

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica  
Mestrado em Engenharia Elétrica

Flávia Rodrigues do Nascimento

**PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS TERMOELÉTRICOS  
DE GERAÇÃO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO BIO-INSPIRADA EM COLÔNIA DE  
FORMIGAS**

Juiz de Fora  
Setembro de 2011

Flávia Rodrigues do Nascimento

**PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS TERMOELÉTRICOS  
DE GERAÇÃO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO BIO-INSPIRADA EM COLÔNIA  
DE FORMIGAS**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. Ivo Chaves da Silva Junior, D. Sc.

Co-orientador: Prof. Edimar José de Oliveira, D. Sc.

Juiz de Fora  
Setembro de 2011

Nascimento, Flávia Rodrigues do.

Programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração utilizando otimização bio-inspirada em colônia de formigas / Flávia Rodrigues do Nascimento. – 2011.

77 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Algoritmos. I. Título.

CDU 321.3.02

**PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS  
TERMOELÉTRICOS DE GERAÇÃO UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO BIO-  
INSPIRADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS**

FLÁVIA RODRIGUES DO NASCIMENTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE  
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE  
FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Ivo Chaves da Silva Júnior, D. Sc. – Orientador – UFJF

---

Prof. Edimar José de Oliveira, D. Sc. – Co-orientador – UFJF

---

Prof. Edmarcio Antônio Belati, D. Sc. – UFABC

---

Prof. João Alberto Passos Filho, D. Sc. – UFJF

Juiz de Fora, MG, Brasil.

Setembro de 2011

*Aos meus pais Gessé Luiz e Maria Helena.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por se fazer sempre presente em minha caminhada.

Agradeço aos meus pais Gessé Luiz e Maria Helena, pela dedicação, carinho, pela estrutura fornecida e por todo apoio nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao Professor Ivo Chaves da Silva Junior, pela paciência, oportunidade e pela orientação que foi fundamental para a realização desta dissertação.

Ao Professor Edimar José de Oliveira pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus eternos amigos e também aos companheiros de curso que, certamente, contribuíram, direta ou indiretamente, para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

A programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração consiste em determinar uma estratégia de despacho das unidades geradoras para atender a demanda de energia, satisfazendo as restrições operacionais e funcionais do sistema elétrico de potência.

O problema pode ser dividido em dois subproblemas: (i) referente à determinação das unidades que devem estar em operação mediante a demanda solicitada, “*Thermal Unit Commitment*” e (ii) referente à determinação da potência gerada por cada uma das unidades colocadas em serviço, “Despacho Econômico”. Devido à variação de carga ao longo do tempo, a programação da operação envolve decisões do sistema de geração a cada hora, dentro do horizonte de um dia a duas semanas.

Os estudos relacionados às técnicas de otimização bio-inspiradas, utilizadas na resolução da programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração, apontam que a combinação entre os métodos computacionais biologicamente inspirados com outras técnicas de otimização tem papel importante na obtenção de melhores soluções em um menor tempo de processamento.

Seguindo esta linha de pesquisa, o presente trabalho faz uso de uma metodologia baseada na otimização por colônia de formiga para a minimização do custo da programação diária de operação de unidades termoeletricas. O modelo proposto utiliza uma Matriz de Sensibilidade (MS) baseada nas informações fornecidas pelos multiplicadores de Lagrange a fim de melhorar o processo de busca bio-inspirado. Desta forma, um percentual dos indivíduos da colônia faz uso destas informações no processo evolutivo da colônia. Os resultados alcançados através das simulações indicam que a utilização da MS resulta em soluções de qualidade com um número reduzido de indivíduos.

**PALAVRAS CHAVE:** Multiplicadores de Lagrange, Matriz de Sensibilidade, Operação de Unidades Termoeletricas, Despacho Térmico, Algoritmo de Colônia de Formigas.

## ABSTRACT

The daily schedule of thermoelectric systems consists of determining the strategy to set the generation units to be put in operation to meet the load, meeting also the operational and functional constraints of the respective power system.

This problem can be split into two subproblems: (i) schedule of units that must operate in accordance with a given load, or Thermal Unit Commitment and (ii) set the power generation for each committed unit, or Economical Schedule. Due to load variations the schedule involves hourly generation decisions, in a horizon that varies from one day to two weeks.

Researches related to bio-inspired optimization strategies applied to the daily thermal system operation show that the combination between bio-inspired computing techniques and other optimization methods has an important role in order to obtain better solutions in a shorter computing time.

Following this, the present work makes use of a methodology based on Ant Colony Optimization to minimize the costs of the thermal system daily scheduling. This proposed method uses a Sensitivity Matrix (SM) based on information from Lagrange Multipliers related to the problem in order to improve the bio-inspired process. In this way, a percentage of the individuals make use of the provided information in the colony evolution process. The results obtained through those simulations indicate that the use of the SM presents better quality solutions with a reduced number of individuals.

