

**PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO
EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
VIA ALGORITMOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO**

LUIZ EDUARDO DE OLIVEIRA

Brasília, 08 de dezembro de 2017.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO
EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
VIA ALGORITMOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO**

Luiz Eduardo de Oliveira

**ORIENTADOR: Francisco Damasceno Freitas
COORIENTADOR: Ivo Chaves da Silva Junior**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 681/2017
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ALGORITMOS
HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO**

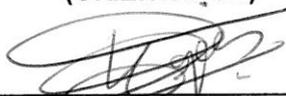
LUIZ EDUARDO DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



**FRANCISCO DAMASCENO FREITAS, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)**



**FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)**



**LEONARDO WILLER DE OLIVEIRA, Dr., UFJF
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Brasília, 08 de dezembro de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA, LUIZ EDUARDO

Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Algoritmos Híbridos de Otimização [Distrito Federal] 2017.

152p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2017). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Expansão Dinâmica da Transmissão 2. Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência
3. *Harmony Search* 4. *Branch & Bound*

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE OLIVEIRA, L. E. (2017). Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Algoritmos Híbridos de Otimização. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 681/2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiz Eduardo de Oliveira.

TÍTULO: Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica via Algoritmos Híbridos de Otimização.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Luiz Eduardo de Oliveira

Rua Nazira Mattar de Freitas, 140, Bairro Monte Castelo.

36.081-230 Juiz de Fora – MG – Brasil.

Dedico este trabalho aos meus pais, João Batista e Maria Tereza, aos meus irmãos, Luiz César e Ana Elisa, e à minha noiva Bianca Campos Oliveira.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida, e me possibilitar ter saúde, capacidade e força de vontade para superar as dificuldades desta longa e apaixonante caminhada.

Em especial agradeço aos meus pais que me ensinaram a ter dignidade e a trabalhar por algo a ser conquistado. Aos meus irmãos por me apoiarem em todos os anos de minha formação e também pelo amor e carinho.

Aos meus entes queridos que infelizmente não posso mais abraçar fisicamente, porém em algum lugar estão e orando e intercedendo por mim. Pessoas essas que foram maravilhosas e colaboraram com seus inúmeros ensinamentos, fazendo, assim, grande diferença em minha vida.

À minha noiva Bianca, que muito sentiu minha ausência em função dos estudos e trabalho, e soube entender, mesmo com o coração apertado: saiba que esta vitória também é sua.

Aos meus tios e tias, padrinhos e madrinhas, que com certeza estão muito felizes com a nossa conquista, pois com certeza estes têm sua parte nesta façanha.

Ao meu orientador e coorientador, pelo apoio e confiança depositada, respectivamente, os amigos Prof. Dr. Francisco Damasceno Freitas e Prof. Dr. Ivo Chaves da Silva Junior.

Ao professor Francisco José Gomes, por depositar confiança em minha capacidade e me dar à oportunidade de aprender a linguagem computacional MatLab.

Aos professores Álvaro Augusto Machado de Medeiros e Leonardo Willer de Oliveira, por me estenderem a mão quando ninguém o queria e pela amizade e credibilidade de sempre.

Sou milionário do sonho!!!

Emicida

RESUMO

PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ALGORITMOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO

O Planejamento de Expansão em Sistemas de Transmissão (PEST) tem o propósito de identificar novos equipamentos transmissores a serem inseridos na rede, a fim de suprir à demanda futura prevista dentro do horizonte de planejamento. Este trabalho contribui nessa direção ao apresentar um novo método baseado em diversas técnicas de otimização para resolver o Planejamento de Expansão Estático (PEEST) e Dinâmico (PDEST). A visão estática de "quais" reforços e "onde" estes devem ser instalados é uma abordagem simplista, pois analisa somente dois estágios de planejamento: presente e futuro. Já a visão dinâmica, ao particionar o horizonte de planejamento em multiestágios, fornece ao planejador informações importantes também sobre "quando" esses reforços devem ser alocados na rede, resultando em uma resposta mais robusta e efetiva. O processo resultante dessa formulação é uma programação não linear inteira mista, onde as dificuldades se intensificam no PDEST com o acoplamento temporal. Sendo assim, foi criada uma metodologia que divide o problema de minimização inicial em mestre (não linear) e escravo (linear). O Método dos Pontos Interiores (MPI) é aplicado na resolução do problema escravo, que por sua vez, requer a otimização da modelagem de fluxos de cargas linearizados, sem perdas, utilizados na representação das redes de transmissão. A solução do problema escravo fornece informações ao método proposto, um algoritmo heurístico híbrido que acopla o *Harmony Search* e o *Branch & Bound* em série (*HS-B&B*), para conferência da factibilidade dos PESTs sugeridos durante o processo de resolução do problema mestre. Posto isto, foi desenvolvida e aprimorada uma metodologia que visa alcançar a solução ótima do problema mestre-escravo em três etapas com diferentes objetivos: redução eficiente do conjunto inicial das rotas candidatas à expansão por meio de um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC); resolução do PEEST através da metaheurística *Harmony Search* (*HS*) e criação da Região de Soluções Estáticas (RSE); expansão dinâmica através da adaptação do algoritmo *Branch & Bound* no refinamento de todos os PEEST contidos na RSE. Testes com os sistemas Garver, *Two Valleys* e Sul do Brasil foram feitos e comparados à literatura para comprovar a eficácia do método.

Palavras-chave: Expansão Dinâmica da Transmissão, Planejamento de Sistemas Elétricos de Potência, Algoritmo Heurístico Construtivo, *Harmony Search*, *Branch & Bound*, Método dos Pontos Interiores.

ABSTRACT

DYNAMIC AND STATIC TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING IN POWER SYSTEMS VIA HYBRID OPTMIZATION ALGORITHMMS

Transmission Network Expansion Planning (TNEP) has the purpose of identifying new transmission equipments to be inserted on the grid in order to supply a forecasted demand. This work contributes in this direction presenting a new method based on several optimization techniques to solve Static (STNEP) and Dynamic (DTNEP) Expansion Planning. The static view of "which" reinforcements and "where" they should be installed is a simplistic approach, since it analyzes only two stages in the planning horizon: the present and the future. On the other hand, the dynamic view, by dividing the planning horizon into multistage, also gives the planner important information about "when" these reinforcements should be allocated on the network, resulting in a more robust and effective response. This formulation results in a non-linear programming problem with integer and continuous variables, whose difficulties are intensified by the temporal coupling. Therefore, a methodology that divides the initial minimization problem into master (non-linear) and slave (linear) problem was proposed. The Interior-Point Method (IPM) is applied in solving the slave problem, which in turn requires the optimization of the lossless linearized load flow modeling used to represents the transmission network. The solution of the slave problem provides information to the proposed method, a hybrid heuristic algorithm that couples Harmony Search and Branch & Bound in series (HS-B&B), to check the feasibility of the suggested PESTs during the solving process of the master problem. Therefore, a hybrid methodology was developed and improved to solve the master problem in three different stages: efficient reduction of the initial set of candidate routes for expansion by a Constructive Heuristic Algorithm (AHC); resolution of PEEST via metaheuristic algorithm Harmony Search and creation of the Static Solutions Region (SSR); dynamic expansion through an adaptation of Branch & Bound algorithm of all PEEST from SSR. Tests with Garver, Two Valleys and Brazilian South System were performed and compared to the literature to prove the method effectiveness.

Keywords: Dynamic Transmission Expansion Planning, Power Systems Planning, Constructive Heuristic Algorithms, Harmony Search, Branch & Bound, Interior-Point Method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA EM DIFERENTES LUGARES E ÉPOCAS.	2
FIGURA 1.2 – RELAÇÃO DE CUSTOS FIXO E RELATIVO ÀS PERDAS ELÉTRICAS EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.	6
FIGURA 3.1 – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.	29
FIGURA 3.2 – HISTÓRICO DAS TENSÕES MÁXIMAS UTILIZADAS NA TRANSMISSÃO EM CA. ..	31
FIGURA 3.3 – INTERLIGAÇÕES ENTRE O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO COM OUTROS PAÍSES.	32
FIGURA 3.4 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIGENTE EM ÍTAIPU.	34
FIGURA 3.5 – SUBDIVISÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DOS ESTADOS UNIDOS E CANADÁ.	37
FIGURA 3.6 – REGIÃO NORTE-AMERICANA AFETADA PELO <i>BLACKOUT</i> OCORRIDO EM AGOSTO DE 2003.	38
FIGURA 4.1 – ILUSTRAÇÃO DA DIFERENÇA ENTRE A ABORDAGEM PARA UM ÚNICO ESTÁGIO E MULTIESTÁGIOS.	42
FIGURA 4.2 – ILUSTRAÇÃO DA ABORDAGEM DESACOPLADA PARA MULTIESTÁGIOS.	42
FIGURA 5.1 – VISÃO DE UM APRENDIZ INICIANTE DO BRAÇO DE UM VIOLÃO.	49
FIGURA 5.2 – VISÃO DE UM MÚSICO EXPERIENTE DO BRAÇO DE UM VIOLÃO.	49
FIGURA 6.1 – DEFINIÇÃO DO ESPAÇO AMOSTRAL E LIMITE SUPERIOR INICIAL DO <i>BRANCH & BOUND</i> PARA O EXEMPLO TUTORIAL.	62
FIGURA 7.1 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO.	67
FIGURA 7.2 – ILUSTRAÇÃO DA INICIALIZAÇÃO ALEATÓRIA EM UM PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO.	72
FIGURA 7.3 – ILUSTRAÇÃO DA INICIALIZAÇÃO DE UM PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO AHI.	72
FIGURA 7.4 – ILUSTRAÇÃO DA REGIÃO DE SOLUÇÕES ESTÁTICAS (RSE).	76
FIGURA 7.5 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DO SISTEMA TUTORIAL.	79
FIGURA 7.6 – CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES DEFINIDAS PELO AHC PARA O ÍNDICE DE SENSIBILIDADE BASEADO NO FLUXO MÉDIO PERCENTUAL PASSANTE EM CADA ROTA CANDIDATA.	83

FIGURA 7.7 – CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES DEFINIDAS PELO AHC PARA O ÍNDICE DE SENSIBILIDADE BASEADO NOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE EM CADA ROTA CANDIDATA.	83
FIGURA 7.8 – EVOLUÇÃO DO <i>HARMONY SEARCH</i> SEM A UTILIZAÇÃO DO ALGORITMO DE INICIALIZAÇÃO.	85
FIGURA 7.9 – EVOLUÇÃO DO <i>HARMONY SEARCH</i> COM O ALGORITMO DE INICIALIZAÇÃO.....	85
FIGURA 7.10 – CONJUNTO DE SOLUÇÕES ÓTIMAS PROPOSTAS NO PRIMEIRO ESTÁGIO DO PLANEJAMENTO DINÂMICO.	88
FIGURA 7.11 – PLANEJAMENTO ESTÁTICO DE EXPANSÃO PROPOSTO PELO <i>HS-B&B</i> AO SISTEMA TUTORIAL.	89
FIGURA 8.1 – TOPOLOGIA INICIAL DO SISTEMA IEEE GARVER.	92
FIGURA 8.2 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 1ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	94
FIGURA 8.3 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 2ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	95
FIGURA 8.4 – CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES DEFINIDAS PELO AHC PARA O SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.....	97
FIGURA 8.5 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 3ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	97
FIGURA 8.6 – CONFIGURAÇÃO DO PEEST PROPOSTO PELO <i>HS-B&B</i> PARA O SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.	99
FIGURA 8.7 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 4ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	101
FIGURA 8.8 – CONFIGURAÇÃO DO PEEST PROPOSTO PELO <i>HS-B&B</i> PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO E $X_{max} = 2$	101
FIGURA 8.9 – CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES DEFINIDAS PELO AHC PARA O SISTEMA GARVER.....	105
FIGURA 8.10 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 5ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	106
FIGURA 8.11 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 6ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	107
FIGURA 8.12 – CONFIGURAÇÃO DO PEEST PROPOSTO PELO <i>HS-B&B</i> PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO E $X_{max} = 3$	107

FIGURA 8.13 – CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> NA 7ª SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.....	108
FIGURA 8.14 – TOPOLOGIA INICIAL DO SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i>	111
FIGURA 8.15 – SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i> : CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES BASEADAS NO FATOR DE SENSIBILIDADE Ψ_{ij}	112
FIGURA 8.16 – SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i> : CONJUNTO DE ROTAS RELEVANTES BASEADAS NO FATOR DE SENSIBILIDADE λ_{ij}	112
FIGURA 8.17 – SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i> : CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> SEM O AHC.....	113
FIGURA 8.18 – SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i> : CAMINHO DE CONVERGÊNCIA DO <i>HS-B&B</i> COM O AHC.....	113

LISTA DE QUADROS

QUADRO 5.1 – ANALOGIA COMPARATIVA ENTRE PERFORMANCE MUSICAL E O PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.	50
QUADRO 5.2 – ALGORITMO DO PROCESSO DE IMPROVISÇÃO MUSICAL.	52
QUADRO 7.1 – PROCESSO DE CODIFICAÇÃO E CONFERÊNCIA EXECUTADO PELO ALGORITMO HEURÍSTICO ANTIRRETRABALHO.	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – MATRIZ DE CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.	27
TABELA 3.2 – LINHAS DE TRANSMISSÃO INSTALADAS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.	28
TABELA 4.1 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DO PARÂMETRO DE EXPANSÃO.	46
TABELA 5.1 – ITERAÇÃO 0 - PREENCHIMENTO DA MEMÓRIA HARMÔNICA (MH).	54
TABELA 5.2 – ITERAÇÃO 1 - NOVA SOLUÇÃO ALEATÓRIA PROPOSTA PELO <i>HS</i>	55
TABELA 5.3 – ITERAÇÃO 1 - MEMÓRIA HARMÔNICA (MH).	55
TABELA 5.4 – ITERAÇÃO 2 - MEMÓRIA HARMÔNICA (MH).	57
TABELA 5.5 – ITERAÇÃO 4 - MEMÓRIA HARMÔNICA (MH).	58
TABELA 5.6 – COMPORTAMENTO DO <i>HS</i> ENTRE A QUINTA E A ÚLTIMA ITERAÇÃO.	58
TABELA 5.7 – ITERAÇÃO 10 - MEMÓRIA HARMÔNICA (MH).	58
TABELA 6.1 – VALORES OBTIDOS NA ITERAÇÃO 2 DO <i>BRANCH & BOUND</i>	63
TABELA 7.1 – EXEMPLO DE CODIFICAÇÃO DO ALGORITMO HEURÍSTICO ANTIRRETRABALHO.	74
TABELA 7.2 – EXEMPLO DA CODIFICAÇÃO ADOTADA PELO ALGORITMO HEURÍSTICO ANTIRRETRABALHO EM UM PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO QUE VISE REFORÇOS UNITÁRIOS NAS ROTAS 1, 2, 3, 10 E 79.	74
TABELA 7.3 – DADOS DE GERAÇÃO E CARGAS DO SISTEMA TUTORIAL.	79
TABELA 7.4 – DADOS DOS CIRCUITOS EXISTENTES DO SISTEMA TUTORIAL.	80
TABELA 7.5 – DADOS DOS CIRCUITOS CANDIDATOS DO SISTEMA TUTORIAL.	80
TABELA 7.6 – VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM PLANO DE EXPANSÃO NA TOPOLOGIA BASE DO SISTEMA TUTORIAL.	81
TABELA 7.7 – PEEST E RSE DO EXEMPLO TUTORIAL.	84
TABELA 7.8 – CONFIGURAÇÃO INICIAL PROPOSTA AO <i>B&B</i> NO PROBLEMA TUTORIAL.	86
TABELA 7.9 – RESULTADO DA PRIMEIRA ITERAÇÃO DO <i>BRANCH & BOUND</i> NO PROBLEMA TUTORIAL.	87
TABELA 7.10 – RESULTADO DA SEGUNDA ITERAÇÃO DO <i>BRANCH & BOUND</i> NO PROBLEMA TUTORIAL.	88
TABELA 8.1 – DIFERENTES CONFIGURAÇÕES E PREMISSAS PARA AS SIMULAÇÕES COM O SISTEMA GARVER.	93

TABELA 8.2 – PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA A PRIMEIRA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA GARVER.....	94
TABELA 8.3 – PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA A SEGUNDA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA GARVER.....	96
TABELA 8.4 – PLANO FINAL DE EXPANSÃO PARA A TERCEIRA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA GARVER.....	98
TABELA 8.5 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA GARVER SEM REDESPACHO.	99
TABELA 8.6 – PLANO DE EXPANSÃO ESTÁTICA PARA A QUARTA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA GARVER.....	100
TABELA 8.7 – REGIÃO DE SOLUÇÕES ESTÁTICAS OBTIDAS NA QUARTA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA GARVER.	102
TABELA 8.8 – CONFIGURAÇÃO INICIAL PROPOSTA AO <i>B&B</i> NA QUARTA SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER.	102
TABELA 8.9 – RESULTADO DA PRIMEIRA ITERAÇÃO DO <i>B&B</i> NA QUARTA SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER PARA O <i>PEEST1</i>	103
TABELA 8.10 – RESULTADO DA SEGUNDA ITERAÇÃO DO <i>B&B</i> NA QUARTA SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER PARA O <i>PEEST1</i>	103
TABELA 8.11 – RESULTADO DA TERCEIRA ITERAÇÃO DO <i>B&B</i> NA QUARTA SIMULAÇÃO DO SISTEMA GARVER PARA O <i>PEEST1</i>	104
TABELA 8.12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS <i>PEEST</i> OBTIDOS PARA O SISTEMA GARVER COM REDESPACHO.	109
TABELA 8.13 – COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO EM TESTES COM O SISTEMA GARVER.....	110
TABELA 8.14 – REGIÃO DE SOLUÇÕES ESTÁTICAS OBTIDAS NA QUARTA SIMULAÇÃO COM O SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i>	114
TABELA 8.15 – SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i> : CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO COM E SEM A UTILIZAÇÃO <i>AHC</i>	114
TABELA 8.16 – RESULTADO DO MÉTODO PROPOSTO PARA O SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i>	115
TABELA 8.17 – REGIÃO DE SOLUÇÕES ESTÁTICAS OBTIDAS PARA O SISTEMA <i>SUL</i>	117
TABELA 8.18 – RESULTADO DO MÉTODO PROPOSTO PARA O SISTEMA <i>SUL</i>	118
TABELA 8.19 – COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE INVESTIMENTO PARA O SISTEMA <i>SUL</i>	118
TABELA 8.20 – COMPARAÇÃO DO TEMPO DE CONVERGÊNCIA PARA O <i>PEEST</i> ÓTIMO SEM REDESPACHO.	119

TABELA 8.21 – COMPARAÇÃO DO TEMPO DE CONVERGÊNCIA PARA O PEEST ÓTIMO COM REDESPACHO PERMITIDO NA GERAÇÃO.	119
TABELA 8.22 – COMPARAÇÃO DO TEMPO DE CONVERGÊNCIA PARA O PDEST ÓTIMO	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
AG	Algoritmo Genético
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
AHAr	Algoritmo Heurístico Antirretrabalho
AHI	Algoritmo Heurístico de Inicialização
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B&B	<i>Branch & Bound</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
ERO	<i>Electric Reliability Organization</i>
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
HS	<i>Harmony Search</i>
HS-B&B	Algoritmo híbrido que utiliza técnicas de otimização baseadas na metaheurística <i>Harmony Search</i> e no algoritmo clássico <i>Branch & Bound</i>
kUS\$	Milhares de Dólares
LT	Linha de transmissão
MD	Margem Direita
MPI	Método dos Pontos Interiores
NERC	<i>North American Electric Reliability Corporation / Council</i>
NPCC	<i>Northeast Power Coordinating Council</i>
PDEST	Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão
PEEST	Planejamento Estático de Expansão em Sistemas de Transmissão
PEST	Planejamento de Expansão em Sistemas de Transmissão
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RSE	Região de Soluções Estáticas
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SE	Subestação elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
t_{max}	Tempo computacional máximo
t_{med}	Tempo computacional médio
t_{min}	Tempo computacional mínimo
TS	<i>Tabu Search</i>
UAT	Ultra alta tensão
UHE	Usina hidrelétrica

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
SUMÁRIO.....	xviii
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - A ENERGIA E A EVOLUÇÃO DO HOMEM	1
1.2 - ASPECTOS GERAIS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	4
1.3 - RELAÇÃO ENTRE GERAÇÃO E REDE DE TRANSMISSÃO	6
1.4 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	8
1.5 - OBJETIVO	9
1.6 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	10
1.7 - PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA PESQUISA	11
1.8 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
1.9 - CONCLUSÃO PARCIAL	13
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 - INTRODUÇÃO	15
2.2 - OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	15
2.3 - MODELOS ESTÁTICOS DE EXPANSÃO	17
2.4 - MODELOS DINÂMICOS DE EXPANSÃO	22
2.5 - CONCLUSÃO PARCIAL	24

3	- ATUAL CONJUNTURA MUNDIAL DAS INTERLIGAÇÕES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.....	26
3.1	- INTRODUÇÃO	26
3.2	- SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....	26
3.3	- INTERLIGAÇÕES EM ULTRA ALTA TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA.....	30
3.4	- SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL E A RELAÇÃO COM OS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL	32
3.4.1	- Interligação entre Brasil e Paraguai	33
3.4.2	- Interligação entre Brasil e Venezuela.....	34
3.4.3	- Interligação entre Brasil e Argentina	35
3.4.4	- Interligação entre Brasil e Uruguai	35
3.5	- INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PELO MUNDO.....	36
3.6	- CONCLUSÃO PARCIAL	39
4	- MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA	41
4.1	- INTRODUÇÃO	41
4.2	- FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA O PDEST.....	41
4.3	- CONCLUSÃO PARCIAL	47
5	- <i>HARMONY SEARCH</i>	48
5.1	- INTRODUÇÃO	48
5.2	- A ANALOGIA MUSICAL.....	48
5.3	- O ALGORITMO DE BUSCA HARMÔNICA.....	51
5.3.1	- Definição dos parâmetros do algoritmo e inicialização do problema.....	51
5.3.2	- Criação da Memória Harmônica	52
5.3.3	- Improvisação de novas harmonias	52
5.3.4	- Atualização da Memória Harmônica.....	53
5.3.5	- Conferência da Satisfação do Critério de Parada.....	53

5.4	- EXEMPLO TUTORIAL DO <i>HARMONY SEARCH</i>	53
5.4.1	- Inicialização do problema	54
5.4.2	- Primeira iteração do <i>Harmony Search</i>	55
5.4.3	- Segunda iteração do <i>Harmony Search</i>	56
5.4.4	- Terceira iteração do <i>Harmony Search</i>	57
5.4.5	- Quarta iteração do <i>Harmony Search</i>	57
5.4.6	- Demais iterações do <i>Harmony Search</i>	58
5.5	- CONCLUSÃO PARCIAL	59
6	- <i>BRANCH & BOUND</i>	60
6.1	- INTRODUÇÃO	60
6.2	- A IDEIA DO ALGORITMO	60
6.3	- EXEMPLO TUTORIAL DO <i>BRANCH & BOUND</i>	61
6.3.1	- Inicialização do problema	61
6.3.2	- Primeira iteração do <i>Branch & Bound</i>	62
6.3.3	- Segunda iteração do <i>Branch & Bound</i>	63
6.3.4	- Terceira iteração do <i>Branch & Bound</i>	63
6.4	- CONCLUSÃO PARCIAL	64
7	- MÉTODO PROPOSTO	65
7.1	- INTRODUÇÃO	65
7.2	- PROBLEMA MESTRE-ESCRAVO	65
7.3	- ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO.....	66
7.4	- PLANEJAMENTO ESTÁTICO DE EXPANSÃO	71
7.4.1	- Algoritmo Heurístico de Inicialização do planejamento estático de expansão 72	
7.4.2	- Algoritmo Heurístico Antirretrabalho no planejamento estático de expansão 73	
7.4.3	- Processo de otimização estática	75
7.5	- PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO	77

7.6	- EXEMPLO TUTORIAL DO MÉTODO PROPOSTO.....	78
7.6.1	- Utilização do Algoritmo Heurístico Construtivo	81
7.6.2	- Obtenção da Região de Soluções Estáticas	83
7.6.3	- Planejamento Dinâmico via <i>Branch and Bound</i>	86
7.7	- CONCLUSÃO PARCIAL	89
8	- RESULTADOS E ANÁLISES	91
8.1	- INTRODUÇÃO	91
8.2	- SISTEMA IEEE GARVER.....	92
8.2.1	- Sistema Garver sem redespacho de potência na geração	93
8.2.2	- Sistema Garver com redespacho de potência na geração.....	100
8.3	- SISTEMA <i>TWO VALLEYS</i>	110
8.4	- SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL	115
8.4.1	- Sistema Sul sem redespacho de potência na geração.....	116
8.4.2	- Sistema Sul com redespacho de potência na geração.	116
8.5	- COMPARAÇÃO TEMPORAL	119
8.6	- CONCLUSÃO PARCIAL	120
9	- CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	APÊNDICE A	125
A.1	- Considerações Iniciais.....	125
A.2	- Sistema de Garver	125
A.3	- Sistema de <i>Two Valleys</i>	127
A.4	- Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil	129
	APÊNDICE B.....	135
B.1	- Considerações Iniciais.....	135
B.2	- Formulação do problema de Fluxo de Potência Ótimo.....	136
B.3	- Resolução do problema pelo método de pontos interiores.....	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - A ENERGIA E A EVOLUÇÃO DO HOMEM

Energia é o pilar central da vida. Calor, luz, alimentação, água, ar, entre outras fontes são essenciais para a manifestação de vida humana. Objetivando uma melhor manutenção da vida, desde os tempos primórdios, a busca por energia impulsiona o homo sapiens a evoluir. Buscando suprir sua demanda básica, o Homem dominou o fogo, desenvolveu a agricultura e pecuária, armazenando, assim, energia excedente nos animais e alimentos [1].

Visando obter maior conforto e aumentar sua perspectiva de vida, o Homem desenvolveu a matemática, geometria e engenharia e passou a entender melhor o plano físico em que está inserido, resultando em dispositivos mecânicos complexos destinados ao aproveitamento da energia contida nos ventos, vapor e carvão mineral [2]. Eclodira, assim, a revolução industrial na Grã-Bretanha no século XVIII. Com o advento da produção em larga escala, o consumo energético mundial passou a ter um crescimento exponencial. Novas tecnologias então foram necessárias para suprir essa demanda energética. Passou-se, assim, a explorar o petróleo. Surgiram os carros, aumentou-se a demanda por energia para transporte e a contínua busca do ser humano por conforto se intensificou. E na busca de otimizar o trabalho, ou seja, o máximo retorno para o mínimo esforço, no século XIX dominou-se o fenômeno da eletricidade.

Será que Tales de Mileto¹ poderia imaginar as benéficas e a modificação cultural provocada pelo domínio da eletricidade pelo homem? As comunicações que antes eram feitas somente por voz – coitado do Fidípides² – passaram a ser executadas também por aparelhos telefônicos. O domínio da conversão de energias primárias em energia elétrica permitiu a criação da lâmpada de luz incandescente, geradores e motores elétricos.

¹ Filósofo grego que viveu entre os séculos VII e VI A.C., e ao esfregar um âmbar a um pedaço de pele de carneiro, observou que pedaços de palhas e fragmentos de madeira começaram a ser atraídas pelo próprio âmbar. Composto de resina fossilizada da seiva de árvores, o âmbar em grego significa *élektron* [122], [123].

² Soldado e mensageiro do exército ateniense que no ano de 490 a.C. correu cerca de 42km, das planícies de Marathónas até Atenas, para levar ao seu povo a notícia de vitória de seu exército frente aos persas na primeira das Guerras Médicas. Assim que bradou “Alegrai-vos, atenienses, nós vencemos!” caiu morto pelo esforço. Lenda tal que deu origem às atuais maratonas, com distância oficial de 42,195km [124].

Possibilitou-se não somente comunicação em tempo real, mas gravação de áudios, vídeos, o advento do cinema, rádios, televisões e computadores.

Com a era da eletrônica digital, as máquinas puderam ter maior confiabilidade e ganharam robustez. Iniciou-se aí a era da computação e posteriormente a era da internet, onde em grande parte dos domicílios brasileiros, atualmente é possível encontrar no mínimo um computador portátil (*notebook* ou *desktop*) e/ou um aparelho celular conectado à rede. A banalização dessas tecnologias e a inserção de técnicas de inteligência artificial resultaram em: meios de transporte mais seguros e acessíveis; evolução radical dos equipamentos medicinais comparados às técnicas empregadas no início do século XX, onde cocaína e heroína eram respectivamente consideradas remédios para dor de dente e cabeça; aprimoramento de tecnologias de cultivo de alimento. Atualmente, a escuridão não é mais uma condição para a noite, mas sim uma opção.

Todo esse conforto tem um preço. De acordo com a Figura 1.1, retirada de [3], nota-se que o consumo energético médio do norte-americano do século XX é exponencialmente maior ao consumo médio do Homem em outros períodos da história. Além disto, estudos e projeções indicam que o consumo energético continua em crescimento na primeira década do século XXI, e a tendência é aumentar [4].

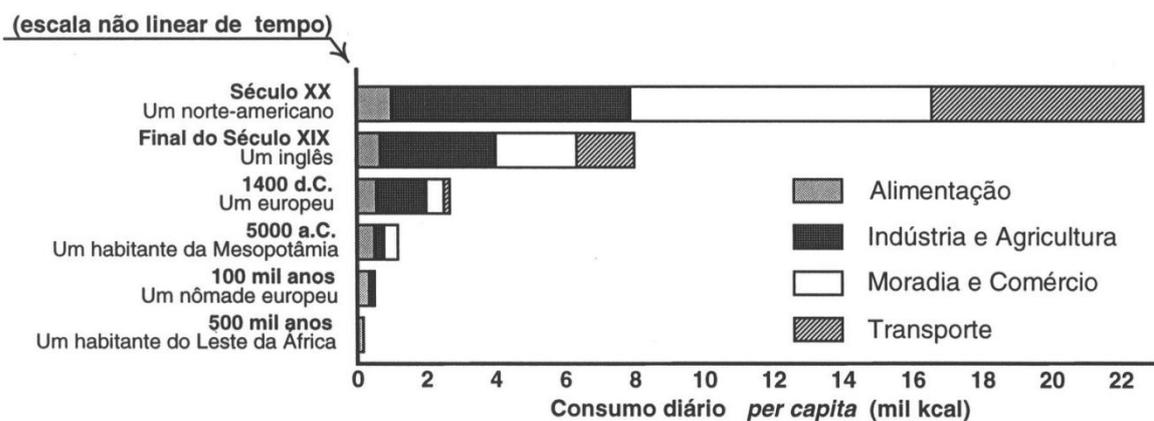


Figura 1.1 – Consumo médio de energia em diferentes lugares e épocas.

Fonte: [3].

A evolução científica do último século resultou em um aumento considerável na qualidade e expectativa de vida, assim como num crescimento populacional jamais visto antes. Há mil anos atrás, a vida humana podia ser resumida em dois adjetivos: selvagem e

curta. Hoje em dia: domesticada e longa. Nesses tempos longínquos, a esperança de vida média era de apenas 24 anos, um terço dos recém-nascidos morria no seu primeiro ano de vida e mais uma grande parte dos sobreviventes sucumbia às doenças, pestes, fomes e epidemias da época. Com algumas exceções, os indicadores de bem estar e saúde das populações, assim como a perspectiva de vida, permaneceram baixos até 1820 [5].

Com a revolução industrial e econômica, o tempo médio de vida do homem teve um generoso aumento. A criação da enfermagem na Criméia; a invenção da penicilina na primeira metade do século XX por Alexander Fleming³; os *baby-boomers* pós-segunda guerra mundial; a codificação do DNA, entre outros fatores, fizeram com que a expectativa de vida mais do que triplicasse no último milênio, chegando a mais de 84 anos em países como Japão, Andorra e Singapura. Em 34 países, a esperança é de que se viva em média 80 anos ou mais [6].

O principal motivo do aumento da população registrada no último milênio foi a redução da mortalidade e não tanto o aumento de fertilidade [7]. Atualmente, a população mundial é de 7,6 bilhões de pessoas [8]. Embora não tão abrupto como no último século, estudos apontam para um crescimento populacional contínuo. Segundo [9], em 2030 é prevista uma população de 8,6 bilhões na face da terra. Em uma perspectiva em longo prazo, em 2050, o Relatório das Nações Unidas estima que a população mundial alcance os 9,6 bilhões [10].

Levando em consideração o alto consumo energético médio do homem moderno e o aumento populacional que a Terra vem sofrendo, as ofertas de energia vêm se tornando cada vez mais escassas. Eis que surge uma palavra que está em voga nos tempos atuais: sustentabilidade.

Em um tempo onde é de suma importância a manutenção das fontes de energia para que exista um crescimento sustentável, fica evidente que a fim de suprir a demanda energética, não se deve aumentar indiscriminadamente o consumo, mas sim otimizar os recursos e iniciar o que é chamado de desenvolvimento sustentável. A meta deste século é reduzir o desperdício e otimizar a geração e operação energética.

³ Alexander Fleming notabilizou-se como o descobridor da proteína antimicrobiana lisozima e da penicilina. Esta última, obtida a partir do fungo *Penicillium notatum*, pela qual foi laureado Nobel de Fisiologia ou Medicina em 1945 [125].

O petróleo surgiu inicialmente em mercados de nicho, crescendo rapidamente desde então. As energias eólica e solar estão fazendo o mesmo, crescendo globalmente a taxas anuais de dois dígitos, principalmente na Europa e Japão, onde o apoio governamental está criando um mercado vibrante e gerando empregos de alta tecnologia e exportação [11]. A substituição de fontes não renováveis de energia (petróleo e carvão) por fontes renováveis (biocombustível, hidrogênio, energia solar e eólica) é a tônica do novo século. Atualmente, em Portugal, um quarto da sua energia consumida é proveniente de energia eólica [12].

Da mesma maneira, estudos de planejamentos ótimos da operação e expansão de sistemas ganham cada vez mais importância devido às economias proporcionadas pelas suas pesquisas. Neste trabalho, procura-se fazer a otimização do PEST. O objetivo é expandir o sistema elétrico de potência observando a demanda futura e evitando cortes de carga, com o menor custo de investimento possível, otimizando, assim, a inserção de novas rotas de transmissão de energia elétrica.

1.2 - ASPECTOS GERAIS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) caracteriza-se como o conjunto de todas as instalações e equipamentos elétricos ligados à rede, destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A geração é o conjunto entre os geradores elétricos e a subestação elevadora. A transmissão, em um sentido amplo, compreende uma rede de transmissão principal e de subestações, em geral, abaixadoras. A distribuição é composta pela subtransmissão (quando necessária) e pelas redes primária e secundária de distribuição, representando, dessa forma, a capilaridade do sistema [13].

A geração tem como personagem predominante o gerador de energia elétrica, que por sua vez, tem por principal objetivo injetar potência no SEP de maneira continuada, disponibilizando energia elétrica de qualidade ao consumidor sempre que requisitado. Ao contrário do que o nome sugere, o gerador elétrico não gera energia, isto é, não cria energia, mas sim converte energias de diferentes fontes, sejam elas eólica, térmica, cinética, em energia elétrica. Embora na eletrônica de potência, conversor seja um dispositivo de conversão entre tensões CA e CC, um nome mais adequado para o gerador talvez fosse: Conversor Gerador de Energia Elétrica.

O objetivo da rede de distribuição é suprir o Sistema Elétrico de Consumo (SEC). Embora se tenha clientes ligados diretamente à alta tensão, a grande maioria dos clientes do setor elétrico está conectada ao SEP através da distribuição secundária.

Com o advento das *smart grids* (redes inteligentes), a rede de distribuição, que ainda é predominantemente radial, vem sofrendo alterações graduais na direção de se obter uma rede interconectada e inteligente, conquistando, assim, maior confiabilidade e sustentabilidade no aproveitamento da energia elétrica [14], [15]. Em Portugal, o primeiro projeto de rede elétrica inteligente começou em abril de 2010 em Évora, com a instalação de 31000 contadores inteligentes [16]. No Brasil as redes elétricas inteligentes estão na fase inicial de sua implementação, onde algumas companhias elétricas começam a fazer a mudança nas suas redes, com foco em fazê-la em pequenos municípios a princípio. Porém um grande passo está sendo dado pela Eletropaulo, que modernizou grande parte da sua rede que atende 60.000 consumidores na cidade de Barueri [17].

Responsável por fazer a ligação elétrica entre a geração e a distribuição, a rede de transmissão, foco deste estudo, tem por objetivo permitir o transporte das grandes cargas de energia dos centros produtores aos grandes centros consumidores, a um mínimo custo possível. A Figura 1.2 ilustra o esboço de curvas de custo para instalação de uma linha de transmissão no sistema.

Os custos referentes aos postes, isoladores, condutores, equipamentos terminais e concessões por deslocamento de energia, embora dependentes do nível de tensão, carga transportada e distância abrangida pela LT, são fixos. Já os custos relativos às perdas de energia são variáveis e podem ser alvo de um estudo de otimização para a melhor instalação da linha de transmissão a um nível de tensão compatível com o mercado. Observa-se que o aumento indiscriminado do nível de tensão não resulta em um ganho tão eficaz no custo relativo às perdas de energia. Por outro lado, os custos com isoladores aumentam significativamente. Isto demonstra a necessidade de se ter estudos de custo ótimo que contemple a relação inversa de proporcionalidade entre os custos fixos e os relativos às perdas elétricas.

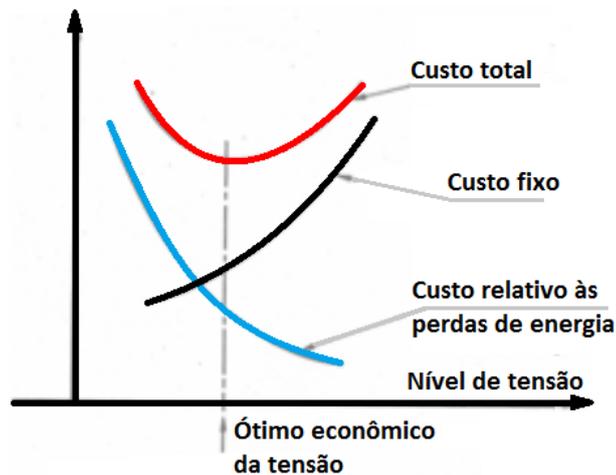


Figura 1.2 – Relação de custos fixo e relativo às perdas elétricas em uma linha de transmissão.

Fonte: adaptado de [18].

1.3 - RELAÇÃO ENTRE GERAÇÃO E REDE DE TRANSMISSÃO

O atendimento dos aspectos de simultaneidade de produção e consumo exigem instalações dimensionadas para a ponta de carga. Por outro lado, as longas distâncias entre os locais de geração renovável e os centros consumidores fazem necessária a existência de sistemas de transmissão e distribuição em muitas das vezes longos e complexos. Sistemas dessa natureza devem ser apoiados por uma estrutura de instalações e equipamentos que, além de representar importantes investimentos, requerem ações permanentes de planejamento, operação e manutenção, e estão como qualquer produto tecnológico sujeitos às falhas [13].

Devido ao alto potencial de suas bacias hidrográficas, quando considerado somente o produto energia elétrica, os autores de [19] citam o Brasil como uma superpotência em consumo sustentável. Essa sustentabilidade é garantida graças às hidrelétricas que respondem pela maioria de geração elétrica no país [20], [21]. No entanto, dada a vasta extensão terrestre e o grande potencial hídrico brasileiro, os grandes centros produtores de energia elétrica, tais como as Usinas Hidrelétricas de Itaipu (Rio Paraná, entre Brasil e Paraguai), Belo Monte (no Rio Xingu) e Tucuruí (Rio Tocantins) encontram-se longe dos principais centros consumidores, como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Tal constatação exige o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias,

umentando, desta maneira, a complexidade do SIN. Isto resulta na necessidade de uma apurada análise nas diferentes estratégias de expansão do sistema elétrico, a fim de disponibilizar energia elétrica a todos os consumidores com o menor custo possível.

A interligação do sistema de transmissão garante vantagens importantes para o Brasil, como por exemplo, um melhor aproveitamento das sazonalidades de chuvas e situações climáticas. Outra grande vantagem de se ter um sistema interligado é verificada com o aumento da confiabilidade e continuidade de suprimento de energia no SEP. Ou seja, com a interligação dos subsistemas, observa-se uma redução significativa na Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor (FEC) e Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC).

Sabe-se que o crescimento econômico de um país está diretamente relacionado com a expansão do mercado consumidor de energia elétrica. Porém, em determinadas situações, problemas econômicos de diversas causas podem levar a restrições de investimentos no setor. Essa dicotomia entre a necessidade de crescimento e a falta de recursos gera a necessidade de se elaborar estudos mais avançados. Principalmente, levando-se em conta aspectos de otimização, garantindo soluções rápidas e eficientes que contribuam com a diminuição desse contraste, como enfatiza [22].

Tendo em vista os aspectos geográficos do vasto território nacional, as grandes distâncias entre centros de carga e consumo, os altos custos das ampliações e reforços no sistema somados à escassez de recursos para investimentos (inerente ao histórico brasileiro), chega-se a seguinte conclusão: estratégias de expansão devem ser constantemente perseguidas visando tomadas de decisões apropriadas durante o processo de planejamento e, sobretudo, que visem alcançar a otimalidade dos recursos.

Assim, insere-se o Planejamento de Expansão do Sistema de Transmissão. O seu objetivo é propor entre um conjunto predefinido de circuitos candidatos à expansão, aqueles que devem ser construídos visando minimizar os custos de investimento no sistema elétrico em longo prazo, suprindo a demanda prevista para um horizonte de planejamento definido [23].

1.4 - MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento de modelos matemáticos de otimização e técnicas que visem solucionar problemas de PEST é de grande importância para possibilitar o desenvolvimento do país. Conseqüentemente, objetiva atender aos consumidores com maior qualidade no fornecimento de energia elétrica, propiciando com isto altos índices de confiabilidade e custos competitivos.

Este problema de otimização apresenta algumas particularidades específicas [24]:

- região de solução não convexa: existência de vários pontos de ótimo locais, o que aumenta a complexidade do problema e leva grande parte dos algoritmos a convergirem em direção a uma solução subótima;
- natureza combinatória do processo de planejamento: fenômeno que conduz a explosão combinatória referente às alternativas de investimento a um tempo computacional elevado ou até proibitivo na obtenção da solução ótima global;
- existência de sistemas elétricos não conexos (ilhados), resultando em um sistema de matrizes linearmente dependentes, ou seja, singulares;
- problema de programação não linear inteira mista: o PEST caracteriza-se pela inserção de novas rotas e/ou reforços na rede de transmissão (variáveis inteiras) visando um acoplamento elétrico eficaz através do fluxo de potência ótimo (variáveis contínuas), evitando, desta maneira, cortes de carga. Problemas com variáveis mistas são de difícil resolução.

O planejamento multiestágio, também conhecido como Planejamento Dinâmico de Expansão do Sistema de Transmissão, possui ainda outras particularidades, como a definição do melhor momento de inserção dos reforços às linhas de transmissão do sistema, evidentemente, respeitando os acoplamentos elétrico e temporal característicos do estudo [21]. De uma forma geral, o PEST pode ser classificado em estático ou dinâmico, de acordo com o horizonte de planejamento.

