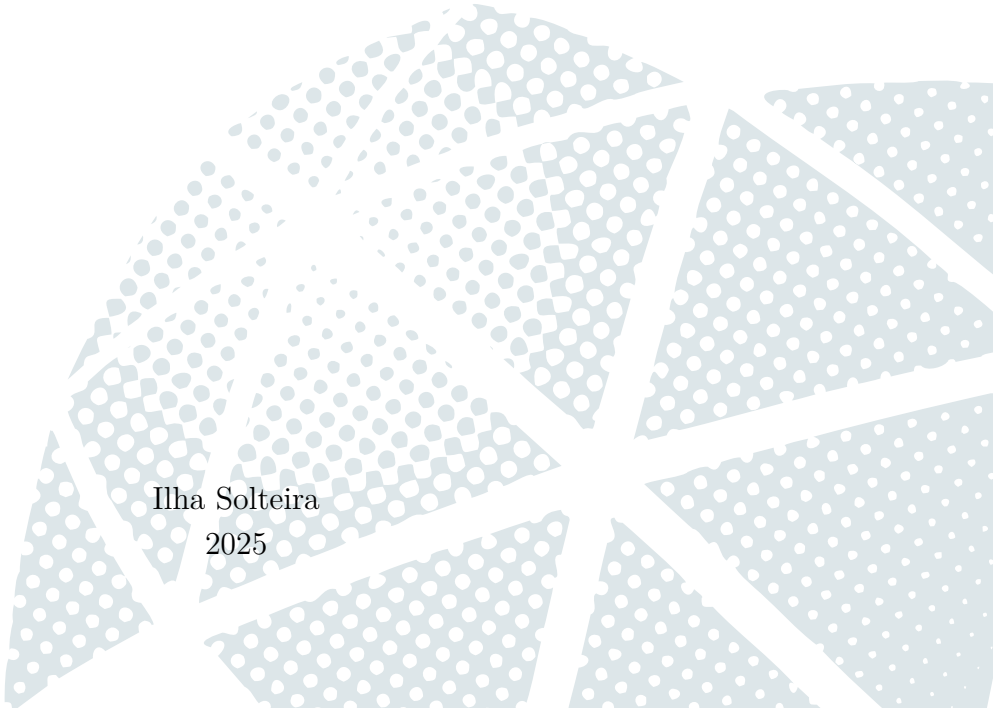


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Anthony Eric Pezo Mayta

**Otimização Multiobjetivo Híbrida para o Fluxo de Potência
Ótimo com Controle de Variáveis Discretas Utilizando Busca
Tabu e Programação Não Linear**



Ilha Solteira
2025

Anthony Eric Pezo Mayta

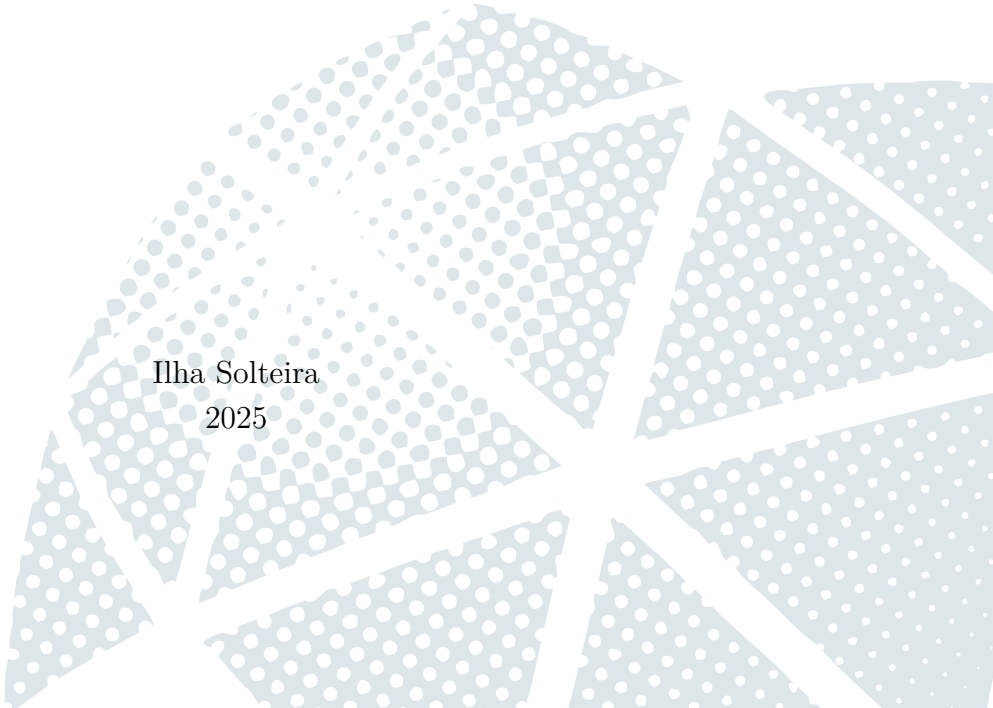
**Otimização Multiobjetivo Híbrida para o Fluxo de Potência
Ótimo com Controle de Variáveis Discretas Utilizando Busca
Tabu e Programação Não Linear**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
da Universidade Estadual Paulista–UNESP, Câmpus de
Ilha Solteira, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Ruben Romero

Ilha Solteira
2025



FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

P521h Pezo Mayta, Anthony Eric.
Hybrid multi-objective optimization for optimal power flow with discrete variable control using tabu search and nonlinear programming / Anthony Eric Pezo Mayta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
135 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência, 2026

Orientador: Ruben Romero
Coorientador: Leonardo Macedo Possagnolo
Inclui bibliografia

1. Optimal power flow. 2. Multi-objective optimization. 3. Tabu search. 4. Hybrid optimization.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto primordial desta pesquisa reside na entrega de uma ferramenta de decisão para operadores de sistemas elétricos, capaz de determinar o conjunto ótimo de variáveis contínuas e discretas essenciais para a gestão da rede. No âmbito técnico-científico e inovador, a metodologia permite equilibrar a minimização de custos de geração, perdas na transmissão e emissão de gases poluentes. Essa otimização multiobjetivo impulsiona o desenvolvimento sustentável e a eficiência econômica, maximizando recursos energéticos em conformidade com critérios ambientais. A validação dos algoritmos reforça a inserção nacional e internacional da pesquisa, contribuindo para o conhecimento sobre redes inteligentes e servindo de referência educacional para soluções que harmonizam economia e meio ambiente.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The primary impact of this research lies in providing a decision-support tool for power system operators, determining the optimal set of continuous and discrete variables essential for grid management. From a technical-scientific and innovative standpoint, the methodology enables balancing the minimization of generation costs, transmission losses, and pollutant emissions. This multi-objective optimization drives sustainable development and economic efficiency, maximizing energy resources in compliance with environmental criteria. The validation of these algorithms reinforces the research's national and international standing, contributing to knowledge on smart grid operation and serving as an educational reference for solutions that harmonize economic viability with the environment..

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Otimização multiobjetivo híbrida para o fluxo de potência ótimo com controle de variáveis discretas utilizando busca tabu e programação não linear

AUTOR: ANTHONY ERIC PEZO MAYTA

ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

COORIENTADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

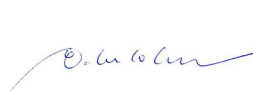
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Data: 26/01/2026 17:00:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Data: 26/01/2026 11:37:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

 Assinado de forma digital por Eduardo Nobuhiro Asada
DN: cn=Eduardo Nobuhiro Asada, o=USP, ou=EESC,
email=easada@usp.br, c=BR
Dados: 2026.01.26 08:06:34 -03'00'

Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 23 de janeiro de 2026.

*Dedico este trabalho à minha família, a minha mãe e meu pai que em paz descanse e
deus cuide dele
por seu apoio infinito*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me capacitou, deu-me saúde e forças para que tudo isso fosse possível.

Aos meus pais amados, Angelica e Martin que sempre acreditaram em mim e aos meus demais familiares.

A meu orientado professor Dr. Ruben Romero por aceitar-me orientar nesse trabalho, pelos ensinamentos, ao meu co-orientador Leonardo H. Macedo por compartilhar comigo seus conhecimentos acadêmicos, pela paciência, pelas sugestões a esse trabalho, por acreditar em mim e no meu potencial e tornar esse trabalho um aprendizado prazeroso. Se cheguei até aqui foi porque tive pessoas iguais a você que acreditaram em mim.

Aos amigos do Laboratório LAPSEE que de forma direta ou indiretamente me ajudaram.

A todos os meus amigos que tive a oportunidade de conhecer durante a minha vida acadêmica, por terem me motivado a prosseguir, dividirem comigo seus conhecimentos e tornarem essa jornada mais alegre e prazerosa.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"O que fazemos em vida ecoa pela eternidade"
(Marco Aurelio)

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia de otimização híbrida para resolver o problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo, considerando os objetivos conflitantes de custo de geração, perdas de potência ativa e emissão de poluentes. A abordagem proposta emprega uma estratégia de decomposição mestre-escravo, na qual a meta-heurística Busca Tabu Multiobjetivo é responsável por otimizar as variáveis de controle discretas (taps de transformadores e compensadores shunt), que definem a topologia operacional do sistema. Para cada configuração discreta candidata, um subproblema de Programação Não Linear é resolvido pelo solver Knitro, através de uma interface com a linguagem de modelagem AMPL, para determinar o estado ótimo das variáveis contínuas. A eficácia da metodologia foi validada nos sistemas-teste NESTA IEEE 30(modificado) , 118 e 300 barras, cujos modelos incorporam parâmetros mais realistas que os casos tradicionais. Os resultados demonstram a capacidade do algoritmo em gerar frentes de Pareto robustos e bem distribuídos, compostos por centenas de soluções não dominadas. A comparação dos pontos extremos do frente com soluções obtidas por otimização mono-objetivo PNL inteiro misto revelou uma excelente aderência, validando a precisão da abordagem híbrida. A ferramenta computacional desenvolvida constitui um valioso instrumento de apoio à decisão, fornecendo aos operadores do sistema um conjunto diversificado de soluções ótimas de compromisso entre os critérios econômicos, técnicos e ambientais.

Palavras-chave: Fluxo de Potência Ótimo. Otimização Multiobjetivo. Busca Tabu. Otimização Híbrida.

ABSTRACT

This work presents a hybrid optimization methodology to solve the Multi-objective Optimal Power Flow problem, considering the conflicting objectives of generation cost, active power losses, and pollutant emissions. The proposed approach employs a master-slave decomposition strategy, in which the Multi-objective Tabu Search metaheuristic is responsible for optimizing the discrete control variables (transformer taps and shunt compensators), which define the operational topology of the system. For each candidate discrete configuration, a Nonlinear Programming subproblem is solved by the solver Knitro, through an interface with the AMPL modeling language, to determine the optimal state of the continuous variables. The effectiveness of the methodology was validated on the NESTA IEEE 30(altered), 118 e 300-bus test systems, whose models incorporate more realistic parameters than traditional cases. The results demonstrate the algorithm's ability to generate robust and well-distributed Pareto fronts, composed of hundreds of non-dominated solutions. The comparison of the front's extreme points with solutions obtained by mono-objective Mixed Integer NLP optimization revealed an excellent adherence, validating the accuracy of the hybrid approach. The developed computational tool constitutes a valuable decision-support instrument, providing system operators with a diverse set of optimal trade-off solutions among economic, technical, and environmental criteria.

Keywords: Optimal Power Flow; Multi-objective Optimization; Tabu Search; Hybrid Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Fluxo da Metodologia Híbrida Proposta	41
Figura 2 – Tentativa de representação do Frente de Pareto 3D obtido para o Sistema de 30 Barras	58
Figura 3 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (emissões de poluentes vs. custo de geração)	59
Figura 4 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (perdas na transmissão vs. custo de geração)	59
Figura 5 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs. emissões de poluentes)	60
Figura 6 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas minimos do FP e Obtidas por PNLIM no Sistema de 30 Barras	63
Figura 7 – Perfil de Tensão para solução compromisso de nosso FP no Sistema de 30 Barras	64
Figura 8 – Proposta de representação do Frente de Pareto 3D obtido para o Sistema de 118 Barras	68
Figura 9 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (emissões de poluentes vs. custo de geração)	69
Figura 10 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs. custo de geração)	70
Figura 11 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs emissões de poluentes)	70
Figura 12 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas minimos do nosso FP y Obtidas por PNLIM no Sistema de 118 Barras	74
Figura 13 – Perfil de Tensão para uma Solução de Compromisso do FP no Sistema de 118 Barras	75
Figura 14 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de custo PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras	82
Figura 15 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de perdas PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras	82
Figura 16 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de Poluição PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras	83
Figura 17 – Perfil de Tensão para a Solução de compromisso da proposta FP no Sistema de 300 Barras	84
Figura 18 – Sistema de 30 Barras	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aprimoramentos dos Casos de Teste NESTA em Relação aos Modelos Tradicionais	35
Tabela 2 – Características dos Sistemas de Teste NESTA	54
Tabela 3 – Parâmetros de Configuração do Algoritmo MOTS	55
Tabela 4 – Distribuição de Iterações por Fase de Busca para cada Sistema Teste .	55
Tabela 5 – Parâmetros do Algoritmo e Fundamentação Técnica	56
Tabela 6 – Soluções Representativas do Frente de Pareto para o Sistema de 30 Barras	61
Tabela 7 – Configuração das Variáveis Discretas para as Soluções Representativas	62
Tabela 8 – Comparação entre Extremos do Frente de Pareto e Soluções PNLIM .	64
Tabela 9 – Comparação das Métricas de Desempenho	67
Tabela 10 – Soluções Representativas do Frente de Pareto para o Sistema de 118 Barras	72
Tabela 11 – Comparação entre Extremos do Frente de Pareto e Soluções PNLIM .	75
Tabela 12 – Comparação dos Ajustes de Variáveis Discretas: Sistema IEEE 118 Barras	77
Tabela 13 – Comparação de Variáveis Contínuas: Frente de Pareto vs PNLIM . . .	79
Tabela 14 – Comparação de Soluções Extremas (300 Barras): PNLIM <i>vs.</i> MOTS . .	84
Tabela 15 – Comparación de Variables Discretas (Parte 1: Taps 1-50)	87
Tabela 16 – Comparación de Variables Discretas (Parte 2: Taps 51-62 e Shunts) . .	88
Tabela 17 – Comparação de Variáveis Contínuas: Frente de Pareto vs PNLIM . . .	90
Tabela 18 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Mínimo Custo)	97
Tabela 19 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Mínimo Custo)	98
Tabela 20 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Mínimo Custo)	98
Tabela 21 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pela PNLIM (caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM)	99
Tabela 22 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo PNLIM KNITRO (Caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM).	100
Tabela 23 – Resumo dos resultados pelo algoritmo PNLIM KNITRO (Caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM).	100
Tabela 24 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 30 barras - Perdas Mínimas).	101
Tabela 25 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 30 barras - Perdas Mínimas).	102
Tabela 26 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Perdas Mínimas).	102

Tabela 27 – Resultados de tensão e ângulo nas barras (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PNLIM).	103
Tabela 28 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PNLIM).	104
Tabela 29 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PNLIM). . .	104
Tabela 30 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Mín Poluição)	105
Tabela 31 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Mín Poluição)	106
Tabela 32 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Mín Poluição MOTS).	106
Tabela 33 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo AMPL PNLIM (caso 30 barras - Mín Poluição)	107
Tabela 34 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo AMPL PNLIM (caso 30 barras - Mín Poluição)	108
Tabela 35 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Poluição Mínima PNLIM). . .	108
Tabela 36 – Resultados completos de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	109
Tabela 37 – Resultados completos de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	110
Tabela 38 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	111
Tabela 39 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	112
Tabela 40 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	113
Tabela 41 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).	114
Tabela 42 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).	115
Tabela 43 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).	116
Tabela 44 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).	117
Tabela 45 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).	118
Tabela 46 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).	119
Tabela 47 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Perdas).	120

Tabela 48 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).	121
Tabela 49 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).	122
Tabela 50 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 1.	123
Tabela 51 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 2.	124
Tabela 52 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 3.	125
Tabela 53 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).	126
Tabela 54 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.	129
Tabela 55 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.	130
Tabela 56 – Relação de geradores no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.	131
Tabela 57 – Coeficientes de custo por tipo de gerador no sistema de 30 barras	131
Tabela 58 – Coeficientes de poluição para o caso de 30 barras	131
Tabela 59 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 1.	132
Tabela 60 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 2.	133
Tabela 61 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 1.	134
Tabela 62 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 2.	135
Tabela 63 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 3.	136
Tabela 64 – Coeficientes de custo por tipo de gerador no sistema de 118 barras	137
Tabela 65 – Coeficientes de poluição para o caso de 118 barras	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPL	A Modeling Language for Mathematical Programming
MOTS	Multiobjective Tabu Search
BT	Busca Tabu
ED	Evolução Diferencial
FP	Frente de Pareto
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
FPO-MO	Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MINLP	Mixed-Integer Nonlinear Programming (ver PNLIM)
MOPs	Multiobjective Optimization Problems
MOEA	Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo
NESTA	NICTA Energy System Test Case Archive
NLP	Nonlinear Programming (ver PNL)
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NSGAI	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
PNL	Programação Não Linear
PNLIM	Programação Não Linear Inteira Mista
POM	Problema de Otimização Multiobjetivo
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SO _x	Óxidos de Enxofre
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
API	Interface de Programação de Aplicações
MOTS–Knitro	Multiobjective Tabu Search e olver Knitro

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos do Modelo Matemático (Capítulo 2)

c_{0i}, c_{1i}, c_{2i}	Coeficientes da função de custo do gerador i .
$f(x, u)$	Função objetivo geral do problema de otimização.
f_{custo}	Função objetivo de custo total de geração (US\$/h).
f_{perdas}	Função objetivo de perdas totais de potência ativa (MW).
$f_{poluicao}$	Função objetivo de emissão total de poluentes (ton/h).
$g(x, u)$	Vetor de restrições de igualdade (equações de fluxo de potência).
$h(x, u)$	Vetor de restrições de desigualdade (limites operacionais).
P_{ij}^{de}	Fluxo de potência ativa no ramo $i - j$ no sentido "de".
P_i^g	Potência ativa gerada na barra i (p.u.).
P_{ji}^{para}	Fluxo de potência ativa no ramo $i - j$ no sentido "para".
Q_i^g	Potência reativa gerada na barra i (p.u.).
u	Vetor de variáveis de controle (independentes).
V_i	Magnitude da tensão na barra i (p.u.).
x	Vetor de variáveis de estado (dependentes).
$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \xi_i, \lambda_i$	Coeficientes da função de emissão do gerador i .
θ_i	Ângulo da tensão na barra i (graus ou radianos).

Símbolos da Metodologia Proposta (Capítulo 3)

F_{MO}	Função objetivo multiobjetivo combinada e normalizada.
f_{obj}^{nadir}	Ponto nadir da função objetivo obj .
f_{obj}^{range}	Faixa de variação da função objetivo obj .
Ω_b	Conjunto de barras
Ω_l	conjunto de ramos (linhas)
Ω_g	Conjunto de barras geradoras
f_{obj}^{utopia}	Ponto utópico da função objetivo obj .
gP_i, gQ_i	Geração artificial de potência ativa e reativa na barra i .
N_{shunt}	Número total de compensadores shunt.
N_{tap}	Número total de transformadores com tap.

nt_k	Posição do tap do k-ésimo transformador.
S	Vetor de solução representando as variáveis discretas.
S_{atual}	Solução corrente na iteração da Busca Tabu.
$S_{vizinho}$	Solução vizinha gerada a partir da solução corrente.
w_{obj}	Peso associado à função objetivo obj na função combinada.
ρ	Fator de penalidade para infactibilidade da solução.
ω_{sh_j}	Estado de operação (0 ou 1) do j-ésimo compensador shunt.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	22
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	CONTRIBUÇÕES DO TRABALHO	23
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA MODERNOS	25
2.1.1	A Formulação Clássica e Seus Desafios	25
2.2	REVISÃO DE ABORDAGENS META-HEURÍSTICAS PARA O FPO MULTIOBJETIVO	26
2.2.1	Contexto histórico e evolução das abordagens para o FPO multiobjetivo	26
2.2.2	Análise Comparativa de Métodos do Estado da Arte	27
2.3	A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU MULTIOBJETIVO	29
2.3.1	Princípios Fundamentais da Busca Tabu	30
2.3.2	Adaptação para Otimização Multiobjetivo	30
2.4	O PARADIGMA MULTIOBJETIVO: COMPROMISSOS E A FRONTEIRA DE PARETO	32
2.4.1	Funções Objetivo Analisadas	32
2.5	JUSTIFICATIVA DOS CASOS DE TESTE NESTA	33
2.5.1	Deficiências dos Casos de Teste Tradicionais	33
2.5.2	A Vantagem do Arquivo NESTA	34
3	METODOLOGIA HÍBRIDA PROPOSTA (MOTS-KNITRO) .	36
3.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	36
3.2	VISÃO GERAL DA ABORDAGEM HÍBRIDA	40
3.3	REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO E TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS	42
3.4	ETAPA DE NORMALIZAÇÃO DOS OBJETIVOS	42
3.5	Estratégia de Pré-processamento e Inicialização Híbrida	43
3.5.1	Tratamento Específico para Espaços de Busca de Alta Dimensionalidade (Caso IEEE 300 Barras)	44

3.6	A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU MULTIOBJETIVO (MOTS)	
	PROPOSTA	45
3.6.1	Estratégia de Busca em Fases	45
3.6.2	Geração de Vizinhança	47
3.6.3	Avaliação da Função Objetivo e Tratamento das Restrições . .	47
3.6.4	Mecanismos de Memória e Atualização do Frente	48
3.6.5	Estratégias de Intensificação e Diversificação (Reinicialização) .	49
3.6.6	Consolidação Final do Frente de Pareto	50
3.7	TOMADA DE DECISÃO FUZZY PARA SELEÇÃO DA SOLUÇÃO	
	DE COMPROMISSO	50
3.7.1	Formulação Matemática	50
3.7.2	Critério de Seleção da BCS	51
3.8	RESOLUÇÃO DO SUBPROBLEMA DE PNL COM KNITRO	51
3.9	DETALHES DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	52
4	TESTES E RESULTADOS	54
4.1	CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	54
4.1.1	Sistemas de Teste	54
4.1.2	Parâmetros da Meta-heurística	54
4.2	RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 30 BARRAS	55
4.2.1	Análise do Frente de Pareto	56
4.2.2	Análise de Soluções Representativas	60
4.2.3	Análise das Estratégias de Controle (Taps e Shunts)	62
4.2.4	Análise do Perfil de Tensão	62
4.2.4.1	Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo Físico	62
4.2.4.2	Divergência em Custo e Poluição: A Natureza Multimodal	63
4.2.4.3	Robustez da Solução de Compromisso	64
4.2.5	Análise Comparativa entre PNLIM e MOTS 30B	64
4.2.6	Análise Comparativa das Métricas Globais de Operação 30	
	Barras	65
4.3	RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 118 BARRAS	67
4.3.1	Análise do Frente de Pareto	67
4.3.2	Análise das Soluções Representativas	71
4.3.3	Análise Comparativa da Topologia de Tensão: Meta-heurística	
	<i>versus</i> Solver Determinístico	73
4.3.3.1	Divergência nos Cenários de Custo e Poluição: A Multimodalidade do	
	Problema	73
4.3.3.2	Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo da Física	73
4.3.3.3	Análise da Solução de Compromisso	74
4.3.4	Análise Comparativa entre PNLIM e MOTS 118 Barras	75

4.3.5	Análise da Configuração das Variáveis Discretas de Controle .	76
4.3.6	Análise de Métricas de Desempenho Operativo 118 Barras . .	78
4.4	RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 300 BARRAS	79
4.4.1	Análise Comparativa dos Perfis de Tensão: Sistema IEEE 300 Barras	80
4.4.1.1	Divergência nos Cenários de Custo e Poluição: A Multimodalidade do Problema	80
4.4.1.2	Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo da Física	81
4.4.1.3	Análise da Solução de Compromisso	83
4.4.2	Validação e Superação dos Extremos na Fronteira de Pareto . .	84
4.4.2.1	Aderência no Custo e Refinamento nas Perdas	84
4.4.2.2	A Superação Expressiva no Cenário de Poluição	85
4.4.3	Análise da Configuração das Variáveis Discretas no Sistema de 300 Barras	85
4.4.4	Análise das Métricas de Rendimento Global: Sistema IEEE 300 Barras	88
4.4.4.1	A Ineficiência Sistêmica do Mínimo Custo Determinístico	88
4.4.4.2	Estresse de Reativos e Segurança de Tensão	89
4.4.4.3	Divergência no Cenário de Poluição	89
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	91
5.1	CONCLUSÕES	91
5.2	TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICES	96
	ANEXOS	127

1 INTRODUÇÃO

A operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) modernos é uma tarefa de crescente complexidade, impulsionada pela desregulamentação dos mercados de energia, pela crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e pela necessidade contínua de garantir um fornecimento de energia seguro e econômico (Araujo, 2018). Nesse cenário, o problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), introduzido por Carpentier na década de 1960, consolidou-se como uma ferramenta fundamental para o planejamento e a operação de redes elétricas (Oriondo; Alonso, 2016). Originalmente, o FPO focava-se primordialmente no despacho econômico, buscando minimizar os custos de geração de combustível (Monticelli, 1983).

Contudo, a visão puramente econômica tornou-se insuficiente para contemplar os múltiplos desafios contemporâneos. A operação de um SEP envolve um delicado equilíbrio entre objetivos que são, por natureza, conflitantes. A minimização dos custos de geração, por exemplo, pode levar ao despacho de unidades termelétricas mais poluentes, aumentando o impacto ambiental (Gong; Zhang; Qi, 2010). De forma análoga, a busca pela máxima eficiência técnica, através da minimização das perdas ativas nas linhas de transmissão, pode exigir um perfil de geração mais oneroso. Esta realidade transformou o FPO de um problema mono-objetivo para um paradigma de otimização multiobjetivo, no qual o operador do sistema deve navegar por um espaço de soluções de compromisso (*trade-offs*).

A complexidade do problema é acentuada pela necessidade de controlar não apenas variáveis contínuas, como a geração de potência ativa, mas também um conjunto de variáveis de controle discretas, como as posições dos comutadores de taps de transformadores e o estado de operação de bancos de capacitores e reatores shunt (Oriondo; Alonso, 2016). A inclusão dessas variáveis transforma o FPO em um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), uma classe de problemas de otimização notoriamente difíceis de resolver devido à sua natureza não convexa e ao espaço de busca combinatório.

Adicionalmente, a validação de novas metodologias de otimização depende criticamente da qualidade e do realismo dos modelos de sistemas utilizados. Muitos dos casos de teste tradicionalmente empregados na literatura, como os sistemas IEEE clássicos, foram desenvolvidos com foco em estudos de fluxo de potência e carecem de dados essenciais para análises de otimização robustas. Em resposta a essa lacuna, o arquivo NESTA (*NICTA Energy System Test Case Archive*) foi desenvolvido, oferecendo modelos de sistemas mais completos e com parâmetros mais realistas, que representam de forma mais fidedigna os desafios operacionais das redes elétricas atuais (Coffrin; Gordon; Scott, 2014).

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho aborda o problema de FPO sob a ótica da otimização multiobjetivo, buscando encontrar um conjunto de soluções de operação que representem os melhores compromissos possíveis entre três critérios fundamentais e concorrentes:

1. **Custo de Geração:** A minimização do custo total de combustível das unidades geradoras, modelado por uma função de custo quadrática.
2. **Perdas de Potência Ativa:** A minimização das perdas totais de energia nas linhas de transmissão do sistema, que representa um objetivo de eficiência técnica.
3. **Emissão de Poluentes:** A minimização da emissão de gases poluentes (como NO_x e SO_x) provenientes das usinas termelétricas, um objetivo de sustentabilidade ambiental modelado por uma combinação de funções polinomiais e exponenciais.

Para resolver este complexo problema PNLIM multiobjetivo, propõe-se uma metodologia de otimização híbrida que desacopla o tratamento das variáveis discretas e contínuas. A estratégia consiste em utilizar a meta-heurística Busca Tabu (BT), reconhecida por sua eficácia em explorar espaços de busca combinatórios (Yamamoto *et al.*, 2024), para determinar a configuração ótima das variáveis discretas (taps e shunts). Para cada configuração discreta candidata, o subproblema de otimização das variáveis contínuas é então resolvido como um problema de Programação Não Linear (PNL) através do solver de alta performance Knitro. A validação da metodologia é realizada nos sistemas-teste NESTA IEEE 30 , 118 e 300 barras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver e validar uma metodologia de otimização multiobjetivo híbrida, fundamentada na meta-heurística Busca Tabu e em programação não linear, para a resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo com controle de variáveis discretas, visando o equilíbrio ótimo entre custos operacionais, perdas técnicas e emissões de poluentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Modelar matematicamente o problema de FPO, incorporando as três funções objetivo conflitantes e as restrições operacionais e físicas do sistema.

- Desenvolver e implementar um algoritmo de Busca Tabu Multiobjetivo (MOTS) para gerenciar a busca no espaço combinatório das variáveis de controle discretas (taps e shunts).
- Integrar a meta-heurística com o solver de PNL Knitro, estabelecendo uma interface robusta para a avaliação de cada configuração discreta candidata.
- Aplicar a metodologia híbrida proposta aos sistemas-teste NESTA IEEE 30 , 118 e 300 barras para gerar os frentes de Pareto, que representam o conjunto de soluções ótimas de compromisso.
- Analisar as soluções não dominadas obtidas, com foco nas estratégias de controle e nos *trade-offs* entre os diferentes objetivos, fornecendo uma ferramenta de apoio à decisão para a operação do sistema.

1.3 CONTRIBUÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições desta pesquisa para a área de otimização de sistemas de potência são:

1. **Proposição de uma Metodologia Híbrida Eficaz:** A combinação da Busca Tabu para o tratamento das variáveis discretas com o solver Knitro para as variáveis contínuas representa uma abordagem robusta que explora as sinergias entre a capacidade de busca global de uma meta-heurística e a eficiência de convergência de um solver determinístico para problemas de PNL.
2. **Validação em Modelos Realistas:** A utilização dos casos de teste do arquivo NESTA para a validação dos resultados confere maior relevância prática aos resultados, uma vez que estes modelos incluem restrições e dados mais completos que os tradicionalmente utilizados.
3. **Análise Abrangente de Soluções Multiobjetivo:** A geração e análise detalhada dos frentes de Pareto para os critérios de custo, perdas e poluição oferecem uma visão aprofundada sobre as complexas relações de compromisso na operação de sistemas elétricos, fornecendo um conjunto valioso de soluções ótimas para apoiar a tomada de decisão dos operadores do sistema.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Após esta introdução, o **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica, detalhando o problema de Fluxo de Potência Ótimo, as técnicas de otimização, com ênfase na Busca Tabu, e os conceitos de otimização

multiobjetivo. O **Capítulo 3** descreve em profundidade a metodologia híbrida proposta, detalhando a implementação da Busca Tabu, a integração com o solver Knitro e a estrutura geral do algoritmo. O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia nos sistemas-teste, incluindo a análise dos frentes de Pareto e a comparação de soluções representativas. Finalmente, o **Capítulo 5** sistematiza as conclusões do trabalho e sugere direções para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo estabelece a base teórica e contextualiza o presente trabalho na literatura existente. Inicia-se com a formulação do problema de FPO, expandindo-o para o domínio multiobjetivo. Em seguida, realiza-se uma revisão crítica das abordagens meta-heurísticas empregadas para sua solução, culminando na apresentação detalhada da meta-heurística Busca Tabu Multiobjetivo, a metodologia central deste estudo. Finalmente, justifica-se a escolha do sistema de teste NESTA IEEE 30 e 118 barras como um benchmark realista e desafiador para a validação dos resultados.

2.1 O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA MODERNOS

O FPO é um dos problemas de otimização mais importantes na operação de sistemas elétricos de potência. Formalmente, consiste em determinar um ponto de operação de estado estacionário para uma rede elétrica que seja, ao mesmo tempo, factível do ponto de vista físico e ótimo em relação a um ou mais critérios pré-definidos. Matematicamente, o FPO é classificado como um problema de PNLIM, caracterizado por ser de grande porte, não convexo e multimodal.

2.1.1 A Formulação Clássica e Seus Desafios

$$\text{Minimizar } f(x, u) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

Onde $f(x, u)$ representa a função objetivo a ser minimizada; $g(x, u)$ é o conjunto de restrições de igualdade, que correspondem às equações de balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema (as equações de fluxo de potência); e $h(x, u)$ é o conjunto de restrições de desigualdade, que representam os limites operacionais da rede.

As variáveis de decisão do problema são divididas em:

- **Variáveis de estado (x):** Tipicamente, as magnitudes de tensão (V_i) e os ângulos de fase (θ_i) nas barras de carga.
- **Variáveis de controle (u):** São as variáveis relacionadas com dispositivos que o operador do sistema pode ajustar para otimizar a operação. Elas se dividem em:

- **Contínuas:** Geração de potência ativa (P_{ger}) das unidades geradoras e magnitudes de tensão (V_g) nas barras de geração.
- **Discretas:** Posições dos comutadores de taps dos transformadores (nt) e o estado de operação dos bancos de capacitores/reatores shunt (ω_{sh}), que são ajustados em passos discretos.

O principal desafio na resolução do problema de FPO reside em sua natureza matemática. As equações de fluxo de potência introduzem termos quadráticos (magnitudes de tensão) e transcendentais (senos e cossenos dos ângulos), tornando a região factível do problema não convexo. Modelos de otimização de problemas não convexos podem apresentar múltiplos ótimos locais. Métodos de otimização clássicos, que frequentemente dependem de gradientes para guiar a busca, são suscetíveis a convergir para um desses ótimos locais, sem garantia de encontrar a solução ótima global. Esta característica intrínseca da formulação do FPO motivou a comunidade de pesquisa a explorar técnicas de otimização mais robustas, como as meta-heurísticas, que são projetadas para navegar em espaços de busca complexos e multimodais de forma mais eficaz.

2.2 REVISÃO DE ABORDAGENS META-HEURÍSTICAS PARA O FPO MULTIOBJETIVO

A complexidade do problema FPO-MO, com sua natureza não linear, não convexa e multimodal, tornou as meta-heurísticas uma classe de técnicas de solução predominante na literatura. Esses algoritmos, inspirados em processos naturais ou físicos, utilizam mecanismos estocásticos e/ou determinísticos para explorar o espaço de soluções de forma mais eficaz do que os métodos clássicos, sendo particularmente adequados para evitar ótimos locais e lidar com variáveis discretas.

2.2.1 Contexto histórico e evolução das abordagens para o FPO multiobjetivo

A otimização do Fluxo de Potência (FPO) tem evoluído significativamente desde suas formulações iniciais, que se concentravam em um único objetivo de despacho econômico. A crescente preocupação com o impacto ambiental e a necessidade de maior eficiência e confiabilidade do sistema transformaram o problema em um domínio de Otimização Multiobjetivo (MOOPF). No MOOPF, objetivos conflitantes, como a minimização do custo de combustível e a minimização das emissões de poluentes (ex: SO_x , NO_x), são tratados simultaneamente. Com o contínuo desenvolvimento dos sistemas de potência, o problema expandiu-se para um FPO de Múltiplos Objetivos (MaOOPF), que considera quatro ou mais objetivos, incluindo custo, emissões, perdas de potência ativa (APL), desvio de magnitude da tensão (VMD) e índice de estabilidade da tensão (VSI). Esta transição para o MaOOPF introduz desafios substanciais, notadamente a necessidade de

navegar em espaços de busca de alta dimensão, caracterizados por paisagens não-convexas e grandes regiões inviáveis que dificultam a convergência dos otimizadores tradicionais.

2.2.2 Análise Comparativa de Métodos do Estado da Arte

Com o avanço da pesquisa em otimização, outras meta-heurísticas baseadas em inteligência de enxame e outros paradigmas foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso ao FPO-MO.

- **PSO Multiobjetivo (MOPSO):** Inspirada no comportamento social de bandos de pássaros ou cardumes de peixes, a PSO é uma técnica baseada em população onde cada "partícula"(solução) se move pelo espaço de busca. O movimento de cada partícula é influenciado por sua própria melhor posição encontrada até o momento (local best) e pela melhor posição encontrada por todo o enxame (global best). Para a adaptação multiobjetivo (MOPSO), conforme proposto por (Abido, 2009) os conceitos de local best e global best são redefinidos. Em vez de uma única melhor solução global, o algoritmo mantém um arquivo externo de soluções não-dominadas (a aproximação da Fronteira de Pareto), e o global best é selecionado a partir deste arquivo para guiar o enxame. Técnicas como agrupamento (clustering) são frequentemente usadas para gerenciar o tamanho do arquivo de soluções Pareto e garantir a diversidade.
- **NSGA-II:** Os Algoritmos Genéticos (AGs) foram uma das primeiras e mais populares meta-heurísticas aplicadas ao FPO. Baseados nos princípios da evolução natural de Darwin, como seleção, recombinação e mutação, os AGs operam sobre uma população de soluções candidatas, evoluindo-as ao longo de gerações para encontrar soluções de alta qualidade. O NSGA-II é um algoritmo evolutivo multiobjetivo que aplica operadores genéticos clássicos (cruzamento e mutação) sobre uma população, utilizando ordenação por não-dominância para hierarquizar soluções e incorporando elitismo ao combinar populações pais e filhas para preservar diversidade sem parâmetros externos, o NSGA-II emprega a crowding distance, que favorece soluções em regiões mais esparsas do espaço de objetivo, garantindo assim um espalhamento uniforme na fronteira de Pareto (Deb *et al.*, 2002). Um trabalho de referência nesta área é a tese de Araujo (2018), que propõe um algoritmo baseado no Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) para resolver um modelo FPO-MO não linear e inteiro misto. O NSGA-II é um algoritmo genético multiobjetivo elitista que utiliza um mecanismo de ordenação baseado em dominância para classificar a população em diferentes frentes não-dominadas. Adicionalmente, emprega uma métrica de distância de aglomeração (crowding distance) para manter a diversidade das soluções ao longo da Fronteira de Pareto, evitando a convergência prematura para

uma única região do espaço de soluções. A literatura revisada por (Araujo, 2018) demonstra a longa e bem-sucedida aplicação dos AGs ao FPO, citando trabalhos pioneiros como (Lai *et al.*, 1997) e (Bakirtzis *et al.*, 2002), que estabeleceram a viabilidade e eficácia desta abordagem.

- **Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2(SPEA2):** O SPEA2 é uma melhoria do SPEA original, o SPEA2 é um algoritmo elitista contemporâneo ao NSGA-II que utiliza um arquivo externo (archive) de tamanho fixo para manter as soluções não-dominadas. Sua principal característica é o mecanismo de 'atribuição de aptidão' (fitness assignment). O SPEA2 atribui um valor de aptidão explícito a cada indivíduo (tanto na população principal quanto no arquivo) com base em sua 'força' (Strength): a força de uma solução é definida pelo número de soluções que ela domina. A aptidão bruta de um indivíduo é então calculada somando-se as forças de todos os indivíduos que o dominam. Além da dominância, o SPEA2 incorpora uma medida de 'densidade', baseada na distância ao k -ésimo vizinho mais próximo, para diferenciar soluções com o mesmo valor de aptidão. Esta abordagem de (Força + Densidade) promove uma forte pressão de seleção em direção à fronteira de Pareto, mantendo uma boa distribuição das soluções. O SPEA2 revelou-se capaz de gerar uma distribuição mais uniforme de soluções na fronteira de Pareto do que o NSGA-II, atingindo soluções de compromisso com menores perdas de potência e desempenho comparável ao melhor encontrado por MOPSO (Jain; Lalwani; Lalwani, 2018) .
- **Tabu Search Multiobjetivo (MOTS):** O Tabu (TS) é uma heurística de busca local baseada em trajetória, que utiliza memória (lista tabu) para evitar ciclicidade e escapar de ótimos locais. O Tabu Search multiobjetivo estende o tabu search clássico para trabalhar diretamente com múltiplas soluções não-dominadas, nesta adaptação multiobjetivo, conforme proposto por (Baykasoglu; Owen; Gindy, 1999), não se baseia em uma população, mas redefine os estágios de seleção e atualização. Para lidar com múltiplos objetivos, o MOTS introduz duas listas dinâmicas além da lista tabu: a 'Lista Pareto' (Pareto list) e a 'Lista Candidata' (Candidate list). A 'Lista Pareto' armazena as soluções não-dominadas de elite selecionadas (análogo a um arquivo externo). A 'Lista Candidata' armazena outras soluções não-dominadas que foram geradas, mas não selecionadas, ajudando como um reservatório de diversidade. A seleção da próxima solução semente é feita a partir da 'Lista Candidata'. Se a busca estagnar, a solução mais antiga da 'Lista Candidata' é escolhida como semente, forçando a diversificação da busca para novas regiões da fronteira.
- **Three-Population Based Constrained Many-Objective Co-evolutionary Algorithm(TPCMaO):** O TPCMaO é um algoritmo projetado especificamente para problemas de Otimização Restrita de Múltiplos Objetivos, como o MaOOPF,

onde o desafio principal são as grandes regiões inviáveis no espaço de busca de alta dimensão. Proposto por (Tian *et al.*, 2023), sua estrutura coevolucionária decompõe o problema ao evoluir três populações com propósitos distintos: (1) A População 1 (P1) otimiza o problema original usando o 'princípio de dominância restrita', focando na fronteira viável. (2) A População 2 (P2) resolve um problema auxiliar 'não restrito', ignorando restrições para convergir rapidamente à fronteira de Pareto teórica, servindo como um 'explorador' para atravessar regiões inviáveis. (3) A População 3 (P3) resolve um problema de 'restrição relaxada' (usando ϵ -constraint dominance), agindo como um 'navegador' que explora a borda entre as regiões viáveis e inviáveis. A cooperação entre as três populações permite ao TPCMaO encontrar soluções viáveis e Pareto-ótimas em paisagens de otimização complexas onde os algoritmos MOO tradicionais falham.

A progressão de meta-heurísticas individuais para abordagens híbridas e evolutivas evidencia um desafio central e persistente na otimização: o equilíbrio entre a exploração global (a busca por novas regiões promissoras no espaço de soluções) e a exploração local (a busca refinada em torno das melhores soluções já encontradas). Este cenário valida a investigação de outras meta-heurísticas poderosas, como a Busca Tabu, que emprega mecanismos fundamentalmente diferentes, baseados em memória, para gerenciar esse equilíbrio, além de sua natureza de controle das variáveis discretas de problema (taps de transformadores e bancos de capacitores). A Busca Tabu, sendo baseada em trajetória, permite uma exploração sistemática, determinística e cirúrgica da vizinhança imediata das variáveis inteiras. Isso permite que a perturbação na topologia da rede seja gradual e controlada, mantendo a viabilidade física do sistema com maior frequência. A BT tem uma memória dupla (Lista de candidatos e Arquivo Pareto) com mecanismos de reinicialização estratégica, baseados na detecção de estagnação, o que emula a diversidade populacional sem o custo computacional de manter e avaliar uma população inteira via Knitro a cada geração, o que seria proibitivo.

2.3 A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU MULTIOBJETIVO

A Busca Tabu (BT) é uma meta-heurística baseada em trajetória que utiliza estruturas de memória para guiar a busca de forma inteligente e evitar a estagnação em ótimos locais. Diferentemente de algoritmos puramente estocásticos como AG e PSO, a BT emprega uma busca local determinística, mas com mecanismos que lhe permitem escapar de vales de atração e explorar o espaço de soluções de forma mais sistemática.

2.3.1 Princípios Fundamentais da Busca Tabu

A BT opera a partir de uma única solução corrente, chamada de "solução semente", e explora sua vizinhança a cada iteração. Os seus componentes fundamentais são (Baykasoglu; Owen; Gindy, 1999) :

- Estrutura de vizinhança: Define o conjunto de todas as soluções que podem ser alcançadas a partir da solução corrente através de um único "movimento". Um movimento é uma pequena perturbação na solução, como alterar o valor de uma variável de controle.
- Lista Tabu: É o mecanismo de memória de curto prazo da BT. Ela armazena os atributos dos movimentos recentes (por exemplo, a variável que foi alterada e seu valor anterior). Movimentos que revertem uma ação recente são declarados "tabu" ou proibidos por um determinado número de iterações (o tabu tenure). Isso impede que a busca retorne imediatamente a soluções já visitadas, forçando-a a explorar novas áreas e evitando ciclos curtos.
- Critério de Aspiração: É uma condição que permite que uma proibição tabu seja ignorada. O critério de aspiração mais comum é permitir um movimento tabu se ele levar a uma solução melhor do que a melhor solução encontrada até agora em toda a busca (best-so-far). Isso evita que regras rígidas impeçam o progresso em direção a soluções de alta qualidade.

2.3.2 Adaptação para Otimização Multiobjetivo

A adaptação da BT para problemas multiobjetivo, conforme proposto por (Baykasoglu; Owen; Gindy, 1999), requer uma redefinição fundamental das etapas de seleção e atualização para lidar com o conceito de dominância de Pareto. A Busca Tabu Multiobjetivo (BT-MO) introduz uma estrutura de memória mais sofisticada.

