

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Ezequiel da Silva Oliveira**

**Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica**

Juiz de Fora  
2015

**Ezequiel da Silva Oliveira**

**Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Júnior, D. Sc.

Coorientador: Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.

Juiz de Fora

2015

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

Oliveira, Ezequiel da Silva.

Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica / Ezequiel da Silva Oliveira. – 2015.

99 f. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Júnior, D. Sc.

Coorientador: Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Despacho Econômico. 2. Metaheurística. 3. Otimização. I. Silva Junior, Ivo Chaves da, orient. II. Oliveira, Leonardo Willer de, coorient. III. Título.

Ezequiel da Silva Oliveira

**Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

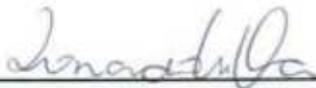
Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



---

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



---

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



---

Prof. Edmarcio Antônio Belati, D. Sc.  
Universidade Federal do ABC, UFABC



---

Prof. André Luís Marques Marcato, D. Sc.  
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

*Dedico este trabalho a toda minha família, em especial, aos meus pais Joaquim e Procidônia.  
A minha namorada, Débora.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela onipresença em minha vida e por me conceder competência para realizar este trabalho.

Aos Professores Ivo Chaves da Silva Júnior e Leonardo Willer de Oliveira, pela orientação, dedicação, incentivo e companheirismo que foram fundamentais na realização e conclusão desta dissertação e, principalmente, pela amizade construída. Ao Professor Bruno Henriques Dias, que esteve sempre disposto a ajudar.

Aos meus pais, Joaquim e Procidônia, por todo o amor, ensinamento e apoio a todo o momento. Aos meus irmãos: José Geraldo, Emerson e Eder; e irmãs, Elisane, Edna e Marineide; pelo incentivo, pelo afeto mútuo e por nossa união, que me fortalece e encoraja a enfrentar quaisquer dificuldades.

A minha namorada Débora, pelo amor, amparo e cumplicidade ao longo desta etapa, e a toda sua família.

Aos amigos do curso de graduação que, embora alguns estejam distantes, nossa amizade continua a mesma. A todos os amigos do LABSPOT (NUPESP), pelos momentos de descontração e de compartilhamento dos saberes.

## RESUMO

O atendimento à demanda requer um uso eficiente do sistema geração sem afetar sua confiabilidade. Para o sistema termoeletrico o uso eficiente está diretamente relacionado com a queima de combustível e, conseqüentemente, com o custo de operação. Portanto, a minimização deste custo é obtida a partir da alocação da potência ativa a ser gerada para cada termoeletrica, que configura um problema de otimização denominado de Despacho Econômico (DE).

Este trabalho aborda de forma real o problema do Despacho Econômico, devido a consideração das características que ocorrem durante a geração de energia elétrica. Estas características são as restrições de Zonas de Operação Proibidas (ZOP), Múltiplo Combustível (MC) e o efeito de ponto de válvula, que torna o problema do Despacho Econômico num problema não convexo e descontínuo.

A proposta deste trabalho é a adoção de duas metaheurísticas bioinspiradas para resolver o problema do Despacho Econômico com características reais de operação. As técnicas bioinspiradas que são utilizadas consistem na: (i) Otimização via Enxame de Partículas e (ii) otimização baseada no fenômeno da ecolocalização do morcego, denominado Algoritmo do Morcego. Ambas as metaheurísticas são implementadas no MATLAB® e para a otimização do problema não linear e não convexo do Despacho Econômico é utilizado o modelo LINGO.

Os resultados obtidos através das técnicas bioinspiradas aplicadas ao estudos de casos, são comparados com os encontrados na literatura especializada e, por fim, é feito a análise da eficiência das metaheurísticas utilizadas, cujo Algoritmo do Morcego apresenta o melhor desempenho.

## ABSTRACT

The demand supply requires efficient use of generation system without affecting its reliability. For the thermoelectric system its efficient use is directly related with fuel burn and, consequently, with cost operation. Therefore, to minimize this cost is obtained from the allocation of active power to be generated for each thermoelectric, which sets up an optimization problem called Economic Dispatch (DE).

This work considers a real way of the Economic Dispatch problem due consideration of the characteristics that occur during electricity generation. These features are restrictions Prohibited Operating Zones (POZ), multiple fuel and the valve-point effect, which makes the Economic Dispatch problem in non-convex and discontinuous problem.

The proposal this work is adopting two bioinspired metaheuristics to solve the Economic Dispatch problem with real operating characteristics. The bioinspired techniques that are used consist of: (i) Particle Swarm Optimization and (ii) Optimization based on bat echolocation phenomenon, called Bat Algorithm. Both metaheuristics are implemented in MATLAB<sup>®</sup> and for optimization of non-linear and non-convex problem is used LINGO model.

The results obtained through the bioinspired techniques applied the study cases, are compared with those found in literature and, finally, is made the analysis of the efficiency of metaheuristics used, which Bat Algorithm has the best performance.

Key-words: Economic Dispatch, Metaheuristic, Optimization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento da Usina Termoelétrica convencional . . . . .	17
Figura 2 – Representação esquemática da geração termoelétrica . . . . .	18
Figura 3 – Capacidade instalada do SEB sem importação contratada - Maio 2015	19
Figura 4 – Geração de energia elétrica do SEB por tipo de fonte - Abril 2015 . .	20
Figura 5 – Dilema do Operador Nacional do Sistema . . . . .	20
Figura 6 – Função de custo futuro . . . . .	21
Figura 7 – Distribuição do parque térmico por faixa de CVU e por subsistema .	22
Figura 8 – Evolução do Custo Marginal de Operação - Subsistema Sudeste/Centro- Oeste . . . . .	23
Figura 9 – Evolução do CMO e despacho térmico do SEB - Maio 2015 . . . . .	23
Figura 10 – Planejamento do <i>Unit Commitment</i> . . . . .	34
Figura 11 – Sistema de geração composto por N unidades termoelétricas . . . . .	35
Figura 12 – Curva de entrada-saída característica da unidade termoelétrica . . .	37
Figura 13 – Função de custo com/sem ponto de válvula . . . . .	39
Figura 14 – Curva de custo com restrição de múltiplo combustível . . . . .	40
Figura 15 – Função de custo com restrição de zonas de operação proibidas . . . .	41
Figura 16 – Atualização da partícula <i>i</i> - PSO . . . . .	45
Figura 17 – Função de custo do exemplo didático . . . . .	48
Figura 18 – Criação da partícula <i>i</i> . . . . .	48
Figura 19 – Fluxograma Trelea-PSO - Aplicado . . . . .	50
Figura 20 – Criação do morcego virtual <i>i</i> . . . . .	56
Figura 21 – Fluxograma <i>Bat Algorithm</i> . . . . .	59
Figura 22 – Representação da comunicação entre a metaheurística e o LINGO. .	61
Figura 23 – Processo de convergência - Caso 1-A (2.500MW) . . . . .	63
Figura 24 – Processo de convergência - Caso 1-B (2.700MW) . . . . .	65
Figura 25 – Processo de convergência - Caso 2 (2.700MW) . . . . .	67
Figura 26 – Processo de convergência - Caso 3 (2.650MW) . . . . .	70
Figura 27 – Processo de convergência - Caso 4 (13.500MW) . . . . .	72
Figura 28 – Processo de convergência - Caso 5 (7.950MW) . . . . .	74
Figura 29 – Processo de convergência - Caso 6 (7.000MW) . . . . .	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 1-A . . .	63
Tabela 2 – Comparação do custo de operação - Caso 1-A . . . . .	63
Tabela 3 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 1-A (2.500MW) . . . . .	64
Tabela 4 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 1-B . . .	65
Tabela 5 – Comparação do custo de operação - Caso 1-B . . . . .	65
Tabela 6 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 1-B (2700MW) . . . . .	66
Tabela 7 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 2 . . .	68
Tabela 8 – Comparação do custo de operação - Caso 2 . . . . .	68
Tabela 9 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 2 . . . . .	68
Tabela 10 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 3 . . .	70
Tabela 11 – Comparação do custo de operação - Caso 3 . . . . .	70
Tabela 12 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 3 (2.650MW) . . . . .	71
Tabela 13 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 4 . . .	72
Tabela 14 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 4 (13.500MW) . . . . .	72
Tabela 15 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 5 . . .	75
Tabela 16 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 5 (7950 MW) . . . . .	75
Tabela 17 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 6 . . .	77
Tabela 18 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 6 (7.000MW) . . . . .	78
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos . . . . .	80
Tabela 20 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 1 . . . . .	88
Tabela 21 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 2 . . . . .	89
Tabela 22 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 3 . . . . .	90
Tabela 23 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoeletrico referente ao Caso 3 . . . . .	90
Tabela 24 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 4 . . . . .	91
Tabela 25 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 5 . . . . .	95
Tabela 26 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoeletrico referente ao Caso 5 . . . . .	96
Tabela 27 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 6 . . . . .	97
Tabela 28 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoeletrico referente ao Caso 6 . . . . .	99

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
bar	Unidade de pressão
Btu	<i>British thermal unit</i>
BA	<i>Bat Algorithm</i>
BT	Busca Tabu
CF	Custo Futuro
CI	Custo Imediato
DE	Despacho Econômico
ED	Evolução Diferencial
FOB	Função Objetivo
LINF	Limite Inferior
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MC	Múltiplo Combustível
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt ( $10^6$ W)
MWh	Megawatt-hora ( $10^6$ Wh)
N	Norte
NE	Nordeste
OCF	Otimização baseado em Colônia de Formiga
ONS	Operador Nacional do Sistema
PE	Programação Evolutiva
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SE/CO	Sudeste/Centro-Oeste
SIN	Sistema Interligado Nacional

S	Sul
UC	<i>Unit Commitment</i>
UHE	Unidade Hidroelétrica de geração (Usina Hidroelétrica)
UTE	Unidade Termoelétrica de geração (Usina Termoelétrica)
ZOP	Zona de Operação Proibidas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_i$	Número binário que permite a ativação do efeito do ponto de válvula para a unidade térmica $i$
$a_i, b_i$ e $c_i$	Coefficientes do custo de unidade termoeétrica $i$ [\$/h, \$/MWh e \$/MW <sup>2</sup> h]
$A$	Sonoridade (volume) do pulso de cada morcego
$\beta$	Vetor constituído de valores randômicos compreendido no intervalo [0,1] - BA
$e_i$ e $f_i$	Coefficiente que representam o efeito do ponto de válvula da unidade térmica $i$ [\$/h e MW <sup>-1</sup> ]
$\epsilon$	Vetor composto pelo valor aleatório compreendido no intervalo [-1,1]
$F_i$	Função de custo da unidade térmica $i$ [\$/h]
$F_T$	Função de custo total da operação do sistema [\$/h]
$f_{\max}$	Limite máximo da frequência do pulso sonoro emitido pelo morcego
$f_{\min}$	Limite mínimo da frequência do pulso sonoro emitido pelo morcego
$g^*$	Melhor posição do enxame da iteração atual
$\gamma$	É a média entre os coefficients $\gamma_1$ e $\gamma_2$
$\gamma_1$ e $\gamma_2$	Constantes positivas que representam o aprendizado individual e social, respectivamente
$N$	Número total de unidade térmica do sistema
$n$	Número total da população (PSO ou BA)
$n_c$	Número total de combustível da unidade térmica $i$
$n_T$	Número total de período ao longo do planejamento
$\mathbf{v}_B^t$	Vetor correspondente a velocidade de cada morcego na iteração atual
$\mathbf{v}_B^{t+1}$	Vetor correspondente a velocidade de cada morcego na iteração posterior
$\mathbf{v}_P^t$	Vetor da velocidade das partículas na iteração atual - PSO
$\mathbf{v}_P^{t+1}$	Vetor da velocidade das partículas na iteração posterior - PSO

$p_m$	Vetor da média ponderada entre os vetores $p^*$ e $g^*$
$p^*$	Vetor de melhor posição de cada partícula na iteração atual - PSO
$p^t$	Vetor da posição das partículas na iteração atual - PSO
$p^{t+1}$	Vetor da posição das partículas na iteração posterior -PSO
$P_i$	Potência ativa gerada pela unidade térmica $i$ [MW]
$P_D$	Potência ativa demandada pelo sistema / Carga do sistema [MW]
$P_i^{\min}$	Potência ativa mínima gerada pela unidade térmica $i$ [MW]
$P_i^{\max}$	Potência ativa máxima gerada pela unidade térmica $i$ [MW]
$r_1$ e $r_2$	Valores aleatórios compreendidos no intervalo [0,1]
$t$	Iteração atual
$T$	Período ao longo do planejamento [h]
$\theta$	Peso de inércia
$\varphi$	Número randômico compreendido no intervalo de [0,1]
$x_*$	Melhor posição do morcego dentre a população
$x^t$	Vetor constituído pela posição de cada morcego na iteração atual
$x^{t+1}$	Vetor constituído pela posição de cada morcego na iteração posterior
$\xi$	Constante de atualização do $\zeta$ , ( $\xi > 0$ )
$\zeta^0$	Taxa de emissão de pulso inicial
$\zeta^{t+1}$	Vetor constituído pela taxa de emissão de pulso de cada morcego

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.1.1	<b>Usina Termoelétrica</b>	16
1.1.2	<b>Sistema Elétrico Brasileiro</b>	19
1.2	MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
1.3	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	24
1.4	PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO	24
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	26
2.2	PRINCIPAIS METODOLOGIAS	26
2.2.1	<b>Enumeração Exaustiva</b>	26
2.2.2	<b>Lista de Prioridade</b>	26
2.2.3	<b>Programação Dinâmica</b>	27
2.2.4	<b>Relaxação Lagrangeana</b>	27
2.2.5	<b>Branch-and-Bound</b>	27
2.2.6	<b>Busca Tabu</b>	28
2.2.7	<b>Algoritmo Genético</b>	28
2.2.8	<b>Programação Evolutiva</b>	30
2.2.9	<b>Evolução Diferencial</b>	30
2.2.10	<b>Otimização via Enxame de Partículas</b>	30
2.2.11	<b>Algoritmo do Morcego</b>	31
2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	32
<b>3</b>	<b>DESPACHO ECONÔMICO DE TERMOELÉTRICAS</b>	<b>33</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	33
3.2	O PROBLEMA DO DESPACHO ECONÔMICO	33
3.3	FORMULAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO	35
3.3.1	<b>Função de custo da termoelétrica</b>	36
3.3.2	<b>Restrições clássicas do problema</b>	37
3.3.2.1	<i>Balanco de potência ativa</i>	37
3.3.2.2	<i>Limites operativos</i>	37
3.3.3	<b>Efeito do ponto de válvula</b>	38
3.3.4	<b>Restrições realísticas do problema</b>	39
3.3.4.1	<i>Múltiplo combustível</i>	39

3.3.4.2	<i>Zonas de Operação Proibidas</i> . . . . .	41
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS . . . . .	42
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO VIA ENXAME DE PARTÍCULAS</b> . . . . .	<b>43</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	43
4.2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO . . . . .	43
4.2.1	<b>Formulação - Particle Swarm Optimization</b> . . . . .	44
4.2.2	<b>Algoritmo - Particle Swarm Optimization</b> . . . . .	45
4.3	TRELEA-PSO . . . . .	45
4.3.1	<b>Análise do efeito da consideração proposta</b> . . . . .	47
4.4	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO BASEADO EM ENXAME DE PARTÍCULAS - TRELEA . . . . .	47
4.4.1	<b>Representação da partícula</b> . . . . .	47
4.4.1.1	<i>Exemplo de representação da partícula</i> . . . . .	47
4.4.2	<b>Inicialização do enxame</b> . . . . .	48
4.4.3	<b>Avaliação da partícula</b> . . . . .	48
4.4.4	<b>Posição e velocidade</b> . . . . .	49
4.4.5	<b>Critério de convergência</b> . . . . .	49
4.5	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO APLICADO . . . . .	49
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS . . . . .	51
<b>5</b>	<b>ALGORITMO DO MORCEGO</b> . . . . .	<b>52</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	52
5.2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO . . . . .	52
5.2.1	<b>Formulação - Bat Algorithm</b> . . . . .	53
5.2.2	<b>Algoritmo - Bat Algorithm</b> . . . . .	54
5.3	OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO VIA ALGORITMO DO MORCEGO . . . . .	55
5.3.1	<b>Representação do morcego</b> . . . . .	55
5.3.1.1	<i>Exemplo de representação do morcego virtual</i> . . . . .	56
5.3.2	<b>Inicialização</b> . . . . .	56
5.3.3	<b>Avaliação</b> . . . . .	56
5.3.4	<b>Posição e velocidade</b> . . . . .	56
5.3.5	<b>Critério de convergência</b> . . . . .	57
5.4	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO APLICADO . . . . .	57
5.5	CONCLUSÕES PARCIAIS . . . . .	60
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASOS</b> . . . . .	<b>61</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	61
6.2	ASPECTOS COMPUTACIONAIS . . . . .	61

6.3	CASO 1: ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE MÚLTIPLO COMBUSTÍVEL	62
6.3.1	<b>A - Sistema de 10 Termoelétricas com demanda de 2500MW</b>	62
6.3.1.1	<i>Análise dos resultados</i>	64
6.3.2	<b>B - Sistema de 10 Termoelétricas com demanda de 2.700MW</b>	64
6.3.2.1	<i>Análise dos resultados</i>	66
6.4	CASO 2: ESTUDO DO EFEITO DE PONTO DE VÁLVULA E DA RESTRIÇÃO DE MÚLTIPLO COMBUSTÍVEL	66
6.4.1	<b>Análise dos resultados</b>	69
6.5	CASO 3: ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE ZONAS DE OPERAÇÃO PROIBIDAS	69
6.5.1	<b>Análise dos resultados</b>	71
6.6	CASO 4: SISTEMA 50 UTEs	71
6.6.1	<b>Análise dos resultados</b>	74
6.7	CASO 5: SISTEMA 45 UTEs	74
6.7.1	<b>Análise dos resultados</b>	76
6.8	CASO 6: SISTEMA CRIADO DE 40 UTEs	76
6.8.1	<b>Análise dos resultados</b>	79
6.9	CONCLUSÕES PARCIAIS	79
7	<b>CONCLUSÕES</b>	81
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
7.2	PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	82
	<b>REFERÊNCIAS</b>	83
	<b>APÊNDICE A – Simplificação do equacionamento - TRELEA-PSO</b>	87
	<b>ANEXO A – Dados dos Sistemas Termoelétricos</b>	88

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização da energia elétrica se faz presente em diversas áreas, portanto a garantia de seu suprimento está diretamente relacionada com a confiabilidade do sistema elétrico. Ao sistema de geração cabe garantir o atendimento à demanda, dessa forma, para um dado sistema de geração composto somente por Usinas Hidroelétricas (UHEs) tem sua operação dependente de aflúências, comprometendo a confiabilidade. Por outro lado, a diversificação da matriz energética através da presença de Usinas Termoelétricas (UTEs), que pode ser aproveitado de forma complementar, assegura a continuidade da energia e aumenta a confiabilidade do sistema, no que se refere à geração.

A vantagem de se usar UHEs está relacionada ao custo de operação, pois estas unidades apresentam apenas os custos de manutenção e operação. Já a utilização de UTEs eleva o custo da geração, pois além de terem os mesmos custos presentes nas UHEs, há o custo do combustível, que varia de acordo com o tipo utilizado, por exemplo: gás, carvão e óleo. Portanto, se faz necessário otimizar a escolha da UTE que irá operar, o tipo de combustível a ser utilizado e a geração de cada termoelétrica, pois estes fatores impactam diretamente no custo total do sistema de geração.

### 1.1.1 Usina Termoelétrica

O princípio básico do funcionamento da Usina Termoelétrica consiste na transformação da energia térmica (calor) em energia elétrica. A fonte da energia térmica pode ser a queima de combustíveis fósseis (carvão, óleo e gás) ou de combustível renovável (biomassa), além de alternativas como a fissão nuclear.

A Figura 1 representa o processo de geração de energia elétrica a partir da Usina Termoelétrica convencional, que utiliza-se da queima de combustível, sendo destacadas as principais partes que a constitui. Na sequência, são identificadas e apresentadas as partes ilustradas pela Figura 1 [1].

- 1 → **Caldeira:** é onde ocorre a queima do combustível e a transformação da água, contida no duto, em vapor a alta temperatura e pressão, em torno de 540°C e 170 bar;
- 2 → Refere-se a entrada de combustível;
- 3 → **Turbina a vapor:** responsável por transformar a energia do vapor em energia mecânica de rotação. Esta transformação ocorre devido a passagem do vapor pelas pás da turbina, que a faz girar;

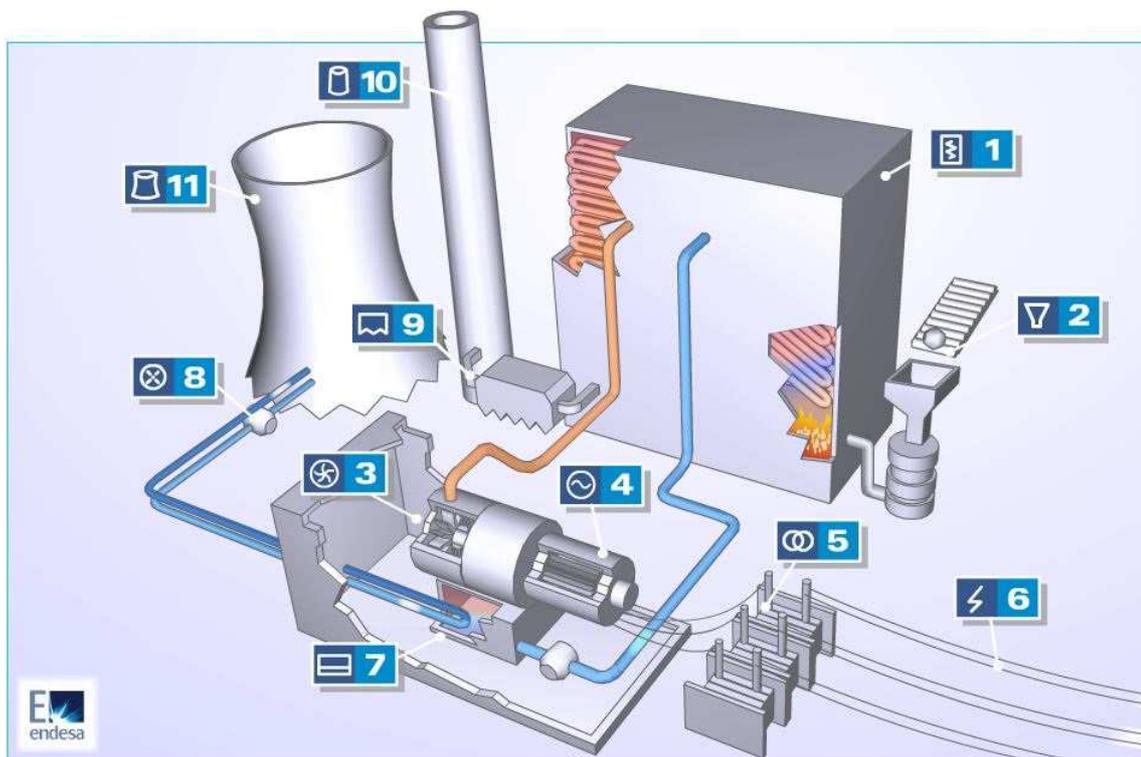


Figura 1 – Funcionamento da Usina Termoeletrica convencional

Fonte: [1] - Modificada

- 4 → **Gerador:** responsável por transformar a energia mecânica de rotação em energia elétrica, devido à conexão mecânica entre o eixo da turbina e o eixo do rotor gerador;
- 5 → Transformadores elevadores: recebem a energia elétrica proveniente do gerador e eleva sua tensão, para que seja transmitida pela rede elétrica;
- 6 → Rede elétrica: responsável por transferir a energia elétrica da UTE até o ponto de seu consumo;
- 7 → Condensador: compartimento onde o vapor, que ao passar pela turbina, se condensa e em seguida é enviado à caldeira, iniciando novamente o ciclo;
- 8 → Bomba de refrigeração: responsável por fazer circular a água de refrigeração entre o condensador e a fonte fria (rio, mar ou torre de refrigeração);
- 9 → Equipamento de redução de emissões: responsável por filtrar partes dos gases provenientes da queima do combustível, para que, posteriormente, sejam tratados e depois emitidos ao ambiente;
- 10 → Chaminé: responsável por dispersar os gases, provenientes do equipamento de redução, para a atmosfera;
- 11 → Torre de refrigeração: responsável por resfriar a água do circuito de refrigeração.

Com base na descrição das partes da UTE convencional, pode ser associada uma representação equivalente que consiste nos itens Caldeira-Turbina-Gerador [2], permitindo a modelagem da entrada da matéria-prima e do resultado obtido no processo, a energia elétrica.

A análise econômica da UTE permite estabelecer alguns parâmetros, a fim de se definir sua característica de entrada/saída (combustível/potência elétrica). De forma que, na resolução do problema do Despacho Econômico, a potência a ser quantificada refere-se a potência elétrica líquida ( $P_{liq}$ ) da termoelétrica, pois em torno de 2% à 6% do total de energia elétrica gerada é consumida pela UTE em serviços auxiliares ( $P_{aux}$ ), cujos serviços estão relacionados com a operação dos equipamentos de condensação, bombas, dentre outros usos. A Figura 2 representa o esquema deste processo, desde a entrada do combustível até a obtenção da potência líquida a ser entregue à rede elétrica, onde C, T e G referem-se à Caldeira, Turbina e Gerador, respectivamente.

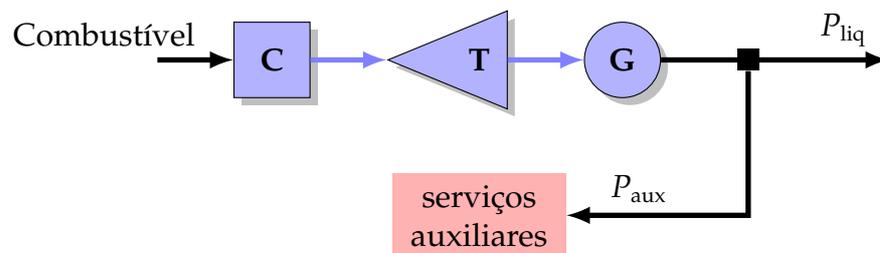


Figura 2 – Representação esquemática da geração termoelétrica  
Fonte: [2] - Adaptada

Portanto, a potência de entrada e a potência de saída da termoelétrica consistem na potência térmica e na potência elétrica (MW), respectivamente. A partir da relação entre a potência de entrada e saída, [2], é possível obter uma curva real para a função de custo de geração, que é proveniente dos cálculos relacionados aos testes de taxa de calor sobre os equipamentos, principalmente, turbina a vapor e o gerador. A curva obtida a partir dos pontos experimentais pode ser aproximada, com boa precisão, por uma função quadrática, de acordo com [2]. A obtenção desta curva é possível, pois a potência térmica está diretamente relacionada com a quantidade consumida de combustível e, conseqüentemente, com geração de energia elétrica. O consumo do combustível acarreta um custo de operação para a UTE, cujo consumo está relacionado com a potência elétrica líquida de saída, logo, a função a ser estudada nesta dissertação refere ao custo e a potência líquida, que tem como objetivo sua otimização através do Despacho Econômico e o custo de geração.