A visão estática de “quais” reforços e “onde” estes devem ser instalados é uma abordagem simplista, pois são considerados apenas dois estágios de planejamento: presente e futuro. Em outras palavras, a abordagem estática retorna o PEEST baseado na demanda

inicial e final do sistema. Já a visão dinâmica leva em consideração o crescimento da demanda em cada estágio do planejamento, sendo possível avaliar e respeitar o acoplamento temporal de vários estágios futuros em série. Essa abordagem multiestágios dá ao planejador uma importante informação referente a “quando” estes reforços deverão ser alocados na rede, resultando em uma resposta mais robusta e eficaz para os recursos financeiros disponíveis [22].

Além das dificuldades presentes no modelo estático, a consideração temporal faz o problema crescer de forma exponencial, levando os modelos dinâmicos a exigir grande esforço computacional [25]. Estas particularidades, todavia, ilustram as principais dificuldades na elaboração de algoritmos rápidos, eficientes e robustos para a resolução do problema referente à expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

1.5 - OBJETIVO

Diante do exposto, esta dissertação apresenta uma solução heurística e híbrida para resolução do planejamento de sistemas de transmissão de energia elétrica, baseado em um Algoritmo Heurístico Construtivo (para a redução do espaço amostral inicial), na metaheurística *Harmony Search* (para obtenção de planos estáticos) e na técnica de otimização combinatória *Branch & Bound* (visando à determinação do planejamento dinâmico). Esta metodologia é dividida em três objetivos específicos, da seguinte forma:

- (i) inicialmente, utiliza-se um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC), responsável por determinar as rotas de transmissão relevantes e reduzir o espaço amostral típico do problema. Esse conjunto reduzido, adequadamente constituído, visa facilitar a obtenção de soluções ótimas de boa qualidade por outros métodos que venham a ser utilizados;
- (ii) na segunda etapa, ocorre a resolução estática do planejamento de expansão via método *Harmony Search*, tendo-se como resultado não somente um único PEEST, mas uma região de ótimos estáticos necessária para o próximo estágio do problema geral;

- (iii) considerando o acoplamento temporal, na terceira e última fase do processo, o algoritmo híbrido *HS-B&B* faz o PDEST de todas as soluções estáticas provenientes da segunda etapa do algoritmo, a fim de encontrar a melhor solução dinâmica.

Para aferir a metodologia proposta, são avaliados testes em sistemas amplamente utilizados na literatura, como o Garver e Sul do Brasil, utilizados em [24], [26], [27], assim como no sistema teste *Two Valleys*, criado pelo autor desta dissertação e apresentado em [21], [25]. Para o planejamento dinâmico, a abordagem holística do problema é avaliada e comparada tanto com a abordagem estática, quanto com os resultados obtidos em [27].

1.6 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A metodologia híbrida particionada apresenta à comunidade acadêmica uma visão diferenciada de resolução do PDEST. Com a redução heurística do espaço amostral nas etapas (i) e (ii), o *B&B* consegue trabalhar com um conjunto resumido de possíveis soluções, fazendo com que o algoritmo convirja com maior velocidade.

Os algoritmos heurísticos utilizados na construção do *HS-B&B* conferiram ao método maior velocidade e assertividade nas simulações. Vale ressaltar que o AHI em muitas das simulações já iniciou o *HS-B&B* do ponto ótimo previamente conhecido pela comunidade acadêmica. Embora o algoritmo antirretrabalho exija um maior tempo computacional por iteração, os tempos obtidos nas simulações demonstram que ao longo do processo de busca, a análise repetitiva de soluções previamente conhecidas se torna superior ao tempo total requisitado pelo AHAr.

Tanto para o PEEST, quanto para o PDEST, o *HS-B&B* teve uma alta taxa de convergência para a possível solução ótima em todos os casos testados e ultrapassou as expectativas no que tange à economia de tempo computacional, desta maneira, provando a eficácia e robustez do método proposto.

Com relação ao PDEST, a resposta encontrada para o Sistema Garver constitui um resultado economicamente melhor ao PDEST previamente conhecido na literatura, obtido em [27] por meio do algoritmo Lagrangeano. Já nos testes com o Sistema Sul, o *HS-B&B*

obteve PDESTs diferentes aos encontrados por Poubel [27]. Fato tal justificado pela diferença nos limites de corte de carga adotados. Neste estudo, assim como em [21]–[26], o corte de carga máximo permitido foi 1 MW por estágio de planejamento.

1.7 - PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA PESQUISA

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, resultados parciais foram apresentados em algumas publicações, conforme são elencados a seguir:

- **de Oliveira, Luiz E.;** Freitas, Francisco. D.; da Silva Jr., Ivo C.; Rosa, Filipe P. O., “A Three Stage Hybrid Technique for Dynamic Transmission Network Expansion Planning”, *XII Congresso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, Mar Del Plata, Argentina, Novembro de 2017.
- **de Oliveira, Luiz E.;** Freitas, Francisco D. ; da Silva Jr., Ivo C. ; Gomes, Phillippe V., “Dynamic and Static Transmission Network Expansion Planning via Harmony Search and Branch & Bound on a Hybrid Algorithm”. *Lecture Notes in Computer Science. 1ed.: Springer International Publishing*, Porto, Portugal, 2017, v. 10423, p. 271-282.
- **L. E. Oliveira,** I. M. Mendonça, I. C. da Silva Jr., F. P. O. Rosa, “Planejamento Dinâmico da Expansão de Transmissão de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Algoritmo de Otimização *Harmony Search*,” *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, p. 1761-1768, 2014.

Embora não tenha uma relação direta com o tema desta dissertação, a pesquisa em si abriu campo para outras áreas e trabalhos serem publicados. Foram eles:

- **de Oliveira, Luiz E.;** Freitas, Francisco. D.; da Silva Jr., Ivo C.; Leonardo W. de Oliveira; Rosa, Filipe P. O.; João B. de Oliveira, “Load Balance on Electrotechnology Projects via *Harmony Search* Algorithm Optimization”, *XII Congresso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, Mar Del Plata, Argentina, Novembro de 2017.
- **de Oliveira, L. E.;** Damasceno, F. D.; Monteiro, B. C. R.; Bogovicz Jr., M.; Silva Jr., I. C.; Rosa, F. P. O., “Análise sobre o algoritmo de otimização metaheurístico

Harmony Search”. Acta Brazilian Science, V. 01, 4º Trim., pp. 06-21, São Luís - MA, Brasil, 2017. ISSN: 2317-7403.

- **de Oliveira, L. E.;** Damasceno, F. D.; Monteiro, B. C. R.; Bogovicz Jr., M.; Santos Jr., A. C.; Silva Jr., I. C.; Rosa, F. P. O., “Minimização de perdas em sistemas elétricos de potência através do método dos pontos interiores com barreira modificada”. Acta Brazilian Science, V. 01, 3º Trim., pp. 18-29, São Luís - MA, Brasil, 2017. ISSN: 2317-7403.

1.8 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo, esta dissertação contém mais oito capítulos e dois apêndices. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre trabalhos com técnicas voltadas à resolução do problema de planejamento de expansão em sistemas de transmissão de energia elétrica.

O capítulo 3 apresenta a atual conjuntura mundial referente às interligações de sistemas de transmissão. Embora priorizado o SIN e suas interligações internas e externas (com países vizinhos), há também citações dos sistemas europeus e norte-americanos e suas políticas de expansão.

No capítulo 4, a formulação matemática proposta ao problema de PDEST é apresentada ao leitor.

As técnicas de otimização utilizadas na composição do algoritmo híbrido são apresentadas nos capítulos 5 e 6, respectivamente. No capítulo 5, é descrita a metaheurística *Harmony Search* inspirada no processo de improvisação de músicos de *jazz*. Já no capítulo 6, o leitor encontra informações sobre o *B&B*. Em ambos os capítulos, um exemplo matemático foi utilizado para demonstrar a atuação das técnicas de otimização.

A metodologia proposta para a resolução do problema referente à expansão dinâmica de sistemas de transmissão é apresentada no capítulo 7. Além disso, este capítulo contém um sistema tutorial com o objetivo de ilustrar a metodologia proposta.

Mediante a aplicação da metodologia proposta, no capítulo 8 são apresentados e discutidos os resultados obtidos em sistemas utilizados na literatura. Para tanto, serão utilizados dois sistemas acadêmicos e um sistema real envolvendo as malhas equivalentes da região Sul do Brasil. As análises visam validar o método proposto e realizar um estudo comparativo entre as soluções obtidas pela metodologia e às encontradas na literatura.

Tendo em vista os desenvolvimentos realizados nesta dissertação, no capítulo 9, são apresentadas as principais conclusões referentes à metodologia proposta e resultados obtidos, bem como sugestões de trabalhos futuros.

O Apêndice A exhibe os dados dos sistemas elétricos simulados nesta dissertação. O Apêndice B apresenta os principais aspectos da metodologia primal-dual de pontos interiores.

1.9 - CONCLUSÃO PARCIAL

Os seres vivos são dependentes de energia para se manter e o Homem não é diferente. Contudo, a capacidade intelectual evoluída trouxe à humanidade a crescente demanda por conforto e facilidades. A fim de suprir suas necessidades, o Homem dominou fogo, agricultura, entre outros, chegando às tecnologias atuais. A energia demandada pelo ser humano de 500 anos atrás é incomparável à demandada pelo Homem atual. Soma-se a isso o fato da população ter crescido vertiginosamente, e chega-se ao cenário atual, onde carvão, petróleo e gases naturais começam a ter previsão de falta.

Para que ocorra a manutenção da vida na terra do jeito que se conhece, é necessária uma modificação cultural na utilização de energias. Para o século XXI, a ordem é ser sustentável. E isso vale também para os sistemas elétricos de potência. A tendência mundial é de forte redução na utilização de fontes não renováveis para geração de energia elétrica. Na distribuição os sistemas tendem a ser malhados e inteligentes, modificando a arquitetura radial das redes.

No que tange às redes de transmissão, para suprir o aumento de carga e tornar possível a inserção das fontes renováveis sujeitas às incertezas naturais, os sistemas elétricos de potência devem ser reforçados e ampliados. No entanto, os custos de

investimento devem ser mitigados a fim de evitar gastos desnecessários com inserção de novas rotas ou reforços que não tragam as melhores relações entre custos e benefícios para o sistema. Em vista disso, o presente trabalho apresenta um modelo híbrido para obtenção do planejamento de expansão em sistemas de transmissão que utiliza em série: um algoritmo heurístico construtivo para refinamento do espaço amostral; o *HS* para otimização estática; o *B&B* para execução do planejamento multiestágio.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se um levantamento sobre trabalhos com técnicas voltadas à solução do problema de planejamento da expansão de sistema de transmissão de energia elétrica. O objetivo é destacar diversos trabalhos que tratam do PEEST e PDEST, alvos principais desta dissertação. Neste sentido, em função da modelagem que se objetiva implementar na dissertação, priorizaram-se as investigações que tratam de métodos de otimização envolvendo metaheurísticas e algoritmos heurísticos construtivos,.

2.2 - OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

A revolução industrial motivou estudos de otimização nos processos de negócio. Em 1760, deu-se início à otimização clássica com Quesnay tentando modelar a economia [28], [29]. Na mesma linha de estudo, em épocas distintas, Walras e Leontief, respectivamente, tentaram interpretar e analisar a economia [30], [31]. Contudo, somente durante a segunda guerra mundial (1940 a 1945) que a investigação de forma sistêmica e racional dos processos envolvidos na realização das atividades produtivas (bélicas ou não) ganhou maior dimensão, dando origem à chamada pesquisa operacional.

Nos anos 60, Carpentier [32] propôs a formulação do problema de Fluxo de Potência Ótimo. Este é um tipo de problema que tem uma modelagem matemática cuja finalidade é otimização de um determinado desempenho do sistema. Neste problema, além de uma Função Objetivo, há restrições de igualdade e desigualdade. As restrições, geralmente, servem para modelar particularidades operacionais e físicas da rede elétrica impostas pelos sistemas e equipamentos. À época, as resoluções dos problemas matemáticos tinham as suas limitações de resolução por conta da tecnologia ao alcance dos pesquisadores. Já nos anos 70, com o avanço dos recursos computacionais, ainda que bastante modesto comparado aos dos dias atuais, bem como da necessidade de ampliação das redes de transmissão, foi que o FPO começou a ser utilizado em programas baseados

em técnicas de otimização com mais recursos voltados para planejamento automático [24], [33]–[35].

Devido ao fato do problema de expansão em sistemas de transmissão ser não linear, não convexo e com variáveis contínuas, sua complexidade é alta e requisita um grande esforço computacional. Nos primeiros estudos de planejamento eram empregadas quase que exclusivamente técnicas de análise, como exemplo, fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade transitória [36]. Esta abordagem, entretanto, não minimizava o custo de investimento em novas pesquisas, apenas garantia uma solução factível ao problema.

Seja diminuindo custos de operação, maximizando os lucros ou produção, ou procurando a forma mais rápida para ir de um ponto ao outro, os métodos de otimização têm como premissa a busca pelo ponto de melhor funcionamento de um sistema. Em sistemas do mundo real, como no PEST, nem sempre as soluções são contínuas e lineares. Somando-se as diversas restrições de ordem física e/ou de operações, comumente estas modelagens resultam em problemas de alta complexidade. Para o caso específico do planejamento de expansão da transmissão, além das dificuldades presentes no modelo estático, a consideração temporal faz o problema crescer de forma exponencial, levando os modelos dinâmicos a exigir grande esforço computacional [25].

No PEST, as variáveis de decisão estão associadas à seleção das unidades geradoras e das melhores rotas de transmissão de energia. Por conseguinte, estratégias devem ser desenvolvidas de modo a possibilitar que as decisões adotadas durante o processo de planejamento sejam ótimas ou estejam economicamente próximas. Na literatura especializada é possível distinguir, basicamente, três grandes grupos de algoritmos empregados na resolução dos problemas aqui abordados: algoritmos de otimização clássica; algoritmos heurísticos construtivos (AHC); metaheurísticas.

Os algoritmos de otimização clássica utilizam técnicas de decomposição matemática e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistemas de pequeno e médio porte. Para sistemas de maior porte estes algoritmos possivelmente podem apresentar problemas de esforço computacional e, em alguns casos, de convergência [33], [37]–[42].

Desde a década de 70 do século passado, diversos algoritmos heurísticos e metaheurísticas bioinspiradas foram desenvolvidos para a resolução de complexos problemas de engenharia. Através de suas várias peculiaridades, tais métodos sempre objetivam encontrar o ótimo global das funções objetivo.

Os algoritmos heurísticos construtivos geralmente encontram soluções de qualidade com pouco esforço computacional. Entretanto, a otimalidade global é raramente obtida, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte. Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável [21], [23]–[25], [40], [43]–[49].

Metaheurísticas: são métodos de solução que coordenam procedimentos de busca locais com estratégias de mais alto nível (busca global), de modo a criar um processo capaz de evitar mínimos e máximos locais e realizar uma busca robusta no espaço de soluções de um problema [50]. Normalmente, utilizam do conhecimento histórico dos resultados para se guiar e realizar suas buscas em vizinhanças, evitando o aprisionamento das mesmas em áreas restritas do espaço de busca, o que atenua a probabilidade de paradas prematuras em ótimos locais. Embora, as metaheurísticas armazenem experiências, e as utilizem para guiar o algoritmo nos futuros processos de busca, explorando, desta maneira, o espaço amostral de maneira eficiente, estas abordagens de solução não garantem o melhor resultado. As metaheurísticas encontram soluções ótimas ou subótimas, mesmo de sistemas de maior porte através de um grande número de simulações computacionais [21], [23]–[25], [43], [45], [49], [51]–[72].

2.3 - MODELOS ESTÁTICOS DE EXPANSÃO

Os modelos estáticos de planejamento visam determinar os reforços que deverão ser instalados de forma a minimizar o custo total de investimento no sistema elétrico e a atendê-lo com qualidade e confiabilidade para um único estágio de planejamento. A modelagem estática considera simplificações como a não consideração do fluxo de potência reativa e o horizonte de planejamento contendo somente dois estágios (o presente

e o futuro). Apesar disso, o problema permanece contendo variáveis inteiras e contínuas e com espaço amostral de característica não convexa [23].

Em 1970, Garver [33] publicou o primeiro trabalho voltado ao planejamento da expansão em sistemas de transmissão de energia elétrica. Garver representou a rede através do modelo de transportes, o que satisfaz somente a primeira lei de Kirchhoff. Portanto trata-se de um modelo relaxado, cujas reatâncias das barras não têm relação entre si. Embora a resposta obtida não seja adequada para o modelo real devido ao relaxamento supracitado, esta forma possibilitou a solução de problemas com barras ilhadas ou desconexas ao sistema.

Seguindo a tendência de Garver [33], em 1985, os autores de [37] proporam um método que combina o uso do fluxo de carga linear e o modelo de transporte. A solução dos dois modelos juntos determina onde existe um déficit na capacidade, onde novos circuitos deverão ser adicionados e quanto de capacidade é necessário.

A utilização de algoritmos heurísticos construtivos deu-se em 1982, [44] publicou um trabalho que se destaca na redução do espaço amostral das rotas candidatas cujo fator de sensibilidade era o esforço mínimo realizado pelas linhas de transmissão em um fluxo de potência ótimo. Em 1985, em [38], Pereira e Pinto propuseram um algoritmo heurístico construtivo baseado no mínimo corte de carga, onde se buscava a minimização dos cortes de carga através da inserção de reforços na transmissão e geradores artificiais para garantir factibilidade matemática do sistema.

No ano de 1989, Berry [39], fez uso da programação linear em um modelo de despacho econômico de potência ativa, sujeito a limites de fluxo em linhas e restrições de contingência. Este modelo foi bastante eficiente para a época, haja visto que incluía as perdas de potência ativa em sua solução. Já Bahiense et al. [40], utilizou uma técnica heurística acoplada ao *B&B* para resolver uma programação linear inteira mista. Esta técnica visava obter os limites superiores, a serem utilizados no modelo inteiro, diminuindo desta forma a árvore de busca.

Com o avanço tecnológico, e a necessidade crescente de análise e planejamento para sistemas cada vez mais robustos, as metaheurísticas passaram a ser utilizadas cada vez mais para solução desses problemas.

Uma metaheurística bastante conhecida inspirada em fenômenos naturais é o método *Simulated Annealing*. Inspirado no recozimento físico e publicado em 1984 por Kirkpatrick em [73], o SA é uma generalização do método Monte Carlo para examinar equações de estado de sistemas com n variáveis [74]. Em 1995, Romero, Gallego e Monticelli, em [51], marcaram o início da utilização de metaheurísticas no PEST. Baseados na técnica de Recozimento Simulado, os autores obtiveram com alta velocidade na solução de sistemas de pequeno porte cujas soluções já eram conhecidas e lançaram novas respostas com custos inferiores às conhecidas em sistemas de grande porte.

O trabalho executado em [51] influenciou Cortes-Carmona et al. [52] na solução do PEEST, que utilizaram o SA em um algoritmo híbrido que refina a solução encontrada em cada nível de temperatura e permite a redução do tempo de processamento.

Em 1993, Glover publicou em [75] a Busca Tabu (BT), ou *Tabu Search (TS)*. Esta foi inicialmente desenvolvida como uma proposta de solução para problemas de programação inteira. A partir de então, o autor formalizou esta técnica e publicou uma série de trabalhos contendo diversas aplicações da mesma. A experiência tem mostrado a eficiência da Busca Tabu na resolução de vários problemas de diferentes naturezas [76] e atualmente pode-se afirmar que se trata de uma técnica definitivamente consolidada.

A Busca Tabu é utilizada em [53] e [54], onde se concluiu que a técnica é robusta e promissora na solução do planejamento de transmissão. Em [55], os autores utilizaram o TS com a inicialização das soluções feitas pela heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)* em um algoritmo inteligente que fazia utilização dos conhecimentos adquiridos em cada iteração para evitar estagnação nos mínimos locais.

Um dos mais antigos e conhecidos entre os métodos de busca é o Algoritmo Genético, proposto pelo pesquisador da Universidade de Michigan John H. Holland e apresentado ao mundo em 1975 [77]. Mais tarde desenvolvido por Goldberg [78], o AG tem como base a teoria evolutiva de Charles Darwin (1808 – 1882) que intitula: “Na evolução das espécies, só os indivíduos mais aptos ao meio ambiente sobrevivem e a estes são dados à oportunidade de se reproduzir e deixar sua característica em seus descendentes”.

De ampla utilização para soluções de problemas em sistema elétrico de potência, o AG é o algoritmo utilizado em [56] para o PEST. Nessa investigação, a Função Objetivo é formulada com o objetivo de reduzir os custos de investimento em linhas de transmissão e perdas na operação. Já em [57], o AG foi acoplado a um algoritmo heurístico construtivo no intuito de dispensar as rotas com a pior relação entre custo e benefício. Ainda em [58] e [45], o AG também é utilizado, sendo obtidos resultados satisfatórios em sua aplicação.

Outro método bastante interessante e que deve ser mencionado é a metaheurística bioinspirada *Ant Colony Optimization*, elaborado em 1992 pelo pesquisador italiano Marco Dorigo, tendo como base a inteligência coletiva de um formigueiro na obtenção de alimento [79]. Ao encontrar alimento, a formiga deixa um rastro de feromônio como forma de comunicação. Quanto menor o caminho entre alimento e formigueiro, maior a probabilidade desse rastro persistir com o tempo. Desse modo, as formigas obtêm o caminho mínimo entre alimento e formigueiro.

Em [59], destacou-se a utilização do algoritmo *ACO* na resolução do problema de planejamento. Já em [60], o *ACO* foi comparado às metaheurísticas AG e *TS* na solução do problema de planejamento da transmissão, onde os resultados obtidos foram superiores aos outros métodos no que tange à convergência e eficiência computacional.

Binato et al [61], propuseram um modelo baseado na técnica *GRASP*, que é dividido em duas etapas. A primeira é responsável pela busca de planos factíveis. A segunda faz a busca dos ótimos locais dos diversos planos previamente conhecidos, objetivando o PEST mais econômico.

Usualmente a rede é modelada pelo fluxo linearizado, assim como em [41], onde os autores apresentam um algoritmo heurístico construtivo com fluxo de potência ótimo baseado na metodologia de pontos interiores (MPI) para determinar as estratégias de expansão do sistema. A novidade foi a utilização da função sigmoide em adição à Função Objetivo para atenuar a descontinuidade relativa à decisão de expansão ou não da rota de transmissão (0 ou 1).

Uma outra abordagem ao problema de expansão da rede é a consideração de incertezas no aumento de carga. Em [42], os autores fazem aplicação de lógica fuzzy

associada ao método *Branch and Bound* para esta abordagem. O modelo proposto em [42] se demonstrou bastante eficiente na aplicação em sistemas reais.

Em [46], Fang propôs um algoritmo heurístico construtivo capaz de lidar com o planejamento da expansão em um ambiente de competição de mercado. A Função Objetivo busca minimizar os riscos do plano adotado em função da variação dos mercados de energia elétrica.

Há trabalhos publicados em diversas metaheurísticas das mais diferentes origens, como é o caso de [80], que utiliza o *Shuffled Frog Leaping (SFL)*, mais conhecida como pulo do sapo, baseada em uma pesquisa cooperativa que começa com uma população virtual de sapos, simulando pulo em um pântano, procurando um lugar com o máximo de alimento disponível.

Em 2012, Mendonça [24] utilizou o *Particle Swarm Optimization*. Em seu trabalho, o PSO foi inicializado por um algoritmo heurístico construtivo cujo objetivo era reduzir o espaço amostral através de uma seleção de melhores rotas candidatas à expansão. Ao solucionar sistemas previamente conhecidos na literatura, no que tange a tempo computacional, a autora obteve melhores respostas quando comparado a outras técnicas de otimização, como o *TS* [53] e a modelagem mista inteira disjuntiva [40].

Gomes e Saraiva [49] descrevem uma ferramenta híbrida para executar planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica: em um primeiro momento, faz-se uso de um AHC baseado no algoritmo de Garver e Mínimo Esforço para reduzir o espaço de busca. Posteriormente, com o espaço de busca reduzido, é feito uso da metaheurística *Evolutionary Particle Swarm Optimization (EPSO)* para determinar o planejamento final da expansão.

Em [26], os autores utilizam a metaheurística *Bat Algorithm* na solução do PEEST, obtendo bons resultados em seus experimentos de validação da técnica. Tanto [24], quanto [26], servirão de base mais à frente no capítulo 8 para comparação da metodologia proposta nesta dissertação.

Em 2001, Geem, Kim e Loganathan [81] publicaram seu estudo referente a criação de uma nova metaheurística, o *Harmony Search (HS)* baseada no processo de improvisação musical. Aproveitando-se da larga adaptabilidade e simplicidade de

implementação oferecida pelo *HS*, Verma et al. [71] executam o planejamento da expansão avaliando índices de segurança em 2010 e comparam os resultados com o algoritmo o genético e *Bacteria-Foraging Differential Algorithm (BF-DEA)*. Assim como em [71], os autores de [72] utilizaram critérios de segurança. O diferencial foi a inserção de incertezas na demanda.

A abordagem estática do PEST é uma visão limitada, onde o planejador considera somente dois estágios, o hoje e o amanhã. No entanto, mesmo com essa defasagem, o PEEST ainda é um problema de difícil solução, sendo recomendado seu uso para planejamentos em longo prazo, onde a estimativa dos custos de investimento é o objetivo.

2.4 - MODELOS DINÂMICOS DE EXPANSÃO

O planejamento da expansão de transmissão é naturalmente um problema de multiestágios, onde o sistema deve ser avaliado sob uma visão holística em um horizonte de planejamento. Isto é, o planejamento para o próximo ano deve levar em consideração a previsão de carga do ano subsequente e por aí em diante, de modo que o acoplamento temporal é necessário e o custo de investimento deve ser minimizado ao longo do horizonte de planejamento como um todo.

O acoplamento temporal adiciona maiores dificuldades a um problema já complexo, como no PEEST, demandando um enorme esforço computacional. Se no PEEST resolve-se um único problema, no PDEST resolvem-se nt^4 problemas de PEEST levando em consideração a relação temporal entre os estágios de planejamento. Portanto, essa análise requer um esforço computacional considerável, requisitando das pesquisas na área maior atenção para métodos metaheurísticos, justificando, assim, incessantes investigações por técnicas que priorizam algoritmos heurísticos.

Em 1989, Youssef [62] desenvolveu uma solução baseada em algoritmos genéticos para o problema do planejamento dinâmico considerando o modelo de corrente alternada para o fluxo de potência sujeito às restrições de operacionalidade e estabilidade (limites

⁴ $nt \in \mathbb{N}$ é a quantidade de estágios contidas no horizonte de planejamento;

inferiores e superiores de tensão em barras e ângulos de referência). Em sua modelagem, o planejamento dinâmico foi representado de maneira holística, ao invés de série de planejamentos estáticos. Já em 2001, Wang [63] apresentou um algoritmo genético híbrido, modificado e melhorado para solução do PDEST, onde a função *fitness* foi ajustada através da técnica de recozimento simulado e a operação de *crossover* do AG é realizada internamente ao gene. Desta forma, a recombinação e o processo de busca do operador *crossover* são utilizados de maneira mais eficiente, resultando em menor tempo computacional para convergência do método.

Para todo e qualquer método de otimização, uma adequada inicialização dos parâmetros é bastante salutar para facilitar o processo de busca no problema. Em [64], Escobar propôs um modelo de inicialização baseado no AG para o planejamento multiestágios da transmissão que obteve soluções satisfatórias para sistemas de pequeno médio e grande porte.

As incertezas provocadas pelo mercado energético foram abordadas por Fu, Wei e Tang em [65], onde um índice de monitoramento de congestionamento em LTs foi proposto. Este índice visa proporcionar um ambiente justo para os participantes do mercado de energia. Rocha [66] prevê em sua tese o PDEST sujeito a incertezas nas cargas (modelada por lógica *fuzzy*), restrições técnicas, financeiras e de qualidade de serviço. O modelo proposto em [66] é baseado na metaheurística *Discrete Evolutionary Particle Swarm Optimization (DEPSO)* suportada por mutações caóticas, e que permite a calendarização de projetos de forma eficiente e precisa.

Em [70], os autores de [49] utilizam a *DEPSO* para fazer o planejamento dinâmico da transmissão considerando a inserção dos carros elétricos e impactos da geração distribuída na rede de transmissão. São feitas previsões para diferentes penetrações de geração distribuída na rede, onde o algoritmo analisa confiabilidade, aspectos econômicos, perdas de potência ativa na rede e aspectos ambientais.

Embora o AG tenha ampla utilização no planejamento multiestágios de expansão da transmissão, outras metaheurísticas também vêm sendo utilizadas atingindo bons resultados a um tempo computacional aceitável. Em [67], foi utilizada a técnica de recozimento simulado para solucionar o problema. A modelagem utilizada prevê custo do

investimento, de operação e da energia não suprida. Já em [68], Silva aplicou a busca Tabu (TS) em paralelo a outras técnicas heurísticas construtivas para solução do problema, onde a Função Objetivo previa minimização de investimentos em reforços, custos de operação e energia não suprida. Os resultados obtidos foram de boa qualidade e em um tempo computacional aceitável.

Em [69], Silva apresentou um robusto trabalho comparativo entre as metaheurísticas para a solução do planejamento multiestágios. As técnicas busca tabu, colônia de formiga, enxame de partículas, sistemas imunes artificiais, *differential evolution* (DE) e *evolution strategies* (DS) foram comparadas no que diz respeito ao tempo computacional e a qualidade das soluções obtidas em relação a melhor solução encontrada.

Os autores de [47] e [48] fazem o uso de um algoritmo heurístico construtivo para a solução do planejamento estático e dinâmico de linhas de transmissão. Assim como em [33], Romero et al. fizeram o uso de técnicas heurísticas aplicadas ao modelo de transportes [47]. Já em [48], é realizada uma avaliação da qualidade das soluções e a viabilidade desta modelagem da rede para lidar com o problema.

Em [25], parâmetro inicial desta pesquisa, o PDEST é solucionado através do *HS*. Já em [21] e [43] o *HS* foi acoplado ao *Branch & Bound* no intuito de aumentar a eficiência da abordagem dinâmica do PEST, onde foram obtidos excelentes resultados se comparado ao método Lagrangeano [27].

Nesta dissertação, optou-se pela continuação do uso do *Harmony Search* pela sua simplicidade matemática em implantação e, conseqüentemente, a facilidade em adaptação para os vários objetivos ao qual esta metaheurística foi submetida neste trabalho. Outro fator que pendeu para a continuação do *HS* e criação do *HS-B&B* foi o pioneirismo em executar o PDEST via *HS* e o *Branch & Bound* juntos.

2.5 - CONCLUSÃO PARCIAL

Devido a sua simplicidade e facilidade de busca local, as heurísticas construtivas quando acopladas na inicialização de metaheurísticas ou algoritmos clássicos resultam em maior eficiência processo de busca em problemas complexos.

Ao contrário dos métodos clássicos, normalmente baseados na obtenção da derivada e alta dependência da inicialização, as metaheurísticas, aliadas a melhoria significativa nas últimas duas décadas da capacidade computacional das máquinas, vêm apresentando bastante aceitação na comunidade acadêmica na busca do ótimo global. Embora não garantam a otimalidade da solução, sua utilização é aconselhada para casos onde não se faz ideia da resposta ótima e o conjunto de soluções cresce exponencialmente: como o PEEST e o PDEST, com conjuntos de soluções iniciais possíveis definidos respectivamente pelas Equações (7.7) e (7.8), ambas na, página 71.

Este capítulo apresentou um levantamento pormenorizado de trabalhos que privilegiam as técnicas de otimização para solução do PEEST e PDEST. Embora fossem priorizados os trabalhos com utilização de algoritmos heurísticos e metaheurísticas, diversas metodologias foram pesquisadas. Foram observadas suas contribuições com a finalidade de saber o que vêm sendo executado ao longo dos anos por outros pesquisadores e nortear futuras pesquisas.

3 - ATUAL CONJUNTURA MUNDIAL DAS INTERLIGAÇÕES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

3.1 - INTRODUÇÃO

Com o aumento de carga e inserção cada vez maior de fontes elétricas renováveis, sistemas de transmissão isolados cada vez mais caem em desuso. Objetivando aumentar confiabilidade e disponibilidade de energia elétrica, sistemas malhados são a tendência para o novo século. Para tal, os SEPs requerem expansão dos sistemas de transmissão.

Levando em consideração a necessidade mundial crescente de aumento das capacidades transmissoras entre os SEPs, neste capítulo é apresentada: a atual conjuntura mundial referente às interligações de sistemas de transmissão; os casos de sucesso e insucesso de utilização de sistemas em UAT para transmissão de grandes blocos de carga. Embora seja priorizado o SIN e suas interligações internas e externas (com países vizinhos), há também citações dos sistemas europeus e norte-americanos, assim como as suas políticas de expansão adotadas.

3.2 - SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

A grande extensão territorial brasileira somada às grandes distâncias entre os centros de consumo e as hidrelétricas faz com que o SIN seja um sistema único. Embora não seja o sistema mais robusto em termos de capacidade de geração e nível de consumo, quando o quesito é sustentabilidade e interconexão, o SIN se torna um referencial.

A capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 154.095 MW em agosto de 2017 [20]. A Tabela 3.1 e demais dados referentes a ela constam na edição de agosto de 2017 do Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro.

Na Tabela 3.1 os dados referentes ao petróleo incluem 147 MW provenientes de outras fontes fósseis. Além dos montantes apresentados, existe a importação de 5.650 MW do Paraguai e de 200 MW da Venezuela.

Na comparação da evolução da capacidade instalada por tipo de fonte, a geração solar foi a que apresentou expansão mais expressiva, com crescimento de 1136,8% entre agosto de 2016 e igual mês em 2017. No mesmo período também houve expansão das fontes eólicas (18,5%), hidráulicas (4,0%) e térmicas (1,2%) [20]. O avanço das fontes renováveis vai na mesma direção do compromisso assumido pelo Brasil durante a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21) ocorrida em 2015, de elevar para ao menos 23% a fatia de energias renováveis (além da hídrica) na matriz elétrica até 2030. Para suprir essa demanda por energia renovável e disponibilizar cada vez mais energia de qualidade aos brasileiros, ano após ano, o sistema ganha novos reforços e/ou rotas de transmissão.

Tabela 3.1 – Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil.

Fonte	Ago/2016	Ago/2017			Evolução da Capacidade Instalada Ago/2017 - Ago/2016
	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW)	% Capacidade Instalada	
Hidráulica	95.572	1.311	99.422	64,5%	4,0%
UHE	90.240	220	93.858	60,9%	4,0%
PCH + CGH	5.333	1.072	5.549	3,6%	4,1%
CGH GD	0	19	15	0,0%	-
Térmica	42.804	3.036	43.327	28,1%	1,2%
Gás Natural	13.039	164	13.026	8,5%	-0,1%
Biomassa	13.830	538	14.227	9,2%	2,9%
Petróleo	10.183	2.224	10.198	6,6%	0,1%
Carvão	3.612	21	3.713	2,4%	2,8%
Nuclear**	1.990	2	1.990	1,3%	0,0%
Outros	150	30	150	0,1%	0,0%
Térmica GD	0	57	22	0,0%	-
Eólica	9.327	506	11.061	7,2%	18,6%
Eólica (não GD)	9.327	454	11.051	7,2%	18,5%
Eólica GD	-	52	10	0,0%	-
Solar	23	13.380	284	0,2%	1136,8%
Solar (não GD)	23	55	177	0,1%	670,7%
Solar GD	-	13.325	107	0,1%	-
Capacidade Total sem GD	147.727	4.780	153.940	99,9%	4,2%
Geração Distribuída - GD	-	13.453	154	0,1%	-
Capacidade Total - Brasil	147.727	18.233	154.095	100,0%	4,3%

Fonte: [20].

No que tange às redes de transmissão, conforme a Tabela 3.2, o SIN possui 136532 km de linhas instaladas operando entre 230 kV e 750 kV. Em 2016, entraram em operação 5688,63 km de LTs na rede básica [82]. Já em 2017, somente em agosto foram instalados 438,2 km, acumulando, assim, 1577,9 km de novos circuitos operando na rede este ano. Embora em 2017 a previsão (1616 km) e realização de expansão do sistema de transmissão tenham sido reduzidas, quando comparado a 2016, para os anos seguintes, o sistema voltará com o ritmo de expansão agressiva dos últimos anos. Estão previstos para 2018 e 2019, respectivamente, a inserção de 7176,3 km e 6642,4 km de novos circuitos no SIN [20]. Estes números evidenciam a alta e crescente interligação do SIN.

Tabela 3.2 – Linhas de transmissão instaladas no Sistema Elétrico Brasileiro.

Classe de Tensão (kV)	Linhas de Transmissão Instaladas (km)*	% Total
230 kV	56.250	41,2%
345 kV	10.319	7,6%
440 kV	6.758	4,9%
500 kV	47.706	34,9%
600 kV (CC)	12.816	9,4%
750 kV	2.683	2,0%
Total SEB	136.532	100,0%

Fonte: [20].

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por meio da Figura 3.1, disponibiliza em seu site oficial a representação atual do SIN e os diferentes níveis normalizados de tensão utilizados na rede de transmissão. Embora seja considerada parte da rede de distribuição, a subtransmissão em 138 kV também é representada na Fig. 3.1. Observam-se que os níveis de tensão mais utilizados são de 230 kV, 345 kV, 440 kV e 500 kV. As duas linhas de transmissão que operam a 600 kV CC são, respectivamente, as que fazem as ligações entre a Usina Hidrelétrica de Jirau e a SE Araraquara II; e SE de Furnas com a SE de Ibiúna. A rota de transmissão responsável pela ligação entre Itaipu e São Paulo é a única LT acoplada ao SIN que opera em 750 kV.

Em fevereiro de 2018, está prevista a entrega do primeiro de dois bipolos de corrente contínua previstos para levar a energia gerada pela UHE Belo Monte para a

Região Sudeste. Com mais de 2.000 km de extensão, a linha de transmissão passará por 65 municípios de quatro estados brasileiros: Pará, Tocantins, Goiás e Minas Gerais; sendo a primeira LT projetada para operar em 800 kV no Brasil [83].

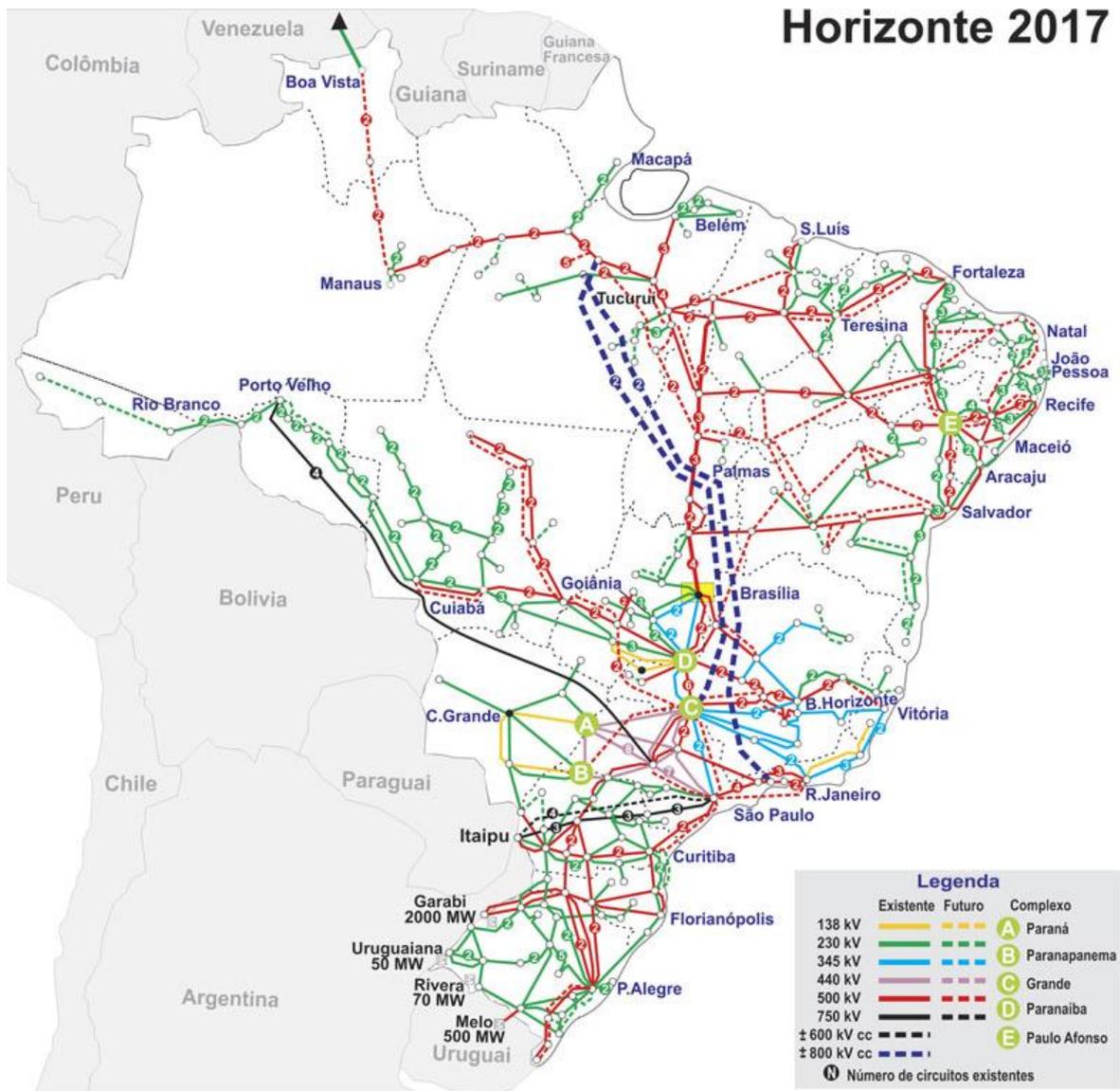


Figura 3.1 – Sistema Interligado Nacional.

Fonte: [84].

Há também a previsão da instalação de outro bipolo de transmissão em 800 kV que fará a interligação entre a UHE de Belo Monte e a cidade de Paracambi (RJ). O conjunto terá 2518 quilômetros de extensão, com capacidade de transmissão de 4000 MW de

energia. Os investimentos de R\$ 9,6 bilhões serão compostos pelos bipolos de 800 kV e duas subestações conversoras, em Xingu e Paracambi, respectivamente.

3.3 - INTERLIGAÇÕES EM ULTRA ALTA TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA

A partir de níveis de tensão em 800 kV CA, aumenta-se consideravelmente a possibilidade de interferências em sinais de telecomunicações. Há casos onde os ruídos nas LTs (perdas por efeito joule) podem ser audíveis. Outro fator preocupante é o efeito corona que se intensifica com o aumento da tensão. Sendo assim, a implantação de LTs com níveis de tensão superiores a 800 kV requer um estudo mais agudo e equipamentos isolantes robustos.