- Redefinição da seleção: base na não-dominância: Em um contexto multiobjetivo, não existe um único "melhor" vizinho. Em vez disso, a seleção é baseada na não-dominância. A partir da vizinhança da solução semente, o algoritmo identifica um conjunto de "soluções semente candidatas". Uma solução é considerada candidata se ela não for dominada por nenhuma outra solução na vizinhança atual, nem por nenhuma solução já armazenada nas listas de memória do algoritmo. A partir deste conjunto de candidatos, uma nova solução semente é selecionada, muitas vezes de forma aleatória, para promover a diversidade.
- Estrutura de Memória Dupla: Além da Lista Tabu tradicional, a BT-MO utiliza duas listas adicionais para gerenciar as soluções não-dominadas encontradas:

1. Lista de Pareto: Funciona como um arquivo de elite, armazenando o conjunto das melhores soluções não-dominadas encontradas ao longo de todo o processo de busca. Esta lista representa a aproximação da Fronteira de Pareto que o algoritmo constrói iterativamente. A cada iteração, novas soluções não-dominadas podem ser adicionadas à lista, e quaisquer soluções na lista que se tornem dominadas pelas novas são removidas.
2. Lista de Candidatos: Este é um mecanismo de memória secundário crucial para a diversificação da busca. Ela armazena outras soluções não-dominadas que foram geradas na vizinhança, mas que não foram selecionadas como a próxima solução semente. Se, em uma iteração, a busca não conseguir encontrar nenhuma nova solução semente candidata (indicando uma possível estagnação), o algoritmo pode selecionar uma solução da Lista de Candidatos como a nova semente. Este "salto" para uma região diferente e promissora do espaço de busca é um poderoso mecanismo de diversificação que ajuda a garantir uma exploração mais completa da Fronteira de Pareto.

A estrutura de memória dupla da BT-MO oferece uma abordagem mais estruturada para equilibrar a intensificação e a diversificação. A Lista de Pareto foca na intensificação, refinando a busca em torno das melhores soluções conhecidas. A Lista de Candidatos, por sua vez, institucionaliza a diversificação, fornecendo um reservatório de pontos de partida alternativos para quando a busca local se esgota. Esta combinação torna a BT-MO uma técnica particularmente promissora para encontrar um conjunto bem distribuído e de alta qualidade de soluções na Fronteira de Pareto.

Os conceitos fundamentais da otimização multiobjetivo são :

- Dominância: Uma solução x_1 domina uma solução x_2 se x_1 for estritamente melhor que x_2 em pelo menos um objetivo e não for pior em nenhum dos outros objetivos.
- Soluções Não-Dominadas: São as soluções para as quais não existe nenhuma outra solução factível que as domine. Todas as soluções não-dominadas são consideradas igualmente ótimas do ponto de vista da otimização multiobjetivo.
- Fronteira de Pareto: É o conjunto de todas as soluções não-dominadas no espaço de objetivos. Esta fronteira representa a superfície de compromisso (trade-off) ótima, ilustrando como a melhoria em um objetivo inevitavelmente leva à degradação de pelo menos um outro.

O objetivo final da resolução de um problema FPO-MO não é encontrar uma única resposta, mas sim aproximar a Fronteira de Pareto da forma mais precisa e abrangente possível. Isso fornece ao operador do sistema um conjunto valioso de alternativas operacio-

nais, cada uma representando um equilíbrio ótimo diferente entre os critérios econômicos, técnicos e ambientais, permitindo uma tomada de decisão mais informada e estratégica.

2.4 O PARADIGMA MULTIOBJETIVO: COMPROMISSOS E A FRONTEIRA DE PARETO

A operação de sistemas de potência modernos transcende a simples minimização de custos. Fatores como a eficiência da rede, a estabilidade e, cada vez mais, o impacto ambiental, tornaram-se critérios operacionais cruciais. Esta realidade transforma o FPO em um problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo (FPO-MO), onde múltiplos objetivos, frequentemente conflitantes, devem ser otimizados simultaneamente.

2.4.1 Funções Objetivo Analisadas

Neste trabalho, o FPO-MO é formulado com três objetivos centrais:

- **Minimização do Custo de Geração (fcusto):** O objetivo econômico tradicional, que busca despachar as unidades geradoras da forma mais barata possível

$$f_{\text{custo}} = \sum_{i \in NG(\text{PollutionEnergy})} (c_{2i} \cdot P_{\text{ger},i}^2 + c_{1i} \cdot P_{\text{ger},i} + c_{0i}) \quad (4)$$

- **Minimização das Perdas de Potência Ativa (fperdas):** Um objetivo técnico que visa maximizar a eficiência da transmissão de energia, reduzindo a quantidade de energia dissipada na rede, busca reduzir as perdas por efeito Joule na rede de transmissão. As perdas totais são calculadas como a soma das perdas em todos os ramos do sistema.

$$f_{\text{perdas}} = \sum_{(i,j) \in NR} (P_{\text{de},ij} + P_{\text{para},ij}) \quad (5)$$

- **Minimização da Emissão de Poluentes (fpoluicao):** A crescente conscientização sobre o impacto ambiental da geração de energia elétrica modificou as estratégias operacionais dos sistemas de potência, elevando a minimização de emissões a um objetivo de alta prioridade. O foco principal recai sobre os poluentes atmosféricos gerados pela queima de combustíveis fósseis, notadamente os óxidos de enxofre (SOx) e os óxidos de nitrogênio (NOx). A relação entre a potência ativa despachada por uma unidade térmica e a quantidade de poluentes que ela emite é complexa e altamente não linear. Para modelar este fenômeno, a literatura consolidou o uso de uma função que combina termos polinomiais e exponenciais, como extensivamente aplicado nos trabalhos de Abido (Abido, 2009). A emissão total é, portanto, a soma das contribuições de cada gerador

$$f_{\text{poluição}} = \sum_{i \in NG(\text{CleanEnergy})} (0.01(\gamma_i P_{\text{ger},i}^2 + \beta_i P_{\text{ger},i} + \alpha_i) + \xi_i e^{\lambda_i P_{\text{ger},i}}) \quad (6)$$

Nesta equação, a componente quadrática:

$$(\gamma_i P_{\text{ger},i}^2 + \beta_i P_{\text{ger},i} + \alpha_i) \quad (7)$$

representa a característica base de emissão da unidade, enquanto o termo exponencial:

$$\xi_i e^{\lambda_i P_{\text{ger},i}} \quad (8)$$

é frequentemente incluído para modelar com maior precisão os efeitos de "ponto de válvula"(valve-point effects), que causam picos de emissão em determinados níveis de operação. Os coeficientes $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \xi_i, \lambda_i$ são específicos para cada unidade geradora e determinados empiricamente.

A natureza conflitante desses objetivos é evidente. Por exemplo, a minimização do custo pode favorecer geradores térmicos mais antigos e baratos, que, no entanto, são mais poluentes. Por outro lado, a minimização das emissões pode exigir o uso de fontes mais limpas, mas potencialmente mais caras. Devido a esses conflitos, não existe uma única solução que seja a "melhor" para todos os objetivos simultaneamente. Em vez disso, a otimização multiobjetivo busca um conjunto de soluções de compromisso, conhecidas como soluções ótimas de Pareto.

2.5 JUSTIFICATIVA DOS CASOS DE TESTE NESTA

A validação de um novo algoritmo de otimização depende criticamente da qualidade e do realismo do sistema de teste utilizado. A escolha do benchmark não é apenas uma questão de dados, mas uma decisão metodológica que impacta diretamente a credibilidade e a generalização dos resultados obtidos. Por esta razão, este trabalho opta por utilizar os casos de teste do NICTA Energy System Test Case Archive (NESTA) (Coffrin; Gordon; Scott, 2014), especificamente as versões aprimoradas dos sistemas IEEE de 30, 118 e 300 barras.

2.5.1 Deficiências dos Casos de Teste Tradicionais

Muitos dos casos de teste padrão da IEEE, embora amplamente utilizados na literatura, foram desenvolvidos décadas atrás com o objetivo principal de validar algoritmos de fluxo de potência, e não de otimização. Conforme detalhado no relatório técnico do arquivo NESTA, esses casos clássicos apresentam deficiências significativas para estudos de FPO:

- **Restrições Inativas ou Ausentes:** Em muitos casos, os limites térmicos das linhas de transmissão são omitidos ou definidos com valores extremamente altos (e.g., 9900 MVA), o que impede a ocorrência de congestionamento na rede. Isso torna uma das principais restrições do FPO inativa e, consequentemente, o problema de otimização menos desafiador e menos representativo da realidade operacional.
- **Dados Econômicos Genéricos:** As funções de custo dos geradores são frequentemente omitidas ou modeladas com coeficientes genéricos e idênticos para todas as unidades, o que não reflete a diversidade econômica de um parque gerador real, onde diferentes tecnologias e combustíveis resultam em custos operacionais distintos.
- **Modelagem Incompleta dos Geradores:** Os limites de potência reativa dos geradores são, muitas vezes, simplificados, não representando a curva de capacidade completa que relaciona a produção de potência ativa e reativa de forma interdependente.

O uso desses casos de teste simplificados pode levar a conclusões otimistas sobre o desempenho de um algoritmo, pois o espaço de busca que ele explora pode ser artificialmente menos complexo do que o de um sistema real. A inadequação destes casos para estudos de otimização robustos é um tema recorrente na literatura, onde trabalhos como o (Beach *et al.*, 2024; Coffrin; Hijazi; Hentenryck, 2015) demonstram a necessidade de benchmarks mais desafiadores para avaliar corretamente o desempenho de diferentes relaxações convexas do problema de FPO.

2.5.2 A Vantagem do Arquivo NESTA

O projeto NESTA foi criado para superar essas limitações, aprimorando os casos de teste clássicos com dados mais realistas, derivados de fontes públicas e modelos estatísticos. A utilização dos casos nesta case 30, case 118 e case 300 IEEE NESTA neste trabalho é uma decisão metodológica deliberada para garantir que a avaliação da meta-heurística seja realizada em um cenário que se aproxima mais fielmente dos desafios encontrados na operação de sistemas de potência reais. As principais vantagens e inovações dos modelos NESTA estão resumidas na Tabela 1

Tabela 1 – Aprimoramentos dos Casos de Teste NESTA em Relação aos Modelos Tradicionais

Componente do Sistema	Problema nos Casos Tradicionais	Aprimoramento no NESTA
Limites Térmicos	Ausentes ou irreais (ex: 9900 MVA).tornando o congestionamento da rede improvável.	Modelo estatístico TL-Stat que estima limites com base nos parâmetros elétricos da linha (r , x , V), resultando em valores heterogêneos e realistas que permitem o congestionamento.
Custos de Geração	Ausentes ou genéricos, com coeficientes idênticos para todos os geradores, não refletindo a diversidade econômica.	Modelo AC-Stat baseado em preços de combustíveis para diferentes tipos de usinas (carvão, gás, nuclear, etc.), criando um cenário de despacho econômico mais realista.
Curvas de Capacidade P-Q	Simplificadas ou inexistentes.	Modelos RG-AM50 e AG-Stat que geram curvas de capacidade P-Q mais completas e realistas para os geradores, representando melhor suas restrições operacionais.
Limites de Ângulo de Fase	Omissão total.	Inclusão de limites de diferença de ângulo de fase entre barras adjacentes (e.g., 30°), uma restrição que pode impactar significativamente a factibilidade e o custo da solução.

Como resultado dessas melhorias, os casos NESTA frequentemente exibem "lacunas de otimalidade"(optimality gaps) significativas quando resolvidos por relaxações convexas, indicando que os problemas são genuinamente não convexas e difíceis de se resolver. Isso os torna benchmarks ideais para avaliar rigorosamente o desempenho de algoritmos de otimização avançados. A necessidade de benchmarks tão rigorosos é ainda mais acentuada quando se avaliam métodos de otimização para PNLIM não convexas, como as técnicas de relaxação e discretização propostas por Beach et al. (2023). Em tais cenários, a presença de restrições ativas e um espaço de busca realista, como os fornecidos pelo NESTA, é indispensável para uma validação científica robusta

3 METODOLOGIA HÍBRIDA PROPOSTA (MOTS-KNITRO)

Este capítulo detalha a arquitetura e os componentes da metodologia de otimização desenvolvida para resolver o problema de FPO multiobjetivo. A abordagem proposta é um método híbrido que integra uma MOTS, responsável pela otimização das variáveis de controle discretas, com o solver de PNL Knitro, que lida com as variáveis contínuas. Esta estratégia de decomposição mestre-escravo foi projetada para explorar eficientemente o espaço de busca complexo do problema PNLIM.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de FPO é modelado conforme apresentado nas Equações (9)–(33):

Objetivo 1: Minimizar o Custo Total de Geração

$$\text{obj}_1 = \sum_{i \in \Omega_g} (c_{2,i}(P_i^g)^2 + c_{1,i}P_i^g + c_{0,i}) + \rho \sum_{i \in \Omega_b \setminus \Omega_g} (g_i^p + g_i^q) \quad (9)$$

Objetivo 2: Minimizar Perdas Ativas na Transmissão

$$\text{obj}_2 = \sum_{(k,i,j) \in \text{RAM}} (P_{ij}^{\text{de}} + P_{ji}^{\text{para}}) + \rho \sum_{i \in \Omega_b \setminus \Omega_g} (g_i^p + g_i^q) \quad (10)$$

Objetivo 3: Minimizar Emissão de Poluentes

$$\text{obj}_3 = \sum_{i \in \Omega_g} [0.01(\gamma_i(P_i^g)^2 + \beta_i(P_i^g) + \alpha_i) + \xi_i e^{\lambda_i P_i^g}] + \rho \sum_{i \in \Omega_b \setminus \Omega_g} (g_i^p + g_i^q) \quad (11)$$

Objetivo 4 :Minimização Bi-objetivo: Custo e Perdas

Esta função combina os aspectos econômicos e de eficiência técnica, excluindo a componente ambiental.

$$\min \left(\frac{\text{obj}_1 - \text{co_utopian}}{\text{co_range}} \right) + \left(\frac{\text{obj}_2 - \text{losses_utopian}}{\text{losses_range}} \right) \quad (12)$$

Objetivo 5 :Minimização Bi-objetivo: Custo e Poluição

Nesta formulação, busca-se o equilíbrio entre a economicidade e a sustentabilidade ambiental, ignorando as perdas de transmissão.

$$\min \left(\frac{\text{obj}_1 - \text{co_utopian}}{\text{co_range}} \right) + \left(\frac{\text{obj}_3 - \text{pollution_utopian}}{\text{pollution_range}} \right) \quad (13)$$

Objetivo 6 :Minimização Bi-objetivo: Perdas e Poluição

Esta função prioriza exclusivamente a eficiência técnica e ambiental ("Green Efficient"), sem considerar diretamente o custo operacional.

$$\min \left(\frac{\text{obj}_2 - \text{losses_utopian}}{\text{losses_range}} \right) + \left(\frac{\text{obj}_3 - \text{pollution_utopian}}{\text{pollution_range}} \right) \quad (14)$$

Objetivo 7 : Minimização Multiobjetivo Composta (Normalizada)

$$\min \left(\frac{\text{obj}_1 - \text{co_utopian}}{\text{co_range}} \right) + \left(\frac{\text{obj}_2 - \text{losses_utopian}}{\text{losses_range}} \right) + \left(\frac{\text{obj}_3 - \text{pollution_utopian}}{\text{pollution_range}} \right) \quad (15)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} P_i^g - P_i^l - \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji}^{\text{Re}} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij}^{\text{Se}} \\ - V_i^2 G_i^{\text{sh}} + g_i^p = 0, \quad \forall i \in \Omega_b \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Q_i^g - Q_i^l - \sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji}^{\text{Re}} - \sum_{ij \in \Omega_l} Q_{ij}^{\text{Se}} \\ + V_i^2 B_i^{\text{sh}} \omega_i + g_i^q = 0, \quad \forall i \in \Omega_b \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_{ij}^{\text{de}} = G_{ij} \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right)^2 V_i^2 \\ - \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right) V_i V_j \\ \cdot \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right. \\ \left. + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right], \quad \forall ij \in \Omega_l \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{ij}^{\text{para}} = G_{ij} V_j^2 \\ - \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right) V_i V_j \\ \cdot \left[G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right. \\ \left. - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right], \quad \forall ij \in \Omega_l \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij}^{\text{de}} = & - \left(B_{ij} + B_{ij}^{\text{sh}} \right) \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right)^2 V_i^2 \\
& + \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right) V_i V_j \\
& \cdot \left[B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right. \\
& \quad \left. - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right], \quad \forall ij \in \Omega_l
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij}^{\text{para}} = & - \left(B_{ij} + B_{ij}^{\text{sh}} \right) V_j^2 \\
& + \left(1 + r_{ij}^{\%} \frac{t_{ij}}{\bar{t}_{ij}} \right) V_i V_j \\
& \cdot \left[B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right. \\
& \quad \left. + G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right], \quad \forall ij \in \Omega_l
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V}, \quad \forall i \in \Omega_b \tag{22}$$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g, \quad \forall i \in \Omega_g \tag{23}$$

$$\underline{Q}_i^g \leq Q_i^g \leq \bar{Q}_i^g, \quad \forall i \in \Omega_g \tag{24}$$

$$(P_{ij}^{\text{de}})^2 + (Q_{ij}^{\text{de}})^2 \leq \bar{S}_{ij}^2, \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{25}$$

$$(P_{ij}^{\text{para}})^2 + (Q_{ij}^{\text{para}})^2 \leq \bar{S}_{ij}^2, \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{26}$$

$$g_i^p, g_i^q \geq 0, \quad \forall i \in \Omega_b \tag{27}$$

$$g_i^p, g_i^q = 0, \quad \forall i \in \Omega_g \tag{28}$$

$$-\bar{t}_{ij} \leq t_{ij} \leq \bar{t}_{ij}, \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{29}$$

$$\theta_i = 0, \quad i = \text{barra de referência} \tag{30}$$

$$\theta_m \leq \theta_i - \theta_j \leq \theta_M, \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{31}$$

$$\omega_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega_b \tag{32}$$

$$t_{ij} \in \mathbb{Z}, \quad \forall ij \in \Omega_l \tag{33}$$

As Equações (9)–(15) representam as funções objetivo fundamentais consideradas neste trabalho. Cada uma dessas expressões será utilizada de forma isolada durante diferentes estágios do processo de busca da função multiobjetivo. Ao focar-se em uma função específica por vez, é possível explorar nichos distintos no espaço de soluções, gerando diferentes vizinhanças e promovendo uma diversificação efetiva na construção da Fronteira de Pareto.

Nas equações (9)–(33), os conjuntos são definidos como: Ω_b é o conjunto de barras (nós), Ω_g é o subconjunto de barras com geração e Ω_l o conjunto de ramos (linhas).

Os parâmetros são os seguintes: c_i^2, c_i^1, c_i^0 : coeficientes do custo de geração; ρ : penalidade para geração artificial (configurado com o valor 10^6); G_{ij}, B_{ij} : condutância e suscep-

tância do ramo; $B_{ij}^{\text{sh}}, G_i^{\text{sh}}, B_i^{\text{sh}}$: parâmetros shunt; $(r_{ij}^{\%})$ é tamanho de passo de regulação para o tap do transformador no ramo i, j ; $\bar{t}_{ij}$ o número de taps do transformador no ramo i, j ; ϕ_{ij} o valor do ângulo de defasagem introduzido pelo transformador defasador no ramo i, j ; $\underline{V}, \bar{V}, \underline{P}_i^g, \bar{P}_i^g, \underline{Q}_i^g, \bar{Q}_i^g$: limites de operação; P_i^l, Q_i^l : demandas nas barras; $\bar{S}_{ij}$: limite de potência aparente.

As variáveis de decisão incluem: P_i^g, Q_i^g : geração ativa e reativa; V_i, θ_i : magnitude e ângulo da tensão; $P_{ij}^{\text{de}}, P_{ij}^{\text{para}}, Q_{ij}^{\text{de}}, Q_{ij}^{\text{para}}$: fluxos de potência; t_{ij} : posição do tap do transformador; ω_i : estado do dispositivo shunt; g_i^p, g_i^q : variáveis de corte de carga.

A restrição angular (31) com $\theta_m = -30^\circ$ e $\theta_M = 30^\circ$ não visa forçar o modelo a convergir para um ótimo local artificial, mas sim reproduzir condições operacionais realistas. Em sistemas de potência reais, diferenças angulares superiores a 30° podem indicar instabilidade de tensão ou riscos de colapso.

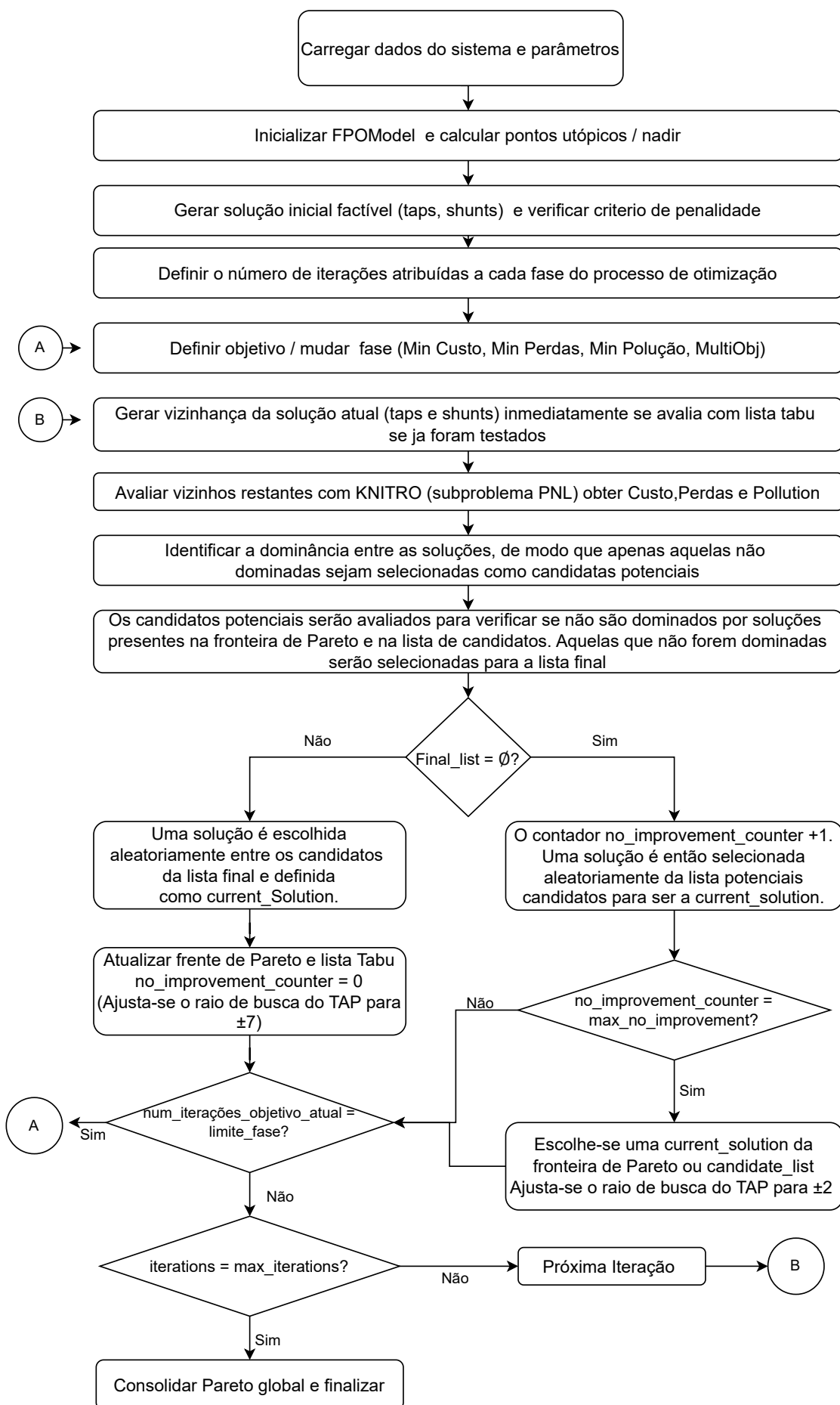
A escolha dos valores $\pm 30^\circ$ baseia-se em estudos de estabilidade transitória para sistemas de grande porte (Coffrin; Gordon; Scott, 2014).

A abordagem híbrida ETS-KNITRO combina exploração meta-heurística de variáveis discretas com programação não linear contínua. Cada solução é avaliada por meio da resolução do subproblema FPO contínuo e da verificação das restrições (22)–(33). O método garante a viabilidade ao mesmo tempo que minimiza os custos de geração definidos em (15).

3.2 VISÃO GERAL DA ABORDAGEM HÍBRIDA

A lógica central da metodologia é separar o problema de otimização em dois níveis hierárquicos. O nível superior, ou "mestre", é governado pela meta-heurística Busca Tabu, que explora o espaço de busca combinatório definido pelas variáveis discretas (posições de taps e estados dos shunts). O nível inferior, ou "escravo", consiste na resolução de um subproblema de FPO puramente contínuo, onde os valores das variáveis discretas são fixados conforme determinado pelo algoritmo mestre.

Para cada nova configuração de variáveis discretas gerada pela Busca Tabu, o subproblema de PNL é modelado na linguagem AMPL e resolvido pelo solver Knitro. O resultado desta otimização — os valores das três funções objetivo (custo, perdas e poluição) e o status de factibilidade — é então retornado ao algoritmo mestre, que utiliza essa informação para avaliar a qualidade da configuração e guiar o processo de busca. A comunicação entre a implementação da Busca Tabu (em Python) e o solver é gerenciada por uma Interface de Programação de Aplicações (API), permitindo um fluxo de trabalho automatizado. O fluxograma geral da metodologia é ilustrado na Figura 1.



3.3 REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO E TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS

Uma solução candidata no espaço de busca da MOTS é representada por um vetor de inteiros. Este vetor, S , representa o estado de todas as variáveis de controle discretas do sistema, sendo sua dimensão definida pelo número total de taps de transformadores (N_{tap}) e compensadores shunt (N_{shunt}):

$$S = [t_1, t_2, \dots, t_{N_{\text{TP}}}, s_1, s_2, \dots, s_{N_{\text{SH}}}] \quad (34)$$

onde:

- $t_i \in [-16, 16]$: valores inteiros representando a posição dos taps;
- $s_j \in \{0, 1\}$: representando o estado desligado/ligado para shunts.

Esse vetor é a entrada do modelo AMPL, via parâmetros **nt** (taps) e **w** (shunts).

3.4 ETAPA DE NORMALIZAÇÃO DOS OBJETIVOS

Para garantir que todos os objetivos sejam tratados com igual importância, o algoritmo inicia com uma etapa de pré-processamento para calcular fatores de normalização. O processo consiste em determinar os **pontos utópicos** (melhor valor alcançável para cada objetivo) e os **pontos nadir** (pior valor de um objetivo quando outro é otimizado). Com estes valores, calcula-se a faixa de variação ($f_{\text{obj}}^{\text{range}}$) para cada objetivo. Estes parâmetros são então utilizados para formular uma função objetivo combinada e normalizada, conforme a Equação (35).

$$\begin{aligned} \min F_{\text{MO}} = & \frac{f_{\text{custo}} - f_{\text{custo}}^{\text{utopia}}}{f_{\text{custo}}^{\text{range}}} + \\ & \frac{f_{\text{perdas}} - f_{\text{perdas}}^{\text{utopia}}}{f_{\text{perdas}}^{\text{range}}} + \\ & \frac{f_{\text{poluicao}} - f_{\text{poluicao}}^{\text{utopia}}}{f_{\text{poluicao}}^{\text{range}}} + \\ & \rho \cdot \sum (gP_i + gQ_i) \end{aligned} \quad (35)$$

Os valores de f_{range} são definidos como a diferença entre o valor *nadir* (o pior valor obtido na fase de pré-processamento) e o valor *utópico* (o melhor valor obtido nessa mesma fase), conforme a seguinte expressão:

$$f_{\text{range}} = f_{\text{nadir}} - f_{\text{utopic}}$$

Nos casos em que o valor *nadir* se apresenta excessivamente elevado, adota-se o segundo pior valor obtido, com o intuito de evitar que o método Tabu apresente completo desinteresse na busca por algum dos objetivos. Essa medida visa manter o equilíbrio na exploração do espaço de busca, assegurando que o algoritmo continue a procurar soluções de melhor qualidade de forma equitativa entre todos os objetivos considerados.

3.5 Estratégia de Pré-processamento e Inicialização Híbrida

A eficiência de algoritmos meta-heurísticos, como a Busca Tabu Multiobjetivo (MOTS), é fortemente dependente da qualidade da solução inicial. Em problemas de alta complexidade combinatória, como o FPOM com variáveis discretas, iniciar a busca a partir de um ponto aleatório pode resultar em um esforço computacional excessivo apenas para alcançar a região de viabilidade.

Para mitigar esse risco e acelerar a convergência, desenvolveu-se uma estratégia de *warm-start* (inicialização a quente) baseada em Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP). Esta etapa de pré-processamento é executada antes do ciclo iterativo principal da meta-heurística e visa identificar uma configuração robusta para as variáveis de controle discretas (taps de transformadores e compensadores shunt).

O módulo de pré-processamento, integrado via *scripting* em Python e AMPL, formula um problema de otimização mono-objetivo agregado. Diferentemente da abordagem clássica de soma ponderada, utiliza-se uma normalização baseada em pontos utópicos e nadir pré-calculados para cada sistema teste, garantindo que nenhum objetivo domine a busca inicial. A função objetivo composta é definida conforme a Equação 36:

$$\min F_{multiobj} = \left(\frac{F_C(x, u) - F_C^{utopia}}{R_C} \right) + \left(\frac{F_L(x, u) - F_L^{utopia}}{R_L} \right) + \left(\frac{F_P(x, u) - F_P^{utopia}}{R_P} \right) \quad (36)$$

onde R_i representa o intervalo de variação (*Range*) de cada objetivo.

O solver KNITRO é empregado para resolver esta formulação relaxada. Após a convergência, o algoritmo captura o vetor de variáveis discretas otimizadas $\vec{u}_{init} = [Tap_1, \dots, Tap_{N_{TP}}, Shunt_1, \dots, Shunt_{N_{SH}}]$. Este vetor é então fixado como a solução somente para a lista Tabu, garantindo que a exploração inicie a partir de um ponto operacional de alta performance e equilibrado entre os objetivos conflitantes.

3.5.1 Tratamento Específico para Espaços de Busca de Alta Dimensionalidade (Caso IEEE 300 Barras)

A aplicação da metodologia ao sistema IEEE 300 barras impõe desafios adicionais devido à explosão combinatória do espaço de busca, composto por 62 transformadores com 33 posições discretas e 14 elementos shunt ($33^{62} \times 2^{14}$ combinações possíveis). Nestas condições, uma única solução inicial, mesmo que otimizada, pode não garantir a diversidade necessária para a construção de uma Fronteira de Pareto densa.

Para superar essa limitação, implementou-se um mecanismo de ****Injeção de Soluções Extremas (Extreme Solution Injection - ESI)****. Este procedimento estende o pré-processamento padrão através das seguintes etapas sequenciais automatizadas no script de controle:

1. **Resolução Dedicada de Extremos:** O algoritmo invoca o solver MINLP para resolver três modelos distintos e independentes, focados exclusivamente na minimização individual de Custo, Perdas e Poluição.
2. **Estratégia *Fix-and-Reevaluate*:** Devido à natureza não linear do problema, a simples extração das variáveis discretas pode levar a inconsistências no cálculo dos fluxos de potência AC. Para garantir a integridade dos dados, o algoritmo aplica uma técnica de fixação:
 - As variáveis inteiras ótimas (nt e w) encontradas pelo MINLP são fixadas no modelo.
 - O problema é re-resolvido como um NLP contínuo puro para ajustar as variáveis de estado (V, θ, P_g, Q_g) à configuração discreta imposta.
3. **Povoamento do Arquivo:** As três soluções resultantes, que representam os vértices teóricos (âncoras) da Fronteira de Pareto, são injetadas diretamente na memória do algoritmo Tabu e no arquivo de soluções não dominadas antes da primeira iteração estocástica.

Esta abordagem assegura que o algoritmo meta-heurístico possua "pontos de refúgio" de alta qualidade. Caso a busca local estagne em ótimos locais de baixa qualidade durante o processo evolutivo, o mecanismo de reinício (*restart mechanism*) pode utilizar essas soluções injetadas como base para explorar novas regiões promissoras do hiperespaço de busca, aumentando significativamente a probabilidade de convergência para o verdadeiro ótimo global.

3.6 A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU MULTIOBJETIVO (MOTS) PROPOSTA

Após a normalização, o algoritmo inicia a busca iterativa, caracterizada por uma estratégia de busca em fases para garantir uma exploração diversificada do frente de Pareto.

3.6.1 Estratégia de Busca em Fases

O número total de iterações é dividido em fases, cada uma focada em um objetivo específico ($\text{Minimize}_{\text{Cost}}$, $\text{Minimize}_{\text{Losses}}$, $\text{Minimize}_{\text{Cost}+\text{Losses}}$, $\text{Minimize}_{\text{Losses}}$, $\text{Minimize}_{\text{Losses}+\text{Pollution}}$, $\text{Minimize}_{\text{Pollution}}$, $\text{Minimize}_{\text{Cost}+\text{Pollution}}$ e a função *Multiobjetivo* combinada(15)). Esta abordagem garante que o algoritmo explore intensivamente tanto as regiões extremas quanto as de compromisso da Fronteira de Pareto. O procedimento geral é apresentado no Algoritmo 1.

Para todos os sistemas analisados (IEEE 30, 118 e 300 barras), adotou-se uma sequência de busca padronizada e determinística, projetada para realizar uma varredura topológica completa do espaço de soluções. Imediatamente após a etapa de pré-processamento e injeção da solução inicial, o ciclo iterativo principal direciona a exploração seguindo a ordem definida pelo vetor de fases `custom_phase_iterations`:

1. **Exploração de Âncoras Mono-objetivo:** O algoritmo inicia focando exclusivamente na minimização do Custo ($\text{Minimize}_{\text{Cost}}$), seguido pela transição para Perdas ($\text{Minimize}_{\text{Losses}}$) e, posteriormente, Poluição ($\text{Minimize}_{\text{Pollution}}$).
2. **Exploração de Arestas Bi-objetivo:** Intercaladas entre os objetivos puros, executam-se fases de transição híbrida ($\text{Minimize}_{\text{Cost}+\text{Losses}}$, $\text{Minimize}_{\text{Cost}+\text{Pollution}}$, etc.), que forçam a população a navegar pelas "arestas" do hiperplano de Pareto.
3. **Consolidação Multiobjetivo:** A fase final é dedicada à função *Multiobjetivo* global, visando preencher a região central de compromisso (soluções *knee-point*).

É fundamental ressaltar que, embora a arquitetura sequencial seja comum a todos os casos de estudo, a alocação do esforço computacional (número de iterações por fase) foi parametrizada individualmente para respeitar a complexidade de cada sistema. Por exemplo, no sistema IEEE 30 barras, de um total de 900 iterações, alocaram-se 100 iterações específicas para a fase de custo, enquanto sistemas maiores, como o de 300 barras, exigiram janelas de exploração ajustadas para garantir a convergência em cada subespaço.

Esta estratégia de reorientação dinâmica do gradiente de busca a cada N iterações provou-se crucial para a qualidade da solução final. Ao forçar o algoritmo a visitar sequencialmente os extremos e as combinações pares antes da otimização global, maximiza-se a

diversidade populacional e garante-se o preenchimento eficaz da superfície tridimensional da Fronteira de Pareto, evitando a convergência prematura para regiões que favoreçam apenas um dos objetivos conflitantes.

Algorithm 1 Fluxo geral do algoritmo MOTS–KNITRO com Pré-processamento Híbrido

Input: Modelo AMPL $\mathcal{M}$, número máximo de iterações $N_{\max}$, lista de objetivos $\mathcal{O}$

Output: Frente de Pareto final $\mathcal{P}$

// Inicialização e Configuração

```

1 Inicializar FPOModel, calcular pontos utópicos e nadir (baseado no sistema) Calcular fatores de
  normalização e atualizar parâmetros no AMPL
// Etapa 1: Pré-processamento Híbrido (Warm-Start)
2 Resolver MINLP com função objetivo composta normalizada (Eq. 15)  $\rightarrow S_{\text{init}}$  if  $S_{\text{init}}$  é factível
  then
3   | Inserir  $S_{\text{init}}$  em  $\mathcal{P}$  e na lista Tabu  $S_{\text{corrente}} \leftarrow S_{\text{init}}$ 
4 else
5   | Gerar solução aleatória factível  $\rightarrow S_{\text{corrente}}$ 
6 end
// Etapa 2: Injeção de Soluções Extremas (Alta Complexidade)
7 if Sistema de Grande Porte (e.g., 300 barras) then
8   foreach objetivo  $k \in \{\text{Custo}, \text{Perdas}, \text{Poluição}\}$  do
9     | Resolver MINLP mono-objetivo para  $k \rightarrow S_{\text{tmp}}$  Fix & Re-evaluate: Fixar variáveis
      | discretas (taps/shunts) de  $S_{\text{tmp}}$  Re-otimizar fluxo de potência (NLP contínuo)  $\rightarrow S_{\text{ext}}$ 
      | Inserir  $S_{\text{ext}}$  em  $\mathcal{P}$  e na lista Tabu (Âncoras)
10  end
11 end
// Etapa 3: Ciclo Principal de Busca Tabu em Fases
12 for cada fase/objetivo  $o \in \mathcal{O}$  do
13   | Atualizar função objetivo ativa no AMPL para  $o$  Definir contador  $\text{no\_improvement} \leftarrow 0$ 
      | for  $\text{iter} \leftarrow 1$  até  $N_{\max}/|\mathcal{O}|$  do
14     | Gerar vizinhança  $V$  a partir de  $S_{\text{corrente}}$  (com perturbação adaptativa) Avaliar cada
      |  $v \in V$  usando o KNITRO (NLP) Filtrar candidatos não dominados locais (intra-
      | vizinhança) Filtrar candidatos globais contra  $\mathcal{P}$  e CandidateList
15     if lista FinalCandidates  $\neq \emptyset$  then
16       | Selecionar candidato  $S_{\text{novo}}$  (estratégia de diversificação) Atualizar  $\mathcal{P}$  com  $S_{\text{novo}}$ 
      | (Alg. 3) Inserir  $S_{\text{novo}}$  na lista Tabu e CandidateList  $S_{\text{corrente}} \leftarrow S_{\text{novo}}$  Reini-
      | ciar  $\text{no\_improvement} \leftarrow 0$ 
17     else
18       | Recuperar solução antiga de CandidateList ou manter  $S_{\text{corrente}}$  Incrementar
      |  $\text{no\_improvement} \leftarrow \text{no\_improvement} + 1$ 
19     end
20     if  $\text{no\_improvement} \geq \text{max\_no\_improvement}$  then
      | // Mecanismo de Reinício (Restart)
21       | Selecionar  $S_{\text{restart}}$  aleatório de  $\mathcal{P}$  ou CandidateList Ativar modo de intensificação
      | (vizinhança reduzida)  $S_{\text{corrente}} \leftarrow S_{\text{restart}}$  Reiniciar  $\text{no\_improvement} \leftarrow 0$ 
22     end
23   end
24 end
25 Consolidar e filtrar o Frente de Pareto final  $\mathcal{P}$ 

```

3.6.2 Geração de Vizinhaça

A vizinhaça de uma solução corrente S_{atual} é o conjunto de todas as soluções que podem ser alcançadas a partir de S_{atual} através de um único "movimento". Para este problema, um movimento é definido como a alteração de uma única variável discreta. Por exemplo:

- Incrementar ou decrementar a posição do tap de um transformador em um passo (e.g., $nt_k \rightarrow nt_k + 1$).
- Mudar o estado de um compensador shunt (e.g., $\omega_{sh_j} \rightarrow 1 - \omega_{sh_j}$).

Uma lista de vizinhos é gerada através de um mecanismo probabilístico. A estratégia foca na modificação de um único elemento do vetor de solução, conforme detalhado no Algoritmo 2.

Algorithm 2 Geração de vizinhaça para MOTS

Input: Solução corrente $S_{corrente}$, probabilidade de mudança de tap p_t , probabilidade de aumento de tap p_a , probabilidade de mudança de shunt p_s

Output: Lista de vizinhos V

```

1  $V \leftarrow \emptyset$  Copiar  $S_{corrente}$  para  $S_{modificado}$ 
2 for cada tap  $t_i$  do
3   if  $rand() < p_t$  then
4     if  $rand() < p_a$  then
5        $t_i \leftarrow \max(-16, t_i - 1)$ 
6     else
7        $t_i \leftarrow \min(16, t_i + 1)$ 
8     end
9     Adicionar solução modificada em  $V$ . Atualizar  $S_{modificado}[i] \leftarrow t_i$ 
10  end
11 end
12 for cada shunt  $s_j$  do
13   if  $rand() < p_s$  then
14      $s_j \leftarrow 1 - s_j$ . Adicionar solução modificada em  $V$ . Atualizar  $S_{modificado}[j] \leftarrow s_j$ .
15   end
16 end
17 if  $S_{modificado} \notin V$  e  $S_{modificado} \neq S_{corrente}$  then
18   Adicionar  $S_{modificado}$  em  $V$ 
19 end

```

3.6.3 Avaliação da Função Objetivo e Tratamento das Restrições

A avaliação de um vizinho $S_{vizinho}$ é realizada pelo AMPL. O vetor de variáveis discretas de $S_{vizinho}$ é passado para o modelo AMPL, que resolve o subproblema de PNL correspondente com o Knitro. O resultado é um vetor de objetivos $[f_{custo}, f_{perdas}, f_{poluicao}]$.

Se o Knitro não conseguir encontrar uma solução factível para uma dada configuração discreta, o vizinho é considerado infactível e descartado do processo de seleção.

Cada vizinho é submetido a um rigoroso processo de avaliação e filtragem para seleccionar a próxima solução corrente:

1. **Avaliação de Factibilidade:** Cada vizinho é avaliado através da função `evaluate` do `FPO_Model`. Uma solução é considerada factível se a penalidade ρ , associada à geração artificial, for nula ou próxima de zero. Soluções infactíveis são descartadas.
2. **Verificação Tabu:** Vizinhos factíveis são verificados contra a `TabuList`. Soluções presentes na lista são descartadas, a menos que satisfaçam um critério de aspiração (não implementado nesta versão).
3. **Candidatos Potenciais:** Os vizinhos restantes são comparados entre si. Um vizinho torna-se um "Candidato Potencial" se ele não for dominado por nenhum outro vizinho.
4. **Candidatos Finais:** Os Candidatos Potenciais são então comparados com as soluções já armazenadas no `ParetoFront` e na `CandidateList`. Um candidato potencial avança para a lista de "Candidatos Finais" apenas se não for dominado por nenhuma solução em ambos os arquivos.

Se a lista de `Final_Candidates` não estiver vazia, uma solução é escolhida aleatoriamente para ser a próxima S_{corrente} . A aleatoriedade na escolha entre soluções mutuamente não dominadas é uma estratégia para evitar viés e promover uma exploração mais uniforme do frente.

3.6.4 Mecanismos de Memória e Atualização do Frente

O algoritmo emprega três estruturas de memória para guiar a busca:

- **Lista Tabu (`TabuList`):** Armazena as soluções completas que foram seleccionadas como S_{corrente} . Esta abordagem de memória baseada em solução, em vez de atributos, é eficaz para problemas com avaliações de função objetivo computacionalmente caras, como o FPO.
- **Frente de Pareto (`ParetoFront`):** Funciona como um arquivo de elite, armazenando o conjunto das melhores soluções não dominadas encontradas. A cada vez que uma nova S_{corrente} é seleccionada, o frente é atualizado conforme o procedimento do Algoritmo 3.

- **Lista de Candidatos (CandidateList):** Armazena soluções de alta qualidade (Candidatos Finais) que não foram selecionadas como a próxima S_{corrente} . Esta lista serve como uma memória de diversificação, fornecendo um reservatório de pontos de partida alternativos.

Algorithm 3 Atualização da Frente de Pareto

Input: Nova solução S_{nova} , frente atual $\mathcal{P}$
Output: Frente de Pareto atualizado $\mathcal{P}'$

```

1  dominada  $\leftarrow$  false
2  for cada  $S_{\text{existente}} \in \mathcal{P}$  do
3      if  $S_{\text{existente}}$  domina  $S_{\text{nova}}$  then
4          |   dominada  $\leftarrow$  true break           // Interrompe pois a nova solução é dominada
5      end
6  end
7  if dominada = false then
8       $\mathcal{P}' \leftarrow \{S_{\text{nova}}\}$  for cada  $S_{\text{existente}} \in \mathcal{P}$  do
9          |   if  $S_{\text{nova}}$  não domina  $S_{\text{existente}}$  then
10             |   |    $\mathcal{P}' \leftarrow \mathcal{P}' \cup \{S_{\text{existente}}\}$ 
11             |   end
12         end
13     return  $\mathcal{P}'$ 
14 end
15 else
16     return  $\mathcal{P}$ 
17 end

```

3.6.5 Estratégias de Intensificação e Diversificação (Reinicialização)

Para evitar a estagnação da busca, o algoritmo implementa um mecanismo de reinicialização adaptativo:

- **Contador de Estagnação (no_improvement_counter):** Incrementado a cada iteração em que nenhuma nova solução é adicionada ao **ParetoFront**.
- **Fase de Reinício (is_in_restart_phase):** Se o contador atinge o limite de estagnação, **max_no_improvement**, o algoritmo entra em uma fase de reinício. Uma nova solução S_{corrente} é selecionada aleatoriamente a partir do **ParetoFront** ou da **CandidateList**.
- **Intensificação:** Durante a fase de reinício, a geração de vizinhança para os taps dos transformadores é restrita a um intervalo menor (por exemplo, $[-2, 2]$). Esta estratégia intensifica a busca local em torno de soluções de elite já conhecidas, com o objetivo de encontrar melhorias refinadas.

Se, em uma iteração normal, não houver **Final_Candidates**, o algoritmo tenta diversificar a busca selecionando uma nova S_{corrente} da **CandidateList** ou, caso esta esteja vazia, da lista de **Potencial_Candidates** gerada na iteração atual.

3.6.6 Consolidação Final do Frente de Pareto

Ao final de todas as fases de busca, o algoritmo terá gerado múltiplos frentes de Pareto, um para cada fase objetiva. A etapa final consiste em consolidar esses resultados: todos os frentes são unidos em um único conjunto. Em seguida, este conjunto consolidado é filtrado para remover soluções duplicadas e, finalmente, submetido a um último processo de ordenação por não dominância para gerar o frente de Pareto absoluto e final do problema.