### 1.1.2 Sistema Elétrico Brasileiro

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é composto por unidades de geração hidroelétricas e termoelétricas, sendo a capacidade instalada, no mês de maio de 2015, de 136.776MW, cujo percentual de 65,8 corresponde a usinas hidroelétricas. Já as unidades termoelétricas representam 29,8% desta capacidade, dentre as quais se destacam as termoelétricas a Gás Natural e Biomassa [3], conforme apresentado na Figura 3.

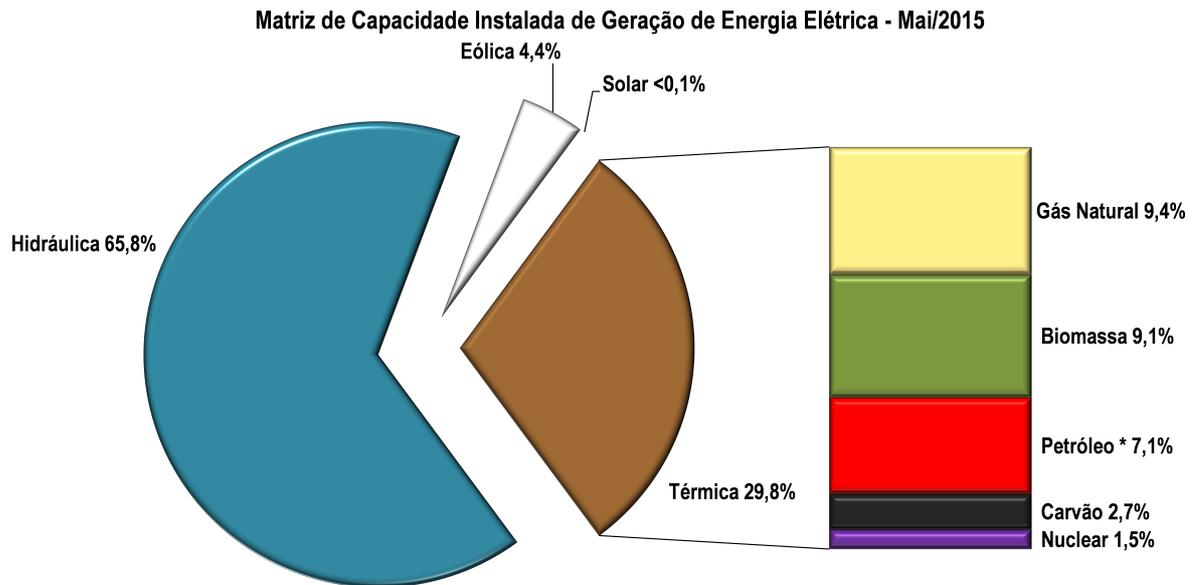
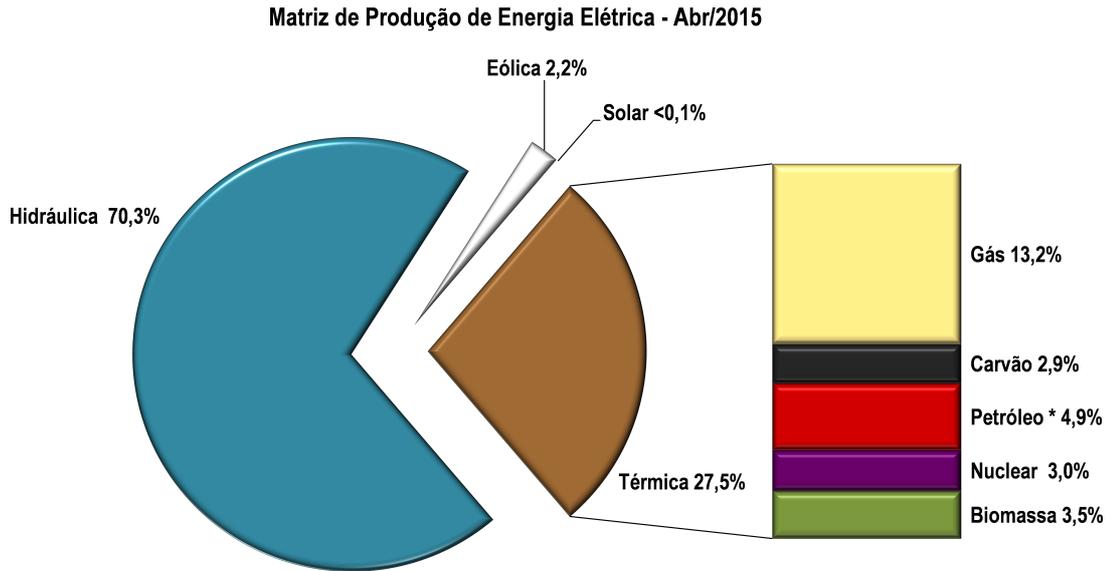


Figura 3 – Capacidade instalada do SEB sem importação contratada - Maio 2015  
Fonte: MME [3]

O percentual da representatividade dos geradores na capacidade instalada do SEB não condiz com a operação do mesmo. De acordo com a Figura 4, no mês de Abril, a geração hidráulica representou 70,3%, enquanto que a geração termoelétrica totalizou 27,5% no mesmo período, do qual se destaca a geração por gás natural que representou 13,2% de toda a produção do SEB.



\* Em Petróleo estão consideradas as usinas a óleo diesel, a óleo combustível e as usinas biocombustíveis.

Figura 4 – Geração de energia elétrica do SEB por tipo de fonte - Abril 2015  
Fonte: MME [3]

A operação do SEB é realizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), cuja prioridade é o atendimento à demanda através do despacho das unidades geradoras. A preferência é sempre pela geração através de Usinas Hidroelétricas, devido a seu custo reduzido. Porém, a utilização deste tipo de geração sem qualquer estudo prévio do cenário hidrológico futuro, pode resultar em um custo de operação reduzido no presente, mas, dependendo das afluências futuras o custo futuro para o atendimento à demanda pode ser elevado, caso haja queda nas afluências. Este problema caracteriza o “Dilema do Operador”, que consiste na decisão do tipo de geração no momento atual e, conseqüentemente, o quanto esta decisão pode impactar no custo da geração futura. A Figura 5 representa a indecisão do ONS ao operar o SEB.

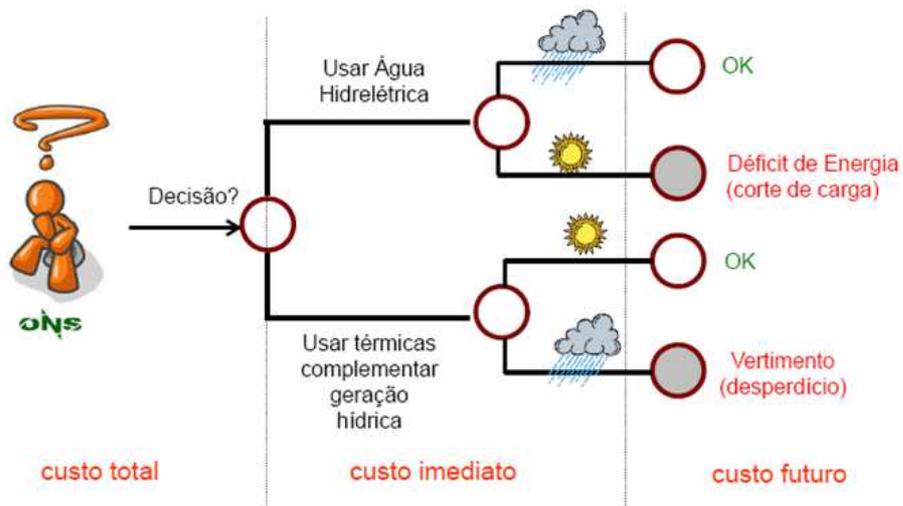


Figura 5 – Dilema do Operador Nacional do Sistema  
Fonte: ONS

O atendimento à demanda por um custo ótimo, está associada ao percentual de geração por unidades hidroelétricas e termoelétricas que é utilizada. A opção pela geração através de termoelétricas, no momento atual, implica no aumento do custo imediato (CI), mas reduz o custo futuro (CF), pois haverá represamento de água nos reservatórios das UHE para o uso futuro. Portanto, a operação resulta num custo total que é formado pela parcela referente ao custo futuro e ao custo imediato, conforme ilustrado na Figura 6, onde o eixo vertical representa o custo da operação e o eixo horizontal refere-se ao volume das hidroelétricas do sistema.

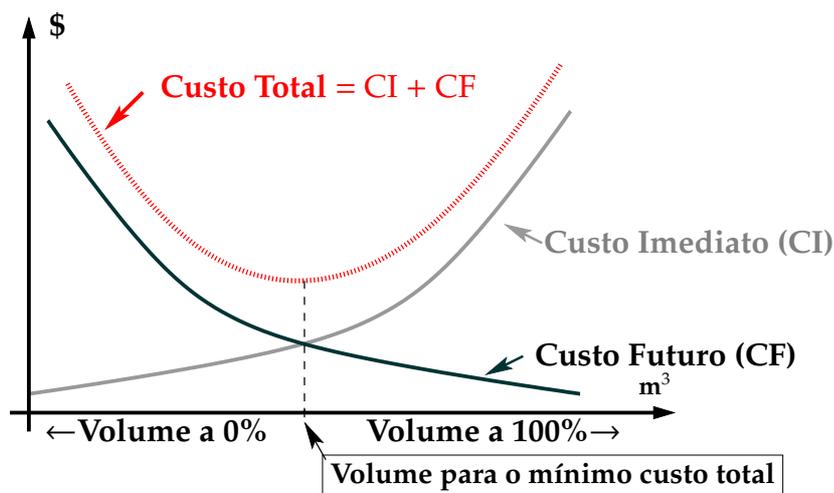


Figura 6 – Função de custo futuro  
Fonte: [4] - adaptada

Ao definir o montante da geração hidráulica, eólica e solar que supri a demanda, o excedente é atendido a partir do despacho das termoelétricas. Devido à variedade de combustíveis que são utilizados em unidades termoelétricas, existem diversos custos de geração, dessa forma, se faz necessário a otimização do despacho de cada uma das unidades geradoras envolvidas no processo, cujo objetivo é a redução do custo operativo total do sistema.

O despacho das termoelétricas do SEB leva em consideração o Custo Variável Unitário (CVU), que é atribuído à cada unidade termoelétrica. Este custo está associado ao acréscimo de 1MWh na geração da respectiva UTE. Portanto, a decisão do ONS em despachar ou não o referido gerador térmico é com base no CVU da termoelétrica e no Custo Marginal de Operação (CMO), em que apenas as UTEs que apresentarem seu CVU inferior ao CMO atual tem a possibilidade de ser despachada, a Figura 7 ilustra a classificação das termoelétricas por região do SEB com base no CVU.

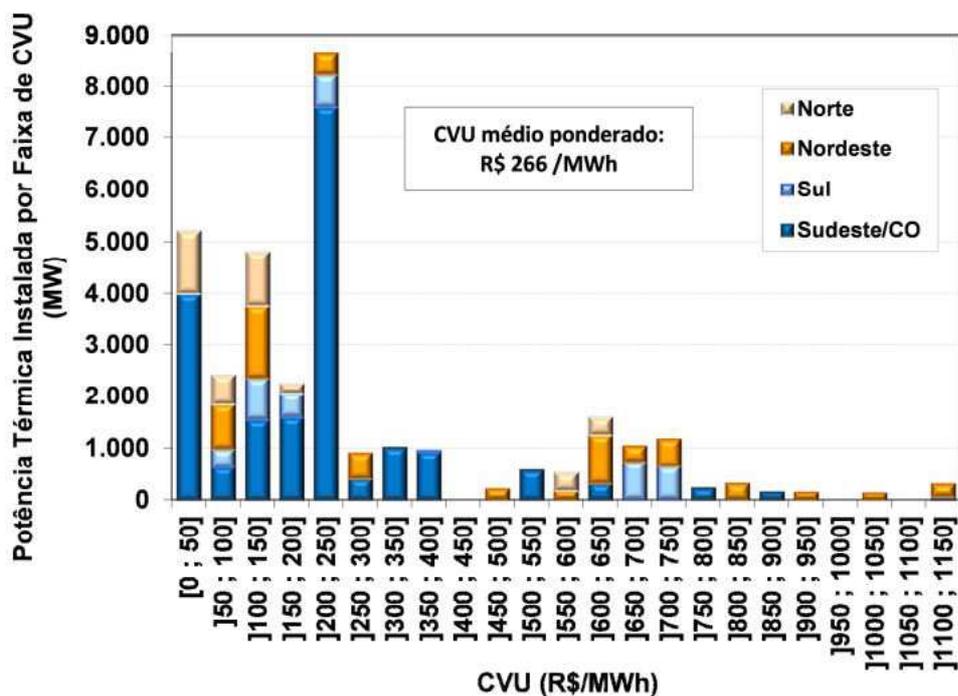


Figura 7 – Distribuição do parque térmico por faixa de CVU e por subsistema  
Fonte: EPE [5]

O cálculo do CMO é proveniente dos modelos NEWAVE e DECOMP [6,7], que são programas utilizados no planejamento da operação de médio prazo do SEB. Este cálculo, leva em consideração o cenário atual do Sistema Interligado Nacional (SIN) e corresponde ao valor adicional à operação do sistema de geração para o acréscimo de 1MWh na demanda. A Figura 8 representa a evolução do CMO para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), desde 2011 até o mês de Maio de 2015, finalizado com o valor de R\$ 367,91/MWh no dia 31/05/2015 [3]. Nesta figura, observa-se que no ano de 2014 e 2015, até o mês de Abril, houve uma elevação considerável neste custo, comparado com os anos anteriores, fator causado devido episódio da redução de precipitação de chuva pelo qual o Brasil tem passado, já que uma redução na afluência implica em menor geração hidráulica e, conseqüentemente, maior geração das termoeletricas. Por conseqüência do aumento da utilização de termoeletricas para suprir a demanda, verifica o aumento no custo imediato, mas com a expectativa de redução do custo futuro, já que a água das hidroelétricas foram economizada.

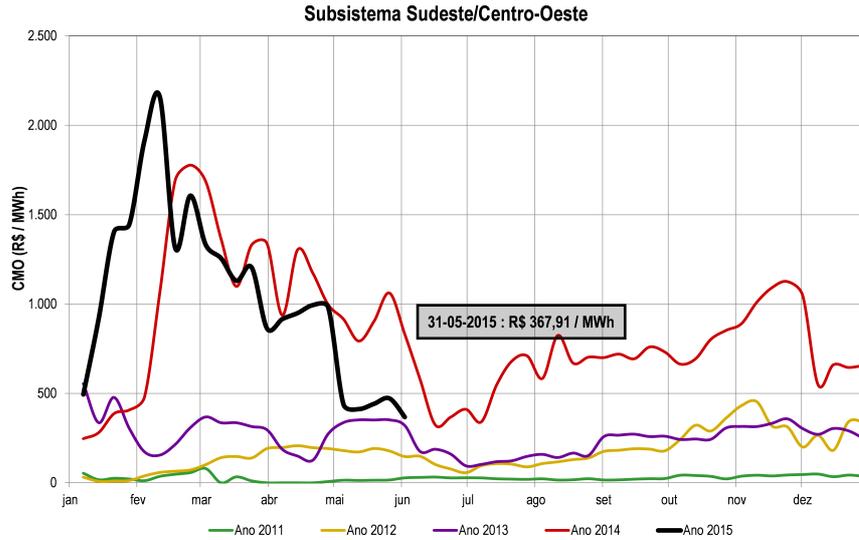


Figura 8 – Evolução do Custo Marginal de Operação - Subsistema Sudeste/Centro-Oeste

Fonte: MME [3]

A fim de ilustrar o despacho das termoeletricas do SEB, a Figura 9 mostra a evolução desta operação ao longo do mês de Maio do SEB, separado por subsistemas (SE/CO, NE, N, S). Em comparação com a evolução do valor do CMO apresentado na Figura 8 no mesmo período, é notado que com a variação do CMO ao longo do mês houve, por consequência, variação na geração termoeletrica, 9, cujo comportamento destas variações é similar, ilustrando assim o despacho das termoeletricas realizado no SEB.

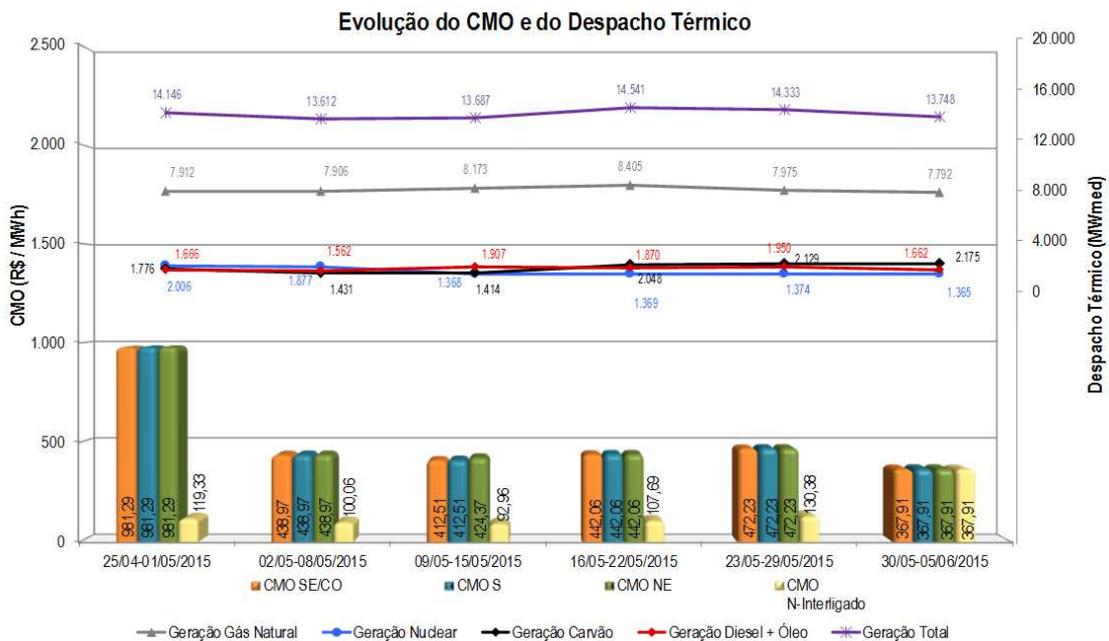


Figura 9 – Evolução do CMO e despacho térmico do SEB - Maio 2015

Fonte: MME [3]

De acordo 9, é verificada a predominância da geração por UTEs a base de gás natural, seguida da geração nuclear que iniciou o mês com sua operação na capacidade total, mas, a partir da segunda semana, teve sua geração reduzida, conforme mostra a análise do gráfico.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A solução do Despacho Econômico é importante para o planejamento e a operação do sistema elétrico de potência, pois consiste no atendimento à demanda ao menor custo de geração do sistema. Portanto, a fim de resolver o problema do Despacho Econômico com características reais, se faz necessário a utilização de técnicas de otimização associada a alguma outra metodologia que permita contornar o problema da descontinuidade e da não convexidade inerente ao problema. Tais estratégias podem se basear em metodologias como as técnicas metaheurísticas bioinspiradas que, agregadas à métodos de otimização clássica, são capazes de produzir boas soluções em um tempo de processamento reduzido. Dessa forma, a presente dissertação faz uso da otimização via Enxame de Partículas e do algoritmo via ecolocalização de morcegos, a fim de obter soluções de boa qualidade para o problema do Despacho Econômico.

## 1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é resolver o problema do Despacho Econômico termoelétrico não convexo e descontínuo com solução de boa qualidade. Sendo proposto como método a utilização de metaheurísticas bioinspiradas (Otimização via Enxame de Partículas e o algoritmo via ecolocalização de morcegos) associado a um otimizador não linear.

## 1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO

Em decorrência da pesquisa realizada na elaboração desta dissertação, foram produzidos os seguintes trabalhos:

- OLIVEIRA, E. S.; SILVA JUNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W.; DIAS, B. H.; OLIVEIRA, E. J. **Non-convex Economic Dispatch using Trelea Particle Swarm Optimization**. In: IEEE PowerTech, Eindhoven, 2015..
- OLIVEIRA, E. S.; SILVA JUNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W.; DIAS, B. H.; FILGUEIRAS, M. J. **Bat Algorithm Aplicado ao Despacho Econômico de Geração de Energia Elétrica Considerando Zonas Proibitivas de Geração**. SBPO, Porto de Galinha-PE, 2015..

- OLIVEIRA, E. S.; SILVA JUNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W.; DIAS, B. H.; FILGUEIRAS, M. J. **Despacho Econômico com Zonas de Operação Proibidas através de Otimização Bioinspirada**. 12º CBIC, Curitiba, 2015

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta este capítulo introdutório e mais seis capítulos, um apêndice e um anexo, cuja organização se estabelece da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica das metodologias empregadas ao problema do Despacho Econômico termoelétrico que foram encontradas na literatura, além da revisão do algoritmo via ecolocalização de morcegos, cuja utilização na resolução do problema Despacho Econômico é proposta por esta dissertação.

No Capítulo 3, é apresentada a modelagem clássica do Despacho Econômico, junto com a consideração do efeito do ponto de válvula e das restrições de zonas de operação proibidas e múltiplo combustível, que tornam o modelo do Despacho Econômico mais real.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia de Otimização via Enxame de Partículas e sua variante Trelea. Neste capítulo, é mostrada a formulação da otimização do Despacho Econômico baseada no Enxame de Partículas.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia de Otimização via ecolocalização de morcegos implementada, envolvendo a formulação da otimização do Despacho Econômico através do algoritmo aplicado.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos pela utilização das metaheurísticas bioinspiradas e suas análises. Os sistemas termoelétricos utilizados nos Casos 1, 2 e 3 são difundidos na literatura especializada, sendo os Casos 4 e 5 originados a partir de derivações realizadas dos Casos 2 e 3, respectivamente. Por fim, é apresentado o resultado e a análise para o Caso 6, que corresponde ao caso criado em que são consideradas todas as três características reais apresentadas nesta dissertação.

O Capítulo 7, apresenta as principais conclusões do trabalho e algumas propostas de desenvolvimentos futuros.

No APÊNDICE A, é apresentado o desenvolvimento detalhado da variante Trelea referente ao modelo clássico da Otimização via Enxame de Partículas.

No ANEXO A são dispostos os dados dos sistemas termoelétricos utilizados para a avaliação das metaheurísticas propostas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A representação mais detalhada do Despacho Econômico das unidades termoe-létricas adere ao problema grau de complexidade maior, sendo necessário a utilização de técnicas de otimização que possibilitem sua resolução. Muitas destas técnicas se baseiam em metaheurísticas bioinspiradas. Com base nos principais métodos utilizados para a resolução deste problema, o presente capítulo aborda as publicações mais relevantes na área, fazendo uma breve apresentação das metaheurísticas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.2 PRINCIPAIS METODOLOGIAS

#### 2.2.1 Enumeração Exaustiva

Por se tratar de um método que consiste na listagem de todas as possíveis combinações de operação das UTEs, para avaliação e determinação da melhor combinação, que satisfaça as restrições do problema ao menor custo, a enumeração exaustiva restringe-se a sistemas de pequena dimensão [8]. Esta limitação se deve ao custo computacional, que aumenta consideravelmente com o porte do sistema.

Outra desvantagem da enumeração exaustiva refere-se a possibilidade de combinações, que são impraticáveis por não satisfazerem às restrições operacionais do problema, ou seja, quando a potência gerada total não satisfaz a demanda. Por estes aspectos a sua utilização se limita a sistemas de pequeno porte.

#### 2.2.2 Lista de Prioridade

A fim de contornar a desvantagem da estratégia descrita anteriormente, este método propõe a ordenação das geradoras termoe-létricas através de parâmetro que leva em consideração, geralmente, suas características econômicas e/ou seus indicadores de eficiência energética, criando uma lista de prioridade [9] dentre as UTEs do sistema. A partir desta característica é pré-determinada uma ordem do despacho das UTEs, e então é realizado o processo que visa o atendimento das restrições do problema.

Com a redução do esforço computacional, devido à limitação das possibilidades de combinações por causa da lista de prioridade que a técnica adiciona, cria-se uma tendência a soluções correspondentes a mínimos locais de baixa qualidade, de acordo com [10] e [11].

### 2.2.3 Programação Dinâmica

Esta metodologia se baseia na regressão ou progressão temporal. De acordo com [12], este método consiste na programação dinâmica desenvolvida por Richard Bellman a partir do estudo matemático de processos de decisão multi-temporais. Referente a regressão, o método se inicia no período final e, período após período, retrocede até o ponto inicial. Durante este percurso, as informações decorrentes do processo de otimização são guardadas com o objetivo de se definir uma trajetória. No caso, estas informações referem-se ao custo global da operação do sistema e o respectivo despacho das UTEs para o período considerado. Portanto, a otimalidade do processo de regressão temporal independe da maneira que se inicia, mas deve-se terminar da melhor forma possível, segundo [13].

A utilização de programação dinâmica implica no consumo de uma considerável quantidade de memória e um elevado tempo computacional, conseqüentemente, com o aumento da dimensão do sistema esta desvantagem se agrava, pois a relação entre a dimensão e as dificuldades apresentadas se comporta de forma exponencial [13]. Por outro lado, este método se aplica a problemas não convexos e não lineares.

### 2.2.4 Relaxação Lagrangeana

Este método adere às suas restrições um relaxamento, além de separá-las em: (i) restrições locais, referentes a cada termoelétrica e seus limites de operação; (ii) restrições do sistema, que envolve todas as UTEs, bem como a restrição do atendimento a demanda.

Devido à separação das restrições do problema, há a possibilidade da divisão em subproblemas que são resolvido através de Programação Dinâmica, podendo utilizar a otimização dual para que as restrições sejam atendidas na solução final. Porém, a solução dual ótima encontrada possa não conduzir a uma solução primal viável, por causa da não convexidade do problema, e esta dificuldade pode ser agravada com o aumento do número de geradores termoelétricos e de unidades termoelétricas idênticas [13].