Naturalmente, esta situação exige a transmissão de grandes blocos de energia, a longas distâncias, com maior capacidade e maior eficiência. O que requer aumento do nível de tensão e expansão da rede, e certamente, um número crescente de linhas de transmissão em alta tensão e extra alta tensão (EAT), também conhecida por ultra alta tensão. Por outro lado, os problemas ambientais tornam-se cada vez mais proeminentes.

Em 1985, a Rússia foi pioneira na construção de sistemas de transmissão UAT CA, implantando o sistema com tensão nominal de 1200 kV em duas linhas de circuito simples de 400 e 500 km. Contudo, devido a não realização da previsão de consumo, objetivando eficiência, tais linhas passaram a operar em tensão reduzida, 500 kV [85], [86]. Tal como a Rússia, o Japão também possui linhas de transmissão UAT operando em tensões reduzidas. No Japão são 430 km de LTs UAT projetadas para atuar em 1100 kV, operando como o restante do sistema, em 550 kV [85], [87], [88].

Em 2009, foi criada na China uma rede em UAT de 1100 kV para interligar as usinas térmicas a carvão e hidroelétricas (localizadas nas regiões Nordeste e Oeste), aos centros de carga, localizados nas regiões Leste e Centro. Com o sucesso do projeto, três anos mais tarde foram construídos mais dois sistemas em 1100 kV, totalizando quase 1300 km de UAT CA. Essa rede atua em paralelo com um sistema de transmissão em corrente contínua em ± 800 kV CC e constituem o eixo principal de interligação do sistema

interligado chinês. Isto resulta em ampliação de capacidade de transferência de energia entre as regiões e melhorias na estabilidade do sistema [85], [86], [88]–[90].

Na Índia, uma grande rede de alta capacidade em 1200 kV CA, juntamente com um sistema ± 800 kV CC, está em fase de planejamento. Em 2012, o projeto piloto de circuitos simples e duplos de 1200 kV, com extensão de 2 km, e um vão de subestação foram testados com sucesso. Foram realizados diversos estudos e testes para a definição das especificações dos equipamentos e configuração das linhas de transmissão. A estação de testes de Bina foi construída pela *Power Grid Corporation of India Limited (PGCIL)*, concessionária de transmissão central da Índia [91], [92]. A primeira linha comercial, a princípio, possuirá a extensão de 400 km entre Wardha e Aurangabad, em Maharashtra, no oeste do país. Destaca-se que este será o nível de tensão CA mais elevado em operação no mundo, se sua operação for concretizada. Em maio de 2016, iniciaram-se os testes a 1200 kV. A liberação para operação comercial desta LT está prevista para meados de 2018 [93].

No Brasil, linhas de transmissão que operam em ultra alta tensão (UAT), como 1000 kV ou 1200 kV ainda estão na fase de estudos [89], [90]. A Figura 3.2 apresenta a evolução dos níveis de UAT nos sistemas de transmissão em CA ao redor do mundo. Esta figura inicialmente foi publicada em [94] e atualizada em [90].

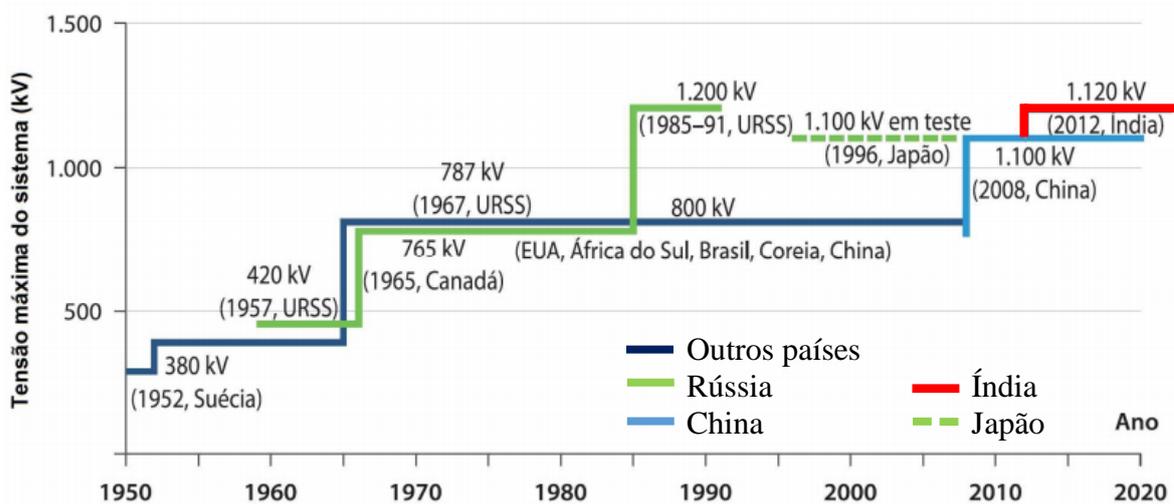


Figura 3.2 – Histórico das tensões máximas utilizadas na transmissão em CA.

Fonte: adaptado de [90].

3.4 - SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL E A RELAÇÃO COM OS PAÍSES DA AMÉRICA DO SUL

O Sistema Interligado Nacional é um sistema robusto, intraconectado e interconectado com outros países. Além da conexão com a Venezuela, atualmente, o SIN apresenta interligações com os países que constituem o MERCOSUL. Contudo, por razões políticas, o SIN ainda não faz interligação direta com outros países que dispõem de fronteira física com o Brasil, como: Bolívia, Peru, Colômbia, Suriname e as Guianas. A Figura 3.3 ilustra este aspecto.



Figura 3.3 – Interligações entre o Sistema Elétrico Brasileiro com outros países.

Fonte: adaptado de [95].

3.4.1 - Interligação entre Brasil e Paraguai

A primeira conexão do sistema elétrico brasileiro com o de outro país ocorreu por meio da interligação de Acaray, com o Paraguai, representada em azul na Figura 3.3. A conexão entrou em operação em 1973 com o intuito de suprir com eletricidade paraguaia a região da cidade brasileira de Foz do Iguaçu. Entretanto, sempre que os reservatórios paraguaios estão em níveis baixos, a conexão é interrompida [95], [96]. Com a construção da UHE Binacional de Itaipu, foi realizada a interligação entre a SE MD e a SE de Furnas, representada em vermelho na Figura 3.3 e detalhada na Figura 3.4. No mesmo ano, em 1980, foi inaugurada a interligação entre Ponta Porã (BR) – Pedro Caballero (PY), a partir de acordos entre a Enersul e a *Administración Nacional de Electricidad (ANDE)* [95]–[97]. Tal conexão é representada pela linha de cor preta na Figura 3.3.

A subestação de furnas é responsável por elevar a parcela brasileira de energia elétrica gerada em Itaipu com tensão de 500 kV e frequência de 60Hz para 750 kV e 60 Hz. Toda energia produzida pela UHE Binacional de Itaipu é dividida em partes iguais, tanto para o Brasil, quanto para o Paraguai. No entanto, o Paraguai não consome toda a sua parcela que lhe é de direito. Sendo assim, através de um acordo de compra entre os dois países, o excedente paraguaio retorna ao Brasil a uma tensão de 500 kV e 50 Hz em corrente alternada (CA), e é convertido na subestação de Furnas para trafegar até Ibiúna a 600 kV CC por uma linha com dois bipolos em CC. Sendo esta, a primeira linha de transmissão CC instalada no Brasil (representadas pelas linhas verdes na Figura 3.4).

A Figura 3.4 é uma fotografia do diagrama esquemático do sistema de transmissão nas mediações entre Foz do Iguaçu (BR) e *Ciudad Del Este* (PY). As fontes geradoras são as UHEs Binacional de Itaipu e Acaray (Paraguai). As subestações elevadoras são as da Margem Direita e a de Furnas – Foz do Iguaçu.

As LTs em preto fazem parte do setor de 60 Hz. Elas são responsáveis por transportar a parcela da produção brasileira da UHE Itaipu à SE Foz do Iguaçu (500kV) através de quatro circuitos, cada um com extensão de 8 km. O setor de frequência em 50 Hz está representado pelas linhas de cor vermelha na Figura 3.4. As ligações da SE MD com o sistema paraguaio se dão através de duas LTs com tensão 220 kV e frequência de 50Hz. Uma com destino à *Assunción* e outra LT de 5 km, que interliga a SE MD à UHE de

Acaray. A LT Itaipu – SE Margem Direita funciona com uma tensão de serviço de 500 kV, quatro circuitos e cada um com extensão de 2 km. Já a linha de transmissão que interliga a SE Margem Direita (500 kV) à SE Foz do Iguaçu (500kV) possui os mesmos quatro circuitos, porém cada um com extensão de 9 km. Para mais detalhes sobre a UHE Binacional de Itaipu e sua subestação de Furnas – Foz do Iguaçu, consultar [98].



Figura 3.4 – Diagrama esquemático do sistema de transmissão de energia elétrica vigente em Itaipu.

3.4.2 - Interligação entre Brasil e Venezuela

Atualmente mais de 98% do sistema elétrico brasileiro é interconectado ao SIN. As únicas exceções a essa regra são as regiões ribeirinhas da floresta amazônica e o estado de Roraima, incluindo a capital Boa Vista, como pode ser visto na Figura 3.1. A maioria dos municípios roraimenses tem a maior parte de sua demanda suprida pela Venezuela. No entanto, sofrem com apagões diários provenientes da baixa qualidade de energia fornecida pelo país vizinho. Para abastecê-lo, o governo brasileiro importa da Venezuela 85% da energia consumida. Esta interligação entre Brasil e Venezuela está representada em vermelho na Figura 3.3. O Estado ainda tem de gastar cerca de R\$ 1 bilhão por ano em

óleo diesel com termoelétricas para suprir o abastecimento comercial e doméstico. Segundo dados da Empresa de Pesquisas de Energia (EPE), do Ministério de Minas e Energia (MME), Roraima registrou 36 apagões em 2016 e já teve 17 cortes em 2017. Está prevista a construção de uma nova rota de transmissão, constituída por um circuito duplo em 500 kV ligando Manaus a Boa Vista [99].

3.4.3 - Interligação entre Brasil e Argentina

Os sistemas de ambos os países estão interligados pelas instalações de Uruguaiana e de Garabi I e II, e que podem ser visualizadas na Figura 3.4. Nesta mesma figura, a interconexão indicada em cor vermelha, entre Brasil e Argentina, representa a interligação com Uruguaiana. Inaugurada em 1994, ela é composta por uma estação conversora de frequência com capacidade de 50 MW, na cidade de Uruguaiana, no estado do Rio Grande do Sul, e uma linha de subtransmissão de 132 kV que a conecta à *Paso de los Libres* (AR) [95], [100].

Em 2000 e 2002 respectivamente, entraram em operação as estações conversoras de frequência Garabi I e II, também no Rio Grande do Sul e com capacidade nominal de 1100 MW cada uma. Na Figura 3.3, as conexões de Garabi I e II com o sistema argentino estão representadas pela interligação azul entre Brasil e Argentina. Esta interligação é feita através da linha de transmissão “Garabi – Rincón S.M.” e à rede básica brasileira por um sistema de transmissão de 500 kV até as subestações de Santo Ângelo (RS) e Itá (SC) [95].

Estas interligações foram construídas com o intuito de importar energia elétrica da Argentina e também para ser utilizada em situações de emergência. Atualmente, tem sido mais utilizada para a exportação à Argentina, no entanto também já foi utilizada para enviar eletricidade ao Uruguai, via Argentina [95].

3.4.4 - Interligação entre Brasil e Uruguai

Entre Brasil e Uruguai há duas interligações. A primeira, foi inaugurada em 2001, é a interligação de Rivera representada pela conexão de cor vermelha Figura 3.3. É composta

pela estação conversora de frequência de Rivera, em território uruguaio, com capacidade nominal de 70 MW; e por uma linha de transmissão em 230 kV que a conecta à subestação Livramento 2, em território brasileiro, no estado do Rio Grande do Sul. A estação conversora de frequência é de propriedade da uruguaia *Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE)*, já o sistema de transmissão, em território brasileiro, é de propriedade da Eletrosul. A segunda é a conexão entre a estação conversora de frequência de Melo, em território uruguaio, à subestação Presidente Médici, em território brasileiro, no estado do Rio Grande do Sul [95], [101]. Com capacidade para trafegar 500MW, esta conexão está representada pela interligação azul na Figura 3.3.

3.5 - INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PELO MUNDO

O Brasil se encontra na vanguarda quando o assunto é a interligação do seu sistema elétrico de potência. Em comparação a países de tamanho continentais, como Estados Unidos, Canadá, China e Rússia, nota-se claramente a diferença do SIN para os SEPs destes países.

Em países de extensão territorial menor, como os da Europa ocidental, os sistemas de transmissão são pequenos, e a geração é em sua maioria proveniente de termoelétricas e nucleares, o que diminui as distâncias na transmissão de energia. No entanto, cada vez mais aparecem estudos com o propósito de interligar o sistema europeu. A maioria dos países europeus já possui interconexão com seus vizinhos, como é o caso da Espanha que possui ligações com Portugal e França.

A Comissão Europeia divulgou um memorando em fevereiro de 2015 informando que: *O Conselho Europeu de outubro de 2014 apelou a todos os Estados-Membros no sentido de conseguirem a interligação de, pelo menos, 10 % da sua capacidade instalada de produção de eletricidade até 2020. Significa isto que cada Estado-Membro deverá dispor de cabos elétricos que permitam que 10 %, pelo menos, da eletricidade produzida pelas respetivas centrais elétricas sejam transportados através das suas fronteiras para os*

países vizinhos [102]. Nesse mesmo documento, emitido pela Comissão Europeia, ainda consta a previsão de interligação de 15% de toda rede para 2030.

Conforme pode ser observado na Figura 3.5, o SEP norte-americano (Estados Unidos e Canadá) é dividido em quatro grandes subsistemas. Historicamente, estes SEPs têm seu foco de expansão em intraconexões, porém, quando comparados aos SEPs europeus, apresentam baixa interconexão entre eles.

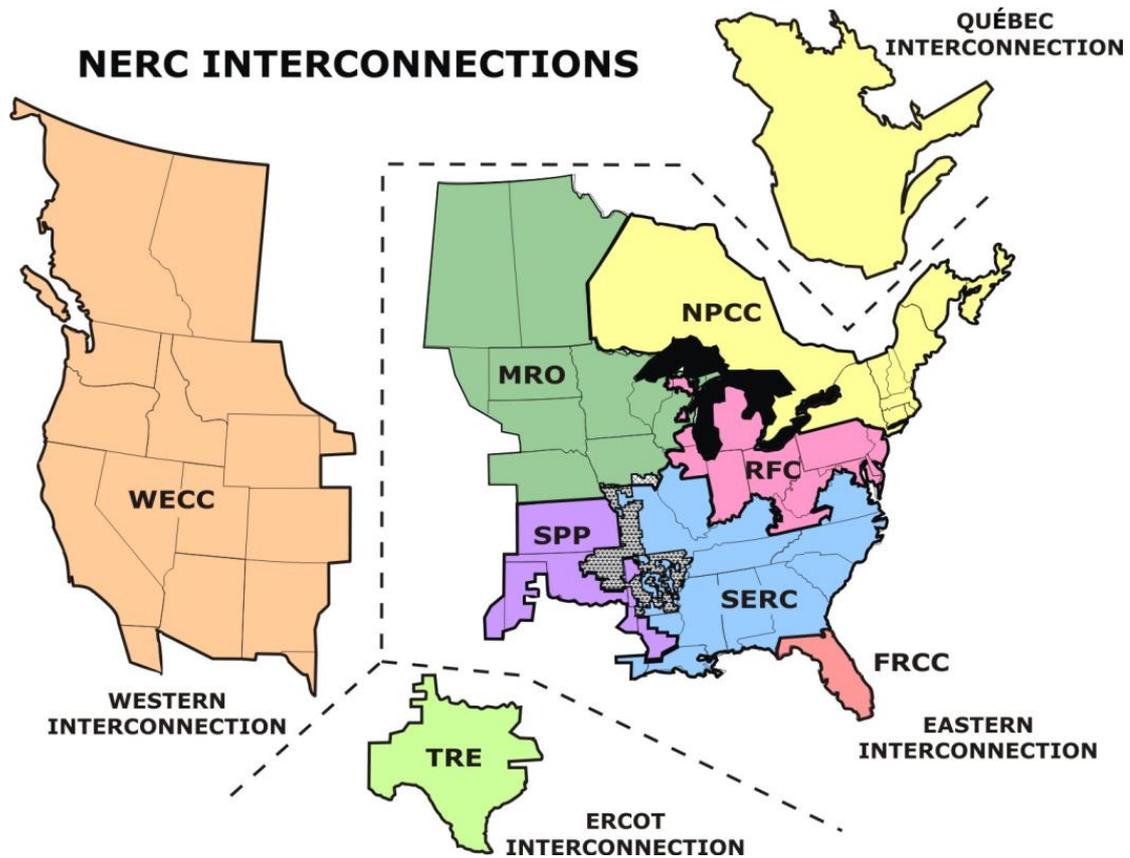


Figura 3.5 – Subdivisão do Sistema Elétrico de Potência dos Estados Unidos e Canadá.

Fonte: [103].

Apresentada originalmente em [104], a Fig. 3.5 foi atualizada em [103], onde ganhou a subdivisão das áreas de interconexão. São elas: *Western Electricity Coordinating Council (WECC)*, que corresponde à *Western Interconnection*, ou Interconexão Oeste; *Texas Reliability Entity (TRE)* correspondente à *ERCOT⁵ Interconnection*, ou se preferir, *Texas Interconnection* (Interconexão do Texas); *Eastern Interconnection*, que significa

⁵ *Electric Reliability Council of Texas*, ou Conselho de Confiabilidade Elétrica do Texas.

interconexão do leste e compreende as seguintes subdivisões: *Florida Reliability Coordinating Council (FRCC)*; *Midwest Reliability Organization (MRO)*; *Reliability First Corporation (RFC)*; *Southeast Reliability Corporation (SERC)*; *Southwest Power Pool, Inc. (SPP)*; *Northeast Power Coordinating Council (NPCC)*. Esta última, a *NPCC*, também é responsável por gerenciar e coordenar a *Québec Interconnection*, ou Interconexão de Quebec, e suas interligações com a Interconexão do Leste.

A *NPCC* compreende a parte nordeste da Interconexão do Leste, sendo responsável por suprir a demanda energética da região onde ocorreu o apagão de 2003⁶. A Figura 3.6 demonstra a área afetada pelo *blackout* ocorrido na *NPCC*.



Figura 3.6 – Região norte-americana afetada pelo *blackout* ocorrido em agosto de 2003.

Fonte: adaptado de [105].

⁶ No dia 14 de agosto de 2003 aproximadamente 50 milhões de pessoas foram afetadas por um apagão na zona de interconexão Quebec. Cidades como Nova Iorque, Detroit, Cleveland e Toronto ficaram no breu, e o reabastecimento só foi normalizado dois dias depois. As causas demoraram a serem identificadas, e somente em abril de 2004, Canadá e EUA assinaram um relatório que apontava uma série de falhas em cascata, que incluíam falta de planejamento e preparo para lidar com crises [126], [127].

O SEPs dos Estados Unidos e Canadá são geridos pela *North American Electric Reliability Corporation* desde 2006, sucessora da *North American Electric Reliability Council*, também possuidora do mesmo acrônimo, *NERC*. A antiga *NERC* foi criada pela indústria de serviços elétricos para promover a confiabilidade e adequação da transmissão de energia em massa nos sistemas de energia elétrica da América do Norte.

Após o *blackout* de 2003, a *Electric Reliability Organization* foi criada para desenvolver e fazer cumprir os padrões de confiabilidade obrigatórios nos Estados Unidos. Esta organização não governamental, de autorregulação, foi criada em reconhecimento da natureza interconectada e internacional do sistema elétrico de potência norte-americano. Em abril de 2006 a *NERC* ganhou força e incorporou a *ERO*, passando de Corporação para Consórcio. Sua missão passou a ser: “garantir a confiabilidade do sistema de energia da América do Norte”. Deste modo, a interligação dos subsistemas passou ganhar maior notoriedade e importância nos assuntos do Consórcio. No mesmo ano, a nova *NERC* estendeu seus padrões de confiabilidade para as províncias de *Alberta, British Columbia, Manitoba, New Brunswick, Nova Scotia, Ontario, Québec* e *Saskatchewan*, assim como para a *National Energy Board of Canada* (Energia Nacional de Fronteira do Canadá, responsável pelas interligações com os Estados Unidos).

Em outubro de 2009, a *Tres Amigas SuperStation* anunciou projeto de interconexão entre os subsistemas *Wester, Easter* e *Ercott* através de três *links* supercondutores em corrente contínua, distintos, e que poderiam transportar 5GW cada uma. Estas interconexões tinham por objetivo transportar a energia elétrica produzida pelos sistemas eólicos norte-americanos. Com o passar do tempo, o projeto foi reduzido em escopo e até o presente somente foram construídas as infraestruturas próximas às usinas eólicas.

3.6 - CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo, ilustrou-se a necessidade crescente por interligações. Estes aspectos levam em consideração tanto interesses regionais, como também internacionais.

No Brasil, fica evidente a necessidade de longas interligações, uma vez que centros de grandes potenciais hidrelétricos estão bastante afastados dos grandes centros de

consumo. Desse modo, faz-se indispensável a busca por melhores alternativas de escoamento de energia. O Brasil possui o SIN, referência mundial em intraconexões, e em expansão continuada, ano após ano. No entanto, ainda carece de maiores conexões, até mesmo para explorar o potencial de sistemas elétricos vizinhos ao país, pertencentes ou não ao MERCOSUL.

Os países europeus pertencentes à comunidade europeia já possuem uma boa conexão em seus sistemas internos. Contudo são sistemas pequenos, o que os deixam altamente susceptíveis às falhas quando comparados a um sistema robusto como o SIN. Dentro deste contexto, a comunidade europeia vem implantando uma política de interligação elétrica crescente entre os países europeus. Já o sistema norte-americano, embora seja o maior sistema em termos de consumo de carga, EUA e Canadá passaram a investir na interconexão de seus sistemas apenas após o *blackout* de 2003.

A tendência mundial é a de aumentar a interconectividade entre os sistemas elétricos aumentando confiabilidade e disponibilidade de energia elétrica. O que reforça a necessidade de se fazer um planejamento ótimo na expansão de sistemas de transmissão.

4 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta dissertação foi considerada a modelagem linearizada do fluxo de potência, desprezando, deste modo, os efeitos das potências reativas. Assim, este capítulo tem por objetivo apresentar a formulação matemática proposta ao problema de Planejamento Dinâmico de Expansão em Sistemas de Transmissão. Como o PEEST é um caso particular do PDEST, somente a modelagem matemática para o planejamento multiestágios é descrita.

4.2 - FORMULAÇÃO PROPOSTA PARA O PDEST

O planejamento de expansão em sistemas de transmissão é um problema de otimização não linear com variáveis inteiras mistas. Isto é, as variáveis de decisão referentes ao fluxo de potência são contínuas e as variáveis referentes ao parâmetro de expansão do sistema são inteiras. Para resolução desse problema, cujo conjunto de possíveis soluções aumenta exponencialmente com o tamanho do sistema, é necessária uma modelagem matemática robusta que represente o sistema de maneira aceitável.

Para este problema, existem dois principais grupos de modelos matemáticos: os que fazem a abordagem dinâmica (multiestágios), através de uma visão holística do problema, respeitando o acoplamento temporal entre os diferentes estágios do horizonte de planejamento; e aqueles que fazem a abordagem estática, considerando o horizonte de planejamento como uma caixa preta onde só existe o presente (*as is*) e o futuro (*to be*). A Figura 4.1 ilustra a diferença entre essas duas abordagens.

Há ainda um terceiro grupo caracterizado por ser um híbrido entre a abordagem dinâmica e a estática: o planejamento dinâmico desacoplado. Esta modelagem desconsidera o acoplamento temporal, o que se traduz pela exclusão da interdependência que cada estágio tem sobre o planejamento como um todo. Tal simplificação cria uma defasagem em relação à resposta dinâmica real, fazendo com que ela seja menos utilizada

para obtenção das respostas finais em algoritmos que objetivam encontrar PDESTs ótimos. Contudo, esse relaxamento provocado pela exclusão do acoplamento temporal permite ao planejador obter uma resposta dinâmica aproximada com maior rapidez. Para algoritmos heurísticos que fazem inúmeros testes e análises de sensibilidade em diversos PESTs visando obter informações diferenciadas sobre a rede, este tipo de modelagem passa a ter grande atratividade.

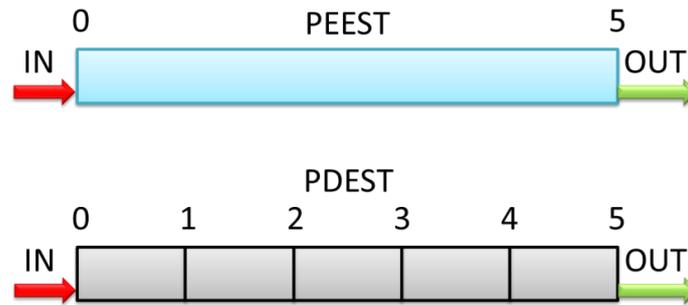


Figura 4.1 – Ilustração da diferença entre a abordagem para um único estágio e multiestágios.

Em suma, a modelagem desacoplada, ilustrada pela da Figura 4.2, permite que o problema seja analisado rapidamente, estágio após estágio, obtendo a melhor resposta para cada fase do planejamento dinâmico, independente dos estágios futuros ainda não analisados.

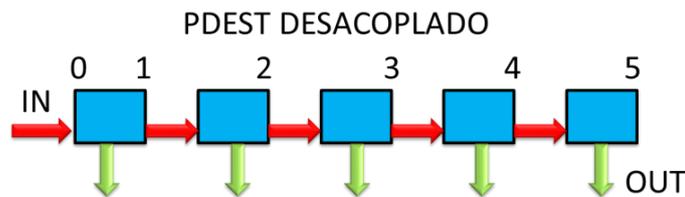


Figura 4.2 – Ilustração da abordagem desacoplada para multiestágios.

Todas essas três abordagens citadas neste capítulo diferem-se apenas de como tratam o acoplamento temporal. Há ainda outros fatores que dependendo do objetivo do engenheiro planejador devem ser observados. Como exemplo, cita-se a modelagem inicial proposta por Garver [33], que não previa o acoplamento elétrico imposto pela relação entre tensões e reatâncias. Em outros estudos, como em [62], a modelagem matemática prevê

fluxo de potência CA. Já em [39], o objetivo é encontrar o melhor planejamento levando em consideração possíveis contingências do sistema. Há ainda outros que incluem as perdas [27]. Há estudos que levam em consideração as incertezas de carga e/ou geração, como é o caso de [70]. Portanto, existem diversas maneiras de se representar o problema, dependendo principalmente do que o planejador tem por objetivo.

Modelagens simplistas privilegiam rapidez de solução com estimação da resposta real aceitável. Já as modelagens mais robustas têm um objetivo mais acurado no que tange ao encontro com a realidade. No entanto, perdem em velocidade de resposta, e dependendo da complexidade adotada, há uma grande possibilidade de o sistema convergir para mínimos e máximos locais. Logo, mediante as suas necessidades, os agentes devem estabelecer planos de expansão altamente satisfatórios, investindo de maneira ótima os recursos financeiros disponíveis, e conseqüentemente, garantindo o funcionamento confiável e adequado do Sistema Elétrico de Potência.

Nesta dissertação, foi adotada a modelagem de fluxo de potência linear (CC) sem perdas para solução do PDEST. Embora a inserção de perdas seja uma das metas de continuidade para este trabalho, a sua não utilização se deve à boa proximidade entre os resultados para o FPO com e sem perdas. Assim como as perdas de potência ativa, incertezas e contingências também não foram contempladas neste estudo. Contudo, o PDEST ainda se caracteriza como um problema de programação não linear com variáveis contínuas e discretas, ou seja, PNLIM, cuja solução envolve a seleção de reforços e ampliações na rede visando minimizar o custo de investimento associado aos cortes de carga, satisfazendo todas as seguintes restrições:

- Satisfação do balanço de potência ativa;
- Parâmetro de Expansão (PE).

O PEEST pode ser modelado com a mesma formulação matemática que o PDEST para t igual ao último estágio. Sendo assim, o PDEST pode ser formulado através do modelo CC de fluxo de carga como:

$$\min \sum_{t=1}^{nt} \left(\sum_{d=1}^{nbar} C_d^t \cdot def_d^t + \sum_{(i,j) \in C} C_{ij}^t \cdot PE_{ij}^t \right) \quad (4.1)$$

sujeito a,

$$\sum_{t=1}^{nt} \sum_{i=1}^{nbar} \left(g_i^t - \sum_{j \in \Omega_i} f e_{ij}^t - \sum_{j \in \Omega_i} f c_{ij}^t \cdot P E_{ij}^t = Dem_i^t \right) \quad (4.2)$$

$$f e_{ij}^t = \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij}^t, \quad \forall (i, j) \in E \quad (4.3)$$

$$f c_{ij}^t = \gamma_{ij} \cdot \theta_{ij}^t \cdot P E_{ij}^t, \quad \forall (i, j) \in C \quad (4.4)$$

$$|f_{ij}^t| \leq \overline{f_{ij}}, \quad \forall (i, j) \in E, C \quad (4.5)$$

$$\underline{g_i^t} \leq g_i^t \leq \overline{g_i^t} \quad (4.6)$$

$$0 \leq def_i^t \leq Dem_i^t \quad (4.7)$$

$$\overline{Exp_{ij}^t} - P E_{ij}^t = \overline{Exp_{ij}^{t+1}} \quad (4.8)$$

$$0 \leq P E_{ij}^t \leq \overline{Exp_{ij}^t}, \quad \forall (i, j) \in C \quad (4.9)$$

$$C_{ij}^t = \frac{C_{ij}^0}{(1 + tx)^{(t-t_0)}}, \quad \forall (i, j) \in C \quad (4.10)$$

onde:

- $nt \in \mathbb{N}$ é a quantidade de estágios contidas no horizonte de planejamento;
- $nbar$ é o número de barras;
- C é o conjunto de rotas candidatas à expansão;
- E é o conjunto de ramos existentes no sistema de transmissão;
- C_d^t é o custo de déficit de energia no estágio t ;
- def_d^t é o déficit de energia nas barras d deficitárias;
- C_{ij}^t é o custo presente de investimento do reforço ou ampliação do ramo $i-j$ no estágio t ;
- $P E_{ij}^t \in \mathbb{N}$ é o parâmetro de expansão referente ao ramo $i-j$ no estágio t ;

- g_i^t é a geração da barra i no estágio t ;
- \underline{g}_i^t é a mínima geração da barra i no estágio t ;
- \overline{g}_i^t é a máxima geração da barra i no estágio t ;
- Dem_i^t é a demanda da barra i no estágio t ;
- fe_{ij}^t é o fluxo de potência ativo no ramo existente $i-j$ no estágio t ;
- fc_{ij}^t é o fluxo de potência ativo no ramo candidato $i-j$ no estágio t ;
- \overline{f}_{ij} é a máxima potência ativa permitida nos ramos $i-j$;
- γ_{ij} é a susceptância do ramo $i-j$;
- θ_{ij}^t é a diferença angular entre as barras $i-j$ no estágio t ;
- \overline{Exp}_{ij}^t é a expansão máxima possível do ramo $i-j$ no estágio t ;
- C_{ij}^0 é o custo de investimento no estágio inicial;
- tx é a taxa de interesse anual;
- t_0 é o estágio inicial.

A Função Objetivo, descrita na Eq. (4.1), corresponde à minimização dos investimentos em linhas candidatas à instalação na rede, juntamente com o somatório dos custos do déficit de energia. Ambos para cada um dos nt estágios do horizonte de planejamento referentes à expansão do sistema de transmissão. O déficit, def_d^t , tem alto custo operacional e pode ser interpretada como uma geração fictícia de potência ativa inserida em cada barra visando garantir a factibilidade matemática do PEST sugerido e simular um possível corte de carga. Quando estes geradores fictícios injetam potência no sistema é sinal de que houve corte de carga.

Visando atender a primeira lei de Kirchhoff, a quantidade de potência injetada em toda e qualquer barra i do sistema deve ser equivalente ao somatório do fluxo transmitido a partir desta barra i para qualquer barra j , associado à potência consumida nesta mesma barra i , de modo a garantir que o balanço de potência ativa seja respeitado. Assim, em comum acordo com a Eq. (4.2), o somatório da potência injetada no sistema é equivalente ao consumido.

Esta modelagem é baseada no fluxo de carga CC, cujo acoplamento entre a potência ativa e o ângulo da tensão permite de forma simples, com baixo esforço

computacional e precisão aceitável, atender a segunda Lei de Kirchhoff, determinando, deste modo, a distribuição dos fluxos de potência ativa na rede de transmissão. Logo, as restrições (4.3) e (4.4) visam atender o balanço de potência ativa nos ramos existentes e os candidatos à expansão, respectivamente.

A restrição (4.5) corresponde aos limites de fluxo de potência ativa nos circuitos existentes e candidatos, representando, desta maneira, a capacidade de transporte de potência ativa das linhas de transmissão. Em (4.6) e (4.7), são definidas as restrições de canalização, ou seja, limites inferiores e superiores, dos geradores existentes e artificiais, sendo estes últimos referentes aos eventuais cortes de carga existentes no sistema.

A decisão de construir ou não determinados circuitos é representada por uma variável discreta, o parâmetro de expansão, PE_{ij}^t . Deve-se inicialmente definir o número máximo de expansões permitidas por rota de transmissão. Após essa definição, a quantidade de linhas existentes deve ser atualizada sempre que um novo reforço for inserido na rede elétrica, conforme indica a Eq. (4.8). A Tabela 4.1 apresenta o vetor expansão de um único estágio de um determinado PEST. Neste exemplo, foi determinado que o circuito entre as barras s e z deve ser reforçado no estágio t .

Tabela 4.1 – Representação vetorial do parâmetro de expansão.

PE_{ij}^t	PE_{jk}^t	PE_{js}^t	PE_{sz}^t
0	0	0	1

Fonte: Adaptado de [24].

Para o caso específico apresentado na Tabela 4.1, a fim de respeitar as Eqs. (4.8) e (4.9) em cada estágio do horizonte de planejamento, uma vez definido que o parâmetro de expansão entre as barras s e z será reforçado no estágio t , é necessário atualizar o limite de expansões máximas possíveis para o próximo estágio, $\overline{Exp}_{ij}^{t+1}$.

Para se comparar os custos de investimento, deve-se trazê-los para o mesmo estágio temporal. Neste trabalho optou-se pela utilização do Valor Presente Líquido (VPL). Logo,

o custo presente do investimento nas rotas candidatas para uma determinada tx^7 , é obtido através da Eq. (4.10).

4.3 - CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo, foi descrita a formulação do PDEST mediante um problema de otimização com restrições de igualdade e desigualdade. Ficou evidente a relação entre custos, fluxo de carga, limitações de circuitos e variáveis de decisão para inclusão ou não de reforços na rede. Na abordagem considerada, o balanço de potência na rede elétrica é avaliado por meio do fluxo de carga CC sem perdas. O PEEST é um caso particular do PDEST, por isso somente a descrição desta última metodologia foi apresentada.

⁷ Fica a critério do planejador a definição de qual taxa de interesse anual utilizar. No Brasil, onde as taxas de juros e inflação são altas, a taxa SELIC é um bom parâmetro. Neste estudo, optou-se por utilizar $tx = 10\%$ em todos os testes.

5 - HARMONY SEARCH

5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metaheurística *Harmony Search*, parte fundamental da técnica híbrida, *HS-B&B*, apresentada nesta dissertação. O algoritmo proposto por [81] é retratado de forma comentada, onde a prioridade é fazer o leitor entender os conceitos do algoritmo para futura implementação. Um exemplo de otimização não linear inteira é utilizado para demonstrar o funcionamento da metaheurística *HS*.

5.2 - A ANALOGIA MUSICAL

O *Harmony Search* é um algoritmo de otimização metaheurístico inspirado no processo de improvisação musical de um trio de jazz, onde cada músico busca a harmonia perfeita entre eles [81], [106].

Como premissas do método, deve-se considerar que em uma banda, as harmonias conhecidas pelos músicos fazem parte de uma memória harmônica (MH). Cada músico detém um conhecimento musical prévio, representado pela sua capacidade de acesso à memória harmônica, ou Taxa de Consideração da Memória Harmônica (TCMH). No entanto, estes músicos são uma banda, e como conjunto, devem manter uma comunicação audiovisual acurada com cada um dos integrantes da banda. Essa grandeza é modelada como Taxa de Ajuste de Tom (TAT) e representa a inteligência coletiva do método.

Para usar a memória harmônica de maneira mais eficaz, o programador deve inicialmente atribuir um parâmetro contínuo entre 0 e 1 à TCMH. Essa taxa se compara ao conhecimento prévio do músico em relação ao instrumento. Se essa taxa for muito pequena, o algoritmo raramente irá consultar a MH. Do mesmo modo, um músico iniciante, um leigo, tocará qualquer nota indiscriminadamente na tentativa de fazer um som harmonicamente estético. Assim, o processo de busca pela harmonia esteticamente perfeita poderá convergir muito morosamente. A Figura 5.1 ilustra a visão de um leigo em guitarra e/ou violão quando olha para o braço do instrumento [107].

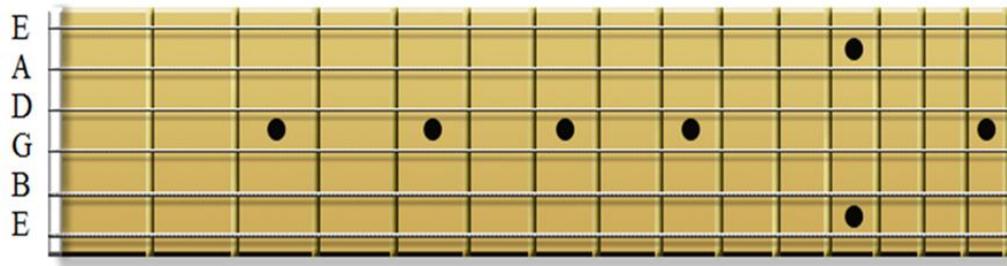


Figura 5.1 – Visão de um aprendiz iniciante do braço de um violão.

Fonte: [108].

Por outro lado, se esta taxa for extremamente alta (próxima de 1), quase sempre, as harmonias a serem utilizadas serão provenientes da MH, evitando, assim, a randomização. Isso se compara a músicos extremamente técnicos que por muitas vezes preferem fazer sons tecnicamente perfeitos deixando a desejar em estética musical. Isto por que raramente estes músicos se permitem a busca do novo (aleatoriedade) e normalmente convergem para ótimos locais. Conseqüentemente, a probabilidade de exploração de novas harmonias diminuirá significativamente, o que potencialmente levará o processo de convergência a soluções subótimas, dependendo da solução inicial [109], [110]. Sendo assim, [111] sugere de forma empírica a utilização de TCMH entre 0,70 e 0,95. A Figura 5.2 ilustra a visão de um músico experiente ao olhar o braço de uma guitarra e/ou violão. Nota-se que o músico visita sua memória harmônica automaticamente relembrando, deste modo, as escalas que mais costuma utilizar em seus processos de improvisação. No caso específico da Fig. 5.2, a escala representada é o arpejo maior em Lá (A).

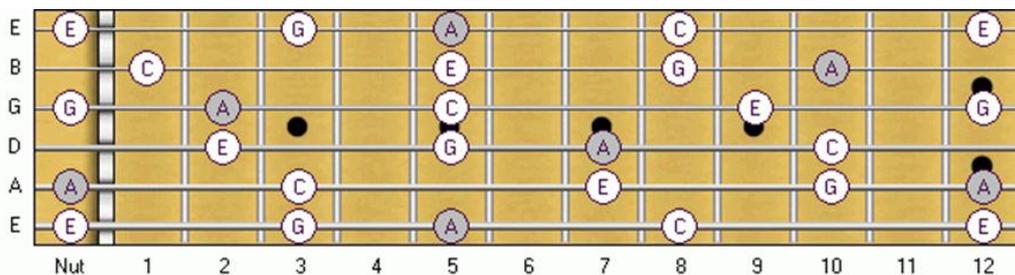


Figura 5.2 – Visão de um músico experiente do braço de um violão.

Fonte: [112].

Assim como a TCMH, a TAT é um parâmetro contínuo que usualmente não trabalha próximo aos seus limites e pode variar entre 0 e 1. A TAT se compara a comunicação entre os músicos, exercendo, desse modo, a inteligência coletiva do método. Se $TAT \approx 0$, raramente as soluções existentes na MH serão ajustadas, assim, a única maneira de se obter novas soluções será através da randomização. Por outro lado, se $TAT \approx 1$, o *HS* pode não convergir plenamente devido à falta de comunicação entre as soluções [108]. Assim, usualmente, a TAT é utilizada entre 0,5 e 0,8 [106].

Outro fator que se relaciona diretamente com o processo em questão é o passo inteiro, ou largura de banda (*lb*), que se trata do tamanho máximo de ajuste. Deve-se evitar duas situações: $lb \approx 0$, o passo será nulo, o que resulta na procura da harmonia por micro afinação (1/8 de tom); $lb \gg 0$, o passo será enorme (12 tons). Um passo descomedido levará a perda do ajuste fino.

Cada possível solução é denominada de harmonia. O conjunto de todas as harmonias conhecidas é denominado memória harmônica sendo associada a cada uma delas uma nota de performance que mede sua capacidade harmônica [111]. Conforme o Quadro 5.1, a cada ensaio, ou prática, o som dos instrumentos de cada músico gera um novo padrão estético a fim de buscar a melhor harmonia possível. Após cada iteração ou ensaio, novas harmonias produzidas através de improvisação e/ou mesclagem são avaliadas e ranqueadas. As piores harmonias são descartadas. Repete-se o ciclo até que se satisfaça o critério de parada. Desse modo, o som obtido entre o trio se torna mais acurado.

Quadro 5.1 – Analogia Comparativa entre performance musical e o processo de otimização.

Performance Musical	Fator de Comparação	Processo de Otimização
Melhor harmonia	Melhor estado	Ótimo global
Padrão estético	Estimado por	Função Objetivo
Som dos instrumentos	Estimado com	Valor das Variáveis
Cada ensaio, prática	Processo unitário	Cada iteração

Fonte: [111].

Os próprios parâmetros do método, juntamente com uma memória de soluções, interagem entre si produzindo novas harmonias. A representação de tais parâmetros pode

ser de forma binária, discreta e ou contínua, dependendo da característica de cada problema. Devido à sua natureza, ocorre uma convergência dos valores em um tempo computacional relativamente baixo, com bons resultados. O *HS* utiliza a própria função a ser otimizada, e não derivadas da mesma, apresentando regras de transição estocástica.

5.3 - O ALGORITMO DE BUSCA HARMÔNICA

Visando um melhor entendimento do *HS*, neste trabalho, os estágios envolvidos no processo de busca harmônica são apresentados e descritos, passo a passo, nas subseções seguintes: (5.3.1) Definição dos parâmetros do algoritmo e inicialização do problema; (5.3.2) Criação da Memória Harmônica; (5.3.3) Improvisação de novas harmonias; (5.3.4) atualização da memória harmônica; (5.3.5) Conferência da satisfação do critério de parada.