**KEYWORDS:** Thermal Unit Commitment, Thermal Dispatch, Lagrange Coefficients, Ant Colony Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experimento Ponte de Tamanhos Iguais.....	21
Figura 2 - Experimento Ponte de Tamanhos Diferentes.....	21
Figura 3 - Detalhamento x Incertezas.....	31
Figura 4 - Abordagens na Modelagem do Problema.....	32
Figura 5 - Variantes do Problema.....	33
Figura 6 - Fluxograma do Algoritmo Proposto.....	40
Figura 7 - Função de Decisão da Operação.....	42
Figura 8 - Representação do depósito de Feromônio.....	47
Figura 9 - Composição da Colônia.....	48
Figura 10 - Roleta Referente às Soluções Geradas pelas Obreiras.....	49
Figura 11 - Convergência-Sistema 4UTES: caso (a).....	55
Figura 12 - Convergência-Sistema 4UTES: caso (b).....	55
Figura 13 - Matriz de Feromônio-Sistema 4UTES: caso (a).....	56
Figura 14 - Matriz de Feromônio-Sistema 4UTES: caso (b).....	56
Figura 15 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 4UTES.....	57
Figura 16 - Convergência-Sistema 10UTES: caso (a).....	59
Figura 17 - Convergência-Sistema 10UTES: caso (b).....	59
Figura 18 - Matriz de Feromônio-Sistema 10UTES: caso (a).....	60
Figura 19 - Matriz de Feromônio-Sistema 10UTES: caso (b).....	60
Figura 20 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 10UTES.....	62
Figura 21 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 20UTES.....	63
Figura 22 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 40UTES.....	63
Figura 23 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 100UTES.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Natureza Combinatória do Problema-Vinte e Quatro Horas.....	14
Tabela 2 - Representação de um indivíduo da colônia. ....	44
Tabela 3 - Custo Operacional-Sistema 4UTES.....	54
Tabela 4 - Desempenho do Custo Operacional-Sistema 4UTES. ....	57
Tabela 5 - Custo Operacional-Sistema 10UTES.....	58
Tabela 6 - Desempenho do Custo Operacional-Sistema10UTES. ....	61
Tabela 7 - Desempenho do Custo Operacional. ....	62
Tabela 8 - Análise de Sensibilidade-Percentual de Obreiras.....	64
Tabela 9 - Comparação Tempo Computacional-Sistema100UTES.....	65
Tabela 10 - Comparação Tempo Computacional Equalizado-Sistema 100UTES. ....	65
Tabela 11 - Resumo dos Resultados Obtidos.....	66
Tabela 12 - Demanda e Reserva Girante-Sistema 4UTES.....	75
Tabela 13 - Dados Gerador-Sistema 4UTES.....	75
Tabela 14 - Demanda e Reserva Girante-Sistema 10UTES.....	76
Tabela 15 - Dados Gerador-Sistema 10UTES.....	76

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	14
1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO .....	14
1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO.....	14
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
<b>OTIMIZAÇÃO BASEADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS</b> .....	<b>20</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	20
2.2 INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA .....	20
2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS .....	22
2.3.1 Ant System .....	22
2.3.2 Elitist Ant System.....	25
2.3.3 Rank - Based Ant System.....	26
2.3.4 MAX-MIN Ant System.....	27
2.3.5 Ant Colony System .....	27
2.4 CONCLUSÕES GERAIS.....	29
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>30</b>
<b>PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS TERMOELÉTRICOS DE GERAÇÃO</b> .....	<b>30</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	30
3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	30
3.3 MODELAGEM DO PROBLEMA .....	32
3.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	33

3.4.1	Função Objetivo.....	33
3.4.2	Restrição Balanço de Potência Ativa do Sistema.....	35
3.4.3	Restrição de Produção de Energia.....	36
3.4.4	Restrição de Reserva Girante.....	36
3.4.5	Restrição dos Tempos Mínimos de Partida e Parada.....	36
3.5	DIFICULDADES DO PROBLEMA.....	37
3.6	CONCLUSÕES GERAIS.....	37
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>39</b>
<b>METODOLOGIA PROPOSTA .....</b>		<b>39</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	39
4.2	ALGORITMO PROPOSTO.....	39
4.3	CONCLUSÕES GERAIS.....	51
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>		<b>53</b>
<b>ESTUDO DE CASO .....</b>		<b>53</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	53
5.2	ASPECTOS COMPUTACIONAIS E PARÂMETROS UTILIZADOS NO ALGORITMO .....	53
5.3	ESTUDO DE CASOS.....	54
5.3.1	Sistema 4UTES .....	54
5.3.2	Sistema 10UTES .....	57
5.3.3	Sistemas 20, 40 e 100UTES.....	62
5.4	CONCLUSÕES GERAIS.....	66
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>		<b>67</b>
<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>		<b>67</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	67
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	68
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>70</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>		<b>75</b>

DADOS DOS SISTEMAS .....	75
A.1 Sistema 4UTES.....	75
A.2 Sistema 10UTES.....	76

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No sistema elétrico brasileiro (SEB), a geração hidroelétrica é predominante na matriz elétrica. Desta forma, a disponibilidade energética do país está fortemente vinculada à afluência hídrica dos reservatórios hidrelétricos. Como forma de aumentar a confiabilidade do sistema, está sendo incluída uma maior participação da geração térmica na matriz energética brasileira. A introdução da geração térmica trouxe para o segmento a difícil tarefa de harmonizar a presença de duas fontes, com características, custos, investimentos e maturação bem diferentes (SILVA JUNIOR, 2008a). Desta forma, a programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração torna-se de fundamental importância.

A programação diária tem como objetivo a determinação do cronograma de geração das unidades termoeletricas de modo a atender as metas de demanda pré-estabelecida e as restrições operacionais e funcionais do sistema elétrico de potência (SEP). Este problema pode ser dividido em dois subproblemas: (i) determinar quais unidades termoeletricas de geração devem estar em operação para atendimento da demanda horária solicitada; (ii) definir a potência horária gerada por cada unidade geradora que esteja em serviço.