### 2.2.5 Branch-and-Bound

*Branch-and-Bound* (B&B) destaca-se pelo uso na resolução de problemas de programação inteira mista e consiste, inicialmente, na resolução de problema relaxado, cujas variáveis assumem valores característicos e servem pra a obtenção de um limite inferior (LINF) para o problema. As variáveis da solução encontrada são avaliadas quanto à violação de seus limites. Na sequência, inicia-se a formação de uma árvore de subproblemas, tendo em cada um a fixação dos valores inteiros adequados para um

subconjunto destas variáveis. A cada novo subproblema criado, tem-se a adesão de um nó na árvore, correspondendo a uma solução do problema.

As características negativas deste método estão relacionadas ao problema, que deve apresentar restrições e função de custo lineares, ao tempo computacional e à capacidade de armazenamento que varia de acordo com o porte do sistema. Os pontos críticos desta técnica estão associados à forma com que os nós são particionados, à velocidade na resolução dos subproblemas em cada nó, e às heurísticas para obtenção de pontos viáveis. Mesmo com avanços tecnológicos terem assegurado redução no tempo computacional, não foram suficientes para torná-la uma técnica computacionalmente relevante, pois ainda há dificuldades quanto à aplicação em sistemas de grande porte, embora apresente facilidade na inserção de restrições e variáveis, e na obtenção de ótimo global.

#### 2.2.6 Busca Tabu

Esta metaheurística consiste no processo de busca pelo ótimo a partir de uma lista de movimentos proibidos. A busca realizada pelo método permite a exploração de regiões próximas à solução atual, possibilitando a seleção de uma solução melhor encontrada nesta região, mesmo que esta piore a solução global atual. Esta técnica permite a fuga de um ponto de boa qualidade local.

Quanto ao retorno a um ótimo local previamente visitado, a Busca Tabu (BT), a partir de seu critério de aspiração, pode permitir sob determinadas condições. Quando o critério de aspiração não é atendido, a exploração periódica do espaço de busca é evitada e a lista tabu inclui as soluções temporariamente proibidas. O conceito de classificação tabu é usado para definir as soluções da lista, ou seja, temporariamente proibidas. Após a alteração na classificação do movimento para não tabu, devido ao atendimento do critério de aspiração, o mesmo não violará as restrições, permitindo assim sua seleção.

As características mencionadas deste método dão ao mesmo um aspecto de memória adaptativa, permitindo ao processo a fuga de determinados mínimos locais. Desta forma, este método se torna relevante em vários problemas de otimização combinatória.

#### 2.2.7 Algoritmo Genético

Esta heurística baseia-se na evolução das espécies definida pela teoria de Charles Darwin. O Algoritmo Genético (AG) pertence ao grupo de metaheurística, pois seu método se norteia pela observação de aspectos da natureza com o propósito de solucionar problemas.

Com a definição do tamanho da população, são criados indivíduos, que são formados, normalmente, por uma cadeia de atributos de tamanho fixo, e cada indivíduo representa uma solução viável para o problema. Este indivíduo é semelhante a um ou mais cromossomos, onde cada gene é representado por um atributo, que tem seu valor alterado conforme as operações genéticas representadas por mecanismo como seleção, cruzamento e mutação. No processo de cruzamento há a troca de gene(s) entre os cromossomos envolvidos; na mutação, um ou mais genes do cromossomo é escolhido, de forma aleatória, e alterado, por fim, a seleção tende a escolher a melhor solução para que haja propagação de suas características através da reprodução. A melhor solução da população atual pode se propagar através de um mecanismo adicional denominado elitismo. Dessa forma, o algoritmo assegura a evolução de cada indivíduo para uma solução que tende a ser ótima para o problema.

A difusão da técnica no âmbito da solução de problemas de otimização se deve à simplificação que o método permite na formulação. Em contrapartida, a técnica pode apresentar como desvantagens o tempo computacional e ao ajuste dos parâmetros genéticos, principalmente em relação às operações, pois estes parâmetros interferem diretamente na qualidade das soluções obtidas. A seguir, são apresentados alguns trabalhos que envolvem a metodologia e o problema de otimização da operação e despacho de termoelétricas.

Em [14], aplicou-se o AG ao problema da operação de unidades termoelétricas de geração, comprovando a viabilidade de seu uso. Já [15] utilizou o método para operar um sistema durante sete dias, tendo seus resultados comparados com a técnica de Relaxação Lagrangeana.

Para maior eficiência do Algoritmo Genético, algumas alterações foram propostas ao método tradicional. Em [16], utilizou-se o AG e adicionou-se o critério de migração juntamente com a atualização do multiplicador em um problema do Despacho Econômico, cujo indivíduo migrante é gerado a partir do melhor indivíduo e é adicionado à população apenas quando não se obtém avanço na busca, durante um determinado número de gerações. Já a atualização do multiplicador está associada às restrições do problema.

O Algoritmo Genético convencional agregado à busca direcional aplicado ao Despacho Econômico de geradoras termoelétricas, compõem o trabalho apresentado em [17]. A mudança em relação à técnica clássica ocorre na inicialização da população, em que apenas o primeiro cromossomo é criado de forma aleatória e avaliado. Na sequência, a criação dos demais indivíduos seguem a direção que o cromossomo anterior produziu.

### 2.2.8 Programação Evolutiva

A Programação Evolutiva (PE) apresenta uma velocidade de convergência superior ao AG e, geralmente tende a encontrar soluções de melhor qualidade, além boa convergência. Porém, este tipo de algoritmo faz uso de quantidade considerável de memória.

Sua aplicação em problema do Despacho Econômico é exemplificada em [18], que utilizou diferentes variações de PE e a metodologia clássica, com o objetivo de avaliar os desempenho das técnicas.

### 2.2.9 Evolução Diferencial

Evolução Diferencial (ED) é uma técnica similar ao AG, pois apresenta as operações genéticas de mutação, seleção e cruzamento. Porém, suas diferenças consistem, por exemplo, na representação do cromossomo, que no ED é por número real, na realização da operação genética de mutação que implica em uma perturbação nos indivíduos existentes [19], e na atualização de equações, que é uma característica de melhora deste método em relação ao AG.

Uma das desvantagens deste método, assim como no GA, está associado ao ajuste dos parâmetros do modelo. Desta forma, ao tentar melhorar a eficiência do método, são utilizados fatores que o auxilia ou até mesmo combine com outras heurísticas. Trabalhos decorrentes desta metodologia estão descritos na sequência.

Em [20], utilizou-se a metodologia ED associada à localização aleatória aplicada ao problema do Despacho Econômico, que faz com que o processo de mutação siga a tendência das melhores soluções que venceram um determinado torneio. Outra alteração que a metodologia propõe é a da adoção de valor negativo para um dos parâmetros aplicados ao processo de mutação, fazendo que o valor de  $\alpha$  varie entre o intervalo compreendido por  $[-1; -0,4] \cup [0,4; 1]$  para cada ponto de mutação.

Em [21], o problema do Despacho Econômico foi resolvido através da técnica que integra a ED ao método de otimização baseado em colônia de formiga (OCF). Neste trabalho, ocorre a interação entre características de ambos os métodos, das operações genéticas da metodologia da ED com o parâmetro de feromônios que é utilizado no OCF. Portanto, há etapas na heurística em que se realiza a clonagem e a mutação do feromônio.

### 2.2.10 Otimização via Enxame de Partículas

Com base no comportamento de espécies que vivem numa sociedade e que, por consequência, adquirem uma inteligência coletiva ou social, os integrantes (indivíduos) desta sociedade se autoajudam na busca do objetivo como, por exemplo, por abrigo

ou alimento. Portanto, esta técnica que também é conhecida como Otimização via Enxame de Partículas, ou do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), tem como base o comportamento de um bando de pássaros ou cardume, em que se modela o movimento dos indivíduos destes grupos [22].

O algoritmo do PSO baseia na busca pela solução ao longo do espaço delimitado pelas restrições do problema, sendo explorado por todos os indivíduos, chamados de *particle* ou partícula, cuja trajetória descrita é definida e alterada de acordo com a posição da atual melhor solução da população e a melhor posição deste indivíduo durante toda a trajetória. Mais detalhes referentes ao método e à atualização da posição são explicitados no Capítulo 4.

A técnica do PSO, assim como suas variações e até técnicas híbridas que envolvem o PSO, têm sido aplicados com a finalidade de solucionar o problema do Despacho Econômico. Decorrente destas aplicações, são apresentados alguns artigos que ilustram tais usos.

A adição da característica antipredatória da partícula, ou pássaro, ao modelo clássico do PSO utilizada em [23], cuja consideração garantiu ao método um aprimoramento na capacidade de busca do bando.

Em [24], apresentou-se um melhoramento da técnica convencional de PSO, em que foi agregado ao método a sequência caótica com o decrescimento linear dos pesos de inércia, usados na atualização da posição da partícula e o processo matemático do cruzamento, com a finalidade de aumentar a capacidade de exploração do PSO.

Foi utilizado em [25] o modelo tradicional de PSO e do modelo com a adição do fator de constrição e do peso de inércia adicionado ao processo de mutação de valor real. O objetivo desta técnica híbrida é de proporcionar melhoria na capacidade de busca do algoritmo, que resultou na superioridade do método modificado com a mutação para resolver o problema em questão.

Em [26], foi utilizada a combinação de duas técnicas, a técnica convencional do PSO e a Evolução Diferencial, resultando em um modelo que associou o padrão de busca característico do PSO e as operações evolucionária de seleção e mutação presentes no método ED.

### 2.2.11 Algoritmo do Morcego

Este método é uma técnica baseada na observação do comportamento da natureza, que tem como essência o princípio biológico dos morcegos de caçar e se locomover em ambiente onde a luz é escassa. Este princípio é o da ecolocalização, que é analisado através do Efeito Doppler, cujo morcego emite pulsos ultrassônicos, através da boca e narina, que são posteriormente captados, fornecendo informações quanto à distância

de obstáculos ou presas. Portanto, esta metodologia apresenta variáveis relacionadas à velocidade e posição do morcego, e variáveis de controle do movimento que são a sonoridade e a taxa de emissão do pulso sonoro, cuja atualização ocorre a cada iteração [19].

O Algoritmo do Morcego, também conhecido como *Bat Algorithm*, foi proposto recentemente, em 2010, por Xin-She Yang e tem se mostrado um algoritmo de alta eficiência, robustez e rapidez quando se aplica ao problema do Despacho Econômico, proposto neste trabalho. Informações referentes à formulação e à implementação do método são detalhados no Capítulo 5.

### 2.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, foram apresentadas algumas técnicas e relatos de artigos que aplica a técnica ao problema do Despacho Econômico. Sendo, por fim, mencionadas as técnicas que são utilizadas no desenvolvimento desta dissertação, cujas particularidades são apresentados no capítulos posteriores. Conforme ressaltados nas descrições das metodologias, não há uma heurística que possa ser utilizada para a resolução de todos os problemas. Portanto, o que deve de ser feito, é a análise do custo/benefício que cada método proporciona para a resolução do problema específico.

De forma geral, foram expostas as principais técnicas que são utilizadas na busca pela solução de boa qualidade para o Despacho Econômico das unidades geradoras termoelétricas.

### 3 DESPACHO ECONÔMICO DE TERMOELÉTRICAS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a operação do sistema elétrico a fim de assegurar o atendimento à demanda, a busca pela minimização do custo de geração de energia se torna o principal objetivo, com o propósito de redução do valor desta *commodity*. A este processo dá-se o nome de Despacho Econômico (DE).

A alocação da potência ativa a ser gerada para cada unidade termoeletrica em um determinado período é resultado do DE, que leva em consideração o custo de cada gerador, bem como suas restrições de operação. No Despacho Econômico termoeletrico, as UTEs apresentam um custo referente a operação e manutenção da unidade, além do custo relacionado com o combustível utilizado, o que não ocorre com as hidroelétricas devido ao seu combustível ser a água, não apresentando custo tão expressivo quanto o combustível da UTE.

Devido ao elevado custo ambiental e econômico de se operar o sistema de geração com termoeletricas, faz-se necessário otimização deste recurso levando muitas vezes a investimentos em fontes alternativas de geração, como exemplo a geração eólica e solar. Tais investimentos visam contribuir com a diversificação da matriz energética e, conseqüentemente, com a redução da utilização de termoeletricas.

A geração eólica utiliza o vento como fonte de energia, fazendo com que os aerogeradores ativem as turbinas e geradores que convertem a energia mecânica, proveniente do vento, em energia elétrica. Embora o investimento neste tipo de fonte ainda seja elevado, muitos países vêm adotando este recurso, pois o vento é uma fonte energética inesgotável e, portanto, renovável. Atualmente este tipo de geração no Brasil corresponde em torno de 5% a 6% [27]. Outra fonte de energia que está se tornando cada vez mais presente é a energia solar, cujo princípio baseia-se no aproveitamento da luz solar para geração de energia elétrica, denominada de fotovoltaica. Devido a seu elevado custo de implementação, a energia solar não é muito utilizada, a exemplo, na geração de energia elétrica no Brasil a geração média ficou em torno de 3MWmédio [27] não tendo um percentual expressivo na geração total.

Nas seções a seguir, são apresentadas algumas peculiaridades da operação do sistema termoeletrico que possibilitam a representação de características reais para a realização do Despacho Econômico, bem como a descrição deste problema.

#### 3.2 O PROBLEMA DO DESPACHO ECONÔMICO

O problema de alocação da potência ativa dentre as termoeletricas operantes, que visa a minimização do custo de geração, é tratado nesta dissertação, sendo deno-

minado de Despacho Econômico. Desta forma, se faz necessário a determinação da operabilidade das UTEs que compõe o parque gerador termoelétrico, caracterizando o problema de *Unit Commitment* (UC).

De acordo com o horizonte de planejamento da geração termoelétrica, a cada período de operação é necessário determinar quantas e quais UTEs estarão operando para atender à demanda. A realização destes dois processos configuram a etapa do problema de *Unit Commitment*. O despacho das termoelétricas ocorre da seguinte forma:

- Em cada período, através da aproximação do Despacho Econômico é feita a seleção das UTEs que opera para o atendimento à demanda, caracterizando o estudo de *Unit Commitment*, na sequência, um novo Despacho Econômico é realizado, porém, considerando apenas as UTEs habilitadas a operar no determinado período [28], conforme ilustra a Figura 10.

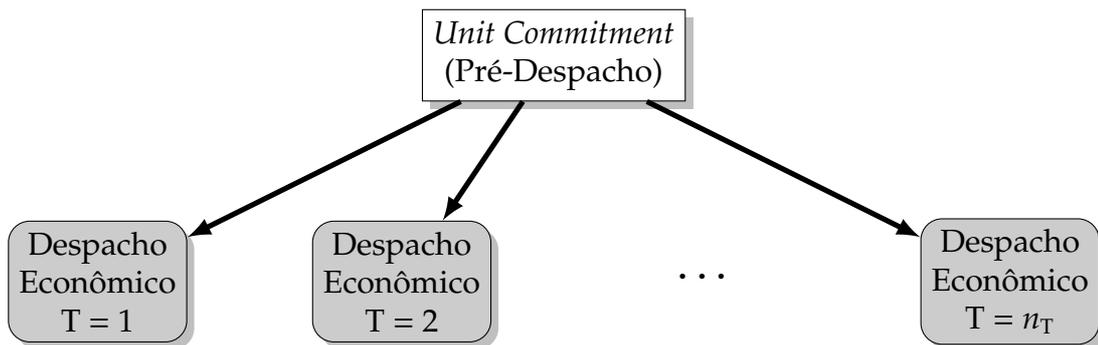


Figura 10 – Planejamento do *Unit Commitment*  
Fonte: [28] - Adaptada

O problema do Despacho Econômico consiste na otimização a função objetivo (FOB), que corresponde ao custo total da geração termoelétrica ( $F_T$ ), conforme representado pela equação (3.1), em que são atendidas as restrições de limite de operação do gerador e do balanço de potência ativa do sistema termoelétrico [2]. Normalmente, considera o sistema composto por  $N$  termoelétricas conectada a uma barra única, cuja soma das injeções de potência ativa destas unidades seja igual a demanda do sistema ( $P_D$ ), de acordo com (3.2), quando desconsiderada a perda na transmissão de energia, como mostrado na Figura 11.

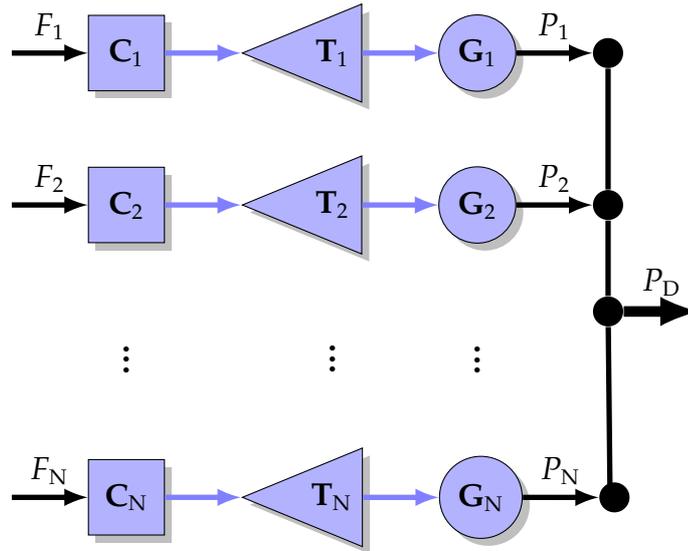


Figura 11 – Sistema de geração composto por N unidades termoelétricas  
Fonte: [2] - Adaptada

$$F_T = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_N(P_N) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (3.1)$$

$$P_1 + P_2 + \dots + P_N = \sum_{i=1}^N P_i = P_D \quad (3.2)$$

Na sequência é apresentada o detalhamento da formulação do problema do DE a ser otimizado, cuja objetivo é minimizar o custo de operação através da minimização de  $F_T$ .

### 3.3 FORMULAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO

A resolução do Despacho Econômico termoelétrico consiste em um problema de otimização, cujo objetivo é a minimização do custo operativo do suprimento da demanda para o período T. O referido problema a ser otimizado é composto, basicamente, por uma função objetivo ( $F_T$ ), que corresponde à soma dos custos do despachos das N termoelétricas utilizadas, e por um conjunto de restrições, sendo uma de igualdade referente ao balanço de potência ativa, e inequações relacionadas aos valores mínimo e máximo de geração das UTEs. O modelo matemático básico do problema de otimização é descrito a seguir.

$$\text{Minimizar } F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (3.3)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{i=1}^N P_i = P_D \quad (3.4)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3.5)$$

Onde:

$F_T$  : Função de custo total da operação do sistema;

$F_i$  : Função de custo da termoeletrica  $i$ ;

$P_i$  : Potência ativa gerada pela termoeletrica  $i$ ;

$P_D$  : Potência ativa demandada pelo sistema;

$P_i^{\min}$  : Potência ativa mínima gerada pela termoeletrica  $i$ ;

$P_i^{\max}$  : Potência ativa máxima gerada pela termoeletrica  $i$ ;

$N$  : Número total de termoeletricas do sistema.

No decorrer desta seção, são apresentadas os detalhes da formulação das características reais consideradas no problema do Despacho Econômico.

### 3.3.1 Função de custo da termoeletrica

A representação básica da unidade termoeletrica pode ser resumida na interação entre a caldeira, a turbina e o gerador, conforme apresentado no Capítulo 1. Portanto, observando a relação não linear entre a entrada do combustível na caldeira, o aumento da pressão do vapor na turbina e a geração de energia elétrica, é adotada uma função de custo não-linear, podendo ser aproximado por uma função quadrática [29], de acordo com a equação (3.6).

$$F_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (3.6)$$

Onde:

$a_i, b_i$  e  $c_i$  : São os coeficientes do custo de operação da UTE  $i$ .

Os coeficientes  $b$  e  $c$  estão diretamente relacionados com a utilização do combustível, tanto no custo do produto quanto no custo do transporte [30]. Já o coeficiente  $a$  representa o custo relacionado à mão-de-obra e à manutenção da termoeletrica, visto que mesmo sem geração o custo reproduzido pela constante  $a$  é considerado. A Figura 12 ilustra o gráfico da função quadrática do custo de operação da UTE  $i$ .

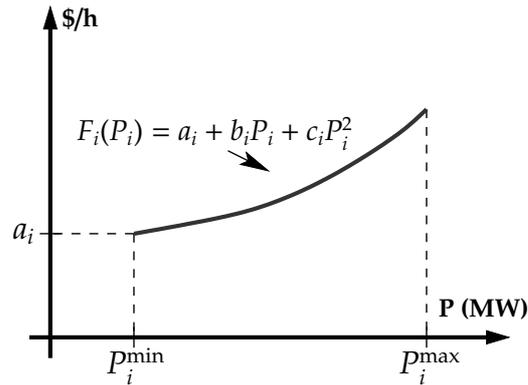


Figura 12 – Curva de entrada-saída característica da unidade termoeletrica  
Fonte: [29] - adaptada

### 3.3.2 Restrições clássicas do problema

As restrições do DE refletem nas limitações operativas apresentadas pelos equipamentos da UTE, dessa forma, elas devem ser satisfeitas, a fim de proporcionar confiabilidade e continuidade na geração de energia elétrica por esta UTE.

Nesta subseção, são apresentadas as restrições tradicionais, que são: (i) atendimento à demanda, que é garantido através da equação do balanço de potência ativa e (ii) os limites referentes ao nível de geração máximo e mínimo.

#### 3.3.2.1 Balanço de potência ativa

Esta restrição faz alusão ao atendimento da carga requisitada pelo sistema, através da geração de todas as unidades termoeletricas que estão aptas a operar. Portanto, o balanço de potência ativa, refere a uma restrição que deve ser satisfeita, conforme a equação (3.7).

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D = 0 \quad (3.7)$$

#### 3.3.2.2 Limites operativos

Os limites de operação da central termoeletrica, que limita a sua capacidade de geração entre o valor mínimo e máximo, estão associados à relação entre o combustível utilizado e as limitações da caldeira e da turbina [29]. Em (3.8), formula-se esta limitação, através de inequações, que representam a restrição de operação da máquina. Portanto, o valor a ser gerado pela UTE  $i$  para o problema do DE deve estar dentro deste intervalo.

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3.8)$$

A determinação do valor mínimo ( $P_i^{\min}$ ) de geração da unidade termoelétrica  $i$  está associada à limitação de carga mínima analisada, em conjunto com as características da caldeira e do conjunto turbina-gerador, conforme a descrição feita a seguir:

- **Caldeira:** Sua limitação mínima de geração está relacionada à estabilidade da queima do combustível, que pode variar entre 25-50% da capacidade de geração, a depender do tipo de caldeira e do combustível utilizado [29].
- **Turbina:** Tem sua operação limitada em um valor mínimo devido à restrição do vapor inerente ao equipamento, que é em torno de 10-15% [29] de sua capacidade máxima.

O limite máximo de operação ( $P_i^{\max}$ ) da termoelétrica  $i$  também é determinado pela capacidade de operação da caldeira, turbina-gerador, considerando a temperatura interna como um dos parâmetros críticos para a turbina [29].

### 3.3.3 Efeito do ponto de válvula

Com base na modelagem tradicional do DE, são adicionadas algumas alterações que visam a representação dos efeitos reais durante a geração termoelétrica. Um destes efeitos é o do ponto de válvula, que precisa ser representado, pois impacta diretamente na função de custo de cada gerador.

Na prática, o efeito do ponto de válvula é causado devido à realização do controle de temperatura interna tanto da caldeira, quanto da turbina. Isto porque no momento em que a válvula é aberta, há perda de temperatura/vapor que, conseqüentemente, afeta o consumo do combustível, já que a tendência do funcionamento do equipamento é de elevar novamente a temperatura até um ponto ideal. Este incremento momentâneo no custo de operação, eleva o grau de não linearidade da função, conforme ilustrado pela Figura 13. Portanto, a representação deste efeito pode ser descrita matematicamente como uma função senoidal adicionada à função quadrática do custo operativo da modelagem clássica, que resulta na equação (3.9).

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \alpha_i \left| e_i \sin \left( f_i (P_i^{\min} - P_i) \right) \right| \quad (3.9)$$

Onde:

$e_i$  e  $f_i$ : São os coeficiente que representam o efeito do ponto de válvula da termoelétrica  $i$ ;

$\alpha_i$ : É um número binário que possibilita a configuração do efeito do ponto de válvula para a termoelétrica  $i$ .

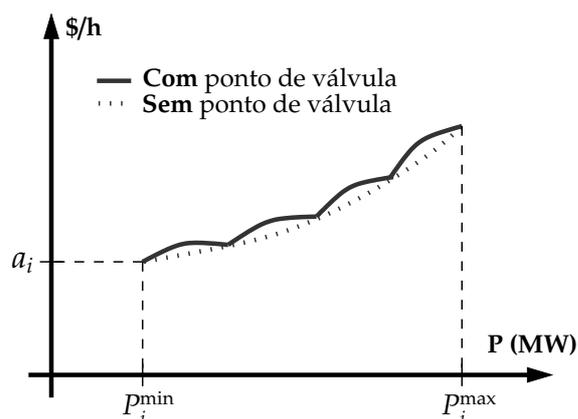


Figura 13 – Função de custo com/sem ponto de válvula  
Fonte: Próprio autor

A consideração deste efeito eleva o grau de não linearidade do problema, devido à inserção de múltiplos pontos de mínimos e máximos na função de custo da respectiva UTE, caracterizando ondulações ao longo da curva, transformando a região de operação em uma região não convexa. Dessa forma, este efeito tende a simular um comportamento físico dos equipamentos da termoelétrica, resultando em grau de dificuldade elevado para a otimização do despacho, se comparado com a formulação clássica. Mas, sua consideração na modelagem do problema, o torna mais fidedigno.

### 3.3.4 Restrições realísticas do problema

A fim de modelar as limitações físicas dos equipamentos da termoelétrica para que o Despacho Econômico se torne mais realista, são inseridas parcelas ao modelo clássico que representam tais limitações, por exemplo, na consideração do ponto de válvula é inserida a função senoidal na equação quadrática convencional do custo de geração de cada termoelétrica.

Outras restrições também agregam um perfil real para a modelagem do problema, como é o caso da consideração do efeito do múltiplo combustível (MC) e das zonas de operação proibidas (ZOP), que estão descritas na sequência.

Todas as formulações apresentadas a seguir, consideram a função de custo de geração com a inserção da parcela referente ao efeito do ponto de válvula.