5.3.1 - Definição dos parâmetros do algoritmo e inicialização do problema

Deve-se especificar o problema de otimização, através de uma Função Objetivo e suas restrições [109], da seguinte forma:

$$\min f(x) \quad (5.1)$$

$$x_i \in X_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.2)$$

onde: $f(x)$ é a Função Objetivo; x_i é o conjunto de variáveis de decisão; n é o número de variáveis de decisão; X_i representa o domínio de soluções possíveis para cada variável.

Como exemplo, pode-se aplicar a Equação (4.1), estabelecida na página 43, na Eq. (5.1). Conforme demonstrado por [109], o critério de parada, a Taxa de Consideração da Memória Harmônica (TCMH), a Taxa de Ajuste de Tom (TAT), a Largura de Banda (lb) e o Tamanho da Memória Harmônica (TMH) são os parâmetros a serem definidos para inicialização do *Harmony Search*.

5.3.2 - Criação da Memória Harmônica

O Tamanho da Memória Harmônica (TMH) corresponde à quantidade de soluções que o *HS* irá acomodar em sua memória. Traçando um paralelo com o Algoritmo Genético, seria o equivalente à quantidade de indivíduos. A Memória Harmônica (MH) deve ser preenchida com TMH vetores aleatórios, representando, deste modo, as n variáveis de decisão. Assim, é criada a Memória Harmônica, MH_{TMH*N} .

5.3.3 - Improvisação de novas harmonias

Nesta parte do algoritmo o *HS* inicia sua busca pela harmonia perfeita. A criação do novo vetor harmonia pode ser explicada em mais detalhes com o auxílio da discussão do processo de improvisação musical. O novo vetor solução $x^t = [x_1^t, x_2^t, x_3^t, \dots, x_n^t]$ é gerado levando em consideração as três possibilidades de criação que o músico predispõe para a improvisação de uma nova harmonia: (a) compor novas e randômicas notas; (b) tocar qualquer parte famosa de uma música, exatamente como veio de sua memória; (c) tocar algo similar a um trecho conhecido (ajustando, dessa forma, o tom levemente). Ao formalizar estas três opções em um processo de otimização, obtêm-se três componentes correspondentes: (a) aleatoriedade, (b) uso de memória harmônica através da inteligência coletiva e (c) ajustes de tonalidade [81], [108]. O processo de improvisação do *HS* pode ser descrito pelo algoritmo apresentado no Quadro 5.2:

Quadro 5.2 – Algoritmo do processo de improvisação musical.

```
para (i = 1 até TMH) faça
  se (rand1 < TCMH) então  $x_i^t = x_i^{t-1}$ 
    se (rand2 < TAT) então  $x_i^t = x_i^t \pm lb \cdot rand$ 
  fim se
  se não  $x_i^t = rand * (UB_i - LB_i)$ 
  fim se
fim para
```

onde: UB_i e LB_i são respectivamente os limites superiores e inferiores das variáveis de decisão x_i^t .

É importante salientar, que tanto em (b) quanto em (c), o algoritmo faz uso da MH para criar o novo vetor harmonia. Em uma simulação onde o algoritmo opte pelo ajuste de uma solução já conhecida, x_i^t será a nova solução candidata, regida pela Eq. (5.3), a ser incorporada à MH. Portanto, assim como a TAT, TCMH, TMH, uma lb adequada é de suma importância para a convergência do método.

$$x_i^t = x_i^{t-1} \pm lb \cdot rand \quad (5.3)$$

5.3.4 - Atualização da Memória Harmônica

Neste ponto, o músico irá analisar se a nova nota está esteticamente melhor na harmonia que as notas da frase já existente. Já o programador julgará se os novos valores são mais atrativos para a Função Objetivo através da função *fitness*. Se a nova harmonia for melhor que as harmonias previamente existentes, então esse novo vetor solução é incluso na MH.

5.3.5 - Conferência da Satisfação do Critério de Parada

Como ação final de uma iteração, o algoritmo testará se o critério de parada foi satisfeito. Em caso de insucesso, deve-se improvisar uma nova harmonia, dando sequência ao processo de busca. Ao final do processo de otimização, com o critério de parada satisfeito e a convergência do método constatada, o algoritmo retorna um provável ótimo global.

5.4 - EXEMPLO TUTORIAL DO HARMONY SEARCH

A resolução do exemplo matemático representado pela Eq. (5.4) torna mais claro o entendimento do processo de busca harmônica. As Equações (5.5), (5.6) e (5.7) consistem nas restrições das quais o problema está sujeito. O critério de parada será a execução de 10 iterações.

$$\min f(X, Y, Z) = (X - 2)^2 + (Y - 3)^4 + (Z - 1)^2 + 3 \quad (5.4)$$

sujeito a:

$$X, Y, Z \leq 5 \quad (5.5)$$

$$X, Y, Z \geq 0 \quad (5.6)$$

$$X, Y, Z \in \mathbb{N} \quad (5.7)$$

Fazendo uma analogia com o PEEST, as variáveis X , Y , Z podem ser consideradas rotas de transmissão onde os custos referentes aos investimentos e cortes de carga são representados pela Eq. (5.4), onde o número máximo de reforços por rota é equivalente a 5.

5.4.1 - Inicialização do problema

Passo 1: deve-se definir os parâmetros iniciais do *HS*. Empiricamente, optou-se por considerar a taxa de consideração da memória harmônica, $TCMH = 0,8$; taxa de ajuste de tom, $TAT = 0,3$; tamanho do vetor solução, $TMH = 4$. Nesta solução, conforme a restrição do problema, optou-se por utilizar somente números naturais. Sendo assim, o passo inteiro, $b_p \in N = [0,1]$, é uma boa estimativa.

Passo 2: inicialização da memória harmônica. A matriz MH é preenchida por valores aleatórios que se encontram dentro da largura de banda e em conformidade com as restrições. Na Tabela 5.1, encontram-se os valores de MH aleatórios, assim como os respectivos valores de sua Função Objetivo.

Tabela 5.1 – Iteração 0 - Preenchimento da Memória Harmônica (MH).

X	Y	Z	f
1	3	4	13
2	3	2	4
5	5	5	44
1	0	3	89

5.4.2 - Primeira iteração do *Harmony Search*

Passo 3: a lógica apresentada em “5.3.3 - Improvisação de novas harmonias” é responsável por definir qual atitude o *HS* tomará, iniciando, assim, a primeira iteração. Supondo que o valor de $rand1 \in [0,1]$ seja 0,9435. Como o valor sorteado para $rand1$ foi superior a TCMH, seguindo a lógica de improvisação demonstrada no Quadro 5.2, o *HS* procurará uma solução aleatória. Esta solução aleatória pode ser qualquer uma que for condizente com as restrições (5.5), (5.6) e (5.7). Contudo, aleatoriamente foi definido que $x_t = \{2,3,3\}$. A Tabela 5.2 apresenta o resultado aleatório obtido no decorrer da primeira iteração do processo.

Tabela 5.2 – Iteração 1 - Nova solução aleatória proposta pelo *HS*.

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>f</i>
2	3	3	7

Passo 4: após definida a nova solução candidata a ser inserida na memória harmônica, $x_t = \{2,3,3\}$, fazem-se os testes necessários para visualizar se essa solução deverá ou não fazer parte da matriz MH. Para esta solução, o valor da função é 7. Como a meta do problema é minimizar a Função Objetivo, deve-se inspecionar se a pior solução contida no MH tem um valor maior que 7. A pior solução, $MH_{max} = \{1,0,3\}$, representa o valor 89 na FOb. Logo, $HM_{max} = \{1,0,3\}$ será descartado da MH e $x^t = \{2,3,3\}$ entrará em seu lugar, conforme demonstrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Iteração 1 - Memória Harmônica (MH).

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>f</i>
1	3	4	13
2	3	2	4
5	5	5	44
2	3	3	7

Passo 5: fim da primeira iteração. Embora $x^t = \{2,3,3\}$ tenha sido inserida na MH, verifica-se que o critério de parada não foi atendido, isto é, não foram executadas dez iterações. Logo, deve-se retornar ao passo 3.

5.4.3 - Segunda iteração do *Harmony Search*

De volta ao passo 3, isto é, ao processo de improvisação, o valor de $rand1 \in [0,1]$ sorteado para a segunda iteração foi equivalente a 0,3846. Dessa maneira, o algoritmo ao enxergar que o valor assumido para $rand1$ é menor que TCHM aciona a memória harmônica para a composição de x^t .

Com a certeza da utilização de MH nesta iteração, um novo sorteio envolvendo a variável $rand2$ faz-se necessário para definir se o *HS* utilizará a memória coletiva ou fará um ajuste em alguma das soluções existentes na MH. Por sorteio foi definido que $rand2 = 0,7584$. Assim, para esta iteração, $rand2$ é maior que o valor definido para a TAT, garantindo, dessa forma, que o *HS* optará pelo ajuste na MH.

Para este problema tutorial, onde as variáveis são inteiras, faz-se uma modificação na Equação original (5.3), para que se permita encontrar valores ajustados sem violar as restrições do problema. Tal alteração resulta na Eq. adaptada (5.8).

$$x_i^t = x_i^{t-1} \pm b_p \quad (5.8)$$

A partir do sorteio com chances iguais é possível definir qual x^{t-1} pertencente à Memória Harmônica será utilizado como base para a criação de x^t . No sorteio desta iteração foi definido que $x^{t-1} = \{1,3,4\}$.

Para este exemplo tutorial, foi definido a utilização de $b_p \in N = [0,1]$. Assim, por randomização, definiu-se para esta iteração $b_p = \{1,0,-1\}$. Logo, ao substituir x^{t-1} e b_p na Eq. (5.8), tem-se $x^t = \{2,3,3\}$. Conforme visto na iteração 1, o valor da Função Objetivo para esta solução corresponde a 7, o que é menor que a atual pior solução contida em MH. Sendo assim, o vetor x^t entrará na MH, excluindo, dessa forma, a solução

$MH_{max} = \{5,5,5\}$ da memória harmônica. Ao fim desta iteração, a matriz MH estará conforme a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Iteração 2 - Memória Harmônica (MH).

<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>f</i>
1	3	4	13
2	3	2	4
2	3	3	7
2	3	3	7

Ao final da segunda iteração, é possível notar que o sistema está convergindo, contudo são necessárias ainda mais algumas iterações para saciar o critério de parada.

5.4.4 - Terceira iteração do *Harmony Search*

De volta ao processo de improvisação, para esta iteração, o valor de $rand1 \in [0,1]$ sorteado foi 0,8846, obrigando o *HS* a procurar uma solução aleatória. Sendo assim, $x^t = \{4,1,2\}$, bem como, o valor da Função Objetivo para esta solução é 24. Levando em consideração que $HS_{max} = f(1,3,4) = 13$ é menor que o valor de $f(x^t) = f(4,1,2) = 24$, x^t será descartado, findando, assim, a iteração 3.

5.4.5 - Quarta iteração do *Harmony Search*

Ao considerar que para esta iteração, o valor de $rand1$ sorteado foi 0,7326, e que, posteriormente, $rand2$ foi equivalente a 0,2598, de acordo com o algoritmo apresentado na subseção 5.3.3, o *HS* consultará a memória harmônica com o objetivo de acessar a inteligência coletiva do método. Através de um novo sorteio com chances iguais entre as soluções da MH foi definido que $x^t = \{2,3,3\}$. Sendo assim, como $f(x^t) = f(2,3,3) = 7 < f(HM_{max}) = f(1,3,4) = 13$, x^t será incorporado à MH. A Tabela 5.5 apresenta a configuração da MH ao final da quarta iteração.

Tabela 5.5 – Iteração 4 - Memória Harmônica (MH).

X	Y	Z	f
2	3	3	7
2	3	2	4
2	3	3	7
2	3	3	7

5.4.6 - Demais iterações do *Harmony Search*

As iterações subsequentes serão a repetição do processo de improvisação até que o critério de parada seja satisfeito, isto é, o *HS* atinja dez iterações. A Tabela 5.6 demonstra o comportamento do *HS* entre a quinta e a última iteração.

Tabela 5.6 – Comportamento do *HS* entre a quinta e a última iteração.

Iteração	Método de improvisação	x^t	$f(x^t)$	HS_{max}	$f(HM_{max})$	MH	Critério de Parada
5	Ajuste	{2,3,4}	12	{2,3,3}	7	Mantém	Insatisfeito
6	Repetição	{2,3,2}	4	{2,3,3}	7	Altera	Insatisfeito
7	Repetição	{2,3,3}	7	{2,3,3}	7	Mantém	Insatisfeito
8	Ajuste	{2,3,1}	3	{2,3,3}	7	Altera	Insatisfeito
9	Aleatório	{2,3,0}	4	{2,3,3}	7	Altera	Insatisfeito
10	Ajuste	{2,3,1}	3	{2,3,2}	4	Altera	Satisfeito

Ao final das dez iterações previstas, o resultado obtido pelo *HS* é o demonstrado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Iteração 10 - Memória Harmônica (MH).

X	Y	Z	f
2	3	0	4
2	3	1	3
2	3	1	3
2	3	2	4

Voltando a analogia com o PEEST, o *HS* determinou que devam ser inseridos {2,3,1} reforços nas rotas {X,Y,Z} com um custo de investimento equivalente a 3.

5.5 - CONCLUSÃO PARCIAL

Ao final das 10 iterações previstas, o resultado obtido pelo *HS* para as variáveis {X,Y,Z} foi de {2,3,1}, valor equivalente a 3 na FOb. Embora o *HS* tenha encontrado a resposta correta para o problema em 10 iterações, é possível notar que nem todos os valores convergiram para o ótimo global. Isto é uma demonstração de que em apenas 10 iterações este problema pode convergir para um mínimo local e não para o global. Com mais iterações, o método aumentará suas probabilidades de convergir para uma MH composta somente por repetições do vetor solução {2,3,1}.

O *HS*, ao contrário da maioria das metaheurísticas, como o algoritmo genético, o *Bat Algorithm*, o *Ant Colony Optimization* e do *Particle Swarm Optimization*, por concepção, executa apenas uma alteração na frase musical por ensaio. Ou seja, somente uma das soluções contidas na MH é alterada por solução. Fazendo uma comparação com o AG, no *HS*, apenas um indivíduo da população é alterado por iteração. No entanto, a simplicidade matemática requerida pelo processo de improvisação do *Harmony Search* permite que *nn* iterações do *HS* sejam mais rápidas que uma única iteração do AG para *nn* indivíduos. Ademais, esta metaheurística possui grande adaptabilidade e facilidade de implementação, por tais motivos optou-se pela utilização desta metaheurística neste trabalho.

6 - *BRANCH & BOUND*

6.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o algoritmo de otimização combinatória *Branch & Bound*. A tradução literal do significado de *B&B* (divisão e poda) dá ideia da forma com que esta técnica de otimização procura o ponto ótimo. Este algoritmo divide (*to branch*) o problema inicial em subproblemas, a fim de executar uma enumeração sistêmica e inteligente nos subgrupos de soluções, fazendo, desta forma, com que apenas uma fração das possíveis soluções seja examinada. Para auxiliar o leitor no entendimento da técnica, na seção 6.3 o *B&B* é utilizado na solução do problema tutorial apresentado no capítulo 5.

6.2 - A IDEIA DO ALGORITMO

Dentre os algoritmos completos, uma estratégia cuja origem remonta aos anos cinquenta, conhecida como *Branch & Bound*, é usualmente empregada para resolver complexos problemas de otimização combinatória aplicados à indústria e comunidade acadêmica [113]. Proveniente da escola clássica de algoritmos, o *B&B* trabalha com o conceito de relaxar o problema (PEEST) e dividi-lo (*to branch*) em vários (*nt* estágios) subproblemas, de modo a encontrar a solução ótima para o problema inicial (PDEST) por comparações.

Ao contrário da enumeração exaustiva, o *B&B*, tem por característica exercer uma enumeração sistêmica e inteligente de todas as soluções possíveis. A cada iteração, seus limites inferiores (LI) e superiores (LS, ou para este trabalho, x_{sup}) são atualizados de modo a executar a poda (*to bound*) de conjuntos de soluções infrutíferas, trazendo, assim, eficiência ao método. É importante salientar que o algoritmo só atinge seu critério de parada quando os *n*-ésimos subproblemas são analisados. Ou seja, ao final do algoritmo a solução encontrada é a efetiva solução ótima.

Neste estudo, optou-se pela utilização do *B&B* no refinamento dinâmico das soluções contidas na Região de Soluções Estáticas. Contudo, propõe-se a criação de um

algoritmo baseado no *HS* para inicialização do *B&B*. Assim, busca-se assegurar um limite superior subótimo aumentando desta forma sua eficácia. A cada estágio do horizonte de planejamento, o método *B&B* poda os ramos mortos (planejamentos onde há cortes de carga) ou infectados (planos de expansão mais caros que o LS) e permite o crescimento dos bons galhos (soluções baratas e factíveis) até o fim do horizonte de planejamento.

6.3 - EXEMPLO TUTORIAL DO *BRANCH & BOUND*

O exemplo matemático apresentado na seção 5.4, página 54, cuja Função Objetivo, representada pela Equação (5.4), está sujeita às restrições (5.5), (5.6) e (5.7), será utilizado nesta seção para demonstração do *Branch & Bound*. Fazendo uma analogia com o PDEST, cada variável pode ser considerada um estágio do horizonte de planejamento, e cada valor assumido pela variável, como uma rota diferente a ser reforçada. Embora para esta FOb as variáveis não possuam relação direta entre elas, isto é, o valor de X não implica nenhuma condição em Y , ou em Z , e vice-versa, o exemplo demonstra o princípio utilizado pelo *B&B* para solução do PDEST. A falta de dependência entre as variáveis X , Y , Z traduz-se pela inexistência do acoplamento temporal, permitindo, desta maneira, a utilização do planejamento dinâmico desacoplado, ilustrado na Figura 4.2, para a solução deste problema.

As variáveis X, Y, Z são inteiras e com alcance restrito, variam de 0 e 5. Logo, valores que se opõem a essas restrições são considerados galhos mortos na árvore de soluções do *B&B*. Para este exemplo, essa definição é de fácil aplicação, e passa até despercebida, entretanto, em problemas mais robustos, como é o caso do PDEST, essa definição ganha maior importância.

6.3.1 - Inicialização do problema

Inicialmente, deve-se partir de uma solução inicial factível, de modo a ter-se um parâmetro base. Empiricamente, adota-se $x_{sup} = \{1,3,4\}$ como o limite superior, valor equivalente a 13 quando substituído na FOb. Ao analisar a Função Objetivo e suas

restrições, observa-se que o problema está sujeito a ter $6^3 = 216$ soluções diferentes. A Figura 6.1 ilustra todo o conjunto de soluções possíveis para este problema.

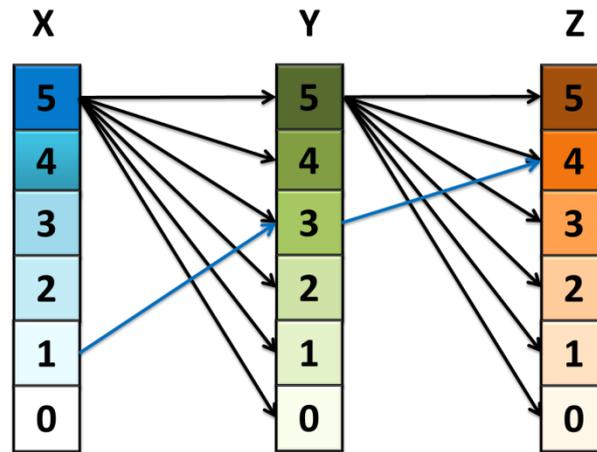


Figura 6.1 – Definição do espaço amostral e limite superior inicial do *Branch & Bound* para o exemplo tutorial.

Após a definição do limite superior, devem-se testar soluções e caminhos no intuito de varrer todo o espaço amostral de forma inteligente. O *B&B* é uma programação combinatória que executa uma otimização enumerativa inteligente, isto é, o *B&B* vasculha todos os conjuntos e subconjuntos de soluções do espaço amostral, para só assim, entrar no detalhe e alcançar a otimalidade.

6.3.2 - Primeira iteração do *Branch & Bound*

Testa-se, inicialmente, o primeiro conjunto de soluções, ou seja, as soluções para X , independente de Y e Z . Para tal, a contribuição de Y e Z é suprimida da FOb ao manter os valores iniciais de $\{3, 4\}$, respectivamente. Desta maneira, somente os valores referentes ao conjunto $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ serão modificados e comparados ao limite superior inicial, $x_{sup} = \{1, 3, 4\}$, onde $f(x_{sup}) = 13$. Ao substituir os diferentes valores para X na FOb, obtêm-se os seguintes valores de $f(X, 3, 4) = \{16, 13, 12, 13, 16, 21\}$. Logo, os valores para $\{X, Y, Z\} = \{[1, 2, 3], 3, 4\}$ possuem valores inferiores ao limite superior.

Assim, o limite superior, x_{sup} , adota o novo valor de {2, 3, 4}. Ao final dessa primeira iteração, o espaço amostral é reduzido pela metade ao excluir 108 soluções infectadas.

6.3.3 - Segunda iteração do *Branch & Bound*

Com a redução das possibilidades para X , o *B&B* passa para o segundo estágio do horizonte de planejamento, ou seja, para Y . No entanto, para se executar uma melhor varredura do conjunto de possíveis soluções, a variável Y é analisada com a contribuição das possíveis soluções para X . Ou seja, $\{X,Y,Z\}$ poderão adotar $\{[1,2,3],[0,1,2,3,4,5],4\}$ como possíveis soluções. A Tabela 6.1 apresenta os valores obtidos para esta iteração, e a relação dos mesmos com x_{sup} .

Tabela 6.1 – Valores obtidos na Iteração 2 do *Branch & Bound*.

$\{X,Y,Z\}$	f	x_{sup}	$\{X,Y,Z\}$	f	x_{sup}	$\{X,Y,Z\}$	f	x_{sup}
{1,0,4}	94	>	{2,0,4}	93	>	{3,0,4}	94	>
{1,1,4}	29	>	{2,1,4}	28	>	{3,1,4}	29	>
{1,2,4}	14	>	{2,2,4}	13	>	{3,2,4}	14	>
{1,3,4}	13	>	{2,3,4}	12	=	{3,3,4}	13	>
{1,4,4}	14	>	{2,4,4}	13	>	{3,4,4}	14	>
{1,5,4}	29	>	{2,5,4}	28	>	{3,5,4}	29	>

De acordo com a Tabela 6.1, ao final dessa iteração x_{sup} se manteve igual, ou seja, o menor valor da FOb conhecido ainda é $x_{sup} = 12$. No entanto, após esta iteração, o *B&B* foi capaz de descartar mais uma gama de soluções infrutíferas, levando o espaço amostral a ser reduzido para somente 6 possíveis soluções.

6.3.4 - Terceira iteração do *Branch & Bound*

Neste ponto do algoritmo, já foram testadas as variáveis X e Y , restando apenas a variável Z . Logo, $\{X,Y,Z\}$ poderão admitir os valores $\{2, 3, [0, 1, 2, 3, 4, 5]\}$. Para tais valores de $\{X,Y,Z\}$, a Fob assume os seguintes resultados, $f = \{4, 3, 4, 7, 12, 19\}$. Ao final

das três iterações, o algoritmo convergiu para a solução $\{X,Y,Z\} = \{2, 3, 1\}$, resultando em um valor equivalente a 3 na Função Objetivo.

Seguindo a analogia com o PDEST, seria o equivalente a dizer que nos estágios $\{X,Y,Z\}$ do horizonte de planejamento foram reforçadas as rotas $\{2, 3, 1\}$ com um custo de investimento equivalente a 3.

6.4 - CONCLUSÃO PARCIAL

O *Branch & Bound* é uma técnica de otimização utilizada para solucionar problemas com explosão combinatória. Esta técnica executa uma enumeração inteligente das possíveis soluções. Como exemplo, o problema testado neste capítulo convergiu para o ponto ótimo de operação em 3 iterações, onde foram testadas somente 21 das 216 soluções contidas inicialmente no espaço amostral, isso corresponde a uma taxa de soluções testadas inferior a 10% do espaço amostral.

Levando em consideração que o PDEST objetiva encontrar o plano ótimo de alocação dos recursos de investimentos para todo o horizonte de planejamento, o *B&B*, com sua busca inteligente e particionada surge como uma possível ferramenta de utilização na solução do problema.

7 - MÉTODO PROPOSTO

7.1 - INTRODUÇÃO

O PEEST pode ser formulado como um problema não linear contendo variáveis mistas do tipo contínuas e inteiras, sendo a região de solução não convexa. No PDEST, todavia, deve ser considerado também o acoplamento temporal. A Figura 7.1 ilustra o fluxograma do método proposto. Visando elencar e ilustrar as dificuldades já mencionadas para solucionar o problema, divide-se o procedimento para explicar a técnica em três etapas: o primeiro bloco é voltado à determinação das rotas relevantes e redução do espaço amostral através do Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC); o segundo bloco resolve o PEEST e fornece ao próximo estágio uma região de soluções ótimas estáticas; no terceiro e último bloco, o *HS-B&B* faz o PDEST, a partir de todas as soluções do PEEST, a fim de encontrar a melhor solução dinâmica considerando o acoplamento temporal.

7.2 - PROBLEMA MESTRE-ESCRAVO

Nesta formulação, o PEST é rearranjado de modo a ser colocado como um problema com a relação mestre-escravo. Devido a não linearidade proporcionada pelo acoplamento temporal dos investimentos, somada aos custos associados ao corte de carga, o PEST se torna um PNLIM. No entanto, é possível dividir o problema de expansão da transmissão em mestre (não linear) e escravo (linear).

O problema mestre, responsável por tentar minimizar a parte da FOb, Eq. (4.1), associada aos custos é sujeita às restrições (4.8), (4.9) e (4.10). Em outras palavras, a minimização do problema mestre envolve a criação de um PEST com o menor custo de investimento possível, desde que este não implique em corte de carga na rede de transmissão durante o horizonte de planejamento.

Graças ao avanço computacional das últimas décadas, as metaheurísticas e algoritmos heurísticos vêm ganhando espaço cada vez maior neste nicho relacionado a problemas de otimização combinatória não linear. Visando solucionar este problema, nesta

dissertação o autor propõe a associação de várias técnicas de otimização em um método híbrido, intitulado *HS-B&B*, cujo objetivo é ofertar ao planejador um PDEST ótimo.

O problema escravo, por sua vez, contém toda característica linear referente à otimização do fluxo de potência CC associado aos cortes de carga, representados pelas gerações fictícias na Eq. (4.1), sujeito às restrições (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7). Em outras palavras, levando em consideração os altos custos associados ao déficit de energia, a minimização do corte de carga pode ser considerada um subproblema de otimização linear cuja solução confere factibilidade aos planos orquestrados pelo *HS-B&B*. Para resolução do problema de fluxo de potência ótimo linearizado sem perdas, foi utilizado o Método dos Pontos Interiores via *toolbox* LINPROG do MatLab. O Apêndice B introduz uma explicação sobre o funcionamento da metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores na resolução de problemas de FPO.

A Figura 7.1 corresponde ao fluxograma simplificado do método proposto. Neste fluxograma, as atividades em cinza “FPO Linearizado (MPI)” representam a resolução do problema escravo.

Em suma, a resolução do problema mestre envolve sugerir planos de reforços da rede ao problema escravo, que em contrapartida, retorna a factibilidade ou não destes planejamentos. Esta relação ocorre em todas as etapas de resolução do PDEST. A solução destes dois problemas de maneira acoplada é equivalente à resposta do PNLIM inicial.

7.3 - ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO

O Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) tem por objetivo reduzir o conjunto inicial de rotas candidatas à expansão a um selecionado e relevante grupo de rotas com maior probabilidade de fazerem parte dos PEEST e PDEST ótimos. Este tipo de algoritmo, quando bem utilizado, ou seja, quando reduz o espaço amostral de maneira eficiente, resulta em um aumento da taxa de convergência, bem como, na redução do tempo de simulação dos algoritmos de planejamento em sistemas elétricos [23], [44], [57], [114].

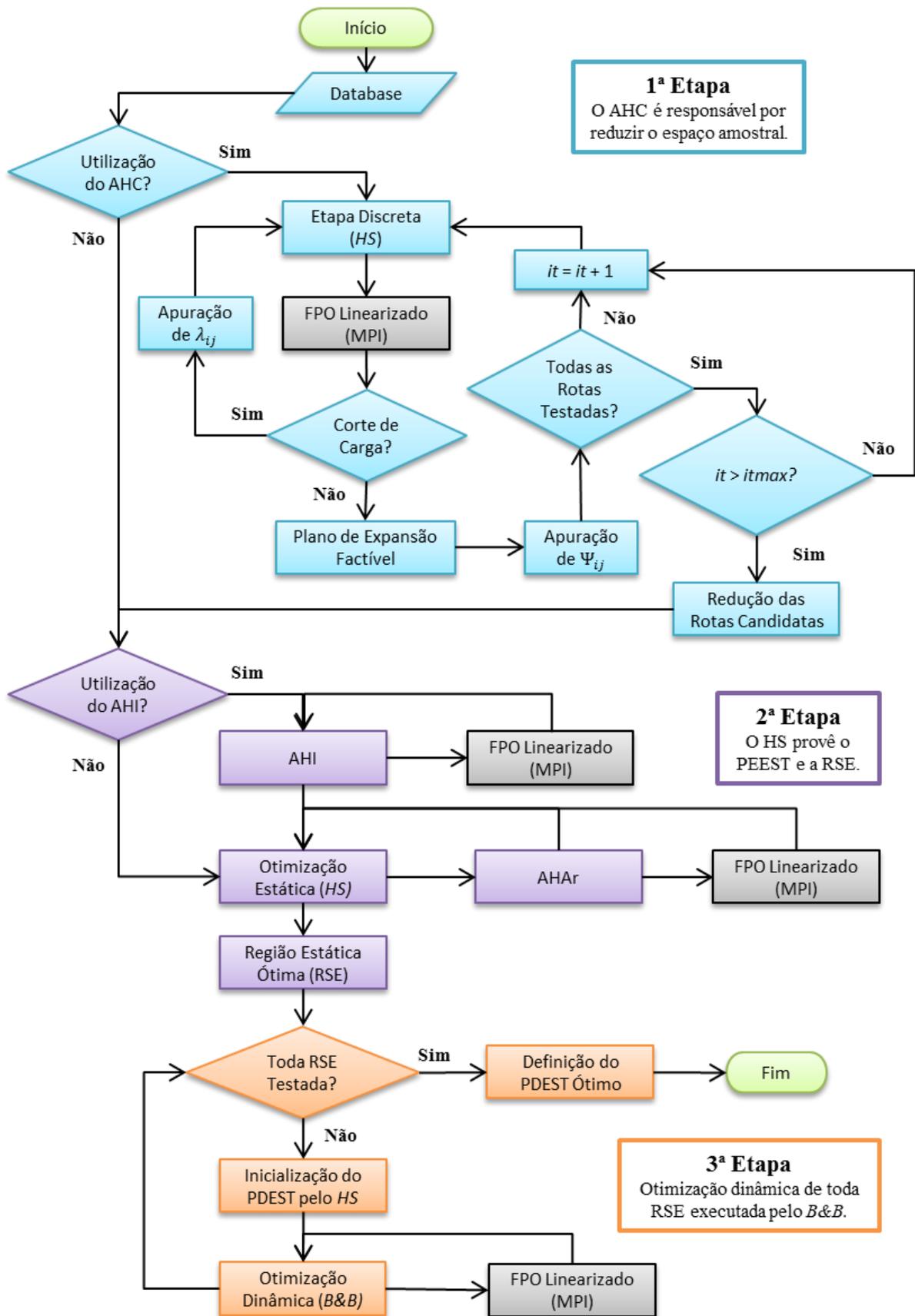


Figura 7.1 – Fluxograma do Método Proposto.

Na Figura 7.1, it representa a iteração vigente do AHC; $itmax$ é o limite máximo de iterações permitido ao Algoritmo Heurístico Construtivo. Neste estudo, optou-se por utilizar $itmax$ equivalente a 50 PEESTs factíveis. Contudo, este número pode variar a critério do planejador.

O Algoritmo Heurístico Construtivo utilizado nesta dissertação é descrito em azul na Figura 7.1, onde o fluxograma do método proposto é ilustrado. Inicialmente, o algoritmo *HS-B&B* confere a necessidade de criação de um plano de expansão ao testar o sistema vigente com a demanda requisitada para o último estágio de planejamento. Ao detectar um corte de carga superior ao limite máximo permitido (o somatório dos cortes de carga de todas as barras do sistema deve ser inferior a 1 MW), o *HS-B&B* certifica-se da necessidade de um planejamento de expansão. Contudo, cabe ao planejador a definição da utilização ou não, tanto do AHC, quanto do AHI na etapa estática de otimização do processo. Com o objetivo de disponibilizar ao leitor a melhor explicação possível sobre o *HS-B&B*, a apresentação do método híbrido proposto abordará a utilização dos algoritmos heurísticos construtivo, de inicialização do PEEST e Antirretrabalho.

O AHC é iniciado com a proposta de TMH planejamentos aleatórios provenientes do *HS-B&B*, onde cada planejamento é testado e, deste modo, verificado sua factibilidade. Em [25], foi proposto um AHC cuja taxa de carregamento médio, Ψ_{ij} , era baseada, exclusivamente, no preenchimento da capacidade de escoamento percentual da linha de transmissão nos PEEST factíveis. No presente trabalho, Ψ_{ij} é também valorizado pela capacidade inserida em relação ao custo de instalação, conforme a Equação (7.1). Ademais, o método de redução do espaço amostral proposto nesta dissertação acopla informações provenientes dos multiplicadores de Lagrange, λ_{ij} , nos PEEST infactíveis.

A relação entre custo de investimento e média do fluxo de potência passante em cada linha de transmissão candidata, Ψ_{ij} , é obtida conforme a Equação (7.1), a partir de todas as soluções factíveis testadas pelo AHC. Este índice, Ψ_{ij} , representa a utilização média da potência instalada por dólar investido. Depois de obtido Ψ_{ij} para cada rota candidata, deve-se compará-lo ao ψ_{min} para definição de sua relevância, conforme as Equações (7.2) e (7.3).

$$\Psi_{ij} = \sum_{it=1}^{itmax} \frac{fc_{ij}^{nt}}{nl_{ij}^{nt} \cdot C_{ij}^0}, \quad \forall (i, j) \in C \quad (7.1)$$

$$\psi_{min} = \text{m\u00e9dia}(\Psi_{ij}) \quad (7.2)$$

$$\Psi_{ij} \geq \psi_{min} \rightarrow \begin{cases} \text{Sim} \Leftrightarrow \text{relevante} \\ \text{N\u00e3o} \Leftrightarrow \text{dispens\u00e1vel} \end{cases} \quad (7.3)$$

onde: fc_{ij}^{nt} \u00e9 o fluxo de pot\u00eancia na rota candidata i - j no \u00faltimo est\u00e1gio do horizonte de planejamento; C_{ij}^0 \u00e9 o custo de investimento da rota i - j no est\u00e1gio inicial de planejamento; nl_{ij}^{nt} \u00e9 a quantidade de refor\u00e7os inseridos ao longo dos $itmax$ planejamentos de expans\u00e3o; Ψ_{ij} \u00e9 utiliza\u00e7\u00e3o m\u00e9dia da pot\u00eancia instalada por d\u00f3lar investido em cada linha de transmiss\u00e3o candidata i - j ; ψ_{min} \u00e9 o carregamento m\u00ednimo necess\u00e1rio para ingresso de rotas candidatas no conjunto das rotas relevantes pelo crit\u00e9rio de m\u00e9dia do fluxo passante.

O mesmo se aplica ao multiplicador de Lagrange, que \u00e9 comparado a um \u00edndice λ_{min} , obtido atrav\u00e9s das Equa\u00e7\u00f5es (7.4), (7.5) e (7.6), para ingresso no conjunto de rotas relevantes. Tanto Ψ_{ij} , quanto λ_{ij} s\u00e3o obtidos a partir de an\u00e1lises sobre os refor\u00e7os candidatos \u00e0 expans\u00e3o sugeridos pelos PEESTs. A grande diferen\u00e7a entre Ψ_{ij} e λ_{ij} est\u00e1 na Eq. (7.2), onde ψ_{min} \u00e9 definido em fun\u00e7\u00e3o da m\u00e9dia de Ψ_{ij} , diferentemente da Eq. (7.5), onde λ_{min} \u00e9 definido em fun\u00e7\u00e3o da m\u00e9dia e vari\u00e2ncia de λ_{ij} .

A diferen\u00e7a entre as Eqs. (7.2) e (7.5) se deve gra\u00e7as ao comportamento abrupto dos multiplicadores de Lagrange quando encontram relev\u00e2ncia em uma linha de transmiss\u00e3o constru\u00edda e/ou candidata. O custo atribu\u00eddo para o corte de carga, assim como o de instala\u00e7\u00e3o de um refor\u00e7o ou nova rota de transmiss\u00e3o, \u00e9 da ordem de milh\u00f5es de d\u00f3lares. Desse modo, os custos marginais referentes a estes circuitos, λ_{ij} , tendem a ser maiores quando encontram relev\u00e2ncia, o que se traduz por uma demonstra\u00e7\u00e3o abrupta em v\u00e1rios casos. Em vista disso, a maneira encontrada para permitir que valores menos expl\u00edcitos, no entanto relevantes, sejam inclu\u00eddos no grupo de relev\u00e2ncia proveniente dos multiplicadores de Lagrange \u00e9 a ado\u00e7\u00e3o da m\u00e9dia e a vari\u00e2ncia na Eq. (7.5) na defini\u00e7\u00e3o de λ_{min} .

$$\lambda_{ij} = \sum_{it=1}^{itmax} \frac{lamb_{ij}^{nt}}{nl_{ij}^{nt}}, \quad \forall (i,j) \in C \quad (7.4)$$

$$\lambda_{min} = média(\lambda_{ij}) - VAR(\lambda_{ij}) \quad (7.5)$$

$$\lambda_{ij} \geq \lambda_{min} \rightarrow \begin{cases} Sim \Leftrightarrow relevante \\ Não \Leftrightarrow dispensável \end{cases} \quad (7.6)$$

onde: $lamb_{ij}^{nt}$ é o multiplicador de Lagrange referente a rota candidata $i-j$ no último estágio do horizonte de planejamento de cada simulação; λ_{ij} é o custo marginal médio para cada linha de transmissão candidata $i-j$; λ_{min} é o custo marginal mínimo necessário para ingresso de qualquer rota candidata $i-j$ no conjunto das rotas relevantes por meio do multiplicador de Lagrange.

As iterações do AHC só são contabilizadas quando há a obtenção de um PEEST factível, isto é, $it = it + 1$, se, e somente se, o PEEST sugerido pelo AHC for factível. Contudo, durante o processo de refinamento proposto pelo AHC, é tão necessário que todas as rotas candidatas sejam observadas e testadas ao menos uma vez em PEESTs factíveis e infactíveis, quanto it alcançar o limite máximo de iterações, $itMax$, para que o AHC termine suas operações. O critério de parada adotado para o AHC foi o paralelismo entre esses dois conceitos enumerados neste parágrafo.

Ao final dessa rodada de testes, o AHC optará por aquelas rotas que se destacaram em relação às outras quanto à taxa de carregamento e/ou multiplicador de Lagrange. Isto é, as rotas construídas que obtiverem Ψ_{ij} e/ou λ_{ij} acima dos seus respectivos indicadores mínimos serão selecionadas para o reduzido conjunto das rotas relevantes candidatas à expansão.

A fim de garantir um maior conjunto de rotas, optou-se, nesta dissertação, por fazer a união dos conjuntos de relevância obtidos por carregamento percentual médio e pelos multiplicadores de Lagrange. Este conjunto é muito pertinente, pois reduz exponencialmente o espaço amostral dos problemas de PEST.

O PEEST pode ser considerado como um problema de solução exponencial simples, onde, assim como na Tabela 4.1, as probabilidades de inserção de nenhum ou dois

reforços na rota de transmissão PE_{ij}^t são as mesmas possibilidades que a criação de um caminho PE_{sz}^t . Posto isto, a Eq. (7.7) exprime a quantidade de soluções possíveis do PEEST, quando aplicado o AHC.

O PDEST é um problema de multiestágios, onde, devido ao acoplamento temporal, cada estágio influi no próximo, e assim por diante, até o final do horizonte de planejamento. No entanto, assim como no PEEST, os caminhos de transmissão não exercem influência na probabilidade de inserção ou não de outra rota qualquer. Desse modo, do ponto de vista estatístico, o PDEST se caracteriza como um problema de combinação completa, onde o conjunto de soluções possíveis é descrito pela Eq. (7.8) [115].

$$(X_{max} + 1)^{NR-ex} \quad (7.7)$$

$$\left(\frac{(nt + X_{max})!}{nt! \cdot X_{max}!} \right)^{NR-ex} \quad (7.8)$$

onde: NR é o número de rotas candidatas iniciais; ex é o número de rotas excluídas; X_{max} é a quantidade máxima de expansões por rota.

7.4 - PLANEJAMENTO ESTÁTICO DE EXPANSÃO

Com o conjunto de rotas relevantes definido, este é então passado ao processo de otimização estática feita pelo HS , metaheurística apresentada no capítulo 5. Neste estudo, foi incorporado um algoritmo de inicialização para que a região de otimização estática fosse encontrada com maior eficiência. Além disso, foi inserido um Algoritmo Heurístico Antirretrabalho, que após todo plano de expansão estático sugerido pelo HS , faz uma análise se o PEEST é ou não uma solução previamente conhecida, evitando, desta forma, a reavaliação de soluções previamente conhecidas pela MH .

7.4.1 - Algoritmo Heurístico de Inicialização do planejamento estático de expansão

O Algoritmo de Heurístico de Inicialização foi desenvolvido especificamente para localizar mínimos locais em problemas de PEEST. Na Figura 7.2, onde é ilustrada a inicialização de um problema de minimização sem a utilização do AHI, as soluções iniciais se encontram, aleatoriamente, fora dos pontos mínimos. Por outro lado, a Figura 7.3 ilustra a mesma FOb, porém com a utilização do AHI. Comparativamente, as soluções iniciais partindo de mínimos locais propostas na Fig. 7.3, se encontram muito mais próximas do mínimo global, que a tentativa de inicialização aleatória, ilustrada na Figura 7.2.

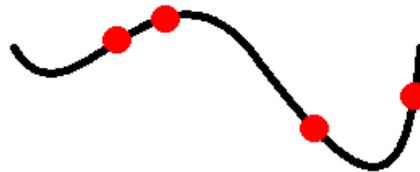


Figura 7.2 – Ilustração da inicialização aleatória em um problema de minimização.



Figura 7.3 – Ilustração da inicialização de um problema de minimização com a utilização do AHI.

A memória harmônica é inicializada com as piores respostas factíveis possíveis: o limite máximo de expansão em cada rota. Para cada solução prévia da MH, o AHI faz um ajuste fino das soluções iniciais e chega, de forma aleatória, a mínimos locais para o PEEST. Como?