3.7 TOMADA DE DECISÃO FUZZY PARA SELEÇÃO DA SOLUÇÃO DE COMPROMISSO

A otimização multiobjetivo do fluxo de potência resulta em um conjunto de soluções ótimas não dominadas, conhecido como Frente de Pareto. Embora todas as soluções neste conjunto sejam matematicamente eficientes, o operador do sistema necessita de um único ponto operativo para o despacho de geração. Devido à natureza conflituosa dos objetivos (por exemplo, custo *versus* emissões) e à incomensurabilidade das suas unidades (dólares, toneladas, p.u.), a seleção direta torna-se complexa (Avvari; DM, 2022).

Para superar a subjetividade dos métodos de soma ponderada, nesta dissertação adotou-se uma metodologia baseada na Teoria dos Conjuntos Difusos (*Fuzzy Set Theory*), conforme fundamentado por Abido e estendido para cenários estocásticos por Avvari (Avvari; DM, 2022). Esta abordagem permite quantificar o grau de satisfação de cada objetivo individualmente e identificar a Melhor Solução de Compromisso (*Best Compromise Solution* - BCS).

3.7.1 Formulação Matemática

A metodologia converte os valores dos objetivos crisp em funções de pertinência (*membership functions*) normalizadas. Considerando que o algoritmo metaheurístico gerou um Conjunto de Pareto Ω com M soluções, para cada k -ésima solução e i -ésimo objetivo, define-se primeiramente o universo de discurso através dos limites empíricos encontrados na otimização atual (Abido, 2002):

$$F_i^{\min} = \min_{X \in \Omega} f_i(X) \quad \text{e} \quad F_i^{\max} = \max_{X \in \Omega} f_i(X) \quad (37)$$

A função de pertinência linear μ_i^k , que representa o grau de otimalidade do i -ésimo objetivo na k -ésima solução, é calculada da seguinte forma para problemas de minimização (Avvari; DM, 2022):

$$\mu_i(X_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } f_i(X_k) \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - f_i(X_k)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & \text{se } F_i^{\min} < f_i(X_k) < F_i^{\max} \\ 0 & \text{se } f_i(X_k) \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (38)$$

Nesta formulação, um valor de $\mu_i(X_k) = 1$ indica total satisfação (o objetivo atingiu o mínimo encontrado), enquanto $\mu_i(X_k) = 0$ indica insatisfação total. A vantagem desta normalização é eliminar as discrepâncias de escala entre os objetivos, permitindo uma comparação justa entre custo financeiro e índices técnicos.

3.7.2 Critério de Seleção da BCS

Após a "fuzzificação" de todos os objetivos, calcula-se a Função de Pertinência Normalizada (μ^k) para cada solução k . Esta métrica atua como uma prioridade cardinal, agregando as satisfações individuais:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i(X_k)}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i(X_j)} \quad (39)$$

Onde N_{obj} é o número de funções objetivo e M é o número total de soluções no arquivo externo. A Melhor Solução de Compromisso (BCS) é, portanto, aquela que maximiza este índice de cardinalidade:

$$BCS = \arg \max_{k \in \Omega} (\mu^k) \quad (40)$$

Geometricamente, a solução selecionada por este método é aquela que apresenta o melhor equilíbrio equidistante entre os objetivos conflitantes, evitando extremos que favoreçam apenas um aspecto da operação em detrimento severo dos demais (Abido, 2009).

3.8 RESOLUÇÃO DO SUBPROBLEMA DE PNL COM KNITRO

O algoritmo desenvolvido em AMPL é responsável por resolver o subproblema de FPO PNL, considerando as variáveis discretas previamente fixadas e enviadas pela meta-heurística implementada em Python. O Knitro resolverá o problema PNL inicialmente com foco na minimização do custo (Eq.9). Após a conclusão de 200 iterações, o solver passará a priorizar a minimização das perdas (Eq.10). De forma análoga ao caso anterior,

após outras 200 iterações, o critério de otimização será alterado para a minimização da poluição (Eq.11). Finalmente, após mais 200 iterações, a função objetivo utilizada para resolver o problema será o FPO multiobjetivo, composto por uma combinação das três funções objetivo mencionadas (Eq.35), permanecendo desta forma ao longo das iterações restantes que, no nosso caso, correspondem a mais 600 iterações. O modelo matemático fornecido ao Knitro é apresentado a seguir:

Minimizar $f_{custo}(P_{ger})$

Minimizar $f_{perdas}(V, \theta)$

Minimizar $f_{poluicao}(P_{ger})$

Minimizar $F_{MO} = \frac{f_{custo} - f_{custo}^{utopia}}{f_{custo}^{range}} + \frac{f_{perdas} - f_{perdas}^{utopia}}{f_{perdas}^{range}} + \frac{f_{poluicao} - f_{poluicao}^{utopia}}{f_{poluicao}^{range}} + \rho \sum_i (gP_i + gQ_i)$

Sujeito a:

- Equações de balanço de potência (com nt e ω_{sh} como parâmetros fixos).
- Limites de geração de potência ativa e reativa.
- Limites de magnitude de tensão nas barras.
- Limites de fluxo de potência nos ramos (limites térmicos).

Este é um problema de PNL clássico, para o qual o Knitro é particularmente adequado devido aos seus robustos algoritmos de pontos interiores e gradiente conjugado, capazes de lidar com problemas de grande escala e não linearidades complexas de forma eficiente .

3.9 DETALHES DA IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação e validação da metodologia proposta foram realizadas em uma estação de trabalho de alto desempenho, integrando diferentes ambientes de programação e otimização. As especificações técnicas e configurações dos solvers são detalhadas a seguir:

- **Ambiente de Desenvolvimento:** A lógica principal da meta-heurística (MOTS) e o gerenciamento das estruturas de dados foram implementados na linguagem **Python**. A modelagem matemática do problema de fluxo de potência ótimo (equações algébricas e diferenciais) foi realizada na linguagem de modelagem algébrica **AMPL**.

- **Interface de Comunicação:** Utilizou-se a biblioteca `amplpy` para estabelecer a ponte entre o Python e o motor de otimização do AMPL, permitindo a manipulação dinâmica de parâmetros e a extração de resultados em tempo de execução.
- **Hardware:** Os experimentos foram conduzidos em um processador Intel Core i7-8700 CPU (3.20 GHz) com 32 GB de memória RAM.
- **Parâmetros da Meta-heurística:** Os parâmetros operacionais do algoritmo MOTS foram ajustados empiricamente: Probabilidade de mudança de tap/shunt, tamanho da Lista Tabu, critério de parada por estagnação (`max_no_improvement`) e número de iterações por fase.
- **Calibração do Solver (Knitro):** A parametrização do solver não-linear foi distinta para cada abordagem, visando atender aos requisitos específicos de precisão e desempenho:

- *Resolução PNLIM (Benchmark):* Para obter as soluções exatas de referência, o Knitro foi configurado com tolerâncias rigorosas para minimizar o gap de integridade e garantir a viabilidade estrita das restrições. As opções utilizadas foram:

```
outlev=0 feastol=1e-8 opttol=1e-8
mip_integral_gap_abs=1e-8
```

- *Modelo Híbrido MOTS:* Para a obtenção das variáveis discretas dentro do algoritmo proposto, as opções foram relaxadas para permitir que o solver atue de maneira heurística, priorizando a velocidade de exploração sobre a precisão absoluta decimal. Utilizou-se o algoritmo de Conjunto Ativo (*Active Set*) com múltipla inicialização (*Multi-start*) para escapar de ótimos locais rapidamente:

```
outlev=0 algorithm=3 honorbnds=1 ms_enable=1
```

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia híbrida MOTS. O objetivo é validar a eficácia e a robustez do algoritmo na resolução do FPO multiobjetivo. Os testes foram conduzidos nos sistemas-teste NESTA IEEE 30(modificado),118 e 300 barras.

4.1 CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

4.1.1 Sistemas de Teste

Os estudos de caso foram realizados nas redes NESTA IEEE 30 (modificado), 118 e 300 barras (Coffrin; Gordon; Scott, 2014). As principais características dos sistemas são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos Sistemas de Teste NESTA

Característica	IEEE 30 Barras	IEEE 118 Barras	IEEE 300 Barras
Barras	30	118	300
Geradores Carvão	1	4	20
Geradores Gás Natural	2	15	32
Gerador Nuclear	0	0	3
Gerador Petroleo	0	0	2
Compensadores Síncronos	4	35	12
Cargas	21	99	231
Ramos (Linhas)	41	186	411
Transformadores com Taps	4	9	62
Compensadores Shunt	2	14	14
Capacidade Total de Geração (MW)	884,0	7134,0	32492
Carga Total (MW)	283,4	4058,0	23246,86
Limites de tensão(pu)	[0,94 1,06]	[0,94 1,06]	[0,94 1,06]

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em (Coffrin; Gordon; Scott, 2014)

4.1.2 Parâmetros da Meta-heurística

A meta-heurística MOTS foi configurada com os parâmetros detalhados na Tabela 3.

A Tabela 4 detalha a estratégia de alocação de esforço computacional adotada para cada sistema teste. O número de iterações por fase foi ajustado empiricamente para garantir a convergência adequada em subespaços críticos. Nota-se que, para o sistema de 300 barras, houve um incremento seletivo nas fases envolvendo a minimização de poluição e na etapa multiobjetivo final, visando assegurar a exploração robusta de um espaço de busca de maior complexidade e dimensionalidade.

Tabela 3 – Parâmetros de Configuração do Algoritmo MOTS

Parâmetro	30B	118B	300B
Número Máximo de Iterações (<code>max_iterations</code>)	900	1200	1400
Tamanho da Lista Tabu (<code>tabu_size</code>)	900	1200	1400
Critério de Estagnação (<code>max_no_improvement</code>)	15 iter	15 iter	15 iter
Tamanho Máximo da Lista de Candidatos	50	50	50
Probabilidade de Mudança de Tap (<code>tap_change_prob</code>)	0,95	0,95	0,95
Probabilidade de Aumento de Tap (<code>tap_increase_prob</code>)	0,6	0,6	0,6
Probabilidade de Mudança de Shunt (<code>shunt_change_prob</code>)	0,9	0,9	0,9
Geração de Vizinhança (Taps)	$[-7; 7]$	$[-7; 7]$	$[-7; 7]$

Tabela 4 – Distribuição de Iterações por Fase de Busca para cada Sistema Teste

Fase de Busca	30 Barras	118 Barras	300 Barras
Minimize_Cost	100	150	150
Minimize_Cost_Losses	100	150	150
Minimize_Losses	100	150	150
Minimize_Losses_Pollution	100	150	150
Minimize_Pollution	100	150	200
Minimize_Cost_Pollution	100	150	200
Multiobjetivo	300	300	400
Total de Iterações	900	1200	1400

A seleção dos parâmetros do algoritmo híbrido MOTS foi realizada mediante um processo sistemático de calibração, considerando:

- Resultados de testes preliminares nos sistemas Nesta IEEE.
- Equilíbrio entre exploração e exploração do espaço de busca
- Tempo computacional aceitável para aplicação em sistemas reais
- Comparação com valores referenciados na literatura especializada

4.2 RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 30 BARRAS

A primeira etapa de validação foi conduzida utilizando o sistema teste de 30 barras, o qual foi ligeiramente modificado com o objetivo de tornar mais evidente o conflito inerente entre as perdas de potência ativa e as emissões de gases poluentes. Para esse propósito, foi adicionado um gerador termelétrico a gas natural na barra 30, intensificando deliberadamente o antagonismo entre os objetivos ambientais e técnicos considerados no problema de Fluxo de Potência Ótimo Multiobjetivo. Os limites de tensão adotados para o sistema IEEE NESTA foram definidos com valor mínimo de 0,94 p.u. e valor máximo de 1,06 p.u..

Tabela 5 – Parâmetros do Algoritmo e Fundamentação Técnica

Parâmetro	Valor	Fundamentação Técnica
max_iterations	900-1500	Equilibra qualidade da solução e custo computacional
tabu_size	900-1500	Previne ciclagem mantendo eficiência de memória
Max no-improvement iterations	15-25	Permite exploração da vizinhança antes de reinício
size_candidate_list	50	Armazena soluções candidatas de ótima qualidade
tap_change_prob	0,95	Facilita escape de ótimos locais
tap_increase_prob	0,6	Garante diversidade na busca por vizinhanças
shunt_change_prob	0,9	Otimiza exploração de variáveis binárias
Geração de Vizinhança (Taps)	[+-7]	Balance entre soluções diversas e de boa qualidade

A execução do algoritmo proposto apresentou um tempo computacional total de 243,50 segundos, durante o qual foram realizadas 900 iterações. Como resultado, o método foi capaz de identificar 470 soluções não dominadas, representando de forma consistente o conjunto de compromissos (trade-offs) entre os objetivos analisados, o que evidencia a robustez e a capacidade exploratória da meta-heurística empregada.

4.2.1 Análise do Frente de Pareto

As 470 soluções não dominadas compõem o frente de Pareto, visualizado na Figura 2.

A Figura 2 apresenta o frente de Pareto tridimensional obtido pelo método híbrido MOTS–Knitro, considerando simultaneamente as funções objetivo de custo de operação das centrais térmicas, perdas de energia nas linhas de transmissão e emissões de gases poluentes. A análise desta figura e das suas projeções bidimensionais permite compreender melhor a relação de conflito ou não conflito entre os objetivos.

Observa-se que, para o caso *NESTA IEEE 30 barras* (modificado), existe um conflito evidente entre cada um dos objetivos considerados, uma vez que cada função objetivo atinge o seu ponto mínimo em regiões distintas do espaço do FP obtido. Esse comportamento pode ser explicado pela configuração específica deste sistema-teste, o qual foi deliberadamente modificado e passou a contar com três unidades geradoras: uma localizada na barra 1, movida a carvão; outra na barra 2, movida a gás natural; e uma terceira

na barra 30, também movida a gás.

As unidades geradoras localizada na barra 1 apresenta maior capacidade instalada, menor custo operacional e, conseqüentemente, maiores níveis de emissão de poluentes. Em contrapartida, a unidades instaladas nas barras 2 e 30, embora menos poluentes, possui um custo de operação mais elevado. Dessa forma, quando a minimização das emissões ou das perdas de potência ativa é considerada como função objetivo prioritária, observa-se um despacho preferencial da geração a gás natural, ainda que essa escolha resulte em um custo total superior àquele obtido com o despacho predominante das unidades a carvão.

Adicionalmente, a localização da unidade geradora da barra 2, próxima à barra de maior demanda do sistema, contribui significativamente para a redução das perdas de transmissão. De forma análoga, a decisão de posicionar um gerador a gás natural na barra 30 fundamenta-se na necessidade de alocar a nova fonte em um ponto da rede que apresente a maior penalização em termos de perdas elétricas. A barra 30 caracteriza-se como um nó de carga situado na extremidade do sistema, com demanda de 10,6 MW, garantindo bastante distanciamento elétrico em relação às demais barras.

Além disso, essa barra encontra-se conectada ao restante da rede por um ramo de resistência relativamente elevada ($R = 0,3202$ pu), o que implica que a injeção de potência nesse ponto maximiza a diferenciação do valor da função objetivo associada às perdas, f_{perdas} , dependendo do padrão de despacho adotado pelo algoritmo. Quando a carga é suprida localmente, observam-se menores perdas locais. Por outro lado, quando há injeção de potência para o restante do sistema, as perdas globais tornam-se significativamente mais elevadas.

Esse comportamento decorre do fato de que a geração mais próxima dos centros de carga reduz os fluxos em linhas longas, minimiza as quedas de tensão e, conseqüentemente, diminui as perdas na transmissão. Portanto, o conflito entre perdas e emissões, bem como o conflito desses objetivos com o custo de geração, constitui uma consequência direta tanto da topologia da rede quanto das características técnicas e ambientais das unidades geradoras consideradas no modelo.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam as projeções bidimensionais do frente de Pareto obtido para o sistema NESTA IEEE 30 barras, evidenciando a relação entre os pares de funções objetivo.

Nas comparações *custo vs. emissões* (Figura 3) e *custo vs. perdas* (Figura 4) , observa-se a presença de um conjunto de soluções de compromisso que equilibram a redução do custo com a diminuição das perdas ou emissões. Nestes gráficos, a linha formada pelos pontos azuis representa o frente de Pareto obtido pelo método MOTS-Knitro, enquanto os pontos vermelhos indicam as soluções extremas onde cada objetivo alcançou seu valor mínimo. Nota-se que, em ambas as comparações, há uma região de compromisso bem definida, permitindo ao operador selecionar soluções intermediárias com balanço ade-

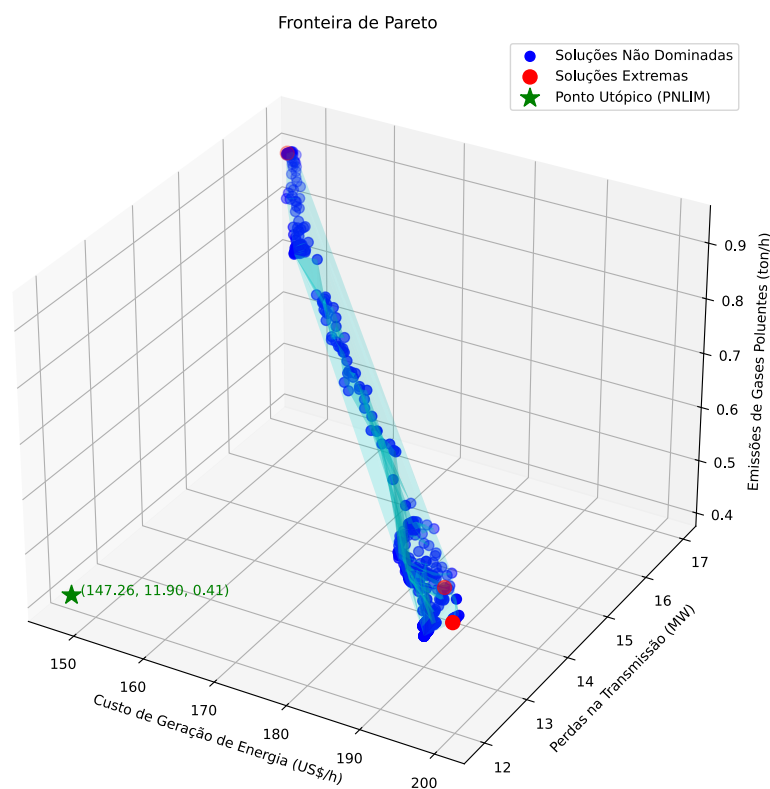


Figura 2 – Tentativa de representação do Frente de Pareto 3D obtido para o Sistema de 30 Barras

quado entre eficiência econômica e desempenho técnico/ambiental.

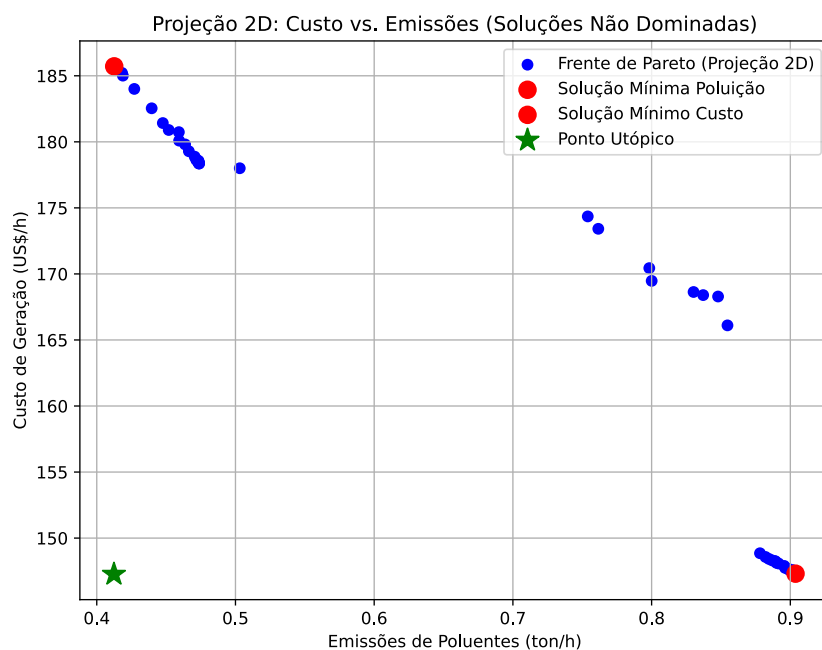


Figura 3 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (emissões de poluentes vs. custo de geração)

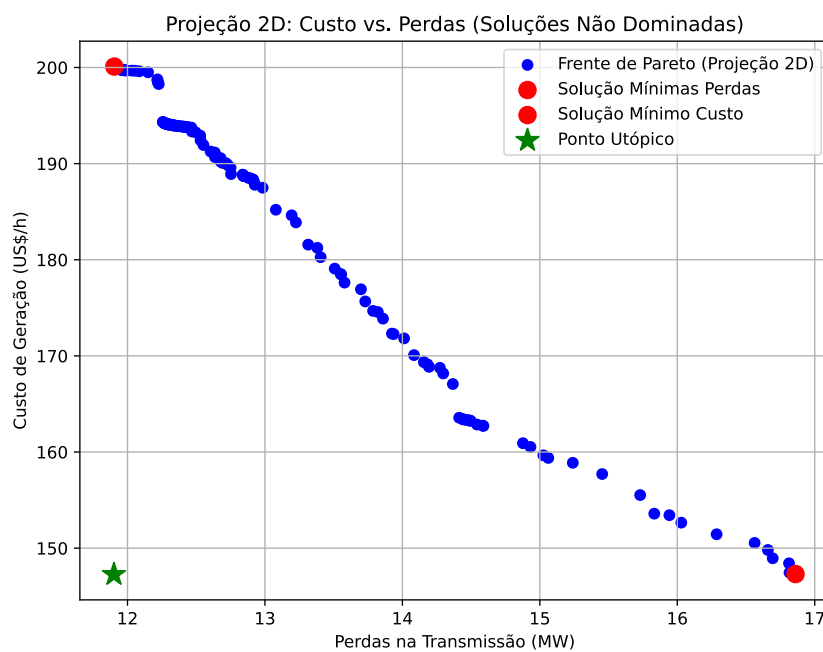


Figura 4 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (perdas na transmissão vs. custo de geração)

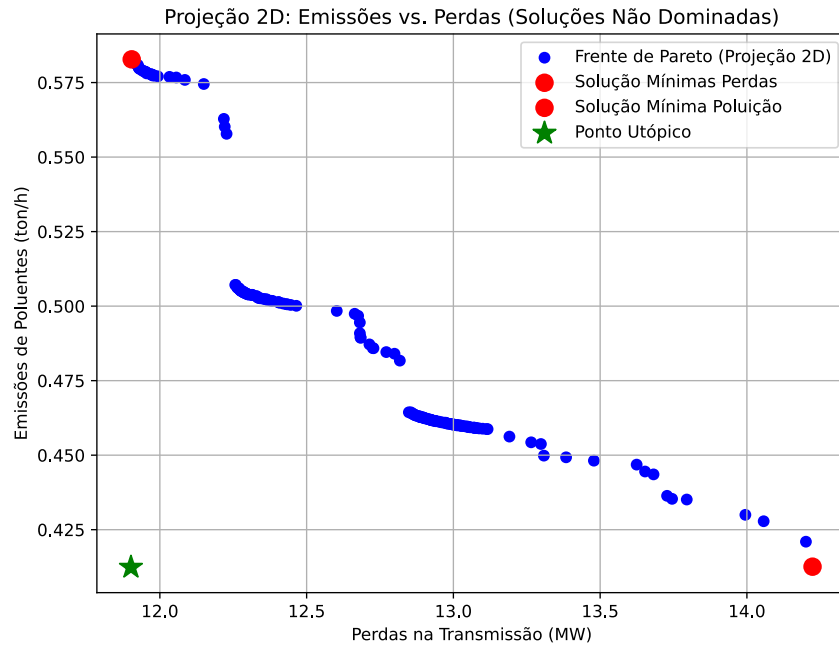


Figura 5 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 30 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs. emissões de poluentes)

Em todas as figuras, a estrela verde indica o ponto ótimo obtido por meio de uma otimização mono-objetivo, baseada em um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), modelado no *AMPL* e resolvido com o *solver* KNITRO. Esse ponto é utilizado exclusivamente como referência para a avaliação da qualidade das soluções obtidas pelo método híbrido proposto.

Ressalta-se, entretanto, que o objetivo principal deste trabalho não consiste na determinação isolada do mínimo de cada função objetivo. Dessa forma, tais pontos ótimos mono-objetivos podem ser interpretados como pontos de fronteira, os quais permitem avaliar quantitativamente e visualmente o número de soluções que convergiram para a superfície de Pareto tridimensional. Essa superfície é composta pelas soluções não dominadas obtidas por meio do algoritmo de Otimização Multiobjetivo baseado em Tabu Search (MOTS), o qual considera simultaneamente múltiplos objetivos e variáveis de controle discretas.

4.2.2 Análise de Soluções Representativas

A Tabela 6 apresenta quatro soluções representativas obtidas pelo método híbrido MOTS, abrangendo os casos de custo mínimo, perdas mínimas, poluição mínima e uma solução de compromisso, vejase as soluções representativas estão no apêndice. Observa-se que o algoritmo conseguiu capturar de forma eficiente o *trade-off* entre os objetivos, evidenciando que não existe uma única configuração ótima capaz de atender simultaneamente

todos os critérios. Destaca-se que a solução de compromisso mantém valores balanceados, conseguindo reduzir perdas e emissões com acréscimos marginais no custo em relação à solução de custo mínimo, demonstrando a eficácia da abordagem multiobjetivo proposta.

Tabela 6 – Soluções Representativas do Frente de Pareto para o Sistema de 30 Barras

Descrição da Solução	Custo (US\$/h)	Perdas (MW)	Poluição (ton/h)
A: Custo Mínimo	147,3070	16,8603	0,9038
B: Perdas Mínimas	200,0942	11,9041	0,5828
C: Poluição Mínima	185,7156	14,2236	0,4126
D: Solução de Compromisso	190,6767	12,8483	0,4644

A análise quantitativa apresentada nesta tabela indica que a **Solução D**, identificada como a *solução de compromisso*, foi selecionada de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3. De acordo com os critérios estabelecidos, a solução de compromisso escolhida apresentou o maior valor do *Score Fuzzy*.

Para determinar a qualidade da Solução de Compromisso selecionada, aplicou-se a metodologia de lógica difusa descrita na Seção 3.7.

Substituindo os valores para cada objetivo:

1. Custo Operacional (μ_C):

$$\mu_C = \frac{200,0942 - 190,6767}{200,0942 - 147,3070} = \frac{9,4175}{52,7872} \approx \mathbf{0,1784}$$

2. Perdas de Transmissão (μ_L):

$$\mu_L = \frac{16,8603 - 12,8483}{16,8603 - 11,9041} = \frac{4,0120}{4,9562} \approx \mathbf{0,8095}$$

3. Emissões Ambientais (μ_P):

$$\mu_P = \frac{0,9038 - 0,4644}{0,9038 - 0,4126} = \frac{0,4394}{0,4912} \approx \mathbf{0,8945}$$

O índice global de prioridade cardinal calculado foi:

$$Score_{Total} = 0,1784 + 0,8095 + 0,8945 = \mathbf{1,8824} \quad (41)$$

Análise: A solução de compromisso selecionada pelo algoritmo demonstra uma forte inclinação para a sustentabilidade e eficiência técnica. Os scores elevados em Poluição (89,5%) e Perdas (81,0%) indicam que o despacho priorizou geradores mais limpos e eletricamente próximos às cargas (provavelmente as unidades a gás), em detrimento da economia direta de combustível, refletida no baixo score de Custo (17,8%). Este perfil operativo sugere que, para este sistema de 30 barras, reduções significativas em impacto ambiental e perdas exigem um *trade-off* financeiro considerável, afastando-se do ótimo econômico global para garantir uma operação "verde" e eficiente.

4.2.3 Análise das Estratégias de Controle (Taps e Shunts)

A Tabela 7 detalha as configurações das variáveis discretas (taps e shunts) para as soluções representativas. Nota-se que as configurações de taps variam significativamente entre os diferentes objetivos refletindo que a priorização do objetivo influencia fortemente o ponto ótimo no espaço de busca. Já a configuração dos shunts mostra menor variabilidade, sugerindo que, para o sistema NESTA IEEE 30 barras, o impacto dessa variável é menos sensível em comparação com o ajuste fino dos taps.

Tabela 7 – Configuração das Variáveis Discretas para as Soluções Representativas

Variável de Controle	Solução A	Solução B	Solução C	Solução D
Tap 1 (var_0)	-16	-3	-4	-9
Tap 2 (var_1)	8	4	-13	4
Tap 3 (var_2)	-4	-1	-7	-3
Tap 4 (var_3)	-1	2	0	1
Shunt 1 (var_4)	1	1	1	1
Shunt 2 (var_5)	1	1	1	1

4.2.4 Análise do Perfil de Tensão

A figura 6 apresenta os perfis de tensão resultantes para as 30 barras do sistema, comparando as soluções obtidas pela aproximação da Fronteira de Pareto (via meta-heurística) com as soluções exatas do solver Knitro para os objetivos mono-objetivo de Custo, Perdas e Poluição.

A análise comparativa dos perfis de tensão revela um comportamento dicotômico entre os objetivos físicos e econômicos/ambientais, além de evidenciar a capacidade da meta-heurística em explorar regiões do espaço de busca distintas daquelas encontradas por métodos baseados em gradiente (PNLIM/Knitro).

4.2.4.1 Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo Físico

Observa-se uma notável similaridade entre os perfis de tensão obtidos pela Fronteira de Pareto e pelo solver Knitro para o objetivo de **Mínimas Perdas**. Em ambas as abordagens, as tensões nas barras de carga (ex: barras 26, 29 e 30) são elevadas para valores próximos ao limite superior (entre 1,00 e 1,06 p.u.). Isso ocorre porque a minimização de perdas ôhmicas (I^2R) possui um acoplamento físico forte e direto com a magnitude da tensão: para reduzir a corrente, é imperativo elevar a tensão. O "vale" de otimalidade para esta função objetivo é estreito e bem definido, forçando qualquer algoritmo de otimização eficaz a convergir para esta mesma topologia de alta tensão.

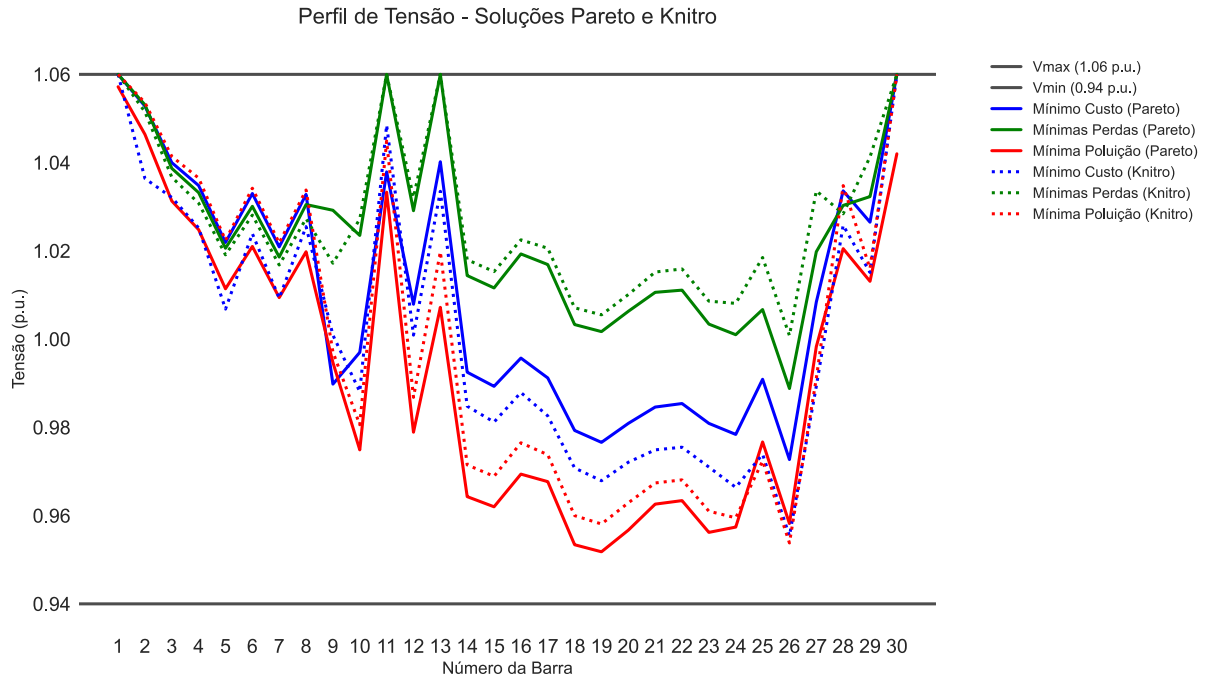


Figura 6 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas mínimos do FP e Obtidas por PNLIM no Sistema de 30 Barras

4.2.4.2 Divergência em Custo e Poluição: A Natureza Multimodal

Em contraste, os perfis para **Mínimo Custo** e **Mínima Poluição** apresentam divergências topológicas significativas entre os métodos.

- **Custo (Barra 1 - Carvão):** O PNLIM (Knitro) explorou agressivamente os limites inferiores de tensão (atingindo 0,9554 p.u. na barra 26) para minimizar o custo. Já a meta-heurística encontrou uma solução de custo competitivo, porém com um perfil de tensão mais seguro (0,9727 p.u. na mesma barra). Isso demonstra a **multimodalidade** do problema: como o custo depende majoritariamente da injeção de potência ativa (P), existem múltiplos vetores de tensão (V) e reativos (Q) que satisfazem o mesmo despacho econômico. O algoritmo estocástico foi capaz de encontrar um ótimo local com melhores margens de estabilidade de tensão.
- **Poluição (Barras 2 e 30 - Gás):** A divergência é acentuada na Barra 30 (gerador a Gás). Enquanto o Knitro manteve esta barra em 1,06 p.u., a solução de Pareto reduziu a tensão para 1,042 p.u. no cenário de Mínima Poluição. Isso sugere que a meta-heurística ajustou o ponto de operação deste gerador limpo para permitir um fluxo de potência que favorecesse o despacho máximo das unidades a gás, compensando restrições de rede através do relaxamento da tensão local, uma estratégia operativa não identificada pelo solver determinístico.

4.2.4.3 Robustez da Solução de Compromisso

A **Solução de Compromisso**, apresentada na Figura 7, atua como um filtro estabilizador. Ao invés de replicar o estresse nas barras de carga verificado nos cenários de custo (onde a barra 26 cai para $\approx 0,95$ p.u.), a solução de compromisso sustenta a barra 26 em 0,982 p.u. e mantém os geradores (Barra 1 e 30) em 1,06 p.u. Este perfil equilibra a necessidade econômica de despachar o gerador a carvão (Barra 1) com a necessidade ambiental e técnica de manter níveis de tensão adequados, validando a eficácia da lógica difusa em selecionar um ponto de operação que não é apenas um meio-termo matemático, mas uma configuração fisicamente robusta e segura para o sistema.

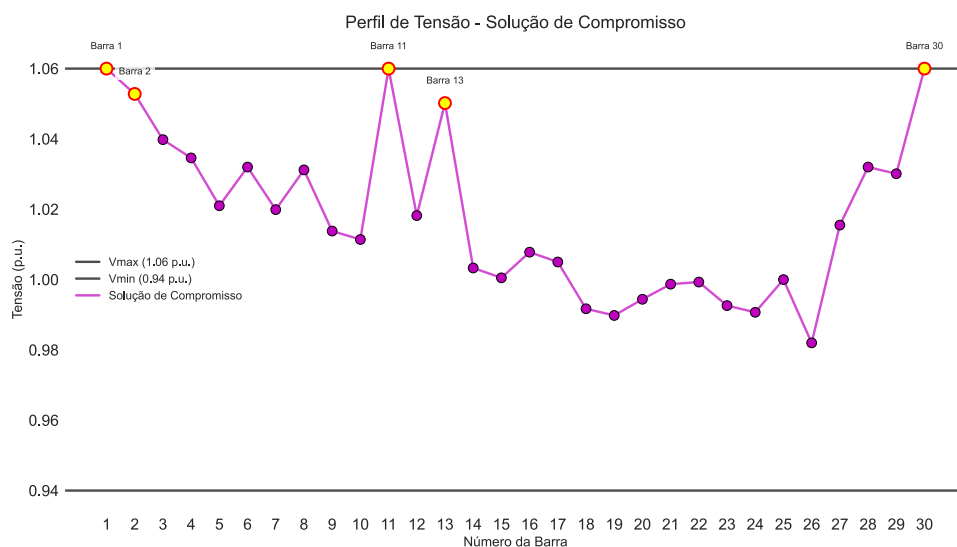


Figura 7 – Perfil de Tensão para solução compromisso de nosso FP no Sistema de 30 Barras

4.2.5 Análise Comparativa entre PNLIM e MOTS 30B

A Tabela 8 complementa a análise ao quantificar o desempenho do MOTS frente ao PNLIM em diferentes objetivos. Novamente, constata-se que as diferenças são pouco significativas, consolidando o argumento de que a estratégia adotada pelo MOTS é capaz de conseguir extremos mínimos, com alto grau de fidelidade, soluções próximas às ótimas por PNLIM, ao mesmo tempo em que lida eficientemente com variáveis discretas.

Tabela 8 – Comparação entre Extremos do Frente de Pareto e Soluções PNLIM

Função Objetivo	Solução PNLIM	Extremos do Frente Mínimos	Diferença (%)
Custo (US\$/h)	147.2630	147.3070	+0.03%
Perdas (MW)	11.9015	11.9041	+0.02%
Poluição (ton/h)	0.4126	0.4126	+0,00%

4.2.6 Análise Comparativa das Métricas Globais de Operação 30 Barras

A Tabela 9 apresenta os indicadores de desempenho operativo para as soluções extremas obtidas pelo solver determinístico (Knitro) e pela abordagem multiobjetivo proposta (Pareto/MOTS). A interpretação física desses dados revela divergências significativas nas estratégias de despacho.

Eficiência Energética no Cenário de Mínimo Custo:

Um dos resultados mais expressivos reside na comparação da **Geração Ativa Total** para o objetivo de Mínimo Custo. O solver Knitro convergiu para uma solução que demanda 300,29 MW de geração bruta, enquanto a solução correspondente na Fronteira de Pareto requer apenas 296,29 MW — uma economia de energia de 4,0 MW.

A explicação encontra-se nas **Perdas Ativas Totais**. O Knitro, ao buscar o mínimo global matemático da função de custo, sobrecarregou o despacho dos geradores mais econômicos (provavelmente o carvão na Barra 1), ignorando as ineficiências de transmissão decorrentes da distância elétrica até as cargas. Isso resultou em perdas elevadas de 16,88 MW. Em contrapartida, o algoritmo MOTS (Pareto) encontrou um ponto de operação alternativo com perdas significativamente menores (12,88 MW). Embora o custo financeiro direto possa ser marginalmente superior, a solução de Pareto é tecnicamente mais eficiente, exigindo menos geração total para atender à mesma demanda, o que denota um despacho mais equilibrado e "verde".

Eficiência de Geração nos Cenários Ambientais:

A comparação direta entre as abordagens para o objetivo de Mínima Poluição evidencia a superioridade da meta-heurística na gestão da eficiência energética. O solver Knitro, para minimizar emissões, convergiu para uma solução que demanda uma **Geração Ativa Total** de 297,63 MW e acarreta perdas de 14,23 MW. Em contraste, a solução de Mínima Poluição do Pareto atingiu o objetivo ambiental com uma geração total de apenas 296,23 MW e perdas reduzidas de 12,83 MW.

Este resultado é notável: o algoritmo MOTS encontrou um ponto de operação onde a redução de poluentes não penaliza severamente as perdas técnicas. Enquanto o Knitro dissociou a poluição da eficiência elétrica (aceitando perdas maiores para despachar geradores limpos), o MOTS identificou uma topologia "duplamente eficiente", onde o despacho limpo coincide com baixas perdas de transmissão.

Gestão de Reativos e Perfil de Tensão:

A análise da **Geração Reativa Total** e das **Perdas Reativas** reforça a distinção entre as abordagens:

1. **Estresse do Sistema:** O cenário de custo mínimo no PNLIM impõe um estresse

considerável à rede, exigindo 126,28 MVar de suporte reativo e gerando perdas reativas de 22,65 MVar (I^2X). Isso é consequência direta dos fluxos de potência elevados e das tensões operando em limites críticos ($V_{min} = 0,96$ p.u.).

2. **A Solução "Mínimas Perdas" do Pareto:** É notável que, no cenário de Mínimas Perdas do Pareto, embora as perdas ativas sejam ligeiramente superiores às do PNLIM (12,83 MW vs 11,90 MW), o algoritmo encontrou uma configuração com a menor injeção de reativos de todos os casos representativos (112,68 MVar) e as menores perdas reativas (10,69 MVar). Isso indica que a meta-heurística priorizou um perfil de tensão mais plano ($V_{min} = 0,99$ p.u.), reduzindo a circulação de corrente reativa, o que é benéfico para a margem de estabilidade de tensão do sistema.
3. **Exploração dos Limites de Tensão na Poluição:** Tanto o PNLIM (0,95 p.u.) quanto o Pareto (0,9518 p.u.) levaram as tensões mínimas ao limite inferior de segurança no cenário de poluição. Isso confirma uma característica física do sistema IEEE 30 barras: para maximizar o uso dos geradores a gás (menos poluentes) e reduzir a geração a carvão, é necessário alterar os fluxos de potência de tal forma que as magnitudes de tensão nas barras de carga sofrem diminuição do valor. Contudo, o Pareto manteve uma margem ligeiramente superior (+0,0018 p.u.), evitando a violação estrita do limite.
4. **Gestão de Reativos:** Observa-se que a solução de Mínima Poluição do Pareto requer 117,11 MVar de geração reativa, um valor muito próximo ao do Knitro (117,63 MVar) e superior ao cenário de Mínimas Perdas do Pareto (112,68 MVar). Isso indica que a mitigação da poluição impõe um "custo reativo" ao sistema, exigindo maior suporte de MVARs para sustentar os perfis de tensão deprimidos.

Consistência Robusta da Meta-heurística:

Um padrão emerge ao observar as colunas da abordagem Pareto: a **Geração Ativa Total** permanece notavelmente estável entre os objetivos de Custo (296,29 MW), Perdas (296,23 MW) e Poluição (296,23 MW). Diferentemente do PNLIM, que oscila agressivamente de 295,3 MW nas perdas para 300,29 MW no custo, a meta-heurística propõe uma operação onde a mudança de objetivo é alcançada através do re-despacho inteligente entre unidades, sem degradar a eficiência global do transporte de energia. Isso sugere que a Fronteira de Pareto obtida é composta por soluções de alta qualidade técnica, minimizando o risco de operar o sistema em pontos de instabilidade ou com perdas em linhas excessivas.

Tabela 9 – Comparação das Métricas de Desempenho

Métrica	Mín. Custo (PNLIM)	Mín. Perdas (PNLIM)	Mín. Poluição (PNLIM)	Mín. Custo (MOTS)	Mín. Perdas (MOTS)	Mín. Poluição (MOTS)
Tensão Mín. (pu)	0,9554	1,0008	0,9538	0,9727	0,9888	0,9518
Tensão Máx. (pu)	1,06	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060
Geração Ativa (MW)	300,2858	295,3015	297,6298	296,2878	296,2341	296,231
Geração Reat. (MVar)	126,2793	116,2788	117,6333	117,4874	112,6804	117,112
Perdas Ativa (MW)	16,8858	11,9014	14,2297	12,8877	12,8341	12,8309
Perdas Reat. (MVar)	22,6468	14,4985	13,6605	14,2914	10,6915	12,9118

4.3 RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 118 BARRAS

A segunda etapa de validação foi realizada no sistema de 118 barras. A execução do algoritmo teve um tempo total de 2339.23 segundos armazenando 1200 soluções na lista tabu, realizando 1200 iterações e encontrando 473 soluções não dominadas. Os limites de tensão adotados para o sistema IEEE NESTA 118 Barras foram definidos com valor mínimo de 0,94 p.u. e valor máximo de 1,06 p.u..

Cabe destacar que o sistema-teste IEEE de 118 barras apresenta elevada complexidade estrutural, sendo composto por 186 ramos de transmissão e um total de 54 unidades de geração, incluindo 19 geradores síncronos e 35 condensadores síncronos. Adicionalmente, o modelo incorpora 9 transformadores com tap ajustável, cada um com 33 posições discretas possíveis, bem como 14 dispositivos de compensação shunt. Em razão dessa complexidade, o processo de busca demandou um tempo computacional significativo, a fim de permitir a exploração de diferentes regiões do espaço de soluções e o armazenamento de um conjunto representativo de soluções não dominadas.

4.3.1 Análise do Frente de Pareto

As 473 soluções não dominadas compõem o frente de Pareto, visualizado na Figura 8.

A Figura 8 apresenta a FP tridimensional obtido pelo método híbrido MOTS–KNITRO, considerando simultaneamente as funções objetivo associadas ao custo de operação das centrais térmicas, às perdas de potência ativa nas linhas de transmissão e às emissões de gases poluentes. A análise dessa figura permite compreender a interação entre os objetivos conflitantes e identificar regiões de compromisso e de conflito no espaço de soluções.