#### 3.3.4.1 Múltiplo combustível

Uma termoelétrica que possui mais de uma fonte de combustível, tem seu custo operativo diretamente associado ao tipo de combustível utilizado, tendo para cada tipo uma equação de custo. Portanto, o Despacho Econômico precisa determinar qual o valor a ser gerado pela termoelétrica  $i$  e qual o combustível utilizado durante a geração.

Na literatura, são encontrados casos cujo tipo de combustível a ser queimado corresponde a uma determinada faixa de operação da UTE em questão. Caso um dos limites seja extrapolado, desde que não seja o valor  $P^{\min}$  e  $P^{\max}$ , outra curva de custo e outro tipo de combustível tem de ser analisado. O equacionamento matemático para uma determinada UTE que possui a restrição de MC, com  $n_c$  tipos de combustíveis diferentes, está descrito a seguir, conforme [31], [32] e [33].

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_i + c_{i1}P_i^2 + \alpha_i |e_{i1} \sin(f_{i1}(P_i^{\min} - P_i))|, & \text{Combustível 1, } P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2}P_i + c_{i2}P_i^2 + \alpha_i |e_{i2} \sin(f_{i2}(P_{i1} - P_i))|, & \text{Combustível 2, } P_{i1} \leq P_i \leq P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{in_c} + b_{in_c}P_i + c_{in_c}P_i^2 + \alpha_i |e_{in_c} \sin(f_{in_c}(P_{i(n_c-1)} - P_i))|, & \text{Combustível } n_c, P_{i(n_c-1)} \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \quad (3.10)$$

Onde:

$n_c$ : Representa o número total de combustível da termoeletrica  $i$ .

A Figura 14 ilustra a curva de custo da UTE que apresenta três tipos diferentes de combustíveis, com a restrição do MC ocorre a inserção de pontos de mínimos e máximos locais na função do custo de operação da termoeletrica, tornando-a não convexa.

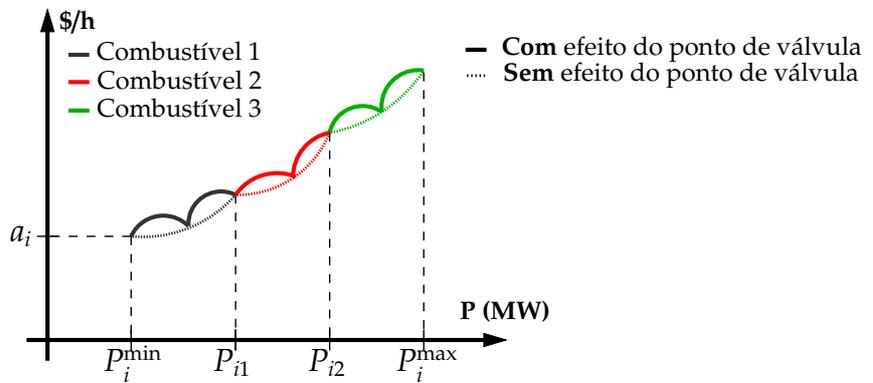


Figura 14 – Curva de custo com restrição de múltiplo combustível  
Fonte: Próprio autor

Esta restrição modela a operação da Usina Termoeletrica de Juiz de Fora, sendo classificada como bicombustível, esta pode operar sua geração de energia elétrica a partir da queima do etanol ou gás natural como combustível, sendo a primeira termoeletrica a operar com etanol no mundo. Com a potência instalada igual a 87MW, esta Termoeletrica faz parte do parque gerador da Petrobras e é conectado ao Sistema Interligado Nacional.

### 3.3.4.2 Zonas de Operação Proibidas

Zonas de Operação Proibidas representa os patamares de potência em que a UTE não consegue gerar. Consequentemente, a curva de custo passa a apresentar descontinuidade devido à ZOP. A Figura 15 ilustra uma curva de custo clássica, com duas ZOPs.

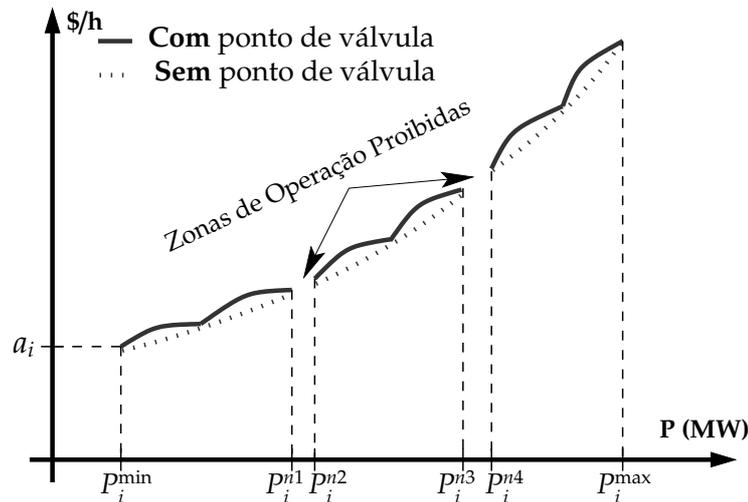


Figura 15 – Função de custo com restrição de zonas de operação proibidas  
Fonte: Próprio autor

A existência desta região proibida está relacionada, por exemplo, as vibrações num rolamento do eixo causadas pelo vapor, ou pode ser devido a falhas da própria máquina ou em equipamento auxiliar a ela associado, tais como caldeiras, bombas de alimentação dentre outros [34]. Na literatura, é adotado intervalos de descontinuidade na função do custo da geração, como mostrado na Figura 15, pois estes intervalos são de difícil determinação de desempenho via teste real e registro de funcionamento em regiões próximas a esta zona proibida [35].

A representação matemática desta restrição é formulada de acordo com (3.11), apresentada a seguir.

$$\begin{aligned}
 p_i^{\min} &\leq P_i \leq p_i^{n1} \\
 p_i^{n2} &\leq P_i \leq p_i^{n3} \\
 p_i^{n4} &\leq P_i \leq p_i^{\max}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

Onde:

$p_i^{n1}$  e  $p_i^{n3}$ : Representam os limites superiores permitidos da ZOP.

$p_i^{n2}$  e  $p_i^{n4}$ : Representam os limites inferiores permitidos da ZOP.

### 3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Ao longo deste capítulo foi apresentada a modelagem clássica do Despacho Econômico e a representação mais realista do comportamento da geração da unidade termoeletrica, sendo descrita através da consideração dos modelos matemáticos do efeito do ponto de válvula, MC e da ZOP, que foram considerados no modelo do Despacho econômico proposto nesta dissertação. A critério de ilustração, foi retratado a Usina Termoeletrica de Juiz de Fora como uma termoeletrica do SEB que apresenta a restrição de múltiplo combustível.

Por fim, conclui que a modelagem do problema do Despacho Econômico termoeletrico tende a ser tão complexa quanto mais fiel for a representação das características físicas da unidade termoeletrica, fazendo com que o problema deixe de ser convexo e contínuo, necessitando de metodologias capazes de lidar com modelo não convexo e descontínuo. Por consequência, técnicas bioinspiradas têm sido bastante utilizadas na resolução deste tipo de problema.

## 4 OTIMIZAÇÃO VIA ENXAME DE PARTÍCULAS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com base no comportamento individual e coletivo dos pássaros e peixes, foi observado e modelado o movimento realizado por estes indivíduos no desvio de predadores, na busca por comida, dentre outras características. Em meados da década de 90, Kennedy e Eberhart [22] propuseram um método de otimização baseado na conduta destas espécies, conhecido como Otimização via Enxame de Partículas, ou *Particle Swarm Optimization* (PSO).

A frequente mudança repentina de direção, o espalhamento e o reagrupamento dos indivíduos (partículas) [36] visando a um objetivo comum, foi o motivo precursor para o desenvolvimento da técnica, pois se trata de um procedimento natural e otimizado de determinadas espécies [22], que leva em consideração o aprendizado individual e coletivo, devido ao convívio social.

Inicialmente nesta dissertação, foi a técnica utilizada para a resolução do problema do Despacho Econômico termoelétrico, pois se trata de um método potencial para se resolver este problema, conforme referenciado na literatura através dos trabalhos de [23], [24], [25] e [26]. Portanto, este capítulo é dedicado à apresentação do método clássico do PSO, assim como sua variante, o Trelea-PSO [37], que foi o método utilizado.

### 4.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O PSO é uma técnica bioinspirada classificada como uma técnica de computação evolucionária, pois o processo de otimização é realizado através de iterações. Tendo a cada iteração a realização dos procedimentos provenientes da modelagem comportamental de peixes/pássaros, a fim de explorar a região de operação com o objetivo de buscar e determinar a solução de boa qualidade.

A inicialização do PSO ocorre com a criação de forma aleatória das partículas que constituem a população (enxame), ou com base em algum conhecimento prévio do problema. Cada partícula representa uma solução candidata para o problema, sendo caracterizada através de dois parâmetros: (i) posição; (ii) velocidade. Após a criação destas partículas, por meio da definição de seus parâmetros, em cada iteração a partícula tem sua posição ajustada com base no aprendizado adquirido pela própria partícula e pelo enxame.

A formulação matemática decorrente do modelo proposto pela técnica é mostrada na sequência.

#### 4.2.1 Formulação - *Particle Swarm Optimization*

A determinação da partícula consiste na descrição de sua velocidade ( $v_p$ ) e de sua posição ( $p$ ), que são expressas através das equações (4.1) e (4.2), respectivamente. A notação utilizada faz distinção entre número algébrico e vetores, sendo utilizado a grafia em negrito para a representação de vetores e  $\otimes$  para denotar multiplicação de elemento por elemento.

$$\mathbf{v}_p^{t+1} = \theta \mathbf{v}_p^t + \gamma_1 r_1 \otimes (\mathbf{p}^* - \mathbf{p}^t) + \gamma_2 r_2 \otimes (\mathbf{g}^* - \mathbf{p}^t) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{p}^{t+1} = \mathbf{p}^t + \mathbf{v}_p^{t+1} \quad (4.2)$$

Onde:

- $t$  : Iteração atual;
- $\mathbf{v}_p^{t+1}$  : Vetor da velocidade das partículas na iteração posterior - PSO;
- $\mathbf{v}_p^t$  : Vetor da velocidade das partículas na iteração atual - PSO;
- $\theta$  : Peso de inércia;
- $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  : Constantes positivas que representam o aprendizado individual e social, respectivamente;
- $r_1$  e  $r_2$  : Valores aleatórios compreendidos no intervalo [0,1];
- $\mathbf{p}^*$  : Vetor da melhor posição de cada partícula na iteração atual;
- $\mathbf{g}^*$  : Melhor posição do enxame da iteração atual;
- $\mathbf{p}^t$  : Vetor da posição das partículas na iteração atual;
- $\mathbf{p}^{t+1}$  : Vetor da posição das partículas na iteração posterior.

Com o decorrer das iterações, uma determinada partícula se movimentará ao longo da região de soluções guiadas pela velocidade atual, associada ao peso de inércia, considerando o aprendizado do grupo (social) e sua capacidade cognitiva, cujo vetor  $\mathbf{p}^*$  e  $\mathbf{g}^*$  representam este aprendizado, conforme ilustrado na Figura 16. Dessa forma, a exploração do espaço de busca pela partícula é assegurada, tendo como objetivo a determinação da solução de boa qualidade, através do aspecto biológico pelo qual o método foi inspirado.

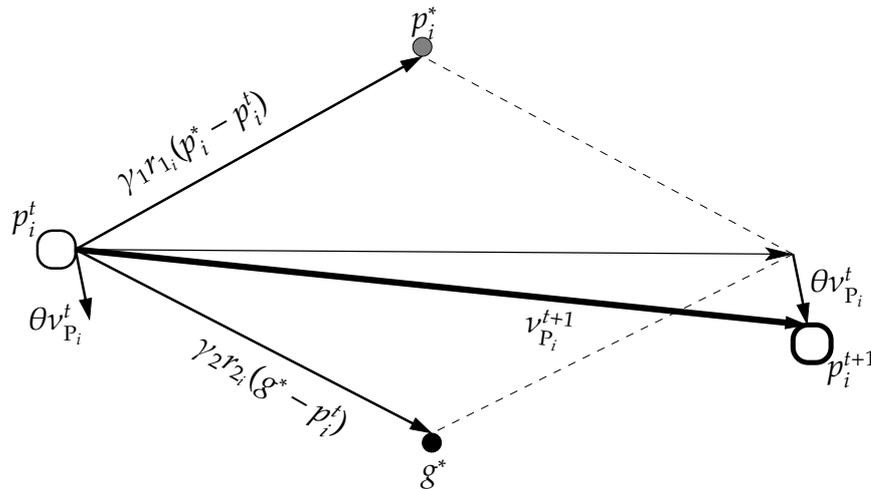


Figura 16 – Atualização da partícula  $i$  - PSO  
Fonte: [38] - Adaptada

#### 4.2.2 Algoritmo - Particle Swarm Optimization

No Pseudocódigo 1 é descrito o método de Otimização via Enxame de Partículas.

---

#### Pseudocódigo 1: Otimização via Enxame de Partículas (PSO) [19]

---

**Entrada:** Obter os parâmetros:  $n$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  e  $\theta$

Inicializar  $x_i$  e  $v_{B_i}$  das  $n$  partículas ( $i = 1, 2, \dots, n$ )

Avaliar cada partícula gerada através da FOB ( $F_T(p_i)$ )

Encontrar a melhor partícula do enxame ( $g^*$ )

1 **enquanto** (*critério de convergência*) **faça**

2     **para** cada partícula  $i$  **faça**

3         Atualizar a velocidade [(4.1)];

4         Calcular nova posição da partícula [(4.2)];

5         Avaliar a FOB para a nova posição  $p_i^{t+1}$  ( $F_T(p_i^{t+1})$ );

6         Encontrar a melhor posição para a partícula ( $p_i^*$ );

7     **fim**

8     Encontrar a melhor partícula do enxame  $g^*$ ;

9     Atualizar o número de iteração ( $t = t + 1$ );

10 **fim**

**Saída:** A melhor partícula ( $g^*$ )

O valor da FOB ( $F_T(g^*)$ )

---

#### 4.3 TRELEA-PSO

Uma variação do método clássico do PSO foi proposta por TRELEA [37], em 2003, sendo apresentado o método determinístico. Esta variação foi proposta com o intuito de melhorar a performance do método tradicional através de dois critérios

“Exploration-Exploitation”, cujas definições estão descritas abaixo, segundo [37]:

- **Exploration:** Consiste na habilidade de analisar várias regiões no espaço do problema a fim de localizar um bom ponto de boa qualidade.
- **Exploitation:** É a habilidade que concentra a busca em torno de uma solução candidata promissora, no intuito de localizar um ótimo preciso.

A alteração implica diretamente na equação da velocidade (4.1) e, consequentemente, na atualização da posição da partícula (4.2). Trelea demonstra a relação das constantes  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , e dos valores aleatórios  $r_1$  e  $r_2$  na influência sobre a inteligência coletiva e individual, conforme a equação (4.3), e apresenta uma simplificação na equação da atualização desta velocidade, que passa a ser contabilizada de acordo com a equação (4.7), em que o valor de  $\gamma$  e de  $\theta$  são definidos e aplicados em simulações, a fim de obter a avaliação do seu desempenho.

$$p_m = \frac{\gamma_1 r_1}{\gamma_1 r_1 + \gamma_2 r_2} p^* + \frac{\gamma_2 r_2}{\gamma_1 r_1 + \gamma_2 r_2} g^* \quad (4.3)$$

No caso do algoritmo determinístico do PSO, que foi proposto e analisado por Trelea,  $r_1$  e  $r_2$  correspondem ao mesmo valor, conforme explicitado em (4.4).

$$r_1 = r_2 = \frac{1}{2} \quad (4.4)$$

A partir desta consideração, houve a simplificação de alguns parâmetros, de acordo com (4.5) e (4.6).

$$\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (4.5)$$

$$p_m = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} p^* + \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} g^* \quad (4.6)$$

Portanto a equação (4.1) passa a ser atualizada conforme a equação (4.7). Detalhamento da obtenção da equação (4.7) está mostrado no APÊNDICE A.

$$v_P^{t+1} = \theta v_P^t + \gamma(p_m - p^t) \quad (4.7)$$

Onde  $\gamma$  representa a média entre os coeficientes  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ . O vetor  $p_m$  refere à média ponderada entre a melhor posição individual e a melhor posição global, ou seja, entre  $p^*$  e  $g^*$ , respectivamente.

### 4.3.1 Análise do efeito da consideração proposta

A consideração do modelo determinístico do PSO e dos valores dos parâmetros para  $\gamma$  e  $\theta$ , contribuiu para a eficácia da variação do método, com base nos resultados apresentados por Trelea, em [37]

Na definição dos parâmetros do método do PSO, Trelea propôs seus testes para dois conjuntos de valores, que são conhecidos na literatura como “Trelea 1” e “Trelea 2”. Os valores dos parâmetros são:

- **Trelea 1:**  $\gamma=1,7$  e  $\theta=0,6$
- **Trelea 2:**  $\gamma=1,494$  e  $\theta=0,729$

Embora a variação proposta tenha sido eficaz, o autor salienta que mais estudos referentes a aleatoriedade têm de ser feitos, a fim de explicar a relação entre esta característica e as metaheurísticas baseada em enxames.

## 4.4 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO BASEADO EM ENXAME DE PARTÍCULAS - TRELEA

### 4.4.1 Representação da partícula

Cada partícula representa uma solução do problema, portanto, sua formação ocorre com base numa codificação de número inteiro variando entre 1 e o valor correspondente ao número máximo de tipo de combustível da termoelétrica ou ao número máximo de regiões de operação viável, a depender do tipo de restrição abordada. Dessa forma, a informação que a partícula carrega está relacionada com o tipo de combustível a ser queimado ou com a zona de operação em que a termoelétrica vai operar.

#### 4.4.1.1 Exemplo de representação da partícula

Exemplificando a representação de uma partícula, considera-se duas termoelétricas, cada uma composta por dois tipos de combustíveis, com uma zona de operação proibida apresentando o efeito do ponto de válvula na função de custo. Portanto, o custo destas usinas é modelado conforme a equação (4.8) e a curva de custo de cada unidade termoelétrica está ilustrada pela Figura 17, sendo  $j$  o número de termoelétricas ( $j = 1, 2$ ).

$$F_j(P_j) = \begin{cases} a_{j1} + b_{j1}P_j + c_{j1}P_j^2 + \alpha_j \left| e_{j1} \sin(f_{j1} (P_j^{\min} - P_j)) \right|, & \text{Combustível 1, } P_j^{\min} \leq P_j \leq P_{j1} \\ a_{j2} + b_{j2}P_j + c_{j2}P_j^2 + \alpha_j \left| e_{j2} \sin(f_{j2} (P_{j1} - P_j)) \right|, & \text{Combustível 2, } P_{j1} \leq P_j \leq P_j^{\max} \end{cases} \quad (4.8)$$

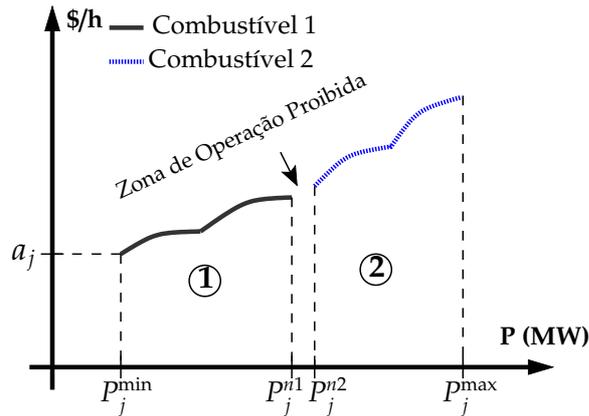


Figura 17 – Função de custo do exemplo didático  
 Fonte: Próprio autor

Portanto, a partícula a ser criada possui o formato representado pela Figura 18.

	UTE 1		UTE 2	
	Combustível	Zona de Operação	Combustível	Zona de Operação
partícula <i>i</i>	↓	↓	↓	↓
	2	1	2	2

Figura 18 – Criação da partícula *i*  
 Próprio autor.

#### 4.4.2 Inicialização do enxame

O algoritmo utilizado é proveniente do modelo apresentado por Trelea, cujos parâmetros  $\gamma$  e  $\theta$  são configurados de acordo com o padrão Trelea 2, ou seja, assumem os valores de 1,494 e 0,729. A escolha deste padrão de parâmetros se justifica pela alta taxa de sucesso na busca do ponto de boa qualidade, conforme apresentado em [37].

Definido o valor dos parâmetros do PSO e o número de partículas que constitui o grupo, cria-se aleatoriamente as partículas dentro da região de solução. Cada partícula apresenta dois valores, um referente à posição e outro à velocidade, que é responsável pelo deslocamento da partícula ao longo da região de solução, conseqüentemente, pela mudança da posição (solução) da mesma.

#### 4.4.3 Avaliação da partícula

Em um enxame com  $n$  partículas, há  $n$  soluções candidatas ao problema, logo a avaliação destas soluções é feita através da determinação do valor da função objetivo, que no caso do problema do despacho termoeletrico refere ao custo total de operação das unidades termoeletricas, de acordo com a equação (3.1).

O valor da FOB é associado à respectiva partícula, sendo criado um critério de sensibilidade para a sua avaliação. Após feito esta relação, são determinadas os valores

da melhor posição global do enxame ( $g^*$ ) e da melhor posição de cada partícula ( $p^*$ ), através da análise da FOB.

#### 4.4.4 Posição e velocidade

Após a avaliação das partículas, se faz necessária a atualização da posição, que leva em consideração o comportamento social, a capacidade cognitiva da partícula e sua inércia, conforme ilustrado na Figura 16. O comportamento social é contabilizado na atualização através da consideração de  $g^*$ , e a capacidade cognitiva é inserida pela ponderação de  $p^*$ .

A atualização da velocidade é expressa pela equação (4.7). Já a atualização da posição é feita conforme descrita em (4.2), gerando a nova solução para o problema.

#### 4.4.5 Critério de convergência

Dentre os possíveis critérios de convergência presentes na literatura, como, por exemplo, o critério de estagnação e o critério do número de iterações. Nesta dissertação foi adotada como critério de convergência o número máximo de iterações, cujo valor máximo é igual a 100.

### 4.5 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO APLICADO

A Figura 19 refere-se ao procedimento da metaheurística Trelea-PSO. Este método foi aplicado com base na *toolbox* do MATLAB® e portanto, a descrição do fluxograma que segue é com base no conhecimento teórico do funcionamento do método.

A seguir, cada passo de Figura 19 é descrito detalhadamente.

- Passo 1:** Neste passo são definidos os parâmetros do processo de Otimização via Enxame de Partículas. Estes parâmetros referem-se ao número de partículas do enxame ( $n$ ), e os valores de  $\gamma$  e  $\theta$  conforme apresentado no modelo Trelea 2 ( $\theta = 0,729$  e  $\gamma = 1,494$ ). O número de partículas  $n$  é definido em 25.
- Passo 2:** As  $n$  soluções ( $p$ ) são criadas de forma aleatória sendo calculado o valor da função objetivo para cada solução. Ao final, define-se o menor custo de operação do sistema termoeletrico e determina a solução que gerou este custo, classificando-a como a melhor solução da população, ou seja, a melhor partícula do enxame ( $g^*$ ).
- Passo 3:** Atualiza-se a velocidade da partícula  $i$ , através da equação (4.1), onde  $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$ , e determina-se a nova solução, a partir da atualização de  $p_i$  pela equação(4.2).

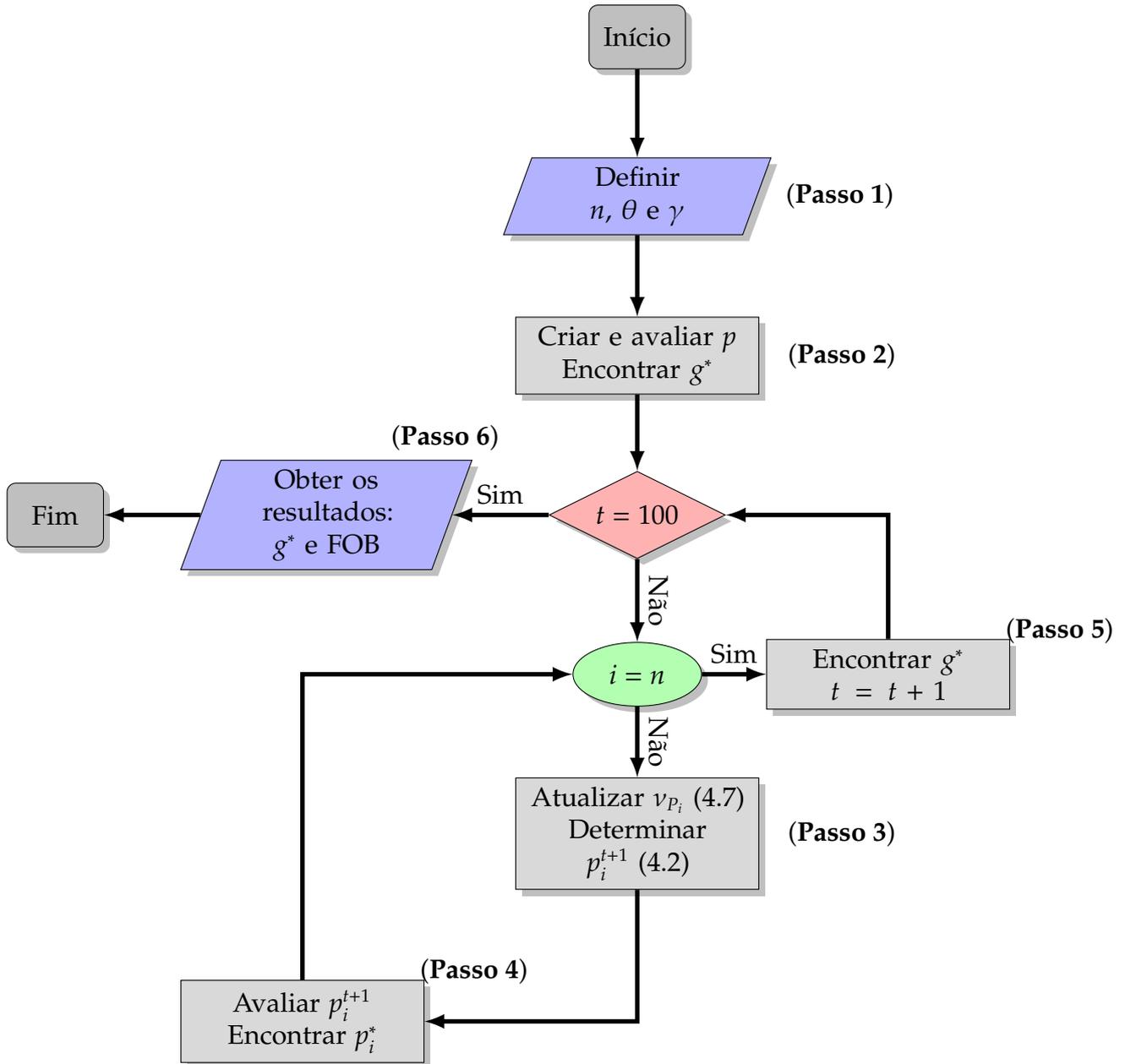


Figura 19 – Fluxograma Trelea-PSO - Aplicado

**Passo 4:** Neste passo obtém-se o custo de operação do sistema e determina-se a melhor solução proveniente da partícula  $i$  ( $p_i^*$ ), pela análise da função objetivo.