A técnica de “escorregamento” das soluções iniciais para mínimos locais é descrita da seguinte maneira: Retira-se uma linha candidata por vez e checa-se a factibilidade da solução N-1 para a primeira solução contida na MH. Caso seja factível, muda-se a rota e retira-se outra LT, assim sucessivamente, até que se depare com a não factibilidade do PEEST. Logo, reinsere-se a última linha retirada do PEEST, tornando-o novamente

factível. Deste modo, segue-se observando outras rotas, até que todos os ramos estejam no limite mínimo para o PEEST factível. Ao final deste processo, quando não houver mais rotas candidatas a serem excluídas do plano de expansão, sem que o PEEST final, se torne infactível, é a certeza de que se chegou a um mínimo local. O AHI passa, então, para o refinamento da próxima solução proveniente da memória harmônica, onde o processo se repete até que todas as soluções contidas na MH sejam mínimos locais.

7.4.2 - Algoritmo Heurístico Antirretrabalho no planejamento estático de expansão

O Algoritmo Heurístico Antirretrabalho (AHAr) trabalha em parceria com o *HS* somente nas situações onde a metaheurística opta por uma solução totalmente aleatória ou com um pequeno ajuste. Nas iterações onde o *HS* utiliza a inteligência coletiva do método, ou seja, o $PEEST_j$ é a repetição de uma solução k previamente conhecida da MH, o AHAr inibe o cálculo de fluxo de potência dessa solução j e insere o $PEEST_j$ no lugar da pior resposta anteriormente vigente na MH.

O AHAr propõe a criação de códigos para cada planejamento de expansão, onde cada vetor solução, $PEEST_x$, é codificado e alocado em uma memória específica de fácil acesso. A alocação desses códigos no banco de dados é executada de maneira sucessiva, onde cada nova solução proposta (diferente das previamente conhecidas) pelo *HS* se torna um novo e único código no banco de dados antirretrabalho.

A codificação é executada de maneira semelhante à obtenção de números binários, contudo, a definição se o código será binário, ternário ou quaternário, depende do número máximo de expansões permitidas por rota. Ao se utilizar $X_{max} = 2$, admite-se $[0, 1, 2]$ como as possíveis soluções para cada caminho, desta forma, a codificação seria ternária. Tomando o exemplo tutorial descrito na seção 5.4 como exemplo, onde foi sugerido que as variáveis $\{X, Y, Z\}$ representariam três rotas de transmissão diferentes precisando ser reforçadas a um custo mínimo de investimento, poder-se-ia supor que $X_{max} = 5$. Desse modo, os valores sugeridos para inicialização do problema seriam codificados conforme a Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Exemplo de codificação do Algoritmo Heurístico Antirretrabalho.

X	Y	Z	f	Codificação	Índice sequencial	Código no AHAr
1	3	4	13	$1 \cdot 6^0 + 3 \cdot 6^1 + 4 \cdot 6^2$	1	163
2	3	2	4	$2 \cdot 6^0 + 3 \cdot 6^1 + 2 \cdot 6^2$	2	92
5	5	5	44	$5 \cdot 6^0 + 5 \cdot 6^1 + 5 \cdot 6^2$	3	215
1	0	3	89	$3 \cdot 6^0 + 0 \cdot 6^1 + 1 \cdot 6^2$	4	109

O MatLab 9.2.0.538062 (R2017a), ferramenta base para as simulações desta dissertação, foi utilizado em um notebook Dell, Intel core i5-480M, 2.67GHz e 6.0GB de RAM. Posto isto, a maior ordem factível encontrada para a utilização desta lógica, sem a utilização de números decimais, foi de 10^{15} . Desta maneira, considerando $X_{max} = [1, 2, 3, 4]$, cada vetor sequencial do banco de dados do AHAr admite abranger, respectivamente, [53, 33, 26, 22] rotas de expansão.

Para sistemas mais robustos, como o equivalente do Sul do Brasil (79 caminhos candidatos), faz-se necessária a criação de outra sequência de vetores correspondentes às rotas não abrangidas pela primeira coluna do banco de dados do AHAr. A Tabela 7.2 exemplifica como seria a codificação de um $PEEST_x$, em um sistema com 79 rotas candidatas, caso as rotas 1, 2, 3, 10 e 79 tivessem parâmetro de expansão equivalente a 1.

Tabela 7.2 – Exemplo da codificação adotada pelo Algoritmo Heurístico Antirretrabalho em um planejamento de expansão que vise reforços unitários nas rotas 1, 2, 3, 10 e 79.

X_{max}	Rotas do $PEEST_{x1}$	Cod. $x1$	Rotas do $PEEST_{x2}$	Cod. $x2$	Rotas do $PEEST_{x3}$	Cod. $x3$	Rotas do $PEEST_{x4}$	Cod. $x4$
2	[1, ..., 33]	19696	[34, ..., 66]	0	[67, ..., 99]	531441	-	-
3	[1, ..., 26]	262165	[27, ..., 52]	0	[53, ..., 78]	0	[79, ..., 104]	1
4	[1, ..., 22]	1953156	[23, ..., 44]	0	[45, ..., 66]	0	[67, ..., 88]	244140625

A Tabela 7.2 demonstra que a quantidade de rotas abrangidas pelos vetores $PEEST_{xn}$, assim como a codificação resultante do AHAr, varia dependendo do número máximo de expansões permitidas por rota. Uma vez codificado, a checagem e conferência de retrabalho do $PEEST_x$ é executada por meio do comando *find* do MatLab, conforme a estrutura de repetição apresentada no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Processo de codificação e conferência executado pelo Algoritmo Heurístico Antirretrabalho.

```
z = 1;
% supondo um sistema com 79 linhas candidatas e  $X_{max} = 2$ .
enquanto z < quantidade (Cod. xn) faça % para  $X_{max} = 2$ , têm-se 3 codificações.
    auxz = find (PEESTxz == Banco de dadosz)
% auxz são z vetores contenedores dos índices sequenciais encontrados nos z banco de
% dados.
    se z > 1 então
        auxz = intersect( auxz-1 , auxz ) % interseção entre os vetores z e z-1.
    fim se
    se ~ isempty ( auxz ) então % se auxz estiver vazio, é um novo PEEST.
        z=z+1
    se não break
    fim se
fim enquanto
```

Ao final desta estrutura de pesquisa e conferência, se aux_z for um vetor vazio, é sinal de que se trata de um PEEST_x desconhecido do *HS-B&B*. Este novo PEEST_x, será analisado e seu código gravado no banco de dados do *AHAr*. Por outro lado, se for constatada a presença de algum índice em aux_z , o PEEST_x trata-se então, de uma solução previamente conhecida, ou seja, uma solução que não necessita ser reavaliada, podendo, assim, ser descartada.

7.4.3 - Processo de otimização estática

Com o processo de otimização partindo de soluções satisfatórias, o *HS* volta-se, então, para a busca do mínimo PEEST, respeitando as restrições de balanço de potência e discretização dos parâmetros de expansão. Destaca-se a evolução do método para que as soluções uma vez testadas, jamais sejam reanalisadas, evitando, dessa forma, que o *HS* ande em círculos, aumentando ainda mais a eficiência do mesmo ao livrar-se do retrabalho.

É importante salientar que ao contrário do que convencionalmente se faz ao otimizar um processo, nesta metodologia, o *HS* foi modificado para encontrar não somente

um único Planejamento Estático Ótimo ($PEEST_{min}$), mas também para disponibilizar uma Região de Soluções Estáticas (RSE), a ser refinada, posteriormente, na parte dinâmica do método proposto. Ou seja, a otimização estática por zona fornecerá os melhores PEESTs à expansão dinâmica. A Figura 7.4 ilustra o conceito de zona ótima, modelado matematicamente pela Eq. (7.9), onde, empiricamente, é definido fazer parte da RSE aqueles $PEEST_y$ que tenham custos de investimento inferiores aos de $PEEST_{min} \cdot (1 + tx)$.

$$Custo(PEEST_y) \leq Custo(PEEST_{min}) \cdot (1 + tx) \rightarrow PEEST_y \in RSE \quad (7.9)$$

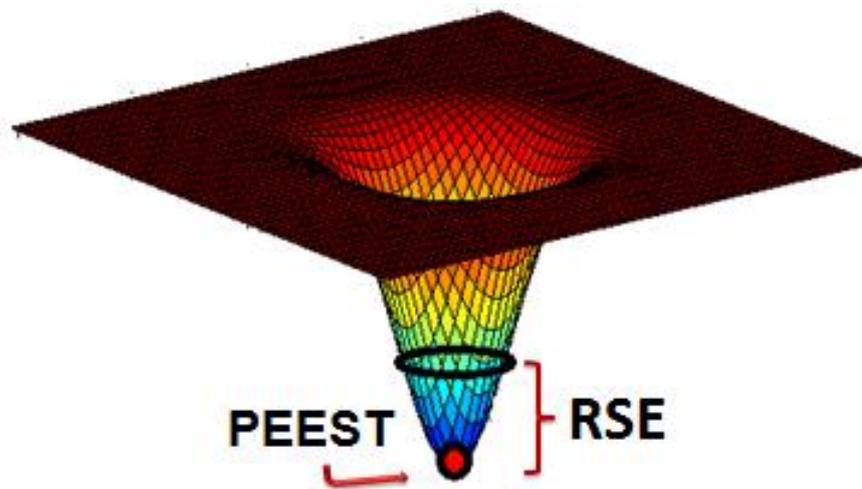


Figura 7.4 – Ilustração da Região de Soluções Estáticas (RSE).

Fonte: adaptado de [21].

O processo de otimização estática é executado até que todas as soluções contidas na MH se mantenham com custo de investimento iguais entre si por no mínimo 20% das iterações já ocorridas no processo de busca harmônica. Em outras palavras, caso tenham se passado 50 iterações do *Harmony Search* (*itHS*) no processo estático de otimização, o somatório das FObs de todas as soluções contidas na MH deve permanecer imutável por no mínimo 10 iterações para que o critério de parada seja atingido. Se $itHS = 1000$, a FOb de todas as soluções deve permanecer inerte por no mínimo 200 iterações, e assim por diante. No entanto, para que o critério de parada descrito neste parágrafo seja habilitado, foi definida uma quantidade mínima de cinco iterações do *HS*.

7.5 - PLANEJAMENTO DINÂMICO DE EXPANSÃO

Após vários cortes e reduções no espaço amostral, efetuados pelos algoritmos heurísticos e o *HS*, o conjunto de soluções possíveis candidatas à PDEST ótimo, se torna bem reduzido. Desse modo, pelo fato do *Branch & Bound* ser um algoritmo assertivo na obtenção do ponto ótimo, este foi o escolhido para executar o PDEST, objetivo final e principal do algoritmo híbrido de otimização proposto neste trabalho.

O procedimento que descreve o processo de otimização dinâmico é representado em laranja no fluxograma da Figura 7.1. Esta etapa do método visa encontrar o PDEST de todas as soluções estáticas contidas na RSE, respeitando o acoplamento temporal e evitando os possíveis cortes de carga. A fim de apurar a atuação do *B&B* e encontrar com maior rapidez o melhor PDEST, é feita a distribuição das soluções estáticas através do *HS*. Neste algoritmo de inicialização utilizado exclusivamente para o planejamento dinâmico, é dada prioridade à inserção das rotas mais baratas, atrasando ao máximo a construção de rotas mais caras. Quando mais de uma rota tem o mesmo preço de construção, então é priorizada aquela que possuir a melhor taxa de carregamento médio, Ψ_{ij} , calculada pelo AHC. Caso o planejador opte pela não utilização do AHC, o *HS-B&B*, aleatoriamente, optará por um dos caminhos.

Com um PDEST subótimo em mãos, o *B&B* encarrega-se de procurar a solução ótima, vasculhando sistematicamente, estágio por estágio, os diversos subgrupos de soluções, procurando por respostas melhores que a solução inicial sugerida pelo *HS*. Como o *B&B* já parte de um bom parâmetro de resposta, a poda da árvore de soluções passa a ser executada, não somente observando as restrições de factibilidade do planejamento multiestágios, mas também comparando o custo de investimento do PDEST inicial, x_{sup} , ao das novas inserções executadas em cada etapa do horizonte de planejamento. Isto é, além de podar os galhos mortos, representados pelos PDESTs ineficazes, o *B&B* também executa o corte prévio de planejamentos dinâmicos que requeiram alto custo de investimento nos estágios iniciais e (antes de chegarem aos estágios finais do horizonte de planejamento) apresentem custos finais superiores à melhor solução conhecida pelo algoritmo híbrido proposto.

Após toda RSE testada, o método compara os possíveis PDESTs a fim de encontrar a melhor solução, ou seja, o PDEST ótimo.

7.6 - EXEMPLO TUTORIAL DO MÉTODO PROPOSTO

Assim como foi apresentado nos capítulos 5 e 6, faz-se necessária a solução de um exemplo tutorial utilizando o método proposto. Para tal, utilizou-se o sistema sugerido por Mendonça [24].

Conforme a ilustração da Figura 7.5, o sistema tutorial em questão tem quatro barras. Dentre elas: três barras delas são, exclusivamente, de carga (PQ); e somente uma das barras é de geração ($V\theta$). As barras 1, 2 e 3 estão ligadas pelas linhas de transmissão existentes 1-3 e 2-3. Já a barra 4 está isolada, fato tal que faz com que este sistema seja não conexo. Logo, a existência de subsistemas ilhados apresenta também uma grande dificuldade enfrentada nos problemas de PEST, a singularidade da matriz hessiana da solução. Diferentemente de [23], [24], [26], [27], [41], que utilizam circuitos fictícios com susceptância próxima de 0 para conectar os sistemas desconexos, a estratégia adotada neste método corresponde a análise dos subsistemas separadamente. Ou seja, neste caso há inicialmente dois subsistemas diferentes: o primeiro é composto pelas barras 1, 2 e 3; o segundo é composto somente pela barra 4. Caso houvessem mais barras isoladas, o método utilizar-se-ia de n -ésimos subsistemas, quantos necessários, para garantir da independência linear das soluções propostas ao problema de planejamento.

A fim de garantir a factibilidade matemática de todo e qualquer plano de expansão, os problemas de operação do sistema elétrico são contornados através da inserção de geradores fictícios com custo operacional elevado (MUS\$1,00/MWh) nas barras de carga. Estes geradores fictícios estão representados por (r) na Figura 7.5.

A inflação adotada neste exemplo foi equivalente a 5%, isto é, a taxa anual de interesse, $tx = 5\%$. O máximo escoamento de potência nas rotas existentes e candidatas é equivalente ao nominal. A potência base utilizada foi de 100 MW. O tamanho da memória harmônica foi equivalente a 10.

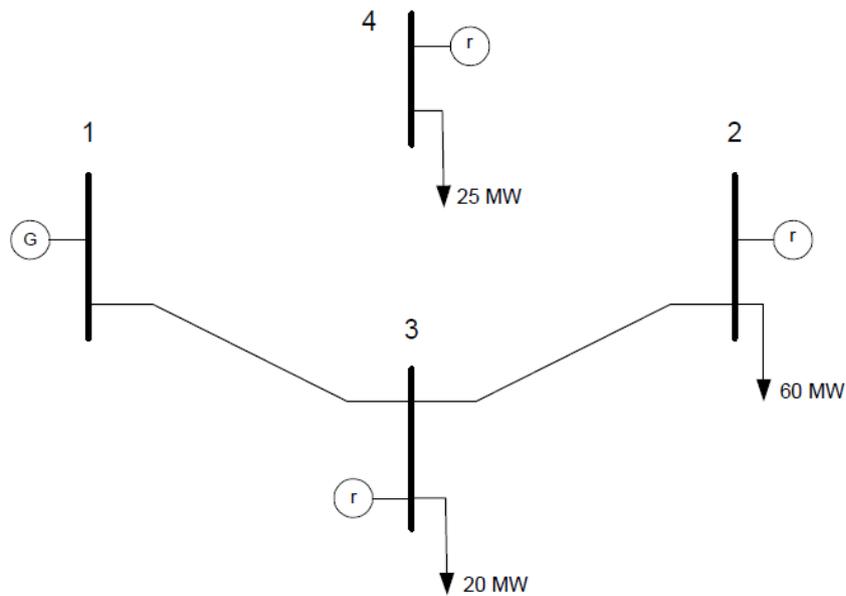


Figura 7.5 – Representação ilustrativa do sistema tutorial.

Fonte: [24].

Conforme a Tabela 7.3, a demanda inicial do problema é de 52,5 MW, o que equivale à metade da demanda final de 105 MW. O horizonte de planejamento foi dividido em 7 estágios, onde a demanda tem crescimento linear de 7,5 MW por estágio. É importante ressaltar que a unidade geradora (G) tem capacidade de geração suficiente para atender a demanda prevista ao final do horizonte de planejamento (105 MW), ficando o problema restrito apenas aos limites de fluxo de potência ativa das linhas de transmissão.

Tabela 7.3 – Dados de geração e cargas do sistema tutorial.

Barra	Capacidade de Geração (MW)	Carga Inicial (MW)	Carga Final (MW)	Custo (US\$/MWh)
1	120,0	0,0	0,0	0,00
2	0,0	30,0	60,0	1000,00
3	0,0	10,0	20,0	1000,00
4	0,0	12,5	20,0	1000,00

As Tabelas 7.4 e 7.5, respectivamente, apresentam os dados dos circuitos existentes e candidatos do sistema tutorial. Com exceção da rota 3-4, todos os outros caminhos

possíveis permitem a possibilidade de expansão do sistema de transmissão. Contudo, somente um reforço é permitido por rota, isto é, $X_{max} = 1$.

Tabela 7.4 – Dados dos circuitos existentes do sistema tutorial.

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-3	1	200	40
2-3	1	200	40

Tabela 7.5 – Dados dos circuitos candidatos do sistema tutorial.

Rota	Caminhos Candidatos	\overline{Exp}_{ij}^0	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)	Custo de Investimento (US\$)
1	1-2	1	300	30	3.000,00
2	1-3	1	200	40	900,00
3	1-4	1	200	40	2.000,00
4	2-3	1	200	40	900,00
5	2-4	1	200	40	2.000,00

Uma vez definido e modelado o problema tutorial, pode-se, então, dar início à verificação da necessidade de um planejamento de expansão. Esta verificação dar-se-á através da constatação de corte de carga (déficit) no fluxo de potência ótimo para a topologia inicial do sistema, quando utilizada a demanda final do horizonte de planejamento. Para esta configuração do sistema, com a matriz de admitâncias (B_{bus}) equivalente à Equação (7.10), o FPO obtém a resposta contida na Tabela 7.6.

$$B_{bus} = \begin{bmatrix} -0,50 & 0 & 0,50 & 0 \\ 0 & -0,50 & 0,50 & 0 \\ 0,50 & 0,50 & -1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Conforme observado na Tabela 7.6, há corte de carga nas barras 2 e 4. Sendo assim, faz-se a necessidade de um plano de expansão.

Tabela 7.6 – Verificação da necessidade de um plano de expansão na topologia base do sistema tutorial.

Barra	Tipo	Geração (p.u.)	Ângulos (rad)	C'_d (MUS\$)
1	V θ	0,40	0,00	0,00
2	PQ	0,40	-1,20	0,40
3	PQ	0,00	-0,80	0,00
4	PQ	0,25	-3,14	0,25
Custo total da Fob				0,65

7.6.1 - Utilização do Algoritmo Heurístico Construtivo

Conforme as Eq. (7.7) e (7.8), respectivamente, o PEEST tem um total de 32 soluções iniciais. Já o PDEST, devido ao acoplamento elétrico, larga com 32768 soluções possíveis. Sendo assim, o AHC sugere diversos planos de expansão aleatórios ao algoritmo, a fim de colher informações sobre os planejamentos e selecionar um conjunto reduzido de rotas candidatas à expansão.

Supondo que o plano de expansão inicial sugerido pelo AHC prevê reforço na rota 1-3 e ampliação do sistema entre 1-4, logo, $PEEST_1 = [0, 1, 1, 0, 0]$. Considerando demanda total de 105 MW, para este plano de expansão, o custo de investimento equivale a US\$2900,00, contudo, o fluxo ótimo de potência convergiu para um déficit de 20 MW na Barra 2. Associando os custos de investimento do problema mestre-escravo, há um total de US\$20.002.900,00 para esta solução infactível.

Embora $PEEST_1$ seja infactível, o AHC colhe informações referentes aos multiplicadores de Lagrange das rotas candidatas inseridas. Assim, $\lambda_{ij} = [0, 0, 0, 1, 0]$ será somada a um vetor histórico dos λ_{ij} para a futura obtenção de média e variância.

O $PEEST_1$ é descartado e o AHC cria aleatoriamente $PEEST_2 = [0, 1, 0, 1, 0]$, cujo custo de investimento é US\$1.800,00. Entretanto, há um corte de carga equivalente a 25 MW na barra 4, impossibilitando, assim, a factibilidade do $PEEST_2$. Para este caso, $\lambda_{ij} = [0, 0, 0, 0, 0]$, isto é, para esta configuração, não adianta em nada reforçar as rotas 1-3 e 2-3 que o corte de carga na barra 4 será mantido em 25 MW.

Ao contrário dos planos anteriores, o $PEEST_3 = [0, 1, 1, 1, 0]$ é factível e possui custo de investimento de US\$3.800,00. Este plano prevê a criação da rota 1-4, assim como o reforço nos circuitos 1-3 e 2-3. Para o AHC, o fator de sensibilidade interessante em planos factíveis é o carregamento percentual dos ramos candidatos, Ψ_{ij} . Para o $PEEST_3$, $\Psi_{ij} = [0, 1, 5/8, 3/4]$. Isto significa que quando $PEEST_3$ estiver em vigência, o fluxo de potência passante nas linhas 1-3, 2-3 e 1-4 serão, respectivamente, de 100%, 62,5% e 75% da capacidade das rotas construídas. Em termos de factibilidade, o mesmo acontece com $PEEST_4 = [0, 1, 1, 1, 1]$ com um custo de investimento equivalente a US\$5.800,00 e $\Psi_{ij} = [0, 0.81, 1, 0.56, 0.37]$.

Inúmeros planos são gerados, dependendo do critério de parada do planejador. O importante é que todas as rotas sejam testadas ao menos uma vez para $PEEST$ factíveis (Ψ_{ij}) e infactíveis (λ_{ij}). Ao final deste processo, o AHC calculará a média e variância desses índices de sensibilidade a fim de obter o conjunto de relevância.

Após inúmeros planos testados, o algoritmo colheu informações de todas as rotas candidatas e alcançou *itmax*. Logo, de acordo com a Figura 7.6, para o índice normalizado baseado no fluxo de potência passante nas rotas candidatas, o AHC enxergou relevância nas rotas 2, 3 e 4, isto é, 1-3, 1-4 e 2-3. Já para o índice de sensibilidade baseado nos multiplicadores de Lagrange, a Figura 7.7 mostra que o AHC optou pelas rotas 1, 2 e 3, ou seja, 1-2, 1-3 e 1-4. Vale ressaltar que o resultado obtido nesta simulação é único e não representa a garantia das melhores rotas, pois a heurística adotada faz o uso de planos aleatórios para a redução do espaço amostra.

Ao fazer a união desses dois conjuntos de respostas, chega-se ao seletivo grupo das rotas relevantes: 1, 2, 3 e 4, isto é, optou-se pela exclusão apenas da rota 2-4. Após a utilização do AHC, ao aplicar as Equações (7.7) e (7.8) no novo espaço amostral, para este exemplo específico, o $PEEST$ passou a ter 16 soluções possíveis e o $PDEST$, 4096. Respectivamente, o novo conjunto de soluções estáticas possíveis tem 50% do tamanho original. Já o conjunto de soluções dinâmicas reduziu suas possíveis soluções para aproximadamente 12,5% do espaço amostral original.

Figura 7.6 – Conjunto de rotas relevantes definidas pelo AHC para o índice de sensibilidade baseado no fluxo médio percentual passante em cada rota candidata.

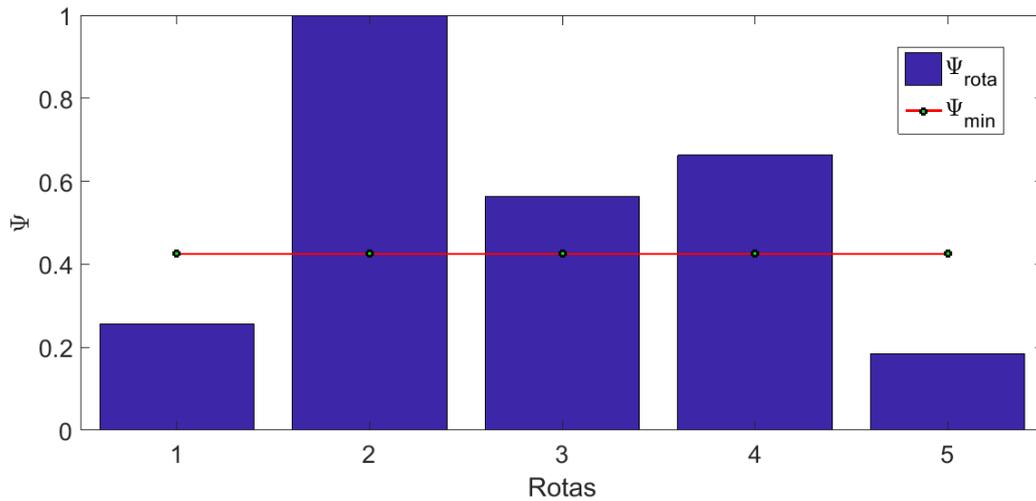
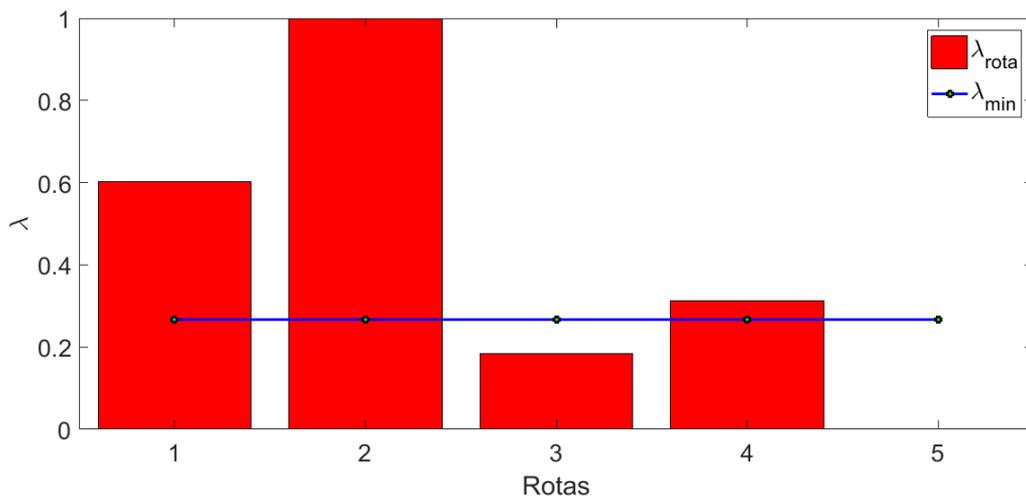


Figura 7.7 – Conjunto de rotas relevantes definidas pelo AHC para o índice de sensibilidade baseado nos multiplicadores de Lagrange em cada rota candidata.



7.6.2 - Obtenção da Região de Soluções Estáticas

O conjunto reduzido de soluções, quando bem definido, reduz o espaço amostral e auxilia na busca pelo ponto ótimo. Após a utilização do AHC, a metodologia preconiza que o *HS* deva ser utilizado na obtenção do PEEST e sua região de soluções estáticas.

De acordo com a Tabela 7.7, para este exemplo específico, o AHC atuou de modo a restar ao PEEST somente 16 soluções possíveis, onde apenas duas delas são factíveis.

Logo, o *HS* prevê, como PEEST ótimo, a criação da rota 1-4 e reforços em 1-2 e 1-3 a um custo de investimento de US\$3.800,00.

Tabela 7.7 – PEEST e RSE do exemplo tutorial.

Rotas				Factibilidade	Custo (US\$)
1-2	1-3	1-4	2-3		
0	0	0	0	Não	-
0	0	0	1	Não	-
0	0	1	0	Não	-
0	0	1	1	Não	-
0	1	0	0	Não	-
0	1	0	1	Não	-
0	1	1	0	Não	-
0	1	1	1	Sim	3.800,00
1	0	0	0	Não	-
1	0	0	1	Não	-
1	0	1	0	Não	-
1	0	1	1	Não	-
1	1	0	0	Não	-
1	1	0	1	Não	-
1	1	1	0	Não	-
1	1	1	1	Sim	6.800,00

Com o objetivo de demonstrar o funcionamento do *HS*, deixando, desta forma, o exemplo mais didático, é possível supor a não utilização do AHC. Logo, o conjunto original de rotas candidatas (1-2, 1-3, 1-4, 2-3 e 2-4) será a base para o *HS* encontrar o PEEST e a RSE.

A Figura 7.8 apresenta a convergência do *HS*. Note que para este caso não foi utilizado o algoritmo de inicialização apresentado em 7.4.1 para o *HS*, pois todas as soluções iniciais contidas na memória harmônica (MH) são $x^0 = [1, 1, 1, 1, 1]$, refletindo um custo de investimento inicial de US\$8.800,00. Conforme demonstrado na Figura 7.9, com a utilização da heurística de inicialização, o gráfico de evolução da metaheurística *Harmony Search* já se inicia com o PEEST ótimo na maioria das soluções contidas na MH.

Conforme a Eq. (7.9), o limite máximo da RSE é calculado em função de PEEST e tx . Para $tx=5\%$, o valor de investimento máximo permitido para ocupação da RSE é de US\$3.990,00. No entanto, somente a o PEEST = [1, 1, 1, 0, 0], com investimento de US\$3.800,00 se encaixa nesse perfil.

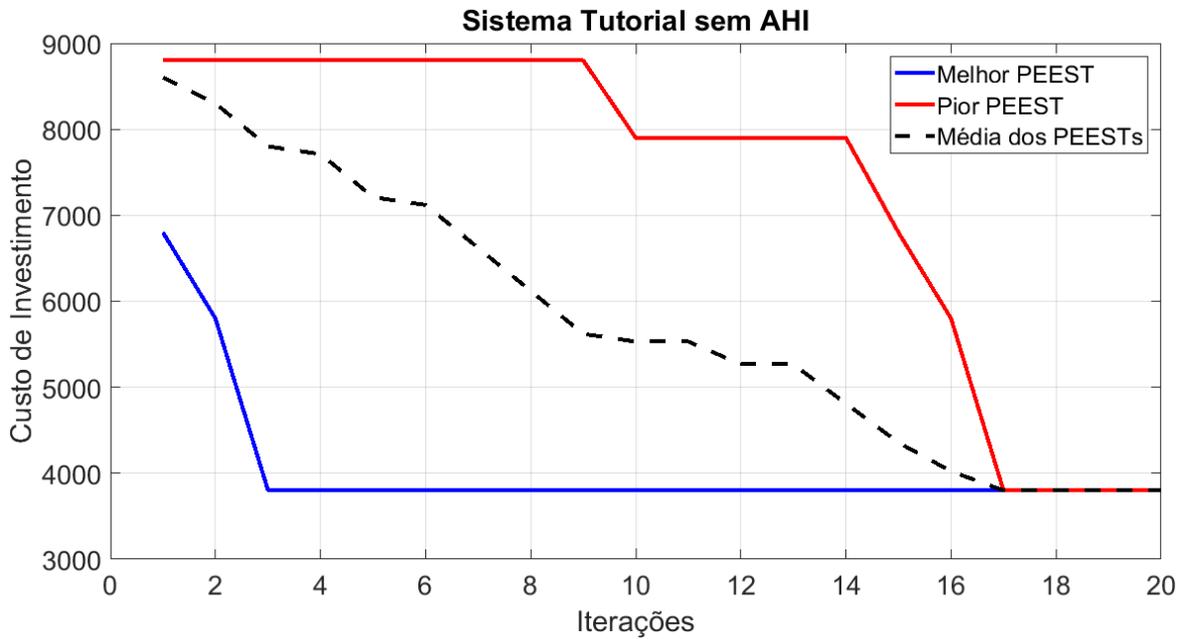


Figura 7.8 – Evolução do *Harmony Search* sem a utilização do algoritmo de inicialização.

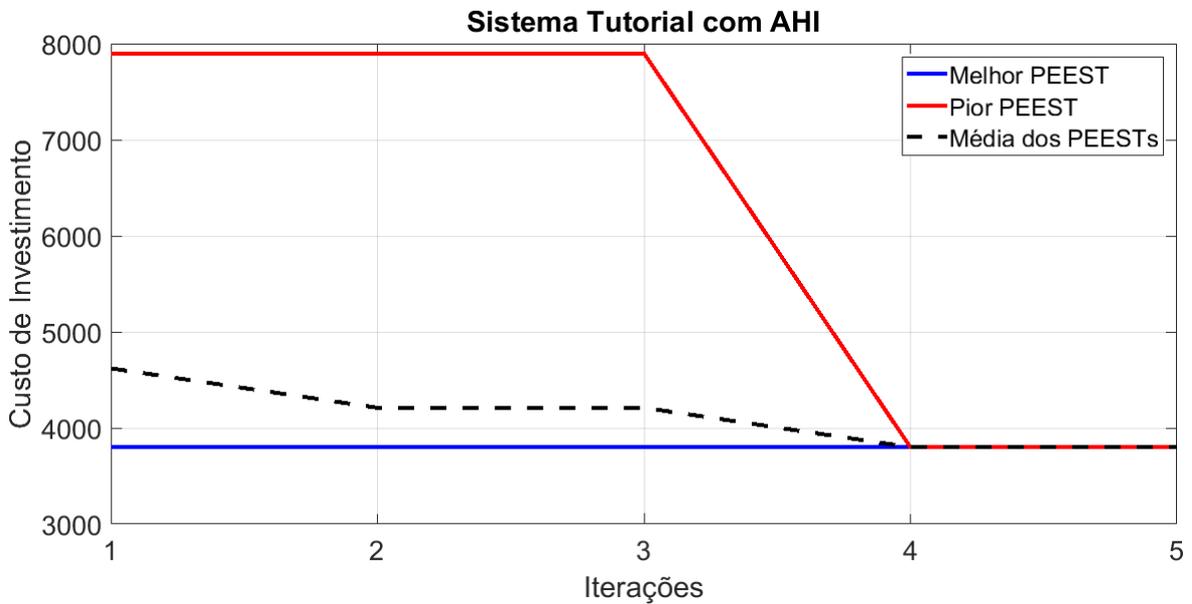


Figura 7.9 – Evolução do *Harmony Search* com o algoritmo de inicialização.

7.6.3 - Planejamento Dinâmico via *Branch and Bound*

Para este sistema tutorial apenas uma única solução foi considerada para fazer parte da Região de Soluções Estáticas (RSE). Contudo, conforme o método proposto, é necessário encontrar o PDEST de toda RSE via *B&B* para conclusão do método, ou seja, neste ponto de execução do algoritmo, o *HS-B&B* buscará pela solução dinâmica do PEEST = [0, 1, 1, 1, 0] encontrado na seção anterior.

7.6.3.1 - Inicialização do *Branch & Bound*

A inicialização do *B&B* é dada através de uma heurística adaptada com base nos fundamentos do *HS*. Este algoritmo visa inserir rotas no planejamento somente quando necessário. Ao detectar corte de carga superior ao máximo permitido, 1 MW, o algoritmo tenta inserir a rota de expansão mais barata prevista na etapa estática, caso esta não seja possível, a heurística de inicialização tentará outros ramos, até que encontre o conjunto mais barato de instalação para determinado estágio no horizonte de planejamento. Quando ocorrer LTs que satisfaçam a demanda e tenham o mesmo custo de inserção no sistema, esta heurística optará pelo conjunto que possuir maior Ψ_{ij} (calculado pelo AHC). Para este caso, o algoritmo de inicialização optou pela configuração apresentada na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Configuração inicial proposta ao *B&B* no problema tutorial.

Investimento Estático		US\$3.800,00
Ano	Rotas	C_{ij}^t (US\$)
1	1-4	2.000,00
2	1-3	857,14
3	-	-
4	2-3	777,45
5	-	-
6	-	-
7	-	-
Investimento Dinâmico		US\$3.634,60

Caso o planejador tenha optado pela não utilização do AHC, quando existir mais de uma rota com o menor custo, a heurística de inicialização escolherá aleatoriamente o(s) melhor(es) circuito(s).

Com o resultado inicial apresentado na Tabela 7.8, o *B&B* passa a ter esta resposta como limite superior, x_{sup} . Ou seja, na otimização dinâmica, as respostas para serem consideradas pelo *B&B* terão, obrigatoriamente, valores iguais ou inferiores a x_{sup} .

7.6.3.2 - Primeira iteração do Branch & Bound na resolução do problema tutorial

O primeiro estágio deste planejamento dinâmico possui um corte de carga equivalente a 12,5 MW na Barra 4. Logo, o *B&B* deve se utilizar das suas combinações para executar este planejamento. A Tabela 7.9 apresenta os planos possíveis para o primeiro estágio de planejamento.

Tabela 7.9 – Resultado da primeira iteração do *Branch & Bound* no problema tutorial.

PDEST	Estágio 1			Factibilidade	Investimento Parcial (US\$)	Relação com x_{sup}	Otimidade
	Rotas possíveis						
	1-3	2-3	1-4				
1	1	1	Sim	3.800,00	>	Não	
1	0	1	Sim	2.900,00	<	Talvez	
0	1	1	Sim	2.900,00	<	Talvez	
0	0	1	Sim	2.000,00	<	Talvez	
1	1	0	Não	-	-	Não	
0	1	0	Não	-	-	Não	
1	0	0	Não	-	-	Não	
0	0	0	Não	-	-	Não	

Para esta primeira iteração, o *B&B* encontrou quatro respostas factíveis. No entanto, todas estas respostas tem um elo comum, a criação da rota 1-4, como pode ser observado na Figura 7.10. Para esta iteração, somente a criação do caminho 1-4 resolve o primeiro estágio do planejamento, não havendo necessidade de mais reforços. Caso obtivéssemos três respostas totalmente diferentes: a primeira (1-2 e 1-3); a segunda (1-2 e 1-4); a terceira

(1-3 e 1-4), o *B&B* enxergaria três conjuntos de soluções diferentes. Porém, as quatro respostas obtidas são somente variações da resposta principal: criação da rota 1-4.

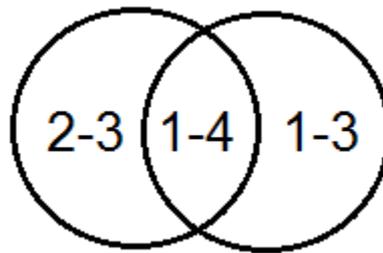


Figura 7.10 – Conjunto de soluções ótimas propostas no primeiro estágio do planejamento dinâmico.

7.6.3.3 - Segunda iteração do Branch & Bound na resolução do problema tutorial

Com a definição da criação do caminho 1-4 na topologia do sistema, as possíveis soluções para o segundo estágio do problema se reduzem a três possibilidades, conforme a Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Resultado da segunda iteração do *Branch & Bound* no problema tutorial.

PDEST	Estágio 2		Factibilidade	Investimento Parcial (US\$)	Relação com x_{sup}	Otimalidade
	Rotas possíveis 1-3	2-3				
0	0	0	Não	-	-	Não
0	1	0	Não	-	-	Não
1	0	1	Sim	2.857,14	<	Talvez
1	1	1	Sim	3.714,29	>	Não

Além da resposta (1-3 e 2-3) ser uma derivação da melhor resposta (1-3), o que já caracterizaria a poda deste conjunto de soluções, a inserção dessas duas rotas no estágio 2 traduz-se em um custo de investimento maior que $x_{sup} = 3.634,60$. Desse modo, o *B&B* opta pela inserção apenas da rota 1-3 no segundo estágio do planejamento dinâmico.

7.6.3.4 - Terceira iteração do Branch & Bound na resolução do problema tutorial

A atuação do *B&B* só se faz necessária novamente no quarto estágio de planejamento deste exemplo tutorial. Logo, com somente a rota 2-3 a disposição, o *HS-B&B* faz a inserção dessa rota, totalizando, assim, um PDEST equivalente ao obtido na Tabela 7.8. A Figura 7.11 ilustra o PEEST proposto para este sistema tutorial em questão.

A fim de demonstrar a eficiência do método, o PEEST = [1, 1, 1, 1, 0] foi testado pelo *B&B*, de modo que, as respostas encontradas foram todas superiores à resposta obtida na Tabela 7.8.

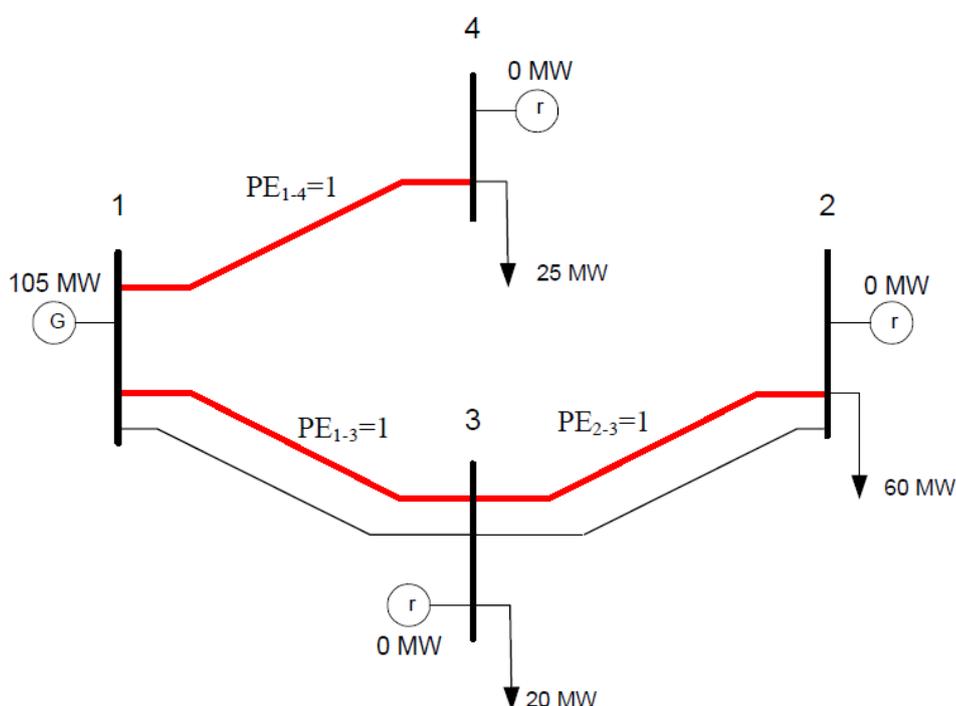


Figura 7.11 – Planejamento estático de expansão proposto pelo *HS-B&B* ao sistema tutorial.

7.7 - CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta para solução do planejamento dinâmico de expansão em sistemas de transmissão. A divisão da metodologia em três etapas com objetivos distintos facilitou a atuação dos algoritmos nas etapas posteriores de solução do problema. A fim de facilitar o entendimento e futuras replicações

do processo de solução proposto nesta dissertação, foi apresentado detalhadamente o algoritmo *HS-B&B* atuando na solução de um problema tutorial.

O Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) auxilia na redução do conjunto de rotas candidatas. Já o *Harmony Search* executa o planejamento estático e sugere planos a serem dinamizados pelo *Branch and Bound*. Desse modo, o sistema consegue encontrar uma boa solução para este problema de programação não linear e variáveis mistas, possibilitando, assim, o uso do *HS-B&B* para o PDEST de diversos sistemas elétricos de potência.