Classificado matematicamente como sendo de programação não linear inteira mista, o problema apresenta as seguintes dificuldades: (i) região de solução não convexa, o que permite a existência de várias soluções e conduz grande parte dos algoritmos a convergirem em direção de mínimos locais; (ii) natureza combinatória do processo de decisão, que leva ao fenômeno da explosão combinatória referente às alternativas de operação, acarretando elevado tempo computacional – a Tabela 1 apresenta o número total de combinações de operação em relação a um determinado número de Unidades Termoeletricas de Geração (UTES) para um período de vinte e quatro horas de operação; (iii) natureza dinâmica do processo de decisão, que se por um lado limita as opções de decisão, por outro, ocasiona antagonismo em relação ao despacho econômico.

Tabela 1- Natureza Combinatória do Problema-Vinte e Quatro Horas.

Número de UTEs	Número de Combinações
7	3,0995e+050
10	1,7259e+072
40	9,7453e+288
100	$\infty$

## 1.2 MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Estudos relacionados às técnicas de otimização bio-inspiradas, utilizadas na resolução da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração (BELEDE et al., 2009), apontam para o fato de que a combinação entre os métodos computacionais biologicamente inspirados com outras técnicas de otimização tem papel importante na obtenção de melhores soluções em um menor tempo de processamento. Assim, a presente dissertação faz uso do processo de busca por colônia de formigas, agregando as informações dos multiplicadores de Lagrange associados às variáveis discretas inerentes ao problema.

## 1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objetivo a minimização dos custos referentes à programação diária de operação de sistemas termoeletrônicos de geração através de otimização bio-inspirada em colônias de formigas. Para tanto, um percentual da colônia fará uso das informações dos multiplicadores de Lagrange, associados às variáveis discretas de decisão, sendo estas obtidas através de uma etapa adicional ao processo de busca, de modo a melhorar a eficiência da colônia e, assim, reduzir o número de indivíduos e, conseqüentemente o tempo de processamento.

## 1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO

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

- NASCIMENTO, F. R. ; SILVA JUNIOR, I. C. ; OLIVEIRA, E. J. ; MARCATO, A.L.M.; DIAS, B. H. **Thermal Unit Commitment using Improved Ant Colony Optimization Algorithm via Lagrange Multipliers**. In: IEEE Powertech, 2011, Trondheim. IEEE Powertech 2011, 2011.
- SILVA JUNIOR, I. C. ; NASCIMENTO, F. R. ; OLIVEIRA, E. J. ; MARCATO, A.L.M.; DIAS, B. H. **Aplicação do Algoritmo de Colônia de Formigas com Informações dos Multiplicadores de Lagrange na Programação de Sistemas Termoelétricos de Geração**. (Aceito para publicação), In: Prof. Heitor S. Lopes - UTFPR; Prof. Ricardo C. Takahashi - UFMG. (Org.). Livro: Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia, 2011.
- SILVA JUNIOR, I. C. ; NASCIMENTO, F. R. ; OLIVEIRA, E. J. ; MARCATO A.L.M.; DIAS, B. H. **A Programação Diária da Operação de Sistemas Termoelétricos de Geração Utilizando Otimização Bio-Inspirada em Colônia de Formigas**. (Aceito para Publicação em Agosto de 2011), Revista da Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

## 1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema da programação diária da operação de sistemas termoelétricos de geração é caracterizado como um problema de otimização combinatória. Desta forma, inicialmente, foi proposta a técnica de enumeração exaustiva, em que todas as combinações possíveis são testadas e a solução que apresentar menor custo, satisfazendo as restrições é, então, escolhida como solução final. Este método pode ser aplicado para sistemas de pequena dimensão, pois para sistemas de grande porte a enumeração torna-se inviável. Desde então, modelos de otimização têm sido propostos para a resolução do problema, tais como técnicas Determinísticas, Metaheurísticas e Híbridas (LOGENTHIRAN e SRINIVASAN, 2010a).

A metodologia baseada em Listas de Prioridade (LP) se caracteriza por ser simples e de baixo esforço computacional. A técnica consiste em elaborar uma ordem de mérito baseada em características técnicas e/ou econômicas das unidades geradoras, de modo a determinar as unidades geradoras com prioridade de operação. Em (SILVA JUNIOR, 2008b) é proposta a utilização de um novo índice de sensibilidade para ordenação das unidades geradoras. A lista de prioridades é obtida a partir dos multiplicadores de Lagrange, associados às variáveis discretas de decisão de operação. Em (TINGFANG e TING, 2008), foi proposta uma metodologia baseada em lista de prioridades, visando à melhoria das soluções. A lista é construída em função do limite

máximo de geração de potência de cada usina pertencente ao sistema analisado. Assim, geradores com maior capacidade de geração têm maior prioridade no despacho.

A Programação Dinâmica (PD) procura a solução em todo o espaço de busca, colocando as unidades em todos os estados (0/1) em cada estágio. Para facilitar a solução, o problema é dividido em subproblemas menores de modo a obter uma solução ótima para o problema inicial. A busca pode partir do início ou do final da programação (*forward/backward*). A programação dinâmica apresenta algumas vantagens, porque consegue tratar problemas não convexos e não lineares. A desvantagem advém da necessidade de trabalhar em um espaço discreto e, deste modo, exigir uma grande capacidade de memória e um elevado tempo computacional. Estas dificuldades evoluem de forma exponencial com a dimensão do problema, isto é, com o número de unidades geradoras e períodos considerados.

(AL KALAANI, 2009) faz uso da programação dinâmica para resolver o problema da programação da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. Visando melhorar a eficiência do algoritmo, antes de realizar o despacho econômico, são verificadas a factibilidade das soluções e as que não atendem as restrições são eliminadas do processo iterativo.