Os Passos 3 e 4 devem ser executados para as  $n$  soluções criadas.

**Passo 5:** Este passo refere-se a determinação da melhor solução ( $g^*$ ), ou seja, a solução que implica no menor custo do despacho, e realiza o incremento na contagem do processo iterativo ( $t=t+1$ ).

Os Passos 3, 4 e 6 são realizados até atingir a convergência do processo.

**Passo 6:** É obtido a melhor solução, após a convergência ( $t = 100$ ), e o correspondente valor do Despacho Econômico termoeletrico.

#### 4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

O processo de Otimização via Enxame de Partículas atua através de atualizações na velocidade com que a partícula se move e, conseqüentemente, na posição da partícula ao longo da região de soluções. Com essa movimentação, o enxame avalia a região a fim de localizar a solução de boa qualidade. Característica do método refere-se à atualização realizada na posição da partícula, pois leva em consideração o comportamento do grupo (enxame) e a própria capacidade cognitiva.

A avaliação da melhor solução individual e coletiva foram determinadas a partir das análises da função objetivo, que no problema a ser aplicado está associado ao mínimo custo de operação para o atendimento à demanda, através de geradores termoelétricas. O tempo de convergência do processo depende do número de partículas que constitui a população, pois está diretamente relacionado com o número de funções objetivos a serem avaliadas, já que cada partícula representa uma solução do problema.

Neste trabalho é utilizado o Trelea-PSO, cujos parâmetros configurados correspondem ao Trelea 2. O método foi aplicado ao problema do Despacho Econômico com restrições realísticas, apresentando bons resultados, conforme estão expostos no Capítulo 6.

## 5 ALGORITMO DO MORCEGO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Sendo a natureza a fonte de inspiração para a resoluções de problemas encontrados nas mais diversas áreas do conhecimento, em especial o comportamento de alguns seres vivos, o pesquisador Xin-She Yang propôs, em 2010, uma técnica de otimização multimodal baseada no fenômeno da ecolocalização observado no comportamento de morcegos durante o voo, denominado de Algoritmo do Morcego, do inglês *Bat Algorithm* (BA) [39].

A ecolocalização é a habilidade que os morcegos desenvolveram para caçar e se locomover em ambiente com baixa ou nenhuma iluminação. Este fenômeno consiste em emissões de pulsos sonoros que refletem no alvo retornando a fonte emissora, permitindo ao morcego determinar sua distância do alvo.

Assim como qualquer outra técnica de busca multimodal, o BA ganha apelo na resolução de problemas de programação inteira ou binária e com região de solução não convexa (máximos e mínimos locais). Problemas com estas características, como é o caso do problema em estudo nesta dissertação, levam grande parte dos algoritmos de otimização a convergirem em direção a ótimos locais. Nesta dissertação foi adotado o BA como uma das metaheurísticas bioinspiradas para solucionar o problema do Despacho Econômico da termoelétrico considerando restrições que aderem dificuldades na resolução, tais como: múltiplo combustível e zonas de operação proibidas.

### 5.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

As premissas iniciais do *Bat Algorithm* são fundamentadas no princípio natural a qual se inspira, tendo sua implementação estabelecida de acordo as seguintes idealizações [19]:

- Todo morcego virtual utiliza do princípio da ecolocalização para a determinar sua distância em relação à presa/obstáculo, sabendo diferenciar presa/obstáculo do limite da região de soluções.
- A movimentação é feito de com base na atualização da componente de velocidade ( $v_B$ ), a qual é responsável pela determinação da posição final do morcego virtual. Em que, previamente ocorre a atualização da frequência do pulso emitido ( $f$ ) e da taxa de emissão de pulso ( $\zeta$ ), de acordo com a proximidade do alvo.
- é realizado, no decorrer do processo iterativo, uma busca local através do valor da sonoridade ( $A$ ), que é atualizada a cada iteração baseado na qualidade da solução, ou seja, na proximidade do alvo.

Baseado no princípio da ecolocalização, o algoritmo propõe a busca pela solução de boa qualidade através da exploração da região factível do problema. A exploração é realizada por uma população constituída de  $n$  morcegos virtuais (soluções do problema), que são avaliados pelo cálculo da função objetivo.

As diferenças do método BA em relação ao PSO consiste na atualização da velocidade, sendo no BA influenciada apenas pelo aprendizado coletivo e não pela capacidade cognitiva do referido morcego virtual, outra diferença consiste na busca local que é apresentado pelo BA em seu processo de convergência. Detalhes do equacionamento são apresentados a seguir.

### 5.2.1 Fomulação - *Bat Algorithm*

A definição do morcego virtual é realizada através de sua posição e velocidade, esta permite que ao longo do processo iterativo o morcego virtual percorra a região de solução em busca do ponto de boa qualidade. O número de morcegos corresponde ao tamanho da população, portanto, a notação do equacionamento é realizado de forma vetorial seguindo o padrão apresentado na modelagem do PSO. A relação entre frequência, velocidade e posição constitui a atualização do método que são definidas conforme as equações (5.1), (5.2) e (5.3).

$$f = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (5.1)$$

$$\mathbf{v}_B^{t+1} = \mathbf{v}_B^t + (\mathbf{x}_* - \mathbf{x}^t) \otimes f \quad (5.2)$$

$$\mathbf{x}^{t+1} = \mathbf{x}^t + \mathbf{v}_B^{t+1} \quad (5.3)$$

Onde:

$f_{\max}$ : Limite máximo da frequência do pulso sonoro emitido pelo morcego;

$f_{\min}$ : Limite mínimo da frequência do pulso sonoro emitido pelo morcego;

$f_{\min}$ : Vetor composto pelo valor de  $f_{\min}$ ;

$\beta$ : Vetor constituído de valores randômicos compreendidos no intervalo  $[0,1]$ ;

$\mathbf{v}_B^t$ : Vetor correspondente a velocidade de cada morcego na iteração atual;

$\mathbf{v}_B^{t+1}$ : Vetor correspondente a velocidade de cada morcego na iteração posterior;

$\mathbf{x}_*$ : Melhor posição do morcego dentre a população;

$\mathbf{x}^t$ : Vetor constituído pela posição de cada morcego na iteração atual;

$\mathbf{x}^{t+1}$ : Vetor constituído pela posição de cada morcego na iteração posterior.

Além do tradicional procedimento de atualização, o Algoritmo do Morcego propõe uma busca local em torno da melhor solução, sendo analisado todos os morcegos na busca e criação por uma nova solução. Esta busca consiste na geração da nova solução ( $x_{\text{novo}}^{t+1}$ ), a partir da seleção de uma dentre as melhores soluções, denominada de  $x_{\text{velho}}^t$ , e adicionado aleatoriamente um deslocamento proveniente da sonoridade do pulso, de acordo com a equação (5.4).

$$x_{\text{novo}}^{t+1} = x_{\text{velho}}^t + \epsilon \otimes A^t \quad (5.4)$$

Onde:

- $\epsilon$ : Vetor composto pelo valor aleatório compreendido no intervalo [-1,1];
- $A^t$ : Vetor constituído pela sonoridade (volume) do pulso de cada morcego na iteração atual.

A cada iteração é observado se o morcego está se aproximando do alvo e, caso isto ocorra, a taxa de emissão e a sonoridade do pulso são atualizados, de forma a identificar que o morcego está se deslocando na direção e sentido correto da sua presa/obstáculo. Estas atualizações ocorrem de acordo com as equações (5.5) e (5.6).

$$A^{t+1} = \varphi A^t \quad (5.5)$$

$$\zeta^{t+1} = \zeta^0 (1 - e^{(-\xi t)}) \quad (5.6)$$

Onde:

- $\varphi$ : Número randômico compreendido no intervalo de [0,1];
- $\zeta^{t+1}$ : Vetor constituído pela taxa de emissão de pulso de cada morcego;
- $\zeta^0$ : Taxa de emissão de pulso inicial;
- $\xi$ : Constante de atualização do  $\zeta$ , ( $\xi > 0$ ).

Por fim, quando o morcego se aproxima do alvo, ou seja, a FOB é minimizada, após algumas iterações ( $t \rightarrow \infty$ ), a sonoridade do pulso emitido pelo morcego tende a zero ( $A^t \rightarrow 0$ ) e a taxa de emissão tende ao seu valor inicial ( $\zeta^t \rightarrow \zeta^0$ )

### 5.2.2 Algoritmo - *Bat Algorithm*

O algoritmo baseado na ecolocalização do morcego foi aplicado ao problema do Despacho Econômico, tendo sua implementação descrito conforme o Pseudocódigo 2, onde *rand* refere-se a um valor aleatório, proveniente da distribuição uniforme no

intervalo aberto (0,1).

---

**Pseudocódigo 2:** Algoritmo do Morcego (*Bat Algorithm*)

---

**Entrada:** Definir os parâmetros:  $n$ ,  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$ ,  $A$ ,  $\zeta^0$ ,  $\xi$  e  $\varphi$   
 Inicializar a população de morcegos,  $x_i$  e  $v_{B_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )  
 Avaliar os morcegos gerados através da FOB ( $F_T(x_i)$ )  
 Encontrar o morcego com a melhor posição da população ( $x_*$ )

1 **enquanto** (*critério de convergência*) **faça**  
 2     **para** (*cada morcego i*) **faça**  
 3         Atualizar frequência e velocidade [(5.1) e (5.2)];  
 4         Gerar nova solução (posição) [(5.3)];  
 5         **se**  $rand > \zeta_i$  **então**  
 6             Fazer  $x_{\text{velho}}^t = x_*$ ;  
 7             Realizar busca local (gerar uma nova solução em torno da melhor  
               solução escolhida) [(5.4)];  
 8         **fim**  
 9         Alterar, de forma aleatória, uma posição de  $x_i^{t+1}$ ;  
 10         Obter o valor da função objetivo para  $x_i^{t+1}$ ;  
 11         **se**  $rand < A_i$  e  $F_T(x_i^{t+1}) < F_T(x_*)$  **então**  
 12             Aceitar a nova solução;  
 13             Atualizar  $\zeta_i$  e  $A_i$ , ou seja, aumentar  $\zeta_i$  e reduzir  $A_i$ ;  
 14         **fim**  
 15         Obter o melhor morcego ( $x_*$ );  
 16     **fim**  
 17     Atualizar o número de iteração ( $t = t + 1$ );  
 18 **fim**

**Saída:** O melhor morcego ( $x_*$ )  
 O valor da FOB ( $F_T(x_*)$ )

---

### 5.3 OTIMIZAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO VIA ALGORITMO DO MORCEGO

#### 5.3.1 Representação do morcego

De forma semelhante a partícula do método do PSO, o morcego virtual também é constituído com base na codificação de número inteiro, cujo limite máximo a ser atribuído para cada posição do morcego virtual depende da restrição que está sendo tratada. Caso seja a restrição referente ao múltiplo combustível, o limite máximo corresponderá ao número máximo do tipo de combustível da termoelétrica, por outro lado, se for a restrição de zonas de operação proibidas o limite máximo se refere ao número de região habilitadas a operar.

### 5.3.1.1 Exemplo de representação do morcego virtual

Com base no mesmo exemplo utilizado para ilustrar a formação da partícula  $i$ , apresentado no Capítulo 4, é feita a representação do morcego virtual, conforme mostrado na Figura 20. Cada UTE possui dois valores, um relacionado ao tipo de combustível e o outro à zona de operação.



Figura 20 – Criação do morcego virtual  $i$   
Próprio autor.

### 5.3.2 Inicialização

Definido o número de morcegos virtuais (soluções) da população ( $n$ ), os mesmos são gerados de forma aleatória, atribuindo uma posição e uma velocidade inicial, que são atualizados ao longo do processo iterativo.

Outros parâmetros tem seu valor definido de acordo com Yang [19]. Estes valores estão especificados na seção 5.4.

### 5.3.3 Avaliação

A partir da criação das soluções, as mesmas são avaliadas através do cálculo da função objetivo (3.1), sendo associado a cada solução o respectivo valor desta função. Portanto, o valor da FOB passa a ser um critério de sensibilidade para a determinação da melhor solução ( $x_*$ ), ou seja, a solução que implica no menor custo total do atendimento a demanda.

### 5.3.4 Posição e velocidade

A velocidade e posição do morcego virtual são atualizadas conforme as equações (5.2) e (5.3), respectivamente. Neste processo ocorre a influência da melhor solução ( $x_*$ ), referente ao aprendizado da população de morcegos no deslocamento atual.

A partir da atualização da posição do morcego, a nova solução gerada é avaliada a fim de encontrar a solução de boa qualidade. Ao longo do processo de atualização, é feita uma busca local em torno de uma das melhores soluções, que tende a aperfeiçoá-la. Este processo se repete até a convergência do BA.

### 5.3.5 Critério de convergência

Como critério de convergência para o BA também foi considerado o número máximo de iterações, sendo adotado o valor máximo de 100, idêntico ao adotado para a técnica PSO.

## 5.4 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO APLICADO

O fluxograma ilustrado pela Figura 21 refere-se ao *Bat Algorithm* proposto para resolver o problema do Despacho Econômico termoelétrico. Na sequência, são descritos detalhadamente os passos deste algoritmo.

**Passo 1:** São definidos os parâmetros do BA, que correspondem: ao número de morcegos virtuais da população ( $n$ ); aos limites mínimo e máximo da frequência do pulso sonoro ( $f_{\min}$  e  $f_{\max}$ ); à sonoridade do pulso ( $A$ ), a taxa inicial de emissão do pulso ( $\zeta^0$ ) e as constantes para a atualização da sonoridade e da taxa de emissão ( $\varphi$  e  $\epsilon$ ). Cada uma das variáveis tem seu valor definido de acordo com [19], sendo:

- Taxa de emissão de pulso ( $\zeta^0$ ) = 0,5;
- sonoridade ( $A$ ) = 0,25;
- Frequência mínima ( $f_{\min}$ ) = 0;
- Frequência máxima ( $f_{\max}$ ) = 2;
- Constante  $\varphi$  = 0,5;
- Constante  $\epsilon$  = 0,5;

O número de morcegos virtuais é definido igual ao número de indivíduos da população do PSO, ou seja,  $n$  igual a 25.

**Passo 2:** São criadas as  $n$  soluções (morcegos virtuais). Na sequência, é feita a avaliação através do cálculo da função objetivo (3.1). Após o cálculo, cada solução é avaliada a fim de determinar a melhor ( $x_*$ ), ou seja, a que resulta no menor custo de operação do sistema termoelétrico.

**Passo 3:** Neste passo, para o morcego  $i$ , ocorre a atualização de  $f_i$ ,  $v_{B_i}$ , através das equações (5.1) e (5.2) e, por fim, a atualização da solução ( $x_i^{t+1}$ ), que é obtido pela equação (5.3).

**Passo 4:** Este passo é realizado quando a solução está longe da melhor, ou seja,  $\zeta_i$  for inferior a *rand*. Neste passo é feita uma busca local, sendo gerado uma nova solução para o morcego virtual, a partir da seleção de uma dentre as melhores soluções e adicionado um deslocamento aleatório com base na sonoridade do

pulso, conforme descrito na equação (5.4). Porém, no algoritmo implementado, é sempre considerado a melhor solução atual, ou seja, da equação (5.4)  $x_{\text{nov}}^t$  é igual a  $x_*$  ( $x_{\text{nov}}^t = x_*$ ).

**Passo 5:** É realizado a alteração aleatória em uma das posições do morcego virtual e obtido o custo total do despacho desta nova solução  $F_T(x_*)$

**Passo 6:** Neste passo faz-se a atualização dos parâmetros de controle do BA, que são a sonoridade ( $A_i$ ) e a taxa de emissão do pulso  $\zeta_i$ , indicando que o morcego se localiza na melhor solução e, portanto, tem a sonoridade reduzida e um aumento na taxa de emissão do pulso, conforme descrito nas equações (5.5)<sup>1</sup> e (5.6)<sup>1</sup>. A nova solução ( $x_i^{t+1}$ ) é aceita como a solução atual  $i$  e, por satisfazer a restrição  $F_T(x_i^{t+1}) < F_T(x_*)$ .

**Passo 7:** Este passo assegura que a atualização da melhor solução ( $x_*$ ) sempre ocorra, pois, caso contrário, esta atualização estaria dependente da análise com número aleatório ( $rand < A_i$ ), ficando a critério da casualidade.

Os passos 3 a 7 são realizados para cada morcego virtual  $i$ , onde  $i$  varia de 1 até  $n$  ( $i = 1, \dots, n$ ).

**Passo 8:** É realizado a atualização da contagem do processo iterativo ( $t = t + 1$ );

Os passos 3 à 8 são executados durante a convergência do algoritmo.

**Passo 9:** É determinado a melhor solução obtida pela convergência do BA e o custo global da operação do sistema termoeletrico.

---

<sup>1</sup> Nota-se que no decorrer no processo iterativo, caso a solução  $i$  se torne a melhor, a tendência da sonoridade do pulso sonoro é de reduzir para zero e da taxa de emissão de pulso é de se aproximar do valor inicial, ou seja,  $t \rightarrow \infty$  faz com que  $A_i \rightarrow 0$  e  $\zeta_i \rightarrow \zeta_i^0$ , de acordo com as equações (5.5) e (5.6)

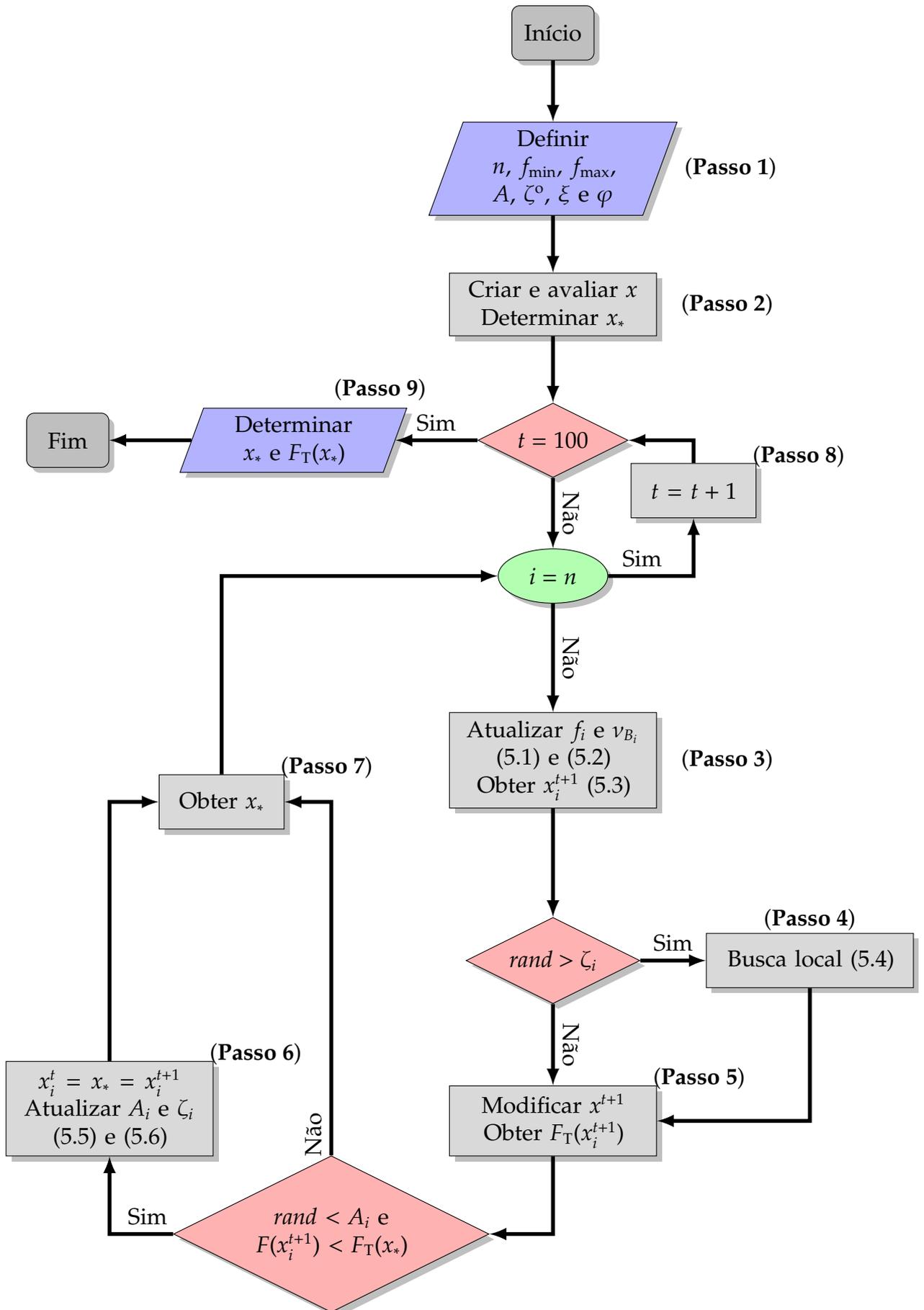


Figura 21 – Fluxograma *Bat Algorithm*

## 5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

O Algoritmo do Morcego é uma técnica recente se comparada com outros métodos bioinspirados, tais como AG, ED e PSO. Porém, apresenta características semelhantes ao PSO, pois faz uso da inteligência adquirida pela população (grupo), ou seja, explora o comportamento social.

Por outro lado, a técnica BA possui algumas peculiaridades que aderem vantagens, tais como:

- **Parâmetros de controle:** Estes parâmetros referem- a taxa de emissão do pulso( $\zeta$ ) e à sonoridade ( $A$ ), que são atualizados a cada interação em que ocorre a exploração de alguma solução de boa qualidade. Normalmente, outras metaheurísticas utilizam de parâmetros constantes, o que faz o BA sobressair aos demais métodos na busca pela solução, pois há melhoria no processo de “*exploration*” e “*exploitation*” [19].
- **Busca local:** Esta é uma característica distinta do método BA, pois permite uma exploração em torno da solução de boa qualidade. A consequência deste processo é de proporcionar uma convergência mais rápida de forma a minimizar o número de iterações.

Diante da simplicidade e flexibilidade do BA, características similares as de outras metaheurísticas, e das vantagens listadas anteriormente, este método foi adotada para realizar o estudo do problema do Despacho Econômico e se mostrou promissor, conforme os resultados apresentados no capítulo de estudo de casos.

## 6 ESTUDO DE CASOS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação das metaheurísticas bioinspiradas para solucionar o problema referente ao Despacho Econômico termoelétrico. Os sistemas termoelétricos utilizados são os encontrados na literatura especializada, cujos dados estão descritos no ANEXO A. Os resultados obtidos pelas metaheurísticas são expostos e comparados com alguns resultados encontrados na literatura especializada, a fim de avaliar o desempenho da Otimização via Enxame de Partículas - Trelea (Trelea-PSO) e do Algoritmo do Morcego (BA).

Os parâmetros de inicialização do Trelea-PSO e do BA, foram descritos nas seções 4.5 e 5.4, respectivamente. Sendo definido o mesmo tamanho da população para ambas as metaheurísticas,  $n = 25$ .

### 6.2 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

O ambiente computacional utilizado para o processamento dos casos é Intel® Core™ i7, 2,93 GHz e 8,00 GB de memória RAM. A metaheurística do Algoritmo do Morcego foi implementado em MATLAB®, enquanto que para a metodologia do Enxame de Partículas (Trelea-PSO) foi utilizado a *toolbox* do PSO em MATLAB®. Estas metaheurísticas bioinspiradas fazem a configuração de operação das UTEs, que correspondem às restrições da UTE, como ilustrado nas Figuras 20 e 18. A partir desta seleção, a combinação resultante é enviado ao programa de otimização utilizado, que é o LINGO versão 11, pois trata-se de um *solver* comercial de otimização que possibilita a implementação de técnicas de programação linear, não linear, dentre outras. Após a obtenção do valor da FOB, este é enviado à metaheurística, que relaciona seu valor com a solução atual, criando o critério de sensibilidade para a metaheurística. A Figura 22 ilustra a comunicação entre a metaheurística e o LINGO.

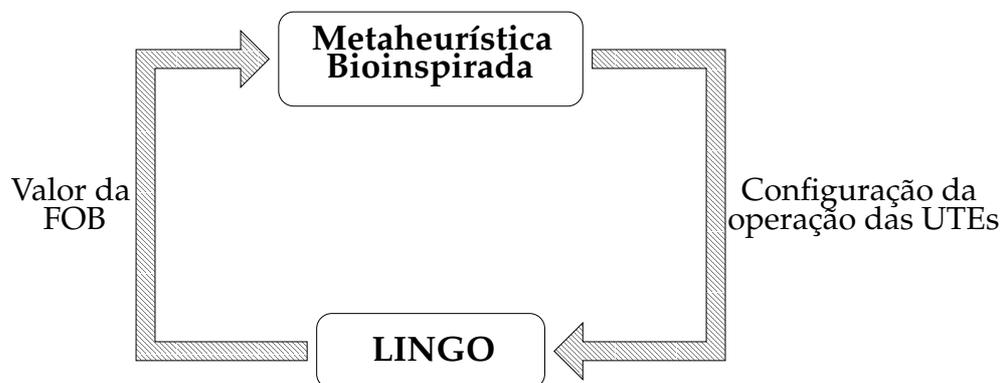


Figura 22 – Representação da comunicação entre a metaheurística e o LINGO.