A FP apresentada evidencia elevada robustez, caracterizada por uma expressiva concentração de soluções localizadas na região central da superfície tridimensional. Essas soluções representam alternativas de compromisso bem definidas, nas quais se observa um equilíbrio adequado entre eficiência técnica do sistema elétrico e desempenho ambiental, reforçando a capacidade do método proposto em explorar de forma eficaz o espaço de

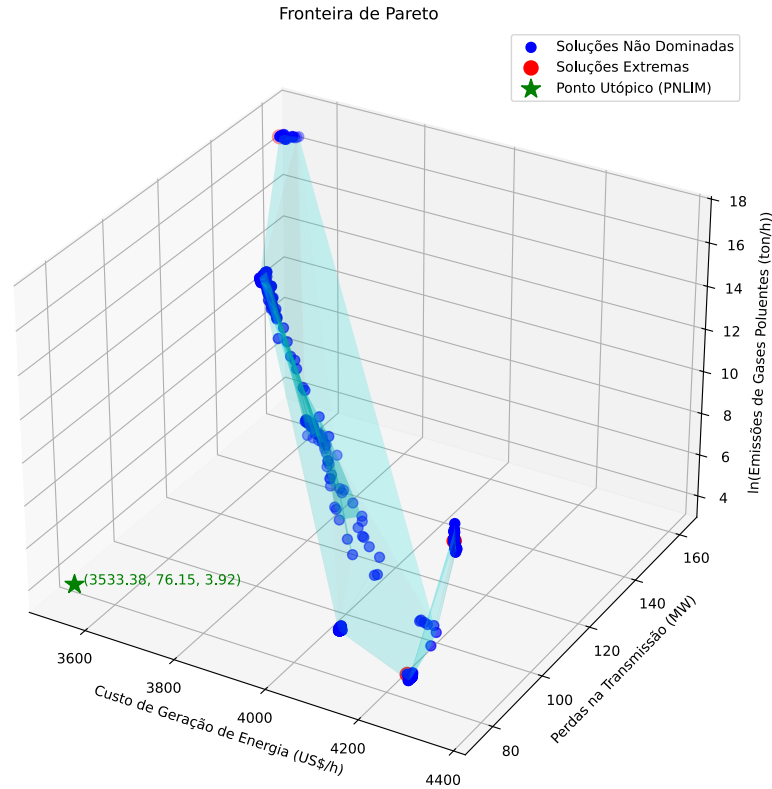


Figura 8 – Proposta de representação do Frente de Pareto 3D obtido para o Sistema de 118 Barras

busca multiobjetivo.

Além disso, para o caso de 118 barras, os eixos associados às emissões de gases poluentes foram definidos utilizando o logaritmo natural dos valores expressos em toneladas por hora. Essa estratégia foi adotada devido à ocorrência de valores de emissão excessivamente elevados em cenários altamente poluentes, os quais dificultavam a análise gráfica. O uso do logaritmo neperiano permitiu, portanto, melhorar a visualização do conflito entre os objetivos e favorecer a interpretação dos resultados obtidos.

As projeções bidimensionais da FP apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11, possibilitam uma análise mais detalhada das relações entre pares de objetivos. Nas figuras, observa-se um conjunto de soluções de compromisso, representadas por pontos azuis, que equilibram a minimização do custo com a redução das perdas ou das emissões. Os pontos vermelhos correspondem às soluções extremas, nas quais cada função objetivo atinge individualmente o seu valor mínimo.

Ressalta-se que, nas projeções bidimensionais, são representadas exclusivamente as

soluções pertencentes ao frente de Pareto tridimensional, considerando-se adicionalmente apenas aquelas que permanecem não dominadas em relação ao par específico de objetivos analisado. Por esse motivo, gráficos como a Figura 10 podem aparentar conter poucas soluções ou regiões visualmente esparsas, uma vez que o critério de não dominância é aplicado apenas aos objetivos em questão.

Um caso particular é observado de melhor forma na Figura 11, na qual o método híbrido MOTS foi capaz de identificar uma solução com perdas inferiores àquela obtida pelo KNITRO na resolução do problema PNLIM mono-objetivo. Enquanto o KNITRO encontrou um valor mínimo de perdas igual a 76,1548 MW, o MOTS obteve uma solução com perdas de 75,4419 MW. Esse resultado evidencia que o ajuste fino e coordenado de variáveis discretas e contínuas pode conduzir a soluções superiores, ampliando a superfície de Pareto com alternativas não dominadas que oferecem maior flexibilidade e melhor equilíbrio para a tomada de decisão do operador do sistema.

Em todas as figuras, a estrela verde indica o ponto ótimo obtido por meio de uma otimização mono-objetivo, baseada em um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), modelado no *AMPL* e resolvido com o *solver* KNITRO. Esse ponto é utilizado exclusivamente como referência para a avaliação da qualidade das soluções mínimas obtidas pelo método híbrido proposto.

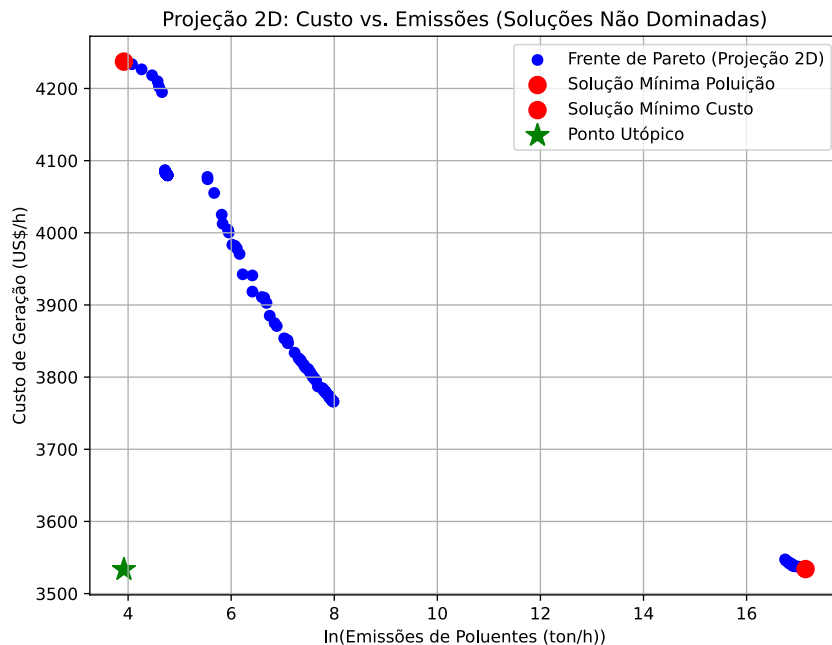


Figura 9 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (emissões de poluentes vs. custo de geração)

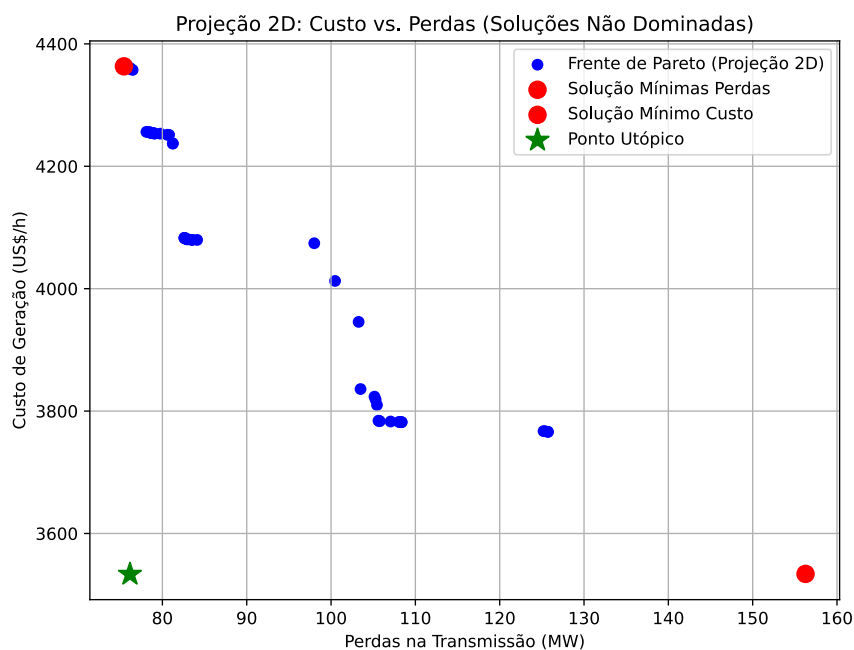


Figura 10 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs. custo de geração)

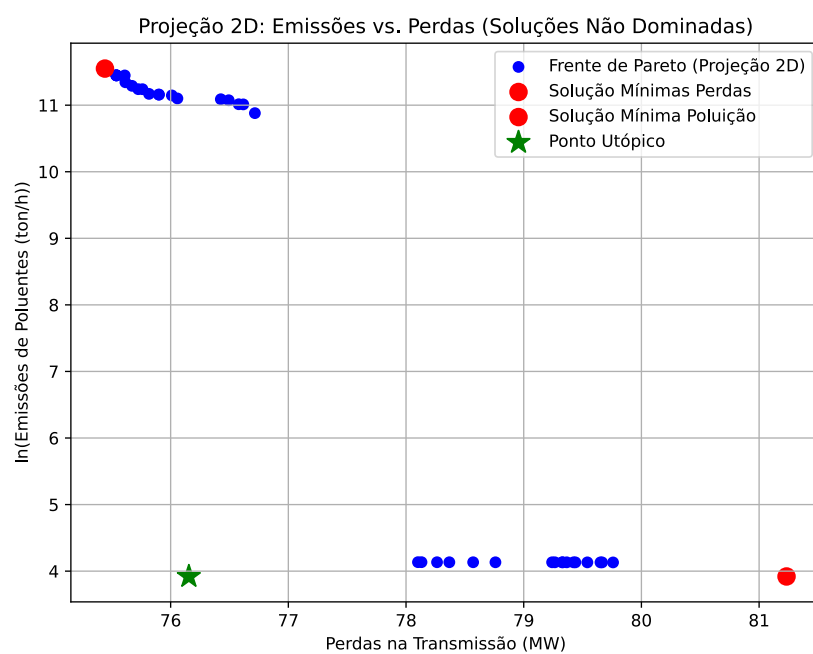


Figura 11 – Representação proposta do Frente de Pareto 3D para o Sistema de 118 Barras, visto lateralmente (Perdas na transmissão vs emissões de poluentes)

4.3.2 Análise das Soluções Representativas

A Tabela 10 apresenta quatro soluções representativas extraídas do FP obtido para o sistema teste com 118 barras. As soluções destacam os casos extremos — custo mínimo, perdas mínimas e poluição mínima — bem como uma solução intermediária de compromisso.

Observa-se de imediato que, ao priorizar exclusivamente um dos objetivos, os demais critérios são significativamente prejudicados. Como exemplo, a Solução A, correspondente à minimização do **custo de operação**, apresenta um custo total de geração de apenas 3533,97 US\$/h. Entretanto, esse benefício econômico é obtido à custa de emissões extremamente elevadas de gases poluentes.

Especificamente, o valor associado às emissões para essa solução é igual a 17,1435, o qual corresponde ao logaritmo neperiano do valor real de poluição expresso em toneladas por hora. Em termos absolutos, esse valor equivale a aproximadamente 27 882 226,47 t/h de emissões, evidenciando que a estratégia de despacho focada exclusivamente na redução de custos conduz a um desempenho ambiental severamente desfavorável.

Este valor expressivo decorre da natureza exponencial da função objetivo de poluição, que utiliza termos do tipo $\exp(\lambda \cdot P_g)$, penalizando severamente situações em que uma ou mais usinas térmicas a carvão operam contribuindo com maior energia. Por outro lado, a solução C, voltada à **minimização da poluição**, resulta em emissões da ordem de apenas 50,39 toneladas por hora, representando uma redução de diversas ordens de magnitude quando comparada ao cenário de custo mínimo. Este valor evidencia a eficiência ambiental que pode ser obtida com o método multiobjetivo proposto, já que mesmo redes de grande porte com forte participação térmica podem operar em regimes de baixíssimo impacto emissor, desde que se aceite um custo operacional mais elevado.

A solução B, associada à **minimização das perdas elétricas**, apresenta um equilíbrio interessante: embora as perdas tenham sido reduzidas para 75,20 MW — o menor valor entre os casos apresentados —, observa-se um aumento concomitante tanto no custo (4363,30 US\$/h) quanto na poluição (93453,24 ton/h). Esta solução evidencia que a redução de perdas nem sempre implica redução de emissões, uma vez que, em certas topologias, a operação com menores perdas pode requerer despacho de geradores térmicos mais próximos das cargas, que ainda assim apresentam elevadas taxas de emissão.

Por fim, a **solução D** ilustra claramente a capacidade do método em encontrar um **compromisso equilibrado** entre as três funções objetivo.

Para determinar a qualidade da Solução de Compromisso selecionada, aplicou-se a metodologia de lógica difusa descrita na Seção 3.7.

Substituindo os valores para cada objetivo:

1. Satisfação do Custo (μ_C):

$$\mu_C = \frac{4363,2965 - 4082,5847}{4363,2965 - 3533,9663} = \frac{280,7118}{829,3302} \approx \mathbf{0,3385}$$

2. Satisfação das Perdas (μ_L):

$$\mu_L = \frac{156,2683 - 82,6403}{156,2683 - 75,4419} = \frac{73,6280}{80,8264} \approx \mathbf{0,9109}$$

3. Satisfação da Poluição (μ_P):

$$\mu_P = \frac{17,1435 - 4,7322}{17,1435 - 3,9198} = \frac{12,4113}{13,2237} \approx \mathbf{0,9386}$$

O *Score Fuzzy* total (ou Prioridade Cardinal) da solução é a soma das satisfações individuais:

$$Score_{Total} = \sum_{i=1}^3 \mu_i(X_k) = 0,3385 + 0,9109 + 0,9386 = \mathbf{2,1880} \quad (42)$$

Análise: O resultado indica que a solução selecionada prioriza fortemente a eficiência técnica (Perdas) e ambiental (Poluição), atingindo índices de satisfação superiores a 90% nessas métricas. Em contrapartida, aceita-se um desempenho moderado no critério econômico (33,8% de satisfação), o que reflete o custo de oportunidade necessário para manter o sistema "limpo" e eficiente.

De forma geral, a Tabela 10 evidencia de maneira quantitativa que:

- Existe um **trade-off pronunciado** entre custo e poluição, mais intenso que o conflito entre perdas e poluição;
- O método utilizado permite capturar soluções de compromisso que se aproximam de forma notável das soluções utópicas monoobjetivo;
- A representação em forma de FP possibilita ao planejador selecionar alternativas alinhadas com restrições orçamentárias e ambientais, conferindo **flexibilidade decisória** no planejamento operacional.

Tabela 10 – Soluções Representativas do Frente de Pareto para o Sistema de 118 Barras

Descrição da Solução	Custo (US\$/h)	Perdas (MW)	Poluição (ton/h)
A: Custo Mínimo	3533.9663	156.2683	17.1435
B: Perdas Mínimas	4363.2965	75.4419	11.5499
C: Poluição Mínima	4237.2481	81.2331	3.9198
D: Solução de Compromisso	4082.5847	82.6403	4.7322

4.3.3 Análise Comparativa da Topologia de Tensão: Meta-heurística *versus* Solver Determinístico

A Figura 12 apresenta os perfis de tensão nas 118 barras do sistema para diferentes soluções extremas: os três casos utópicos resolvidos via programação não linear (PNLIM) com AMPL e KNITRO — mínimo custo, mínimas perdas e mínima poluição — e as soluções extremas obtidas pelo FP correspondente a cada objetivo.

A inspeção detalhada dos perfis de tensão revelou um fenômeno notável: enquanto os perfis para o objetivo de **Mínimas Perdas** apresentam grande similaridade entre a Fronteira de Pareto (meta-heurística) e o PNLIM (Knitro), os perfis para **Mínimo Custo** e **Mínima Poluição** exibem divergências topológicas significativas. A seguir, apresenta-se a fundamentação teórica para este comportamento e a análise da solução de compromisso.

4.3.3.1 Divergência nos Cenários de Custo e Poluição: A Multimodalidade do Problema

A discrepância observada entre os perfis de tensão obtidos pelo método proposto e pelo solver Knitro para os objetivos de Custo e Poluição pode ser atribuída à natureza **não-convexa e multimodal** do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

- **Desacoplamento Fraco $P-V$:** As funções objetivo de Custo e Poluição dependem predominantemente do despacho de Potência Ativa (P). Existe uma ampla "região de indiferença" para as variáveis de Potência Reativa (Q) e Tensão (V). Matematicamente, múltiplos vetores de tensão podem satisfazer o mesmo ótimo de despacho ativo (P_{gen}).
- **Exploração Global *vs.* Local:** O solver Knitro, baseado em gradientes (pontos interiores), tende a convergir para o ótimo local mais próximo da condição inicial ou aquele que satisfaz as condições KKT com menor esforço computacional. Já a meta-heurística, através de sua busca global estocástica, explorou uma região diferente do espaço de busca, encontrando um perfil de tensão distinto que, embora produza custos/emissões similares, opera a rede com uma estratégia de reativos diferente (por exemplo, priorizando o chaveamento de bancos de capacitores ou *taps* de transformadores de forma distinta).

Essa divergência não indica erro, mas sim a existência de múltiplas soluções operativas equivalentes para o mesmo custo, uma característica intrínseca de sistemas de potência complexos.

4.3.3.2 Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo da Física

Ao contrário do custo, a função objetivo de **Perdas de Transmissão Ativa** (P_{loss}) possui uma correlação física direta e forte com as magnitudes de tensão, dada pela relação

aproximada $P_{loss} \propto 1/V^2$.

- **Otimização Guiada pela Física:** Para minimizar perdas, a física da rede "força" a solução para uma topologia única: elevar as tensões de todas as barras para o limite superior máximo admissível (1,05 ou 1,06 p.u.) a fim de reduzir as correntes.
- **Espaço de Busca Estreito:** O "vale" de otimalidade para perdas é estreito e bem definido. Tanto a meta-heurística quanto o solver determinístico são conduzidos para esta mesma configuração de alta tensão, pois qualquer desvio significativo resultaria em aumento imediato das perdas. Por isso, os perfis são visualmente idênticos.

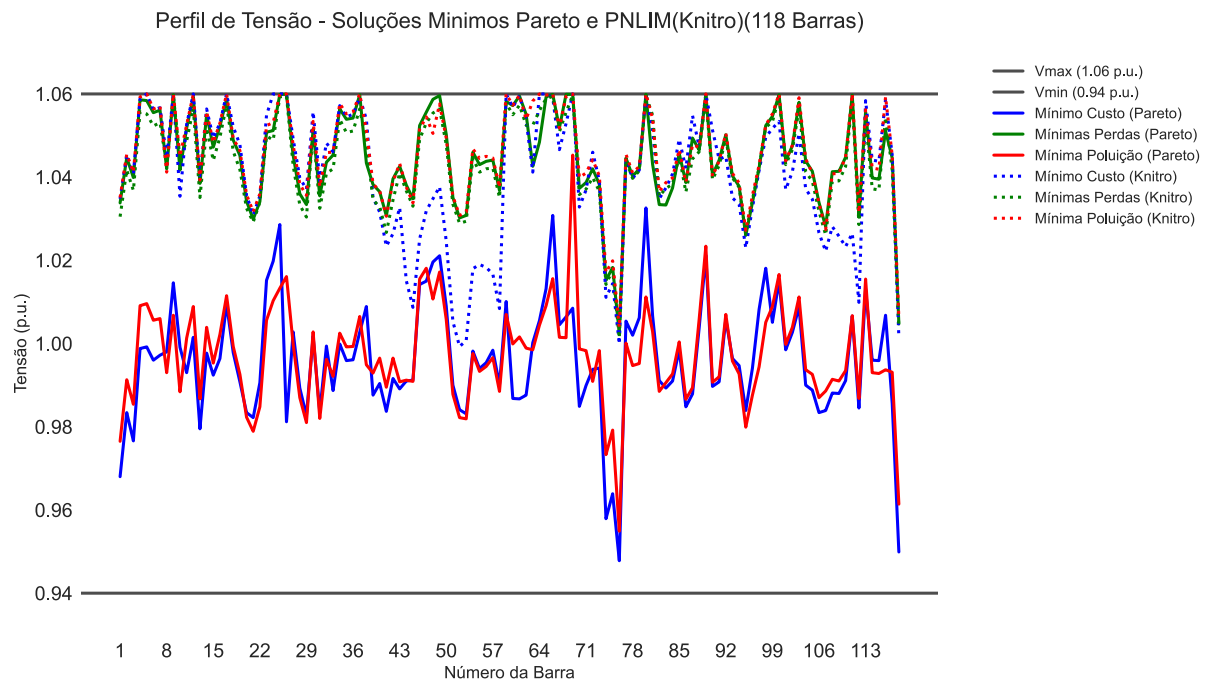


Figura 12 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas mínimos do nosso FP y Obtidas por PNLIM no Sistema de 118 Barras

4.3.3.3 Análise da Solução de Compromisso

A Figura 13 mostra o perfil de tensão da **Solução de Compromisso** (apresentado na última coluna) atua como um "filtro de robustez" entre essas divergências.

Ao selecionar esta solução via lógica difusa, o sistema não adota os perfis extremos (e potencialmente estressados no limite inferior) do Custo/Poluição do Knitro, nem os perfis uniformemente altos das Perdas. O perfil de compromisso exhibe uma modulação inteligente:

1. Mantém tensões elevadas nas barras críticas para garantir eficiência (herança do objetivo de Perdas).

2. Permite relaxamentos controlados em barras de carga menos sensíveis para acomodar o despacho econômico (herança do objetivo de Custo).

Em resumo, a solução de compromisso mitiga os riscos associados aos ótimos locais "agressivos" encontrados pelos métodos determinísticos em objetivos isolados, provendo um ponto de operação mais equilibrado e seguro para o operador do sistema.

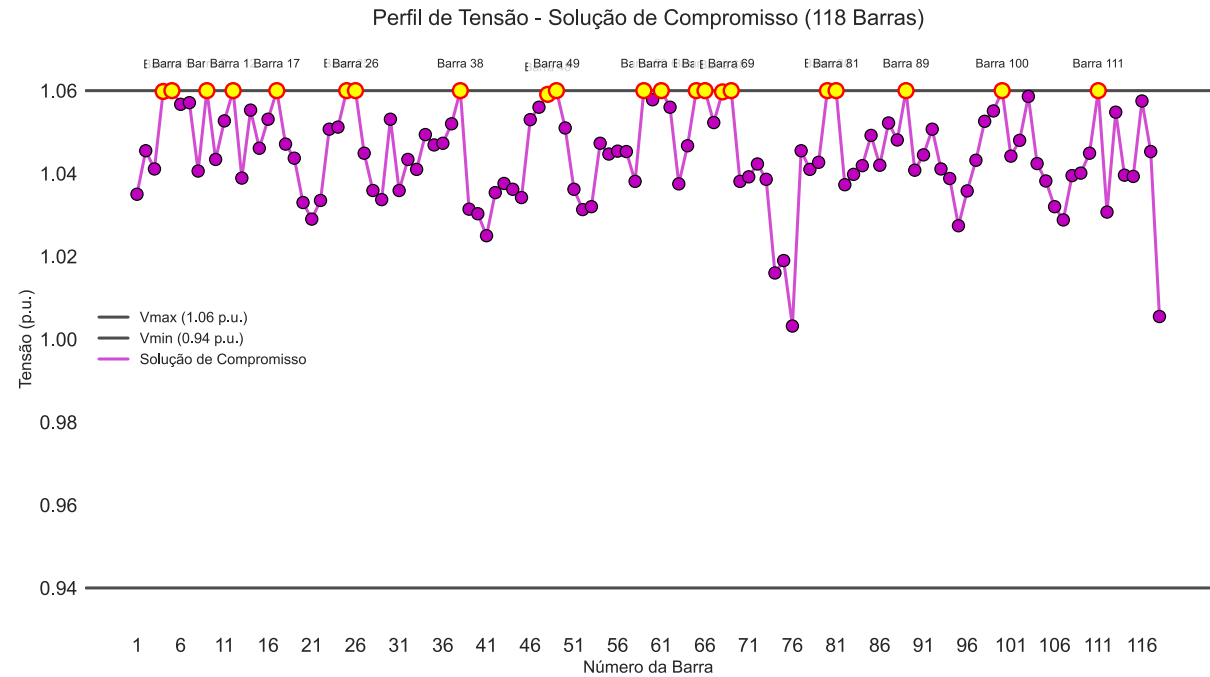


Figura 13 – Perfil de Tensão para uma Solução de Compromisso do FP no Sistema de 118 Barras

4.3.4 Análise Comparativa entre PNLIM e MOTS 118 Barras

A eficácia do algoritmo proposto (MOTS) na exploração do espaço de busca foi validada através da comparação direta entre as soluções extremas encontradas na Fronteira de Pareto e os ótimos globais mono-objetivo obtidos pelo solver de programação não-linear mista (PNLIM/Knitro). A Tabela 11 apresenta os desvios percentuais entre as abordagens.

Tabela 11 – Comparação entre Extremos do Frente de Pareto e Soluções PNLIM

Função Objetivo	Solução PNLIM Min	Extremo do Frente minimos	Diferença (%)
Custo (US\$/h)	3533.38	3533.97	+0.02%
Perdas (MW)	76.15	75.44	-0.94%
Ln(Poluição (ton/h))	3.92	3.92	+0,0%

Análise de Convergência e Superação Local:

Os resultados demonstram uma aderência quase perfeita do método proposto às soluções de referência. Nos objetivos de **Custo** e **Poluição**, as diferenças são negligenciáveis

(+0,02% e 0,00%, respectivamente), confirmando que a meta-heurística foi capaz de convergir para os mesmos ótimos globais que o solver matemático determinístico, validando a robustez do mecanismo de busca nas bordas da fronteira.

Um fenômeno de particular relevância científica observa-se no objetivo de **Perdas de Transmissão**. Contrariando a expectativa usual — onde métodos multiobjetivo, ao priorizarem a diversidade da fronteira (espalhamento), tendem a obter extremos ligeiramente inferiores aos métodos mono-objetivo dedicados —, o algoritmo MOTS encontrou uma solução de perdas (75,44 MW) **superior** àquela obtida pelo PNLIM (76,15 MW), representando uma melhoria de 0,94%.

Este resultado pode ser atribuído à natureza não-convexa e multimodal das equações de fluxo de potência (especialmente as perdas, $P_{loss} \propto V^2$). Solvers baseados em gradiente, como o Knitro, são suscetíveis a estagnação em ótimos locais dependendo do ponto de partida. Em contrapartida, a natureza estocástica e a busca global da meta-heurística permitiram ao MOTS escapar dessa atração local, realizando um "ajuste fino" na topologia de despacho que o método determinístico não foi capaz de identificar. Isso evidencia que o MOTS não apenas gera uma fronteira de Pareto bem distribuída, mas também compete eficazmente na descoberta de ótimos estritos em paisagens de busca complexas.

4.3.5 Análise da Configuração das Variáveis Discretas de Controle

A Tabela 12 detalha os ajustes ótimos encontrados para os transformadores com comutação de *tap* (OLTC) e bancos de capacitores/reatores (*shunts*) nas soluções extremas obtidas pelo solver PNLIM e pela meta-heurística MOTS. A comparação destas variáveis inteiras revela aspectos importantes sobre a topologia de operação do sistema.

Multimodalidade e Estratégias de Chaveamento:

A primeira observação relevante é a discrepância nos ajustes dos *taps* para os cenários de **Mínimo Custo** e **Mínimas Perdas**. Por exemplo, no ajuste do `tap_8` sob o objetivo de custo, o PNLIM definiu a posição +15, enquanto o MOTS optou pela posição +8. Da mesma forma, no cenário de perdas, o `tap_8` apresenta uma divergência de sinal (+4 no PNLIM vs. -13 no MOTS).

Este comportamento evidencia a natureza **multimodal** do problema de Fluxo de Potência Ótimo em redes de grande porte. Como o custo e as perdas são funções globais, existem múltiplas combinações de ajustes discretos locais que resultam em valores de função objetivo muito próximos. O solver determinístico (PNLIM) e a meta-heurística (MOTS) exploraram "vales" distintos do espaço de busca combinatório, ambos válidos, mas com estratégias de regulação de tensão diferentes.

Conservadorismo no Uso de Compensação Shunt:

No que tange aos dispositivos *shunt* (bancos de capacitores), nota-se um padrão comportamental distinto na meta-heurística. Nos cenários de Custo e Perdas, o algoritmo MOTS tendeu a manter desligados (*status* 0) certos dispositivos que o PNLIM manteve ativados (*status* 1), especificamente os **shunt_3**, **shunt_6** e **shunt_11**.

Isso sugere que a solução encontrada pelo MOTS é operacionalmente mais "esparça" ou conservadora em termos de chaveamentos, conseguindo satisfazer as restrições de tensão e os objetivos de otimização utilizando menos recursos de compensação reativa, o que é benéfico para a vida útil dos equipamentos de manobra.

Convergência no Cenário de Poluição:

Em contraste com os demais objetivos, o cenário de **Mínima Poluição** apresentou uma convergência notável entre os métodos. Para a maioria dos transformadores (ex: **tap_1** a **tap_7**, **tap_9**) e praticamente todos os *shunts*, os ajustes encontrados pelo MOTS e PNLIM foram idênticos ou diferiram por apenas uma posição discreta.

Fisicamente, isso indica que, para minimizar as emissões (que dependem de um despacho de geração ativa muito específico e restritivo), o sistema perde graus de liberdade. A rede é "forçada" a operar em um ponto de equilíbrio muito rígido para acomodar o fluxo de potência dos geradores limpos, restando poucas alternativas combinatórias para o controle de tensão, o que explica a similaridade entre as soluções discretas.

Tabela 12 – Comparação dos Ajustes de Variáveis Discretas: Sistema IEEE 118 Barras

Variável Discreta	Min. Custo		Min. Perdas		Min. Poluição	
	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS
tap_1	5	2	3	4	3	3
tap_2	-9	0	-8	-8	-9	-9
tap_3	2	3	3	3	3	3
tap_4	2	0	4	6	4	4
tap_5	7	3	2	4	1	1
tap_6	-4	-2	1	3	1	1
tap_7	4	3	3	2	3	3
tap_8	15	8	4	-13	3	3
tap_9	4	6	3	9	4	4
shunt_1	1	1	1	1	0	0
shunt_2	1	1	1	0	1	1
shunt_3	1	0	1	1	1	1
shunt_4	1	1	1	1	1	1
shunt_5	1	1	1	1	1	1
shunt_6	1	0	1	0	1	1
shunt_7	1	1	1	1	0	0
shunt_8	1	1	1	1	1	1
shunt_9	1	1	1	1	1	1
shunt_10	1	1	1	1	1	1
shunt_11	1	0	1	0	1	1
shunt_12	1	1	1	1	1	1
shunt_13	1	1	1	1	1	1
shunt_14	1	1	1	1	1	1

4.3.6 Análise de Métricas de Desempenho Operativo 118 Barras

A Tabela 13 apresenta um comparativo detalhado das variáveis de estado e controle para as soluções extremas obtidas. A análise cruzada destes dados permite inferir as estratégias de otimização adotadas por cada algoritmo e explica as discrepâncias observadas na potência total gerada.

A Dicotomia entre Eficiência Energética e Custo Financeiro:

Um dos resultados mais intrigantes observa-se na comparação dos cenários de **Mínimo Custo**. O solver PNLIM encontrou uma solução que demanda uma Geração Ativa Total de 4213,90 MW, substancialmente superior aos 4152,04 MW requeridos pela solução de Mínimo Custo da Fronteira de Pareto.

Esta diferença de quase 62 MW pode ser explicada pela análise das **Perdas de Energia Ativa**:

- O PNLIM, guiado estritamente pelo gradiente da função de custo, convergiu para um ponto de operação onde geradores baratos (provavelmente carvão) são despachados ao máximo, mesmo que distantes dos centros de carga. O resultado é um sistema com perdas elevadíssimas (155,90 MW). Como o balanço de potência exige que $P_{gerada} = P_{carga} + P_{perdas}$, o aumento das perdas obriga o aumento da geração total.
- A meta-heurística (Pareto), por sua natureza de busca global e preservação de diversidade, encontrou um ótimo local alternativo (sub-ótimo financeiramente, mas tecnicamente superior). Com perdas de apenas 94,04 MW no cenário de custo, o sistema exige menos geração bruta para atender à mesma carga.

Conclui-se que o PNLIM atuou de maneira agressiva financeiramente, sacrificando a eficiência elétrica (I^2R) para minimizar o custo de combustível, enquanto o método proposto encontrou uma solução operacionalmente mais eficiente ("verde"), ainda que sob a etiqueta de minimização de custos.

Estratégias de Controle de Tensão e Suporte Reativo:

A análise das magnitudes de tensão e potência reativa revela perfis de exploração distintos:

1. **Exploração dos Limites de Tensão:** O PNLIM manteve as tensões operando em uma banda conservadora e alta (Mínimo de $\approx 0,999$ p.u. e Máximo cravado em 1,06 p.u.). Isso é consistente com a tentativa de minimizar as perdas elevadas descritas anteriormente, pois tensões altas reduzem a corrente. Em contraste, a solução de Pareto (Min. Custo e Poluição) explorou agressivamente os limites inferiores, atingindo valores como 0,9478 p.u. Isso sugere que a meta-heurística identificou que

relaxar a tensão em certas barras permitia um despacho de potência ativa mais favorável aos objetivos, uma manobra não linear que o solver determinístico evitou.

2. **Estresse de Potência Reativa:** O cenário de Mínimo Custo do PNLIM impôs um estresse severo ao sistema, exigindo 744,08 MVar de geração reativa total. Este valor excessivo é uma consequência direta das perdas elevadas ($X \cdot I^2$), que consomem reativos da rede. A solução de Pareto, sendo mais eficiente em perdas ativas, exigiu significativamente menos suporte reativo (518,45 MVar), indicando uma operação mais "leve" e com maior margem de estabilidade de tensão para contingências.

Convergência no Cenário de Mínimas Perdas:

Diferente do cenário de custo, no objetivo de **Mínimas Perdas**, o PNLIM superou o método de Pareto, alcançando 75,43 MW contra 82,86 MW. Isso valida a consistência do PNLIM em problemas convexos ou onde a relação física é direta ($P_{perdas} \propto V$). Aqui, ambos os métodos elevaram a tensão máxima para 1,06 p.u., mas o "ajuste fino" matemático do gradiente do PNLIM conseguiu extrair os últimos megawatts de eficiência que a busca estocástica da meta-heurística, focada em manter a diversidade da fronteira, não refinou ao extremo.

Em suma, enquanto o PNLIM demonstra superioridade na precisão matemática pontual (especialmente em Perdas), o método de Pareto proposto oferece soluções mais equilibradas do ponto de vista sistêmico (menos geração total, menos stress reativo) nos cenários conflitantes de Custo e Poluição.

Tabela 13 – Comparação de Variáveis Contínuas: Frente de Pareto vs PNLIM

Métrica / MIN	Custo(PNLIM)	Perdas(PNLIM)	Poluição(PNLIM)	Custo(Pareto)	Perdas(Pareto)	Poluição (Pareto)
Tensão Mín(pu)	0,9993	1,0013	1,0039	0,9478	1,0023	0,9549
Tensão Máx(pu)	1,06	1,0597	1,06	1,0326	1,0599	1,0453
Geração Ativa Total (MW)	4213,9008	4133,4304	4139,2411	4152,0423	4140,8582	4151,0492
Geração Reativa Total (MVar)	744,0809	337,4541	293,2304	518,4473	387,2219	515,1762
Perdas Ativa Total (MW)	155,9002	75,4299	81,2688	94,042	82,8576	93,0485
Perdas Reativa Total (MVar)	-576,0492	-1007,6352	-1022,9291	-828,0899	-995,3522	-832,034

Nota: Valores de tensão em pu (por unidade), geração em MW/MVar. Dados referentes ao sistema de 118 barras.

4.4 RESULTADOS PARA O SISTEMA NESTA IEEE 300 BARRAS

O sistema teste IEEE 300 barras, baseado no caso NESTA (*Nesta 0.7.0*), representa um desafio de otimização de larga escala e alta complexidade combinatória, caracterizado por uma topologia não sequencial (com identificadores de barra como "7049") e uma matriz de geração diversificada.

Caracterização do Sistema e Desempenho Computacional:

Este sistema é composto por 300 barras e 69 unidades geradoras, categorizadas em: 20 unidades térmicas a carvão (COW), 32 a gás natural (GN), 12 compensadores síncronos (SYN), 2 unidades a óleo (PEL) e 3 usinas nucleares (NUC). A barra de referência (*slack*) é definida na barra 7049, alimentada por geração nuclear. A complexidade do problema é exacerbada pela presença de variáveis de controle discretas massivas: 62 transformadores com comutação de *tap* sob carga (OLTC), cada um possuindo 33 posições discretas, além de 14 dispositivos de compensação *shunt* e um transformador defasador (*phase-shifter*) conectando as barras 196 e 2040, que introduz não-linearidades adicionais no fluxo de potência.

Devido à explosão combinatória provocada pelas 33^{62} combinações possíveis de *taps*, adotou-se a estratégia de pré-processamento detalhada na Seção 3.4 para viabilizar a convergência. A execução do algoritmo meta-heurístico proposto consumiu um tempo computacional total de 39026,86 segundos. Durante o processo, a lista tabu armazenou 1400 soluções, resultando, após 1400 iterações, em um conjunto final de 750 soluções não dominadas na Fronteira de Pareto.

4.4.1 Análise Comparativa dos Perfis de Tensão: Sistema IEEE 300 Barras

As Figuras 14, 15 e 16 ilustram os perfis de tensão para as 300 barras do sistema, comparando as soluções extremas obtidas pela Fronteira de Pareto (meta-heurística) com os ótimos globais identificados pelo solver PNLIM (Knitro) para os objetivos de Custo, Perdas e Poluição, respectivamente.

A inspeção detalhada dos dados tabulados revela fenômenos distintos de convergência e divergência topológica, fundamentados na física da rede e na natureza multimodal do problema de otimização em larga escala.

4.4.1.1 Divergência nos Cenários de Custo e Poluição: A Multimodalidade do Problema

A discrepância observada entre os perfis de tensão obtidos pelo método proposto (MOTS) e pelo solver Knitro, especialmente nos objetivos de Custo e Poluição, reflete a natureza não-convexa do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

- **Exploração do Espaço de Busca (Exemplo da Barra 10 - Síncrono):** A Barra 10 (compensador síncrono) é um exemplo paradigmático desta divergência. Para o objetivo de **Mínimo Custo**, o solver Knitro satura a tensão no limite superior (1,06 p.u.), enquanto a solução de Pareto encontra um ótimo local estável em 1,0353 p.u. Da mesma forma, no cenário de **Mínima Poluição**, o Knitro novamente fixa a tensão em 1,06 p.u., enquanto o Pareto converge para 1,0509 p.u.

- **Desacoplamento Fraco $P-V$:** Como os custos de geração e as emissões dependem predominantemente da Potência Ativa (P), existe uma região de indiferença para as variáveis de Tensão (V) e Reativos (Q). O solver determinístico (Knitro), baseado em gradientes, tende a explorar os limites das restrições (1,06 p.u.) para obter ganhos marginais na função objetivo. A meta-heurística, por sua vez, explora uma região topológica distinta, encontrando soluções com custos similares, mas com perfis de tensão menos saturados, o que sugere uma estratégia operativa mais flexível.

4.4.1.2 Convergência no Cenário de Perdas: O Determinismo da Física

Ao contrário dos objetivos econômicos, a função de **Mínimas Perdas** impõe um comportamento determinístico à rede, guiado pela relação física $P_{loss} \propto I^2$.

- **Tendência de Alta Tensão:** Observa-se uma forte correlação entre os métodos nas barras de transmissão e geração principal. Por exemplo, na Barra 7130(263) (Nuclear) e na Barra 7001(247) (Carvão), ambos os algoritmos elevam as tensões próximos ao limite superior (entre 1,058 p.u. e 1,06 p.u.) no cenário de perdas. Isso ocorre porque a elevação da tensão é a única maneira física de reduzir a corrente e, consequentemente, as perdas ôhmicas, forçando a convergência dos algoritmos para a mesma região do espaço de busca.
- **Exceções Topológicas (Barra 10):** É notável, contudo, que na Barra 10, o objetivo de perdas força a tensão para o limite inferior (Knitro: 0,9466 p.u.; Pareto: 0,9401 p.u.), contrariando a tendência global. Isso indica uma restrição local ativa ou a necessidade de controlar fluxos reativos circulares nesta sub-região específica da rede de 300 barras, um comportamento capturado corretamente por ambos os métodos.

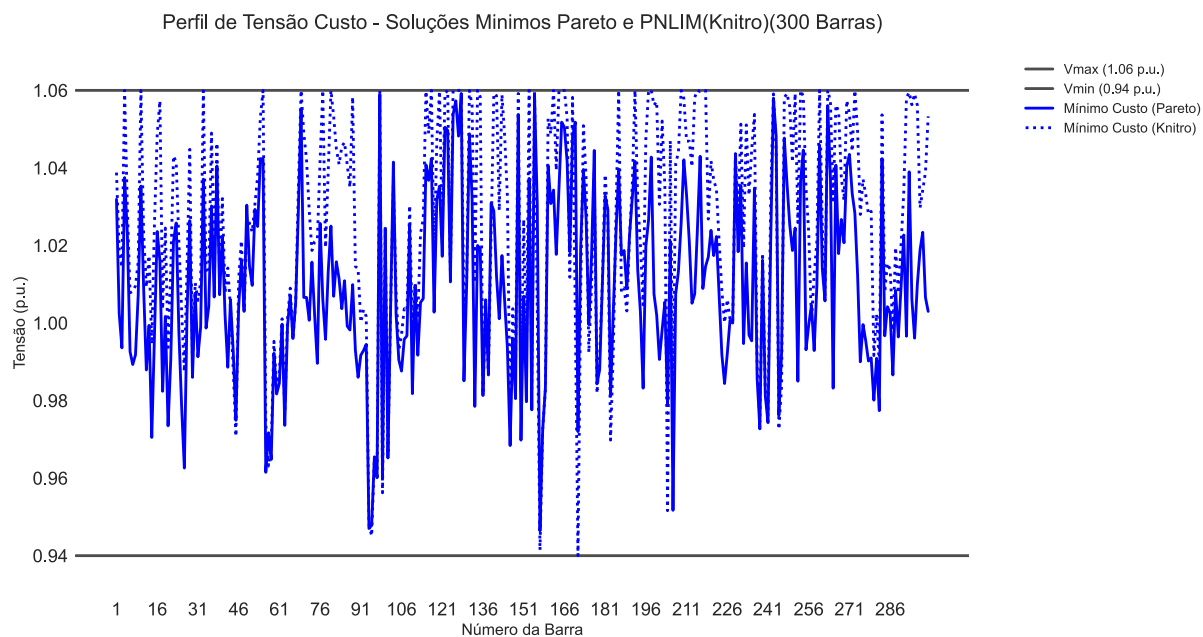


Figura 14 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de custo PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras

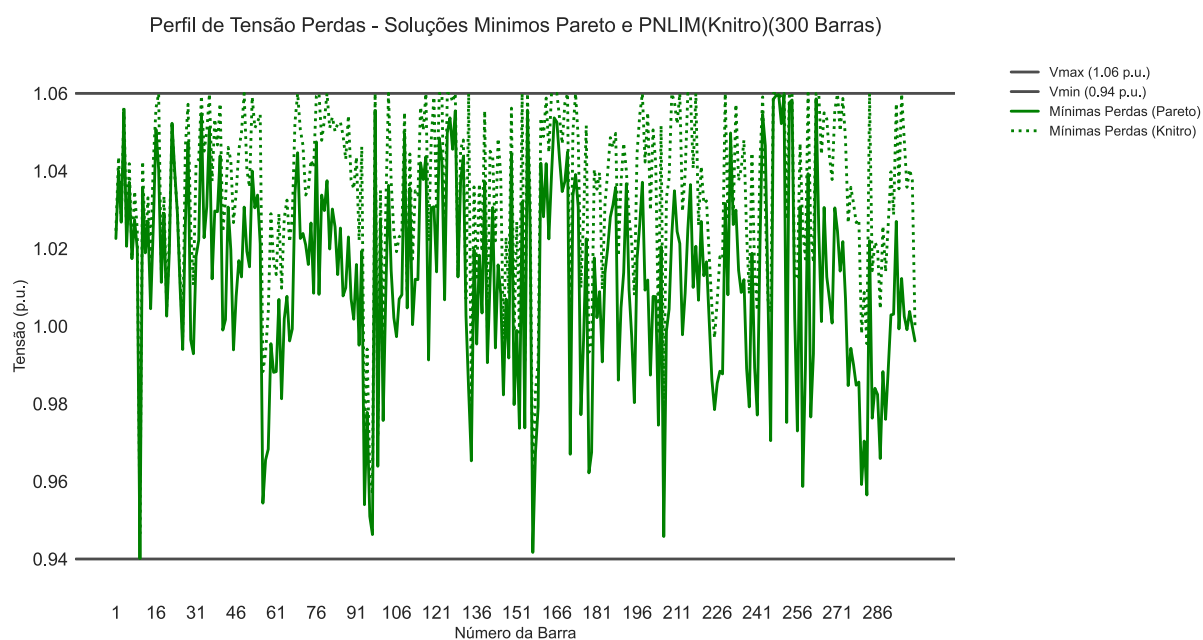


Figura 15 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de perdas PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras

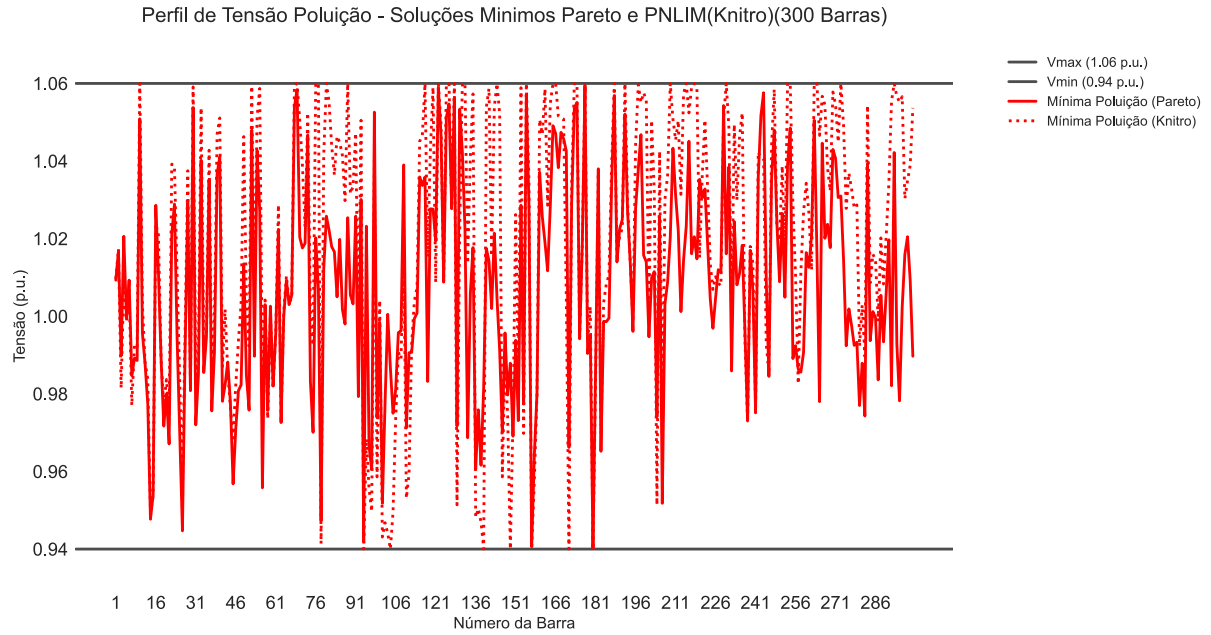


Figura 16 – Perfil de Tensão para as Soluções Extremas de Poluição PNLIM e MOTS no Sistema de 300 Barras

4.4.1.3 Análise da Solução de Compromisso

A Figura 17 mostra a **Solução de Compromisso**, ela atua como um "filtro de robustez", mitigando os extremos operacionais identificados nas soluções mono-objetivo.