8 - RESULTADOS E ANÁLISES

8.1 - INTRODUÇÃO

Nesta seção são executados testes com o sistema-teste IEEE Garver [33], com o modelo do sistema Sul brasileiro [116] e um sistema de 10 barras, *Two Valleys*, baseado no IEEE Garver, proposto por de Oliveira et al. [25]. Foram testadas e comparadas tanto as soluções do PEEST de [24] e [26], como as do PDEST [27].

Em todas as simulações foram considerados um horizonte de planejamento de 10 anos, isto é, 10 estágios; taxa anual de interesse, $tx = 10\%$; a demanda do primeiro ano equivalente a 50% da demanda final e crescimento linear; corte de carga máximo de 1 MW por estágio de planejamento; escoamento máximo das rotas equivalente ao nominal. Os dados de geração, carga e linhas de transmissão dos sistemas mencionados neste capítulo estão contidos no Apêndice A.

Para finalizar as operações do AHC, *it* deve alcançar *itmax*, bem como, todas as rotas serem analisadas ao menos uma vez em PEEST factíveis e infactíveis. A estagnação do *HS* foi o critério de parada utilizado na otimização estática. Ao detectar que as últimas iterações da metaheurística (20% de *itHS*) não obtiveram qualquer mudança no vetor de custos de investimentos, o critério de parada era atingido. Por outro lado, o *B&B*, por ser um algoritmo de otimização combinatória, teve a análise sistêmica de todos os subgrupos de soluções como critério de parada.

As taxas de convergência apresentadas neste capítulo foram calculadas pela relação simples entre a quantidade simulações com obtenção do PEEST ótimo previamente conhecido pela comunidade acadêmica e o total de simulações executadas.

Todos os testes foram realizados utilizando o MatLab 9.2.0.538062 (R2017a) no mesmo notebook Dell com as seguintes características: Intel core i5-480M, 2.67GHz e 6.0GB de RAM. A fim de demonstrar a robustez e eficácia do método, todos os sistemas foram testados utilizando os Algoritmos Heurísticos Construtivo, de Inicialização do PEEST e Antirretrabalho. Os tempos mínimos, máximos e médios para convergência do *HS-B&B* para todos os casos podem ser encontrados nas Tabelas 8.20, 8.21 e 8.22.

8.2 - SISTEMA IEEE GARVER

Originalmente proposto por Garver [33], este sistema de 6 barras, 6 ramos existentes, 15 ramos candidatos e demanda total de 760MW no último estágio, apesar de pequeno, ilustra as maiores dificuldades encontradas na resolução do PDEST. Por exemplo, o acoplamento temporal e a explosão combinatória das soluções, expressa na Eq. (7.8).

As tabelas do Apêndice A.2 contêm os dados referentes ao sistema em questão. A Figura 8.1 ilustra o sistema Garver.

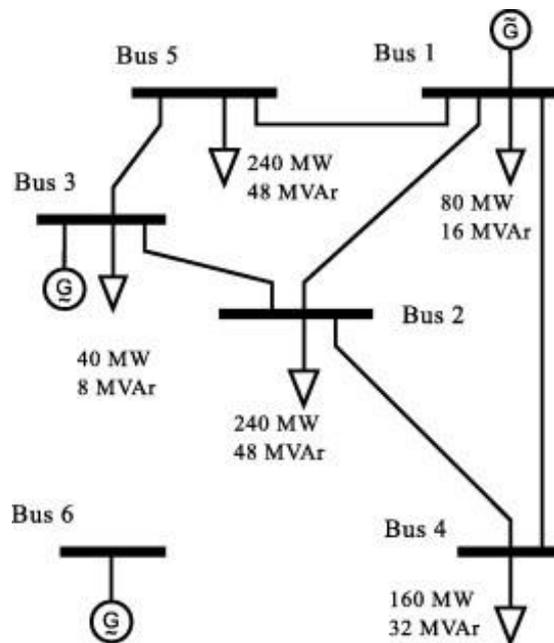


Figura 8.1 – Topologia inicial do sistema IEEE Garver.

Para o sistema IEEE Garver serão executadas análises com as mais diferentes configurações. Para cada uma dessas configurações permitidas para expansão, o sistema será testado com despacho de geração fixa, e também com redespacho das potências injetadas pelas unidades geradoras. A Tabela 8.1 apresenta as especificações de cada simulação. Para obtenção dos resultados demonstrados nesta seção 8.2, foram realizados 300 testes para cada tipo diferente de simulação.

Tabela 8.1 – Diferentes configurações e premissas para as simulações com o sistema Garver.

Garver		Premissas das simulações			
Simulação	Redespacho	X_{max}	AHC	AHI	PDEST
1ª Simulação	Não	4	Não	Não	Não
2ª Simulação	Não	4	Não	Sim	Não
3ª Simulação	Não	4	Sim	Sim	Não
4ª Simulação	Sim	2	Não	Sim	Sim
5ª Simulação	Sim	2	Sim	Sim	Sim
6ª Simulação	Sim	3	Não	Sim	Sim
7ª Simulação	Sim	3	Sim	Sim	Sim

8.2.1 - Sistema Garver sem redespacho de potência na geração

Conforme a Tabela 8.1, esta análise mantém o despacho de potência predefinido. Uma vez que isto acontece, se torna impossível manter o balanço de potência ativa representado pela Eq. (4.2) na análise dinâmica, pois as cargas se alteram em cada estágio do horizonte de planejamento, o que não ocorre com a geração fixa, isto é, sem redespacho. Deste modo, para os testes sem redespacho, o algoritmo híbrido *HS-B&B* é orientado a encerrar suas atividades com a obtenção do PEEST.

8.2.1.1 - Primeira simulação

Para esta restrição de geração no sistema foram permitidos quatro reforços por rota de transmissão, $X_{max} = 4$. De acordo com a Eq. (7.7), para esta configuração o sistema Garver dispõe de $5^{15} \approx 3 * 10^{10}$ soluções estáticas possíveis. Como parte dessa simulação, nenhuma das técnicas heurísticas propostas para solução do problema foi utilizada. A Figura 8.2 apresenta a convergência do método nessas configurações. Já a Tabela 8.2 apresenta o plano de expansão estático proposto pelo *HS-B&B*.

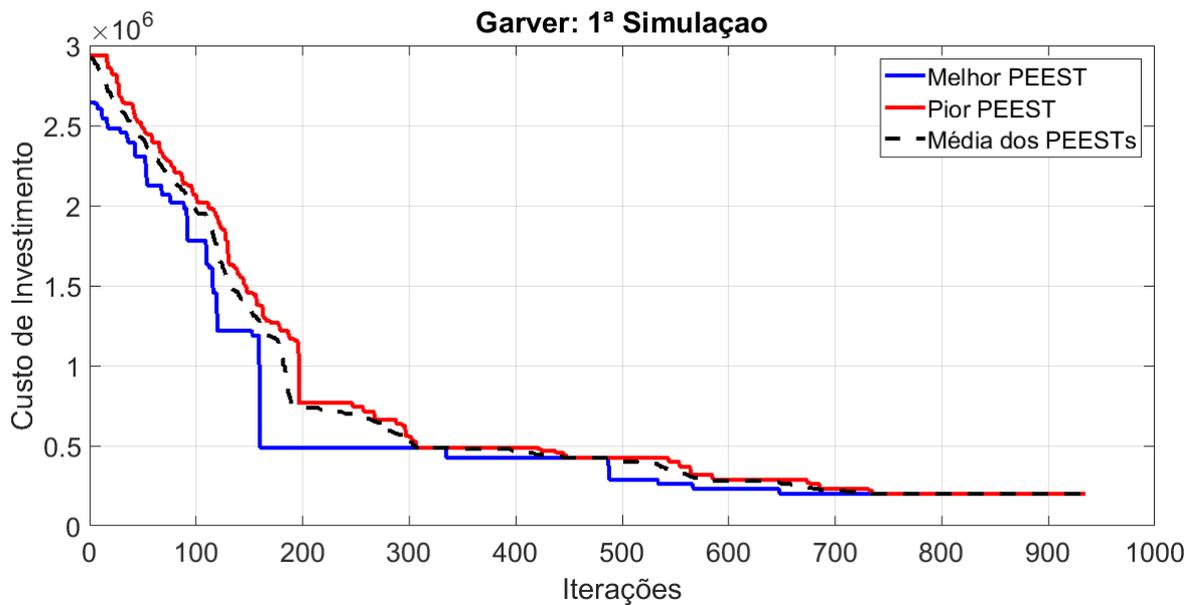


Figura 8.2 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 1ª simulação do Sistema Garver.

Conforme a Tabela 8.2, o PEEST encontrado prevê seis novos reforços para o sistema a um custo de investimento de US\$200.000,00. Dentre eles, a criação de dois novos caminhos de transmissão. Para tal foram necessárias 935 iterações, o que se traduziu em aproximadamente 2 minutos e 43 segundos de simulação computacional (163s).

Tabela 8.2 – Plano final de expansão para a primeira simulação com o sistema Garver.

Ramos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
9	2-6	4	4*30,00
11	3-5	1	1*20,00
14	4-6	2	2*30,00
Investimento Total (US\$)			200.000,00
Tempo médio de Simulação			163s
Iterações			935

Para o teste representado na Figura 8.2, houve dois momentos, entre as iterações 300 e 500, em que todos os custos de investimento referentes às soluções da MH estabilizaram no mesmo valor, contudo, não se mantiveram inertes por iterações

suficientes para atingir o critério de parada utilizado neste estudo: custos de investimentos de todas as soluções de MH com valores iguais e sem alteração por no mínimo de 20% de *itHS*.

8.2.1.2 - Segunda simulação

A diferença desta simulação em relação à primeira é a utilização do algoritmo heurístico de inicialização do PEEST. Na Figura 8.3, o caminho de convergência do método *HS-B&B* com o auxílio do algoritmo heurístico de inicialização do PEEST é demonstrado. Para esta simulação, o PEEST mínimo inicializado foi de US\$220.000,00. Nota-se uma grande diferença de inicialização do algoritmo em relação à primeira simulação, cujo melhor PEEST partiu com custo aproximadamente 750% superior (MUS\$2,46) ao PEEST inicial desta simulação (MUS\$0,329). Os resultados obtidos para esta configuração do sistema se encontram na Tabela 8.3.

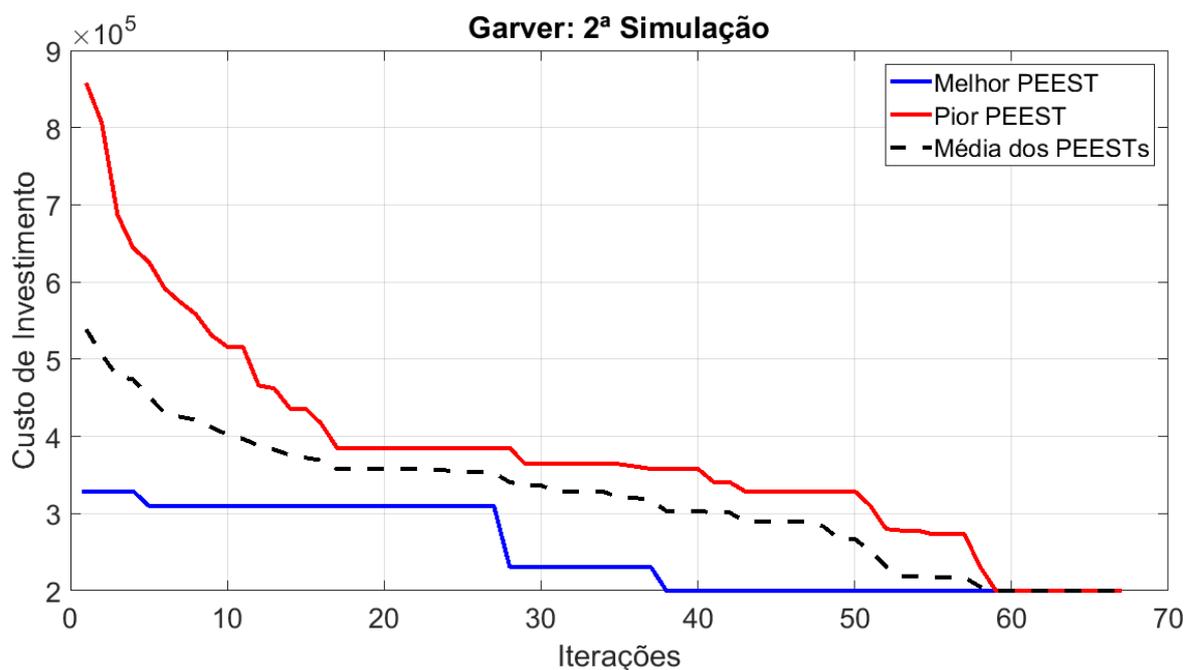


Figura 8.3 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 2ª simulação do Sistema Garver.

Assim como a Tabela 8.2, o PEEST encontrado tem um custo de investimento de US\$200.000,00 e prevê a seguinte ampliação do sistema: 2-6 (4), 4-6 (2) e 3-5 (1). No

entanto, a grande diferença entre o resultado das duas simulações é em relação à quantidade de iterações necessária para convergência. Quando comparados os tempos computacionais da primeira e segunda simulação, a pequena diferença do tempo requerido em relação ao número de iterações nesta simulação se justifica pela inserção do algoritmo de inicialização. O algoritmo de inicialização do PEEST executa vários testes antes de encontrar o mínimo local, resultando, assim, em um aumento tempo computacional de cada iteração do *HS*.

Tabela 8.3 – Plano final de expansão para a segunda simulação com o sistema Garver.

Ramos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
9	2-6	4	4*30,00
11	3-5	1	1*20,00
14	4-6	2	2*30,00
Investimento Total (US\$)			200.000,00
Tempo médio de Simulação			134s
Iterações			67

8.2.1.3 - Terceira simulação

Nesta simulação, o *HS-B&B* faz uso do AHC para redução das rotas candidatas a expansão. A Figura 8.4 mostra a atuação do AHC sobre a amostra, nota-se que a partir do AHC baseado no fluxo de potência passante médio entre as linhas, Ψ_{ij} , foi possível observar relevância nas rotas 4, 6, 9, 11 e 14, isto é, circuitos 1-5, 2-3, 2-6, 3-5 e 4-6. Por outro lado, devido à impossibilidade de redespacho, a arquitetura do algoritmo impediu a análise dos multiplicadores de Lagrange λ_{ij} . Mesmo assim, o conjunto de rotas relevantes acoplado ao algoritmo de inicialização do PEEST fez com que o *HS-B&B* obtivesse excelentes resultados.

O espaço amostral que inicialmente continha $5^{15} \approx 3 * 10^{10}$, com a utilização do AHC, passou a ter $5^6 \approx 15625$ soluções, uma redução de 99,99% no conjunto de soluções. Conforme a Figura 8.5, com o espaço amostral enxuto, o AHI conseguiu iniciar o

planejamento estático do ponto ótimo conhecido. A Tabela 8.4 demonstra o resultado obtido nesta simulação. Já a Tabela 8.5 mostra que a obtenção do conjunto de rotas relevantes candidatas a expansão reduziu o tempo computacional e quantidade de iterações necessárias para a convergência do método em relação às Simulações 1 e 2.

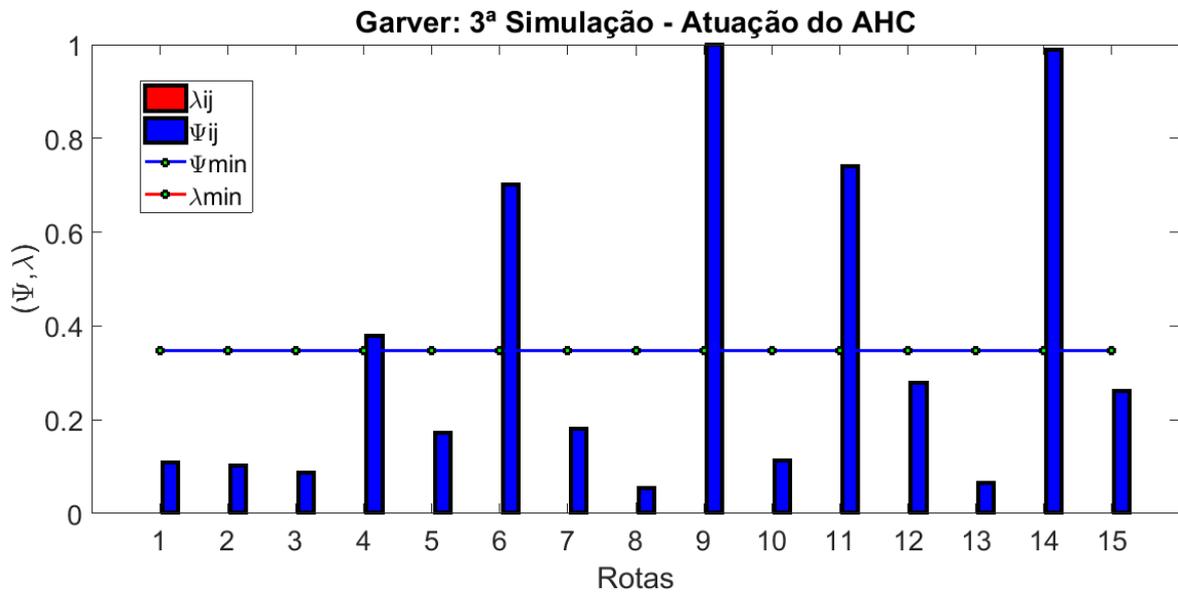


Figura 8.4 – Conjunto de rotas relevantes definidas pelo AHC para o sistema Garver sem redespacho.

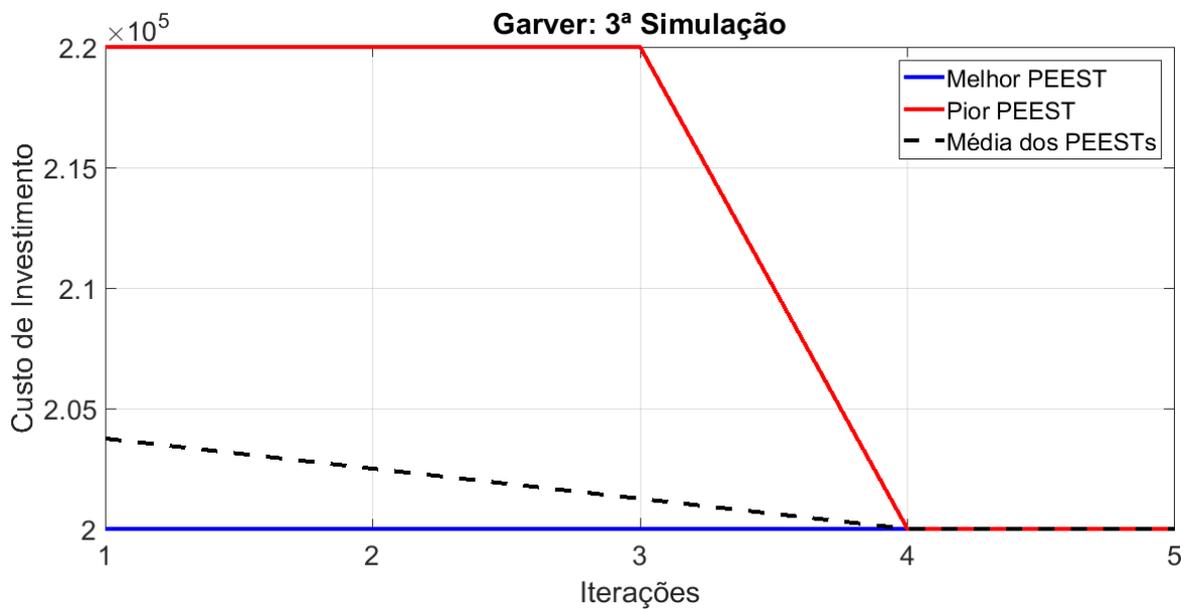


Figura 8.5 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 3ª simulação do Sistema Garver.

Tabela 8.4 – Plano final de expansão para a terceira simulação com o sistema Garver.

Ramos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
9	2-6	4	4*30,00
11	3-5	1	1*20,00
14	4-6	2	2*30,00
Investimento Total (US\$)			200.000,00
Tempo de Simulação			44s
Iterações			5

8.2.1.4 - Análise das simulações sem redespacho para o sistema Garver

O sistema IEEE Garver foi testado com os níveis de geração predefinidos em três configurações diferentes. Para estes testes foram aferidos o tempo médio de simulação com e sem a utilização dos Algoritmos Heurísticos Construtivo (AHC) e de Inicialização (AHI), responsáveis por garantir velocidade e eficácia ao método. Em todas as três simulações, o algoritmo proposto encontrou a solução ilustrada na Figura 8.6.

Na primeira simulação o *HS-B&B* foi utilizado sem nenhum de seus algoritmos heurísticos, o que levou a uma baixa taxa de convergência e exigência de grande tempo computacional. Na segunda simulação foi permitida a utilização do AHI, resultando em um aumento considerável da taxa de convergência do *HS-B&B* para o provável PEEST ótimo de US\$200.000,00.

Conforme a Tabela 8.5, na terceira simulação, tanto o AHC, quanto o AHI foram utilizados, demonstrando, assim, que o AHC quando bem utilizado confere velocidade ao método. Portanto, para o sistema Garver sem redespacho, os dois algoritmos heurísticos atuando em série aumentaram a taxa de convergência do método em um tempo menor que o alcançado em outras configurações. Ademais, em todas as três simulações a resposta conhecida na literatura foi encontrada, constatando, desta maneira, que o *HS-B&B* é uma técnica promissora [24], [26].

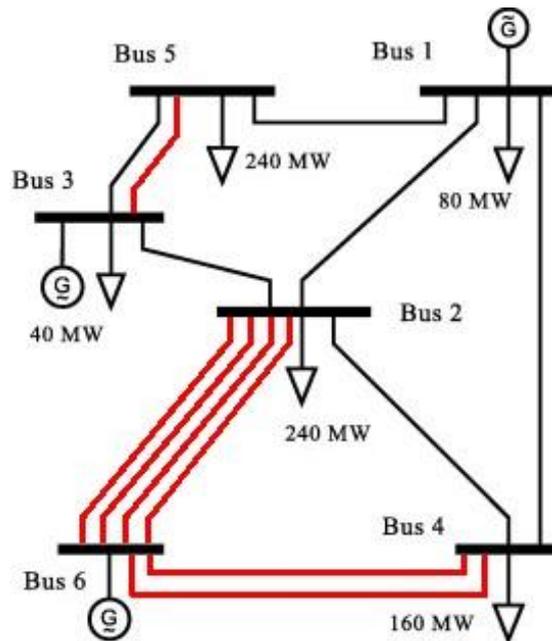


Figura 8.6 – Configuração do PEEST proposto pelo *HS-B&B* para o sistema Garver sem Redespatcho.

Tabela 8.5 – Comparação entre os resultados obtidos para o sistema Garver sem redespatcho.

Garver	PEEST	2-6 (4), 4-6 (2) e 3-5 (1)	
Sem Redespatcho	Custo de Investimento	US\$200.000,00	
	t_{med}	Iterações	Taxa de convergência
1ª Simulação	163s	935	65,7%
2ª Simulação	134s	67	97,3%
3ª Simulação	44s	5	100%

O algoritmo heurístico de inicialização do PEEST se demonstrou tão útil em relação à taxa de convergência, que a sua utilização se tornou obrigatória nas próximas simulações.

8.2.2 - Sistema Garver com redespacho de potência na geração

Nestas simulações, o redespacho de potência é permitido. Logo, o planejamento dinâmico pode ser executado. Assim como em 8.2.1, nesta subseção, o sistema Garver será testado para as diferentes configurações de solução propostas nesta dissertação.

Nas simulações 4 e 5, o limite de expansões por rotas adotado será equivalente a dois, ou seja, $X_{max} = 2$. Já nas simulações 7, 8 e 9, $X_{max} = 3$.

8.2.2.1 - Quarta simulação

Tanto o AHC, quanto o AHI não foram utilizados nesta simulação. Logo, além de inicializar o *HS-B&B* de qualquer ponto factível, foram consideradas todas as rotas candidatas à expansão, vide Apêndice A.2 (exceto por $X_{max} = 2$). Assim, ao enquadrar os dados do problema na Equação (7.8), nota-se que o espaço amostral desta simulação contém 66^{15} soluções possíveis. A Figura 8.7 demonstra o caminho de convergência trilhado pelo *HS-B&B* considerando todas as rotas candidatas à expansão na etapa estática. Na Tabela 8.6 é possível encontrar os resultados do planejamento estático desta simulação. A Figura 8.8 ilustra a configuração proposta pelo *HS-B&B* ao PEEST do sistema Garver.

Tabela 8.6 – Plano de expansão estática para a quarta simulação com o sistema Garver.

Ramos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
6	2-3	1	1*20,00
9	2-6	1	1*30,00
11	3-5	1	1*20,00
14	4-6	2	2*30,00
Investimento Total (US\$)			130.000,00
Tempo de Simulação			85s
Iterações			65

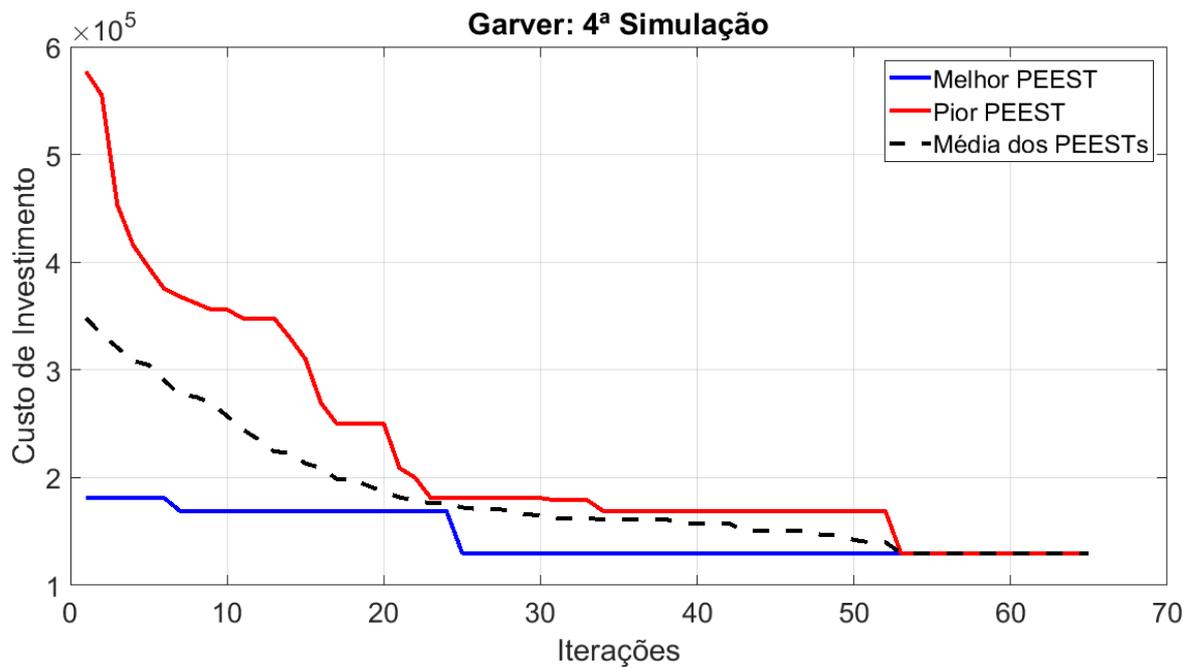


Figura 8.7 – Caminho de convergência do HS-B&B na 4ª simulação do sistema Garver.

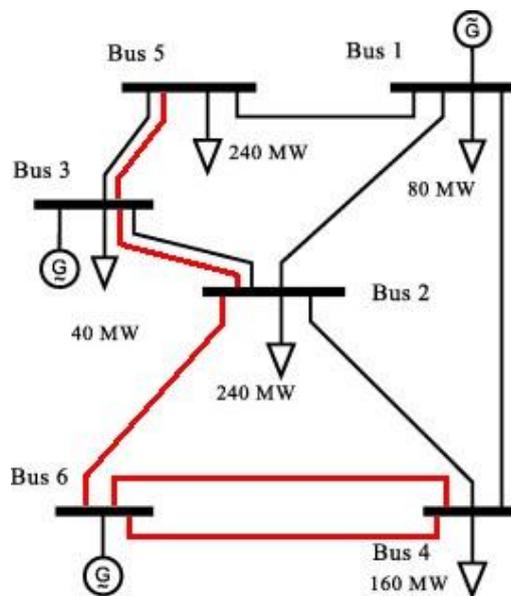


Figura 8.8 – Configuração do PEEST proposto pelo HS-B&B para o sistema Garver com redespacho e $X_{max} = 2$.

De acordo com a Tabela 8.7, a Região de Soluções Estáticas (RSE) obtida empiricamente pela Eq. (7.9), veio recheada com dois PEESTs diferentes. Na etapa dinâmica, estas soluções devem passar pelo B&B com o objetivo de encontrar o melhor plano de expansão dinâmico possível.

Tabela 8.7 – Região de soluções estáticas obtidas na quarta simulação com o sistema Garver.

Região de Soluções Estáticas		Limite máximo	US\$143.000,00
Planos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
1	2-6 (2), 3-5 (1) e 4-6 (2)	5	140,00
2	2-3 (1), 2-6 (1), 3-5 (1) e 4-6 (2)	5	130,00

O *HS-B&B* inicia com o $PEEST_1$ cujo investimento estático é de US\$140.000,00. O limite superior, x_{sup} , proposto pelo *HS* ao *B&B* consta na Tabela 8.8. No primeiro estágio de planejamento, já é constatada a necessidade de um reforço no sistema. Sendo assim, de acordo com a Tabela 8.9, o primeiro estágio da árvore de soluções do *B&B* para o $PEEST_1$ considera a exclusão de somente duas soluções ineficazes. Contudo, quando os subconjuntos dependentes são separados das soluções independentes, sobram somente dois grandes ramos: o primeiro sugere a inserção da rota 2-6 no primeiro estágio; o segundo opta pela criação do circuito 4-6.

Tabela 8.8 – Configuração inicial proposta ao *B&B* na quarta simulação do sistema Garver.

Investimento Estático	Plano 1 US\$140.000,00		Plano 2 US\$130.000,00	
	Ano	Rotas C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)
	1	2-6 30,000	2-3	20,000
	2	- -	-	-
	3	3-5 16,528	3-5	16,528
	4	- -	-	-
	5	2-6 20,490	4-6	20,490
	6	- -	-	-
	7	- -	4-6	16,934
	8	- -	-	-
	9	4-6 13,995	4-6	13,995
	10	4-6 12,722	-	-
Investimento Dinâmico		US\$93.737,48		US\$87.948,77

Ao final do terceiro estágio do PDEST₁, somente as soluções 3B e 3E ainda podem ser consideradas, pois como demonstra a Tabela 8.10, as outras futuras soluções são superiores a $x_{sup} = \text{US}\$87.948,77$.

Tabela 8.9 – Resultado da primeira iteração do B&B na quarta simulação do sistema Garver para o PDEST₁.

PDEST	Estágio 1			Factibilidade	Investimento Parcial (kUS\$)	Relação com x_{sup1}	Otimidade
	Rotas possíveis						
	2-6	3-5	4-6				
1	1	1	1	Sim	80,00	<	Talvez
1	0	1	1	Sim	60,00	<	Talvez
0	1	1	1	Sim	50,00	<	Talvez
0	0	1	1	Sim	30,00	<	Talvez
1	1	0	0	Não	50,00	<	Talvez
0	1	0	0	Não	-	-	Não
1	0	0	0	Não	30,00	<	Talvez
0	0	0	0	Não	-	-	Não

Tabela 8.10 – Resultado da segunda iteração do B&B na quarta simulação do sistema Garver para o PDEST₁.

PDEST	Estágio 3			Invest. Parcial (US\$)	Mínimo Restante (US\$)	Investimento mínimo (US\$)	x_{sup} US\$87.948,77
	Solução	1	2				
3A	2-6	-	2-6	54.793,39	33.927,81	88.721,20	>
	30	-	24,8				
3B	2-6	-	3-5	46.528,93	38.168,79	84.697,71	<
	30	-	16,5				
3C	2-6	-	4-6	54.793,39	33.927,81	88.721,20	>
	30	-	24,8				
3D	4-6	-	2-6	54.793,39	33.927,81	88.721,20	>
	30	-	24,8				
3E	4-6	-	3-5	46.528,93	38.168,79	84.697,71	<
	30	-	16,5				
3F	4-6	-	4-6	54.793,39	33.927,81	88.721,20	>
	30	-	24,8				

Já no quinto estágio, de acordo com a Tabela 8.11, $x_{sup} = \text{US\$}87.948,77$ supera todas as soluções possíveis, encerrando, assim, as análises quanto ao PDEST_1 . Logo, parte-se então para a obtenção do PDEST_2 .

Tabela 8.11 – Resultado da terceira iteração do *B&B* na quarta simulação do sistema Garver para o PEEST_1 .

PDEST Solução	Estágio 3			Invest. Parcial (US\$)	Mínimo Restante (US\$)	Investimento mínimo (US\$)	x_{sup} US\$87.948,77
	3	4	5				
5A	2-6	-	2-6	6.7019,33	25.445,86	92.465,19	>
	3-5	-					
	46,5	-	20,5				
5B	2-6	-	4-6	6.7019,33	25.445,86	92.465,19	>
	3-5	-					
	46,5	-	20,5				
5C	4-6	-	2-6	6.7019,33	25.445,86	92.465,19	>
	3-5	-					
	46,5	-	20,5				
5D	4-6	-	4-6	6.7019,33	25.445,86	92.465,19	>
	3-5	-					
	46,5	-	20,5				

Ao utilizar os conhecimentos adquiridos na obtenção do PDEST_1 ótimo, observa-se que no terceiro estágio, apenas a solução 3E pode ser aproveitada. Já no quinto estágio, nenhuma das soluções da Tabela 8.11 faz frente a $x_{sup} = \text{US\$}87.948,77$. Sendo assim, conclui-se que as rotas 2-3 e 3-5 têm de ser implantadas até o quinto estágio. A única solução factível enumera a inserção de 2-3 no primeiro estágio e 3-5 no terceiro estágio. No quinto estágio do PEEST_2 restam apenas as rotas 4-6, comprovando, desta forma, que $\text{PDEST}_2 = x_{sup} = \text{US\$}87.948,77$, apresentado na Tabela 8.8.

Sem a utilização do AHC, o *HS-B&B* encontrou o $\text{PDEST} = \text{US\$}87.948,77$ em média em 145 segundos, e alcançou uma taxa de convergência de 96,7% das iterações.

8.2.2.2 - Quinta simulação

Nesta simulação, o AHC é requisitado para redução do espaço amostral. A Figura 8.9 mostra o resultado do AHC para o sistema Garver com redespacho. Nota-se que a

partir do AHC baseado no fluxo de potência passante médio entre as linhas (Ψ_{ij}) foi possível observar relevância nos ramos 6, 9, 11 e 14, traduz-se por rotas 2-3, 2-6, 3-5 e 4-6. Por outro lado, quando este método privilegia a análise dos multiplicadores de Lagrange, λ_{ij} , os caminhos de relevância se tornam as rotas 6, 9, 10, 11 e 14. Caso fosse considerada somente a análise de Ψ_{ij} , para esta iteração específica, o conjunto de rotas relevantes seria mais enxuto. Todavia, a fim de garantir maior robustez ao método, optou-se pela união dos conjuntos de soluções encontradas pelo AHC, garantindo, desta forma, as rotas 2-3, 2-6, 3-4, 3-5 e 4-6 no conjunto das rotas relevantes. A utilização do AHC reduziu o conjunto de soluções possíveis para 66^5 .

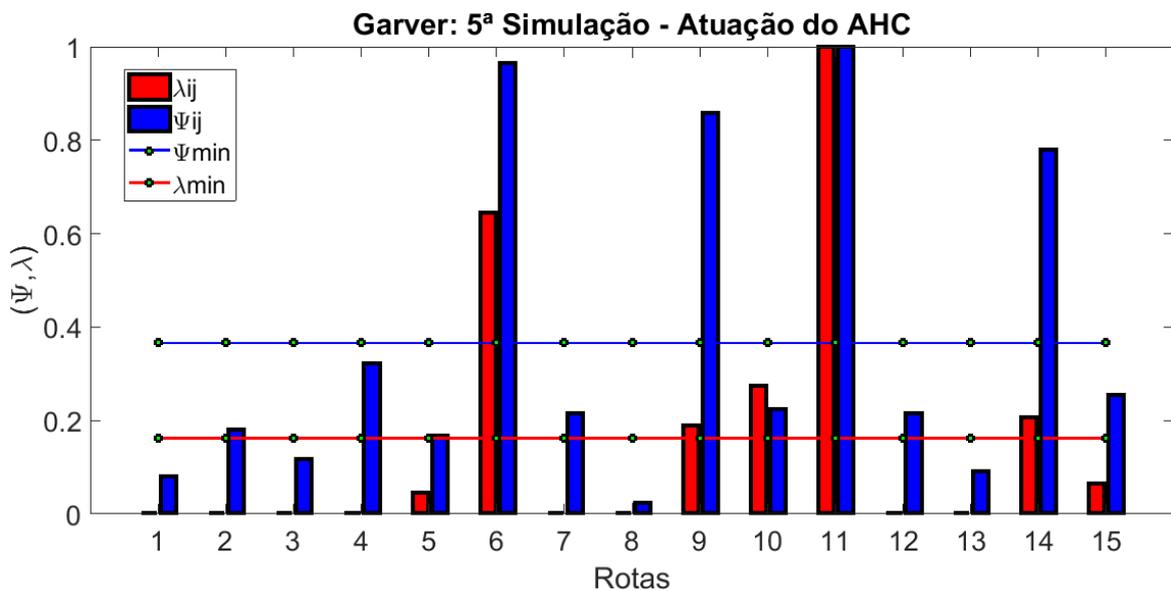


Figura 8.9 – Conjunto de rotas relevantes definidas pelo AHC para o sistema Garver.

A Figura 8.10 demonstra o caminho de convergência do *HS* na quinta simulação do Sistema Garver. É importante salientar que o *HS-B&B* convergiu em todos os testes realizados para o PEEST com custo de investimento de US\$130.000,00.

Assim como na terceira simulação, a redução do espaço amostral permitiu ao AHI fornecer à etapa estática o ponto ótimo conhecido para esta configuração do sistema. Esta excelente inicialização da segunda etapa do *HS-B&B* resultou em uma redução do número de iterações (27 ao todo) necessárias para alcançar a estagnação do algoritmo, e

consequentemente a redução do tempo computacional (48s) para a etapa estática. A taxa de convergência do método chegou a 100% nos testes realizados.

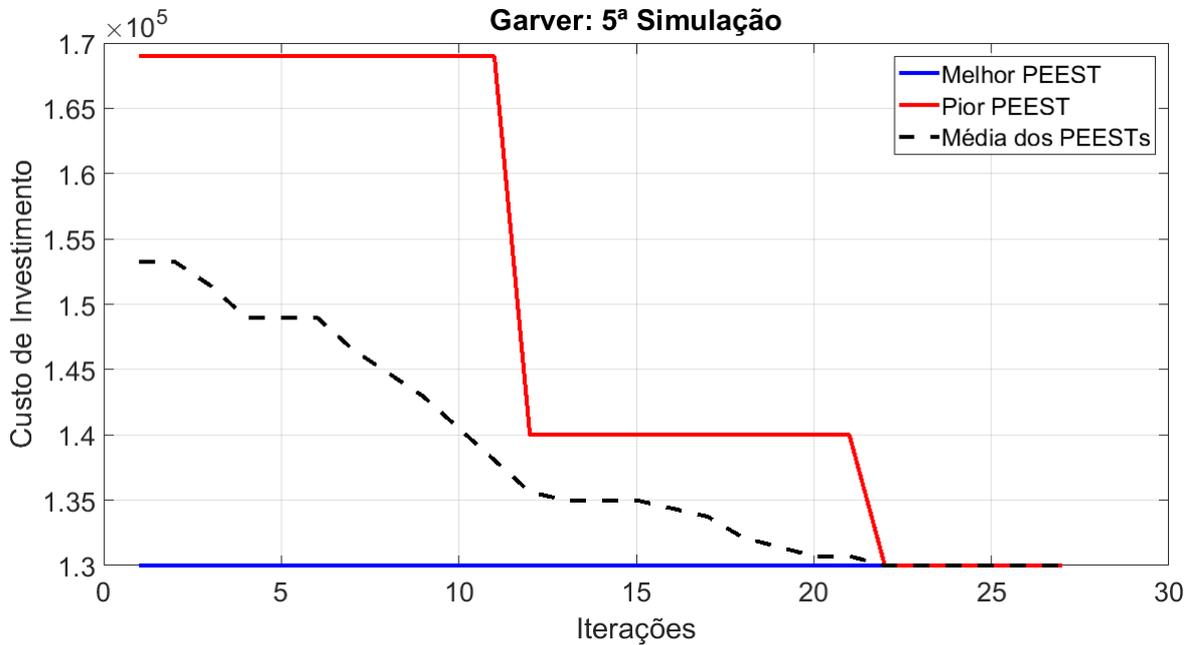


Figura 8.10 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 5ª simulação do sistema Garver.

Além do tempo já gasto na obtenção da RSE, na etapa dinâmica o *B&B* requisitou, em média, mais 5 segundos para encontrar o PDEST = US\$87.948,77.

8.2.2.3 - Sexta simulação

A diferença desta e da próxima simulação em relação às quarta e quinta simulações é a quantidade máxima de expansões possíveis por rota. Se antes foi utilizado $X_{max} = 2$, a partir de agora será utilizado $X_{max} = 3$ para o sistema Garver. Logo, de acordo com a Equação (7.8), o espaço amostral cresce de 66^{15} para 286^{15} soluções possíveis.

Em 300 testes sem o AHC, o bloco estático de otimização encontrou o PEEST = US\$110.000,00 conhecido na literatura em 93,7% dos testes. A Figura 8.11 demonstra a convergência do método para um dos testes executados, onde foram necessárias 79

iterações e tempo de simulação de aproximadamente 114s. O resultado obtido nessa configuração é ilustrado na Figura 8.12.