### 6.3 CASO 1: ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE MÚLTIPLO COMBUSTÍVEL

Nesta seção são apresentados os resultados provenientes do estudo do sistema constituído de 10 termoelétricas, cuja função de custo de cada UTE é modelada por uma função quadrática, conforme ilustrada na Figura 12, sendo todas termoelétricas habilitadas a operar com mais de um tipo de combustível. Os resultados obtidos são comparados com outras metodologias presentes na literatura, tais como:

- *Hierarchical approach based on the Numerical Method* (HNUM) [31]
- *Hopfield Neural Network* (HNN) [40]
- *Adaptive Hopfield Neural Network* (AHNN) [41]
- *Enhanced Lagrangian Neural Network* (ELANN) [42]
- *Hybrid Real Coded Genetic Algorithm* (HRCGA) [43]
- *Modified Particle Swarm Optimization* (MPSO) [44]
- *Artificial Immune System* (AIS) [45]
- *Quadratic Programming and Augmented Lagrange Hopfield Network* (QP-ALHN) [46]

Deste caso, são realizados dois estudos, o primeiro refere ao atendimento à demanda de 2.500 MW e, o segundo, a uma demanda igual a 2.700 MW.

#### 6.3.1 A - Sistema de 10 Termoelétricas com demanda de 2500MW

O Despacho Econômico deste estudo de caso tem por objetivo selecionar o tipo de combustível a ser utilizado em cada uma das UTEs existentes, assim como alocar a geração dentre as UTEs operantes a fim de atender à demanda de 2.500MW. Sendo utilizado a Otimização via Enxame de Partículas e o Algoritmo do Morcego para a obtenção do menor custo de operação. O processo de convergência das metaheurísticas estão ilustrados pelas Figuras 23a e 23b, que relaciona o número de iterações com o custo total de geração obtido em cada iteração.

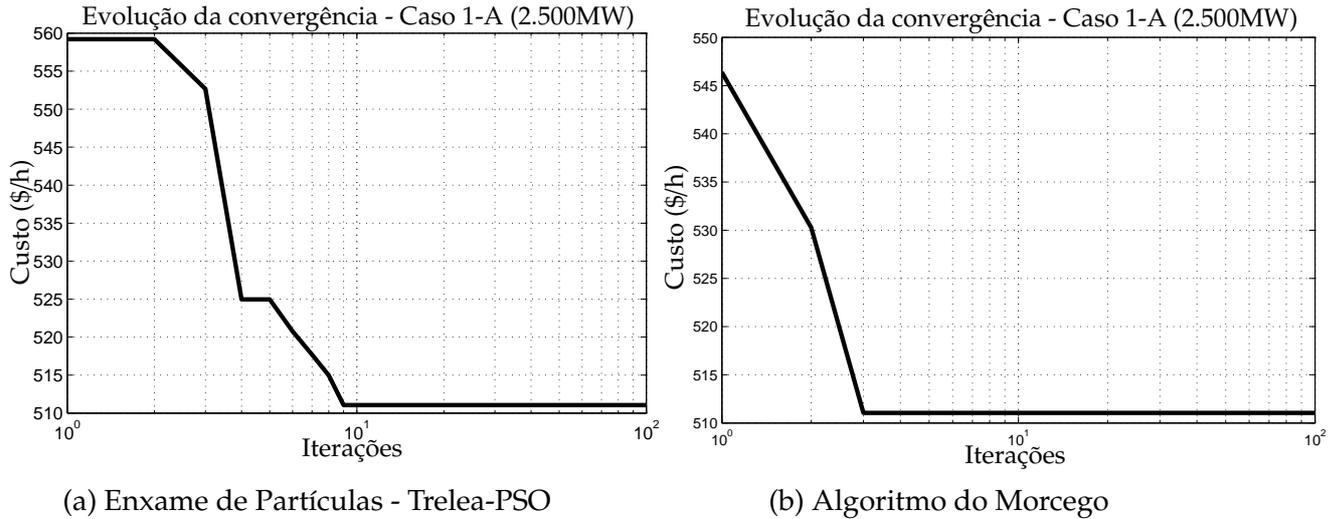


Figura 23 – Processo de convergência - Caso 1-A (2.500MW)

A Tabela 1 mostra o valor correspondente ao ponto de boa qualidade de operação e a respectiva iteração onde este valor foi determinado.

Tabela 1 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 1-A

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	511,0439	9 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>511,0436</b>	<b>2<sup>a</sup></b>

Com base nos resultados obtidos, os mesmos foram comparados com alguns resultados da literatura, conforme apresentado pela Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação do custo de operação - Caso 1-A

Metodologia	Total de Geração (MW)	Custo da Operação (\$/h)
HNUM [31]	2.500,1	526,70
HNN [40]	2.499,8	526,13
AHNN [41]	2.500	526,230
ELANN [42]	2.500	526,27
HRCGA [43]	2.500	526,238
MPSO [44]	2.500	526,239
AIS [45]	2.500	526,240
QP-ALHN [46]	2.500	526,239
<b>Trelea-PSO</b>	2.500	<b>511,0439</b>
<b>BA</b>	2.500	<b>511,0436</b>

A alocação de potência e o tipo de combustível selecionado para cada unidade termoeletrica, após o término do processo de convergência, estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 1-A (2.500MW)

Usina Termoeletrica	Tipo de Comb. <sup>1</sup>	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
1	1	191,9300	30,8354	1	191,8693	30,8088
2	3	203,4787	33,8321	3	203,4423	33,8162
3	2	332,0000	74,4385	2	332,0000	74,4385
4	3	233,8483	44,6183	3	233,8211	44,6064
5	1	246,2988	57,0776	1	246,2352	57,0498
6	3	233,8483	44,6183	3	233,8211	44,6064
7	1	257,5787	58,2467	1	257,4671	58,1979
8	3	233,8483	44,6183	3	233,8214	44,6065
9	2	323,4489	67,5510	2	323,3365	67,5018
10	1	243,7201	55,2073	1	244,1861	55,4116
<b>Total</b>		2.500,00	<b>511,0436</b>		2.500,00	<b>511,0439</b>

### 6.3.1.1 Análise dos resultados

Com base nos resultados apresentados, o Algoritmo do Morcego se destacou perante o Trelea-PSO, encontrando a solução de boa qualidade em um número menor de iterações, e com o valor da função objetivo ligeiramente melhor, conforme ilustrado na Figura 23 com os resultados expostos na Tabela 1. A Tabela 3, apresenta o tipo de combustível selecionado, assim como o respectivo despacho e custos de cada UTE, nota-se que o tipo de combustível de ambos os métodos foram iguais, sendo que a diferença do custo total de operação está relacionada com o despacho das UTEs do sistema.

Diante dos resultados encontrados na literatura e apresentados na Tabela 2, as metaheurísticas utilizadas apresentaram o custo de operação do sistema termoeletrico inferior.

### 6.3.2 B - Sistema de 10 Termoeletricas com demanda de 2.700MW

Sendo composto pelas mesmas usinas apresentado da seção 6.3.1, o Despacho Econômico deste caso visa o atendimento à demanda de 2.700MW.

A convergência obtida pelas metaheurísticas estão ilustradas nas Figuras 24a e 24b, para o Trelea-PSO e o BA, respectivamente.

<sup>1</sup> Tipo de Combustível

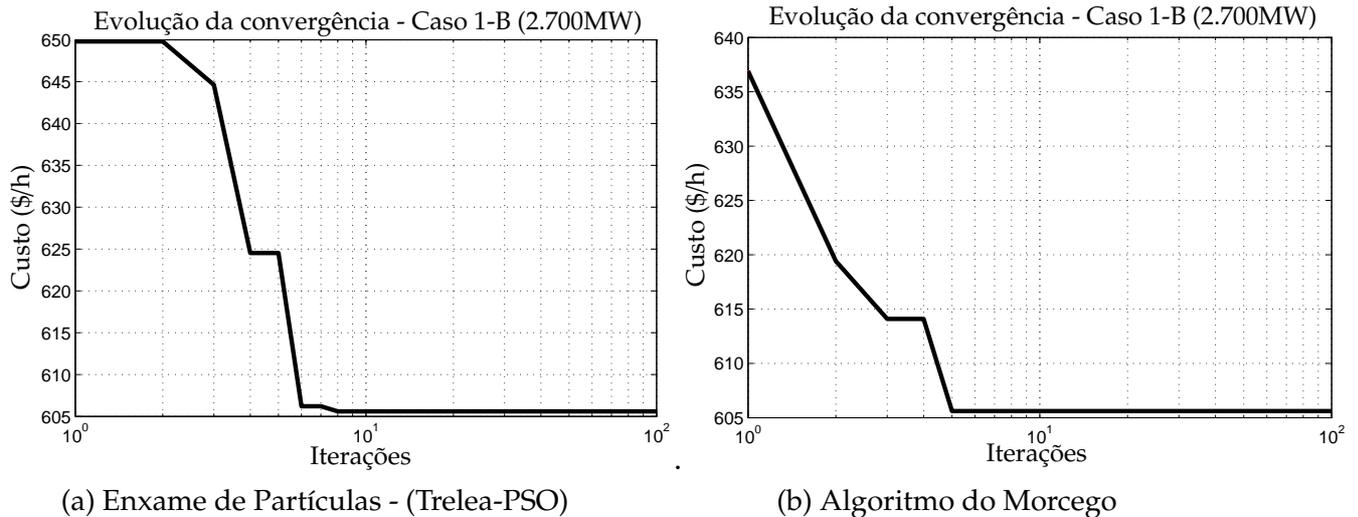


Figura 24 – Processo de convergência - Caso 1-B (2.700MW)

A Tabela 4 descreve a solução de boa qualidade obtido na convergência das metaheurísticas, apresentando os valores referentes ao custo total de operação ótima e à iteração onde a solução de boa qualidade é encontrado.

Tabela 4 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 1-B

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	605,6084	7 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>605,6077</b>	<b>5<sup>a</sup></b>

O resultado para a operação econômica do sistema termoeletrico proposto é comparado com alguns resultados da literatura, conforme apresentado pela Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação do custo de operação - Caso 1-B

Metodologia	Total de Geração (MW)	Custo da Operação (\$/h)
HNUM [31]	2.702,2	625,18
HNN [40]	2.699,7	626,12
AHNN [41]	2.700	626,24
ELANN [42]	2.700	623,88
HRCGA [43]	2.700	623,809
MPSO [44]	2.700	623,809
AIS [45]	2.700	623,809
QP-ALHN [46]	2.700	623,809
<b>Trelea-PSO</b>	2.700	<b>605,6084</b>
<b>BA</b>	2.700	<b>605,6077</b>

A alocação ótima de potência e o tipo de combustível selecionado de cada termoeletrica, assim como o custo ótimo de geração, estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 1-B (2700MW)

Usina Termoeletrica	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
1	2	213,3851	40,5928	2	213,1476	40,4769
2	3	209,5040	36,6222	3	209,5096	36,6249
3	2	332,0000	74,4385	2	332,0000	74,4385
4	3	238,1061	46,5899	3	238,0967	46,5853
5	1	270,0044	68,0544	1	269,6966	67,9043
6	3	238,1061	46,5899	3	238,0967	46,5853
7	1	280,4062	68,8170	1	280,2865	68,7585
8	3	238,1061	46,5899	3	238,0967	46,5853
9	3	413,7309	111,4877	3	414,5645	111,8951
10	1	266,6512	65,8256	1	266,5052	65,7543
<b>Total</b>		2.700,00	<b>605,6077</b>		2.700,00	<b>605,6084</b>

#### 6.3.2.1 Análise dos resultados

Para este caso o Algoritmo do Morcego também se mostrou mais eficiente, encontrando a solução de boa qualidade de operação na 5ª iteração. Esta diferença está relacionado a determinação da potência a ser gerada pela UTE, de acordo com a Tabela 6.

Em comparação com os outros resultados da literatura, o resultado obtido pelos métodos em análise se mostrou melhor, apresentando o custo de operação inferior, de acordo com a Tabela 6.

#### 6.4 CASO 2: ESTUDO DO EFEITO DE PONTO DE VÁLVULA E DA RESTRIÇÃO DE MÚLTIPLO COMBUSTÍVEL

O sistema a ser estudado neste caso, é composto por 10 UTEs, sendo a primeira apta a funcionar com dois tipos de combustíveis e as demais com três tipos de combustíveis. A demanda a ser atendida por este sistema termoeletrico é de 2.700MW.

Para este, é considerado o efeito de ponto de válvula na função de custo de geração, além da restrição de operação com múltiplo combustível. Portanto, a função de custo de cada termoeletrica deste sistema, é descrita conforme a equação (3.10).

Neste sistema é possível avaliar o efeito do ponto de válvula referente a determinação do ponto de boa qualidade de operação. Já que sua consideração no modelo implica na inserção de mínimos e máximos locais, resultando em uma função de custo não convexa.

Os resultados obtidos pelas metodologias em análise são comparados com os resultados provenientes de outras metodologias encontradas na literatura, tais com:

- *Improved Genetic Algorithm with Multiplier Updating (IGA\_MU)* [16]
- *New Particle Swarm Optimization with Local Random Search (NPSO\_LRS)* [47]
- *Anti-predatory Particle Swarm Optimization (APSO<sup>2</sup>)* [23]
- *Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO<sup>3</sup>)* [45]
- *Biogeography-based Optimization (BBO)* [32]
- *Differential Evolution with Biogeography-based Optimization (DE/BBO)* [32]
- *Differential Evolution (DE)* [20]
- *Enhanced Differential Evolution (EDE)* [20]
- *Q-Learning (Q-Learning)* [33]

A convergência do problema do DE através do Algoritmo do Morcego está representado na Figura 25b e a do Trelea-PSO na Figura 25a.

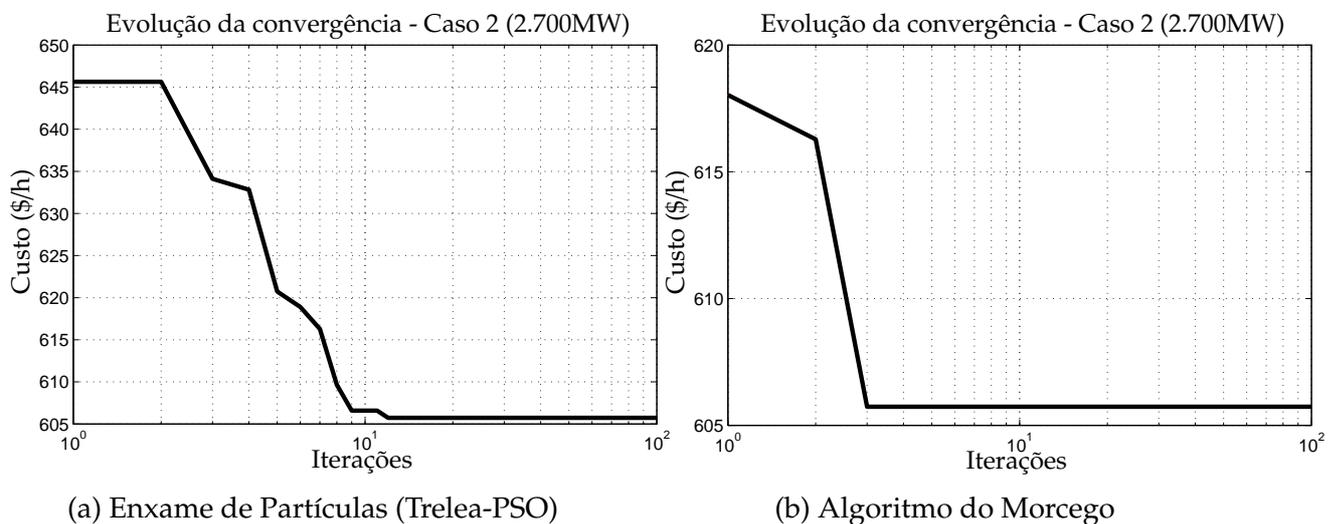


Figura 25 – Processo de convergência - Caso 2 (2.700MW)

A iteração em que se obtém a solução de boa qualidade e o valor da função objetivo devido a solução proveniente das metaheurísticas propostas, estão apresentadas na Tabela 7.

<sup>2</sup> Anti-predatory Particle Swarm Optimization

<sup>3</sup> Adaptive Particle Swarm Optimization

Tabela 7 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 2

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	605,7313	11 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>605,7313</b>	<b>3<sup>a</sup></b>

Os resultados encontrados na literatura são comparados com o resultado obtido pelo BA e pelo Trelea-PSO, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação do custo de operação - Caso 2

Metodologia	Total de Geração (MW)	Custo da Operação (\$/h)
IGA_MU [16]	2.700	624,5178
NPSO_LRS [47]	2.700	624,1273
APSO <sup>2</sup> [23]	2.700	624,0145
APSO <sup>3</sup> [45]	2.700	623,9099
BBO [32]	2.700	605,6387
DE/BBO [32]	2.700	605,6230
DE [20]	2.700	623,8900
EDE [20]	2.700	623,8300
Q-Learning [33]	2.700	624,3116
<b>Trelea-PSO</b>	2.700	<b>605,7313</b>
<b>BA</b>	2.700	<b>605,7313</b>

A solução de boa qualidade foi explorada pelas técnicas bioinspiradas, resultando na mesma seleção de combustível e no mesmo despacho de cada termoeletrica. O valor alocado da potência e a identificação do combustível em cada UTE são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 2

Usina Termoeletrica	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>BA e Trelea-PSO</b>		
1	2	212,5735	40,2142
2	3	212,3825	38,0626
3	2	332,0000	74,4385
4	3	239,1304	47,0963
5	1	268,8913	67,5254
6	3	239,1304	47,0963
7	1	279,4107	68,3503
8	3	239,1304	47,0963
9	3	411,7903	110,5444
10	1	265,5604	65,3070
<b>Total</b>		<b>2.700,00</b>	<b>605,7313</b>

#### 6.4.1 Análise dos resultados

O sistema deste caso é semelhante ao apresentado na seção 6.3.2, o que difere é a representação do efeito de ponto de válvula, que é considerado neste caso. Através do resultado encontrado pelo estudo deste caso, ao compará-lo com o custo total do despacho apresentado na seção 6.3.2 identifica uma ligeira diferença, que é devida a consideração do efeito de ponto de válvula, inserindo mínimos e máximos locais que transforma a função de custo das UTEs numa função não convexa, podendo alterar o ponto de operação para o mesmo valor da demanda.

Para este caso, embora o resultado do custo total de operação tenha sido igual em ambas as metaheurísticas, o Algoritmo do Morcego encontra a solução de boa qualidade com menos iterações, conforme observado na Figura 25 e descrito na Tabela 7. Ao comparar o resultado do custo total de operação obtido com os resultados presentes na literatura, conclui que o resultado encontrado por [32] é melhor, porém, com a mesma configuração de combustível alterando apenas os valores da potência alocada.

#### 6.5 CASO 3: ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE ZONAS DE OPERAÇÃO PROIBIDAS

Este caso consiste num sistema termoeletrico que apresenta restrições de zonas de operação proibidas, cuja modelagem do problema é feita como descrito na seção 3.3.4.2. O sistema a ser estudado possui 15 termoeletricas com a função de custo de cada UTE aproximada por uma função quadrática, que supre uma demanda de 2.650MW.

A restrição de zonas proibidas inseri ao modelo matemático do problema do Despacho Econômico regiões de descontinuidade na geração. Portanto, o modelo resultante foi solucionado através das metaheurísticas bioinspiradas adotadas. Os resultados obtidos são comparados com os encontrados na literatura especializada, tais como:

- *Mixed integer quadratic programming* [48]
- *Directional Search Genetic Algorithm* (DSGA) [17]
- *Quantum-inspired evolutionary* (QEA) [49]
- *Improved Quantum-inspired evolutionary* (IQEA) [49]

O processo de convergência é ilustrado pelas Figura 26a e 26b, que representa a convergência pelo Trelea-PSO e BA, respectivamente.

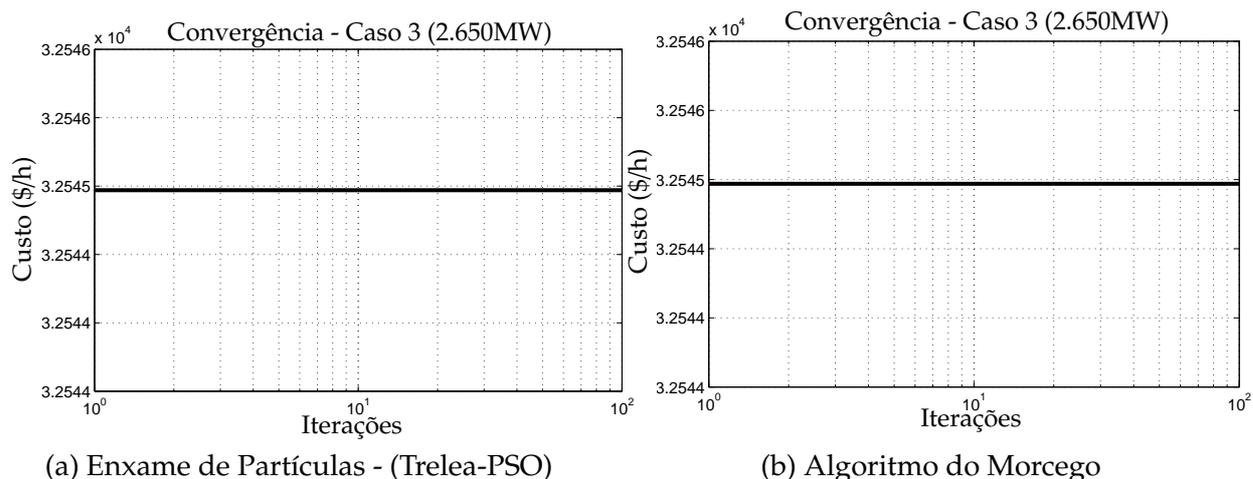


Figura 26 – Processo de convergência - Caso 3 (2.650MW)

Em relação a obtenção do ponto de boa qualidade, que neste caso refere-se a seleção da região de operação, ambas as metaheurísticas conseguem determiná-lo na primeira iteração resultando no mesmo custo total de operação, conforme apresentado na Tabela 10

Tabela 10 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 3

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	32.544,9704	1 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	32.544,9704	1 <sup>a</sup>

A comparação dos resultados obtidos com os encontrados na literatura é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação do custo de operação - Caso 3

Metodologia	Total de Geração (MW)	Custo da Operação (\$/h)
Mixed integer quadratic programming [48]	2.650	32.544,97
DSGA [17]	2.650	32.545,00
QEA [49]	2.650	32.548,4839
IQEA [49]	2.650	32.544,97
<b>Trelea-PSO</b>	2.650	<b>32.544,9704</b>
<b>BA</b>	2.650	<b>32.544,9704</b>

De acordo com a zona de operação selecionada, a partir do processo de exploração da região de soluções da metaheurística, foi alocado a geração para cada UTE do sistema, resultando no despacho apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 3 (2.650MW)

Usina Termoeletrica	Zona de Operação	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>BA e Trelea-PSO</b>		
1	1	450	5.263,0775
2	4	450	5.210,5975
3	1	130	1.537,6194
4	1	130	1.537,6194
5	3	335	3.968,3761
6	4	455	5.287,9545
7	1	465	5.216,4559
8	1	60	918,3068
9	1	25	454,4744
10	1	20	390,8312
11	1	20	412,4944
12	2	55	791,4468
13	1	25	553,5119
14	1	15	491,2640
15	1	15	510,9406
<b>Total</b>		<b>2.650</b>	<b>32.544,9704</b>

### 6.5.1 Análise dos resultados

O processo de convergência das metaheurísticas ocorreu na mesma iteração e para o mesmo ponto de boa qualidade, de acordo com o despacho apresentado na Tabela 9. A rápida convergência está associada ao número de usinas com restrições e ao respectivo número de restrições, pois neste sistema apenas 4 UTEs apresentam zonas de operação proibidas.

Diante dos resultados obtidos da literatura especializada, ambas as metaheurísticas se destacam, é obtido sucesso na resolução do DE proposto.

### 6.6 CASO 4: SISTEMA 50 UTEs

Este caso consiste no sistema criado a partir da multiplicação proporcional dos dados de geração e da demanda do sistema apresentado na seção 6.4. Para este caso, o sistema termoeletrico é composto de 50 UTEs, cuja demanda a ser atendida é de 13.500MW. Este sistema é modelado de acordo com a equação (3.10).

Como não foi encontrado na literatura trabalho que tenha resolvido o mesmo problema, a comparação dos resultados é feita entre as metaheurísticas bioinspiradas utilizadas, o Trelea-PSO e o BA.

O processo de convergência das metaheurísticas está apresentado na Figura 27.

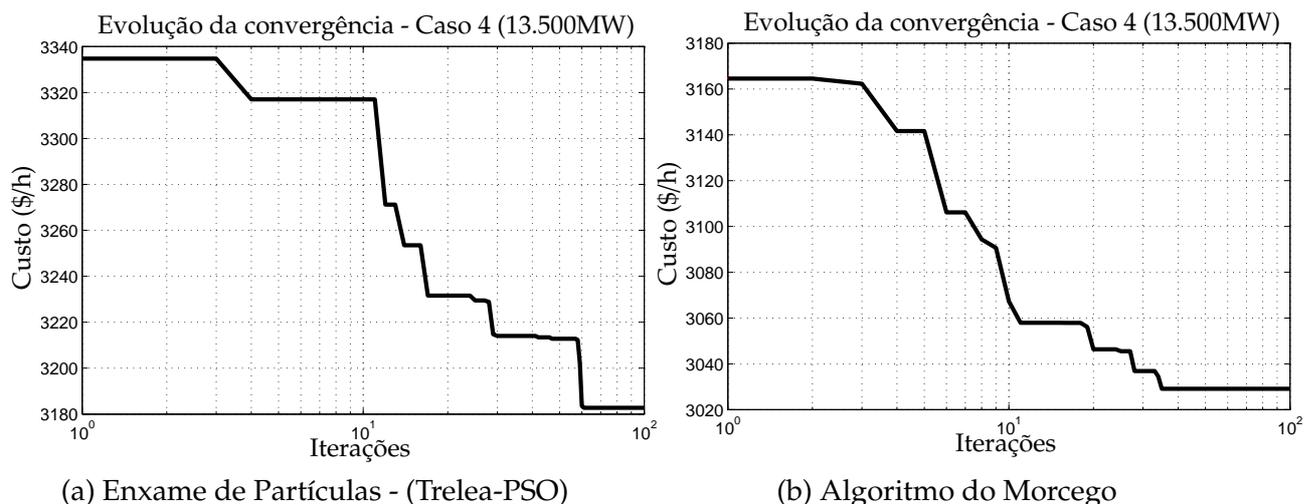


Figura 27 – Processo de convergência - Caso 4 (13.500MW)

Com base na convergência das metaheurísticas, a Tabela 4 apresenta o custo total de operação e a respectiva iteração em que a solução é encontrada.