1. **Modulação Inteligente (Barra 10):** Enquanto a Barra 10 oscila violentamente entre o máximo (1,06 p.u. no Custo) e o mínimo ($\approx 0,94$ p.u. nas Perdas) nas soluções extremas, a solução de compromisso estabelece um ponto de operação equilibrado em 1,0230 p.u., evitando o estresse dos limites operativos.
2. **Gestão da Referência (Barra 7049(257) - Slack):** Na barra *slack* nuclear, onde o Custo sugere operar próximo a 1,00 p.u. e as Perdas exigem 1,04 p.u., a solução de compromisso adota um valor intermediário de 1,0263 p.u.
3. **Sacrifício Controlado (Barra 1201(245)):** Em pontos críticos da rede, como a Barra 1201, a solução de compromisso aceita uma tensão de 0,9401 p.u., ligeiramente inferior aos mínimos individuais encontrados (0,97 a 1,00 p.u.). Este comportamento sacrificial em uma barra de carga específica é necessário para viabilizar o equilíbrio global das 69 unidades geradoras, demonstrando que o algoritmo prioriza a viabilidade sistêmica e a redução do conflito global em detrimento da maximização local de uma única variável.

Em resumo, a solução de compromisso oferece um perfil de tensão mais plano e seguro nas barras de geração base, enquanto realiza ajustes finos e necessários nas barras de carga para acomodar as restrições conflitantes de um sistema de alta complexidade.

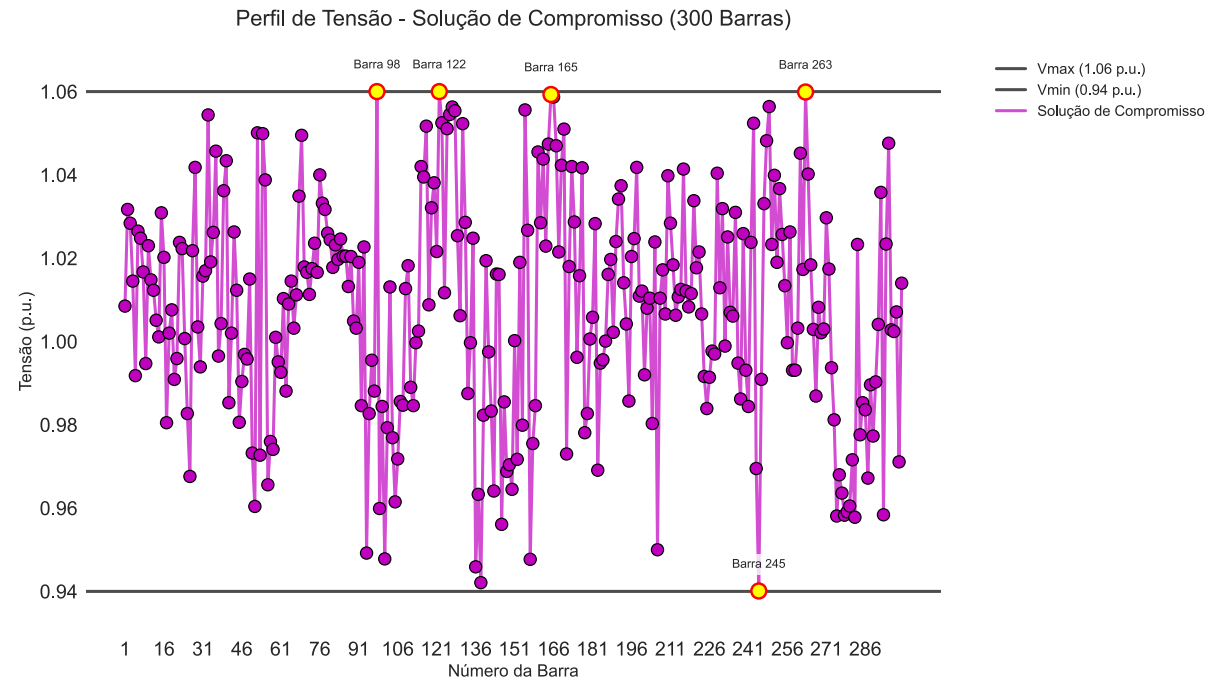


Figura 17 – Perfil de Tensão para a Solução de compromisso da proposta FP no Sistema de 300 Barras

4.4.2 Validação e Superação dos Extremos na Fronteira de Pareto

A robustez do algoritmo MOTS em espaços de busca de alta dimensionalidade foi validada através da comparação entre as soluções extremas da Fronteira de Pareto e os mínimos obtidos via programação não-linear mista (PNLIM). A Tabela 14 resume os resultados, revelando divergências de desempenho fundamentais para a justificativa da abordagem meta-heurística.

Tabela 14 – Comparação de Soluções Extremas (300 Barras): PNLIM *vs.* MOTS

Função Objetivo	Mínimo PNLIM	Extremo Pareto (MOTS)	Diferença (%)
Custo (\$/h)	16.284,63	16.285,62	+0,01%
Perdas (MW)	242,98	241,30	-0,69%
Ln((Poluição (ton/h))	16,12	13,65	-15,33%

4.4.2.1 Aderência no Custo e Refinamento nas Perdas

No objetivo de **Mínimo Custo**, observa-se uma aderência técnica quase perfeita (+0,01%) entre o MOTS e o solver exato. Isso confirma que, apesar da estocasticidade, a meta-heurística convergiu para o mesmo ótimo global que o método determinístico, validando a eficácia do mecanismo de busca.

Simultaneamente, no objetivo de **Perdas**, o MOTS superou o PNLIM em 0,69%. Embora a magnitude pareça pequena, em sistemas de potência reais, uma redução de 1,68

MW em perdas representa uma economia energética significativa ao longo do horizonte operativo. Este ganho sugere que a manipulação direta das variáveis discretas (*taps*) pelo MOTS permitiu um ajuste fino de tensão que a relaxação contínua do PNLIM não capturou com precisão.

4.4.2.2 A Superação Expressiva no Cenário de Poluição

O resultado mais impactante deste estudo de caso reside na minimização da **Po-luição**, onde a solução encontrada pelo MOTS (13,65 ton/h) é 15,33% inferior àquela obtida pelo PNLIM (16,12 ton/h). Esta discrepância de magnitude elevada não é um erro numérico, mas uma evidência da **multimodalidade severa** do sistema de 300 barras.

- **Armadilha dos Ótimos Locais:** Solvers baseados em gradiente, como o Knitro, dependem fortemente do ponto de inicialização. Em superfícies de custo complexas e repletas de "vales" locais (típico de funções de emissão com múltiplos geradores de coeficientes distintos), o solver determinístico convergiu prematuramente para um ótimo local de qualidade inferior.
- **Exploração Global Eficaz:** A meta-heurística, através de seus operadores de diversificação, conseguiu escapar dessa bacia de atração local. O algoritmo identificou uma combinação de despacho entre as unidades geradoras — possivelmente envolvendo uma redistribuição de carga não-intuitiva entre as unidades térmicas e a gás — que resultou em uma redução drástica das emissões.

Este resultado corrobora a hipótese de que, à medida que a escala e a complexidade do sistema elétrico aumentam (de 30 para 300 barras), a capacidade dos métodos determinísticos clássicos de garantir a otimalidade global diminui, tornando as abordagens meta-heurísticas não apenas uma alternativa viável, mas, em casos críticos como este, uma ferramenta superior para a descoberta de pontos de operação mais sustentáveis.

4.4.3 Análise da Configuração das Variáveis Discretas no Sistema de 300 Barras

A complexidade combinatória do sistema IEEE 300 barras, caracterizada por 62 transformadores com comutação de *tap* e 14 dispositivos de compensação *shunt*, exige uma análise detalhada das estratégias de controle adotadas. As Tabelas 15 e 16 apresentam a comparação entre os ajustes ótimos encontrados pelo solver PNLIM e pela meta-heurística MOTS.

Convergência Robusta em Cenários de Alta Dimensionalidade:

Ao contrário do observado em sistemas menores, onde a multimodalidade resultava em ajustes de *tap* divergentes, no caso de 300 barras, nota-se uma convergência surpreen-

dente entre os métodos para os cenários de **Mínimo Custo** e **Mínima Poluição**. Para a vasta maioria dos 62 transformadores (ex: `tap_3` a `tap_7`, `tap_12` a `tap_15`), os ajustes encontrados pelo MOTS são idênticos ou diferem em apenas uma posição discreta (± 1) em relação ao PNLIM. Isso sugere que, em redes de grande porte e altamente restritas, a "bacia de atração" do ótimo global para variáveis discretas é estreita. A capacidade do MOTS de replicar a configuração de *taps* do solver exato (mesmo operando em um espaço de busca de 33^{62} combinações) valida a eficácia do mecanismo de busca local e da lista tabu em refinar a solução combinatória.

Divergência Estratégica no Cenário de Perdas:

A exceção a essa convergência ocorre no cenário de **Mínimas Perdas**, onde se observam discrepâncias significativas.

- **Exploração de Regiões Distintas:** Para o `tap_60`, o PNLIM ajustou a posição +6, enquanto o MOTS optou por +13. Similarmente, no `tap_58`, tem-se +6 (PNLIM) contra +10 (MOTS).
- **Impacto na Eficiência:** Relembrando que o MOTS superou o PNLIM em eficiência no cenário de perdas (241,30 MW vs 242,98 MW), essa divergência nos ajustes de *tap* indica que a meta-heurística encontrou uma topologia de tensão superior. Ao elevar os *taps* nestes transformadores específicos, o MOTS provavelmente melhorou o perfil de tensão em sub-regiões críticas da rede que o solver baseado em gradiente não conseguiu otimizar devido a estagnação em ótimos locais.

Otimização dispersa dos Dispositivos Shunt:

A análise dos compensadores *shunt* revela uma característica distintiva da abordagem proposta: a tendência à "esparsidade" operativa. Enquanto o PNLIM tende a manter a maioria dos capacitores conectados (*status* 1), o MOTS desativa estrategicamente vários bancos (ex: `shunt_3`, `shunt_4`, `shunt_5`, `shunt_8`, `shunt_10`) nos cenários de Custo e Perdas. Esta estratégia de "menos é mais" tem dupla vantagem:

1. **Eficiência:** Evita a sobrecompensação reativa, que pode elevar perdas em transformadores e linhas (I^2R devido a correntes reativas desnecessárias).
2. **Operacional:** Reduz o número de manobras de chaveamento necessárias, preservando a vida útil dos disjuntores e capacitores.

Em resumo, a análise das variáveis discretas confirma que o algoritmo MOTS não apenas compete com solvers comerciais em precisão, mas frequentemente descobre estratégias de controle mais eficientes e operacionalmente conservadoras em problemas de alta complexidade combinatória.

Tabela 15 – Comparación de Variables Discretas (Parte 1: Taps 1-50)

Variável	Min. Custo		Min. Perdas		Min. Poluição	
	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS
tap_1	8	8	2	2	12	12
tap_2	5	6	6	5	5	5
tap_3	4	4	4	4	4	4
tap_4	-9	-9	-8	-7	-9	-9
tap_5	14	14	14	14	14	14
tap_6	-7	-6	-7	-7	-7	-7
tap_7	-8	-8	-3	-4	-4	-4
tap_8	-5	-4	-6	-5	-5	-5
tap_9	0	0	-5	0	0	0
tap_10	12	12	-11	-12	6	6
tap_11	-7	-6	-3	-3	1	1
tap_12	7	7	4	4	4	4
tap_13	11	11	9	9	6	6
tap_14	-3	-3	5	4	2	2
tap_15	-3	-3	16	16	-7	-7
tap_16	11	11	-10	-11	14	14
tap_17	9	9	7	7	16	16
tap_18	5	5	4	3	-7	-7
tap_19	9	9	8	8	2	2
tap_20	-5	-6	1	1	-5	-5
tap_21	-2	-2	8	6	-14	-14
tap_22	9	9	3	2	-6	-6
tap_23	7	8	15	15	0	0
tap_24	-14	-14	-11	-12	-13	-13
tap_25	-2	-2	2	2	-14	-14
tap_26	5	5	-1	-1	-8	-8
tap_27	16	16	10	9	-5	-5
tap_28	-16	-16	-15	-16	-11	-11
tap_29	-10	-10	-11	-12	-16	-16
tap_30	-8	-9	-10	-10	-16	-16
tap_31	12	12	5	5	16	16
tap_32	2	2	2	2	2	2
tap_33	11	12	13	13	4	4
tap_34	5	4	4	4	-1	-1
tap_35	12	12	5	5	-16	-16
tap_36	2	2	8	8	1	1
tap_37	2	2	11	11	4	4
tap_38	-3	-3	-9	-9	2	2
tap_39	-1	-1	-1	-2	3	3
tap_40	16	16	9	7	16	16
tap_41	4	4	-4	-2	1	1
tap_42	-7	-6	-6	-7	-8	-8
tap_43	-3	-2	-4	-9	-6	-6
tap_44	-4	-3	-7	-10	-10	-10
tap_45	5	7	5	2	-4	-4
tap_46	-10	-9	-10	-11	12	12
tap_47	-5	-5	-3	-3	4	4
tap_48	-11	-10	-11	-14	-13	-13
tap_49	-2	-1	-5	-7	-8	-8
tap_50	-6	-5	-6	-6	-7	-7

Tabela 16 – Comparación de Variables Discretas (Parte 2: Taps 51-62 e Shunts)

Variável	Min. Custo		Min. Perdas		Min. Poluição	
	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS	PNLIM	MOTS
tap_51	3	3	4	4	3	3
tap_52	1	1	3	3	3	3
tap_53	-3	-3	-1	-2	-3	-3
tap_54	1	1	1	1	1	1
tap_55	16	16	11	15	15	15
tap_56	10	10	10	15	9	9
tap_57	10	10	10	16	6	6
tap_58	11	11	6	10	11	11
tap_59	7	7	9	10	9	9
tap_60	9	9	6	13	4	4
tap_61	6	6	10	15	5	5
tap_62	4	4	8	6	4	4
shunt_1	1	1	1	1	1	1
shunt_2	1	1	1	1	1	1
shunt_3	1	0	1	0	0	0
shunt_4	1	0	1	1	0	0
shunt_5	1	0	1	0	0	0
shunt_6	1	1	1	1	1	1
shunt_7	1	1	1	1	1	1
shunt_8	1	0	1	1	1	1
shunt_9	1	1	1	1	1	1
shunt_10	1	0	1	0	0	0
shunt_11	1	1	1	1	0	1
shunt_12	1	1	1	1	1	1
shunt_13	1	1	1	1	1	1
shunt_14	1	1	1	1	1	1

4.4.4 Análise das Métricas de Rendimento Global: Sistema IEEE 300 Barras

A Tabela 17 apresenta um comparativo macroscópico do desempenho operativo do sistema, confrontando as soluções obtidas pelo solver determinístico (PNLIM) e pela meta-heurística proposta (Pareto). A análise conjunta da Geração Total, Perdas e Suporte Reativo evidencia trade-offs críticos de eficiência energética.

4.4.4.1 A Ineficiência Sistêmica do Mínimo Custo Determinístico

A comparação mais reveladora ocorre no cenário de **Mínimo Custo**. O solver PNLIM convergiu para uma solução que exige uma Geração Ativa Total de 23.733,08 MW. Em contrapartida, a solução correspondente na Fronteira de Pareto demanda apenas 23.594,56 MW. Essa diferença substancial de $\approx 138,5$ MW de geração "excedente" pelo PNLIM é explicada pelas **Perdas Ativas Totais**:

- O despacho econômico do PNLIM resultou em perdas massivas de 487,58 MW. Isso indica que o solver priorizou o despacho de unidades geradoras de baixo custo marginal (provavelmente localizadas distantes dos centros de carga ou em áreas com restrição de transmissão), ignorando a penalidade física do transporte de energia.

- A solução de Pareto, embora busque o mínimo custo, encontrou uma configuração topológica com perdas significativamente menores (349,01 MW). Ao reduzir o desperdício na transmissão em $\approx 28\%$, o sistema precisa gerar menos energia bruta para atender à mesma demanda, demonstrando que a solução da meta-heurística é energeticamente mais eficiente e sustentável.

4.4.4.2 Estresse de Reativos e Segurança de Tensão

O impacto das perdas elevadas na solução PNLIM (Custo) influi diretamente no subsistema de potência reativa.

1. **Consumo de Reativos:** As altas correntes necessárias para suprir as perdas do PNLIM aumentam drasticamente o consumo de reativos nas linhas (I^2X). Consequentemente, a **Geração Reativa Total** disparou para 7.807,44 MVar no cenário de custo do PNLIM, um valor 20% superior aos 6.479,22 MVar requeridos pela solução de Pareto.
2. **Saturação da Tensão:** Esse estresse reativo força o sistema a operar nos limites de tensão. Observa-se que a Tensão Mínima em praticamente todos os cenários toca o limite inferior crítico de 0,94 p.u. (ou 0,946 p.u.), indicando que o sistema de 300 barras opera próximo de sua capacidade máxima de transferência. No entanto, a menor demanda de reativos das soluções de Pareto sugere uma maior margem de estabilidade de tensão (VSM) para contingências.

4.4.4.3 Divergência no Cenário de Poluição

No objetivo de **Mínima Poluição**, repete-se o padrão de eficiência. O PNLIM incorre em perdas ativas elevadas de 479,98 MW, enquanto a solução de Pareto reduz este desperdício para 336,16 MW. Isso sugere que o solver determinístico, ao tentar minimizar emissões, realizou um despacho "cego" à topologia, ativando geradores limpos (como gás ou nuclear) sem otimizar o fluxo de potência resultante. A meta-heurística, por sua vez, alinhou o objetivo ambiental com a eficiência da rede, provando que é possível operar um sistema "verde" sem sacrificar a eficiência do transporte de energia.

Em conclusão, enquanto o PNLIM é matematicamente rigoroso na busca de um objetivo isolado (frequentemente às custas da eficiência global), a abordagem multiobjetivo proposta entrega soluções que são sistemicamente superiores, economizando centenas de megawatts em geração e aliviando o estresse reativo da rede.

Tabela 17 – Comparação de Variáveis Contínuas: Frente de Pareto vs PNLIM

Métrica / MIN	Custo(PNLIM)	Perdas(PNLIM)	Poluição(PNLIM)	Custo(Pareto)	Perdas(Pareto)	Poluição (Pareto)
Tensão Mín(pu)	0,94	0,9466	0,94	0,9464	0,9401	0,9402
Tensão Máx(pu)	1,06	1,06	1,06	1,0592	1,0597	1,0595
Geração Ativa						
Total (MW)	23733,083	23488,4867	22809,0227	23594,562	23546,0033	23581,7211
Geração Reativa						
Total (MVar)	7807,4433	6317,959	7136,3574	6479,2246	6545,3998	6587,9215
Perdas Ativa						
Total (MW)	487,5754	242,9798	479,9799	349,0063	300,403	336,1577
Perdas Reativa						
Total (MVar)	-243,8237	-2076,4894	-657,6852	-1282,2435	-1590,6407	-1335,9394

Nota: Valores de tensão em pu (por unidade), geração em MW/MVar. Dados referentes ao sistema de 300 barras.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo finaliza a presente dissertação, apresentando uma síntese dos resultados alcançados e das contribuições geradas. Inicialmente, são discutidas as conclusões obtidas em relação aos objetivos propostos, reforçando a validade e a eficácia da metodologia desenvolvida. Em seguida, são delineadas diversas linhas de pesquisa promissoras que podem ser exploradas como uma extensão natural deste trabalho.

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta dissertação foi desenvolver e validar uma metodologia de otimização multiobjetivo híbrida, fundamentada na meta-heurística Busca Tabu e em programação não linear, para a resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo com controle de variáveis discretas, [1]. Com base nos resultados apresentados no Capítulo 4, pode-se afirmar que este objetivo foi plenamente alcançado. A abordagem proposta, denominada MOTS-Knitro, demonstrou ser uma ferramenta robusta e eficaz para navegar no complexo espaço de busca do problema, equilibrando os objetivos conflitantes de custo de geração, perdas de potência ativa e emissão de poluentes.

Os objetivos específicos foram sistematicamente atendidos. O problema de FPO multiobjetivo foi modelado matematicamente, e a metodologia híbrida foi implementada com sucesso, integrando a Busca Tabu para a otimização das variáveis discretas (taps e shunts) com o solver de alta performance Knitro para o tratamento das variáveis contínuas. A aplicação da metodologia aos sistemas-teste NESTA, notadamente o de 30 barras, permitiu a geração de frentes de Pareto bem distribuídas, compostas por centenas de soluções não dominadas.

As simulações no sistema IEEE 30 barras evidenciaram uma limitação crítica dos métodos de otimização convencionais baseados puramente em custo. Observou-se que o solver determinístico (PNLIM), ao minimizar estritamente o custo financeiro, convergiu para uma solução que exigiu uma geração total de 300,29 MW, contra apenas 296,29 MW da solução proposta (MOTS). Essa diferença de 4,0 MW demonstra que o solver exato priorizou o despacho de unidades baratas (carvão na Barra 1) sem considerar adequadamente o aumento das perdas de transmissão (16,88 MW) decorrente do transporte dessa energia. Em contraste, a meta-heurística encontrou um ponto de operação "eco-eficiente", onde o despacho foi equilibrado entre as unidades a gás (Barras 2 e 30) e carvão, resultando em menores perdas e menor estresse de reativos, provando que a eficiência técnica pode coexistir com a competitividade econômica.

—

A análise das soluções representativas do frente de Pareto quantificou os custos

inerentes a cada filosofia operacional. Demonstrou-se, por exemplo, no sistema IEEE 300 barras (NESTA) — caracterizado por 62 transformadores com *taps* discretos — o algoritmo MOTS superou o desempenho do solver comercial. A meta-heurística obteve uma redução de 0,69% nas perdas técnicas e uma expressiva diminuição de 15,33% nas emissões poluentes em comparação ao PNLIM. Isso confirma que, em espaços de busca altamente multimodais e discretos, a manipulação direta das variáveis inteiras (sem relaxamento contínuo) permite encontrar configurações topológicas de tensão superiores, que solvers baseados em gradiente falham em identificar.

Ao superar as limitações de busca energética dos solvers clássicos (visto no caso 30) e as barreiras combinatórias de grandes redes (visto no caso 300), a metodologia proposta oferece um caminho robusto para a operação de sistemas elétricos sustentáveis e eficientes.

Em resumo, a metodologia MOTS-Knitro provou ser uma ferramenta poderosa e de grande valor estratégico. A sua capacidade de decompor o problema, utilizando a Busca Tabu para explorar o espaço combinatório das variáveis discretas e o Knitro para refinar as variáveis contínuas, mostrou-se uma abordagem sinérgica e computacionalmente viável para um problema de otimização notoriamente complexo.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação abre diversas alternativas para investigações futuras, visando tanto o aprimoramento da metodologia quanto a sua aplicação a problemas ainda mais complexos. As seguintes direções são propostas:

- **Inclusão de Centrais Hidrelétricas:** Propõe-se a inserção de centrais hidrelétricas em barras estratégicas dos sistemas de teste. A geração hidrelétrica, com seu baixo custo operacional e nula emissão de poluentes, mas sujeita a restrições hídricas, introduzirá um novo nível de conflito entre os objetivos, tornando o problema de otimização mais desafiador e representativo de sistemas de base mista.
- **Aprimoramento da Diversidade de Soluções:** Buscar estratégias para aumentar a diversidade das soluções encontradas no frente de Pareto, especialmente para sistemas de grande porte como o de 118 barras. Isso pode envolver mecanismos de diversificação mais sofisticados na Busca Tabu e a exploração de novas fases de busca, com o objetivo final de aplicar a metodologia ao sistema de 300 barras.
- **Paralelização da Avaliação e das Fases de Busca:** Uma vez que a avaliação de cada vizinho (que envolve a resolução de um PNL) é a etapa computacionalmente mais intensiva, propõe-se explorar a paralelização deste processo. Múltiplos vizinhos poderiam ser avaliados simultaneamente em diferentes núcleos de processamento. Adicionalmente, a própria estrutura de busca em fases poderia ser paralelizada,

com cada fase sendo executada em paralelo para acelerar a obtenção do frente de Pareto consolidado.

- **Gestão Inteligente da Memória e Diversificação:** Desenvolver mecanismos para uma gestão mais inteligente das soluções armazenadas, particularmente na `CandidateList` e no `ParetoFront`. Uma linha de pesquisa interessante seria monitorar a evolução das variáveis discretas ao longo das iterações para detectar se alguma delas converge prematuramente (a mínimo local) e, caso isso ocorra, aplicar perturbações direcionadas para forçar a exploração de outras configurações.
- **Análise Comparativa com Outras Meta-heurísticas:** Realizar uma análise comparativa robusta da metodologia MOTS-Knitro com outras meta-heurísticas multiobjetivo consagradas na literatura, como o NSGA-II e outros algoritmos evolutivos (MOEAs). A comparação deve focar em métricas de desempenho como a convergência para o frente de Pareto verdadeiro, a diversidade das soluções encontradas e a qualidade geral do conjunto de soluções de compromisso.

REFERÊNCIAS

- ABIDO, M. Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 79, n. 7, p. 1105–1113, 2009.
- ABIDO, M. A. Optimal power flow using particle swarm optimization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 24, n. 7, p. 563–571, 2002.
- ARAUJO, E. X. S. **Fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos de potência através de um algoritmo genético multiobjetivo**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2018.
- AVVARI, R. K.; DM, V. K. Multi-objective optimal power flow including wind and solar generation uncertainty using new hybrid evolutionary algorithm with efficient constraint handling method. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 2022, n. 1, p. 7091937, 2022.
- BAKIRTZIS, A. G.; BISKAS, P. N.; ZOUMAS, C. E.; PETRIDIS, V. Optimal power flow by enhanced genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, Piscataway, NJ, v. 17, n. 2, p. 229–236, May 2002. ISSN 0885-8950.
- BAYKASOGLU, A.; OWEN, S.; GINDY, N. A taboo search based approach to find the pareto optimal set in multiple objective optimization. **Engineering Optimization**, Taylor & Francis, v. 31, n. 6, p. 731–748, 1999.
- BEACH, B.; BURLACU, R.; BÄRMANN, A.; HAGER, L.; HILDEBRAND, R. Enhancements of discretization approaches for non-convex mixed-integer quadratically constrained quadratic programming: Part i. **Computational Optimization and Applications**, Springer, v. 87, n. 3, p. 835–891, 2024.
- COFFRIN, C.; GORDON, D.; SCOTT, P. Nesta, the nicta energy system test case archive. **arXiv preprint arXiv:1411.0359**, 2014.
- COFFRIN, C.; HIJAZI, H. L.; HENTENRYCK, P. V. The qc relaxation: A theoretical and computational study on optimal power flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 31, n. 4, p. 3008–3018, 2015.
- DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE transactions on evolutionary computation**, Ieee, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.
- GONG, D.; ZHANG, Y.; QI, C. Environmental/economic power dispatch using a hybrid multi-objective optimization algorithm. **Int. J. Electr. Power Energy Syst.**, v. 32, n. 6, p. 607–614, 2010.
- JAIN, A.; LALWANI, S.; LALWANI, M. A comparative analysis of mopso, nsga-ii, spea2 and pesa2 for multi-objective optimal power flow. *In: 2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

LAI, L. L.; MA, J. T.; YOKOYAMA, R.; ZHAO, M. Improved genetic algorithms for optimal power flow under both normal and contingent operation states. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, London, v. 19, n. 5, p. 287–292, 1997. ISSN 0142-0615.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

ORIONDO, M.; ALONSO, M. **Resolução do problema de fluxo de potência ótimo pela meta-heurística algoritmo dos fogos de artifício de busca dinâmica com mutação de covariância**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.

TIAN, Y.; SHI, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, H.; ZHANG, X. Solving optimal power flow problems via a constrained many-objective co-evolutionary algorithm. **Frontiers in Energy Research**, Frontiers Media SA, v. 11, p. 1293193, 2023.

YAMAMOTO, R. Y.; PINTO, T.; ROMERO, R.; MACEDO, L. H. Specialized tabu search algorithm applied to the reconfiguration of radial distribution systems. **Int. J. Electr. Power Energy Syst.**, v. 162, p. 110258, 2024.

Apêndices

Tabela 18 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Mínimo Custo)

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0600	0,0000	147,8009	-19,9988	0,0000
2	1,0528	-2,7462	99,9999	21,8163	0,0000
3	1,0400	-5,1319	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0348	-6,2866	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0219	-10,8206	0,0000	31,8966	0,0000
6	1,0330	-7,4423	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0209	-9,3382	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0328	-8,0111	0,0000	35,1098	0,0000
9	0,9898	-10,3081	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,9970	-11,7209	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0379	-10,3081	0,0000	23,9993	0,0000
12	1,0079	-11,4915	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0402	-11,4915	0,0000	23,9896	0,0000
14	0,9925	-12,2657	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,9893	-12,1640	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,9957	-11,8787	0,0000	0,0000	0,0000
17	0,9912	-12,0067	0,0000	0,0000	0,0000
18	0,9793	-12,7728	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,9766	-12,9237	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,9809	-12,6855	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,9846	-11,9219	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,9854	-11,8144	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,9809	-11,8347	0,0000	0,0000	0,0000
24	0,9784	-11,0042	0,0000	0,0000	1,0000
25	0,9909	-7,1513	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,9727	-7,5941	0,0000	0,0000	0,0000
27	1,0084	-4,5368	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0336	-7,2504	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0265	-1,2294	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0600	2,6652	48,4870	0,6746	0,0000

Tabela 19 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Mínimo Custo)

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	88,3221	-86,9558	-16,9326	15,1321	1,3663	-1,8005	1,0000	0
1	3	59,4787	-58,0553	-3,0662	3,7699	1,4234	0,7036	1,0000	0
2	4	38,5496	-37,7852	-2,5933	0,9130	0,7644	-1,6803	1,0000	0
3	4	55,6553	-55,2748	-4,9699	5,1583	0,3805	0,1885	1,0000	0
2	5	77,0255	-74,4938	1,1486	4,9888	2,5317	6,1374	1,0000	0
2	6	49,6807	-48,3836	-4,5710	4,4387	1,2971	-0,1323	1,0000	0
4	6	49,4236	-49,1427	-9,7065	9,7217	0,2809	0,0152	1,0000	0
5	7	-19,7062	19,9127	7,9078	-9,5151	0,2065	-1,6073	1,0000	0
6	7	43,1802	-42,7127	1,0276	-1,3849	0,4674	-0,3573	1,0000	0
6	8	23,5154	-23,4492	-6,4380	5,7095	0,0662	-0,7286	1,0000	0
6	9	22,1195	-22,1195	-26,2941	29,1352	0,0000	2,8411	0,9000	-16
6	10	14,5115	-14,5115	17,6398	-15,1741	0,0000	2,4657	1,0500	8
9	11	0,0000	0,0000	-22,8871	23,9993	0,0000	1,1122	1,0000	0
9	10	22,1195	-22,1195	-6,2481	6,8413	0,0000	0,5932	1,0000	0
4	12	36,0364	-36,0364	2,0351	1,2412	0,0000	3,2763	0,9750	-4
12	13	0,0000	0,0000	-23,2450	23,9896	0,0000	0,7446	1,0000	0
12	14	6,6728	-6,6087	2,8909	-2,7577	0,0641	0,1332	1,0000	0
12	15	12,9717	-12,8216	7,8725	-7,5769	0,1500	0,2955	1,0000	0
12	16	5,1919	-5,1539	3,7404	-3,6604	0,0381	0,0801	1,0000	0
14	15	0,4087	-0,4053	1,1577	-1,1547	0,0034	0,0031	1,0000	0
16	17	1,6539	-1,6506	1,8604	-1,8483	0,0033	0,0120	1,0000	0
15	18	5,6019	-5,5639	1,8152	-1,7378	0,0380	0,0774	1,0000	0
18	19	2,3639	-2,3597	0,8378	-0,8293	0,0042	0,0085	1,0000	0
19	20	-7,1403	7,1609	-2,5707	2,6118	0,0205	0,0411	1,0000	0
10	20	9,4568	-9,3609	3,5259	-3,3118	0,0959	0,2142	1,0000	0
10	17	7,3724	-7,3494	4,0115	-3,9517	0,0230	0,0599	1,0000	0
10	21	10,0969	-10,0122	11,8367	-11,6543	0,0847	0,1824	1,0000	0
10	22	3,9049	-3,8687	5,8460	-5,7715	0,0361	0,0745	1,0000	0
21	22	-7,4878	7,4945	0,4543	-0,4406	0,0067	0,0137	1,0000	0
15	23	-0,5749	0,5952	4,4164	-4,3755	0,0203	0,0409	1,0000	0
22	24	-3,6258	3,6871	6,2121	-6,1167	0,0613	0,0954	1,0000	0
23	24	-3,7952	3,8255	2,7755	-2,7134	0,0303	0,0620	1,0000	0
24	25	-16,2126	16,8070	6,2467	-5,2087	0,5944	1,0380	1,0000	0
25	26	3,5472	-3,5000	2,3704	-2,3000	0,0472	0,0704	1,0000	0
25	27	-20,3541	20,8243	2,8383	-1,9406	0,4701	0,8977	1,0000	0
28	27	-12,3837	12,3837	5,1568	-4,4814	0,0000	0,6754	0,9938	-1
27	29	-12,8716	13,2473	2,8487	-2,1389	0,3756	0,7098	1,0000	0
27	30	-20,3363	21,6788	3,5732	-1,0464	1,3424	2,5268	1,0000	0
29	30	-15,6473	16,2082	1,2389	-0,1790	0,5610	1,0600	1,0000	0
8	28	-6,5508	6,5781	-0,5997	-3,8834	0,0273	-4,4831	1,0000	0
6	28	-5,8002	5,8056	-0,0956	-1,2734	0,0054	-1,3690	1,0000	0

Tabela 20 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Minimo Custo)

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	147,307009
Perdas Ativas (MW)	16,8603
Poluição (ton/h)	0,9038

Tabela 21 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pela PNLIM (caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM)

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0600	0,0000	205,9504	-0,1026	0,0000
2	1,0364	-4,1177	35,1358	5,9080	0,0000
3	1,0321	-5,8246	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0252	-7,1508	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0068	-12,1028	0,0000	30,2577	0,0000
6	1,0239	-8,3716	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0093	-10,4221	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0255	-8,9457	0,0000	40,0000	0,0000
9	1,0009	-11,1079	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,9881	-12,5415	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0485	-11,1079	0,0000	24,0000	0,0000
12	1,0009	-12,3443	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0335	-12,3443	0,0000	24,0000	0,0000
14	0,9848	-13,1033	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,9812	-12,9598	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,9879	-12,7184	0,0000	0,0000	0,0000
17	0,9826	-12,8388	0,0000	0,0000	0,0000
18	0,9708	-13,5905	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,9679	-13,7510	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,9721	-13,5122	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,9749	-12,6866	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,9755	-12,5575	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,9710	-12,4856	0,0000	0,0000	0,0000
24	0,9664	-11,4489	0,0000	0,0000	1,0000
25	0,9739	-6,7554	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,9554	-7,2141	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,9893	-3,6110	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0258	-8,0024	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0151	0,7594	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0600	5,6774	59,1996	2,2162	0,0000

Tabela 22 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo PNLIM KNITRO (Caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	137,9990	-134,7438	-0,5295	4,4764	3,2552	3,9469	1,0000	0
1	3	67,9515	-66,0910	0,4269	1,9075	1,8605	2,3344	1,0000	0
2	4	31,4412	-30,9124	-4,7926	2,4940	0,5288	-2,2986	1,0000	0
3	4	63,6910	-63,1875	-3,1075	3,6644	0,5035	0,5569	1,0000	0
2	5	73,8026	-71,4050	0,7258	4,9836	2,3976	5,7094	1,0000	0
2	6	42,9358	-41,9240	-7,2016	6,3028	1,0118	-0,8988	1,0000	0
4	6	50,8950	-50,5883	-11,3586	11,4807	0,3067	0,1222	1,0000	0
5	7	-22,7950	23,0550	6,2741	-7,6913	0,2600	-1,4172	1,0000	0
6	7	46,4076	-45,8550	3,1489	-3,2087	0,5526	-0,0598	1,0000	0
6	8	22,1775	-22,1096	-10,5380	9,8306	0,0679	-0,7075	1,0000	0
6	9	22,4937	-22,4937	-9,7054	11,0075	0,0000	1,3021	0,9563	-7
6	10	12,7361	-12,7361	0,0051	0,9234	0,0000	0,9285	0,9625	-6
9	11	0,0000	0,0000	-22,9102	24,0000	0,0000	1,0898	1,0000	0
9	10	22,4937	-22,4937	11,9027	-11,1916	0,0000	0,7111	1,0000	0
4	12	35,6049	-35,6049	3,6002	-0,3606	0,0000	3,2395	0,9812	-3
12	13	0,0000	0,0000	-23,2450	24,0000	0,0000	0,7550	1,0000	0
12	14	6,6188	-6,5528	3,1508	-3,0136	0,0660	0,1373	1,0000	0
12	15	12,5746	-12,4186	8,8305	-8,5232	0,1560	0,3073	1,0000	0
12	16	5,2114	-5,1698	4,1243	-4,0367	0,0417	0,0876	1,0000	0
14	15	0,3528	-0,3480	1,4136	-1,4092	0,0048	0,0044	1,0000	0
16	17	1,6698	-1,6656	2,2367	-2,2214	0,0042	0,0154	1,0000	0
15	18	5,7290	-5,6884	1,8949	-1,8122	0,0406	0,0826	1,0000	0
18	19	2,4884	-2,4836	0,9122	-0,9026	0,0048	0,0096	1,0000	0
19	20	-7,0164	7,0365	-2,4974	2,5377	0,0201	0,0403	1,0000	0
10	20	9,3314	-9,2365	3,4495	-3,2377	0,0949	0,2119	1,0000	0
10	17	7,3567	-7,3344	3,6369	-3,5786	0,0223	0,0583	1,0000	0
10	21	9,3319	-9,2400	13,0728	-12,8749	0,0919	0,1979	1,0000	0
10	22	3,4098	-3,3681	6,6605	-6,5746	0,0417	0,0860	1,0000	0
21	22	-8,2600	8,2687	1,6749	-1,6573	0,0087	0,0176	1,0000	0
15	23	-1,1624	1,1957	5,5375	-5,4703	0,0333	0,0672	1,0000	0
22	24	-4,9006	5,0115	8,2319	-8,0592	0,1109	0,1726	1,0000	0
23	24	-4,3957	4,4437	3,8703	-3,7721	0,0480	0,0982	1,0000	0
24	25	-18,1552	18,9894	9,1470	-7,6901	0,8342	1,4569	1,0000	0
25	26	3,5489	-3,5000	2,3730	-2,3000	0,0489	0,0730	1,0000	0
25	27	-22,5383	23,1563	5,3171	-4,1372	0,6180	1,1800	1,0000	0
28	27	-19,2549	19,2549	5,1410	-3,5888	0,0000	1,5523	0,9812	-3
27	29	-16,6458	17,2935	3,3641	-2,1403	0,6477	1,2238	1,0000	0
27	30	-25,7653	27,9996	4,3618	-0,1565	2,2342	4,2054	1,0000	0
29	30	-19,6935	20,6000	1,2403	0,4726	0,9065	1,7129	1,0000	0
8	28	-7,8904	7,9316	0,1694	-4,5426	0,0412	-4,3731	1,0000	0
6	28	-11,3027	11,3233	-0,6940	-0,5985	0,0206	-1,2925	1,0000	0

Tabela 23 – Resumo dos resultados pelo algoritmo PNLIM KNITRO (Caso 30 barras - Mínimo Custo PNLIM).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	147,262952
Perdas Ativas (MW)	16,8858
Emissão de Gases (t/h)	0,904802

Tabela 24 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 30 barras - Perdas Mínimas).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0600	0,0000	148,2743	-19,9412	0,0000
2	1,0531	-2,7640	99,9999	26,4062	0,0000
3	1,0387	-5,1267	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0332	-6,2809	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0206	-10,8409	0,0000	31,9752	0,0000
6	1,0301	-7,4292	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0186	-9,3409	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0305	-8,0113	0,0000	37,4549	0,0000
9	1,0292	-10,1344	0,0000	0,0000	0,0000
10	1,0235	-11,5469	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0600	-10,1344	0,0000	15,7162	0,0000
12	1,0291	-11,2555	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0600	-11,2555	0,0000	23,3910	0,0000
14	1,0144	-12,0008	0,0000	0,0000	0,0000
15	1,0116	-11,9156	0,0000	0,0000	0,0000
16	1,0193	-11,6664	0,0000	0,0000	0,0000
17	1,0169	-11,8054	0,0000	0,0000	0,0000
18	1,0033	-12,5148	0,0000	0,0000	0,0000
19	1,0017	-12,6693	0,0000	0,0000	0,0000
20	1,0063	-12,4489	0,0000	0,0000	0,0000
21	1,0106	-11,7365	0,0000	0,0000	0,0000
22	1,0111	-11,6338	0,0000	0,0000	0,0000
23	1,0034	-11,6113	0,0000	0,0000	0,0000
24	1,0010	-10,8319	0,0000	0,0000	1,0000
25	1,0067	-7,0856	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,9888	-7,5144	0,0000	0,0000	0,0000
27	1,0198	-4,5254	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0303	-7,2224	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0323	-1,1758	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0600	2,7992	47,9599	-2,3219	0,0000

Tabela 25 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 30 barras - Perdas Mínimas).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	88,7126	-87,3308	-17,6622	15,9058	1,3817	-1,7563	1,0000	0
1	3	59,5617	-58,1346	-2,2790	3,0017	1,4271	0,7227	1,0000	0
2	4	38,6152	-37,8486	-1,4694	-0,1997	0,7665	-1,6692	1,0000	0
3	4	55,7346	-55,3528	-4,2017	4,3962	0,3817	0,1945	1,0000	0
2	5	77,1744	-74,6319	1,9653	4,2214	2,5425	6,1868	1,0000	0
2	6	49,8412	-48,5397	-2,6956	2,5868	1,3015	-0,1088	1,0000	0
4	6	49,8104	-49,5299	-6,4276	6,4456	0,2805	0,0180	1,0000	0
5	7	-19,5681	19,7798	8,7537	-10,3408	0,2117	-1,5870	1,0000	0
6	7	43,0464	-42,5798	0,2083	-0,5592	0,4666	-0,3509	1,0000	0
6	8	23,4810	-23,4119	-8,1707	7,4570	0,0690	-0,7137	1,0000	0
6	9	23,6035	-23,6035	-8,3741	9,6512	0,0000	1,2770	0,9812	-3
6	10	13,9556	-13,9556	6,6486	-5,4568	0,0000	1,1918	1,0250	4
9	11	0,0000	0,0000	-15,2589	15,7162	0,0000	0,4572	1,0000	0
9	10	23,6035	-23,6035	5,6078	-4,9965	0,0000	0,6113	1,0000	0
4	12	35,7911	-35,7911	0,6312	2,4804	0,0000	3,1115	0,9938	-1
12	13	0,0000	0,0000	-22,7093	23,3910	0,0000	0,6817	1,0000	0
12	14	6,6270	-6,5672	2,7463	-2,6220	0,0598	0,1243	1,0000	0
12	15	12,9025	-12,7651	7,2987	-7,0281	0,1374	0,2706	1,0000	0
12	16	5,0616	-5,0323	2,6839	-2,6223	0,0293	0,0616	1,0000	0
14	15	0,3672	-0,3647	1,0220	-1,0197	0,0025	0,0023	1,0000	0
16	17	1,5323	-1,5307	0,8223	-0,8167	0,0015	0,0056	1,0000	0
15	18	5,4366	-5,4042	1,1799	-1,1138	0,0325	0,0661	1,0000	0
18	19	2,2042	-2,2011	0,2138	-0,2075	0,0031	0,0063	1,0000	0
19	20	-7,2989	7,3204	-3,1925	3,2355	0,0215	0,0430	1,0000	0
10	20	9,6185	-9,5204	4,1545	-3,9355	0,0981	0,2190	1,0000	0
10	17	7,4945	-7,4693	5,0491	-4,9833	0,0253	0,0659	1,0000	0
10	21	10,4830	-10,3927	12,7268	-12,5324	0,0903	0,1944	1,0000	0
10	22	4,1631	-4,1224	6,4251	-6,3412	0,0407	0,0839	1,0000	0
21	22	-7,1073	7,1132	1,3324	-1,3203	0,0059	0,0121	1,0000	0
15	23	-0,5068	0,5257	4,3678	-4,3297	0,0189	0,0382	1,0000	0
22	24	-2,9909	3,0670	7,6615	-7,5431	0,0761	0,1184	1,0000	0
23	24	-3,7257	3,7537	2,7297	-2,6725	0,0280	0,0572	1,0000	0
24	25	-15,5206	16,0890	7,8245	-6,8320	0,5683	0,9925	1,0000	0
25	26	3,5456	-3,5000	2,3682	-2,3000	0,0456	0,0682	1,0000	0
25	27	-19,6346	20,0719	4,4638	-3,6288	0,4373	0,8350	1,0000	0
28	27	-12,6401	12,6401	6,4645	-5,7310	0,0000	0,7335	1,0125	2
27	29	-12,6652	13,0390	4,0537	-3,3475	0,3738	0,7062	1,0000	0
27	30	-20,0467	21,3708	5,3061	-2,8139	1,3241	2,4923	1,0000	0
29	30	-15,4390	15,9891	2,4475	-1,4081	0,5501	1,0394	1,0000	0
8	28	-6,5881	6,6172	-0,0022	-4,4507	0,0291	-4,4529	1,0000	0
6	28	-6,0168	6,0229	0,6555	-2,0137	0,0061	-1,3582	1,0000	0