A relaxação Lagrangeana é uma das técnicas mais utilizadas na literatura especializada. Esta técnica separa as restrições do problema em: (a) restrições locais, envolvendo cada unidade geradora e seus limites de operação, tempos mínimos de parada e partida, retomada de carga; (b) restrições do sistema, envolvendo todas as unidades geradoras, assim como as restrições de balanço de potência e reserva girante, em que ambas as restrições são relaxadas. Assim, o problema torna-se separável em relação às unidades geradoras ou grupos geradores, sendo estes subproblemas resolvidos por programação dinâmica, sem qualquer problema de dimensionalidade. O processo de resolução também faz uso de otimização dual para, gradativamente, ir inserindo restrições aos subproblemas referentes às unidades geradoras, com base no grau de satisfação das restrições relaxadas, até ser encontrada uma solução final que satisfaça todas as restrições. Entretanto, devido à não convexidade do problema, não há garantia de que a otimalidade da solução dual encontrada conduza a uma solução primal viável, dificuldade que tende a aumentar com o número de unidades geradoras e com a existência de unidades termoeletrônicas idênticas.

(ONGSAKUL e PETCHARAKS, 2004) propuseram a utilização da técnica de relaxação Lagrangeana com ajuste adaptável dos multiplicadores de Lagrange. Além disso, uma nova forma de inicialização dos multiplicadores e as características técnicas e econômicas das unidades geradoras foram abordadas.

O trabalho desenvolvido por (BENHAMIDA e ABDELBAR, 2010) institui uma nova função para determinar o caminho ótimo para a solução dual. O valor de inicialização dos multiplicadores de Lagrange é baseado nas características operacionais de cada unidade geradora.

Na Programação Inteira (PI)/Inteira Mista(PIM) ocorre a linearização das funções e restrições do problema (ZENDEHDEL et al., 2008). A PIM soluciona o problema pela redução do espaço de busca, descartando as soluções infactíveis. Geralmente, estas técnicas adotam a programação linear para a resolução do problema, que pode ser decomposto em subproblemas pelo princípio de decomposição *Dantzig – Wolfe*. Para sistemas de grande porte, a metodologia requer elevado tempo computacional e memória. (CHANG et al., 2004) utilizam o pacote CPLEX para resolução do problema, além da potência gerada por cada usina, é obtido, também, o preço marginal associado a demanda horária.

A estratégia de *Branch and Bound* é uma das principais técnicas para a resolução de problemas de programação inteira mista. Esta técnica consiste em resolver, inicialmente, um problema relaxado, onde se permitem quaisquer valores para as variáveis inteiras, e valores no intervalo  $[0,1]$  para as variáveis binárias. Com isto, obtém-se um limite inferior (LINF) para o problema. Verificam-se quais variáveis violaram a condição de integralidade na solução encontrada e, em seguida, inicia-se a criação de uma árvore de subproblemas, em que, em cada um, fixam-se valores inteiros adequados para um subconjunto destas variáveis. Cada novo subproblema criado é denominado nó da árvore. A eficiência deste algoritmo depende, essencialmente, da forma como o particionamento dos nós é realizado, da velocidade na resolução dos subproblemas relaxados em cada nó e das heurísticas realizadas para obter pontos viáveis.

Como vantagens do algoritmo *Branch and Bound* pode-se mencionar: (i) obtenção do ponto ótimo global; (ii) medida da otimalidade do melhor ponto encontrado; (iii) facilidade em se adicionar restrições e variáveis. Como desvantagens têm-se: (i) as expressões para as restrições e funções de custo devem ser lineares; (ii) o método demanda elevado tempo computacional e memória para aplicações de grande porte. Entretanto, avanços tecnológicos relevantes, nas últimas décadas, reduziram de forma significativa o tempo de resolução, mas não o bastante para tornar a metodologia computacionalmente atraente.

O trabalho de (LAUER et al, 1982) apresentou uma proposta de solução baseada no método de *Branch and Bound* que incorporava as restrições dependentes do tempo e não necessitava da utilização de uma ordem de mérito para colocação das unidades geradoras em serviço.

Em (HUANG et al, 1998) foi proposta uma restrição lógica de programação que, junto com a técnica de *Branch and Bound*, resultou em uma proposta eficiente de resolução.

Algoritmos baseados em metaheurísticas têm sido aplicados com sucesso ao problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos, tais como: Algoritmo Genético (KEZHEN et al., 2009), *Simulated Annealing* (SIMOPOULOS et al., 2006) e *Particle Swarm Optimization* (LOGENTHIRAN e SRINIVASAN, 2010b). A metaheurística Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*) foi utilizada pela primeira vez em (SISWORAHARDJO e KEIB, 2002) para a resolução do problema em questão. Em 2003, (SUM e ONGSAKUL, 2003) empregam o algoritmo de busca colônia de formigas (ACSA – *Ant Colony Search Algorithm*), para determinar despacho horário de um sistema composto por dez unidades geradoras, sendo o despacho econômico realizado pelo método iteração lambda.

Em (CHUSANAPIPUTT et al., 2006) os autores utilizam um sistema autoadaptativo (SSAS – *Selective Self-Adaptive Ant System*), que adapta, automaticamente, o tamanho da população de formigas e os parâmetros de transição de probabilidades necessários ao ACO. São também incluídos no algoritmo SSAS dois módulos (ERHM – *Effective Repairing Heuristic Module* e CPMM – *Candidate Path Management Module*), que têm, respectivamente, as funções de diminuir o tamanho do espaço de busca e manter a solução factível.