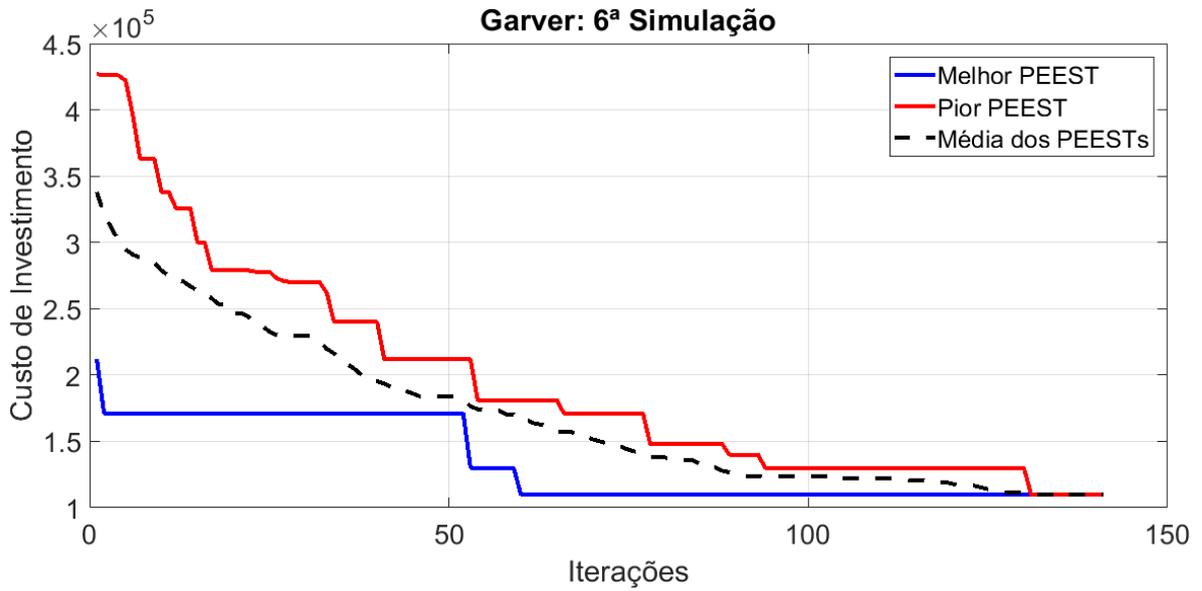


Figura 8.11 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 6ª simulação do sistema Garver.

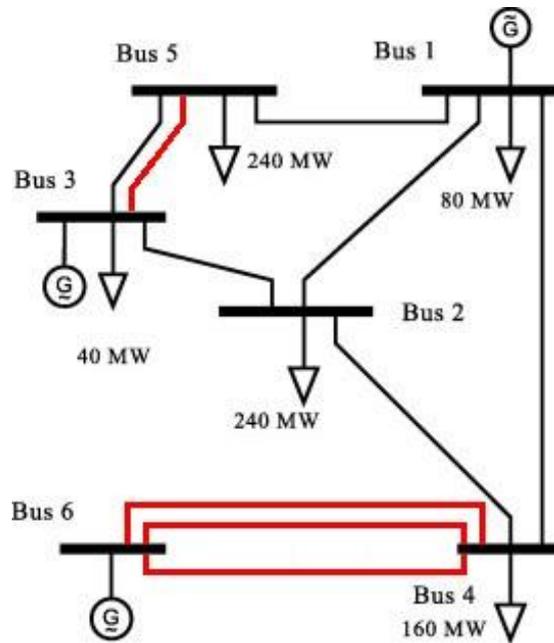


Figura 8.12 – Configuração do PEEST proposto pelo *HS-B&B* para o sistema Garver com redespacho e $X_{max} = 3$.

8.2.2.4 - Sétima simulação

Mais uma vez o AHC cumpriu seu papel com excelência, deixando no *hall* das rotas relevantes as conexões 2-3, 2-6, 3-4, 3-5 e 4-6. Fato tal que permitiu o *HS-B&B* iniciar sua etapa estática partindo já do PEEST = US\$110.000,00 conhecido como o ponto ótimo. Isto resultou em convergência em todos os testes executados. Além disso, o tempo médio de convergência estática foi de 49s em 29 iterações. Já para obter a resposta dinâmica, o método proposto exigiu ao todo 51s. A Figura 8.13 demonstra a atuação do *HS-B&B*.

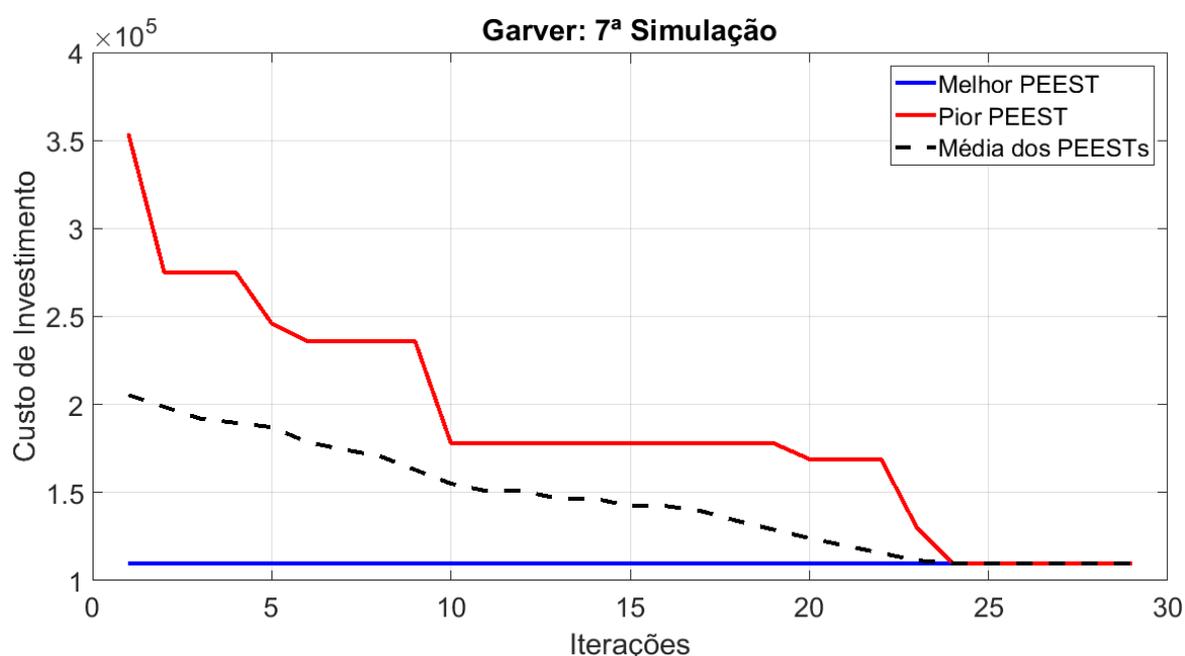


Figura 8.13 – Caminho de convergência do *HS-B&B* na 7ª simulação do sistema Garver.

8.2.2.5 - Análise das simulações com redespacho para o sistema Garver

O bloco estático de otimização encontrou os PEESTs ótimos conhecidos na literatura na grande maioria dos testes quando o AHC não foi utilizado. Por outro lado, em 300 testes, quando houve a utilização do AHC, tal PEEST foi obtido em 100% das tentativas. A utilização do AHC está intrinsecamente ligada ao tempo computacional, e como subproduto a taxa de convergência também é elevada pelo algoritmo heurístico

construtivo. Já o algoritmo heurístico de inicialização por mínimos locais atua diretamente no refinamento das soluções, ou seja, aumenta a taxa de convergência do método, o que também auxilia na redução do esforço computacional exigido pelo *HS-B&B*. Embora todos os testes permitindo redespacho tenham sido executados com o AHI, a Tabela 8.12 reflete os resultados obtidos com a utilização ou não do AHC para as simulações executadas nesta subseção.

Tabela 8.12 – Comparação entre os PEEST obtidos para o sistema Garver com redespacho.

Sistema Garver		PEEST			Custo de Investimento	
Redespacho Permitido	$X_{max} = 2$	2-3 (1), 3-5 (1) e 4-6 (2)			US\$130.000,00	
	$X_{max} = 3$	(3-5) e 4-6(3)			US\$110.000,00	
	X_{max}	AHC	t_{med}	Iterações	Taxa de convergência	PDEST t_{med}
4ª Simulação	2	Não	85s	65	96,8%	88s
5ª Simulação	2	Sim	48s	27	100%	53s
6ª Simulação	3	Não	114s	79	93,7%	116s
7ª Simulação	3	Sim	49s	29	100%	51s

O método proposto nesta dissertação encontrou bom resultados na maioria dos testes realizados. A Tabela 8.13 apresenta a comparação do *HS-B&B* com o método Lagrange utilizado em [27].

O resultado, ano a ano, do PDEST no sistema Garver é demonstrado na Tabela 8.13. Nota-se que ao considerar três reforços como o limite máximo de expansões por rota, o investimento dinâmico total, evitando o corte de carga, é equivalente a US\$81.892,09. Quando considerado $X_{max} = 2$, o PDEST encontrou um investimento de US\$87.948,77 ao longo do horizonte de planejamento, o que é um resultado melhor que a resposta previamente conhecida, com custo de investimento de US\$89.997,81, apresentada em [27].

Nessa mesma ordem, o PDEST para $tx = 10\%$ mostra uma economia aproximada de 25,6% e 32,3% de gastos em relação ao PEEST. Estes resultados demonstram, deste modo, a importância do planejador saber “quando” inserir os reforços planejados na rede.

Tabela 8.13 – Comparação entre técnicas de otimização em testes com o sistema Garver.

Algoritmo	<i>HS-B&B</i>		<i>HS-B&B</i>		Lagrange	
Investimento Estático	Garver $X_{max} = 3$ US\$110.000,00		Garver $X_{max} = 2$ US\$130.000,00		Garver $X_{max} = 2$ US\$130.000,00	
Iterações (<i>HS</i>)	29		27		-	
t_{med} PEEST	49s		48s		-	
t_{med} PDEST	51s		53s		-	
Taxa de Convergência	100%		100%		-	
Ano	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)
1	4-6	30,00	2-3	20,00	2-3	20,00
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	3-5	16,53	3-5	16,53
4	4-6	22,54	-	-	4-6	22,53
5	-	-	4-6	20,49	-	-
6	3-5	12,42	-	-	-	-
7	4-6	16,93	4-6	16,93	4-6	16,93
8	-	-	-	-	-	-
9	-	-	2-6	14,00	2-6	14,00
10	-	-	-	-	-	-
Investimento Dinâmico	US\$81.892,09		US\$87.948,77		US\$89.997,81	

8.3 - SISTEMA *TWO VALLEYS*

Originalmente proposto em [25], este sistema é baseado no IEEE Garver. Este, todavia, se diferencia do sistema Garver original por possuir um subsistema com 4 barras e 4 linhas acopladas na Barra 6, formando, desta maneira, um sistema desconexo de 10 barras. No entanto, como se fossem dois vales onde a única forma de interconexão entre os subsistemas é através da Barra 6, situada no alto da montanha que separa as duas cidades. Logo, o conjunto de linhas candidatas não contém 45 elementos, mas sim 25. Os dados do sistema constam no Apêndice A.3. Para este sistema foram considerados $X_{max} = 3$, o que resulta em 4^{25} soluções estáticas possíveis. A Figura 8.14 ilustra o sistema *Two Valleys*. Assim como na seção anterior, foram executados 300 testes para obtenção dos resultados apresentados nesta subseção.

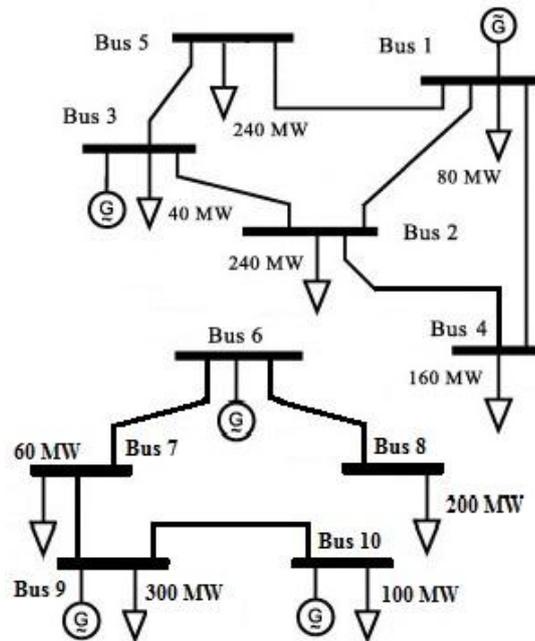


Figura 8.14 – Topologia inicial do sistema *Two Valleys*.

Devido às peculiaridades do sistema, ao observar o parâmetro Ψ_{ij} , o AHC evidenciou nove rotas relevantes. São elas: 6, 9, 11, 14, 16, 17, 21, 24 e 25. O que se traduz pelos caminhos diretos entre as barras: 2-3, 2-6, 3-5, 4-6, 6-7, 6-8, 7-9, 8-10 e 9-10. Já o parâmetro baseado nos multiplicadores de Lagrange, λ_{ij} , além de validar as nove rotas já propostas, incluiu a rota 10 (ligação 3-4) neste conjunto. As Figuras 8.15 e 8.16 demonstram os resultados obtidos por cada fator de sensibilidade na obtenção do conjunto das rotas relevantes à expansão. Seguindo a Eq. (7.7), com o conjunto reduzido de possíveis soluções à disposição do algoritmo, o problema passa a ter 4^{10} soluções. Na prática, o AHC reduziu a ordem do espaço amostral original de 10^{15} para aproximadamente 10^6 .

Neste sistema-teste, o método proposto encontrou duas soluções pertinentes na RSE (Tabela 8.14). De acordo com a Tabela 8.15, com a utilização do AHC, a incidência desses resultados na RSE foi de 100%. Para tal, o algoritmo proposto demandou em média 111s e 50 iterações. Por outro lado, sem o AHC, mesmo com o AHI em funcionamento, o *HS-B&B* demorou em média aproximadamente três vezes mais para convergir, bem como, estagnou em ótimos locais de baixa qualidade em 8,7% dos testes. Além de proporcionar velocidade e um aumento da taxa de convergência, o AHC, na maioria das vezes, permitiu

que o AHI inicializasse o PEEST em planos conhecidos da RSE. Todavia, deve-se melhorar o estudo da técnica de mineração do espaço amostral a fim de obter uma maior segurança e seletividade na utilização do recurso. No que tange a utilização do AHC, os diferentes caminhos de convergência do *HS-B&B* estão dispostos nas Figuras 8.17 e 8.18.

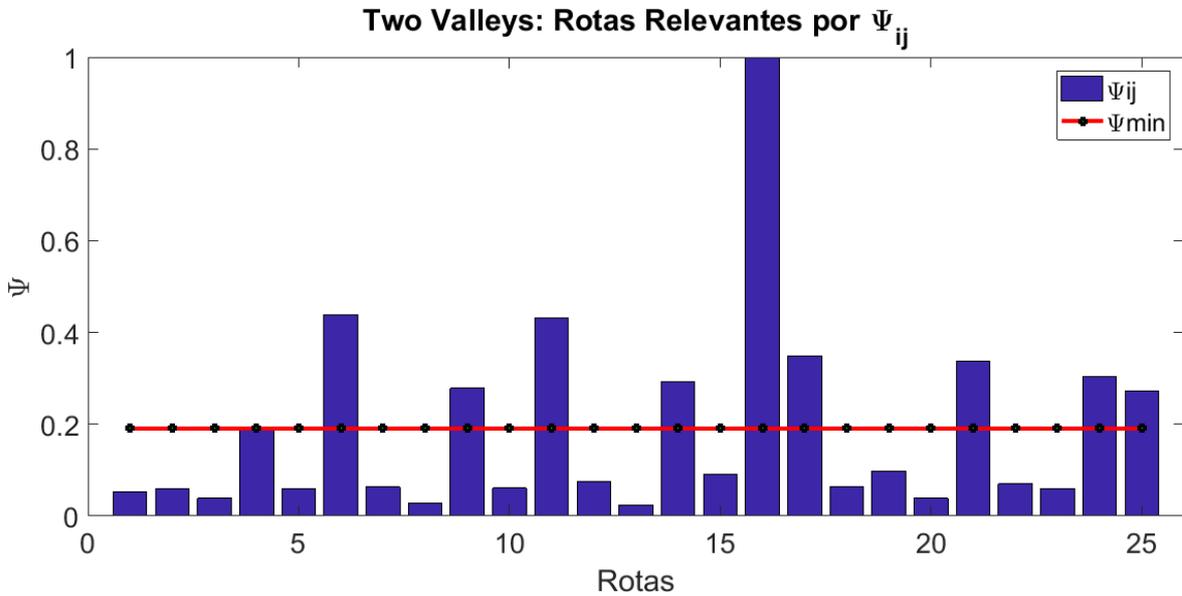


Figura 8.15 – Sistema *Two Valleys*: conjunto de rotas relevantes baseadas no fator de sensibilidade Ψ_{ij} .

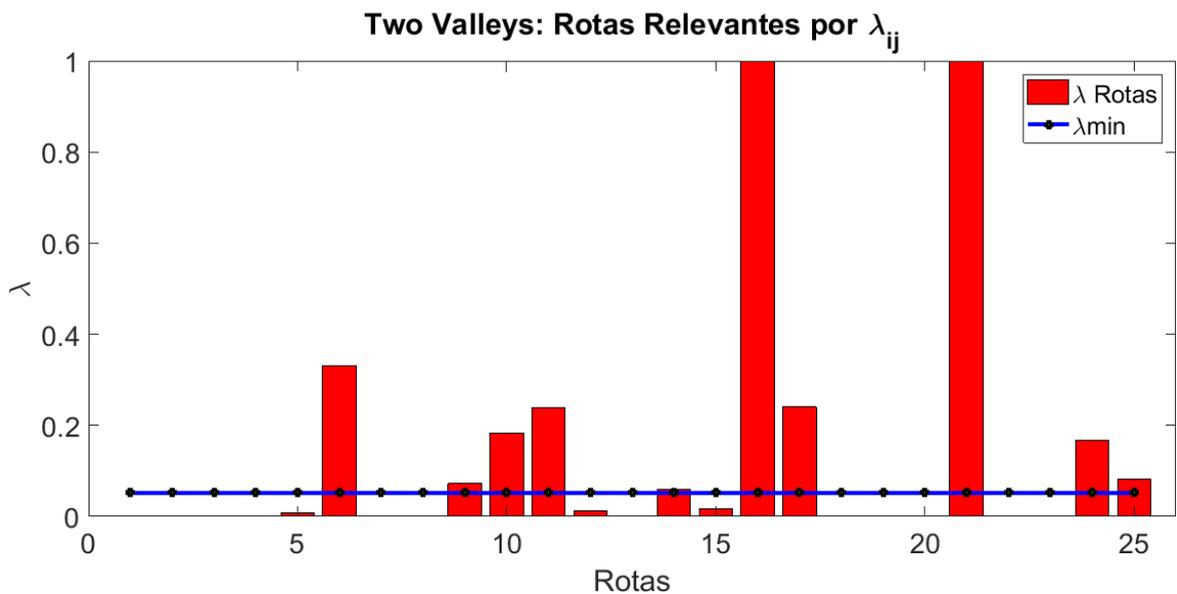


Figura 8.16 – Sistema *Two Valleys*: conjunto de rotas relevantes baseadas no fator de sensibilidade λ_{ij} .

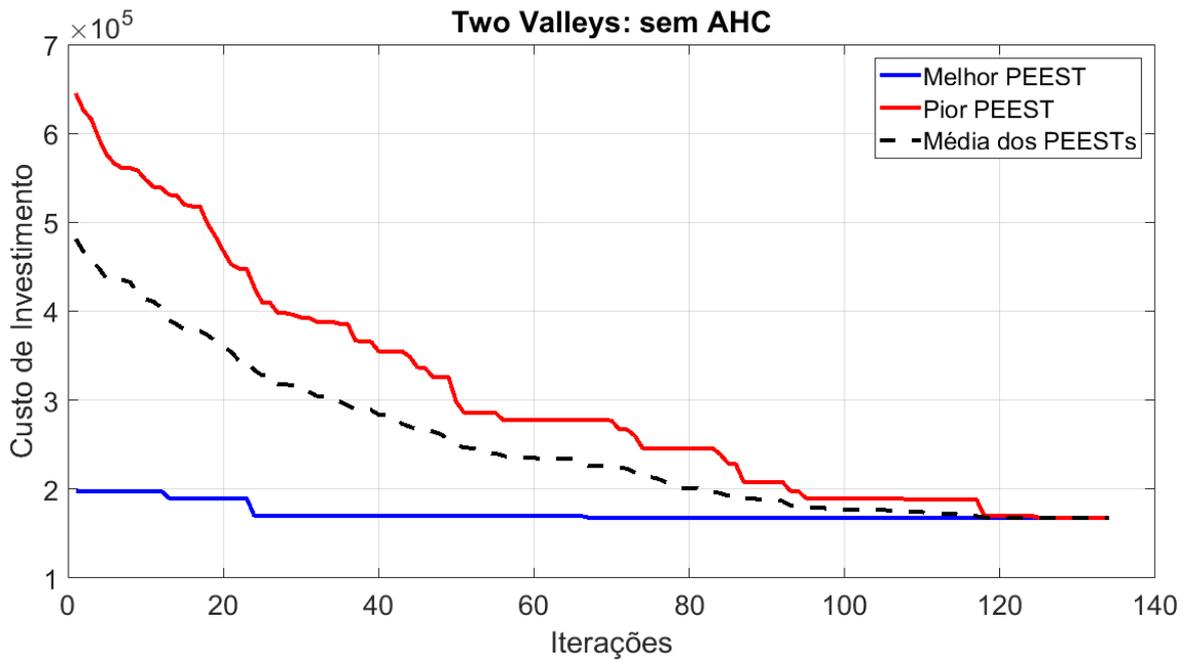


Figura 8.17 – Sistema *Two Valleys*: caminho de convergência do *HS-B&B* sem o AHC.

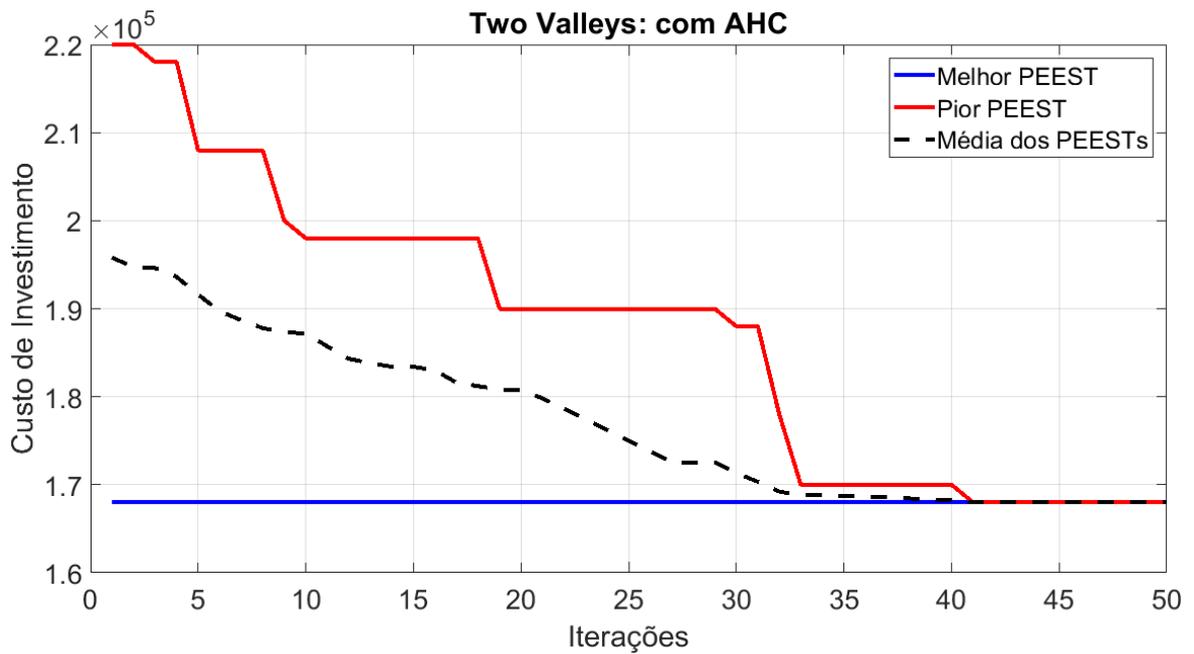


Figura 8.18 – Sistema *Two Valleys*: caminho de convergência do *HS-B&B* com o AHC.

Tabela 8.14 – Região de soluções estáticas obtidas na quarta simulação com o sistema *Two Valleys*.

Região de Soluções Estáticas		Limite máximo	US\$184.800,00
Planos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
1	4-6 (3), 3-5 (1), 6-8 (1) e 9-10(1)	6	168,00
2	4-6 (3), 3-5 (1), 6-7 (1), 7-9(1) e 8-10(1)	7	170,00
3	4-6 (3), 3-5 (1), 6-7 (1), 6-8(1) e 9-10(1)	7	178,00

Tabela 8.15 – Sistema *Two Valleys*: convergência do algoritmo com e sem a utilização AHC.

Sistema <i>Two Valleys</i>	Sem AHC	Com AHC
Iterações	134	50
Tempo médio computacional PEEST	322s	111s
Tempo médio computacional PDEST	329s	135s
Taxa de convergência	91,3%	100%

Os PDESTs encontrados pelo *HS-B&B* são demonstrados ano a ano na Tabela 8.16, onde é provada a necessidade de explorar toda a RSE antes da definição do PDEST ótimo. Embora esta análise seja mais complexa e exija maior esforço computacional, se demonstrou mais completa e robusta, gerando para este caso uma economia de aproximadamente US\$146,00 do PDEST₂ em relação ao PDEST₁.

As rotas iniciais sugeridas na etapa dinâmica pelo *HS* ao *Branch & Bound* demonstraram ser os melhores PDESTs para todos três planejamentos estáticos da RSE (Tabela 8.14). Deste modo, de acordo com a Tabela 8.16, diferentemente do melhor PEEST encontrado, o PDEST final obtido pelo algoritmo híbrido *HS-B&B* foi proveniente do “Plano 2”. Os resultados obtidos nos testes com o sistema *Two Valleys* demonstraram a robustez do método. Com a inserção do conceito de Região de Soluções Estáticas (RSE), o *HS-B&B* procura pelo PDEST, não somente em um único PEEST, mas em soluções estáticas propensas a fornecer um planejamento dinâmico mais econômico.

Tabela 8.16 – Resultado do Método proposto para o sistema *Two Valleys*.

Investimento Estático	Plano 1 US\$168.000,00		Plano 2 US\$170.000,00		Plano 3 US\$178.000,00	
Ano	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)
1	4-6	30,000	4-6	30,000	4-6	30,000
2	6-8	25,455	8-10	27,273	6-8	25,455
3	-	-	-	-	-	-
4	4-6	22,539	4-6	22,539	4-6	22,539
5	-	-	-	-	-	-
6	3-5	12,418	3-5	12,418	3-5	12,418
7	4-6 9-10	33,868	4-6 6-7	22,579	4-6 6-7	22,579
8	-	-	-	-		
9	-	-	7-9	9,330	9-10	13,995
10	-	-	-	-		
Investimento Dinâmico	US\$124.280,85		US\$124.139,70		US\$126.986,59	

8.4 - SISTEMA EQUIVALENTE DA REGIÃO SUL DO BRASIL

Este sistema real é originalmente formado por 46 barras, das quais 11 delas estão isoladas; 62 circuitos existentes na topologia base; 79 caminhos candidatos e uma demanda prevista de 6880MW. Inicialmente proposto em [116], o sistema Sul vem sendo muito utilizado para validar novos métodos para o problema de PEST, como em [23], [26], [27].

Assim como proposto nas análises do Sistema Garver, as análises para este sistema serão divididas em dois grandes grupos: o primeiro, com despacho de potência fixo nas unidades geradoras; o segundo, com a permissão de redespacho de potência. Foram executados 50 testes para cada configuração de despacho de potência, totalizando, assim, 100 simulações para o sistema Sul.

8.4.1 - Sistema Sul sem redespacho de potência na geração.

A fim de respeitar o balanço de potência ativa, para esta configuração do sistema, somente o PEEST será solucionado. Considerando um número máximo de duas expansões por caminho candidato, $X_{max} = 2$, este problema de otimização possui $3^{79} \approx 5 * 10^{37}$ soluções possíveis, demonstrando, dessa maneira, a dificuldade em se obter o ótimo global.

Quando consideradas todas as rotas candidatas, o sistema convergiu em 74% dos testes demandando em torno de 17 minutos e 850 iterações para cada simulação. Sobre o sistema Sul equivalente sem redespacho, pode-se afirmar que a melhor solução é a publicada em [26], onde o custo total de investimento equivale a US\$154.420,00. Em termos elétricos, este investimento corresponde à adição de 16 novos circuitos. São eles: 05-06 (2); 06-46 (1); 19-25 (1); 20-21 (1); 24-25 (2); 26-29 (3); 28-30(1); 29-30 (2); 31-32 (1); 42-43 (2).

Quando o algoritmo heurístico construtivo é utilizado para redução do espaço amostral, o conjunto inicial das 79 rotas candidatas é reduzido para 39. São elas: 1-7, 2-3, 2-4, 3-46, 4-5, 4-9, 4-11, 5-6, 5-9, 5-11, 6-46, 7-8, 8-13, 9-10, 10-46, 11-46, 12-14, 13-18, 13-20, 14-15, 15-16, 16-17, 16-28, 16-32, 16-46, 17-19, 18-19, 18-20, 19-25, 20-21, 24-25, 24-34, 26-29, 28-30, 28-31, 29-30, 31-32, 40-41, 40-42 e 42-43.

A partir dessa redução, a quantidade de soluções possíveis passa a ser de $3^{79} \approx 1.5 * 10^{17}$, uma redução na ordem de 10^{20} soluções. Estes números traduzem-se em um aumento da taxa de convergência (94%) e redução do esforço computacional requerido para o sistema (571s).

8.4.2 - Sistema Sul com redespacho de potência na geração.

Quando se permite o redespacho, utilizando $X_{max} = 2$, a resposta encontrada foi a mesma conhecida na literatura, com custo de investimento equivalente a US\$70.289,00 [23], [26], [27]. No entanto, por se tratar de um PDEST, o conjunto de soluções iniciais desse problema contém $286^{79} \approx 1,13 * 10^{194}$ diferentes planos, factíveis ou não. A partir

dessa gama de soluções, o *HS-B&B* executou o PEEST e encontrou a solução prevista em 83,6% das execuções, a um tempo médio de 549s e 245 iterações.

Seja por Ψ_{ij} ou por λ_{ij} , ao procurar uma redução significativa no espaço amostral, o AHC encontrou 36 rotas interessantes. São elas: 1-7, 2-3, 2-4, 3-46, 4-5, 4-9, 4-11, 5-6, 5-9, 5-11, 6-46, 7-8, 8-13, 9-10, 9-14, 10-46, 11-46, 12-14, 13-18, 13-20, 14-15, 16-17, 16-28, 16-32, 16-46, 18-20, 20-21, 24-25, 24-34, 26-29, 28-31, 29-30, 31-32, 40-41, 40-42 e 42-43. Com essa redução, o *HS-B&B* encontrou a RSE apresentada na Tabela 8.17 em 99,3% dos testes, requisitando em média 375s e 183 iterações.

Tabela 8.17 – Região de soluções estáticas obtidas para o sistema Sul.

Região de Soluções Estáticas		Limite máximo	US\$70.289,00
Planos	Rotas de Transmissão	Circuitos Construídos	Investimento (kUS\$)
1	5-6 (2), 6-46 (1), 13-18 (1), 20-21 (2), 20-23 (1) e 42-43 (1)	8	74,733
2	5-6 (2), 6-46 (1), 13-20 (1), 20-21 (2), 20-23 (1) e 42-43 (1)	8	70,289

A etapa dinâmica do problema inicia-se com as respostas demonstradas na Tabela 8.18, onde $x_{sup} = \text{US}\$42.524,07$. Até o sétimo estágio de planejamento, o único plano factível é o proposto inicialmente nos planos 1 e 2 da Tabela 8.17. No oitavo estágio observam-se mais soluções viáveis. No entanto, o *Branch & Bound* acabou por convergir para a solução proposta pelo plano 2.

Levando em consideração que o carregamento máximo adotado pelas linhas foi o nominal, o corte de carga máximo permitido de 1MW e $X_{max} = 2$, o PDEST proposto através desse método tem custo total de investimento equivalente a US\$42.524,07, de acordo com a Tabela 8.19. Planejamento tal que diverge dos 38,94 mil dólares encontrados em [27]. Entretanto, ao simular as expansões propostas em [27], inclusive com a inserção manual dos reforços previstos em seus respectivos estágios, no 5º ano foi observado corte de carga superior a 1MW na barra 9. Destaca-se que 1MW é o valor máximo de corte de carga normalmente utilizado na literatura especializada, e por isso adotado neste trabalho.

Tabela 8.18 – Resultado do Método proposto para o sistema Sul.

Investimento Estático	Plano 1 US\$74.733,00		Plano 2 US\$ 70.289,00	
Ano	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	20-21	6.75	20-21	6.75
4	-	-	-	-
5	5-6 6-46	16.52	5-6 6-46	16.52
6	-	-	-	-
7	42-43	4.62	42-43	4.62
8	5-6 20-21 20-23	11.61	5-6 20-21 20-23	11.61
9	-	-	-	-
10	13-18	4.90	13-20	3.02
Investimento Dinâmico	US\$44.408,76		US\$42.524,07	

Tabela 8.19 – Comparação dos Custos de Investimento para o sistema Sul.

Algoritmo	<i>HS-B&B</i>		Lagrange	
Investimento Estático	Sul $X_{max} = 3$ US\$70.289,00		Sul $X_{max} = 3$ US\$70.289,00	
Ano	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)	Rotas	C_{ij}^t (kUS\$)
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	20-21	6,75	20-21	6,75
4	-	-	-	-
5	5-6 6-46	16,52	5-6 13-20	6,07
6	-	-	6-46	9,93
7	42-43	4,62	42-43	4,61
8	5-6 20-21 20-23	11,61	5-6 13-20 20-23	7,77
9	-	-	20-21	3,81
10	13-20	3,02	-	-
Investimento Dinâmico	US\$42.524,07		kUS\$38.94	

8.5 - COMPARAÇÃO TEMPORAL

Os tempos computacionais máximos, mínimos, e médios requeridos no PEEST e no PDEST são apresentados nas Tabelas 8.20, 8.21 e 8.22. Para os sistemas IEEE Garver e Sul, a simulação mais rápida do *HS-B&B*, quando comparada, convergiu em menos tempo que o *PSO* [24] e o *BA* [26]. Em alguns casos, mesmo o pior tempo de convergência apresentado pelo algoritmo híbrido proposto se mostrou mais rápida que as metaheurísticas concorrentes. A surpresa ficou para o tempo computacional gasto no PDEST do sistema Sul. O método Lagrange utilizado em [27] requisitou em média três vezes o tempo computacional gasto pelo *HS-B&B* para convergir para a solução ótima.

Tabela 8.20 – Comparação do tempo de convergência para o PEEST ótimo sem redespacho.

System	Tempo Computacional	<i>HS-B&B</i>	Lagrange (média) [27]	<i>BA</i> (média) [26]	<i>PSO</i> (média) [24]
Garver $X_{max} = 4$	t_{min}	35s	-	-	-
	t_{max}	73s	-	165s	192s
	t_{med}	44s	-	-	-
Sul $X_{max} = 3$	t_{min}	453s	-	-	-
	t_{max}	1019s	-	-	1626s
	t_{med}	571s	-	-	-

Tabela 8.21 – Comparação do tempo de convergência para o PEEST ótimo com redespacho permitido na geração.

System	Tempo Computacional	<i>HS-B&B</i>	Lagrange (média) [27]	<i>BA</i> (média) [26]	<i>PSO</i> (média) [24]
Garver $X_{max} = 2$	t_{min}	18s	-	-	-
	t_{max}	58s	-	-	-
	t_{med}	48s	-	-	-
Garver $X_{max} = 3$	t_{min}	23s	-	-	-
	t_{max}	53s	-	125s	160s
	t_{med}	49s	-	-	-
Sul $X_{max} = 3$	t_{min}	243s	-	-	-
	t_{max}	675s	-	278s	992s
	t_{med}	375s	-	-	-

Tabela 8.22 – Comparação do tempo de convergência para o PDEST ótimo

System	Tempo Computacional	<i>HS-B&B</i>	Lagrange (média) [27]	<i>BA</i> (média) [26]	<i>PSO</i> (média) [24]
Garver $X_{max} = 2$	t_{min}	20s	-	-	-
	t_{max}	63s	-	-	-
	t_{med}	53s	-	-	-
Garver $X_{max} = 3$	t_{min}	25s	-	-	-
	t_{max}	54s	-	-	-
	t_{med}	51s	-	-	-
Sul $X_{max} = 3$	t_{min}	261s	-	-	-
	t_{max}	704s	34min42s or 2082s	-	-
	t_{med}	400s	-	-	-

Devido o superior esforço computacional requisitado pelo sistema Equivalente da Região Sul do Brasil em comparação aos sistemas Garver e *Two Valleys*, foram executadas apenas 50 simulações com a representação da região Sul brasileira, diferindo dos demais.

Embora a metodologia tenha como principal objetivo sugerir ao planejador PEESTs e PDESTs em longo prazo, o tempo computacional exigido por cada simulação não deve ser proibitivo, assim como a rapidez na resolução do problema deve ser procurada incessantemente. Levando em consideração de que o *HS-B&B* é um algoritmo heurístico que faz utilização de várias técnicas de otimização (inclusive heurísticas e metaheurísticas) em série, sempre existirá a possibilidade da resposta encontrada não ser o planejamento ótimo. Portanto, para que o resultado tenha consistência, é importante que o planejador execute o teste repetidas vezes. Dessa maneira, em uma rotina programada de testes e simulações, quanto mais rápido o algoritmo convergir, mais testes poderão ser executados, resultando em um aumento de credibilidade na resposta ótima encontrada.

8.6 - CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo foram apresentados testes e resultados do método proposto atuando na obtenção do PEEST e PDEST de três sistemas conhecidos: IEEE Garver [33]; Equivalente da Região Sul do Brasil [116]; *Two Valleys* [25].

Foram executadas sete diferentes simulações para o sistema Garver, onde foram observadas a relevância dos AHI e AHC na obtenção dos resultados. Inclusive, quando comparado sob as mesmas configurações à resposta conhecida na literatura [27], o *HS-B&B* obteve PDESTs mais econômicos.

Para o sistema *Two Valleys*, o melhor PDEST encontrado requereu a inserção de rotas diferentes dos circuitos sugeridos pelo PEEST ótimo. O que demonstra a necessidade de se obter uma RSE em métodos como este, que propõem a otimização dinâmica a partir de uma resposta estática.

Os testes com o sistema Equivalente da Região Sul do Brasil foram realizados para conferir robustez ao método. Para solução desse sistema, o *HS-B&B* obteve resultados satisfatórios em tempos computacionais aceitáveis.

Apesar dos tempos computacionais obtidos pelo *HS-B&B* nas simulações realizadas serem, em sua maioria, inferiores aos obtidos em [24], [26], [27], estas comparações servem apenas para demonstrar que o método proposto executa simulações em tempos próximos aos obtidos em outros estudos. Justifica-se isso pelo fato das simulações terem sido executadas em máquinas distintas, com configurações e hardwares diferentes.

9 - CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A energia é algo fundamental nas vidas humanas. Com o aumento de consumo e populacional enxergado no último século, uma gestão energética sustentável é a tônica do século XXI. Nos Sistemas Elétricos de Potência do mundo todo, a ordem é buscar fontes energéticas limpas e renováveis. Contudo, estas fontes muitas vezes estão longe dos grandes centros de consumo e sofrem com as intempéries da natureza. Eis que um sistema integrado de transmissão se torna necessário. A fim de evitar perdas elétricas e financeiras, o Planejamento de Expansão em Sistemas de Transmissão vem se tornando cada vez mais importante.

Neste trabalho, foi apresentado um algoritmo híbrido que se utiliza de diferentes técnicas de otimização para solução do Planejamento Dinâmico de Expansão. Originalmente apresentado em [25], o algoritmo evoluiu, e atualmente utiliza técnicas heurísticas para redução do espaço amostral, inicialização da metaheurística *Harmony Search*, inviabilização de reanálise em soluções previamente conhecidas, bem como, a aplicação da técnica clássica de otimização combinatoria *Branch & Bound*.

Como inovações, enumeram-se: o AHC passou a utilizar, não somente as informações de carregamento das rotas candidatas, mas também informações dos multiplicadores de Lagrange na busca pelo conjunto das rotas relevantes; a etapa estática foi equipada com uma lógica capaz de evitar análises em PEEST já conhecidos e um algoritmo heurístico de inicialização por mínimos locais; a inserção do *B&B* no estágio dinâmico permitiu maior eficiência ao método. Fato tal que pode ser notado quando comparado o esforço computacional requerido pelo *HS-B&B* às outras técnicas de otimização. Na maioria dos casos, o método proposto se demonstrou mais rápido que *BA*, *PSO* e o método de Lagrange. Mesmo nos piores casos, o *HS-B&B* demonstrou tempo computacional não proibitivo.

Embora o *HS-B&B* tenha convergido em tempos inferiores que os obtidos nos outros estudos. A comparação temporal não pode ser tomada como definitiva, pois foram utilizados softwares e hardwares diferentes para execução dos mesmos. Ainda sim, é importante ressaltar que a preocupação do engenheiro é por tornar factível a sua metodologia, principalmente através de bons resultados e tempos não proibitivos de

execução. A busca pelo algoritmo mais rápido passa a ter maior importância em uma pesquisa voltada para a comercialização de um produto ou software de execução de PDESTs.

Nos planejamentos estáticos, tanto com redespacho das gerações, quanto com valores fixos, o método proposto demonstrou um excelente desempenho. Com relação ao PDEST, o valor obtido em [27] contempla um corte de carga superior ao máximo tolerado nestes estudos, 1MW, inviabilizando, desta forma, toda e qualquer comparação. Destaca-se que, geralmente, 1MW é o valor máximo de corte de carga utilizado na literatura especializada, e por isso adotado neste trabalho [21]–[26], [33], [47], [48], [66]–[69].

Embora o AHC não forneça garantias de otimalidade, a redução do conjunto de rotas candidatas agrega eficiência na solução do problema de PEST, se tornando, assim, um atrativo campo de estudo e pesquisas.

Tanto para o PEEST, quanto para o PDEST, o *HS-B&B* encontrou a solução ótima em todos os casos testados e ultrapassou as expectativas no que tange à economia de tempo computacional, provando, desta forma, a eficácia e robustez do método proposto.

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível salientar alguns tópicos que servirão de continuação do presente trabalho:

- ampliação da eficiência do AHC para sistemas mais robustos;
- inserção do AHI como um algoritmo de refinamento em todas as iterações do *HS*, transformando-o em um Algoritmo Heurístico de Busca Local (AHBL);
- melhor codificação do AHAr, a fim de executar a conferência nas rotas já conhecidas com maior rapidez;
- inserção de perdas na rede de transmissão, obtendo dessa forma, respostas mais fidedignas quanto à potência ativa transmitida pelos sistemas elétricos de potência;
- os tempos computacionais requisitados pelo *HS-B&B* na obtenção dos PDESTs abre espaço para a inclusão de incertezas na geração e/ou na carga. Assim, o método criará soluções para diferentes cenários futuros, resultado em uma estratégia de expansão mais próxima da realidade;
- análise levando em consideração o tempo de comissionamento para criação ou reforço nas rotas de transmissão;

- neste estudo, foi considerado que o investimento estará presente independente do estágio em que o reforço for planejado para ser inserido no sistema. E forem considerados períodos de abundância e escassez na disponibilidade recursal? A disponibilidade financeira flutuante é algo já estudado em planejamentos de distribuição e que deve ser inserido nos estudos de PEST.
- evolução para um método capaz de avaliar e gerar soluções que atendem os critérios determinísticos N-1 e N-2. Desta maneira o algoritmo encontrará soluções mais robustas capacitadas para lidar com as contingências do sistema;
- análise de fluxo de potência CA. Embora a avaliação não linear dos níveis de tensão e o comportamento da potência ativa e reativa através das expansões forneçam respostas bastante diferenciadas em relação às análises CC, esta abordagem deve ser utilizada para efeito comparativo e analítico de sua controlabilidade e estabilidade perante aos planos de expansão.