Tabela 13 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 4

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	3.182,0006	60 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>3.029,0809</b>	<b>35<sup>a</sup></b>

A partir da definição do tipo de combustível a ser utilizado, pelas metaheurísticas, a alocação ótima de potência dentre as termoelétricas foi determinada. Os resultados obtidos da seleção do tipo de combustível, e da alocação de potência estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 4 (13.500MW)

Usina Termoelétrica	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
<b>1</b>	2	214,7293	41,2705	1	196,0000	32,6532
<b>2</b>	3	212,3846	38,0636	2	157,0000	22,4954
<b>3</b>	2	332,0000	74,4385	2	358,4017	88,1898
<b>4</b>	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
<b>5</b>	1	272,6066	69,3458	1	295,1859	81,0270
<b>6</b>	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
<b>7</b>	1	282,9982	70,1081	1	304,9210	81,4533
<b>8</b>	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
<b>9</b>	3	418,2711	113,7197	3	440,0000	124,7378
<b>10</b>	1	269,1558	67,0686	1	291,1142	78,4308

Continuação da Tabela 14 “Despacho Econômico - Caso 4 (13.500MW)”

Usina Termoelétrica	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
11	2	214,7293	41,2705	2	228,0233	48,1397
12	3	212,3846	38,0636	3	212,7099	38,2308
13	2	332,0000	74,4385	2	358,4016	88,1897
14	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
15	1	272,6066	69,3458	1	295,1859	81,027
16	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
17	1	282,9982	70,1081	1	304,9210	81,4533
18	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
19	3	418,2711	113,7197	3	440,0000	124,7378
20	1	269,1558	67,0686	1	291,1142	78,4308
21	2	214,7293	41,2705	2	228,0233	48,1397
22	3	212,3846	38,0636	3	212,7099	38,2308
23	2	332,0000	74,4385	2	358,4016	88,1897
24	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
25	1	272,6066	69,3458	1	295,1859	81,0270
26	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
27	1	282,9982	70,1081	1	304,9211	81,4533
28	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
29	3	418,2711	113,7197	3	440,0000	124,7378
30	1	269,1558	67,0686	1	291,1142	78,4308
31	1	196,0000	32,6642	1	196,0000	32,6532
32	3	212,3846	38,0636	3	212,7099	38,2308
33	2	332,0000	74,4385	2	358,4017	88,1897
34	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
35	1	272,6067	69,3458	1	295,1859	81,0270
36	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
37	1	282,9982	70,1081	1	304,9210	81,4533
38	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
39	2	339,3158	74,8884	3	440,0000	124,7378
40	1	269,1558	67,0686	1	291,1142	78,4308
41	2	214,7293	41,2705	1	196,0000	32,6532
42	3	212,3846	38,0636	3	212,7099	38,2308
43	2	332,0000	74,4385	2	358,4017	88,1897
44	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
45	1	272,6067	69,3458	1	295,1859	81,0270
46	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
47	1	282,9982	70,1081	1	304,9210	81,4533
48	3	239,1304	47,0963	2	200,0000	36,2100
49	3	418,2711	113,7197	3	440,0000	124,7378
50	1	269,1559	67,0686	1	291,1142	78,4308
<b>Total</b>		<b>13.500,00</b>	<b>3.029,0809</b>		<b>13.500,00</b>	<b>3.182,0006</b>

### 6.6.1 Análise dos resultados

A convergência das metaheurísticas utilizadas para este caso de maior porte, em que são considerados o efeito do ponto de válvula e a restrição de múltiplo combustível, mostra que o processo de busca e exploração da região de solução pela metaheurística baseada na ecolocalização dos morcegos (BA) é superior ao apresentado pela metaheurística baseada no Enxame de Partículas, pois o BA converge para uma solução que resulta no custo total de operação inferior ao encontrado pelo Trelea-PSO, conforme apresenta a Tabela 13.

A Figura 27 mostra que o processo de busca pelo ponto de boa qualidade através do Algoritmo do Morcego é mais rápida e eficaz, fato que pode ser relacionado com o processo de busca local, de acordo com [19], pois através da equação (5.4), o BA propõe a busca em torno da região promissora, sendo esta uma característica distinta do método.

### 6.7 CASO 5: SISTEMA 45 UTEs

O estudo deste caso visa avaliar o desempenho das metaheurísticas na resolução do problema do Despacho Econômico em sistemas termoeletricos de maior porte, que considera a restrição de zonas de operação proibidas. Sendo utilizado o sistema apresentado na seção 6.5 como caso base para a criação do sistema deste caso, que consiste em 45 UTEs cuja demanda a ser suprida é igual a 7.950MW.

O resultado obtido pelas metaheurísticas é comparado entre si, pois não foi encontrado nenhum trabalho na literatura especializada que aborde o caso proposto.

O processo de convergência, de ambas as metaheurísticas, está ilustrado na Figura 28.

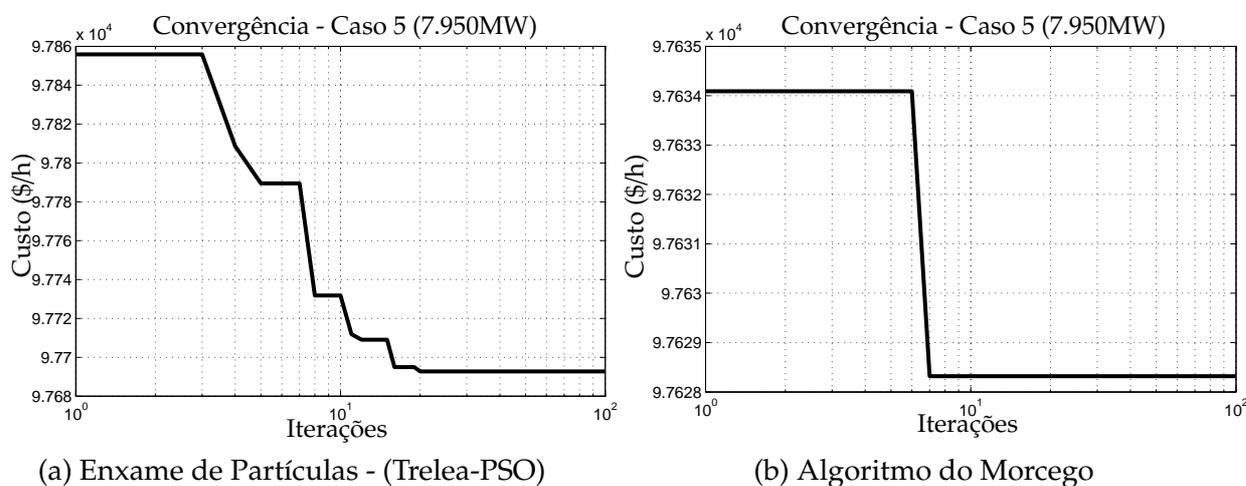


Figura 28 – Processo de convergência - Caso 5 (7.950MW)

O custo de operação obtido pelo ponto de boa qualidade, determinado pelas metaheurísticas, e a iteração em que ocorreu estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 5

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	97.692,7342	20 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>97.628,3220</b>	<b>7<sup>a</sup></b>

A otimização da região de operação das UTEs com zonas proibidas, através do Trelea-PSO e BA, resultou na alocação da geração do sistema de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 5 (7950 MW)

Usina	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
<b>1</b>	1	455,0000	5.314,7805	1	455,0000	5.314,7804
<b>2</b>	4	455,0000	5.262,5256	4	455,0000	5.262,5256
<b>3</b>	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
<b>4</b>	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
<b>5</b>	2	260,0000	3.179,2280	3	390,0000	4.548,5505
<b>6</b>	4	460,0000	5.339,8316	4	460,0000	5.339,8316
<b>7</b>	1	465,0000	5.216,4559	1	465,0000	5.216,4559
<b>8</b>	1	60,0000	918,3068	1	60,0000	918,3068
<b>9</b>	1	25,0000	454,4744	1	25,0000	454,4744
<b>10</b>	1	20,0000	390,8312	1	75,0110	986,8372
<b>11</b>	1	20,0000	412,4944	1	20,0000	412,4944
<b>12</b>	2	58,1844	824,9597	1	30,0000	532,2316
<b>13</b>	1	25,0000	553,5119	1	25,0000	553,5119
<b>14</b>	1	15,0000	491,2640	1	15,0000	491,2640
<b>15</b>	1	15,0000	510,9406	1	15,0000	510,9406
<b>16</b>	1	455,0000	5.314,7805	1	455,0000	5.314,7805
<b>17</b>	4	455,0000	5.262,5256	4	455,0000	5.262,5256
<b>18</b>	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
<b>19</b>	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
<b>20</b>	3	345,2233	4.076,1240	2	260,0000	3.179,2280
<b>21</b>	4	460,0000	5.339,8316	4	460,0000	5.339,8316
<b>22</b>	1	465,0000	5.216,4559	1	465,0000	5.216,4559
<b>23</b>	1	60,0000	918,3068	1	60,0000	918,3068
<b>24</b>	1	25,0000	454,4744	1	25,0000	454,4744
<b>25</b>	1	20,0000	390,8312	1	75,0053	986,7748

Continuação da Tabela 16 “Resultado do Despacho Econômico - Caso 5 (7950 MW)”

Usina Termoelétrica	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>			<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>		
26	1	20,0000	412,4944	1	20,0000	412,4944
27	2	58,1844	824,9597	2	65,0000	897,0624
28	1	25,0000	553,5119	1	25,0000	553,5119
29	1	15,0000	491,2640	1	15,0000	491,2640
30	1	15,0000	510,9406	1	15,0000	510,9406
31	1	455,0000	5.314,7805	1	455,0000	5.314,7805
32	4	455,0000	5.262,5256	4	455,0000	5.262,5256
33	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
34	1	130,0000	1.537,6194	1	130,0000	1.537,6194
35	3	345,2233	4.076,1240	1	180,0000	2.340,0120
36	4	460,0000	5.339,8316	3	430,0000	5.028,7949
37	1	465,0000	5.216,4559	1	465,0000	5.216,4559
38	1	60,0000	918,3068	1	60,0000	918,3068
39	1	25,0000	454,4744	1	25,0000	454,4744
40	1	20,0000	390,8312	1	74,9837	986,5389
41	1	20,0000	412,4944	1	20,0000	412,4944
42	2	58,1844	824,9597	2	65,0000	897,0624
43	1	25,0000	553,5119	1	25,0000	553,5119
44	1	15,0000	491,2640	1	15,0000	491,2640
45	1	15,0000	510,9406	1	15,0000	510,9406
<b>Total</b>		7.950,00	<b>97.628,3220</b>		7.950,00	<b>97.692,7342</b>

### 6.7.1 Análise dos resultados

O aumento do porte do sistema termoeletrico elevou a dificuldade de se determinar a solução de boa qualidade, conforme os gráficos de convergência ilustrado pela Figura 28. Dentre as metaheurísticas utilizadas o Algoritmo do Morcego apresentou maior eficiência no processo de convergência, pois obteve o melhor custo de operação, como mostra a Tabela 15.

### 6.8 CASO 6: SISTEMA CRIADO DE 40 UTEs

Este caso de estudo contempla as restrições realísticas das UTEs que foram apresentadas nesta dissertação, que são: múltiplo combustível e zonas de operação proibidas, além de considerar o efeito do ponto de válvula. Com base no caso apresentado por [50], alguns dados de determinadas UTEs foram alterados originando o presente caso de estudo, que apresenta desde UTEs mais simples, com função de custo aproximada por uma função de quadrática, bem como UTEs com as características operativas reais (MC, ZOP e efeito do ponto de válvula). O sistema deste caso consiste em 40 UTEs que possui uma demanda a ser atendida igual a 7.000MW, os dados deste

sistema estão dispostos no ANEXO A.

Devido a este caso ser inédito, o resultado obtido pelas metaheurísticas é comparado entre si. Na Figura 29 é ilustrado o processo de convergência de ambas as metaheurísticas bioinspiradas. O custo de operação referente ao ponto de boa qualidade obtido pelas metaheurísticas, bem como a iteração em que ocorre, são apresentados na Tabela 17.

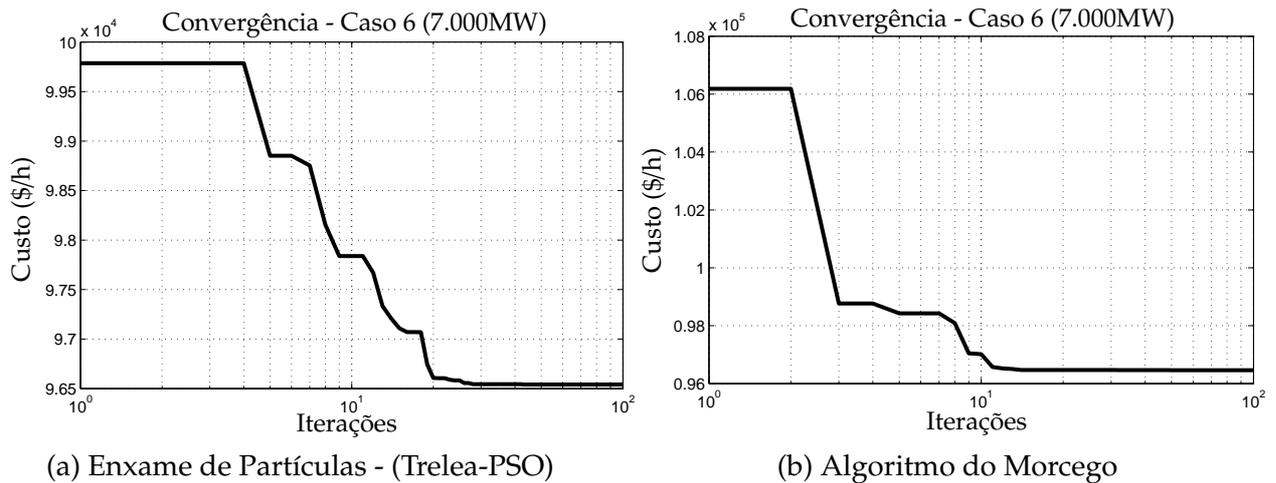


Figura 29 – Processo de convergência - Caso 6 (7.000MW)

Tabela 17 – Comparação da convergência entre as metaheurísticas - Caso 6

	Custo (\$/h)	Iteração
<b>Trelea-PSO</b>	96.539,4976	43 <sup>a</sup>
<b>BA</b>	<b>96.463,0104</b>	<b>50<sup>a</sup></b>

De acordo com a determinação do tipo de combustível e da zona de operação da operação das termoelétricas, através da solução de boa qualidade encontrado pelas metaheurísticas bioinspiradas, a alocação da geração termoelétrica é obtida através da otimização da função não convexa, cujo valor da geração e o respectivo custo de cada UTE, bem como os parâmetros operativos deste caso, são dispostos na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado do Despacho Econômico - Caso 6 (7.000MW)

UTE	Tipo de Comb.	Zona de Operação	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)	Tipo de Comb.	Zona de Operação	Geração (MW)	Custo da Geração (\$/h)
	<b>Algoritmo do Morcego (BA)</b>				<b>Enxame de Partículas (Trelea-PSO)</b>			
1	1	1	40,0000	553,0480	1	1	40,0000	553,0480
2	1	1	60,0000	1.463,8560	1	1	60,0000	1.463,8560
3	1	2	97,4316	1.255,6091	1	1	82,0000	1.103,2695
4	1	1	24,0000	351,0571	1	1	24,0000	351,0571
5	1	1	26,0000	371,2617	1	1	26,0000	371,2617
6	1	1	85,9441	998,9026	1	1	95,5700	1.096,3856
7	1	1	110,0000	1.603,2330	1	1	110,0000	1.603,2330
8	1	1	192,0000	1.917,1592	1	1	192,0000	1.917,1589
9	1	2	298,0201	2.932,2043	1	2	300,0000	2.952,0599
10	1	1	130,0000	2.503,1050	1	1	130,0000	2.503,1050
11	1	1	94,0000	1.901,3894	1	1	94,0000	1.901,3894
12	1	1	94,0000	1.907,7908	1	1	94,0000	1.907,7908
13	1	1	125,0000	2.541,8063	1	1	125,0000	2.541,8063
14	2	2	280,0000	3.624,8840	2	2	294,5601	3.772,7968
15	1	1	125,0000	2.983,6125	1	1	125,0000	2.983,6125
16	1	1	125,0000	2.983,6125	1	1	125,0000	2.983,6125
17	1	1	125,0000	2.983,6125	1	1	125,0000	2.983,6125
18	1	2	327,1900	3.590,3366	1	2	362,2015	3.944,8946
19	3	3	500,0000	4.564,5109	3	3	500,0000	4.564,2200
20	1	1	327,1895	3.590,3116	1	2	362,3349	3.946,2396
21	1	1	327,1887	3.590,2844	1	2	362,3335	3.946,2060
22	1	3	550,0000	5.334,6250	1	3	550,0000	5.334,6250
23	3	3	550,0000	4.788,0100	3	3	550,0000	4.788,0100
24	2	3	550,0000	4.625,2950	2	3	550,0000	4.624,5750
25	1	3	550,0000	5.317,2350	1	3	550,0000	5.317,2350
26	1	3	520,0222	5.244,2159	1	1	380,0000	3.900,5240
27	1	3	526,0138	5.304,1340	1	3	550,0000	5.546,0049
28	1	1	10,0000	1.140,5770	1	1	10,0000	1.140,5770
29	1	1	10,0000	1.140,5770	1	1	10,0000	1.140,5770
30	1	1	10,0000	1.140,5770	1	1	10,0000	1.140,5770
31	1	1	20,0000	1.569,2320	1	1	20,0000	1.569,2320
32	1	1	20,0000	1.315,5940	1	1	20,0000	1.315,5940
33	1	1	20,0000	1.557,9800	1	1	20,0000	1.557,9800
34	1	1	20,0000	1.508,9140	1	1	20,0000	1.508,9140
35	1	1	18,0000	1.173,5669	1	1	18,0000	1.173,5669
36	1	1	18,0000	1.392,8249	1	1	18,0000	1.392,8249
37	1	1	20,0000	1.322,5540	1	1	20,0000	1.322,5540
38	1	1	25,0000	1.390,1837	1	1	25,0000	1.390,1838
39	1	1	25,0000	1.392,1837	1	1	25,0000	1.392,1838
40	1	1	25,0000	1.593,1438	1	1	25,0000	1.593,1438
<b>Total</b>			7.000,00	<b>96.463,0104</b>			7.000,00	<b>96.539,4976</b>

### 6.8.1 Análise dos resultados

Este caso foi criado com o intuito de avaliar, num mesmo sistema, todas as restrições operativas do Despacho Econômico termoelétrico apresentado nesta dissertação que, conseqüentemente, torna o sistema mais real. Diante deste fato, observa-se na Figura 29 e na Tabela 17 que o Algoritmo do Morcego conseguiu obter o menor custo de operação para o referido sistema, mostrando-se um método eficiente.

Diante da complexidade do problema pela busca da solução boa qualidade, a Tabela 18 mostra que a seleção do tipo de combustível e da zona de operação, é realizado de forma mais eficaz pelo Algoritmo do Morcego.

## 6.9 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos a partir das metaheurísticas bioinspiradas utilizadas na resolução do problema do Despacho Econômico termoelétrico. Os sistemas dos casos e os resultados da literatura, são os difundidos na literatura especializada. Sendo criado e analisado um sistema que contempla todas as restrições operativas apresentadas.

Com base nas Figuras 23, 25, 26, 27, 28 e 29, que representam o processo de convergência de cada caso, nota-se que para todos os casos o Algoritmo do Morcego obtém o custo de geração menor, exceto no Caso 3 em que ambas as metaheurísticas converge para a solução de boa qualidade na primeira iteração. Este fato, possivelmente, está relacionado com a forma de implementação do BA, que foi feita conforme a descrição na seção 5.4 e no Pseudocódigo 2. Pois, nesta implementação a melhor solução ( $x_*$ ) é atualizada a cada atualização do morcego virtual  $i$  (solução  $i$ ), que afeta diretamente o processo de busca local inserida pela metaheurística do Algoritmo do Morcego, e que contribui para uma performance mais rápida e eficiente no processo de otimização.

Com base nos resultados obtidos dos casos de estudo, é apresentado na Tabela 19 um resumo dos resultados encontrados pelas metaheurísticas bioinspiradas utilizadas, assim como a melhor solução conhecida na literatura e a metodologia que deu origem a esta solução, em destaque para o Caso 6, por ser mais complexo.

Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos

	Metaheurística		Solução Conhecida	Metodologia	
	Algoritmo do Morcego	Trelea-PSO			
<b>Caso 1</b>	A	511,0436	511,0439	526,23 [41]	BA
	B	605,6077	605,6084	623,809 [43–46]	BA
<b>Caso 2</b>		605,7313	605,7313	605,623 [32]	DE/BBO
<b>Caso 3</b>		32.544,9704	32.544,9704	32.544,97 [49]	IQEA - BA - Trelea-PSO
<b>Caso 4</b>		3.029,0809	3.182,0006	—	BA
<b>Caso 5</b>		97.628,3220	97.692,7342	—	BA
<b>Caso 6</b>		96.463,0104	96.539,4976	—	BA

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação, foi proposto o uso de metaheurísticas bioinspiradas para solucionar o problema do Despacho Econômico termoelétrico, que considera características reais da operação na formulação do problema. Estas características torna o problema não convexo, quando considera o efeito de ponto de válvula ou múltiplo combustível (adição de máximos e mínimos locais), e descontínuo ao considerar as zonas de operação proibidas. A fim de solucionar o problema combinatório apresentado pelo Despacho Econômico, foram utilizados o Algoritmo do Morcego e o Enxame de Partículas (Trelea-PSO) para realizar a exploração da região de soluções e juntamente com o otimizador LINGO, determinar uma solução de boa qualidade para o problema.

O processo de exploração da região de solução, delimitada pelas restrições do problema, se diferencia entre as metaheurísticas propostas. Em linha gerais, o Trelea-PSO, variante da técnica de Otimização via Enxame de Partículas, utiliza do aprendizado individual e coletivo da população de partículas, em analogia ao comportamento dos pássaros e peixes. O Algoritmo baseado na ecolocalização de Morcegos, por sua vez, faz uso apenas do aprendizado coletivo no processo de busca pela solução de boa qualidade e apresenta algumas características distintas, tais como, busca local e atualização dos parâmetros de controle, sonoridade e taxa de emissão de pulso, que lhe confere maior aderência no processo de otimização, tornando o processo de convergência mais eficiente.

O Enxame de Partículas, incluindo suas variantes, é uma metaheurística difundida na resolução do problema de Despacho Econômico termoelétrico, com base em trabalhos encontrados na literatura. Em contrapartida, para o Algoritmo do Morcego, que é um método incipiente, não foi encontrado nenhuma aplicação ao problema. Porém, com base nos resultados obtidos e apresentados, o Algoritmo baseado na ecolocalização do Morcego mostrou-se mais eficiente em quase todos os casos de estudos.

De acordo com os resultados obtidos para os Casos 1, 2 e 3, tanto o Trelea-PSO quanto o Algoritmo do Morcego tiveram resultados semelhantes ou iguais, às vezes, diferenciando-se apenas na iteração em que a solução de boa qualidade era obtida. Já nos Casos 4 e 5, a melhor solução para ambos os casos é obtida através do Algoritmo do Morcego, nestes casos a comparação entre as metaheurísticas bioinspiradas mostrou que a eficiência do Algoritmo do Morcego é superior ao Enxame de Partículas (Trelea-PSO), não apenas pelo valor do custo de operação do sistema termoelétrico, mas também na rapidez com que a solução de boa qualidade é encontrado.

O Caso 6 foi criado e proposto nesta dissertação, pois exemplifica o problema

mais complexo do Despacho Econômico termoeletrico, visto que o sistema deste caso apresenta todas as restrições operativas descritas no Capítulo 3, que são a restrição de múltiplo combustível, zonas de operação proibidas e o efeito do ponto de válvula. Embora ambas as metaheurísticas tenha obtido uma solução viável para o problema, o Algoritmo do Morcego se mostrou mais eficiente, encontrando um ponto de boa qualidade cujas características permitiu otimizar a alocação da geração resultando no custo operacional inferior ao obtido via Enxame de Partículas. Destaca-se que ambas as metodologias propostas mostraram-se capazes de solucionar o problema do Despacho Econômico, considerando restrições que modelam fenômenos reais das termoeletricas e que tornam bastante complexa a obtenção da solução de boa qualidade.

Por fim, a partir dos resultados apresentados, permite-se concluir que a utilização de metaheurísticas bioinspiradas no problema não convexo e descontínuo do Despacho Econômico termoeletrico, fornece boas soluções. De acordo com a qualidade dos resultados obtidos através do Algoritmo do Morcego, conclui-se que a utilização desta metaheurística é bastante promissora na resolução do problema do Despacho Econômico termoeletrico.

## 7.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base na linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação e nos resultados obtidos, são sugeridas algumas propostas de trabalhos futuros que complementam o problema do Despacho Econômico, tais como:

- Consideração do sistema de transmissão, possibilitando o cálculo do fluxo de potência e das perdas na transmissão de energia.
- Otimização dos parâmetros a serem definidos na inicialização, tanto para a metaheurística baseada no Enxame de Partículas quanto para o Algoritmo do Morcego.
- Inclusão das restrições de limite de rampa, pois leva em consideração o tempo de parada e partida da UTE, devido a sua geração não poder ser ajustada instantaneamente. Esta representação visa a realização do Despacho Econômico com um perfil mais realístico para mais de um período de operação.
- Investigação de outras metaheurísticas para aplicação ao problema de Despacho Econômico.
- Simulação de mais casos, a fim de verificar a eficiência das metaheurísticas aplicadas.
- Utilização do processamento paralelo, a fim de otimizar o tempo computacional.