Mais recentemente, algoritmos híbridos têm sido aplicados com sucesso. Esta técnica combina duas ou mais metodologias, geralmente uma técnica determinística aliada a metaheurística, aproveitando o melhor de cada método para melhorar a qualidade da solução final. Em (XIAO et al., 2006), os autores utilizam o algoritmo híbrido baseado em ACO e PSO. No primeiro passo, o status *ON/OFF* das unidades geradoras é obtido usando a metodologia colônia de formigas, já no segundo passo, é empregado o algoritmo de enxame de partículas para solucionar o despacho econômico.

Os autores em (CHUSANAPIPUTT et al., 2008) apresentam um modelo híbrido composto das metodologias ACO e Lista de Prioridades. Já em (VAISAKH e SRINIVAS, 2009), é proposto um sistema baseado em ACO e Algoritmos Genéticos (EACO – *Genetic Evolving Ant Colony Optimization*). O ACO utilizado para determinar o status das unidades geradoras durante um período de vinte e quatro horas, enquanto o método algoritmo genético é empregado para encontrar o valor ótimo dos parâmetros utilizados no ACO, tais como: taxa de evaporação e número de formigas.

Em (EL-SHARKH et al., 2010), a metodologia ACSA é associada a um modelo *Fuzzy* para incorporar as incertezas presentes no problema, tais como: custo de combustível e a previsão de demanda.

Em (YU et al., 2010) é proposto um algoritmo híbrido ( HACO – *Híbrid Ant Colony Optimization*), sendo a metaheurística ACO responsável pela alocação das unidades geradoras e o método iteração-lambda, pelo despacho econômico.

## 1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além do presente capítulo, esta dissertação contém mais cinco capítulos e um apêndice.

O capítulo II apresenta os principais conceitos referentes à técnica de otimização bio-inspirada em colônia de formigas.

O capítulo III é referente ao problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração, onde serão abordados os principais conceitos, dificuldades, formulação e modelagem do problema aqui em estudo.

No capítulo IV, são descritas as principais etapas e conceitos da metodologia proposta para a resolução da programação da operação de sistemas termoeletrônicos de geração.

No capítulo V, são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta.

O capítulo VI, por sua vez, apresenta as principais conclusões referentes à metodologia proposta, bem como sugestões de trabalhos futuros, tendo em vista os desenvolvimentos realizados nesta dissertação.

# CAPÍTULO 2

## OTIMIZAÇÃO BASEADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Formigas reais são capazes de encontrar o caminho mais curto de uma fonte de comida para sua colônia, sem utilizar recursos visuais, apenas explorando as informações do feromônio que são deixadas por outras formigas, é a chamada inteligência coletiva. Este comportamento é a grande inspiração do processo de otimização baseado em colônia de formigas e será o foco deste capítulo.

### 2.2 INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

As formigas, assim como outros insetos sociais, são distribuídas em comunidades que possuem indivíduos simples, porém apresentam uma organização social altamente estruturada. Como resultado desta organização, colônias de formigas podem realizar tarefas complexas que, em alguns casos, excedem a capacidade individual de cada indivíduo (DORIGO e STÜTZLE, 2004). Enquanto caminham em busca de alimentos, as formigas depositam uma substância química denominada feromônio, formando uma trilha sensorial. Tal trilha, ao ser encontrada por outro indivíduo, promove reações comportamentais e é utilizada como meio de comunicação entre a população de indivíduos. Esta comunicação indireta é denominada estigmergia, em que um indivíduo da população, alterando um meio próximo a sua localização, altera, também, todo o ambiente onde ele esteja, provocando, posteriormente, reações de outros indivíduos baseadas nesta modificação individual. A auto-organização presente nas colônias de insetos sociais é a ideia principal que é utilizada para coordenar uma população de formigas artificiais, utilizadas na implementação de algoritmos baseados em colônia de formigas.

Utilizando formigas da espécie Argentina (*I. humilis*) no experimento *Double Bridge Experiments* (DENEUBOURG et al., 1990), investigou-se o comportamento das formigas na busca pelo alimento. No primeiro experimento, Figura 1, o caminho até a fonte de comida possui duas pontes com o mesmo comprimento. Inicialmente, as formigas se movem aleatoriamente

entre o ninho e a fonte de comida, já que não há presença do feromônio nos caminhos. Portanto, os caminhos possuem a mesma probabilidade de serem escolhidos. Entretanto, de acordo com a flutuação aleatória, um caminho será escolhido por um número maior de formigas, fazendo com que a quantidade de feromônio neste caminho seja maior e, conseqüentemente atraia mais formigas, até que, com o passar do tempo, a maioria das formigas escolham uma única ponte.

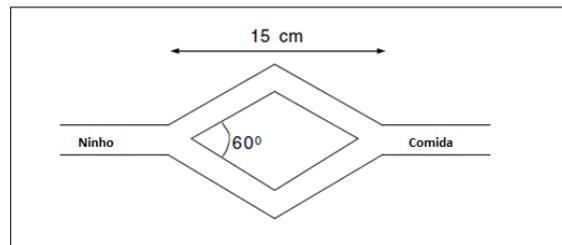


Figura 1 - Experimento Ponte de Tamanhos Iguais.

Já no segundo experimento, Figura 2, as pontes têm tamanhos diferentes, um caminho é duas vezes maior que o outro. Conforme esperado, as formigas utilizam o menor caminho entre o ninho e a fonte de comida. As que escolheram o caminho mais curto retornam primeiro da fonte de comida para o ninho. Logo, o caminho mais curto apresentará um maior nível de feromônio, estimulando mais formigas a seguirem pela mesma trilha. Uma pequena parte das formigas ainda utiliza o caminho mais longo na busca de alimento. Este fato pode ser interpretado como “exploração do caminho” para a procura de novas fontes de alimento.