APÊNDICE A

Dados dos Sistemas de Transmissão

A.1 - Considerações Iniciais

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas elétricos de potência utilizados nesta dissertação para validação da metodologia proposta. Em ordem são apresentados os dados dos sistemas Garver, *Two Valleys* e o Equivalente da Região Sul do Brasil. Assim, para cada um dos sistemas serão apresentadas três tabelas:

- I. dados de geração e carga;
- II. dados dos circuitos existentes na topologia base;
- III. dados sobre os caminhos e circuitos candidatos à expansão.

Em relação aos custos dos geradores fictícios adotou-se o valor de US\$1,00/Wh em todas as simulações realizadas.

A.2 - Sistema de Garver

Níveis de Geração e Carga				
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga Inicial (MW)	Carga Final (MW)
1	150	50	40	80
2	0,0	0,0	120	240
3	360	165	20	40
4	0,0	0,0	80	160
5	0,0	0,0	240	240
6	600	545	0,0	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-2	1	40	100
1-4	1	60	80
1-5	1	20	100
2-3	1	20	100
2-4	1	40	100
3-5	1	20	100

Circuitos Candidatos

Ramo	Linhas Candidatas	X_{max}	Reatância (Ω)	\bar{f}_{ij} (MW)	C_{ij}^0 (kUS\$)
1	1-2	3	40	100	40
2	1-3	3	38	100	38
3	1-4	3	60	80	60
4	1-5	3	20	100	20
5	1-6	3	68	70	68
6	2-3	3	20	100	20
7	2-4	3	40	100	40
8	2-5	3	31	100	31
9	2-6	3	30	100	30
10	3-4	3	59	82	59
11	3-5	3	20	100	20
12	3-6	3	48	100	48
13	4-5	3	63	75	63
14	4-6	3	30	100	30
15	5-6	3	61	78	61

A.3 - Sistema de *Two Valleys*

Níveis de Geração e Carga

Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga Inicial (MW)	Carga Final (MW)
1	150	50	40	80
2	0,0	0,0	120	240
3	360	165	20	40
4	0,0	0,0	160	160
5	0,0	0,0	120	240
6	600	545	0,0	0,0
7	150	150	40	80
8	0	0	120	240
9	360	360	20	40
10	0	0	80	160

Circuitos Existentes na Topologia Base

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-2	1	40	100
1-4	1	60	80
1-5	1	20	100
2-3	1	20	100
2-4	1	40	100
3-5	1	20	100
6-7	1	10	100
6-8	1	28	100
7-9	1	20	100
9-10	1	30	100

Circuitos Candidatos

Ramo	Linhas Candidatas	X_{max}	Reatância (Ω)	\overline{f}_{ij} (MW)	C_{ij}^0 (kUS\$)
1	1-2	3	40	100	40
2	1-3	3	38	100	38
3	1-4	3	60	80	60
4	1-5	3	20	100	20
5	1-6	3	68	70	68
6	2-3	3	20	100	20
7	2-4	3	40	100	40
8	2-5	3	31	100	31
9	2-6	3	30	100	30
10	3-4	3	59	82	59
11	3-5	3	20	100	20
12	3-6	3	48	100	48
13	4-5	3	63	75	63
14	4-6	3	30	100	30
15	5-6	3	61	78	61
16	6-7	3	10	100	10
17	6-8	3	28	100	28
18	6-9	4	60	80	60
19	6-10	4	20	100	20
20	7-8	4	68	70	68
21	7-9	3	20	100	20
22	7-10	4	40	100	40
23	8-9	4	31	100	31
24	8-10	4	30	100	30
25	9-10	3	30	82	30

A.4 - Sistema Equivalente da Região Sul do Brasil

Níveis de Geração e Carga				
Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga Inicial (MW)	Carga Final (MW)
1	0,0	0,0	0,00	0,0
2	0,0	0,0	221,55	443,1
3	0,0	0,0	0,00	0,0
4	0,0	0,0	150,35	300,7
5	0,0	0,0	119,00	238
6	0,0	0,0	0,00	0,0
7	0,0	0,0	0,00	0,0
8	0,0	0,0	36,10	72,2
9	0,0	0,0	0,00	0,0
10	0,0	0,0	0,00	0,0
11	0,0	0,0	0,00	0,0
12	0,0	0,0	255,95	511,9
13	0,0	0,0	92,90	185,8
14	1257	944	0,00	0,0
15	0,0	0,0	0,00	0,0
16	2000	1366	0,00	0,0
17	1050	1000	0,00	0,0
18	0,0	0,0	0,00	0,0
19	1670	773	0,00	0,0
20	0,0	0,0	545,50	1091
21	0,0	0,0	0,00	0,0
22	0,0	0,0	40,95	81,9
23	0,0	0,0	229,00	458,0
24	0,0	0,0	239,10	478,2
25	0,0	0,0	0,00	0,0
26	0,0	0,0	115,95	231,9
27	220	54	0,00	0,0
28	800	730	0,00	0,0
29	0,0	0,0	0,00	0,0
30	0,0	0,0	0,00	0,0

Barra de Geração	Capacidade de Geração (MW)	Geração (MW)	Carga Inicial (MW)	Carga Final (MW)
31	700	310	0,00	0,0
32	500	450	0,00	0,0
33	0,0	0,0	114,55	229,1
34	748	221	0,00	0,0
35	0,0	0,0	108,00	216,0
36	0,0	0,0	45,05	90,1
37	300	212	0,00	0,0
38	0,0	0,0	108,00	216
39	600	221	0,00	0,0
40	0,0	0,0	131,05	262,1
41	0,0	0,0	0,00	0,0
42	0,0	0,0	803,50	1607
43	0,0	0,0	0,00	0,0
44	0,0	0,0	39,55	79,1
45	0,0	0,0	43,35	86,7
46	700	599	0,00	0,0

Circuitos Existentes na Topologia Base

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
1-7	1	6,16	270
1-2	2	10,65	270
4-9	1	9,24	270
5-9	1	11,73	270
5-8	1	11,32	270
7-8	1	10,23	270
4-5	2	5,66	270
2-5	2	3,24	270
8-13	1	13,48	240
9-14	2	17,56	220
12-14	2	7,40	270
14-18	2	15,14	240

Caminhos	Circuitos Existentes	Reatância (Ω)	Capacidade (MW)
13-18	1	18,05	220
18-20	1	19,97	200
19-21	1	2,78	1500
16-17	1	0,78	2000
17-19	1	0,61	2000
14-26	1	16,14	220
14-22	1	8,40	270
22-26	1	7,90	270
20-23	2	9,32	270
23-24	2	7,74	270
26-27	2	8,32	270
24-34	1	16,47	220
24-33	1	14,48	240
33-34	1	12,65	270
27-36	1	9,15	270
27-38	2	20,8	200
36-37	1	10,57	270
34-35	2	4,91	270
35-38	1	19,80	200
37-39	1	2,83	270
37-40	1	12,81	270
37-42	1	21,05	200
39-42	3	20,30	200
40-42	1	9,32	270
38-42	3	9,07	270
32-43	1	3,09	1400
42-44	1	12,06	270
44-45	1	18,64	200
19-32	1	1,95	1800
46-19	1	2,22	1800
46-16	1	2,03	1800
18-19	1	1,25	600
20-21	1	1,25	600
42-43	1	1,25	600

Circuitos Candidatos

Ramo	Linhas Candidatas	X_{max}	Reatância (Ω)	$\overline{f_{ij}}$ (MW)	C_{ij}^0 (kUS\$)
1	1-7	3	6,16	270	4,35
2	1-2	3	10,65	270	7,08
3	4-9	3	9,24	270	6,22
4	5-9	3	11,73	270	7,74
5	5-8	3	11,32	270	7,50
6	7-8	3	10,23	270	6,83
7	4-5	3	5,66	270	4,05
8	2-5	3	3,24	270	2,58
9	8-13	3	13,48	240	8,80
10	9-14	3	17,56	220	11,27
11	12-14	3	7,40	270	5,11
12	14-18	3	15,14	240	9,80
13	13-18	3	18,05	220	11,57
14	13-20	3	17,03	270	7,17
15	18-20	3	19,97	200	12,74
16	19-21	3	2,78	1500	32,64
17	16-17	3	0,78	2000	10,51
18	17-19	3	0,61	2000	8,72
19	14-26	3	16,14	220	10,41
20	14-22	3	8,40	270	5,72
21	22-26	3	7,90	270	5,41
22	20-23	3	9,32	270	6,27
23	23-24	3	7,74	270	5,31
24	26-27	3	8,32	270	5,66
25	24-34	3	16,47	220	10,61
26	24-33	3	14,48	240	9,34
27	33-34	3	12,65	270	8,28
28	27-36	3	9,15	270	6,17
29	27-38	3	20,8	200	13,24
30	36-37	3	10,57	270	7,02
31	34-35	3	4,91	270	3,59
32	35-38	3	19,80	200	12,63

Ramo	Linhas Candidatas	X_{max}	Reatância (Ω)	\bar{f}_{ij} (MW)	C_{ij}^0 (kUS\$)
33	37-39	3	2,83	270	2,33
34	37-40	3	12,81	270	8,38
35	37-42	3	21,05	200	13,38
36	39-42	3	20,30	200	12,93
37	40-42	3	9,32	270	6,26
38	38-42	3	9,07	270	6,11
39	32-43	3	3,09	1400	35,917
40	42-44	3	12,06	270	7,93
41	44-45	3	18,64	200	11,94
42	19-32	3	1,95	1800	23,42
43	46-19	3	2,22	1800	26,36
44	46-16	3	2,03	1800	24,31
45	18-19	3	1,25	600	8,17
46	20-21	3	1,25	600	8,17
47	42-43	3	1,25	600	8,17
48	02-04	3	8,82	270	5,97
49	14-15	3	3,74	270	2,89
50	46-10	3	0,81	2000	10,89
51	04-11	3	22,46	240	14,25
52	05-11	3	9,15	270	6,17
53	46-06	3	1,28	2000	16,00
54	46-03	3	2,03	1800	24,32
55	16-28	3	2,22	1800	26,36
56	16-32	3	3,11	1400	36,21
57	17-32	3	2,32	1700	27,51
58	19-25	3	3,25	1400	37,75
59	21-25	3	1,74	2000	21,12
60	25-32	3	3,19	1400	37,11
61	31-32	3	0,46	2000	7,14
62	28-31	3	0,53	2000	7,82
63	28-30	3	0,58	2000	8,33
64	27-29	3	9,98	270	6,67
65	26-29	3	5,41	270	3,89
66	28-41	3	3,39	1300	39,29

Ramo	Linhas Candidatas	X_{max}	Reatância (Ω)	\bar{f}_{ij} (MW)	C_{ij}^0 (kUS\$)
67	28-43	3	4,06	1200	47,70
68	31-41	3	2,78	1500	32,63
69	32-41	3	3,09	1400	35,95
70	41-43	3	1,39	2000	17,29
71	40-45	3	22,05	180	13,99
72	15-16	3	1,25	600	8,17
73	46-11	3	1,25	600	8,17
74	24-25	3	1,25	600	8,17
75	29-30	3	1,25	600	8,17
76	40-41	3	1,25	600	8,17
77	02-03	3	1,25	600	8,17
78	05-06	3	1,25	600	8,17
79	09-10	3	1,25	600	8,17

APÊNDICE B

Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores

B.1 - Considerações Iniciais

Através do Fluxo de Potência Ótimo, é possível atender às demandas técnicas e operativas do sistema e ainda ajustar as injeções de potência reativa, possibilitando, desta forma, obter a minimização dos custos de geração e das perdas nas linhas de transmissão de um Sistema Elétrico de Potência [32]. Isto é, o problema do FPO é uma ferramenta computacional que tem por finalidade otimizar um determinado desempenho do sistema, satisfazendo às restrições que são regidas por particularidades operacionais e físicas da rede elétrica.

Devido ao fato do problema ser não linear, não convexo e com variáveis contínuas, sua complexidade é alta. Eis que surge a representação linear do fluxo de potência, onde a modelagem da relação entre potência injetada nas barras e ângulos das tensões passa a ser linearizada. Assim possibilitou a utilização de métodos lineares em sua solução.

Em substituição ao método Simplex criado por [117] que viabilizava a solução problemas da programação linear, mas com complexidade exponencial elevada, [118] propôs o Método dos Pontos Interiores (MPI) como uma maneira de solucionar problemas lineares de otimização. Em 1986, mais precisamente, 18/07/1986, através de uma publicação no The Wall Street Journal, Karmarkar demonstrou que era possível implementar o seu algoritmo na solução dos Fluxos de Potência da rede de transmissão da AT&T. Graças às demandas contínuas e mutantes dos SEPs, com o passar do tempo, o algoritmo foi se desenvolvendo, e Polyak, em [119], introduziu a barreira modificada ao método, buscando, assim, soluções também na região de fronteira e não somente próximas a ela [120], [121].

Este apêndice descreve os aspectos computacionais da metodologia primal-dual de pontos interiores na resolução de problemas de fluxo de potência ótimo. Neste trabalho, todos os FPOs foram solucionados no MatLab via sua toolbox de programação linear:

LINPROG. O método de otimização linear padrão do LINPROG é o método dual-simplex, porém, a toolbox permite a opção do método dos pontos interiores, e assim foi feito para realização dos testes contidos no presente trabalho.

A motivação desta aplicação deve-se ao bom desempenho mostrado pelos métodos de pontos interiores em programação linear de grande porte, assim como em programação quadrática e convexa. O algoritmo implementado resolve o sistema de equações resultante da formulação primal-dual pelo método de Newton-Raphson com critérios específicos de convergência e ajuste do parâmetro barreira.

B.2 - Formulação do problema de Fluxo de Potência Ótimo

Um problema de Fluxo de Potência Ótimo pode ser descrito da seguinte forma:

$$\min f(x_i) \tag{B.1}$$

sujeito a:

$$x_i \in X_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{B.2}$$

onde: $f(x)$ é a Função Objetivo; x é o conjunto de variáveis de decisão; n é o número de variáveis de decisão; X_i representa o domínio de soluções possíveis para cada variável [106]. O domínio das soluções factíveis pode ser representado por: equações de igualdade (B.3), isto é, restrições referentes às equações de balanço de potência e restrições funcionais; equações de desigualdade (B.4) e canalização (B.5), ou seja, restrições que definem limites inferiores e superiores sobre as variáveis de controle, variáveis de estado e folgas associadas às restrições funcionais.

$$g_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, M < n \tag{B.3}$$

$$h_k(x) \geq 0 \quad k = 1, 2, 3, \dots, P \tag{B.4}$$

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, Q \quad (\text{B.5})$$

onde: $x \in R^n$; $g(x) \in R^M$; $h(x) \in R^p$.

A formulação do problema parte da premissa que toda inequação pode ser transformada em uma equação de igualdade. Logo, as restrições de canalização (B.5) serão transformadas em equações.

As restrições de desigualdade que aparecem são do tipo (“>0”), ou seja, as restrições de desigualdade originais foram transformadas em variáveis não negativas, sendo tratadas através de penalização interna. Desta forma, este tipo de restrição pode ser incluída ao problema através de uma função penalidade. Para esta penalidade usualmente utiliza-se a função barreira logarítmica ($-\sum \ln(s)$), no entanto a função de barreira modificada ($-\sum \ln(s \cdot \mu^{-1} + 1)$) vem sendo utilizada em alguns estudos para FPO [121]. Com a inclusão da função barreira logarítmica modificada ou não, o problema original é transformado em uma sequência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira (μ). Assim, o problema primal (B.1) sujeito a (B.3), (B.4) e (B.5) é escrito como:

$$\text{Min } f(x) - \mu \sum_{i=1}^m \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^m \ln(su_i) \quad (\text{B.6})$$

sujeito a:

$$h_k(x) = 0 \quad (\lambda) \quad (\text{B.7})$$

$$x - sl = l \quad (\pi_l) \quad (\text{B.8})$$

$$x - su = u \quad (\pi_u) \quad (\text{B.9})$$

onde: m é o número de variáveis com restrições de canalização.

É possível notar em (B.6), que para cada valor de barreira (μ), tem-se um problema diferente. O conjunto de pontos obtidos para cada valor de μ define a trajetória de convergência no interior da região viável em relação às restrições de canalização. Logo, a otimalidade será alcançada quando $\mu=0$. Assim, é necessário executar um decréscimo no parâmetro barreira ($\mu_{k+1} < \mu_k$) [24].

Para solucionar este problema linear, aplica-se então a função Lagrangeana a ele, pois esta função transforma um determinado problema de otimização sujeito a restrições de

igualdade e desigualdades em um problema sem restrições. Portanto, ao aplicar os conceitos de Lagrange sobre as equações (B.6), (B.7), (B.8) e (B.9), obtém-se a seguinte Função Lagrangeana que descreve o problema:

$$L = f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) - \lambda^T \cdot h(x) \dots \quad (\text{B.10})$$

$$\dots - \pi_u^T \cdot (x + su - u) - \pi_l^T \cdot (x - sl - l)$$

B.3 - Resolução do problema pelo método de pontos interiores

Após a definição de (B.10), o passo seguinte do método é a utilização do algoritmo de Newton-Raphson (NR) de segunda ordem para a atualização das variáveis. Contudo, em (B.14) e (B.15) há uma diferenciação proposital referente aos passos máximos possíveis para cada variável primal ou dual. Eis o algoritmo:

B.3.1. Inicializar o problema e os parâmetros do algoritmo

O NR deve iniciar com número de iterações, $iter = 0$. Os valores iniciais para as variáveis s e π são obtidos através do gradiente de (B.10) igualado a 0, como em (B.11). Para os valores de x_i é recomendado que se inicie com valores factíveis. Normalmente, utiliza-se $\mu=1$ e $\lambda=0$. Desse modo define-se X_{iter} .

$$\nabla L = 0 \quad (\text{B.11})$$

B.3.2. Cálculo da Matriz Hessiana

A matriz Hessiana é a derivada do vetor gradiente ∇L para cada variável da função Lagrangeana.

$$Hess = \nabla(\nabla L) \quad (\text{B.12})$$

B.3.3. Cálculo do Delta

Com a matriz Hessiana, proveniente de (B.12), e o vetor gradiente (B.11), deve-se então substituir os valores de X_{iter} nas matrizes originais e calcular ΔX_{iter} conforme (B.13).

$$\Delta X_{iter} = -\nabla L(X_{iter}) / Hess(X_{iter}) \quad (B.13)$$

B.3.4. Atualização das Variáveis

Neste ponto do algoritmo há uma modificação pontual, demonstrada em (B.14) e (B.15). O objetivo desta variação é garantir as variáveis s_l, s_u, π_l e $\pi_u \geq 0$. Portanto, os passos primal e dual são calculados, respectivamente, por (18) e (19):

$$s_b^{iter+1} = s_b^{iter} + \alpha_p \cdot \Delta s_b^{iter} \quad (B.14)$$

$$\pi_b^{iter+1} = \pi_b^{iter} + \alpha_d \cdot \Delta \pi_b^{iter} \quad (B.15)$$

$$\alpha_p = \min \left\{ \left(\min_{\substack{\Delta s_b < 0 \\ e \\ s_b > 0}} \frac{s_b}{|\Delta s_b|} \right), 1 \right\} \quad (B.16)$$

$$\alpha_d = \min \left\{ \left(\min_{\substack{\Delta s_b < 0 \\ e \\ s_b > 0 \\ \Delta s_b > 0 \\ e \\ s_b < 0}} \frac{\pi_b}{|\Delta \pi_b|} \right), 1 \right\} \quad (B.17)$$

B.3.5. Checar Critério de Parada

Como ação final de uma iteração, o algoritmo testará se o critério de parada foi satisfeito, como demonstrado em (B.18). Caso não tenha sido, volta-se para o início, estágio 2.2.3, onde começará uma nova repetição do processo de busca. Ao final do processo de otimização, com o critério de parada satisfeito e a convergência do método constatada, o algoritmo retorna um provável ótimo global [25].

$$\max(\Delta X_{iter}) \leq erro \quad (B.18)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FONSECA, R. S. **Iluminação Elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1972.
2. FARIAS, L. M.; MIGUEL, A. S. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Liberato**, Nova Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 01-106, junho 2011.
3. COOK, E. F. **Man, Energy, Society**. San Francisco: W.H.Freeman & Co Ltd, 1976.
4. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2017**. EIA. [S.l.]. 2017.
5. PÚBLICO.PT. O MILÉNIO QUE MUDOU A HUMANIDADE. **Público.PT**, 2001. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2001/07/29/sociedade/noticia/esperanca-de-vida-triplicou-desde-o-ano-1000-33484>>. Acesso em: 15 out. 2017.
6. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Life expectancy at birth (years), 2000-2015. **WHO**, 2016. Disponível em: <http://gamapsver.who.int/gho/interactive_charts/mbd/life_expectancy/atlas.html>. Acesso em: 15 out. 2017.
7. MADDISON, A. **The World Economy: A Millennial Perspective**. [S.l.]: ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2001. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2001/07/29/sociedade/noticia/esperanca-de-vida-triplicou-desde-o-ano-1000-33484>>. Acesso em: 15 out. 2017.
8. DIGITAL, Á. 2. População mundial atingiu 7,6 bilhões de habitantes. **África 21 Digital**, 2017. Disponível em: <<https://africa21digital.com/2017/06/21/populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes/>>. Acesso em: 15 out. 2017.
9. BRASIL, E. A. ONU diz que população mundial chegará a 8,6 bilhões de pessoas em 2030. **EBC Agência Brasil**, 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2017-06/onu-diz-que-populacao-mundial-chegara-86-bilhoes-de-pessoas-em-2030>>. Acesso em: 15 out. 2017.
10. UNRIC. Relatório das Nações Unidas estima que a população mundial alcance os 9,6 mil milhões em 2050. **UNRIC**, 2017. Disponível em: <<http://www.unric.org/pt/actualidade/31160-relatorio-das-nacoes-unidas-estima-que-a-populacao-mundial-alcance-os-96-mil-milhoes-em-2050->>. Acesso em: 15 out.

- 2017.
11. WORLDWATCH INSTITUTE. UMA ESTRATÉGIA ENERGÉTICA PARA O SÉCULO XXI. **WWI**, 2001. Disponível em: <http://wwiuma.org.br/cf_%20esta_energ_secxxi.htm>. Acesso em: 15 out. 2017.
 12. PÚBLICO.PT. Um século de energia em Portugal. **Público.PT**, 2015. Disponível em: <<https://acervo.publico.pt/ecosfera/interactivo/um-seculo-de-energia-em-portugal>>. Acesso em: 15 out. 2017.
 13. LEÃO, R. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2009.
 14. KAPLAN, S. M. **Smart Grid. Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues**. [S.l.]: The Capital.Net, Government Series., 2009.
 15. CEMIG. O que são as redes inteligentes de energia? **CEMIG**, S/ Data. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Redes_Inteligentes/Paginas/as_redes_inteligentes.aspx>. Acesso em: 25 out. 2017.
 16. SILVA, M. J. L. V. R. D. **Smart Grids em Portugal - Plano de Negócio para Serviço de Planeamento e Gestão Remota de Consumos Eléctricos**. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 10. 2011.
 17. AES ELETROPAULO. AES Brasil - Sustentabilidade. **Redes Inteligentes: de São Paulo para o mundo**, 2016. Disponível em: <<http://aesbrasilsustentabilidade.com.br/pt/noticias/item/redes-inteligentes-de-sao-paulo-para-o-mundo>>. Acesso em: 28 out. 2017.
 18. FERREIRA, J. R. **Sistemas Eléctricos de Energia I - Linhas de Transmissão**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP. Porto, p. 5. 2004.
 19. U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Total Renewable Electricity Net Generation. **U. S. Energy Information Administration**, 2014. Disponível em: <https://www.eia.gov/beta/international/rankings/#?product=29-12&iso=BRA&pid=29&aid=12&tl_id=12-A&tl_type=a&cy=2014>. Acesso em: 26 out. 2017.
 20. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (Agosto - 2017)**. Ministério das Minas e Energia.

- Brasília. 2017.
21. OLIVEIRA, L. E. et al. **A Three Stage Hybrid Technique for Dynamic Transmission Network Expansion Planning**. THE 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017. Mar del Plata: [s.n.]. 2017.
 22. ALVES, A. C. et al. Algoritmos Genéticos Aplicados ao Planejamento da Distribuição de Energia Elétrica em Curitiba e Região Metropolitana. In: LOPES, H. S.; TAKAHASHI, R. H. C. **Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia**. Curitiba: Omnipax, 2011. Cap. 3, p. 56.
 23. MENDONÇA, I. M. **Identificação de Rotas Relevantes para o Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. Tese Ph. D., Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora. 2016.
 24. MENDONÇA, I. M. **Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Enxame de Partículas**. Dissertação M. Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora. 2012.
 25. OLIVEIRA, L. E. et al. **Planejamento Dinâmico da Expansão de Transmissão de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Algoritmo de Otimização Harmony Search**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte: [s.n.]. 2014. p. 1761-1768.
 26. AREDES, C. et al. **Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Via Ecolocalização**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte: [s.n.]. 2014. p. 1754 - 1760.
 27. POUBEL, R. P. B. **Planejamento Dinâmico da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. Dissertação M. Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora. 2012.
 28. QUESNAY, F. Tableau Economique. In: **Economistes Financiers du XVIII Siècle**. (Paris, 1843): reprinted in E. Daire, 1760.
 29. QUESNAY, F. Problème Economique. In: **Economistes Financiers du XVIII Siècle**. (Paris, 1843): [s.n.], 1760.

30. WALRAS, L. **Eléments d'Economie Politique Pure**. 1st ed. ed. Lausanne: [s.n.], 1874-1877.
31. LEONTIEF, W. W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. **Rev. Econ. Stat.**, v. 18, n. 3, p. 105-125, 1936.
32. CARPENTIER, J. L. Contribution a L'etude du Dispatching Economique. **Bull. Soc. Francaise Electricians**, v. 8, p. 431-447, Agosto 1962.
33. GARVER, L. L. Transmission Network Estimation Using Linear Programming. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 7, p. 688–1697, Sep. 1970.
34. DUSONCHET, Y. P.; EL-ABIAD, A. Transmission Planning Using Discrete Dynamic Optimizing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-92, n. 4, p. 1358–1371, Jul. 1973.
35. EL-ABIAD, A.; DUSONCHET, Y. Discrete optimization and the planning of electric power networks. **IEEE Transactions on Circuit Theory**, v. 20, n. 3, p. 230–238, May 1973.
36. FISCHL, R. **Optimal system expansion: a critical review**. System Engineering for Power: Status & Prospects, ERDA & EPRI Conf.. Henniker: [s.n.]. 1975.
37. VILLASANA, R.; GARVER, L. L.; SALON, S. J. Transmission Network Planning Using Linear Programming. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n. 2, p. 349–356, Feb. 1985.
38. PEREIRA, M. V. F. et al. A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. PAS-104, p. 3074- 3083, Nov. 1985.
39. BERRY, P. E.; DUNNETT, R. M. Contingency Constrained Economic Dispatch Algorithm for Transmission Planning. **IEE Proc**, v. 136-C, p. 238-244, Jul. 1989.
40. BAHIENSE, L. et al. Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 16, p. 560-565, Aug. 2001.
41. OLIVEIRA, E. J. D. et al. Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 3, p. 1616- 1621, Ago. 2005.

42. KIM, H. et al. Transmission System Expansion Planning of KEPCO System (YOUNG NAM area) Using Fuzzy Set Theory. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, v. 1, p. 535-540, 2002.
43. DE OLIVEIRA, L. E. et al. Dynamic and Static Transmission Network Expansion Planning via Harmony Search and Branch & Bound on a Hybrid Algorithm. In: PUBLISHING, I. . S. I. **Lecture Notes in Computer Science**. [S.l.]: [s.n.], v. 10423, 2017. Cap. 23, p. 271-282.
44. MONTICELLI, A. et al. Interactive Transmission Network Planning Using a Least effort Criterion. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. PAS-101, p. 3919- 3925, Oct. 1982.
45. SILVA, I. C. **Planejamento Estático da Expansão de Sistemas de Transmissão Utilizando um Novo Algoritmo Heurístico Construtivo**. Dissertação M. Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora. 2003.
46. HILL, R. F. A. D. J. A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 18, p. 374-380, Feb. 2003.
47. ROMERO, R. et al. Analysis of Heuristic Algorithms for the Transportation Model in Static and Multistage Planning in Network expansion systems. **IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, v. 150, n. 5, Sep. 2003.
48. ROMERO, R. et al. Evaluation of Hybrid Models for Static and Multistage Transmission System Planning. **Revista Controle & Automação**, v. 18, n. 1, Janeiro, Fevereiro e Março 2017.
49. GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. Static transmission expansion planning using Heuristic and metaheuristic techniques. **PowerTech, 2015 IEEE**, Eindhoven, p. 1-6, 2015.
50. LUZIA, L. F.; RODRIGUES, M. C. **Estudo sobre as Metaheurísticas**. Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME-USP). São Paulo. 2009.
51. ROMERO, R.; GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 11, p. 364-369, Feb. 1996.
52. CORTES-CARMONA, M.; PALMA-BEHNKE, R.; MOYA, O. **Transmission**

- Network Expansion Planning by a Hybrid Simulated Annealing Algorithm.** 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. [S.l.]: ISAP '09. 2009. p. 1-7.
53. SILVA, E. L. D. et al. Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 16, n. 1, p. 62-68, Fev. 2001.
 54. GALLEGO, R. A.; ROMERO, R.; MONTICELLI, A. J. Tabu Search Algorithm for Network Synthesis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 2, p. 490-495, May 2000.
 55. SILVA, A. M. D. et al. **Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs.** Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS '08). [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1-7.
 56. TANGKANANURUK, W.; DAMRONGKULKAMJORN, P. **Multi-Zone Transmission Expansion Planning Using Genetic Algorithm.** 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2008, vol. 2. [S.l.]: [s.n.]. p. 881-884.
 57. ROMERO, R.; RIDER, M. J.; SILVA, I. D. J. A Metaheuristic to Solve the Transmission Expansion Planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 4, p. 2289-2291, Nov. 2007.
 58. SILVA, E. L. D.; GIL, H. A.; AREIZA, J. M. Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 3, p. 1168-1174, Ago. 2000.
 59. RESENDE, S. S. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão através de Otimização de Colônia de Formigas.** M.Sc., Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Itajubá. 2006.
 60. LIMSAKUL, P.; POTHYIA, S.; LEEPRECHANON, N. **Application of Ant Colony Optimization to Transmission Network Expansion Planning with Security Constraint.** 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009). [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 1-6.

61. BINATO, S.; OLIVEIRA, G. C. D.; ARAÚJO, J. L. D. A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Transmission Expansion Planning. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 16, p. 247-253, May 2001.
62. YOUSSEF, H. K.; HACKAM, R. New Transmission Planning Model. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 4, p. 9-18, Feb. 1989.
63. WANG, X. L.; WANG, X. F.; MAO, Y. B. Improved Genetic Algorithm for Optimal Multistage Transmission System Planning. **Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf.**, v. 3, p. 1737-1742, Jul. 2001.
64. ESCOBAR, A. H.; GALLEGO, R. A.; ROMERO, R. Multistage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 19, p. 735-744, May 2004.
65. FU, R. et al. **New Congestion Monitoring Index Constrained Multistage Transmission Expansion Planning Under Market Environment**. DRPT2008. Nanjing, China: [s.n.]. 2008.
66. ROCHA, M. J. C. D. **Transmission Expansion Planning - A multiyear approach considering uncertainties**. D.Sc., FACULTY OF ENGINEERING OF UNIVERSITY OF PORTO (FEUP). Porto. 2011.
67. BRAGA, A. S. D.; SARAIVA, J. T. A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 20, p. 1631-1639, Aug. 2005.
68. SILVA, A. M. L. et al. Tabu Search Applied to Transmission Expansion Planning Considering Losses and Interruption Costs. **Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAFS '08. Proceedings of the 10th International Conference on**, Rincon, Puerto Rico, May 2008.
69. RESENDE, L. S.; SILVA, A. M. L.; HONÓRIO, L. M. Artificial Immune Systems and Differential Evolution Based Approaches Applied to Multi-Stage Transmission Expansion Planning, 2009.
70. GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. Transmission System Planning Considering Solar Distributed Generation Penetration. **14th International Conference on the European Energy Market (EEM)**, Dresden, Germany, Jun. 2017. ISSN ISSN:

2165-4093.

71. VERMA, A.; PANIGRAHI, B. K.; BIJWE, P. R. Harmony search algorithm for transmission network expansion planning. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 4, n. 6, p. 663-673, 2010. ISSN doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0611.
72. PARIZAD, A. et al. Application of Harmony Search for Transmission Expansion Planning Considering Security Index and Uncertainty. **International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems - EPECS'09**, Sharjah, United Arab Emirates, nov. 2009. ISSN ISBN: 978-1-4244-5477-8.
73. KIRKPATRICK, S.; GELATT, J. C. D.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, p. 671-680, 1983.
74. METROPOLIS, N. et al. Equations of State Calculations by Fast Computing Machines. **J. Chem. Phys.**, 1081-1092, v. 21, 1953.
75. GLOVER, F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. **Computers and Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986. ISSN doi:10.1016/0305-0548(86)90048-1.
76. GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu search. Modern Heuristics Techniques for Combinatorial Problems. **Blackwell Scientific Publications**, Oxford, 1993. 70-150.
77. HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
78. GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Boston: Addison Wesley, 1989.
79. DORIGO, M. **Optimization, learning and Natural Algorithms**. Ph.D. thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano. Milano, Italy. 1992.
80. EGHBAL, M.; SAHA, T. K.; HASAN, K. N. Transmission Expansion Planning by Meta-Heuristic Techniques: A Comparison of Shuffled Frog Leaping Algorithm, PSO and GA. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1-8, 2011.
81. GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. A New Heuristic Optimization. **Simulation**, v. 76, p. 60-86, 2001.
82. ENERGIA, M. D. M. E. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (Dezembro - 2016)**. Energia, Ministério das Minas e. Brasília, p. 27.

- 2017.
83. BELO MONTE TRANSMISSORA DE ENERGIA. A empresa. **BMTE**, 2014. Disponível em: <<http://www.bmte.com.br/the-company/>>. Acesso em: 18 out. 2017.
 84. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Mapas para Download. **Operador Nacional do Sistema**, 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 24 out. 2017.
 85. BORIN, P. D. O. F. **Influência de Feixes de Condutores em Linhas de Transmissão UAT CA**. Dissertação M.Sc., Universidade de Brasília (UnB). Brasília- DF. 2015.
 86. CIGRÉ WG A3.22. **TB 362: Technical Requirements for Substation Equipment exceeding 800 kV AC**. [S.l.]. 2008.
 87. CIGRE WG C4.306. **TB542: Insulation Coordination for UHV AC Systems**. [S.l.]. 2013.
 88. LIU, Z. **Ultra-High Voltage AC/DC Grids**. 1st. ed. Waltham: Academic Press, 2014.
 89. JARDINI, J. A. et al. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica**. Brasília: Goya, v. Estudos Técnicos e Econômicos, 2012.
 90. SILVEIRA, P. O. **Planejamento de sistemas de transmissão em área com fonte de geração intermitente, apoiado no uso de tecnologias avançadas**. Dissertação M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2017.
 91. CESI. News & Press Releases. **CESI**, 2015. Disponível em: <http://www.cesi.it/news_ideas/news/Documents/CESI_on_the_news/201404-India-steps-up-to-1200-kV.pdf>. Acesso em: 18 out. 2017.
 92. PATEL, R. R. et al. **Design and Optimization of Upgradable 1200 kV Transmission Line**. CIGRÉ UHV Colloquium. New Delhi: [s.n.]. 2013.
 93. STANDARD, B. Power Grid operationalises 1,200 kV test station at Bina. **Business Standard**, 2016. Disponível em: <http://www.business-standard.com/article/pti-stories/power-grid-operationalises-1-200-kv-test-station-at-bina-116051801162_1.html>. Acesso em: 18 out. 2017.
 94. JARDINI, J. A. et al. **Alternativas não convencionais para a transmissão de**

- energia elétrica.** Brasília: Goya, v. Estado da Arte, 2011.
95. RODRIGUES, L. A. **Análise Institucional e Regulatória da Integração de Energia Elétrica Entre o Brasil e os Demais Membros do MERCOSUL.** Dissertação M. Sc., Programa de Pós-Graduação em Energia – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 27-31. 2012.
 96. VAINER, C.; NUTI, M. **A Integração Energética Sul-Americana: Subsídios para uma Agenda Socioambiental.** INESC. Brasília, p. 72. 2008.
 97. REGIONAL, C. D. I. E. Síntesis Informativa Energética de los Países de la CIER. **CIER**, 2010. Disponível em: <www.cier.org.uy>. Acesso em: 12 nov. 2017.
 98. ITAIPU BINACIONAL. Itaipu Binacional. **Itaipu Binacional**, 2017. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 18 out. 2017.
 99. PEREIRA, P. Roraima tem quase três apagões por mês. **ESTADÃO - Economia e Negócios**, 2017. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,roraima-tem-quase-3-apagoes-por-mes,70001882326>>. Acesso em: 28 out. 2017.
 100. CHIPPE, H. J. E. A. Perspectiva da integração eletroenergética do cone sul: uma alternativa de evolução gradual. **Revista de CIER**, v. 54, p. 3-9, 2010.
 101. UTE. SISTEMA ELÉCTRICO. **UTE**, S. Data. Disponível em: <<https://portal.ute.com.uy/institucional-nuestro-patrimonio/sistema-el%C3%A9ctrico>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
 102. COMISSÃO EUROPEIA. Ligar os mercados da eletricidade para garantir a segurança de abastecimento, a integração do mercado e a utilização em vasta escala das energias renováveis. **Comissão Europeia**, 2015. Disponível em: <europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-4486_pt.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.
 103. CORPORATION, N. A. E. R. NERC Interconnections. **NERC**, 2012. Disponível em: <http://www.nerc.com/AboutNERC/keyplayers/PublishingImages/NERC_Interconnections_Color_072512.jpg>. Acesso em: 12 nov. 2017.
 104. FAIRLEY, P. A smarter Power Grid. **MIT Technology Review, Power Gridlock - Can new Digital Technology Break It Up?**, July/August 2001.
 105. WIKIPEDIA. Apagão nos Estados Unidos e Canadá em 2003. **Wikipedia**, S. Data.

- Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Map_of_North_America%2C_blackout_2003.svg>. Acesso em: 12 dez. 2017.
106. LEE, K. S.; GEEM, Z. W. A New Meta-Heuristic Algorithm for Continuous Engineering Optimization: Harmony Search Theory and Practice. **Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.** , v. 194, p. 3902-3933, 2005.
 107. OLIVEIRA, L. E. et al. ANÁLISE SOBRE O ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO METAHEURÍSTICO HARMONY SEARCH. **Acta Brazilian Science**, São Luís, Ma, v. 1, n. 4º Trim., p. 6-21, Out. 2017. ISSN ISSN: 2317-7403.
 108. OLIVEIRA, L. E. **Algoritmo de Otimização Metaheurístico Harmony Search**. Term Paper's Graduation, Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Juiz de Fora. 2013.
 109. YANG, X. S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. In: OPTIMIZATION, N. I. C. S. F. **Studies in Computational Intelligence**. Berlin: Springer, v. 284, 2010. p. 65-74.
 110. OLIVEIRA, L. E. et al. **Load Balance on Electrotechnology Projects via Harmony Search Algorithm Optimization**. THE 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017. Mar del Plata: [s.n.]. 2017.
 111. GONÇALVES, L. A. **Otimização de Parâmetros de modelos Pluvi-Fluviométricos Utilizando Algoritmo Genético e Busca Harmônica**. Dissertação MSc, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, UFMS. [S.l.]. 2008.
 112. BASSETT, C. What Are Guitar Arpeggios? **Rock Guitar Training**. Disponível em: <<http://www.rockguitartraining.com.au/what-are-guitar-arpeggios.html>>. Acesso em: 25 out. 2017.
 113. PESSOA, T. C. **Estratégias Paralelas Inteligentes para o Método Branch-And-Bound Aplicadas ao Problema do Caixeiro Viajante**. M.Sc. Dissertação, Univ. Est. do Ceará, UECE. Fortaleza. 2012.
 114. GOMES, P. V.; SARAIVA, J. T. Evaluation of the performance of space reduction technique using AC and DC models in Transmission Expansion problems. **13th International Conference on the European Energy Market (EEM)**, Porto,

Portugal, Jun 2016. ISSN ISSN: 2165-4093.

115. PINTO, R. C. **Introdução à Análise Combinatória**. Dissertação M. Sc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO). Rio de Janeiro, p. 36-41. Jul, 2014.
116. PEREIRA, M. V.; PINTO, L. M. Application Of Sensitivity Analysis Of Load Supplying Capability To Interactive Transmission Expansion Planning. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n. 2, p. 381-389, 1985.
117. DANTZIG, G. B. Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities. In: KOOPMANS, T. C. **Activity Analysis of Production and Allocation**. New York: John wiley & Sons, 1951. p. 339-347.
118. KARMARKAR, N. A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. **Combinatorica**, v. 4, p. 373-395, 1984.
119. POLYAK, R. A. Modified barrier functions. **Mathematical Programming**, v. 54, n. 2, p. 177-222, 1992.
120. SOUZA, V. A. **Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo Reativo Via Método da Função Lagrangeana Barreira Modificada**. Tese PhD., EESC/USP. São Carlos. 2006.
121. OLIVEIRA, L. E. D. et al. MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES COM BARREIRA MODIFICADA. **Acta Brazilian Science**, São Luís, v. 1, n. 3º Trim., p. 18-29, Jul. 2017. ISSN ISSN 2317-7403.
122. HEATH, S. T. L. **A Manual of Greek Mathematics**. [S.l.]: Clarendon Press, 1931.
123. GUTHRIE, W. K. C. **History of Greek Philosophy**. Cambridge: Cambridge University Press, v. I GUTHRIE, W.K.C. (1962). History of Greek Philosophy. Volume I. The Earlier Presocratics and the Pythagoreans, 1962.
124. HALICARNASSO, H. D. **The History of Herodotus**. [S.l.]: [s.n.], v. II, 440 a.C.
125. NOBELPRIZE.ORG. Sir Alexander Fleming - Biographical. **Nobelprize.org.**, 2014. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1945/fleming-bio.html>. Acesso em: 15 out. 2017.

126. G1. Conheça os maiores apagões da história pelo mundo. **G1**, 2009. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Sites/Especiais/Noticias/0,MUL1375144-16107,00-CONHECA+OS+MAIORES+APAGOES+DA+HISTORIA+PELO+MUNDO.html>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
127. SODRÉ, R. 8 apagões que ficaram na história. **Super Interessante**, 2017. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/blog/superlistas/8-apagoes-que-ficaram-na-historia/>>. Acesso em: 08 set. 2017.