Tabela 26 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Perdas Mínimas).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	200,094242
Perdas Ativas (MW)	11,9041
Poluição (ton/h)	0,5828

Tabela 27 – Resultados de tensão e ângulo nas barras (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PN-LIM).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0600	0,0000	166,0981	-20,0000	0,0000
2	1,0515	-3,1086	100,0000	25,9867	0,0000
3	1,0367	-5,6866	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0308	-6,9765	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0191	-11,4686	0,0000	32,2983	0,0000
6	1,0281	-8,3094	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0168	-10,1202	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0273	-8,9328	0,0000	33,5527	0,0000
9	1,0172	-11,2289	0,0000	0,0000	0,0000
10	1,0272	-12,6674	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0600	-11,2289	0,0000	21,7933	0,0000
12	1,0321	-12,2130	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0600	-12,2130	0,0000	21,1389	0,0000
14	1,0180	-13,0169	0,0000	0,0000	0,0000
15	1,0153	-13,0076	0,0000	0,0000	0,0000
16	1,0225	-12,6935	0,0000	0,0000	0,0000
17	1,0206	-12,8947	0,0000	0,0000	0,0000
18	1,0071	-13,6114	0,0000	0,0000	0,0000
19	1,0055	-13,7703	0,0000	0,0000	0,0000
20	1,0101	-13,5544	0,0000	0,0000	0,0000
21	1,0152	-12,9555	0,0000	0,0000	0,0000
22	1,0159	-12,8862	0,0000	0,0000	0,0000
23	1,0086	-12,9680	0,0000	0,0000	0,0000
24	1,0081	-12,5494	0,0000	0,0000	1,0000
25	1,0185	-10,1129	0,0000	0,0000	0,0000
26	1,0008	-10,5316	0,0000	0,0000	0,0000
27	1,0336	-8,3619	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0284	-8,4486	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0413	-6,9658	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0600	-5,0271	29,2034	1,5089	0,0000

Tabela 28 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PNLIM).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	100,1382	-98,3867	-17,8786	17,2388	1,7515	-0,6398	1,0000	0
1	3	65,9599	-64,2097	-2,1214	4,0335	1,7502	1,9121	1,0000	0
2	4	42,1268	-41,2119	-1,9369	0,7353	0,9149	-1,2016	1,0000	0
3	4	61,8097	-61,3376	-5,2335	5,6910	0,4720	0,4576	1,0000	0
2	5	79,5198	-76,8135	1,6955	5,1931	2,7063	6,8886	1,0000	0
2	6	55,0401	-53,4468	-3,7108	4,5016	1,5933	0,7908	1,0000	0
4	6	57,0197	-56,6470	-9,2648	9,6078	0,3727	0,3429	1,0000	0
5	7	-17,3865	17,5576	8,1052	-9,7876	0,1711	-1,6823	1,0000	0
6	7	40,7782	-40,3576	0,6272	-1,1124	0,4207	-0,4852	1,0000	0
6	8	25,8595	-25,7805	-5,7175	5,0437	0,0790	-0,6738	1,0000	0
6	9	23,8476	-23,8476	-26,9368	29,8739	0,0000	2,9371	0,9313	-11
6	10	15,7865	-15,7865	20,2599	-17,3591	0,0000	2,9008	1,0938	15
9	11	0,0000	0,0000	-20,9141	21,7933	0,0000	0,8792	1,0000	0
9	10	23,8476	-23,8476	-8,9598	9,6497	0,0000	0,6899	1,0000	0
4	12	37,9298	-37,9298	1,2385	2,2311	0,0000	3,4696	1,0000	0
12	13	0,0000	0,0000	-20,5821	21,1389	0,0000	0,5568	1,0000	0
12	14	6,9112	-6,8493	2,3912	-2,2627	0,0618	0,1285	1,0000	0
12	15	14,2534	-14,1038	6,1236	-5,8290	0,1496	0,2946	1,0000	0
12	16	5,5653	-5,5330	2,3363	-2,2683	0,0323	0,0680	1,0000	0
14	15	0,6493	-0,6475	0,6627	-0,6611	0,0018	0,0017	1,0000	0
16	17	2,0330	-2,0308	0,4683	-0,4603	0,0022	0,0080	1,0000	0
15	18	5,4888	-5,4561	1,1350	-1,0684	0,0327	0,0666	1,0000	0
18	19	2,2561	-2,2529	0,1684	-0,1619	0,0032	0,0065	1,0000	0
19	20	-7,2471	7,2683	-3,2381	3,2805	0,0212	0,0424	1,0000	0
10	20	9,5651	-9,4683	4,1966	-3,9805	0,0968	0,2161	1,0000	0
10	17	6,9932	-6,9692	5,4022	-5,3397	0,0240	0,0625	1,0000	0
10	21	12,0782	-11,9907	10,9265	-10,7382	0,0875	0,1883	1,0000	0
10	22	5,1977	-5,1602	5,2336	-5,1563	0,0375	0,0773	1,0000	0
21	22	-5,5093	5,5128	-0,4618	0,4688	0,0034	0,0070	1,0000	0
15	23	1,0625	-1,0535	2,8551	-2,8369	0,0090	0,0182	1,0000	0
22	24	-0,3525	0,3772	4,6876	-4,6492	0,0246	0,0383	1,0000	0
23	24	-2,1465	2,1545	1,2369	-1,2206	0,0080	0,0163	1,0000	0
24	25	-11,2317	11,4889	3,5397	-3,0905	0,2572	0,4492	1,0000	0
25	26	3,5446	-3,5000	2,3665	-2,3000	0,0446	0,0665	1,0000	0
25	27	-15,0334	15,2721	0,7240	-0,2682	0,2387	0,4558	1,0000	0
28	27	-0,4115	0,4115	2,0183	-2,0028	0,0000	0,0155	1,0125	2
27	29	-5,6883	5,7577	1,1814	-1,0502	0,0694	0,1312	1,0000	0
27	30	-9,9954	10,2984	1,0895	-0,5192	0,3030	0,5703	1,0000	0
29	30	-8,1577	8,3050	0,1502	0,1281	0,1473	0,2783	1,0000	0
8	28	-4,2195	4,2306	-1,4910	-2,9958	0,0111	-4,4867	1,0000	0
6	28	3,8218	-3,8191	-2,3421	0,9775	0,0028	-1,3646	1,0000	0

Tabela 29 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Perdas Mínimas PNLIM).

Parâmetro	Valor
Função Objetivo - Perdas Totais (MW)	11,9015
Custo de Geração (US\$/h)	200,116477
Emissão de Gases (t/h)	0,583101

Tabela 30 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (caso 30 barras - Mín Poluição)

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0572	0,0000	161,3912	-13,2101	0,0000
2	1,0464	-3,0400	92,7824	26,0696	0,0000
3	1,0313	-5,4039	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0248	-6,6271	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0114	-11,2767	0,0000	30,9350	0,0000
6	1,0210	-7,8692	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0094	-9,7882	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0198	-8,4596	0,0000	32,9711	0,0000
9	0,9947	-10,8465	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,9749	-12,4537	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0333	-10,8465	0,0000	19,1738	0,0000
12	0,9789	-12,1053	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0072	-12,1053	0,0000	20,3637	0,0000
14	0,9643	-12,9448	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,9620	-12,8847	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,9694	-12,5745	0,0000	0,0000	0,0000
17	0,9677	-12,7342	0,0000	0,0000	0,0000
18	0,9534	-13,5389	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,9518	-13,7049	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,9567	-13,4581	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,9626	-12,7006	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,9634	-12,6001	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,9562	-12,6470	0,0000	0,0000	0,0000
24	0,9574	-11,9222	0,0000	0,0000	1,0000
25	0,9767	-8,4374	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,9582	-8,8934	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,9983	-6,0530	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0205	-7,7857	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0131	-3,2945	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0420	0,0641	42,0574	0,8089	0,0000

Tabela 31 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS.(caso 30 barras - Mín Poluição)

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	98,5953	-96,9072	-13,2522	12,4659	1,6880	-0,7863	1,0000	0
1	3	62,7959	-61,1991	0,0421	1,3438	1,5968	1,3859	1,0000	0
2	4	39,0823	-38,2862	-0,6279	-0,8933	0,7961	-1,5212	1,0000	0
3	4	58,7991	-58,3696	-2,5438	2,8894	0,4296	0,3456	1,0000	0
2	5	77,7650	-75,1452	3,1984	3,3817	2,6198	6,5800	1,0000	0
2	6	51,1424	-49,7545	-1,6667	1,8812	1,3879	0,2145	1,0000	0
4	6	53,2799	-52,9551	-5,7124	5,9005	0,3248	0,1881	1,0000	0
5	7	-19,0548	19,2595	8,5533	-10,1197	0,2047	-1,5663	1,0000	0
6	7	42,5231	-42,0595	0,4520	-0,7803	0,4636	-0,3283	1,0000	0
6	8	24,4243	-24,3538	-4,3969	3,7064	0,0704	-0,6905	1,0000	0
6	9	24,7256	-24,7256	1,0317	0,2538	0,0000	1,2854	0,9750	-4
6	10	13,1469	-13,1469	-5,6942	6,9912	0,0000	1,2970	0,9187	-13
9	11	0,0000	0,0000	-18,4575	19,1738	0,0000	0,7162	1,0000	0
9	10	24,7256	-24,7256	18,2038	-17,1556	0,0000	1,0482	1,0000	0
4	12	35,7759	-35,7759	2,1163	1,3074	0,0000	3,4237	0,9563	-7
12	13	0,0000	0,0000	-19,7914	20,3637	0,0000	0,5722	1,0000	0
12	14	6,5934	-6,5297	2,4708	-2,3384	0,0637	0,1324	1,0000	0
12	15	12,9680	-12,8253	6,1934	-5,9124	0,1427	0,2810	1,0000	0
12	16	5,0145	-4,9844	2,3199	-2,2566	0,0301	0,0633	1,0000	0
14	15	0,3297	-0,3282	0,7384	-0,7370	0,0016	0,0014	1,0000	0
16	17	1,4844	-1,4830	0,4566	-0,4517	0,0013	0,0049	1,0000	0
15	18	5,3634	-5,3285	1,1610	-1,0899	0,0349	0,0711	1,0000	0
18	19	2,1285	-2,1253	0,1899	-0,1834	0,0032	0,0065	1,0000	0
19	20	-7,3747	7,3990	-3,2166	3,2652	0,0243	0,0486	1,0000	0
10	20	9,7093	-9,5990	4,2115	-3,9652	0,1103	0,2463	1,0000	0
10	17	7,5464	-7,5170	5,4251	-5,3483	0,0294	0,0768	1,0000	0
10	21	10,5922	-10,5054	11,1775	-10,9907	0,0868	0,1869	1,0000	0
10	22	4,2245	-4,1885	5,4089	-5,3346	0,0360	0,0743	1,0000	0
21	22	-6,9946	7,0007	-0,2093	0,2218	0,0061	0,0125	1,0000	0
15	23	-0,4099	0,4197	2,9884	-2,9685	0,0098	0,0199	1,0000	0
22	24	-2,8123	2,8545	5,1128	-5,0471	0,0422	0,0657	1,0000	0
23	24	-3,6197	3,6414	1,3685	-1,3243	0,0216	0,0442	1,0000	0
24	25	-15,1958	15,6976	3,6126	-2,7364	0,5017	0,8763	1,0000	0
25	26	3,5486	-3,5000	2,3726	-2,3000	0,0486	0,0726	1,0000	0
25	27	-19,2462	19,6707	0,3638	0,4469	0,4246	0,8107	1,0000	0
28	27	-7,7784	7,7784	5,8295	-5,4700	0,0000	0,3594	1,0000	0
27	29	-10,5109	10,7661	2,2854	-1,8032	0,2552	0,4822	1,0000	0
27	30	-16,9382	17,8842	2,7377	-0,9571	0,9460	1,7805	1,0000	0
29	30	-13,1661	13,5732	0,9032	-0,1340	0,4071	0,7692	1,0000	0
8	28	-5,6462	5,6670	-0,7353	-3,6532	0,0209	-4,3885	1,0000	0
6	28	-2,1102	2,1113	0,8257	-2,1763	0,0011	-1,3506	1,0000	0

Tabela 32 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Mín Poluição MOTS).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	185.715563
Perdas Totais (MW)	14.2236
Emissão de Gases (t/h)	0.4126

Tabela 33 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo AMPL PNLIM (caso 30 barras - Mín Poluição)

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0600	0,0000	138,4365	-20,0000	0,0000
2	1,0536	-2,5651	100,0000	21,7133	0,0000
3	1,0414	-4,8395	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0365	-5,9236	0,0000	0,0000	0,0000
5	1,0224	-10,4919	0,0000	31,4027	0,0000
6	1,0342	-6,9907	0,0000	0,0000	0,0000
7	1,0218	-8,9357	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0338	-7,5263	0,0000	34,7991	0,0000
9	0,9971	-9,8079	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,9806	-11,3003	0,0000	0,0000	1,0000
11	1,0449	-9,8079	0,0000	24,0000	0,0000
12	0,9868	-11,1078	0,0000	0,0000	0,0000
13	1,0198	-11,1078	0,0000	24,0000	0,0000
14	0,9715	-11,8778	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,9689	-11,7439	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,9765	-11,5008	0,0000	0,0000	0,0000
17	0,9738	-11,6043	0,0000	0,0000	0,0000
18	0,9600	-12,3830	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,9581	-12,5430	0,0000	0,0000	0,0000
20	0,9629	-12,2975	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,9674	-11,4497	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,9681	-11,3192	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,9610	-11,2610	0,0000	0,0000	0,0000
24	0,9595	-10,2081	0,0000	0,0000	1,0000
25	0,9724	-5,5196	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,9538	-5,9798	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,9911	-2,3965	0,0000	0,0000	0,0000
28	1,0348	-6,6228	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0160	1,9869	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0600	6,9259	59,1933	1,7182	0,0000

Tabela 34 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo AMPL PNLIM (caso 30 barras - Mín Poluição)

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	82,3442	-81,1534	-16,6831	14,3526	1,1908	-2,3306	1,0000	0
1	3	56,0923	-54,8261	-3,3169	3,4399	1,2661	0,1230	1,0000	0
2	4	36,6463	-35,9565	-2,5999	0,6828	0,6898	-1,9171	1,0000	0
3	4	52,4261	-52,0895	-4,6399	4,6998	0,3367	0,0600	1,0000	0
2	5	75,7985	-73,3496	1,4106	4,3735	2,4489	5,7841	1,0000	0
2	6	47,0086	-45,8498	-4,1501	3,5907	1,1589	-0,5594	1,0000	0
4	6	46,1499	-45,9082	-7,6886	7,5647	0,2417	-0,1239	1,0000	0
5	7	-20,8504	21,0782	8,0292	-9,5860	0,2277	-1,5568	1,0000	0
6	7	44,3706	-43,8782	1,0296	-1,3140	0,4924	-0,2844	1,0000	0
6	8	22,2735	-22,2147	-5,8014	5,0451	0,0588	-0,7564	1,0000	0
6	9	23,1494	-23,1494	-6,3429	7,5843	0,0000	1,2414	0,9500	-8
6	10	12,8494	-12,8494	-1,4339	2,4225	0,0000	0,9887	0,9375	-10
9	11	0,0000	0,0000	-22,9027	24,0000	0,0000	1,0973	1,0000	0
9	10	23,1494	-23,1494	15,3184	-14,4659	0,0000	0,8525	1,0000	0
4	12	34,2961	-34,2961	0,7060	2,4012	0,0000	3,1072	0,9500	-8
12	13	0,0000	0,0000	-23,2246	24,0000	0,0000	0,7754	1,0000	0
12	14	6,4094	-6,3472	2,8576	-2,7282	0,0623	0,1294	1,0000	0
12	15	11,9793	-11,8429	7,5619	-7,2932	0,1364	0,2687	1,0000	0
12	16	4,7073	-4,6776	2,9039	-2,8415	0,0297	0,0624	1,0000	0
14	15	0,1472	-0,1441	1,1282	-1,1254	0,0030	0,0027	1,0000	0
16	17	1,1776	-1,1763	1,0415	-1,0365	0,0014	0,0050	1,0000	0
15	18	5,3953	-5,3600	1,3190	-1,2472	0,0353	0,0718	1,0000	0
18	19	2,1600	-2,1567	0,3472	-0,3405	0,0033	0,0067	1,0000	0
19	20	-7,3433	7,3667	-3,0595	3,1064	0,0234	0,0469	1,0000	0
10	20	9,6738	-9,5667	4,0454	-3,8064	0,1070	0,2390	1,0000	0
10	17	7,8524	-7,8237	4,8382	-4,7635	0,0287	0,0748	1,0000	0
10	21	9,2910	-9,1996	12,8885	-12,6919	0,0914	0,1966	1,0000	0
10	22	3,3817	-3,3407	6,5401	-6,4556	0,0410	0,0845	1,0000	0
21	22	-8,3004	8,3092	1,4919	-1,4739	0,0088	0,0179	1,0000	0
15	23	-1,6082	1,6335	4,5996	-4,5485	0,0253	0,0511	1,0000	0
22	24	-4,9685	5,0760	7,9295	-7,7622	0,1075	0,1672	1,0000	0
23	24	-4,8335	4,8794	2,9485	-2,8548	0,0458	0,0937	1,0000	0
24	25	-18,6553	19,4949	7,8757	-6,4094	0,8396	1,4663	1,0000	0
25	26	3,5490	-3,5000	2,3733	-2,3000	0,0490	0,0733	1,0000	0
25	27	-23,0440	23,6767	4,0361	-2,8280	0,6327	1,2081	1,0000	0
28	27	-18,7282	18,7282	6,9273	-5,3959	0,0000	1,5314	0,9812	-3
27	29	-16,6427	17,2910	3,5682	-2,3433	0,6483	1,2249	1,0000	0
27	30	-25,7622	27,9964	4,6557	-0,4503	2,2342	4,2054	1,0000	0
29	30	-19,6910	20,5969	1,4433	0,2685	0,9059	1,7118	1,0000	0
8	28	-7,7853	7,8239	-0,2460	-4,2116	0,0385	-4,4576	1,0000	0
6	28	-10,8849	10,9043	1,3932	-2,7157	0,0194	-1,3225	1,0000	0

Tabela 35 – Resumo dos resultados (Caso 30 barras - Poluição Mínima PNLIM).

Parâmetro	Valor
Função Objetivo - Emissão de Gases (t/h)	0.4126
Custo de Geração (US\$/h)	185.694336
Perdas Totais (MW)	14.2298

Tabela 36 – Resultados completos de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0301	-20,7059	0,0000	14,4278	0,0000
2	1,0412	-19,4983	0,0000	0,0000	0,0000
3	1,0363	-20,1339	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0550	-18,1274	0,0000	29,1509	0,0000
5	1,0550	-17,8746	0,0000	0,0000	1,0000
6	1,0519	-18,9330	0,0000	22,9416	0,0000
7	1,0526	-18,7771	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0410	-15,6126	0,0000	-159,1783	0,0000
9	1,0594	-12,8091	0,0000	0,0000	0,0000
10	1,0408	-9,6684	182,0296	-136,1196	0,0000
11	1,0484	-18,7749	0,0000	0,0000	0,0000
12	1,0560	-18,1959	286,9348	51,5229	0,0000
13	1,0351	-20,1920	0,0000	0,0000	0,0000
14	1,0517	-19,3350	0,0000	0,0000	0,0000
15	1,0436	-21,0028	0,0000	23,9675	0,0000
16	1,0492	-19,1381	0,0000	0,0000	0,0000
17	1,0565	-18,9917	0,0000	0,0000	0,0000
18	1,0452	-20,9261	0,0000	33,7235	0,0000
19	1,0414	-21,2801	0,0000	20,6856	0,0000
20	1,0305	-20,4321	0,0000	0,0000	0,0000
21	1,0265	-18,9826	0,0000	0,0000	0,0000
22	1,0313	-16,6553	0,0000	0,0000	0,0000
23	1,0494	-12,1064	0,0000	0,0000	0,0000
24	1,0506	-11,9062	0,0000	1,2888	0,0000
25	1,0598	-5,8757	266,5732	-40,5790	0,0000
26	1,0595	-5,5051	241,5641	-27,2408	0,0000
27	1,0419	-17,4967	0,0000	36,2717	0,0000
28	1,0326	-18,7870	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0300	-19,4152	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0533	-15,3505	0,0000	0,0000	0,0000
31	1,0321	-19,2214	22,9572	11,0748	0,0000
32	1,0402	-17,9322	0,0000	30,1528	0,0000
33	1,0421	-21,4194	0,0000	0,0000	0,0000
34	1,0541	-20,7248	0,0000	10,4443	1,0000
35	1,0510	-21,1353	0,0000	0,0000	0,0000
36	1,0513	-21,1420	0,0000	18,6098	0,0000
37	1,0571	-20,3033	0,0000	0,0000	1,0000
38	1,0555	-15,9573	0,0000	0,0000	0,0000
39	1,0357	-22,9085	0,0000	0,0000	0,0000
40	1,0341	-23,6397	0,0000	33,7133	0,0000
41	1,0283	-23,8374	0,0000	0,0000	0,0000
42	1,0375	-21,8628	0,0000	40,0763	0,0000
43	1,0390	-20,0266	0,0000	0,0000	0,0000
44	1,0329	-16,6704	0,0000	0,0000	1,0000
45	1,0293	-14,5637	0,0000	0,0000	1,0000
46	1,0451	-11,5423	25,4072	-2,2428	1,0000
47	1,0509	-9,3886	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,0553	-10,2346	0,0000	0,0000	1,0000
49	1,0576	-9,2892	231,6433	64,3949	0,0000
50	1,0465	-11,1896	0,0000	0,0000	0,0000
51	1,0292	-13,5091	0,0000	0,0000	0,0000
52	1,0238	-14,3204	0,0000	0,0000	0,0000
53	1,0237	-15,0301	0,0000	0,0000	0,0000
54	1,0387	-14,1388	149,8542	39,1176	0,0000
55	1,0350	-14,7725	0,0000	16,7928	0,0000
56	1,0361	-14,5063	0,0000	9,3202	0,0000
57	1,0378	-13,4673	0,0000	0,0000	0,0000
58	1,0301	-14,1967	0,0000	0,0000	0,0000

Continua...

Tabela 37 – Resultados completos de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
59	1,0478	-13,2586	122,5280	60,3823	0,0000
60	1,0454	-11,2073	0,0000	0,0000	0,0000
61	1,0474	-10,6219	7,1307	56,8503	0,0000
62	1,0447	-10,5519	0,0000	12,4776	0,0000
63	1,0454	-10,5092	0,0000	0,0000	0,0000
64	1,0590	-9,1160	0,0000	0,0000	0,0000
65	1,0597	-5,2831	217,5190	-32,7134	0,0000
66	1,0598	-3,9472	463,0717	-55,4666	0,0000
67	1,0457	-7,7609	0,0000	0,0000	0,0000
68	1,0547	-3,8627	0,0000	0,0000	0,0000
69	1,0599	0,0000	713,6684	-166,8371	0,0000
70	1,0335	-8,6728	0,0000	29,7893	0,0000
71	1,0358	-9,1936	0,0000	0,0000	0,0000
72	1,0401	-11,0997	0,0000	-4,7708	0,0000
73	1,0364	-9,3508	0,0000	1,9241	0,0000
74	1,0118	-9,7399	0,0000	8,5572	1,0000
75	1,0153	-8,5602	0,0000	0,0000	0,0000
76	1,0002	-10,4254	0,0000	22,7149	0,0000
77	1,0438	-6,6734	0,0000	67,4788	0,0000
78	1,0394	-7,0063	0,0000	0,0000	0,0000
79	1,0413	-6,8382	0,0000	0,0000	1,0000
80	1,0594	-5,0084	349,3568	-62,8955	0,0000
81	1,0350	-4,2300	0,0000	0,0000	0,0000
82	1,0353	-8,0817	0,0000	0,0000	1,0000
83	1,0374	-8,0020	0,0000	0,0000	1,0000
84	1,0391	-7,3199	0,0000	0,0000	0,0000
85	1,0462	-6,6987	0,0000	20,6990	0,0000
86	1,0363	-7,9948	0,0000	0,0000	0,0000
87	1,0440	-8,0075	0,4088	1,4208	0,0000
88	1,0465	-5,0071	0,0000	0,0000	0,0000
89	1,0597	-2,1282	439,7321	-8,9200	0,0000
90	1,0403	-7,3351	0,0000	45,5644	0,0000
91	1,0438	-6,7705	0,0000	0,0463	0,0000
92	1,0496	-5,1930	0,0000	7,2710	0,0000
93	1,0398	-6,3006	0,0000	0,0000	0,0000
94	1,0375	-6,8581	0,0000	0,0000	0,0000
95	1,0261	-7,5770	0,0000	0,0000	0,0000
96	1,0344	-7,5151	0,0000	0,0000	0,0000
97	1,0423	-6,6090	0,0000	0,0000	0,0000
98	1,0517	-6,4190	0,0000	0,0000	0,0000
99	1,0533	-6,7622	0,0000	-4,6002	0,0000
100	1,0587	-5,7037	258,8244	34,8923	0,0000
101	1,0430	-6,2763	0,0000	0,0000	0,0000
102	1,0468	-5,6470	0,0000	0,0000	0,0000
103	1,0564	-6,9939	97,9016	14,8909	0,0000
104	1,0419	-10,0213	0,0000	19,6888	0,0000
105	1,0396	-10,8076	0,0000	15,4635	1,0000
106	1,0322	-11,3062	0,0000	0,0000	0,0000
107	1,0267	-13,5969	0,0000	5,9709	1,0000
108	1,0389	-10,9118	0,0000	0,0000	0,0000
109	1,0387	-10,9216	0,0000	0,0000	0,0000
110	1,0414	-10,6468	0,0000	21,0316	1,0000
111	1,0585	-7,6202	78,0314	2,1138	0,0000
112	1,0283	-13,0636	0,0000	16,3533	0,0000
113	1,0523	-18,9120	0,0000	-9,5872	0,0000
114	1,0364	-18,2343	0,0000	0,0000	0,0000
115	1,0361	-18,2438	0,0000	0,0000	0,0000
116	1,0582	-3,8789	0,0000	83,4006	0,0000
117	1,0413	-19,5511	0,0000	0,0000	0,0000
118	1,0020	-9,8465	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 38 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	-23,8255	23,9920	-5,2993	3,1240	0,1665	-2,1753	1,0000	0
1	3	-27,1745	27,2698	-7,2730	6,4308	0,0952	-0,8421	1,0000	0
4	5	-58,4884	58,5456	13,7747	-13,7494	0,0571	0,0253	1,0000	0
3	5	-41,6495	42,0524	-9,3283	8,0284	0,4029	-1,2998	1,0000	0
5	6	37,5404	-37,3893	-2,7005	1,8036	0,1511	-0,8969	1,0000	0
6	7	-14,6107	14,6196	-0,8620	0,2932	0,0089	-0,5688	1,0000	0
8	9	-180,3500	181,1253	-106,7057	-11,7711	0,7754	-118,4768	1,0000	0
8	5	164,3781	-164,3781	-0,3503	6,8437	0,0000	6,4934	1,0125	2
9	10	-181,1253	182,0296	11,7711	-136,1196	0,9043	-124,3485	1,0000	0
4	11	19,4884	-19,4136	3,3762	-5,0632	0,0749	-1,6871	1,0000	0
5	11	26,2398	-26,1130	1,5778	-3,0743	0,1268	-1,4964	1,0000	0
11	12	-63,5239	63,7667	-21,5135	21,7577	0,2429	0,2442	1,0000	0
2	12	-43,9920	44,3478	-12,1240	11,5672	0,3557	-0,5568	1,0000	0
3	12	-24,6203	24,9044	-7,1026	3,5977	0,2841	-3,5049	1,0000	0
7	12	-33,6196	33,7078	-2,2932	1,6695	0,0882	-0,6237	1,0000	0
11	13	39,0505	-38,7299	6,6510	-7,6335	0,3206	-0,9825	1,0000	0
12	14	30,4576	-30,2775	-3,5456	2,1208	0,1801	-1,4248	1,0000	0
13	15	4,7299	-4,6969	-8,3665	1,7037	0,0330	-6,6627	1,0000	0
14	15	16,2775	-16,1349	-3,1208	-1,9220	0,1426	-5,0428	1,0000	0
12	16	22,6180	-22,5190	1,8496	-3,8313	0,0990	-1,9817	1,0000	0
15	17	-89,2274	90,1930	-4,6855	2,9864	0,9656	-1,6992	1,0000	0
16	17	-2,4810	2,4889	-6,1687	1,0343	0,0079	-5,1344	1,0000	0
17	18	75,3852	-74,7543	5,7201	-4,5636	0,6308	1,1565	1,0000	0
18	19	14,7543	-14,7296	4,2871	-5,4210	0,0248	-1,1339	1,0000	0
19	20	-10,9731	11,0350	10,4670	-13,3778	0,0619	-2,9108	1,0000	0
15	19	13,8879	-13,8663	1,2151	-2,2418	0,0216	-1,0267	1,0000	0
20	21	-29,0350	29,2032	10,3778	-11,8827	0,1682	-1,5050	1,0000	0
21	22	-43,2032	43,5787	3,8827	-4,7443	0,3755	-0,8615	1,0000	0
22	23	-53,5787	54,5029	-0,2557	0,1796	0,9242	-0,0762	1,0000	0
23	24	-7,9058	7,9135	-3,0206	-2,4422	0,0077	-5,4628	1,0000	0
23	25	-146,3515	149,4618	18,4706	-12,1299	3,1103	6,3407	1,0000	0
26	25	19,1296	-19,1296	17,6970	-17,4688	-0,0000	0,2283	1,0063	1
25	27	136,2410	-130,9850	-10,9804	18,4418	5,2560	7,4614	1,0000	0
27	28	29,4705	-29,3129	3,9042	-5,5236	0,1576	-1,6195	1,0000	0
28	29	12,3129	-12,2792	-1,4764	-0,9208	0,0337	-2,3971	1,0000	0
30	17	185,5590	-185,5590	51,6932	-39,1902	0,0000	12,5030	1,0188	3
8	30	-12,0282	12,0573	-52,1223	-3,9023	0,0292	-56,0246	1,0000	0
26	30	222,4345	-218,9100	-44,9378	-18,4534	3,5246	-63,3912	1,0000	0
17	31	7,1471	-7,0381	12,1153	-16,1076	0,1090	-3,9922	1,0000	0
29	31	-11,7208	11,7355	-3,0792	2,2420	0,0147	-0,8373	1,0000	0
23	32	92,7544	-90,2354	-18,6297	14,9866	2,5190	-3,6431	1,0000	0
31	32	-24,7401	24,9115	-2,0596	-0,0686	0,1714	-2,1282	1,0000	0
27	32	10,6600	-10,6359	-1,8769	-0,1309	0,0241	-2,0078	1,0000	0
15	33	6,1714	-6,1579	-2,3437	-1,0860	0,0134	-3,4297	1,0000	0
19	34	-5,4311	5,4610	-7,1185	0,2789	0,0299	-6,8396	1,0000	0
35	36	0,5998	-0,5996	-3,1259	2,8306	0,0002	-0,2953	1,0000	0
35	37	-33,5998	33,7149	-5,8741	4,9296	0,1151	-0,9445	1,0000	0
33	37	-16,8421	16,9639	-7,9140	4,2985	0,1218	-3,6155	1,0000	0
34	36	30,4733	-30,4004	0,8157	-1,2208	0,0729	-0,4052	1,0000	0
34	37	-89,6459	89,8329	-9,5360	9,1263	0,1870	-0,4097	1,0000	0
38	37	228,2830	-228,2830	41,6197	-23,9388	0,0000	17,6808	1,0125	2
37	39	49,2104	-48,4987	5,9656	-6,5722	0,7117	-0,6066	1,0000	0
37	40	38,5610	-37,7699	-0,3812	-1,9697	0,7911	-2,3509	1,0000	0
30	38	21,2936	-21,2731	-29,3375	-17,3395	0,0204	-46,6770	1,0000	0
39	40	21,4987	-21,4172	-4,4278	3,0335	0,0815	-1,3943	1,0000	0
40	41	10,2857	-10,2598	8,5812	-9,7936	0,0259	-1,2124	1,0000	0
40	42	-17,0986	17,2570	1,0683	-5,5457	0,1583	-4,4774	1,0000	0
41	42	-26,7402	27,0184	-0,2064	-2,5474	0,2783	-2,7538	1,0000	0
43	44	-23,3420	23,6958	5,8516	-10,9361	0,3538	-5,0845	1,0000	0
34	43	-5,2884	5,3420	8,4411	-12,8516	0,0537	-4,4105	1,0000	0
44	45	-39,6958	40,0726	13,6050	-14,4707	0,3768	-0,8658	1,0000	0

Continua...

Tabela 39 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
45	46	-41,4145	42,0628	-0,4083	-0,9658	0,6483	-1,3741	1,0000	0
46	47	-30,9690	31,3118	3,3839	-5,7087	0,3428	-2,3248	1,0000	0
46	48	-13,6866	13,7904	-3,7393	-1,1400	0,1038	-4,8793	1,0000	0
47	49	-5,9762	5,9979	-10,3517	8,6399	0,0217	-1,7117	1,0000	0
42	49	-70,1377	73,6024	12,5847	-6,3708	3,4647	6,2140	1,0000	0
42	49	-70,1377	73,6024	12,5847	-6,3708	3,4647	6,2140	1,0000	0
45	49	-51,6581	53,4029	3,4735	-3,5639	1,7448	-0,0904	1,0000	0
48	49	-33,7904	33,9831	6,8452	-7,7056	0,1927	-0,8605	1,0000	0
49	50	48,5251	-47,9628	-1,8316	1,3411	0,5623	-0,4905	1,0000	0
49	51	59,5153	-57,9724	1,0590	-0,4333	1,5430	0,6257	1,0000	0
51	52	25,6295	-25,5035	0,0081	-1,1140	0,1260	-1,1059	1,0000	0
52	53	7,5035	-7,4805	-3,8860	-0,2744	0,0230	-4,1604	1,0000	0
53	54	-15,5195	15,6007	-10,7256	7,8059	0,0812	-2,9197	1,0000	0
49	54	32,1719	-31,4963	-3,9730	-1,4605	0,6756	-5,4335	1,0000	0
49	54	31,5540	-30,7793	-5,2816	-0,1443	0,7747	-5,4259	1,0000	0
54	55	17,1352	-17,0889	0,2287	-2,2067	0,0463	-1,9781	1,0000	0
54	56	74,2078	-74,0663	6,2973	-6,5936	0,1415	-0,2963	1,0000	0
55	56	-31,9951	32,0422	2,9280	-3,1834	0,0471	-0,2554	1,0000	0
56	57	-18,4262	18,5425	3,6494	-5,9239	0,1163	-2,2745	1,0000	0
50	57	30,9628	-30,5425	-5,3411	2,9239	0,4203	-2,4173	1,0000	0
56	58	-3,2536	3,2757	6,3482	-8,8689	0,0221	-2,5207	1,0000	0
51	58	15,3429	-15,2757	-7,5748	5,8689	0,0672	-1,7059	1,0000	0
54	59	-7,8139	7,8451	-5,6094	-0,7573	0,0311	-6,3667	1,0000	0
56	59	-9,9057	9,9828	-4,5373	-1,4060	0,0771	-5,9433	1,0000	0
56	59	-10,3904	10,4728	-4,3630	-1,2113	0,0824	-5,5743	1,0000	0
55	59	-13,9160	14,0054	-5,9284	0,2116	0,0894	-5,7168	1,0000	0
59	60	-25,3471	25,5499	5,6865	-8,8776	0,2028	-3,1911	1,0000	0
59	61	-31,9000	32,2233	5,9170	-8,6967	0,3233	-2,7797	1,0000	0
60	61	-82,6129	82,7778	0,5880	-1,3391	0,1649	-0,7511	1,0000	0
60	62	-20,9370	20,9905	5,2896	-6,6489	0,0535	-1,3593	1,0000	0
61	62	-1,8203	1,8253	7,3834	-8,4331	0,0050	-1,0497	1,0000	0
63	59	139,5310	-139,5310	69,2134	-61,0582	0,0000	8,1552	1,0250	4
63	64	-139,5310	139,8892	-69,2134	49,4634	0,3583	-19,7500	1,0000	0
64	61	106,0502	-106,0502	-55,8903	59,5026	0,0000	3,6123	0,9750	-4
38	65	-207,0099	210,5692	-24,2802	-53,7648	3,5593	-78,0451	1,0000	0
64	65	-245,9394	247,4086	6,4270	-32,5785	1,4692	-26,1516	1,0000	0
49	66	-108,8213	110,8205	22,7124	-15,2846	1,9993	7,4278	1,0000	0
49	66	-108,8213	110,8205	22,7124	-15,2846	1,9993	7,4278	1,0000	0
62	66	-56,5003	57,9432	5,4977	-5,3719	1,4429	0,1258	1,0000	0
62	67	-43,3155	43,7815	8,0619	-9,3353	0,4660	-1,2734	1,0000	0
65	66	-71,6476	71,6476	39,1562	-37,0136	0,0000	2,1425	1,0125	2
66	67	72,8399	-71,7815	-0,5119	2,3353	1,0584	1,8234	1,0000	0
65	68	-168,8113	169,1925	14,4738	-81,3598	0,3813	-66,8860	1,0000	0
47	69	-59,3356	62,3314	16,0604	-14,0992	2,9958	1,9612	1,0000	0
49	69	-50,0691	52,5947	14,3685	-15,3421	2,5256	-0,9736	1,0000	0
68	69	-212,4281	212,4281	128,8245	-109,9782	0,0000	18,8462	1,0437	7
69	70	130,3223	-125,7865	-5,7668	11,5998	4,5358	5,8330	1,0000	0
24	70	-14,8572	14,8621	-0,7703	-9,3936	0,0049	-10,1639	1,0000	0
70	71	24,3175	-24,2558	-12,9226	12,2308	0,0616	-0,6918	1,0000	0
24	72	-6,0563	6,0954	4,5012	-9,6770	0,0391	-5,1757	1,0000	0
71	72	18,2524	-18,0954	-9,0601	4,9062	0,1570	-4,1539	1,0000	0
71	73	6,0034	-6,0000	-3,1707	1,9241	0,0034	-1,2466	1,0000	0
70	74	18,2264	-18,0515	9,7670	-12,7128	0,1749	-2,9458	1,0000	0
70	75	2,3805	-2,3140	10,7387	-14,2977	0,0665	-3,5591	1,0000	0
69	75	132,7894	-126,4251	-2,4496	8,2652	6,3643	5,8156	1,0000	0
74	75	-49,9485	50,2542	6,5556	-6,6086	0,3058	-0,0530	1,0000	0
76	77	-50,0421	51,2278	-14,7815	14,8886	1,1858	0,1071	1,0000	0
69	77	123,2024	-118,9782	-19,2011	21,5236	4,2243	2,3224	1,0000	0
75	77	-19,9224	20,1931	-10,7751	6,3981	0,2707	-4,3770	1,0000	0
77	78	56,9520	-56,8260	19,4971	-20,4529	0,1260	-0,9558	1,0000	0
78	79	-14,1740	14,1855	-5,5471	4,8972	0,0115	-0,6499	1,0000	0
77	80	-69,2101	69,9686	-11,0136	7,9575	0,7585	-3,0561	1,0000	0

Continua...

Tabela 40 – Fluxo completo de potência ativa e reativa pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Barra	Barra	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
77	80	-32,2988	32,5902	-7,3034	5,8226	0,2914	-1,4808	1,0000	0
79	80	-53,1855	53,6214	-15,2096	15,1136	0,4359	-0,0961	1,0000	0
68	81	43,2096	-43,0264	53,9290	-140,0310	0,1832	-86,1020	1,0000	0
81	80	43,0264	-43,0264	140,0310	-133,5420	0,0000	6,4890	1,0688	11
77	82	31,1141	-30,8493	-4,5115	-3,5639	0,2648	-8,0753	1,0000	0
82	83	-5,4108	5,4158	-6,4075	2,3472	0,0051	-4,0604	1,0000	0
83	84	-8,4284	8,4740	1,3438	-4,0286	0,0456	-2,6849	1,0000	0
83	85	-16,9875	17,1032	-2,9287	-0,4501	0,1157	-3,3788	1,0000	0
84	85	-19,4740	19,5815	-2,9714	1,8581	0,1076	-1,1132	1,0000	0
85	86	20,7351	-20,5951	1,2928	-3,7932	0,1400	-2,5005	1,0000	0
86	87	-0,4049	0,4088	-6,2068	1,4208	0,0039	-4,7860	1,0000	0
85	88	-30,4753	30,6519	4,6654	-6,7863	0,1767	-2,1208	1,0000	0
85	89	-50,9446	51,5114	-1,6672	0,5590	0,5669	-1,1082	1,0000	0
88	89	-78,6519	79,4377	-3,2137	5,0936	0,7858	1,8799	1,0000	0
89	90	52,8896	-51,5987	-4,1595	3,0227	1,2909	-1,1368	1,0000	0
89	90	100,6394	-98,4926	-4,7498	2,0546	2,1467	-2,6952	1,0000	0
90	91	-12,9086	12,9478	-1,5129	-0,6820	0,0391	-2,1949	1,0000	0
89	92	118,0053	-116,7776	-1,8582	2,0247	1,2277	0,1665	1,0000	0
89	92	37,2487	-36,7624	-3,8052	1,1562	0,4863	-2,6490	1,0000	0
91	92	-22,9478	23,1371	0,7283	-3,6867	0,1893	-2,9583	1,0000	0
92	93	26,2201	-26,0545	3,2091	-5,0445	0,1655	-1,8353	1,0000	0
92	94	20,6528	-20,4647	-0,1840	-3,6200	0,1881	-3,8040	1,0000	0
93	94	14,0545	-14,0136	-1,9555	0,0660	0,0409	-1,8896	1,0000	0
94	95	35,8528	-35,6610	16,0945	-16,6457	0,1918	-0,5511	1,0000	0
80	96	28,2239	-27,9416	6,8863	-10,8584	0,2822	-3,9720	1,0000	0
82	96	-17,7399	17,7956	4,4074	-10,0506	0,0557	-5,6432	1,0000	0
94	96	14,0145	-13,9654	-1,7136	-0,5960	0,0491	-2,3095	1,0000	0
80	97	35,5684	-35,3346	11,5637	-13,1756	0,2338	-1,6119	1,0000	0
80	98	25,8825	-25,7394	0,5966	-3,1341	0,1431	-2,5375	1,0000	0
80	99	16,5282	-16,4177	-3,2938	-2,2977	0,1105	-5,5915	1,0000	0
92	100	2,5304	-2,5183	-6,3666	1,1765	0,0121	-5,1902	1,0000	0
94	100	-45,3890	45,8216	-26,8269	21,6006	0,4326	-5,2263	1,0000	0
95	96	-6,3390	6,3754	-14,3543	12,9066	0,0365	-1,4477	1,0000	0
96	97	-20,2640	20,3346	-6,4017	4,1756	0,0706	-2,2261	1,0000	0
98	100	-8,2606	8,2869	-4,8659	-0,3157	0,0263	-5,1816	1,0000	0
99	100	-25,5823	25,6887	-2,3025	0,3743	0,1064	-1,9282	1,0000	0
100	101	11,1161	-11,0567	8,9683	-12,3199	0,0594	-3,3515	1,0000	0
92	102	15,9997	-15,9707	1,1181	-2,5949	0,0290	-1,4768	1,0000	0
101	102	-10,9433	10,9707	-2,6801	-0,4051	0,0273	-3,0852	1,0000	0
100	103	45,3185	-45,0146	-11,6914	6,6938	0,3039	-4,9976	1,0000	0
100	104	40,9725	-40,2965	-1,8345	-1,0758	0,6761	-2,9103	1,0000	0
103	104	36,6631	-36,1018	-2,3958	-0,1766	0,5613	-2,5724	1,0000	0
103	105	44,2502	-43,3094	-4,4148	2,7909	0,9408	-1,6238	1,0000	0
100	106	47,1384	-45,9366	-1,3858	-0,8428	1,2017	-2,2286	1,0000	0
104	105	38,3983	-38,2622	-4,0588	3,5086	0,1361	-0,5503	1,0000	0
105	106	19,4325	-19,3726	8,4536	-9,7582	0,0599	-1,3046	1,0000	0
105	107	28,3363	-27,9425	-2,7073	-0,9713	0,3938	-3,6786	1,0000	0
105	108	2,8027	-2,8008	-0,9665	-1,0200	0,0019	-1,9865	1,0000	0
106	107	22,3092	-22,0575	-5,3990	1,2664	0,2517	-4,1326	1,0000	0
108	109	0,8008	-0,8008	0,0200	-0,8398	0,0001	-0,8199	1,0000	0
103	110	39,0028	-38,4696	-0,9924	-1,6047	0,5333	-2,5971	1,0000	0
109	110	-7,1992	7,2129	-2,1602	0,0125	0,0137	-2,1476	1,0000	0
110	111	-76,8338	78,0314	-0,2085	2,1138	1,1977	1,9053	1,0000	0
110	112	69,0904	-68,0000	-7,1677	3,3533	1,0904	-3,8144	1,0000	0
17	113	-0,6551	0,6729	14,3341	-15,1291	0,0179	-0,7950	1,0000	0
32	113	6,7369	-6,6729	-11,0011	5,5419	0,0640	-5,4592	1,0000	0
32	114	10,2229	-10,2076	3,3668	-5,0525	0,0153	-1,6857	1,0000	0
27	115	19,8544	-19,7926	2,8027	-4,6521	0,0618	-1,8495	1,0000	0
114	115	2,2076	-2,2074	2,0525	-2,3479	0,0002	-0,2954	1,0000	0
68	116	0,0260	0,0000	-101,3936	83,4006	0,0260	-17,9930	1,0000	0
12	117	20,1325	-20,0000	4,6269	-8,0000	0,1325	-3,3731	1,0000	0
75	118	51,4072	-51,0116	12,4161	-12,3225	0,3956	0,0936	1,0000	0
76	118	-17,9579	18,0116	1,4964	-2,6775	0,0536	-1,1811	1,0000	0

Tabela 41 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Custo).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	3.534,020257
Perdas Ativas (MW)	156,5113
Poluição (ton/h)	27.883.361,9754

Tabela 42 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	1,0348	-20,6664	0,0000	14,9983	0,0000
2	1,0454	-19,4649	0,0000	0,0000	0,0000
3	1,0408	-20,0972	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0598	-18,1097	0,0000	34,6974	0,0000
5	1,0594	-17,8542	0,0000	0,0000	1,0000
6	1,0567	-18,9096	0,0000	25,2008	0,0000
7	1,0571	-18,7521	0,0000	0,0000	0,0000
8	1,0442	-15,6035	0,0000	-163,2394	0,0000
9	1,0600	-12,8143	0,0000	0,0000	0,0000
10	1,0388	-9,6736	181,1109	-144,2131	0,0000
11	1,0527	-18,7476	0,0000	0,0000	0,0000
12	1,0600	-18,1699	286,9998	48,1432	0,0000
13	1,0395	-20,1606	0,0000	0,0000	0,0000
14	1,0559	-19,3097	0,0000	0,0000	0,0000
15	1,0484	-20,9890	0,0000	29,9410	0,0000
16	1,0526	-19,1044	0,0000	0,0000	0,0000
17	1,0585	-18,9560	0,0000	0,0000	0,0000
18	1,0502	-20,9161	0,0000	39,0149	0,0000
19	1,0468	-21,2708	0,0000	23,9724	0,0000
20	1,0357	-20,4151	0,0000	0,0000	0,0000
21	1,0315	-18,9676	0,0000	0,0000	0,0000
22	1,0359	-16,6475	0,0000	0,0000	0,0000
23	1,0534	-12,1127	0,0000	0,0000	0,0000
24	1,0559	-11,9339	0,0000	5,5985	0,0000
25	1,0600	-5,8459	266,9988	133,9889	0,0000
26	1,0600	-5,4416	243,6636	-208,0209	0,0000
27	1,0476	-17,4899	0,0000	39,3890	0,0000
28	1,0381	-18,7699	0,0000	0,0000	0,0000
29	1,0353	-19,3948	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0596	-15,3248	0,0000	0,0000	0,0000
31	1,0373	-19,2037	22,9999	11,9972	0,0000
32	1,0461	-17,9302	0,0000	33,7906	0,0000
33	1,0461	-21,3889	0,0000	0,0000	0,0000
34	1,0582	-20,7016	0,0000	21,9661	1,0000
35	1,0554	-21,1125	0,0000	0,0000	0,0000
36	1,0560	-21,1233	0,0000	23,9158	0,0000
37	1,0600	-20,2652	0,0000	0,0000	1,0000
38	1,0557	-15,9457	0,0000	0,0000	0,0000
39	1,0384	-22,8669	0,0000	0,0000	0,0000
40	1,0366	-23,6003	0,0000	35,0225	0,0000
41	1,0304	-23,7971	0,0000	0,0000	0,0000
42	1,0383	-21,8272	0,0000	41,1899	0,0000
43	1,0411	-20,0015	0,0000	0,0000	0,0000
44	1,0320	-16,6391	0,0000	0,0000	1,0000
45	1,0273	-14,5232	0,0000	0,0000	1,0000
46	1,0429	-11,4865	25,7122	13,1977	1,0000
47	1,0481	-9,3253	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,0456	-10,0444	0,0000	0,0000	1,0000
49	1,0539	-9,2074	231,9990	56,2631	0,0000
50	1,0436	-11,1207	0,0000	0,0000	0,0000
51	1,0273	-13,4506	0,0000	0,0000	0,0000
52	1,0221	-14,2645	0,0000	0,0000	0,0000
53	1,0225	-14,9729	0,0000	0,0000	0,0000
54	1,0379	-14,0770	149,9996	33,7268	0,0000
55	1,0351	-14,7205	0,0000	19,1134	0,0000
56	1,0359	-14,4521	0,0000	14,5464	0,0000
57	1,0365	-13,4098	0,0000	0,0000	0,0000
58	1,0289	-14,1410	0,0000	0,0000	0,0000

Continua...