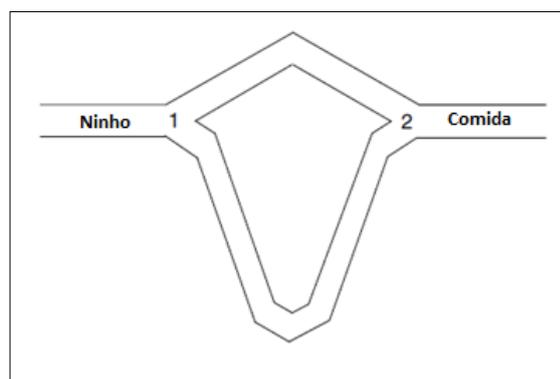


Figura 2 - Experimento Ponte de Tamanhos Diferentes.

Este comportamento coletivo presente nas formigas é chamado de comportamento autocatalítico, onde quanto mais formigas seguem uma trilha, mais atrativa é a mesma. Este

processo é, então, caracterizado por um *feedback* positivo ( processo de realimentação positivo), ou seja, a probabilidade de um caminho ser escolhido aumenta com o número de formigas que, previamente, escolherem este mesmo caminho (DORIGO et al.,1996). Outro fator importante no processo é a evaporação do feromônio que, mesmo lento, faz com que a colônia “esqueça” caminhos ruins e explore outros caminhos.

O experimento das pontes duplas mostra, claramente, que as colônias têm incorporadas a capacidade de otimização, uma vez que através do uso de regras probabilísticas, baseada em informações locais, elas podem encontrar o menor caminho entre dois pontos do ambiente. Pela inspiração do experimento, é possível desenvolver formigas artificiais, tendo como modelo as formigas reais que conseguem encontrar o menor caminho entre a fonte de comida e o ninho.

## 2.3 OTIMIZAÇÃO BASEADA EM COLÔNIA DE FORMIGAS

Diversas versões de algoritmos de otimização baseados em colônia de formigas foram desenvolvidos. Nesta seção será apresentado o algoritmo *Ant System*, o qual é utilizado pela metodologia proposta, bem como suas variações.

### 2.3.1 ANT SYSTEM

O primeiro algoritmo baseado no comportamento da colônia de formiga foi proposto no início da década de 90 (DORIGO et al.,1991). A metodologia chamada *Ant System* (AS) (DORIGO et al., 1996) foi aplicada para resolver o problema do caixeiro viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*). Três versões do algoritmo AS foram propostos: *ant-cycle*, *ant-quantity* e *ant-density*, diferenciando-se apenas na forma de atualização do feromônio.

O problema TSP consiste em: dado um conjunto de cidades e a distância entre cada uma delas, determinar a menor rota para o caixeiro viajante que contemple todas as cidades, passando por cada cidade uma única vez e voltando ao ponto de partida. O TSP pode ser representado por um grafo  $G(N, C)$ , onde  $N$  é conjunto das cidades e  $C$  representa as conexões entre as cidades. A distância entre a cidade  $i$  e a cidade  $j$  assume o valor  $d(i, j)$ . Desta forma, o algoritmo é inicializado com uma população de indivíduos. Cada formiga  $k$  escolhe, aleatoriamente, uma cidade que será o ponto de partida. Cada agente pertencente à colônia constrói uma solução. A escolha da próxima cidade a ser visitada é baseada na concentração do feromônio  $\tau(i, j)$  e na informação heurística  $\eta(i, j)$ . Isso é feito por meio de uma regra de transição, equação (2.1), que

fornece a probabilidade de cada formiga escolher o caminho  $(i, j)$  ainda não visitado.

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)]^\varphi \cdot [\eta(i, j)]^\beta}{\sum_{v \in J_k(i)} (\tau[i, v]^\varphi \cdot \eta[i, v]^\beta)} & \text{se } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

$P_k$  Probabilidade de que a formiga  $k$  escolha o caminho  $(i, j)$ .

$\tau(i, j)$  Representa a quantidade de feromônio no caminho  $(i, j)$ .

$\eta(i, j)$  É uma informação prévia (heurística) do problema, um índice de atratividade de escolha pelo caminho  $(i, j)$ . Esta informação pode existir ou não, depende do problema em estudo. Para este caso,  $\eta(i, j) = 1 / d_{ij}$ .

$J_k$  Conjuntos das cidades ainda não visitadas pela formiga  $k$ .

$\varphi$  e  $\beta$  Parâmetros de controle que determinam o peso relativo da influência da concentração de feromônio ou da informação heurística do problema.

Como o problema é de minimização, quanto menor a distância  $d(i, j)$ , maior deverá ser a quantidade de feromônio associada a este caminho. Ou seja, de maneira geral, os melhores caminhos terão maior valor de feromônio associado. Os parâmetros  $\varphi$  e  $\beta$  constituem uma informação importante no processo de busca. Se  $\varphi = 0$  as cidades mais próximas têm maior chance de serem selecionadas, já que a probabilidade de escolha é em função da informação heurística  $\eta(i, j)$ . Caso  $\beta = 0$  somente as informações baseado no feromônio são inseridas na escolha, podendo levar o algoritmo a uma estagnação em uma solução subótima. Em (DORIGO e STÜTZLE, 2004) é encontrado os valores apropriados dos parâmetros para cada versão do AS.

Posteriormente, após todas as formigas completarem o ciclo, as trilhas de feromônio são atualizadas pelo acréscimo e evaporação do fenômeno, equação (2.2). A evaporação é representada pelo coeficiente  $\rho$ , que pode variar entre zero e o valor unitário.