## REFERÊNCIAS

- [1] MATEOS, J. A. R., “Central Térmica”, <http://almez.pntic.mec.es/jrem0000/dpbg/2bch-ctma/tema11/TERMICA11.swf>.
- [2] WOOD, A. J., WOLLENBERG, B. F., *Power generation, operation, and control*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 1996.
- [3] “Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Maio 2015”, <http://www.mme.gov.br/documents/10584/2027273/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+Elétrico+-+Maio-2015.pdf/c9133d5e-483d-4ed6-90fd-512af78dbac5>, Maio 2015.
- [4] MARCATO, A. L. M., *Planejamento Energético*, Tech. rep., Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- [5] EPE, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2023”, 2015.
- [6] RAMOS, T. P., *Modelo Individualizado de Usinas Hidrelétricas Baseado em Técnicas de Programa'ção Não Linear Integrado com o Modelo de Decisão Estratégica*, Master's Thesis, UFJF, 2011.
- [7] BRANDI, R. B. D. S., *Processo Iterativo de Construção da Função de Custo Futuro na Metodologia PDE-ConvexHull*, Master's Thesis, UFJF, 2011.
- [8] KERR, R., SCHEIDT, J., FONTANNA, A., WILEY, J., “Unit Commitment”, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. PAS-85, n. 5, pp. 417–421, May 1966.
- [9] BURNS, R., GIBSON, C., “Optimization of priority lists for a unit commitment program”. In: *IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS*, v. 94, n. 6, pp. 1917–1917, 1975.
- [10] LEE, F. N., “The application of commitment utilization factor (CUF) to thermal unit commitment”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 2, pp. 691–698, 1991.
- [11] LEE, F. N., FENG, Q., “Multi-area unit commitment”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 2, pp. 591–599, 1992.
- [12] DINIZ, A., *Uma estratégia de decomposição por relaxação lagrangeana para a otimização da programação diária da operação de sistemas hidrotérmicos com modelagem detalhada da rede elétrica—aplicação ao sistema brasileiro*, Ph.D. Thesis, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2007.
- [13] DA SILVA JUNIOR, I. C., *Planejamento da Operação de Sistemas Termoelétricos utilizando Análise de Sensibilidade Associada a Procedimentos Heurísticos*, Ph.D. Thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2008.
- [14] DASGUPTA, D., MCGREGOR, D. R., “Thermal unit commitment using genetic algorithms”. In: *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 141, n. 5, pp. 459–465, 1994.

- [15] SHEBLÉ, G. B., MAIFELD, T. T., BRITTIG, K., FAHD, G., FUKUROZAKI-COPPINGER, S., “Unit commitment by genetic algorithm with penalty methods and a comparison of Lagrangian search and genetic algorithm - economic dispatch example”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 18, n. 6, pp. 339–346, 1996.
- [16] CHIANG, C.-L., “Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 4, pp. 1690–1699, Nov 2005.
- [17] ADHINARAYANAN, T., SYDULU, M., “A directional search genetic algorithm to the economic dispatch problem with prohibited operating zones”. In: *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&# x00026; D. IEEE/PES*, pp. 1–5, 2008.
- [18] SINHA, N., CHAKRABARTI, R., CHATTOPADHYAY, P., “Evolutionary programming techniques for economic load dispatch”, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 1, pp. 83–94, 2003.
- [19] YANG, X.-S., *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier, 2014.
- [20] SAYAH, S., HAMOUDA, A., “Nonsmooth economic power dispatch through an enhanced differential evolution approach”. In: *Complex Systems (ICCS), 2012 International Conference on*, pp. 1–6, Nov 2012.
- [21] RAHMAT, N., MUSIRIN, I., ABIDIN, A. F., “Differential Evolution Immunized Ant Colony Optimization Technique (DEIANT) in solving economic dispatch by considering prohibited operating zones”. In: *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*, pp. 455–460, 2014.
- [22] KENNEDY, J., EBERHART, R., “Particle swarm optimization”. In: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, v. 4, pp. 1942–1948 vol.4, Nov 1995.
- [23] SELVAKUMAR, A. I., THANUSHKODI, K., “Anti-predatory particle swarm optimization: Solution to nonconvex economic dispatch problems”, *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 1, pp. 2 – 10, 2008.
- [24] PARK, J.-B., JEONG, Y.-W., SHIN, J.-R., LEE, K. Y., “An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 1, pp. 156–166, 2010.
- [25] LU, H., SRIYANYONG, P., SONG, Y. H., DILLON, T., “Experimental study of a new hybrid {PSO} with mutation for economic dispatch with non-smooth cost function”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 32, n. 9, pp. 921 – 935, 2010.
- [26] PARASSURAM, A., DEEPA, S. N., KARTHICK, M., “A hybrid technique using particle swarm optimization and differential evolution to solve economic dispatch problem with valve-point effect”. In: *Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE), 2011 International Conference on*, pp. 51–56, Dec 2011.

- [27] “infoMercado semanal”, [http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE\\_358924](http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_358924), 10 2015.
- [28] MAGALHAES, A. C. P., *Modelo de otimização para o problema do despacho económico*, Master’s Thesis, FEUP, Outubro 2012.
- [29] ZHU, J., *Optimization of power system operation*. John Wiley & Sons, 2015.
- [30] JERONYMO, D. C., *Metaheurísticas aplicadas ao problema de despacho econômico de energia elétrica*, Master’s Thesis, UFPR, 2011.
- [31] LIN, C., VIVIANI, G., “Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions”, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, , n. 6, pp. 1170–1175, 1984.
- [32] BHATTACHARYA, A., CHATTOPADHYAY, P., “Hybrid Differential Evolution With Biogeography-Based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 4, pp. 1955–1964, Nov 2010.
- [33] ABOUHEAF, M., HAESAERT, S., LEE, W.-J., LEWIS, F., “Approximate and Reinforcement Learning techniques to solve non-convex Economic Dispatch problems”. In: *Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD), 2014 11th International*, pp. 1–8, Feb 2014.
- [34] ORERO, S., IRVING, M. R., “Economic dispatch of generators with prohibited operating zones: a genetic algorithm approach”. In: *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 143, n. 6, pp. 529–534, 1996.
- [35] CHEN, P.-H., CHANG, H.-C., “Large-scale economic dispatch by genetic algorithm”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 4, pp. 1919–1926, 1995.
- [36] REYNOLDS, C. W., “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”. In: *ACM Siggraph Computer Graphics*, v. 21, n. 4, pp. 25–34, 1987.
- [37] TRELEA, I. C., “The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection”, *Information Processing Letters*, v. 85, n. 6, pp. 317 – 325, 2003.
- [38] MEDONÇA, I. M., *Planejamento Estatístico da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Otimização por Enxame de Partículas*, Master’s Thesis, UFJF, 2012.
- [39] YANG, X.-S., “A new metaheuristic bat-inspired algorithm”, In: *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, pp. 65–74, Springer, 2010.
- [40] PARK, J., KIM, Y., EOM, I., LEE, K., “Economic load dispatch for piecewise quadratic cost function using Hopfield neural network”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 3, pp. 1030–1038, 1993.
- [41] LEE, K. Y., SODE-YOME, A., PARK, J. H., “Adaptive Hopfield neural networks for economic load dispatch”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 2, pp. 519–526, 1998.

- [42] LEE, S.-C., KIM, Y.-H., "An enhanced Lagrangian neural network for the ELD problems with piecewise quadratic cost functions and nonlinear constraints", *Electric Power Systems Research*, v. 60, n. 3, pp. 167–177, 2002.
- [43] BASKAR, S., SUBBARAJ, P., RAO, M., "Hybrid real coded genetic algorithm solution to economic dispatch problem", *Computers & Electrical Engineering*, v. 29, n. 3, pp. 407–419, 2003.
- [44] PARK, J.-B., LEE, K.-S., SHIN, J.-R., LEE, K. Y., "A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions", *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 1, pp. 34–42, 2005.
- [45] PANIGRAHI, B., PANDI, V. R., DAS, S., "Adaptive particle swarm optimization approach for static and dynamic economic load dispatch", *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 6, pp. 1407 – 1415, 2008.
- [46] DIEU, V. N., SCHEGNER, P., "Augmented Lagrange Hopfield network initialized by quadratic programming for economic dispatch with piecewise quadratic cost functions and prohibited zones", *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 1, pp. 292–301, 2013.
- [47] SELVAKUMAR, A., THANUSHKODI, K., "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 1, pp. 42–51, Feb 2007.
- [48] PAPAGEORGIOU, L. G., FRAGA, E. S., "A mixed integer quadratic programming formulation for the economic dispatch of generators with prohibited operating zones", *Electric Power Systems Research*, v. 77, n. 10, pp. 1292–1296, 2007.
- [49] NETO, J. X. V., DE ANDRADE BERNERT, D. L., DOS SANTOS COELHO, L., "Improved quantum-inspired evolutionary algorithm with diversity information applied to economic dispatch problem with prohibited operating zones", *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 1, pp. 8–14, 2011.
- [50] NARESH, R., DUBEY, J., SHARMA, J., "Two-phase neural network based modelling framework of constrained economic load dispatch", *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v. 151, n. 3, pp. 373–378, 2004.

## APÊNDICE A – Simplificação do equacionamento - TRELEA-PSO

A seguir são apresentados os passos para a obtenção da equação (4.7) a partir da equação (4.1).

Dada a equação, feita para uma única partícula (retirando a notação vetorial):

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma_1 r_1 (p^* - p^t) + \gamma_2 r_2 (g^* - p^t)$$

De acordo com a consideração apresentada em (4.4), tem-se:

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma_1 \frac{1}{2} (p^* - p^t) + \gamma_2 \frac{1}{2} (g^* - p^t)$$

Fazendo a multiplicação distributiva:

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma_1 \frac{1}{2} p^* - \gamma_1 \frac{1}{2} p^t + \gamma_2 \frac{1}{2} g^* - \gamma_2 \frac{1}{2} p^t$$

Reagrupando a equação anterior, resulta em:

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma_1 \frac{1}{2} p^* + \gamma_2 \frac{1}{2} g^* - \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} p^t$$

Reescrevendo a equação acima considerando a simplificação apresentada em (4.5):

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma_1 \frac{1}{2} p^* + \gamma_2 \frac{1}{2} g^* - \gamma p^t$$

Multiplicando toda a equação por  $\frac{\gamma}{\gamma}$ , tem-se:

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} p^* + \gamma \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} g^* - \gamma p^t$$

Simplificando a equação anterior com base em (4.6):

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma p - \gamma p^t$$

Por fim, reagrupando a equação anterior obtêm-se a descrita em (4.7), conforme apresentada abaixo:

$$v_p^{t+1} = \theta v_p^t + \gamma (p - p^t)$$

## ANEXO A – Dados dos Sistemas Termoelétricos

Neste ANEXO são apresentados os parâmetros dos casos estudados. Estes parâmetros referem-se aos coeficientes da função quadrática do custo de geração de cada UTE, bem como os coeficientes referentes ao efeito de ponto de válvula e a delimitação das zonas de operação proibidas, quando existentes.

### o CASO 1:

Este caso é composto por 10 UTEs [31] com múltiplo combustível que atende à demanda de 2.500MW e 2.700MW referente ao Caso 1-A e 1-B, respectivamente. Seus dados estão detalhados na Tabela 20.

Tabela 20 – Dados das unidades termoelétricas referente ao Caso 1

Unidade Termoelétrica	Tipo de Combustível	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$p^{\min}$ [MW]	$p^{\max}$ [MW]
1	1	26,97	-0,3975	0,002176	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	196	250
2	1	1,865	-0,03988	0,001138	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	157	230
3	1	39,79	-0,3116	0,001457	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	388	500
4	1	1,983	-0,03114	0,001049	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	200	265
5	1	13,92	-0,08733	0,001066	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	407	490
6	1	1,983	-0,03114	0,001049	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	200	265
7	1	18,93	-0,1325	0,001107	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	391	500
8	1	1,983	-0,03114	0,001049	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	200	265
9	1	14,23	-0,01817	0,0006121	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	370	440
10	1	13,97	-0,09938	0,001102	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	407	490

## ▣ CASO 2:

O Caso 2 é composto pelas mesmas 10 UTEs com múltiplo combustível do Caso 1, porém, neste caso considera-se o efeito do ponto de válvula [33]. A demanda deste sistema é de 2.700MW. Os dados deste caso estão detalhados na Tabela 21, onde TC representa o tipo de combustível.

Tabela 21 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 2

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{min}$ [MW]	$p_{max}$ [MW]
1	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
2	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230
3	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
4	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
5	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
6	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
7	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500
8	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
9	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
10	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490

### ▣ CASO 3:

Este caso consiste em 15 UTEs que possui a função de custo modelado por uma função quadrática, apresentando zonas de operação proibidas [49]. Os coeficientes da função de custo das termoelétricas, assim como os limites de potência mínimo e máximo, estão dispostos na Tabela 22. As regiões e zonas de operação proibidas estão descritas na Tabela 23. A demanda a ser atendida por este sistema é de 2.650MW.

Tabela 22 – Dados das unidades termoelétricas referente ao Caso 3

<b>Unidade Termoelétrica</b>	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$p^{\min}$ [MW]	$p^{\max}$ [MW]
1	671,03	10,07	0,000299	150	455
2	574,54	10,22	0,000183	150	185
3	374,59	08,80	0,001126	20	130
4	374,59	08,80	0,001126	20	130
5	461,37	10,40	0,000205	420	470
6	630,14	10,10	0,000301	455	460
7	548,20	09,87	0,000364	135	465
8	227,09	11,50	0,000338	60	300
9	173,72	11,21	0,000807	25	162
10	175,95	10,72	0,001203	20	160
11	186,86	11,21	0,003586	20	80
12	230,27	09,90	0,005513	20	30
13	225,28	13,12	0,000371	25	85
14	309,03	12,12	0,001929	15	55
15	323,79	12,41	0,004447	15	55

Tabela 23 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoelétrico referente ao Caso 3

<b>Unidade Termoelétrica</b>	<b>Número de ZOP</b>	<b>ZOP 1</b> [MW]	<b>ZOP 2</b> [MW]	<b>ZOP 3</b> [MW]
2	3	[185; 225]	[305; 335]	[420; 450]
5	3	[180; 200]	[260; 335]	[390; 420]
6	3	[230; 255]	[365; 395]	[430; 455]
12	2	[30; 55]	[65; 75]	

### ▣ CASO 4:

O Caso 4 é obtido através da multiplicação proporcional do Caso 2, sendo o fator multiplicativo igual a 5. Portanto, a demanda deste sistema é de 13.500MW. Os dados deste caso estão detalhados na Tabela 24

Tabela 24 – Dados das unidades termoelétricas referente ao Caso 4

Unidade Termoelétrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{min}$ [MW]	$p_{max}$ [MW]
1	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
2	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230
3	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
4	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
5	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
6	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
7	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500
8	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
9	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
10	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490
11	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
12	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230

Continuação da Tabela 24 - Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 4

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{\min}$ [MW]	$p_{\max}$ [MW]
13	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
14	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
15	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
16	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
17	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500
18	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
19	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
20	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490
21	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
22	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230
23	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
24	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
25	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
26	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
27	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500

Continuação da Tabela 24 - Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 4

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{\min}$ [MW]	$p_{\max}$ [MW]
28	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
29	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
30	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490
31	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
32	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230
33	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
34	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
35	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
36	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
37	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500
38	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
39	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
40	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490
41	1	26,97	-0,3975	0,002176	0,027	-4	100	196
	2	21,13	-0,3059	0,001861	0,0211	-3,1	196	250
42	1	1,865	-0,03988	0,001138	0,0019	-0,4	50	114
	2	13,65	-0,198	0,00162	0,0137	-2	114	157
	3	118,4	-1,269	0,004194	0,1184	-13,	157	230

Continuação da Tabela 24 - Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 4

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{min}$ [MW]	$p_{max}$ [MW]
43	1	39,79	-0,3116	0,001457	0,0398	-3,1	200	332
	2	-2,875	-0,03389	0,0008035	-0,003	0,3	332	388
	3	-59,14	0,4864	0,00001176	-0,059	4,9	388	500
44	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
45	1	13,92	-0,08733	0,001066	0,0139	-0,9	190	338
	2	99,76	-0,5206	0,001597	0,0998	-5,2	338	407
	3	-53,99	0,4462	0,0001498	-0,054	4,5	407	490
46	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	85	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
47	1	18,93	-0,1325	0,001107	0,0189	-1,3	200	331
	2	43,77	-0,2267	0,001165	0,0438	-2,3	331	391
	3	-43,35	0,3559	0,0002454	-0,043	3,6	391	500
48	1	1,983	-0,03114	0,001049	0,002	-0,3	99	138
	2	52,85	-0,6348	0,002758	0,0529	-6,3	138	200
	3	266,8	-2,338	0,005935	0,2668	-23	200	265
49	1	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	130	213
	2	88,53	-0,5675	0,001554	0,0885	-5,7	213	370
	3	14,23	-0,01817	0,0006121	0,0142	-0,2	370	440
50	1	13,97	-0,09938	0,001102	0,014	-1	200	362
	2	46,71	-0,2024	0,001137	0,0467	-2,	362	407
	3	-61,13	0,5084	0,00004164	-0,061	5,1	407	490

### ◉ CASO 5:

Este caso é resultado da multiplicação proporcional do Caso 3, sendo o fator multiplicativo igual a 3. Logo, a demanda a ser atendida por este sistema é de 7.950MW. Os dados deste sistema estão descritos abaixo:

Tabela 25 – Dados das unidades termoelétricas referente ao Caso 5

<b>Unidade Termoelétrica</b>	<i>a</i> [\$/h]	<i>b</i> [\$/MWh]	<i>c</i> [\$/MW <sup>2</sup> h]	<i>p</i> <sup>min</sup> [MW]	<i>p</i> <sup>max</sup> [MW]
1	671,03	10,07	0,000299	150	455
2	574,54	10,22	0,000183	150	185
3	374,59	08,80	0,001126	20	130
4	374,59	08,80	0,001126	20	130
5	461,37	10,40	0,000205	420	470
6	630,14	10,10	0,000301	455	460
7	548,20	09,87	0,000364	135	465
8	227,09	11,50	0,000338	60	300
9	173,72	11,21	0,000807	25	162
10	175,95	10,72	0,001203	20	160
11	186,86	11,21	0,003586	20	80
12	230,27	09,90	0,005513	20	30
13	225,28	13,12	0,000371	25	85
14	309,03	12,12	0,001929	15	55
15	323,79	12,41	0,004447	15	55
16	671,03	10,07	0,000299	150	455
17	574,54	10,22	0,000183	150	185
18	374,59	08,80	0,001126	20	130
19	374,59	08,80	0,001126	20	130
20	461,37	10,40	0,000205	420	470
21	630,14	10,10	0,000301	455	460
22	548,20	09,87	0,000364	135	465
23	227,09	11,50	0,000338	60	300
24	173,72	11,21	0,000807	25	162
25	175,95	10,72	0,001203	20	160
26	186,86	11,21	0,003586	20	80
27	230,27	09,90	0,005513	20	30
28	225,28	13,12	0,000371	25	85

Continuação Tabela 25 - Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 5

<b>Unidade Termoeletrica</b>	<i>a</i> [\$/h]	<i>b</i> [\$/MWh]	<i>c</i> [\$/MW <sup>2</sup> h]	<i>P</i> <sup>min</sup> [MW]	<i>P</i> <sup>max</sup> [MW]
29	309,03	12,12	0,001929	15	55
30	323,79	12,41	0,004447	15	55
31	671,03	10,07	0,000299	150	455
32	574,54	10,22	0,000183	150	185
33	374,59	08,80	0,001126	20	130
34	374,59	08,80	0,001126	20	130
35	461,37	10,40	0,000205	420	470
36	630,14	10,10	0,000301	455	460
37	548,20	09,87	0,000364	135	465
38	227,09	11,50	0,000338	60	300
39	173,72	11,21	0,000807	25	162
40	175,95	10,72	0,001203	20	160
41	186,86	11,21	0,003586	20	80
42	230,27	09,90	0,005513	20	30
43	225,28	13,12	0,000371	25	85
44	309,03	12,12	0,001929	15	55
45	323,79	12,41	0,004447	15	55

Tabela 26 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoeletrico referente ao Caso 5

<b>Unidade Termoeletrica</b>	<b>Número de ZOP</b>	<b>ZOP 1</b> [MW]	<b>ZOP 2</b> [MW]	<b>ZOP 3</b> [MW]
2	3	[185; 225]	[305; 335]	[420; 450]
5	3	[180; 200]	[260; 335]	[390; 420]
6	3	[230; 255]	[365; 395]	[430; 455]
12	2	[30; 55]	[65; 75]	
17	3	[185; 225]	[305; 335]	[420; 450]
20	3	[180; 200]	[260; 335]	[390; 420]
21	3	[230; 255]	[365; 395]	[430; 455]
27	2	[30; 55]	[65; 75]	
32	3	[185; 225]	[305; 335]	[420; 450]
35	3	[180; 200]	[260; 335]	[390; 420]
36	3	[230; 255]	[365; 395]	[430; 455]
42	2	[30; 55]	[65; 75]	

### ◉ CASO 6:

Este caso foi criado baseado-se nos dados apresentado em [50], consistindo em 40 UTEs cujas restrições operativas relacionadas ao múltiplo combustível e ao efeito do ponto de válvula foram inseridas ao sistema tradicional que apresentava apenas zonas de operação proibidas. Os dados referentes ao custo das termoeletricas e ao tipo de combustível estão dispostos na Tabela 27, e as regiões referentes as zonas de operação proibidas estão descritas na Tabela 28.

Tabela 27 – Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 6

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{\min}$ [MW]	$p_{\max}$ [MW]
1	1	170,44	8,336	0,03073	–	–	40	55
	2	159,07	8,770	0,02873	–	–	55	80
2	1	309,54	7,0706	0,2028	–	–	60	120
3	1	369,03	8,1817	0,00942	–	–	80	190
4	1	135,48	6,9467	0,08482	–	–	24	42
5	1	135,19	6,5595	0,09693	0,13519	6,5595	26	42
6	1	222,33	8,0543	0,01142	–	–	68	140
7	1	287,71	8,0323	0,0357	0,028771	0,80323	110	300
8	1	391,98	6,999	0,00492	0,0039198	0,06999	135	192
	2	401,8	5,870	0,01492	0,004018	0,0587	192	300
9	1	455,76	6,602	0,00573	–	–	135	300
10	1	722,82	12,908	0,00605	0,072282	0,12908	130	257
	2	675,31	11,821	0,00725	0,067531	0,11821	257	300
11	1	635,2	12,986	0,00515	–	–	94	160
	2	620,2	13,236	0,00600	–	–	160	213
	3	630,5	13,125	0,00572	–	–	220	375
12	1	654,69	12,796	0,00569	–	–	94	375
13	1	913,4	12,501	0,00421	–	–	125	250
	2	960,4	13,201	0,00752	–	–	250	500
14	1	1.760,4	8,8412	0,00752	0,17604	0,88412	125	280
	2	1.235,7	6,9872	0,00552	0,12357	6,9872	280	409
	3	1.584,4	7,5225	0,00682	0,15844	7,5225	420	500
15	1	1.728,3	9,1575	0,00708	–	–	125	500
16	1	1.728,3	9,1575	0,00708	0,017283	0,09157	125	250
	2	1.858,7	8,8524	0,00672	0,18587	0,8852	250	450
	3	1.927,1	9,5142	0,00718	0,19271	0,95142	450	500
17	1	1.728,3	9,1575	0,00708	0,017283	0,09157	125	500
18	1	647,85	7,9691	0,00313	–	–	220	500

Continuação da Tabela 27 - “Dados das unidades termoeletricas referente ao Caso 6”

Unidade Termoeletrica	TC	$a$ [\$/h]	$b$ [\$/MWh]	$c$ [\$/MW <sup>2</sup> h]	$e$ [\$/h]	$f$ [MW <sup>-1</sup> ]	$p_{\min}$ [MW]	$p_{\max}$ [MW]
19	1	649,69	7,955	0,00313	0,064969	0,7955	220	275
	2	705,23	8,955	0,00425	0,70523	8,955	275	457
	3	589,72	6,874	0,00215	0,58972	0,6874	457	500
20	1	647,83	7,9691	0,00313	–	–	242	500
21	1	647,81	7,9691	0,00313	0,006478	0,0797	242	500
22	1	785,96	6,6313	0,00298	–	–	254	550
23	1	785,96	6,6313	0,00298	–	–	254	270
	2	697,89	5,5698	0,00214	–	–	270	380
	3	727,36	6,0135	0,00249	–	–	380	550
24	1	794,53	6,6611	0,00284	0,079453	0,6661	254	415
	2	736,24	5,8762	0,00217	0,73624	5,876	415	550
25	1	794,53	6,6611	0,00284	–	–	254	550
26	1	801,32	7,1032	0,00277	0,80132	7,103	254	550
27	1	801,32	7,1032	0,00277	–	–	254	550
28	1	1.055,1	3,3353	0,52124	–	–	10	150
29	1	1.055,1	3,3353	0,52124	0,10551	3,3353	10	83
	2	1.178,2	4,0589	0,60278	0,011782	4,0589	83	135
	3	989,9	2,7894	0,48721	0,09899	0,27894	135	150
30	1	1.055,1	3,3353	0,52124	–	–	10	150
31	1	1.207,8	13,052	0,25098	–	–	20	50
	2	1.148,2	11,784	0,18695	–	–	50	70
32	1	810,79	21,887	0,16766	–	–	20	70
33	1	1.247,7	10,244	0,2635	0,12477	1,0244	20	70
34	1	1.219,2	8,3707	0,30575	–	–	20	70
35	1	641,43	26,258	0,18362	–	–	18	35
	2	678,87	28,458	0,23458	–	–	35	49
	3	714,85	30,875	0,27896	–	–	49	60
36	1	1.112,8	9,6956	0,32563	–	–	18	60
37	1	1.044,4	7,1633	0,33722	0,10444	7,1633	20	60
38	1	832,24	16,339	0,23915	–	–	25	60
39	1	834,24	16,339	0,23915	0,083424	1,6339	25	40
	2	895,34	18,178	0,31785	0,089534	0,18178	40	60
40	1	1.035,2	16,339	0,23915	0,10352	1,6339	25	35
	2	1.178,4	18,284	0,27853	0,011784	1,8284	35	47
	3	1.247,3	20,147	0,32987	0,12473	0,20147	47	60

Tabela 28 – Dados das zonas de operação proibidas do sistema termoeletrico referente ao Caso 6

<b>Unidade Termoeletrica</b>	<b>Número de ZOP</b>	<b>ZOP 1 [MW]</b>	<b>ZOP 2 [MW]</b>	<b>ZOP 3 [MW]</b>
2	1	[80; 85]		
3	1	[82; 88]		
7	2	[155; 162]	[221; 235]	
9	1	[235; 246]		
10	1	[200; 211]		
11	1	[213; 220]		
12	1	[213; 220]		
13	3	[201; 211]	[290; 310]	[413; 425]
14	3	[205; 217]	[306; 318]	[409; 420]
15	3	[214; 230]	[277; 290]	[402; 412]
16	3	[214; 230]	[277; 290]	[402; 412]
17	3	[214; 230]	[277; 290]	[402; 412]
18	2	[307; 321]	[407; 421]	
19	2	[301; 310]	[421; 431]	
20	2	[340; 351]	[421; 431]	
21	2	[340; 351]	[421; 431]	
22	2	[306; 320]	[440; 445]	
23	2	[306; 320]	[440; 445]	
24	2	[370; 390]	[495; 502]	
25	2	[370; 390]	[495; 502]	
26	2	[380; 410]	[501; 520]	
27	2	[380; 410]	[501; 520]	
28	1	[102; 113]		
29	1	[102; 113]		
30	1	[102; 113]		