Tabela 43 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
59	1,0490	-13,1861	131,7381	126,0890	0,0000
60	1,0500	-11,2231	0,0000	0,0000	0,0000
61	1,0527	-10,6536	0,3929	-40,1599	0,0000
62	1,0475	-10,5542	0,0000	4,3239	0,0000
63	1,0472	-10,5187	0,0000	0,0000	0,0000
64	1,0471	-9,1221	0,0000	0,0000	0,0000
65	1,0597	-5,3228	209,1890	-7,2722	0,0000
66	1,0600	-3,9461	463,2278	-66,9981	0,0000
67	1,0471	-7,7633	0,0000	0,0000	0,0000
68	1,0600	-3,9058	0,0000	0,0000	0,0000
69	1,0600	0,0000	713,8211	-126,5760	0,0000
70	1,0359	-8,7012	0,0000	31,9897	0,0000
71	1,0381	-9,2182	0,0000	0,0000	0,0000
72	1,0440	-11,1244	0,0000	-4,7134	0,0000
73	1,0384	-9,3710	0,0000	1,0973	0,0000
74	1,0136	-9,7631	0,0000	8,9986	1,0000
75	1,0166	-8,5833	0,0000	0,0000	0,0000
76	1,0014	-10,4525	0,0000	22,9992	0,0000
77	1,0442	-6,7115	0,0000	69,9916	0,0000
78	1,0397	-7,0441	0,0000	0,0000	0,0000
79	1,0414	-6,8768	0,0000	0,0000	1,0000
80	1,0589	-5,0482	350,9772	23,4645	0,0000
81	1,0600	-4,3143	0,0000	0,0000	0,0000
82	1,0362	-8,1201	0,0000	0,0000	1,0000
83	1,0387	-8,0446	0,0000	0,0000	1,0000
84	1,0409	-7,3721	0,0000	0,0000	0,0000
85	1,0483	-6,7567	0,0000	22,9911	0,0000
86	1,0395	-8,0918	0,0000	0,0000	0,0000
87	1,0491	-8,1641	0,0014	2,4270	0,0000
88	1,0475	-5,0461	0,0000	0,0000	0,0000
89	1,0600	-2,1541	440,2665	-14,0711	0,0000
90	1,0411	-7,3621	0,0000	46,0523	0,0000
91	1,0449	-6,8019	0,0000	0,4808	0,0000
92	1,0506	-5,2240	0,0000	8,9935	0,0000
93	1,0408	-6,3306	0,0000	0,0000	0,0000
94	1,0385	-6,8880	0,0000	0,0000	0,0000
95	1,0269	-7,6079	0,0000	0,0000	0,0000
96	1,0350	-7,5488	0,0000	0,0000	0,0000
97	1,0423	-6,6464	0,0000	0,0000	0,0000
98	1,0519	-6,4542	0,0000	0,0000	0,0000
99	1,0548	-6,7999	0,0000	-3,2580	0,0000
100	1,0600	-5,7316	259,6770	32,1162	0,0000
101	1,0441	-6,3039	0,0000	0,0000	0,0000
102	1,0478	-5,6767	0,0000	0,0000	0,0000
103	1,0587	-7,0326	97,9997	14,1239	0,0000
104	1,0455	-10,0623	0,0000	22,9529	0,0000
105	1,0428	-10,8377	0,0000	14,8157	1,0000
106	1,0350	-11,3287	0,0000	0,0000	0,0000
107	1,0293	-13,6032	0,0000	11,8418	1,0000
108	1,0426	-10,9503	0,0000	0,0000	0,0000
109	1,0426	-10,9638	0,0000	0,0000	0,0000
110	1,0459	-10,7006	0,0000	22,9785	1,0000
111	1,0600	-7,6501	77,9113	-1,9163	0,0000
112	1,0312	-13,0663	0,0000	13,7443	0,0000
113	1,0567	-18,9108	0,0000	-2,0475	0,0000
114	1,0422	-18,2250	0,0000	0,0000	0,0000
115	1,0419	-18,2337	0,0000	0,0000	0,0000
116	1,0592	-3,9024	0,0000	-28,9378	0,0000
117	1,0453	-19,5151	0,0000	0,0000	0,0000
118	1,0033	-9,8703	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 44 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	-23,8008	23,9647	-4,9675	2,7603	0,1640	-2,2072	1,0000	0
1	3	-27,1992	27,2934	-7,0342	6,1783	0,0942	-0,8559	1,0000	0
4	5	-58,6273	58,6866	18,4959	-18,4629	0,0593	0,0330	1,0000	0
3	5	-41,7023	42,1027	-9,3483	8,0107	0,4004	-1,3376	1,0000	0
5	6	37,6119	-37,4612	-3,4053	2,4928	0,1507	-0,9125	1,0000	0
6	7	-14,5388	14,5475	0,7080	-1,2828	0,0087	-0,5748	1,0000	0
8	9	-179,4329	180,1818	-98,9176	-20,3472	0,7489	-119,2649	1,0000	0
8	5	164,7432	-164,7432	-5,4947	11,9853	0,0000	6,4906	1,0125	2
9	10	-180,1818	181,1109	20,3472	-144,2131	0,9292	-123,8659	1,0000	0
4	11	19,6273	-19,5507	4,2015	-5,8994	0,0767	-1,6978	1,0000	0
5	11	26,3420	-26,2150	1,8722	-3,3839	0,1270	-1,5117	1,0000	0
11	12	-63,4177	63,6548	-20,1287	20,3496	0,2371	0,2209	1,0000	0
2	12	-43,9647	44,3158	-11,7603	11,1745	0,3510	-0,5858	1,0000	0
3	12	-24,5911	24,8709	-6,8300	3,2746	0,2797	-3,5553	1,0000	0
7	12	-33,5475	33,6343	-0,7172	0,0802	0,0868	-0,6370	1,0000	0
11	13	39,1834	-38,8639	6,4119	-7,4154	0,3194	-1,0035	1,0000	0
12	14	30,6103	-30,4294	-3,9140	2,4762	0,1809	-1,4378	1,0000	0
13	15	4,8639	-4,8291	-8,5846	1,8680	0,0349	-6,7165	1,0000	0
14	15	16,4294	-16,2851	-3,4762	-1,6082	0,1443	-5,0844	1,0000	0
12	16	22,7823	-22,6816	2,5861	-4,5780	0,1006	-1,9919	1,0000	0
15	17	-88,8059	89,7552	1,7717	-3,5561	0,9493	-1,7844	1,0000	0
16	17	-2,3184	2,3239	-5,4220	0,2519	0,0055	-5,1701	1,0000	0
17	18	75,3453	-74,7220	-0,4875	1,6035	0,6233	1,1160	1,0000	0
18	19	14,7220	-14,6984	3,4114	-4,5627	0,0236	-1,1513	1,0000	0
19	20	-11,1648	11,2288	10,7759	-13,7093	0,0641	-2,9334	1,0000	0
15	19	13,7398	-13,7192	-0,4250	-0,6157	0,0206	-1,0407	1,0000	0
20	21	-29,2288	29,3986	10,7093	-12,2291	0,1698	-1,5199	1,0000	0
21	22	-43,3986	43,7746	4,2291	-5,1125	0,3760	-0,8834	1,0000	0
22	23	-53,7746	54,6979	0,1125	-0,2294	0,9233	-0,1170	1,0000	0
23	24	-7,9077	7,9165	-5,8752	0,3677	0,0088	-5,5076	1,0000	0
23	25	-146,8355	149,9793	23,5545	-17,0806	3,1438	6,4739	1,0000	0
26	25	19,5872	-19,5872	-156,0756	165,5205	0,0000	9,4449	0,9437	-9
25	27	136,6067	-131,3193	-14,4510	21,9639	5,2874	7,5129	1,0000	0
27	28	29,5938	-29,4363	4,0969	-5,7419	0,1575	-1,6449	1,0000	0
28	29	12,4363	-12,4023	-1,2581	-1,1644	0,0340	-2,4226	1,0000	0
30	17	184,2146	-184,2146	27,1343	-15,3008	0,0000	11,8335	1,0063	1
8	30	-13,3103	13,3548	-58,8270	2,4735	0,0445	-56,3535	1,0000	0
26	30	224,0764	-220,5059	-51,9453	-11,6067	3,5706	-63,5520	1,0000	0
17	31	6,7668	-6,6834	10,0643	-14,1710	0,0834	-4,1067	1,0000	0
29	31	-11,5977	11,6118	-2,8356	1,9875	0,0141	-0,8480	1,0000	0
23	32	93,0453	-90,5168	-20,4498	16,7196	2,5285	-3,7302	1,0000	0
31	32	-24,9285	25,1013	-2,8193	0,6665	0,1727	-2,1528	1,0000	0
27	32	10,7899	-10,7653	-2,2594	0,2299	0,0246	-2,0295	1,0000	0
15	33	6,1803	-6,1671	-1,6654	-1,7940	0,0132	-3,4595	1,0000	0
19	34	-5,4177	5,4447	-6,6251	-0,2869	0,0270	-6,9121	1,0000	0
35	36	0,7353	-0,7346	-6,2260	5,9307	0,0008	-0,2953	1,0000	0
35	37	-33,7353	33,8481	-2,7740	1,8092	0,1128	-0,9648	1,0000	0
33	37	-16,8329	16,9507	-7,2060	3,5502	0,1177	-3,6558	1,0000	0
34	36	30,3371	-30,2654	-1,3992	0,9851	0,0717	-0,4141	1,0000	0
34	37	-89,7274	89,9119	3,6731	-4,0994	0,1845	-0,4263	1,0000	0
38	37	228,9839	-228,9839	53,2302	-35,3143	0,0000	17,9160	1,0188	3
37	39	49,4607	-48,7449	6,1637	-6,7727	0,7158	-0,6090	1,0000	0
37	40	38,8125	-38,0150	-0,1993	-2,1575	0,7975	-2,3568	1,0000	0
30	38	22,9365	-22,9134	-18,0011	-28,9382	0,0231	-46,9393	1,0000	0
39	40	21,7449	-21,6623	-4,2273	2,8284	0,0826	-1,3989	1,0000	0
40	41	10,5354	-10,5067	9,4325	-10,6413	0,0287	-1,2089	1,0000	0
40	42	-16,8582	17,0150	1,9191	-6,4176	0,1569	-4,4985	1,0000	0
41	42	-26,4933	26,7667	0,6413	-3,4217	0,2734	-2,7804	1,0000	0
43	44	-23,1170	23,4768	7,0563	-12,1243	0,3598	-5,0679	1,0000	0
34	43	-5,0543	5,1170	9,6553	-14,0563	0,0627	-4,4010	1,0000	0
44	45	-39,4768	39,8582	14,7748	-15,6157	0,3814	-0,8409	1,0000	0

Continua...

Tabela 45 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
45	46	-41,4128	42,0636	-0,2411	-1,1102	0,6508	-1,3513	1,0000	0
46	47	-30,7944	31,1365	3,8452	-6,1562	0,3421	-2,3110	1,0000	0
46	48	-13,5570	13,6636	0,4627	-5,2746	0,1066	-4,8118	1,0000	0
47	49	-6,0318	6,0488	-8,7122	6,9959	0,0170	-1,7163	1,0000	0
42	49	-69,8909	73,3610	14,0146	-7,7502	3,4702	6,2644	1,0000	0
42	49	-69,8909	73,3610	14,0146	-7,7502	3,4702	6,2644	1,0000	0
45	49	-51,4454	53,1902	4,4112	-4,4755	1,7448	-0,0643	1,0000	0
48	49	-33,6636	33,8533	-5,7254	4,8743	0,1897	-0,8511	1,0000	0
49	50	48,1691	-47,6105	-2,9059	2,4179	0,5586	-0,4880	1,0000	0
49	51	59,0748	-57,5465	-0,1965	0,8008	1,5283	0,6043	1,0000	0
51	52	25,5134	-25,3882	-0,3004	-0,8025	0,1253	-1,1029	1,0000	0
52	53	7,3882	-7,3653	-4,1975	0,0486	0,0228	-4,1489	1,0000	0
53	54	-15,6347	15,7185	-11,0486	8,1470	0,0838	-2,9016	1,0000	0
49	54	31,9099	-31,2402	-4,9735	-0,4489	0,6697	-5,4224	1,0000	0
49	54	31,2540	-30,4859	-6,2514	0,8369	0,7680	-5,4145	1,0000	0
54	55	17,1078	-17,0619	-0,9216	-1,0566	0,0459	-1,9782	1,0000	0
54	56	73,9811	-73,8414	0,5186	-0,8205	0,1397	-0,3019	1,0000	0
55	56	-31,7239	31,7708	4,5654	-4,8214	0,0469	-0,2560	1,0000	0
56	57	-18,0773	18,1934	4,7344	-7,0057	0,1161	-2,2714	1,0000	0
50	57	30,6105	-30,1934	-6,4179	4,0057	0,4170	-2,4122	1,0000	0
56	58	-2,9383	2,9647	7,2984	-9,8035	0,0264	-2,5051	1,0000	0
51	58	15,0331	-14,9647	-8,5004	6,8035	0,0684	-1,6969	1,0000	0
54	59	-8,0817	8,1169	-6,4053	0,0543	0,0352	-6,3510	1,0000	0
56	59	-10,2057	10,2887	-4,9993	-0,9321	0,0830	-5,9314	1,0000	0
56	59	-10,7080	10,7966	-4,8451	-0,7161	0,0887	-5,5612	1,0000	0
55	59	-14,2142	14,3086	-6,3955	0,6940	0,0944	-5,7015	1,0000	0
59	60	-24,8915	25,0777	3,0943	-6,3844	0,1862	-3,2901	1,0000	0
59	61	-31,4352	31,7372	2,8716	-5,7754	0,3020	-2,9037	1,0000	0
60	61	-82,2652	82,4278	-5,2869	4,5086	0,1625	-0,7783	1,0000	0
60	62	-20,8124	20,8708	8,6713	-10,0198	0,0583	-1,3485	1,0000	0
61	62	-1,7818	1,7990	14,5585	-15,5607	0,0172	-1,0022	1,0000	0
63	59	132,4461	-132,4461	-1,8472	8,0229	0,0000	6,1757	1,0000	0
63	64	-132,4461	132,7242	1,8472	-22,2982	0,2781	-20,4510	1,0000	0
64	61	111,9903	-111,9903	57,1754	-53,4516	0,0000	3,7238	1,0188	3
38	65	-206,0705	209,5966	-24,2920	-54,1497	3,5261	-78,4417	1,0000	0
64	65	-244,7144	246,1886	-34,8772	9,2581	1,4741	-25,6191	1,0000	0
49	66	-107,7025	109,6422	17,8453	-10,7124	1,9397	7,1329	1,0000	0
49	66	-107,7025	109,6422	17,8453	-10,7124	1,9397	7,1329	1,0000	0
62	66	-56,4352	57,8769	6,6688	-6,5663	1,4417	0,1024	1,0000	0
62	67	-43,2345	43,7022	9,2357	-10,5151	0,4677	-1,2794	1,0000	0
65	66	-74,3089	74,3089	58,1219	-55,2968	0,0000	2,8252	1,0188	3
66	67	72,7575	-71,7022	-1,7102	3,5151	1,0553	1,8049	1,0000	0
65	68	-172,2873	172,6549	-20,5025	-46,9033	0,3676	-67,4058	1,0000	0
47	69	-59,1046	62,0590	14,8684	-13,0241	2,9543	1,8442	1,0000	0
49	69	-49,8182	52,2940	13,0057	-14,1120	2,4758	-1,1063	1,0000	0
68	69	-212,0249	212,0249	85,0384	-68,6816	0,0000	16,3568	1,0250	4
69	70	130,6161	-126,0608	-7,6071	13,4920	4,5553	5,8849	1,0000	0
24	70	-14,9587	14,9638	-0,0334	-10,1793	0,0051	-10,2127	1,0000	0
70	71	24,2254	-24,1643	-12,9757	12,2774	0,0611	-0,6983	1,0000	0
24	72	-5,9578	6,0012	5,2643	-10,4696	0,0434	-5,2053	1,0000	0
71	72	18,1612	-18,0012	-9,9268	5,7561	0,1600	-4,1706	1,0000	0
71	73	6,0031	-6,0000	-2,3507	1,0973	0,0031	-1,2534	1,0000	0
70	74	18,3512	-18,1713	10,2164	-13,1598	0,1799	-2,9435	1,0000	0
70	75	2,5204	-2,4466	11,4364	-14,9849	0,0738	-3,5486	1,0000	0
69	75	132,9706	-126,5932	-3,5263	9,3632	6,3774	5,8369	1,0000	0
74	75	-49,8287	50,1336	7,4864	-7,5452	0,3050	-0,0588	1,0000	0
76	77	-49,8510	51,0208	-14,3612	14,4091	1,1698	0,0479	1,0000	0
69	77	123,8564	-119,5854	-19,6249	22,0950	4,2711	2,4701	1,0000	0
75	77	-19,6953	19,9564	-10,3893	5,9715	0,2611	-4,4178	1,0000	0
77	78	57,1950	-57,0670	20,3347	-21,2846	0,1281	-0,9499	1,0000	0
78	79	-13,9330	13,9438	-4,7154	4,0619	0,0108	-0,6535	1,0000	0
77	80	-68,5270	69,2662	-9,2877	6,1772	0,7392	-3,1106	1,0000	0

Continua...

Tabela 46 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS - (Caso 118 barras - Mínimas Perdas).

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
77	80	-32,0297	32,3137	-6,4710	4,9640	0,2840	-1,5070	1,0000	0
79	80	-52,9438	53,3727	-14,3710	14,2439	0,4288	-0,1271	1,0000	0
68	81	39,3688	-39,3445	-48,6732	-41,8328	0,0243	-90,5060	1,0000	0
81	80	39,3445	-39,3445	41,8328	-40,7734	0,0000	1,0594	1,0125	2
77	82	30,9698	-30,7076	-5,0600	-3,0335	0,2622	-8,0935	1,0000	0
82	83	-5,5258	5,5320	-7,4515	3,3866	0,0062	-4,0650	1,0000	0
83	84	-8,5167	8,5618	0,9262	-3,6203	0,0451	-2,6941	1,0000	0
83	85	-17,0153	17,1318	-3,5244	0,1358	0,1165	-3,3885	1,0000	0
84	85	-19,5618	19,6705	-3,3797	2,2638	0,1087	-1,1159	1,0000	0
85	86	21,1482	-21,0047	0,2612	-2,7648	0,1434	-2,5036	1,0000	0
86	87	0,0047	0,0014	-7,2352	2,4270	0,0061	-4,8082	1,0000	0
85	88	-30,6955	30,8768	5,8321	-7,9383	0,1813	-2,1062	1,0000	0
85	89	-51,2550	51,8272	-0,5018	-0,5790	0,5723	-1,0808	1,0000	0
88	89	-78,8768	79,6651	-2,0617	3,9518	0,7883	1,8902	1,0000	0
89	90	52,8723	-51,5825	-4,4589	3,3122	1,2898	-1,1467	1,0000	0
89	90	100,6261	-98,4812	-5,3203	2,6057	2,1449	-2,7147	1,0000	0
90	91	-12,9363	12,9756	-1,8656	-0,3330	0,0393	-2,1985	1,0000	0
89	92	118,0402	-116,8125	-3,3786	3,5379	1,2277	0,1593	1,0000	0
89	92	37,2357	-36,7494	-4,2861	1,6317	0,4863	-2,6544	1,0000	0
91	92	-22,9756	23,1651	0,8138	-3,7785	0,1895	-2,9647	1,0000	0
92	93	26,2541	-26,0884	3,2344	-5,0736	0,1657	-1,8392	1,0000	0
92	94	20,6867	-20,4983	-0,1587	-3,6524	0,1884	-3,8111	1,0000	0
93	94	14,0884	-14,0474	-1,9264	0,0335	0,0410	-1,8929	1,0000	0
94	95	36,0386	-35,8442	16,3958	-16,9406	0,1943	-0,5448	1,0000	0
80	96	28,0379	-27,7625	6,2563	-10,2635	0,2755	-4,0071	1,0000	0
82	96	-17,7666	17,8236	4,9576	-10,6050	0,0570	-5,6473	1,0000	0
94	96	14,2214	-14,1709	-1,3762	-0,9327	0,0505	-2,3090	1,0000	0
80	97	35,3784	-35,1492	10,9297	-12,5638	0,2292	-1,6341	1,0000	0
80	98	25,6522	-25,5120	-0,0315	-2,5180	0,1402	-2,5495	1,0000	0
80	99	16,3008	-16,1926	-4,3017	-1,3061	0,1082	-5,6077	1,0000	0
92	100	2,4943	-2,4818	-6,4760	1,2760	0,0124	-5,2000	1,0000	0
94	100	-45,7143	46,1554	-27,4006	22,1880	0,4412	-5,2126	1,0000	0
95	96	-6,1558	6,1905	-14,0594	12,6041	0,0348	-1,4554	1,0000	0
96	97	-20,0808	20,1492	-5,8029	3,5638	0,0684	-2,2390	1,0000	0
98	100	-8,4880	8,5168	-5,4820	0,3043	0,0288	-5,1777	1,0000	0
99	100	-25,8074	25,9152	-1,9519	0,0238	0,1078	-1,9281	1,0000	0
100	101	11,1541	-11,0941	9,0654	-12,4227	0,0600	-3,3573	1,0000	0
92	102	15,9617	-15,9329	1,0028	-2,4838	0,0288	-1,4810	1,0000	0
101	102	-10,9059	10,9329	-2,5773	-0,5162	0,0271	-3,0935	1,0000	0
100	103	45,2925	-44,9843	-13,6431	8,6393	0,3082	-5,0038	1,0000	0
100	104	41,0247	-40,3492	-3,0333	0,0929	0,6755	-2,9405	1,0000	0
103	104	36,6425	-36,0838	-3,2727	0,6662	0,5586	-2,6065	1,0000	0
103	105	44,2023	-43,2662	-4,9683	3,3066	0,9360	-1,6617	1,0000	0
100	106	47,1001	-45,9045	-2,0649	-0,2135	1,1956	-2,2784	1,0000	0
104	105	38,4330	-38,2982	-2,8061	2,2437	0,1348	-0,5624	1,0000	0
105	106	19,4546	-19,3931	9,1682	-10,4758	0,0615	-1,3075	1,0000	0
105	107	28,3438	-27,9522	-2,4112	-1,3033	0,3916	-3,7145	1,0000	0
105	108	2,7661	-2,7641	-1,7439	-0,2556	0,0020	-1,9995	1,0000	0
106	107	22,2976	-22,0478	-5,3108	1,1450	0,2498	-4,1657	1,0000	0
108	109	0,7641	-0,7641	-0,7444	-0,0816	0,0001	-0,8259	1,0000	0
103	110	39,1392	-38,6054	-2,2744	-0,3525	0,5339	-2,6269	1,0000	0
109	110	-7,2359	7,2502	-2,9184	0,7548	0,0142	-2,1637	1,0000	0
110	111	-76,7227	77,9113	3,7781	-1,9163	1,1887	1,8618	1,0000	0
110	112	69,0778	-68,0000	-4,6389	0,7443	1,0778	-3,8946	1,0000	0
17	113	-0,9766	0,9800	6,0282	-6,8757	0,0035	-0,8475	1,0000	0
32	113	7,0397	-6,9800	-10,3577	4,8282	0,0597	-5,5295	1,0000	0
32	114	10,1411	-10,1260	3,5323	-5,2388	0,0151	-1,7065	1,0000	0
27	115	19,9356	-19,8742	2,5875	-4,4625	0,0614	-1,8750	1,0000	0
114	115	2,1260	-2,1258	2,2388	-2,5375	0,0002	-0,2987	1,0000	0
68	116	0,0012	0,0000	10,5381	-28,9378	0,0012	-18,3998	1,0000	0
12	117	20,1314	-20,0000	4,5922	-8,0000	0,1314	-3,4078	1,0000	0
75	118	51,6014	-51,2035	12,5563	-12,4583	0,3979	0,0980	1,0000	0
76	118	-18,1490	18,2035	1,3604	-2,5417	0,0546	-1,1814	1,0000	0

Tabela 47 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínimo Perdas).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	4364,841335
Perdas Ativas (MW)	75,2029
Poluição (ton/h)	93453,2476

Tabela 48 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
1	0,9762	-21,4060	0,0000	6,2203	0,0000
2	0,9910	-20,1766	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,9850	-20,7886	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0094	-18,5285	0,0000	34,6194	0,0000
5	1,0090	-18,2307	0,0000	0,0000	1,0000
6	1,0055	-19,5091	0,0000	24,8134	0,0000
7	1,0059	-19,3804	0,0000	0,0000	0,0000
8	0,9897	-15,5488	0,0000	-136,3625	0,0000
9	1,0056	-11,8574	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,9885	-7,7750	214,7944	-122,2350	0,0000
11	1,0012	-19,3750	0,0000	0,0000	0,0000
12	1,0087	-18,8116	277,0347	55,0944	0,0000
13	0,9870	-20,9863	0,0000	0,0000	0,0000
14	1,0042	-20,1073	0,0000	0,0000	0,0000
15	0,9965	-22,0788	0,0000	21,1800	0,0000
16	1,0023	-19,9189	0,0000	0,0000	0,0000
17	1,0123	-19,9279	0,0000	0,0000	0,0000
18	1,0009	-22,0533	0,0000	40,0859	0,0000
19	0,9942	-22,4165	0,0000	15,7535	0,0000
20	0,9840	-21,5865	0,0000	0,0000	0,0000
21	0,9808	-20,0741	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,9871	-17,6189	0,0000	0,0000	0,0000
23	1,0090	-12,8238	0,0000	0,0000	0,0000
24	1,0142	-12,7091	0,0000	17,5169	0,0000
25	1,0176	-5,9972	255,4055	122,2280	0,0000
26	1,0135	-5,2621	250,1174	-172,8796	0,0000
27	1,0011	-18,7328	0,0000	47,2045	0,0000
28	0,9881	-20,1505	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,9821	-20,8527	0,0000	0,0000	0,0000
30	1,0034	-15,7928	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,9831	-20,6405	14,0129	2,6865	0,0000
32	0,9976	-19,1691	0,0000	30,2977	0,0000
33	0,9938	-22,5674	0,0000	0,0000	0,0000
34	1,0059	-21,8515	0,0000	15,4762	1,0000
35	1,0021	-22,2928	0,0000	0,0000	0,0000
36	1,0023	-22,2988	0,0000	15,5250	0,0000
37	1,0089	-21,3849	0,0000	0,0000	1,0000
38	1,0002	-16,6218	0,0000	0,0000	0,0000
39	0,9939	-24,4055	0,0000	0,0000	0,0000
40	0,9967	-25,2999	0,0000	52,6375	0,0000
41	0,9897	-25,5129	0,0000	0,0000	0,0000
42	0,9968	-23,3808	0,0000	40,5953	0,0000
43	0,9917	-21,1606	0,0000	0,0000	0,0000
44	0,9889	-17,6178	0,0000	0,0000	1,0000
45	0,9876	-15,3891	0,0000	0,0000	1,0000
46	1,0110	-12,1867	29,2884	15,3955	1,0000
47	1,0107	-9,9082	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,0080	-10,6641	0,0000	0,0000	1,0000
49	1,0151	-9,7676	221,4352	69,1998	0,0000
50	1,0037	-11,7623	0,0000	0,0000	0,0000
51	0,9859	-14,2064	0,0000	0,0000	0,0000
52	0,9804	-15,0735	0,0000	0,0000	0,0000
53	0,9808	-15,8051	0,0000	0,0000	0,0000
54	0,9971	-14,8096	140,5789	44,8610	0,0000
55	0,9932	-15,4299	0,0000	14,8002	0,0000
56	0,9943	-15,1649	0,0000	7,0576	0,0000
57	0,9953	-14,1184	0,0000	0,0000	0,0000
58	0,9873	-14,8993	0,0000	0,0000	0,0000

continua...

Tabela 49 – Resultados de tensão e ângulo nas barras pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).

Barra	V_i [pu]	θ_i [graus]	P_i^{ger} [MW]	Q_i^{ger} [MVar]	ω_i
59	1,0104	-13,3256	148,1702	126,0330	0,0000
60	1,0019	-11,0975	0,0000	0,0000	0,0000
61	1,0038	-10,4381	26,9047	-34,3617	0,0000
62	0,9998	-10,4746	0,0000	3,3139	0,0000
63	1,0021	-10,5013	0,0000	0,0000	0,0000
64	1,0054	-9,0160	0,0000	0,0000	0,0000
65	1,0160	-5,2098	218,5271	4,6278	0,0000
66	1,0191	-3,9318	448,0955	-34,1751	0,0000
67	1,0028	-7,7741	0,0000	0,0000	0,0000
68	1,0115	-3,8349	0,0000	0,0000	0,0000
69	1,0196	0,0000	683,1219	-79,3580	0,0000
70	0,9879	-9,2876	0,0000	20,8947	0,0000
71	0,9940	-9,8910	0,0000	0,0000	0,0000
72	0,9940	-11,8081	0,0000	-11,5114	0,0000
73	1,0008	-10,1277	0,0000	15,4073	0,0000
74	0,9611	-10,3841	0,0000	3,1991	1,0000
75	0,9663	-9,1059	0,0000	0,0000	0,0000
76	0,9475	-11,0585	0,0000	16,4110	0,0000
77	0,9998	-6,9413	0,0000	60,0233	0,0000
78	0,9955	-7,2984	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,9982	-7,1021	0,0000	0,0000	1,0000
80	1,0202	-5,0985	364,8248	53,2770	0,0000
81	1,0103	-4,2894	0,0000	0,0000	0,0000
82	0,9897	-8,4719	0,0000	0,0000	1,0000
83	0,9914	-8,3745	0,0000	0,0000	1,0000
84	0,9930	-7,6242	0,0000	0,0000	0,0000
85	1,0005	-6,9460	0,0000	15,3875	0,0000
86	0,9867	-8,2376	0,0000	0,0000	0,0000
87	0,9897	-8,0866	1,4085	-0,9543	0,0000
88	1,0053	-5,1742	0,0000	0,0000	0,0000
89	1,0225	-2,1169	441,4614	33,7689	0,0000
90	0,9916	-7,6421	0,0000	33,3160	0,0000
91	0,9930	-6,9921	0,0000	-8,0851	0,0000
92	1,0065	-5,4085	0,0000	1,6790	0,0000
93	0,9960	-6,6226	0,0000	0,0000	0,0000
94	0,9934	-7,2401	0,0000	0,0000	0,0000
95	0,9815	-7,9947	0,0000	0,0000	0,0000
96	0,9903	-7,8900	0,0000	0,0000	0,0000
97	1,0002	-6,8666	0,0000	0,0000	0,0000
98	1,0104	-6,7107	0,0000	0,0000	0,0000
99	1,0070	-7,1251	0,0000	-10,9666	0,0000
100	1,0155	-6,0868	260,1432	48,1575	0,0000
101	0,9990	-6,6549	0,0000	0,0000	0,0000
102	1,0033	-5,9238	0,0000	0,0000	0,0000
103	1,0101	-7,6692	87,2764	16,0098	0,0000
104	0,9924	-10,8519	0,0000	12,0489	0,0000
105	0,9916	-11,7367	0,0000	12,0795	1,0000
106	0,9863	-12,2982	0,0000	0,0000	0,0000
107	0,9891	-14,9469	0,0000	23,4312	1,0000
108	0,9906	-11,8198	0,0000	0,0000	0,0000
109	0,9903	-11,8187	0,0000	0,0000	0,0000
110	0,9930	-11,4870	0,0000	9,3599	1,0000
111	1,0059	-7,9473	80,5658	-4,8393	0,0000
112	0,9878	-14,3187	0,0000	29,9694	0,0000
113	1,0162	-20,0264	0,0000	21,1545	0,0000
114	0,9943	-19,5116	0,0000	0,0000	0,0000
115	0,9941	-19,5245	0,0000	0,0000	0,0000
116	1,0089	-3,8226	0,0000	-72,7783	0,0000
117	0,9929	-20,2963	0,0000	0,0000	0,0000
118	0,9509	-10,4757	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 50 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 1.

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
1	2	-22,9871	23,1720	-8,5025	6,6549	0,1849	-1,8476	1,0000	0
1	3	-28,0129	28,1379	-12,2772	11,6475	0,1250	-0,6297	1,0000	0
4	5	-62,2608	62,3337	18,3700	-18,2535	0,0729	0,1165	1,0000	0
3	5	-43,5798	44,0829	-12,6184	12,0495	0,5031	-0,5689	1,0000	0
5	6	41,4420	-41,2407	-2,8856	2,3521	0,2013	-0,5335	1,0000	0
6	7	-10,7593	10,7646	0,4613	-0,9936	0,0053	-0,5324	1,0000	0
8	9	-212,3314	213,4741	-84,9530	-16,4282	1,1427	-101,3812	1,0000	0
8	5	178,2873	-178,2873	1,2256	7,1237	0,0000	8,3492	1,0188	3
9	10	-213,4741	214,7944	16,4282	-122,2350	1,3203	-105,8068	1,0000	0
4	11	23,2608	-23,1444	4,2494	-5,6327	0,1164	-1,3833	1,0000	0
5	11	30,4287	-30,2424	1,9659	-3,0960	0,1862	-1,1301	1,0000	0
11	12	-56,9624	57,1806	-21,0170	21,2289	0,2182	0,2118	1,0000	0
2	12	-43,1720	43,5691	-15,6549	15,3913	0,3971	-0,2635	1,0000	0
3	12	-23,5580	23,8597	-9,0291	5,9914	0,3017	-3,0377	1,0000	0
7	12	-29,7646	29,8401	-1,0064	0,4174	0,0755	-0,5889	1,0000	0
11	13	40,3492	-39,9747	6,7458	-7,3693	0,3745	-0,6235	1,0000	0
12	14	31,5496	-31,3376	-3,7048	2,5625	0,2120	-1,1423	1,0000	0
13	15	5,9747	-5,9237	-8,6307	2,6335	0,0510	-5,9972	1,0000	0
14	15	17,3376	-17,1596	-3,5625	-0,8773	0,1780	-4,4398	1,0000	0
12	16	23,8891	-23,7695	0,7328	-2,4259	0,1196	-1,6931	1,0000	0
15	17	-88,9233	89,9821	-9,7904	8,8165	1,0588	-0,9739	1,0000	0
16	17	-1,2305	1,2436	-7,5741	2,8974	0,0131	-4,6767	1,0000	0
17	18	75,8155	-75,1216	5,1217	-3,5877	0,6940	1,5340	1,0000	0
18	19	15,1216	-15,0843	9,6737	-10,6458	0,0373	-0,9722	1,0000	0
19	20	-9,7743	9,8287	9,3789	-12,0417	0,0544	-2,6628	1,0000	0
15	19	15,2029	-15,1748	0,7497	-1,6579	0,0281	-0,9082	1,0000	0
20	21	-27,8287	27,9943	9,0417	-10,3579	0,1656	-1,3162	1,0000	0
21	22	-41,9943	42,3801	2,3579	-2,9487	0,3859	-0,5908	1,0000	0
22	23	-52,3802	53,3431	-2,0513	2,5035	0,9630	0,4522	1,0000	0
23	24	-6,6282	6,6447	-11,5149	6,4790	0,0165	-5,0359	1,0000	0
23	25	-147,3170	150,7533	22,4659	-13,7151	3,4363	8,7508	1,0000	0
26	25	32,9098	-32,9098	-137,8985	146,1802	-0,0000	8,2817	0,9500	-8
25	27	137,5620	-131,7509	-10,2372	22,0513	5,8111	11,8141	1,0000	0
27	28	30,5637	-30,3710	7,5876	-8,8632	0,1927	-1,2756	1,0000	0
28	29	13,3710	-13,3254	1,8632	-3,9913	0,0456	-2,1281	1,0000	0
30	17	192,3127	-192,3127	33,1232	-18,9832	0,0000	14,1400	1,0188	3
8	30	6,0441	-6,0093	-52,6351	1,9938	0,0348	-50,6412	1,0000	0
26	30	217,2076	-213,5274	-34,9811	-17,7536	3,6802	-52,7348	1,0000	0
17	31	12,5091	-12,3308	13,0927	-16,4771	0,1784	-3,3845	1,0000	0
29	31	-10,6746	10,6874	-0,0087	-0,7535	0,0128	-0,7622	1,0000	0
23	32	93,6021	-90,8396	-16,4544	14,6946	2,7625	-1,7599	1,0000	0
31	32	-27,3437	27,5849	-7,0828	5,4178	0,2411	-1,6650	1,0000	0
27	32	10,4945	-10,4688	0,4205	-2,2596	0,0256	-1,8391	1,0000	0
15	33	6,8037	-6,7860	-1,5355	-1,5696	0,0177	-3,1052	1,0000	0
19	34	-4,9666	4,9932	-6,3216	0,0881	0,0266	-6,2335	1,0000	0
35	36	0,5405	-0,5404	-2,4176	2,1490	0,0001	-0,2686	1,0000	0
35	37	-33,5405	33,6676	-6,5824	5,8239	0,1271	-0,7585	1,0000	0
33	37	-16,2140	16,3377	-7,4304	4,1836	0,1237	-3,2468	1,0000	0
34	36	30,5410	-30,4596	3,3017	-3,6240	0,0814	-0,3222	1,0000	0
34	37	-89,7608	89,9658	-7,3071	7,0613	0,2050	-0,2458	1,0000	0
38	37	229,0171	-229,0171	54,1026	-34,3440	-0,0000	19,7586	1,0250	4
37	39	49,9729	-49,1853	-0,9594	0,8527	0,7877	-0,1067	1,0000	0
37	40	39,0731	-38,1686	-7,2108	5,5498	0,9045	-1,6610	1,0000	0
30	38	27,2240	-27,1891	-17,3634	-24,5825	0,0348	-41,9459	1,0000	0
39	40	22,1853	-22,0707	-11,8527	10,6920	0,1146	-1,1607	1,0000	0
40	41	10,8283	-10,7933	10,4612	-11,5491	0,0350	-1,0879	1,0000	0
40	42	-16,5890	16,7581	2,9345	-7,0066	0,1691	-4,0721	1,0000	0
41	42	-26,2067	26,4985	1,5491	-3,9820	0,2919	-2,4329	1,0000	0
43	44	-22,8211	23,1785	4,5818	-9,0906	0,3573	-4,5088	1,0000	0
34	43	-4,7735	4,8211	7,5596	-11,5818	0,0477	-4,0222	1,0000	0
44	45	-39,1785	39,5629	10,8699	-11,5115	0,3844	-0,6416	1,0000	0
45	46	-42,1581	42,8918	-5,0842	4,2557	0,7338	-0,8285	1,0000	0

continua...

Tabela 51 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 2.