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \Delta\tau(i, j) \quad (2.2)$$

Sendo  $\Delta\tau(i, j)$ , o depósito de feromônio de todas as formigas para o caminho  $(i, j)$ , conforme equações (2.3) e (2.4):

$$\Delta\tau(i, j) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(i, j) \quad (2.3)$$

$$\Delta\tau_k(i, j) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{se } (i, j) \in \text{a rota da formiga } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.4)$$

onde:

$m$  Número de formigas.

$Q$  Constante de peso para o depósito de feromônio.

$L_k$  Comprimento da rota da  $k$ -ésima formiga.

A equação (2.4) representa a quantidade de feromônio depositado pela formiga  $k$  nos caminhos que ela percorreu. Desta forma, quanto mais formigas utilizarem um arco pertencente a um menor caminho, maior será a quantidade de feromônio depositado neste arco, fazendo com que este caminho tenha mais chance de ser escolhido por outras formigas.

Os algoritmos *ant-quantity* e *anty-density* diferem do *ant-cycle*, apresentado acima, apenas na atualização do depósito de feromônio, nas versões *ant-quantity* e *anty-density*, a atualização do feromônio é feito após a formiga se mover entre as cidades. Na versão *ant-cycle*, a trilha de feromônio é atualizada somente após todas as formigas completarem o ciclo, ou seja, após todas as cidades terem sido visitadas por elas. Na versão *ant-quantity*, o depósito de feromônio é dado pela equação (2.5).

$$\Delta\tau_k(i, j) = \begin{cases} \frac{W}{d(i, j)} & \text{se a } k\text{-ésima formiga caminha de } i \text{ para } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.5)$$

onde:

$W$  Valor constante.

Na versão *anty-density*, é depositado um valor constante  $D$  para a formiga  $k$ , quando ela caminha da cidade  $i$  para a cidade  $j$ , equação (2.6):

$$\Delta\tau_k(i, j) = \begin{cases} D & \text{se a formiga } k \text{ vai de } i \text{ para } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.6)$$

Comparando o *ant-cycle* com as versões *ant-quantity* e *anty-density*, este apresentou um resultado superior aos demais, pois o *ant-cycle* usa informação global na atualização do feromônio, enquanto os demais modelos utilizam informações locais que não indicam uma medida do resultado final (DORIGO et al., 1996).

### 2.3.2 ELITIST ANT SYSTEM

Na versão *Elitist Ant System* (EAS), proposta em (DORIGO, 1992), a principal modificação é o reforço do melhor caminho desde o início do processo iterativo. Para isso, a melhor solução, denominada  $T^{bs}$  (*best-so-far tour*), é acrescentada a equação (2.2) como um depósito adicional de feromônio, conforme equações (2.7) e (2.8).

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \Delta\tau(i, j) + e \cdot \Delta\tau^{bs}(i, j) \quad (2.7)$$

$$\Delta\tau^{bs}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{C^{bs}} & \text{se } (i, j) \in T^{bs} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.8)$$

onde:

$e$  Parâmetro que define o peso ao  $T^{bs}$ .

$C^{bs}$  Comprimento do menor caminho encontrado.

Em (DORIGO et al., 1996) é sugerido um valor apropriado para o parâmetro  $e$ .

### 2.3.3 RANK - BASED ANT SYSTEM

Outra versão do AS, denominada *Rank - Based Ant System* ( $AS_{rank}$ ), é proposta por Bullnheimer em (BULLNHEIMER et al., 1997). A variação do depósito de feromônio é baseada em uma lista  $L$ , com as melhores soluções ordenadas de forma crescente, ou seja, do menor para o maior caminho. A quantidade de feromônio a ser depositado é de acordo com a posição  $r$  da formiga na lista, com isso a quantidade de feromônio a ser depositado decresce conforme a lista. Conforme a versão EAS, a solução que apresenta o caminho mais curto ( $T^{bs}$ ) também recebe um depósito diferenciado de feromônio. Desta forma, as equações (2.2) e (2.3) tornam-se as equações (2.9) e (2.10):

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \sum_{r=1}^{w-1} (w - r) \cdot \Delta\tau^r(i, j) + w \cdot \Delta\tau^{bs}(i, j) \quad (2.9)$$

$$\Delta\tau^r(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{C^r} & \text{se a } r\text{-ésima formiga caminha de } i \text{ para } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.10)$$

onde:

$w$  Número de formigas consideradas na lista  $L$ .

$r$  Posição da formiga  $w$  na lista  $L$ .

$C^r$  Valor do caminho obtido pela  $r$ -ésima formiga.

$\Delta\tau^{bs}$  Depósito de feromônio para o melhor caminho de acordo com a equação (2.8).

### 2.3.4 MAX-MIN ANT SYSTEM

A versão *MAX-MIN Ant System* (MMAS), (STÜTZLE e HOOS, 1997), introduz quatro modificações no AS: (i) faz o reforço do melhor caminho encontrado, somente da formiga  $k$  que possui a melhor solução. Essa escolha pode ser feita pela melhor solução encontrada na iteração corrente  $ib$  (*iteration-best*) ou pela melhor solução global encontrada durante todo o processo iterativo  $bs$  (*best-so far*). A solução só será atualizada caso seja encontrada uma melhor solução nas iterações seguintes; (ii) a fim de evitar a estagnação do algoritmo, causado pelo aumento de feromônio nas trilhas de menor caminho, são definidos os limites mínimos e máximos para o depósito de feromônio  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$  nas trilhas; (iii) as trilhas de feromônio são inicializadas com um alto valor de feromônio,  $\tau_{max}$ , que juntamente com um pequeno coeficiente de evaporação, favorece a exploração de novos caminhos já no início do processo iterativo; (iv) as trilhas de feromônio são inicializadas assim que ocorrer a estagnação em uma solução. Diante destas modificações têm-se as equações (2.11) e (2.12).