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	Q_{ji} [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
46	47	-29,1199	29,4693	7,9758	-10,0371	0,3494	-2,0613	1,0000	0
46	48	-12,4836	12,5950	3,3858	-7,8456	0,1114	-4,4598	1,0000	0
47	49	-5,6789	5,6904	-6,2173	4,6091	0,0115	-1,6082	1,0000	0
42	49	-69,6283	73,3648	14,2919	-6,1166	3,7364	8,1753	1,0000	0
42	49	-69,6283	73,3648	14,2919	-6,1166	3,7364	8,1753	1,0000	0
45	49	-50,4048	52,2162	4,3496	-3,8769	1,8114	0,4726	1,0000	0
48	49	-32,5950	32,7833	-3,1544	2,3984	0,1883	-0,7560	1,0000	0
49	50	46,9916	-46,4194	-1,4507	1,1527	0,5722	-0,2980	1,0000	0
49	51	57,7288	-56,1518	1,5843	-0,5633	1,5770	1,0209	1,0000	0
51	52	25,1619	-25,0296	0,1486	-1,1146	0,1324	-0,9660	1,0000	0
52	53	7,0296	-7,0072	-3,8854	0,0739	0,0224	-3,8115	1,0000	0
53	54	-15,9928	16,0879	-11,0739	8,4826	0,0950	-2,5913	1,0000	0
49	54	30,7591	-30,0889	-3,8957	-0,9225	0,6702	-4,8182	1,0000	0
49	54	30,1583	-29,3897	-5,1436	0,3268	0,7686	-4,8168	1,0000	0
54	55	15,6265	-15,5844	0,9243	-2,7485	0,0421	-1,8243	1,0000	0
54	56	67,3804	-67,2518	10,0195	-10,2989	0,1286	-0,2793	1,0000	0
55	56	-29,5266	29,5700	2,0349	-2,2700	0,0434	-0,2351	1,0000	0
56	57	-16,8984	17,0065	3,9123	-6,0029	0,1081	-2,0905	1,0000	0
50	57	29,4194	-29,0065	-5,1527	3,0029	0,4129	-2,1498	1,0000	0
56	58	-1,9038	1,9267	6,7118	-9,0229	0,0230	-2,3111	1,0000	0
51	58	13,9899	-13,9267	-7,5852	6,0229	0,0632	-1,5623	1,0000	0
54	59	-12,0372	12,1151	-5,9697	0,2988	0,0778	-5,6709	1,0000	0
56	59	-13,4303	13,5834	-4,5842	-0,6674	0,1531	-5,2516	1,0000	0
56	59	-14,0857	14,2494	-4,4134	-0,4853	0,1637	-4,8987	1,0000	0
55	59	-17,8890	18,0493	-6,4862	1,5493	0,1603	-4,9369	1,0000	0
59	60	-24,5580	24,7887	9,9102	-12,6618	0,2307	-2,7515	1,0000	0
59	61	-31,3956	31,7601	10,2177	-12,4865	0,3645	-2,2688	1,0000	0
60	61	-85,1057	85,2965	2,5180	-3,0069	0,1908	-0,4889	1,0000	0
60	62	-17,6829	17,7289	7,1438	-8,4048	0,0459	-1,2610	1,0000	0
61	62	3,8875	-3,8781	9,4773	-10,4180	0,0094	-0,9408	1,0000	0
63	59	130,8734	-130,8734	14,2887	-7,7904	-0,0000	6,4983	1,0125	2
63	64	-130,8734	131,1669	-14,2887	-4,0610	0,2936	-18,3496	1,0000	0
64	61	94,0394	-94,0394	30,9113	-28,3455	0,0000	2,5658	1,0063	1
38	65	-201,8280	205,5437	-29,5201	-36,1179	3,7157	-65,6380	1,0000	0
64	65	-225,2063	226,5575	-26,8504	3,2033	1,3512	-23,6471	1,0000	0
49	66	-109,9581	112,1623	21,7106	-13,0226	2,2042	8,6880	1,0000	0
49	66	-109,9581	112,1623	21,7106	-13,0226	2,2042	8,6880	1,0000	0
62	66	-52,0019	53,3215	2,7756	-2,6976	1,3195	0,0780	1,0000	0
62	67	-38,8488	39,2507	5,3611	-6,6465	0,4019	-1,2853	1,0000	0
65	66	-63,1910	63,1910	27,2667	-25,6105	0,0000	1,6562	1,0125	2
66	67	68,2584	-67,2507	2,1781	-0,3535	1,0076	1,8246	1,0000	0
65	68	-150,3832	150,7105	10,2756	-72,0448	0,3273	-61,7692	1,0000	0
47	69	-57,7904	60,8760	16,2544	-13,4067	3,0856	2,8477	1,0000	0
49	69	-48,7058	51,2848	13,7871	-13,8737	2,5790	-0,0866	1,0000	0
68	69	-191,0743	191,0743	54,6526	-41,0575	-0,0000	13,5951	1,0250	4
69	70	129,2443	-124,4155	-1,0674	9,2151	4,8288	8,1476	1,0000	0
24	70	-14,4939	14,4994	1,7506	-10,9359	0,0056	-9,1854	1,0000	0
70	71	23,4946	-23,3982	-23,1141	22,6399	0,0964	-0,4742	1,0000	0
24	72	-5,1509	5,2295	9,2873	-13,8923	0,0786	-4,6051	1,0000	0
71	72	17,3729	-17,2295	-6,1930	2,3809	0,1434	-3,8121	1,0000	0
71	73	6,0252	-6,0000	-16,4469	15,4073	0,0252	-1,0395	1,0000	0
70	74	18,1824	-17,9580	13,0350	-15,4937	0,2244	-2,4587	1,0000	0
70	75	2,2391	-2,1453	12,6947	-15,8233	0,0938	-3,1286	1,0000	0
69	75	131,4643	-124,6833	4,5821	3,6101	6,7809	8,1922	1,0000	0
74	75	-50,0420	50,3769	2,7762	-2,6311	0,3349	0,1452	1,0000	0
76	77	-50,9277	52,3463	-18,2251	19,4626	1,4186	1,2375	1,0000	0
69	77	119,1782	-114,9313	-14,5347	17,8330	4,2469	3,2983	1,0000	0
75	77	-21,1118	21,4568	-11,8265	8,1617	0,3450	-3,6648	1,0000	0
77	78	55,5372	-55,4088	17,5191	-18,3537	0,1284	-0,8346	1,0000	0
78	79	-15,5912	15,6075	-7,6463	7,0754	0,0163	-0,5708	1,0000	0
77	80	-72,9794	73,9248	-17,6281	15,5099	0,9454	-2,1182	1,0000	0
77	80	-33,8656	34,2288	-10,5258	9,4969	0,3632	-1,0288	1,0000	0

continua...

Tabela 52 – Fluxo de potência ativa e reativa, perdas e ângulos pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição) - Parte 3.

Barra i	Barra j	P_{ij} [MW]	P_{ji} [MW]	Q_{ij} [MVar]	j_i [MVar]	P_{perdas} [MW]	Q_{perdas} [MVar]	Tap	Pos Tap
79	80	-54,6075	55,1264	-19,1491	19,5860	0,5189	0,4369	1,0000	0
68	81	40,3500	-40,3220	-38,8149	-43,4348	0,0280	-82,2498	1,0000	0
81	80	40,3220	-40,3220	43,4348	-42,2230	0,0000	1,2118	1,0250	4
77	82	31,4360	-31,1409	-2,7993	-4,4449	0,2951	-7,2442	1,0000	0
82	83	-5,4132	5,4175	-4,6726	0,9620	0,0043	-3,7106	1,0000	0
83	84	-8,4231	8,4733	1,5657	-3,9994	0,0502	-2,4337	1,0000	0
83	85	-16,9943	17,1211	-2,6997	-0,3159	0,1268	-3,0155	1,0000	0
84	85	-19,4733	19,5912	-3,0006	2,0248	0,1179	-0,9758	1,0000	0
85	86	19,7405	-19,5925	4,4107	-6,6158	0,1480	-2,2051	1,0000	0
86	87	-1,4075	1,4085	-3,3842	-0,9543	0,0010	-4,3385	1,0000	0
85	88	-30,1643	30,3466	0,2852	-2,1315	0,1823	-1,8463	1,0000	0
85	89	-50,2886	50,8956	-6,0174	5,6017	0,6070	-0,4157	1,0000	0
88	89	-78,3466	79,1973	-7,8685	10,2377	0,8507	2,3692	1,0000	0
89	90	53,2108	-51,7972	1,9022	-2,1277	1,4136	-0,2255	1,0000	0
89	90	100,8653	-98,5146	6,8182	-7,7232	2,3507	-0,9049	1,0000	0
90	91	-12,6882	12,7311	1,1669	-3,1330	0,0429	-1,9661	1,0000	0
89	92	119,4222	-118,0575	9,3934	-8,0729	1,3647	1,3205	1,0000	0
89	92	37,8702	-37,3296	-0,1844	-1,9024	0,5406	-2,0868	1,0000	0
91	92	-22,7311	22,9383	-4,9521	2,3663	0,2072	-2,5858	1,0000	0
92	93	26,4992	-26,3145	3,6653	-5,2440	0,1846	-1,5787	1,0000	0
92	94	20,9315	-20,7209	0,2575	-3,6260	0,2105	-3,3684	1,0000	0
93	94	14,3145	-14,2683	-1,7560	0,0516	0,0462	-1,7044	1,0000	0
94	95	34,7467	-34,5467	16,4145	-16,8394	0,2000	-0,4249	1,0000	0
80	96	29,3170	-28,9763	9,1086	-12,3598	0,3407	-3,2512	1,0000	0
82	96	-17,4459	17,4994	1,7079	-6,8645	0,0535	-5,1566	1,0000	0
94	96	12,7534	-12,7091	-1,4139	-0,7054	0,0444	-2,1194	1,0000	0
80	97	36,6743	-36,3975	13,8270	-15,0062	0,2769	-1,1792	1,0000	0
80	98	27,6255	-27,4481	2,0265	-4,1699	0,1773	-2,1434	1,0000	0
80	99	18,2500	-18,1014	-0,0549	-4,8803	0,1487	-4,9352	1,0000	0
92	100	3,2768	-3,2609	-6,1463	1,3938	0,0159	-4,7525	1,0000	0
94	100	-42,5109	42,9446	-27,4262	22,7447	0,4337	-4,6815	1,0000	0
95	96	-7,4533	7,4953	-14,1606	12,8622	0,0420	-1,2984	1,0000	0
96	97	-21,3093	21,3975	-7,9324	6,0062	0,0882	-2,2390	1,0000	0
98	100	-6,5519	6,5693	-3,8301	-0,9754	0,0175	-4,8055	1,0000	0
99	100	-23,8986	24,0044	-6,0863	4,3551	0,1058	-1,7312	1,0000	0
100	101	10,3887	-10,3271	9,3276	-12,3751	0,0616	-3,0475	1,0000	0
92	102	16,7414	-16,7068	1,5115	-2,8325	0,0346	-1,3210	1,0000	0
101	102	-11,6729	11,7068	-2,6249	-0,1675	0,0339	-2,7925	1,0000	0
100	103	52,5156	-52,0843	-7,4741	3,3914	0,4313	-4,0827	1,0000	0
100	104	41,9089	-41,1340	1,1384	-3,0874	0,7748	-1,9490	1,0000	0
103	104	35,6438	-35,0622	-0,3513	-1,7521	0,5817	-2,1033	1,0000	0
103	105	43,3076	-42,3233	-3,3365	2,2391	0,9844	-1,0974	1,0000	0
100	106	48,0725	-46,7120	-0,3526	-0,7100	1,3605	-1,0627	1,0000	0
104	105	38,1962	-38,0431	-38,1116	7,7235	0,1531	-0,3881	1,0000	0
105	106	18,8126	-18,7586	4,3341	-5,5256	0,0540	-1,1915	1,0000	0
105	107	28,2853	-27,8349	-8,2906	5,2163	0,4504	-3,0743	1,0000	0
105	108	2,2684	-2,2669	-0,2597	-1,5477	0,0015	-1,8074	1,0000	0
106	107	22,4706	-22,1651	-9,7644	6,2149	0,3055	-3,5494	1,0000	0
108	109	0,2669	-0,2668	0,5477	-1,2930	0,0001	-0,7453	1,0000	0
103	110	37,4092	-36,8707	0,3061	-2,4312	0,5385	-2,1251	1,0000	0
109	110	-7,7332	7,7502	-1,7070	-0,2325	0,0171	-1,9396	1,0000	0
110	111	-79,1513	80,5658	7,6958	-4,8393	1,4145	2,8565	1,0000	0
110	112	69,2718	-68,0000	-19,7556	16,9694	1,2718	-2,7862	1,0000	0
17	113	1,7623	-1,7456	-13,9451	13,2099	0,0166	-0,7352	1,0000	0
32	113	4,3323	-4,2544	-12,9395	7,9446	0,0779	-4,9949	1,0000	0
32	114	10,3912	-10,3752	2,3844	-3,9266	0,0160	-1,5422	1,0000	0
27	115	19,6927	-19,6249	4,1450	-5,8013	0,0678	-1,6563	1,0000	0
114	115	2,3752	-2,3751	0,9266	-1,1987	0,0002	-0,2721	1,0000	0
68	116	0,0139	0,0000	56,2072	-72,7783	0,0139	-16,5711	1,0000	0
12	117	20,1465	-20,0000	5,0374	-8,0000	0,1465	-2,9627	1,0000	0
75	118	50,5636	-50,1257	15,6708	-15,3191	0,4379	0,3517	1,0000	0
76	118	-17,0723	17,1257	-1,3639	0,3191	0,0533	-1,0448	1,0000	0

Tabela 53 – Resumo dos resultados pelo algoritmo MOTS (Caso 118 barras - Mínima Poluição).

Parâmetro	Valor
Custo de Geração (US\$/h)	4237,234003
Perdas Ativas (MW)	81,2192
Poluição (ton/h)	50,3876

Anexos

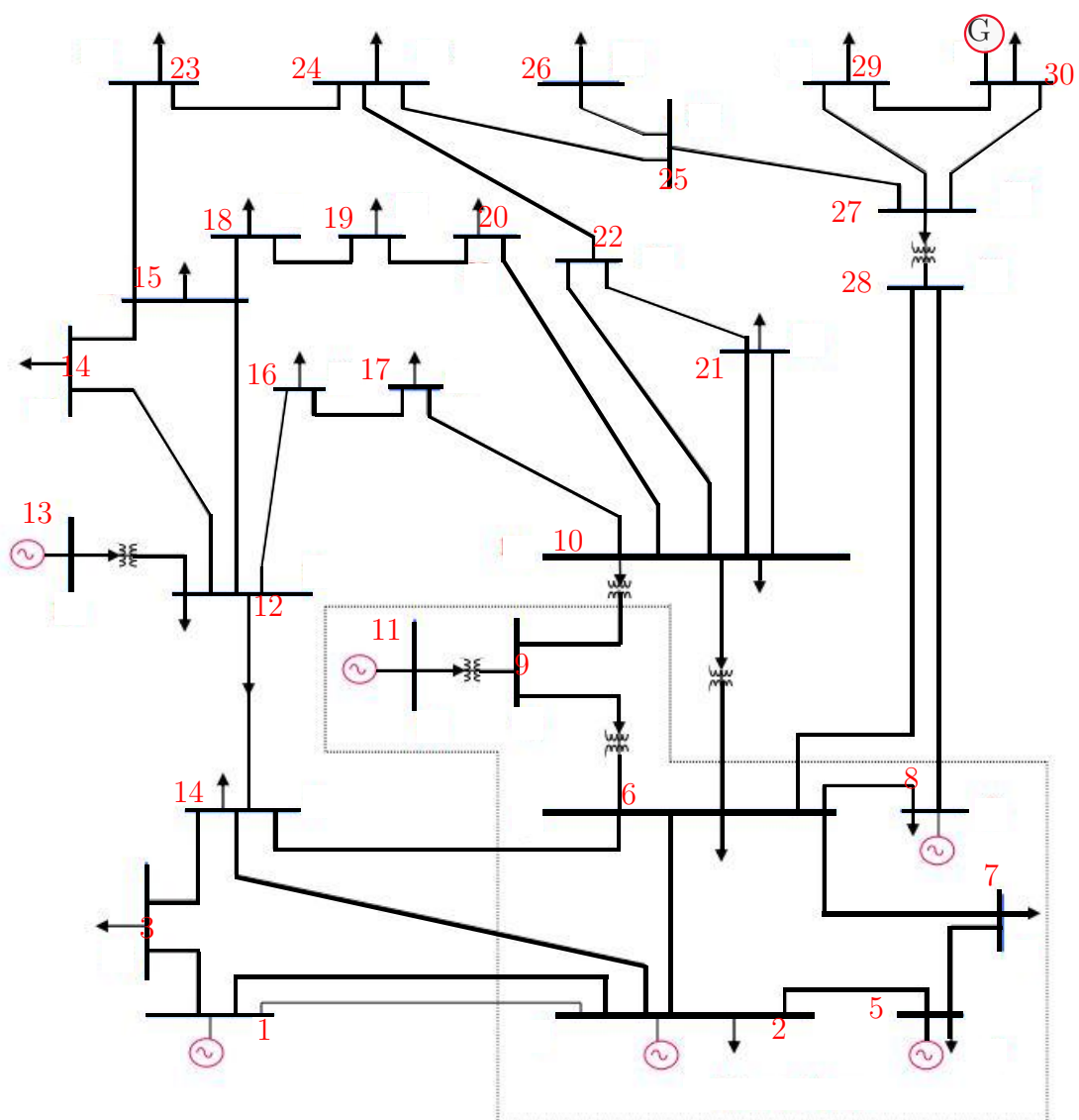
**Figura 18** – Sistema de 30 Barras

Tabela 54 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.

Barra	Tipo de Barra	P_d [MW]	Q_d [MVar]	g_{sh} [pu]	b_{sh} [pu]	V [pu]	θ [graus]
1	Ref	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0600	0,0000
2	PV	21,7	12,7	0,0	0,0	1,0359	-4,11149
3	PQ	2,4	1,2	0,0	0,0	1,0150	-6,85372
4	PQ	7,6	1,6	0,0	0,0	1,0045	-8,44573
5	PV	94,2	19,0	0,0	0,0	0,9975	-13,13219
6	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0017	-10,15670
7	PQ	22,8	10,9	0,0	0,0	0,9921	-11,91709
8	PV	30,0	30,0	0,0	0,0	1,0024	-10,93464
9	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0367	-13,26617
10	PQ	5,8	2,0	0,0	0,19	1,0322	-14,89731
11	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0600	-13,26617
12	PQ	11,2	7,5	0,0	0,0	1,0462	-14,18876
13	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0600	-14,18876
14	PQ	6,2	1,6	0,0	0,0	1,0310	-15,09457
15	PQ	8,2	2,5	0,0	0,0	1,0262	-15,17833
16	PQ	3,5	1,8	0,0	0,0	1,0326	-14,75320
17	PQ	9,0	5,8	0,0	0,0	1,0272	-15,07477
18	PQ	3,2	0,9	0,0	0,0	1,0160	-15,79034
19	PQ	9,5	3,4	0,0	0,0	1,0132	-15,95831
20	PQ	2,2	0,7	0,0	0,0	1,0171	-15,75155
21	PQ	17,5	11,2	0,0	0,0	1,0198	-15,35269
22	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0204	-15,33862
23	PQ	3,2	1,6	0,0	0,0	1,0153	-15,56402
24	PQ	8,7	6,7	0,0	0,043	1,0093	-15,72599
25	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0062	-15,29140
26	PQ	3,5	2,3	0,0	0,0	0,9883	-15,72056
27	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0129	-14,75622
28	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9982	-10,79564
29	PQ	2,4	0,9	0,0	0,0	0,9929	-16,01184
30	PQ	10,6	1,9	0,0	0,0	0,9813	-16,91371

Tabela 55 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.

Barra de Origem	Barra de Destino	G_{ij} [pu]	B_{ij} [pu]	b_{sh} [pu]	$S_{MAX_{ij}}$ [MVA]	Max Tap	Min Tap
1	1	0,0192	0,0575	0,0528	138	0	0
2	1	0,0452	0,1652	0,0408	152	0	0
3	2	0,0570	0,1737	0,0368	139	0	0
4	3	0,0132	0,0379	0,0084	135	0	0
5	2	0,0472	0,1983	0,0418	144	0	0
6	2	0,0581	0,1763	0,0374	139	0	0
7	4	0,0119	0,0414	0,0090	148	0	0
8	5	0,0460	0,1160	0,0204	127	0	0
9	6	0,0267	0,0820	0,0170	140	0	0
10	6	0,0120	0,0420	0,0090	148	0	0
11	6	0,0000	0,2080	0,0000	142	1,1	0,9
12	6	0,0000	0,5560	0,0000	53	1,1	0,9
13	9	0,0000	0,2080	0,0000	142	0	0
14	9	0,0000	0,1100	0,0000	267	0	0
15	4	0,0000	0,2560	0,0000	115	1,1	0,9
16	12	0,0000	0,1400	0,0000	210	0	0
17	12	0,1231	0,2559	0,0000	29	0	0
18	12	0,0662	0,1304	0,0000	29	0	0
19	12	0,0945	0,1987	0,0000	30	0	0
20	14	0,2210	0,1997	0,0000	20	0	0
21	16	0,0524	0,1923	0,0000	38	0	0
22	15	0,1073	0,2185	0,0000	29	0	0
23	18	0,0639	0,1292	0,0000	29	0	0
24	19	0,0340	0,0680	0,0000	29	0	0
25	10	0,0936	0,2090	0,0000	30	0	0
26	10	0,0324	0,0845	0,0000	33	0	0
27	10	0,0348	0,0749	0,0000	30	0	0
28	10	0,0727	0,1499	0,0000	29	0	0
29	21	0,0116	0,0236	0,0000	29	0	0
30	15	0,1000	0,2020	0,0000	29	0	0
31	22	0,1150	0,1790	0,0000	26	0	0
32	23	0,1320	0,2700	0,0000	29	0	0
33	24	0,1885	0,3292	0,0000	27	0	0
34	25	0,2544	0,3800	0,0000	25	0	0
35	25	0,1093	0,2087	0,0000	28	0	0
36	28	0,0000	0,3960	0,0000	75	1,1	0,9
37	27	0,2198	0,4153	0,0000	28	0	0
38	27	0,3202	0,6027	0,0000	28	0	0
39	29	0,2399	0,4533	0,0000	28	0	0
40	8	0,0636	0,2000	0,0428	140	0	0
41	6	0,0169	0,0599	0,0130	149	0	0

Tabela 56 – Relação de geradores no sistema IEEE-NESTA de 30 barras.

Barra	P_g [MW]	Q_g [MVar]	P_g^{max} [MW]	P_g^{min} [MW]	Q_g^{max} [MVar]	Q_g^{min} [MVar]
1	218,839	9,373	784	0	10	-20
2	80,050	24,589	100	0	50	-40
3	0,0	0,0	70	0	-10	-20

Tabela 57 – Coeficientes de custo por tipo de gerador no sistema de 30 barras

Barra	c_2 [US\$/MW ²]	c_1 [US\$/MW]	c_0 [US\$]	Tipo de Combustível
1	0	0,521	0	CARVÃO
2	0	1,135	0	GÁS NATURAL
5	0	0,000000	0	SÍNCRONO
8	0	0,000000	0	SÍNCRONO
11	0	0,000000	0	SÍNCRONO
13	0	0,000000	0	SÍNCRONO
30	0	1,135	0	GÁS NATURAL

Tabela 58 – Coeficientes de poluição para o caso de 30 barras

Gerador	α [ton/h]	β [ton/h · MW]	γ [ton/h · MW ²]	ξ [ton/h]	λ [1/MW]	Tipo de Combustível
1	16.364	-22.216	25.96	0.0002	2.857	CARVÃO
2	2.543	-6.047	5.638	0.0005	3.333	GÁS NATURAL
5	0	0	0	0	0	SÍNCRONO
8	0	0	0	0	0	SÍNCRONO
11	0	0	0	0	0	SÍNCRONO
13	0	0	0	0	0	SÍNCRONO
30	2.543	-6.047	5.638	0.0005	3.333	GÁS NATURAL

Tabela 59 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 1.

Barra	Tipo de Barra	P_d [MW]	Q_d [MVar]	g_{sh} [pu]	b_{sh} [pu]	V [pu]	θ [graus]
1	PV	51,0	27,0	0,0	0,0	1,03313	-32,79829
2	PQ	20,0	9,0	0,0	0,0	1,04476	-31,43391
3	PQ	39,0	10,0	0,0	0,0	1,03885	-32,29547
4	PV	39,0	12,0	0,0	0,0	1,05719	-30,64013
5	PQ	0,0	0,0	0,0	-0,4	1,05562	-30,42957
6	PV	52,0	22,0	0,0	0,0	1,05524	-31,14479
7	PQ	19,0	2,0	0,0	0,0	1,05615	-30,84911
8	PV	28,0	0,0	0,0	0,0	1,04474	-28,85812
9	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06000	-28,92750
10	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,03529	-28,82050
11	PQ	70,0	23,0	0,0	0,0	1,05162	-30,76612
12	PV	47,0	10,0	0,0	0,0	1,05999	-30,04186
13	PQ	34,0	16,0	0,0	0,0	1,03910	-31,57015
14	PQ	14,0	1,0	0,0	0,0	1,05645	-30,51913
15	PV	90,0	30,0	0,0	0,0	1,04944	-30,35121
16	PQ	25,0	10,0	0,0	0,0	1,05302	-30,17322
17	PQ	11,0	3,0	0,0	0,0	1,06000	-28,29202
18	PV	60,0	34,0	0,0	0,0	1,05264	-30,09584
19	PV	45,0	25,0	0,0	0,0	1,04789	-30,27721
20	PQ	18,0	3,0	0,0	0,0	1,03471	-28,79835
21	PQ	14,0	8,0	0,0	0,0	1,02936	-26,88590
22	PQ	10,0	5,0	0,0	0,0	1,03326	-24,02807
23	PQ	7,0	3,0	0,0	0,0	1,05205	-18,62826
24	PV	13,0	0,0	0,0	0,0	1,05682	-17,50102
25	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06000	-12,69922
26	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02524	-12,31737
27	PV	71,0	13,0	0,0	0,0	1,04142	-25,04041
28	PQ	17,0	7,0	0,0	0,0	1,03325	-26,56574
29	PQ	24,0	4,0	0,0	0,0	1,03199	-27,45759
30	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02883	-24,89177
31	PV	43,0	27,0	0,0	0,0	1,03444	-27,36116
32	PV	59,0	23,0	0,0	0,0	1,04234	-25,60297
33	PQ	23,0	9,0	0,0	0,0	1,04644	-29,73962
34	PV	59,0	26,0	0,0	0,14	1,05777	-27,93122
35	PQ	33,0	9,0	0,0	0,0	1,05520	-28,33563
36	PV	31,0	17,0	0,0	0,0	1,05573	-28,34858
37	PQ	0,0	0,0	0,0	-0,25	1,06000	-27,47810
38	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00989	-23,11262
39	PQ	27,0	11,0	0,0	0,0	1,03411	-29,53573
40	PV	66,0	23,0	0,0	0,0	1,02963	-29,95140
41	PQ	37,0	10,0	0,0	0,0	1,01757	-29,83569
42	PV	96,0	23,0	0,0	0,0	1,01043	-26,88647
43	PQ	18,0	7,0	0,0	0,0	1,02843	-26,31390
44	PQ	16,0	8,0	0,0	0,1	1,00429	-21,41768
45	PQ	53,0	22,0	0,0	0,1	0,99592	-18,65546
46	PV	28,0	10,0	0,0	0,1	1,01212	-15,50406
47	PQ	34,0	0,0	0,0	0,0	1,01972	-11,98215
48	PQ	20,0	11,0	0,0	0,15	1,02043	-13,08165
49	PV	87,0	30,0	0,0	0,0	1,02323	-11,80917
50	PQ	17,0	4,0	0,0	0,0	1,01133	-15,01813
51	PQ	17,0	8,0	0,0	0,0	0,99379	-19,02717
52	PQ	18,0	5,0	0,0	0,0	0,98829	-20,33167
53	PQ	23,0	11,0	0,0	0,0	0,99145	-22,26595
54	PV	113,0	32,0	0,0	0,0	1,01028	-22,16971
55	PV	63,0	22,0	0,0	0,0	1,01049	-22,53067
56	PV	84,0	18,0	0,0	0,0	1,00978	-22,23337
57	PQ	12,0	3,0	0,0	0,0	1,00607	-19,58747
58	PQ	12,0	3,0	0,0	0,0	0,99809	-20,68386

Tabela 60 – Relação de barras no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 2.

Barra	Tipo de Barra	P_d [MW]	Q_d [MVar]	g [pu]	b_{sh} [pu]	V [pu]	θ [graus]
59	PV	277,0	113,0	0,0	0,0	1,04823	-20,01733
60	PQ	78,0	3,0	0,0	0,0	1,05498	-15,19733
61	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06000	-14,58431
62	PV	77,0	14,0	0,0	0,0	1,04635	-13,62156
63	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,01792	-15,38992
64	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02901	-12,87730
65	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02987	-6,98042
66	PV	39,0	18,0	0,0	0,0	1,06000	-2,98216
67	PQ	28,0	7,0	0,0	0,0	1,04383	-8,66117
68	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02062	-5,69946
69	Ref	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06000	0,00000
70	PV	66,0	20,0	0,0	0,0	1,03170	-10,14942
71	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,03547	-11,05503
72	PV	12,0	0,0	0,0	0,0	1,04425	-14,80433
73	PV	6,0	0,0	0,0	0,0	1,03745	-11,22651
74	PV	68,0	27,0	0,0	0,12	1,01048	-10,62644
75	PQ	47,0	11,0	0,0	0,0	1,01395	-9,25550
76	PV	68,0	36,0	0,0	0,0	0,99960	-10,91934
77	PV	61,0	28,0	0,0	0,0	1,04410	-6,87285
78	PQ	71,0	26,0	0,0	0,0	1,03970	-7,20945
79	PQ	39,0	32,0	0,0	0,2	1,04174	-7,04886
80	PV	130,0	26,0	0,0	0,0	1,06000	-5,24129
81	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,01451	-5,50728
82	PQ	54,0	27,0	0,0	0,2	1,03483	-7,93386
83	PQ	20,0	10,0	0,0	0,1	1,03737	-7,34853
84	PQ	11,0	7,0	0,0	0,0	1,04085	-5,87420
85	PV	24,0	15,0	0,0	0,0	1,04907	-4,87492
86	PQ	21,0	10,0	0,0	0,0	1,04208	-6,23523
87	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,05481	-6,33068
88	PQ	48,0	10,0	0,0	0,0	1,04735	-2,48518
89	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,06000	0,87743
90	PV	163,0	42,0	0,0	0,0	1,05126	-4,87373
91	PV	10,0	0,0	0,0	0,0	1,04436	-4,73340
92	PV	65,0	10,0	0,0	0,0	1,04495	-3,97188
93	PQ	12,0	7,0	0,0	0,0	1,03499	-6,20851
94	PQ	30,0	16,0	0,0	0,0	1,03344	-7,74757
95	PQ	42,0	31,0	0,0	0,0	1,02300	-8,24044
96	PQ	38,0	15,0	0,0	0,0	1,03266	-7,88686
97	PQ	15,0	9,0	0,0	0,0	1,04162	-6,91133
98	PQ	34,0	8,0	0,0	0,0	1,04955	-7,70927
99	PV	42,0	0,0	0,0	0,0	1,05160	-9,04319
100	PV	37,0	18,0	0,0	0,0	1,05328	-8,74860
101	PQ	22,0	15,0	0,0	0,0	1,03690	-7,50844
102	PQ	5,0	3,0	0,0	0,0	1,04121	-5,23894
103	PV	23,0	16,0	0,0	0,0	1,05037	-11,59117
104	PV	38,0	25,0	0,0	0,0	1,03709	-14,87455
105	PV	31,0	26,0	0,0	0,2	1,03457	-16,04051
106	PQ	43,0	16,0	0,0	0,0	1,02649	-16,17588
107	PV	50,0	12,0	0,0	0,06	1,02208	-18,68691
108	PQ	2,0	1,0	0,0	0,0	1,02796	-17,58242
109	PQ	8,0	3,0	0,0	0,0	1,02564	-18,18553
110	PV	39,0	30,0	0,0	0,06	1,02320	-19,47936
111	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,02631	-19,53009
112	PV	68,0	13,0	0,0	0,0	1,00975	-21,98346
113	PV	6,0	0,0	0,0	0,0	1,05698	-28,02777
114	PQ	8,0	3,0	0,0	0,0	1,03742	-25,85113
115	PQ	22,0	7,0	0,0	0,0	1,03697	-25,85161
116	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	1,01953	-6,10767
117	PQ	20,0	8,0	0,0	0,0	1,04531	-31,38704
118	PQ	33,0	15,0	0,0	0,0	1,00105	-10,44914

Tabela 61 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 1.

Barra de Origem	Barra de Destino	G_{ij} [pu]	B_{ij} [pu]	b_{sh} [pu]	$S_{MAX_{ij}}$ [MVA]	Max Tap	Min Tap
1	2	0,03030	0,09990	0,0254	151	0	0
1	3	0,01290	0,04240	0,01082	151	0	0
4	5	0,00176	0,00798	0,0021	176	0	0
3	5	0,02410	0,10800	0,0284	175	0	0
5	6	0,01190	0,05400	0,01426	176	0	0
6	7	0,00459	0,02080	0,0055	176	0	0
8	9	0,00244	0,03050	1,162	711	0	0
8	5	0,00000	0,02670	0	1099	1,1	0,9
9	10	0,00258	0,03220	1,23	710	0	0
4	11	0,02090	0,06880	0,01748	151	0	0
5	11	0,02030	0,06820	0,01738	152	0	0
11	12	0,00595	0,01960	0,00502	151	0	0
2	12	0,01870	0,06160	0,01572	151	0	0
3	12	0,04840	0,16000	0,0406	151	0	0
7	12	0,00862	0,03400	0,00874	164	0	0
11	13	0,02225	0,07310	0,01876	151	0	0
12	14	0,02150	0,07070	0,01816	151	0	0
13	15	0,07440	0,24440	0,06268	115	0	0
14	15	0,05950	0,1950	0,0502	144	0	0
12	16	0,02120	0,08340	0,0214	164	0	0
15	17	0,01320	0,04370	0,0444	151	0	0
16	17	0,04540	0,18010	0,0466	158	0	0
17	18	0,01230	0,05050	0,01298	167	0	0
18	19	0,01119	0,04930	0,01142	173	0	0
19	20	0,02520	0,11700	0,0298	178	0	0
15	19	0,01200	0,03940	0,0101	151	0	0
20	21	0,01830	0,08490	0,0216	177	0	0
21	22	0,02090	0,09700	0,0246	178	0	0
22	23	0,03420	0,15900	0,0404	178	0	0
23	24	0,01350	0,04920	0,0498	158	0	0
23	25	0,01560	0,08000	0,0864	186	0	0
26	25	0,00000	0,03820	0	768	1,1	0,9
25	27	0,03180	0,16300	0,1764	177	0	0
27	28	0,01913	0,08550	0,0216	174	0	0
28	29	0,02370	0,09430	0,0238	165	0	0
30	17	0,00000	0,03880	0	756	1,1	0,9
8	30	0,00431	0,05040	0,514	580	0	0
26	30	0,00799	0,08600	0,908	340	0	0
17	31	0,04740	0,15630	0,0399	151	0	0
29	31	0,01080	0,03310	0,0083	146	0	0
23	32	0,03170	0,11530	0,1173	158	0	0
31	32	0,02980	0,09850	0,0251	151	0	0
27	32	0,02290	0,07550	0,01926	151	0	0
15	33	0,03800	0,12440	0,03194	150	0	0
19	34	0,07520	0,24700	0,0632	114	0	0
35	36	0,00224	0,01020	0,00268	176	0	0
35	37	0,01100	0,04970	0,01318	175	0	0
33	37	0,04150	0,14200	0,0366	154	0	0
34	36	0,00871	0,02680	0,00568	146	0	0
34	37	0,00256	0,00940	0,00984	159	0	0
38	37	0,00000	0,03750	0	783	1,1	0,9
37	39	0,03210	0,10600	0,027	151	0	0
37	40	0,05930	0,16800	0,042	140	0	0
30	38	0,00464	0,05400	0,422	542	0	0
39	40	0,01840	0,06050	0,01552	151	0	0
40	41	0,01450	0,04870	0,01222	152	0	0
40	42	0,05550	0,18300	0,0466	151	0	0
41	42	0,04100	0,13500	0,0344	151	0	0
43	44	0,06080	0,24540	0,06068	117	0	0
34	43	0,04130	0,16810	0,04226	167	0	0
44	45	0,02240	0,09010	0,0224	166	0	0
45	46	0,04000	0,13560	0,0332	153	0	0

Tabela 62 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 2.

Barra de Origem	Barra de Destino	G_{ij} [pu]	B_{ij} [pu]	b_{sh} [pu]	$S_{MAX_{ij}}$ [MVA]	Max Tap	Min Tap
46	47	0,03800	0,12700	0,0316	152	0	0
46	48	0,06010	0,18900	0,0472	148	0	0
47	49	0,01910	0,06250	0,01604	150	0	0
42	49	0,07150	0,32300	0,086	89	0	0
42	49	0,07150	0,32300	0,086	89	0	0
45	49	0,06840	0,18600	0,0444	138	0	0
48	49	0,01790	0,05050	0,01258	140	0	0
49	50	0,02670	0,07520	0,01874	140	0	0
49	51	0,04860	0,13700	0,0342	140	0	0
51	52	0,02030	0,05880	0,01396	142	0	0
52	53	0,04050	0,16350	0,04058	166	0	0
53	54	0,02630	0,12200	0,031	177	0	0
49	54	0,07300	0,28900	0,0738	99	0	0
49	54	0,08690	0,29100	0,073	97	0	0
54	55	0,01690	0,07070	0,0202	169	0	0
54	56	0,00275	0,00955	0,00732	155	0	0
55	56	0,00488	0,01510	0,00374	146	0	0
56	57	0,03430	0,09660	0,0242	140	0	0
50	57	0,04740	0,13400	0,0332	140	0	0
56	58	0,03430	0,09660	0,0242	140	0	0
51	58	0,02550	0,07190	0,01788	140	0	0
54	59	0,05030	0,22930	0,0598	125	0	0
56	59	0,08250	0,25100	0,0569	112	0	0
56	59	0,08030	0,23900	0,0536	117	0	0
55	59	0,04739	0,21580	0,05646	133	0	0
59	60	0,03170	0,14500	0,0376	176	0	0
59	61	0,03280	0,15000	0,0388	176	0	0
60	61	0,00264	0,01350	0,01456	186	0	0
60	62	0,01230	0,05610	0,01468	176	0	0
61	62	0,00824	0,03760	0,0098	176	0	0
63	59	0,00000	0,03860	0	760	1,1	0,9
63	64	0,00172	0,02000	0,216	687	0	0
64	61	0,00000	0,02680	0	1095	1,1	0,9
38	65	0,00901	0,09860	1,046	297	0	0
64	65	0,00269	0,03020	0,38	675	0	0
49	66	0,01800	0,09190	0,0248	186	0	0
49	66	0,01800	0,09190	0,0248	186	0	0
62	66	0,04820	0,21800	0,0578	132	0	0
62	67	0,02580	0,11700	0,031	176	0	0
65	66	0,00000	0,03700	0	793	1,1	0,9
66	67	0,02240	0,10150	0,02682	176	0	0
65	68	0,00138	0,01600	0,638	686	0	0
47	69	0,08440	0,27780	0,07092	102	0	0
49	69	0,09850	0,32400	0,0828	87	0	0
68	69	0,00000	0,03700		793	1,1	0,9
69	70	0,03000	0,12700	0,122	170	0	0
24	70	0,00221	0,41150	0,10198	72	0	0
70	71	0,00882	0,03550	0,00878	166	0	0
24	72	0,04880	0,19600	0,0488	146	0	0
71	72	0,04460	0,18000	0,04444	159	0	0
71	73	0,00866	0,04540	0,01178	188	0	0
70	74	0,04010	0,13230	0,03368	151	0	0
70	75	0,04280	0,14100	0,036	151	0	0
69	75	0,04050	0,12200	0,124	145	0	0
74	75	0,01230	0,04060	0,01034	151	0	0
76	77	0,04440	0,14800	0,0368	152	0	0
69	77	0,03090	0,10100	0,1038	150	0	0
75	77	0,06010	0,19990	0,04978	141	0	0
77	78	0,00376	0,01240	0,01264	151	0	0
78	79	0,00546	0,02440	0,00648	174	0	0
77	80	0,01700	0,04850	0,0472	141	0	0
77	80	0,02940	0,10500	0,0228	157	0	0

Tabela 63 – Relação de ramos no sistema IEEE-NESTA de 118 barras - Parte 3.

Barra de Origem	Barra de Destino	G_{ij} [pu]	B_{ij} [pu]	b_{sh} [pu]	$S_{MAX_{ij}}$ [MVA]	Max Tap	Min Tap
79	80	0,01560	0,07040	0,0187	175	0	0
68	81	0,00175	0,02020	0,808	684	0	0
81	80	0,00000	0,03700		793	1,1	0,9
77	82	0,02980	0,08530	0,08174	141	0	0
82	83	0,01120	0,03665	0,03796	150	0	0
83	84	0,06250	0,13200	0,0258	122	0	0
83	85	0,04300	0,14800	0,0348	154	0	0
84	85	0,03020	0,06410	0,01234	122	0	0
85	86	0,03500	0,12300	0,0276	156	0	0
86	87	0,02828	0,20740	0,0445	141	0	0
85	88	0,02000	0,10200	0,0276	186	0	0
85	89	0,02390	0,17300	0,047	168	0	0
88	89	0,01390	0,07120	0,01934	186	0	0
89	90	0,05180	0,18800	0,0528	151	0	0
89	90	0,02380	0,09970	0,106	169	0	0
90	91	0,02540	0,08360	0,0214	151	0	0
89	92	0,00990	0,05050	0,0548	186	0	0
89	92	0,03930	0,15810	0,0414	166	0	0
91	92	0,03870	0,12720	0,03268	151	0	0
92	93	0,02580	0,08480	0,0218	151	0	0
92	94	0,04810	0,15800	0,0406	151	0	0
93	94	0,02230	0,07320	0,01876	151	0	0
94	95	0,01320	0,04340	0,0111	151	0	0
80	96	0,03560	0,18200	0,0494	159	0	0
82	96	0,01620	0,05300	0,0544	150	0	0
94	96	0,02690	0,08690	0,023	149	0	0
80	97	0,01830	0,09340	0,0254	186	0	0
80	98	0,02380	0,10800	0,0286	176	0	0
80	99	0,04540	0,20600	0,0546	140	0	0
92	100	0,06480	0,29500	0,0472	98	0	0
94	100	0,01780	0,05800	0,0604	150	0	0
95	96	0,01710	0,05470	0,01474	149	0	0
96	97	0,01730	0,08850	0,024	186	0	0
98	100	0,03970	0,17900	0,0476	160	0	0
99	100	0,01800	0,08130	0,0216	175	0	0
100	101	0,02770	0,12620	0,0328	176	0	0
92	102	0,01230	0,05590	0,01464	176	0	0
101	102	0,02460	0,11200	0,0294	176	0	0
100	103	0,01600	0,05250	0,0536	151	0	0
100	104	0,04510	0,20400	0,0541	141	0	0
103	104	0,04660	0,15840	0,0407	153	0	0
103	105	0,05350	0,16250	0,0408	145	0	0
100	106	0,06050	0,2290	0,062	124	0	0
104	105	0,00994	0,03780	0,00986	161	0	0
105	106	0,01400	0,05470	0,01434	164	0	0
105	107	0,05300	0,18300	0,0472	154	0	0
105	108	0,02610	0,07030	0,01844	137	0	0
106	107	0,05300	0,18300	0,0472	154	0	0
108	109	0,01050	0,02880	0,0076	138	0	0
103	110	0,03906	0,18130	0,0461	159	0	0
109	110	0,02780	0,07620	0,0202	138	0	0
110	111	0,02200	0,07550	0,02	154	0	0
110	112	0,02470	0,06400	0,062	135	0	0
17	113	0,00913	0,03010	0,00768	151	0	0
32	113	0,06150	0,20300	0,0518	139	0	0
32	114	0,01350	0,06120	0,01628	176	0	0
27	115	0,01640	0,07410	0,01972	175	0	0
114	115	0,00230	0,01040	0,00276	175	0	0
68	116	0,00034	0,00405	0,164	7218	0	0
12	117	0,03290	0,14000	0,0358	170	0	0
75	118	0,01450	0,04810	0,01198	151	0	0
76	118	0,01640	0,05440	0,01356	151	0	0

Tabela 64 – Coeficientes de custo por tipo de gerador no sistema de 118 barras

Gerador	c_2 [US\$/MW ²]	c_1 [US\$/MW]	c_0 [US\$]	Tipo Combustível
1	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
4	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
6	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
8	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
10	0.000000	1.463389	0.000000	NG
12	0.000000	0.889054	0.000000	NG
15	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
18	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
19	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
24	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
25	0.000000	0.929688	0.000000	NG
26	0.000000	1.118121	0.000000	NG
27	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
31	0.000000	0.814446	0.000000	NG
32	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
34	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
36	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
40	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
42	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
46	0.000000	1.513792	0.000000	NG
49	0.000000	1.071413	0.000000	NG
54	0.000000	1.324712	0.000000	NG
55	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
56	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
59	0.000000	1.426207	0.000000	NG
61	0.000000	1.245208	0.000000	NG
62	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
65	0.000000	0.969762	0.000000	NG
66	0.000000	0.865713	0.000000	COW
69	0.000000	0.518513	0.000000	COW
70	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
72	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
73	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
74	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
76	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
77	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
80	0.000000	1.006636	0.000000	COW
85	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
87	0.000000	1.381184	0.000000	NG
89	0.000000	0.793496	0.000000	COW
90	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
91	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
92	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
99	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
100	0.000000	1.066562	0.000000	NG
103	0.000000	0.691193	0.000000	NG
104	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
105	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
107	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
110	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
111	0.000000	1.200887	0.000000	NG
112	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
113	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC
116	0.000000	0.000000	0.000000	SYNC

Tabela 65 – Coeficientes de poluição para o caso de 118 barras

Gerador	α [ton/h]	β [ton/h · MW]	γ [ton/h · MW ²]	ξ [ton/h]	λ [1/MW]	Tipo Combustível
1	0	0	0	0	0	SYNC
4	0	0	0	0	0	SYNC
6	0	0	0	0	0	SYNC
8	0	0	0	0	0	SYNC
10	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
12	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
15	0	0	0	0	0	SYNC
18	0	0	0	0	0	SYNC
19	0	0	0	0	0	SYNC
24	0	0	0	0	0	SYNC
25	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
26	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
27	0	0	0	0	0	SYNC
31	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
32	0	0	0	0	0	SYNC
34	0	0	0	0	0	SYNC
36	0	0	0	0	0	SYNC
40	0	0	0	0	0	SYNC
42	0	0	0	0	0	SYNC
46	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
49	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
54	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
55	0	0	0	0	0	SYNC
56	0	0	0	0	0	SYNC
59	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
61	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
62	0	0	0	0	0	SYNC
65	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
66	16	-22.216	26	0.0002	2.857	COW
69	16	-22.216	26	0.0002	2.857	COW
70	0	0	0	0	0	SYNC
72	0	0	0	0	0	SYNC
73	0	0	0	0	0	SYNC
74	0	0	0	0	0	SYNC
76	0	0	0	0	0	SYNC
77	0	0	0	0	0	SYNC
80	16	-22.216	26	0.0002	2.857	COW
85	0	0	0	0	0	SYNC
87	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
89	16	-22.216	26	0.0002	2.857	COW
90	0	0	0	0	0	SYNC
91	0	0	0	0	0	SYNC
92	0	0	0	0	0	SYNC
99	0	0	0	0	0	SYNC
100	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
103	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
104	0	0	0	0	0	SYNC
105	0	0	0	0	0	SYNC
107	0	0	0	0	0	SYNC
110	0	0	0	0	0	SYNC
111	3	-6.047	6	0.0005	3.333	NG
112	0	0	0	0	0	SYNC
113	0	0	0	0	0	SYNC
116	0	0	0	0	0	SYNC