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \Delta\tau^{best}(i, j) \quad (2.11)$$

$$\Delta\tau^{best}(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{C^{best}} & \text{se } (i, j) \in T^{bs} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde:

$C^{best}$  Melhor caminho encontrado pela formiga  $k$ , na iteração corrente ( $C^{ib}$ ), ou o melhor caminho global ( $C^{bs}$ ).

### 2.3.5 ANT COLONY SYSTEM

A versão proposta em (DORIGO e GAMBARDELLA, 1997), a *Ant Colony System* (ACS), é baseada na versão *Ant-Q* (GAMBARDELLA e DORIGO, 1995) e difere da versão AS em três pontos: (i) explora a experiência acumulada pelas formigas; (ii) a atualização do depósito e da evaporação é realizada somente para a solução que apresentar o menor caminho; (iii) a cada iteração uma quantia do feromônio do caminho  $(i, j)$  é removido para aumentar a exploração de caminhos alternativos, evitando a estagnação prematura. Sendo assim, a probabilidade da formiga  $k$  se mover da cidade  $i$  para a cidade  $j$  é dada pela equação (2.13):

$$P_k = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{v \in J_k(i)} \{ [\tau(i, v)] \cdot [\eta(i, v)]^\beta \} & \text{se } q \leq q_0 \\ J & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.13)$$

onde:

$q$  É um número aleatório dentro do intervalo  $[0,1]$ .

$q_0$  Parâmetro com valor:  $0 \leq q_0 \leq 1$ .

$J_k$  Conjuntos das cidades ainda não visitadas pela formiga  $k$ .

$J$  Regra de probabilidade conforme equação (2.1) com  $\varphi = 1$ .

A atualização global ocorre após o fim de cada iteração, somente para a solução que apresentar o menor caminho, e é atualizada pela seguinte equação (2.14).

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \cdot \tau(i, j) + \rho \Delta \tau^{best}(i, j) \quad (2.14)$$

onde:

$\rho$  Parâmetro de decaimento do feromônio, variando entre zero e um.

$\Delta \tau^{best}$  Depósito de feromônio para o melhor caminho de acordo com a equação (2.12).

Já a atualização local, é realizada logo após as formigas atravessarem o arco  $(i, j)$  durante a construção do caminho, é de acordo com a equação (2.15):

$$\tau(i, j) = (1 - \xi) \cdot \tau(i, j) + \xi \tau_0 \quad (2.15)$$

onde:

$\xi$  Parâmetro de decaimento do feromônio, variando entre zero e um.

$\tau_0$  Parâmetro com o valor inicial da trilha de feromônio.

(DORIGO e GAMBARDILLA, 1997) mencionam que um bom valor para o parâmetro de decaimento é  $\xi = 0,1$  e  $\tau_0 = 1/nC^m$  como valor inicial do feromônio –  $n$  é o número de cidades consideradas no TSP e  $C^m$  é o comprimento da menor rota pela heurística do vizinho mais próximo.

## 2.4 CONCLUSÕES GERAIS

Foram apresentadas, no presente capítulo, as informações básicas do processo de otimização bio-inspirado em colônia de formigas, tais como: inspiração biológica, modelagem, formulação, algoritmo e as variações entre as principais modelagens existentes. Desta forma, pode-se verificar que o processo de busca, tem como ponto forte o fato de que as informações de todos os indivíduos da colônia são utilizadas na obtenção da solução ótima, a chamada inteligência coletiva. Além disso, a metodologia baseada em colônia de formigas caracteriza-se por ser simples e flexível, podendo ser aplicada ao mais diversos problemas de otimização.

## CAPÍTULO 3

### PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS TERMOELÉTRICOS DE GERAÇÃO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O SEB é predominantemente hidrelétrico, sendo este perfil adotado naturalmente, já que o país é detentor da maior bacia hidrográfica do mundo. No entanto, a impressão de que a matriz energética era inesgotável foi se dissipando gradativamente nos últimos anos, principalmente após o último racionamento (2001-2002). Essa crise deu início a uma ampla discussão sobre o modelo elétrico brasileiro, sua operação e gestão, bem como sobre a necessidade de diversificação da matriz energética. Dentro deste cenário, a inserção da geração térmica no SEB tornou-se importante para a minimização dos riscos de racionamento e aumento da confiabilidade do sistema. Desta forma, a programação da operação de unidades termoeletricas torna-se cada vez mais relevante, não apenas para promover economia e segurança do sistema, mas também pelas seguintes razões: *(i)* as decisões de partida, parada e as dinâmicas quanto à reativação das modernas instalações geradoras são mais complexas e dispendiosas do que eram antigamente; *(ii)* o modelo competitivo do setor elétrico, no qual até mesmo ganhos de pequena porcentagem tornaram-se economicamente relevantes; *(iii)* variação acentuada entre as demandas em horários de pico e fora do pico. Ou seja, a termoeletricidade começa a ganhar espaço, apresentando-se como uma opção atrativa a curto e médio prazo, e a programação da operação de sistemas termoeletricos de geração maior importância em estudos e pesquisas.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O atual mercado de energia tem motivado o uso de pequenas centrais, geração distribuída e fontes de energia renováveis. Com isto, o número de unidades geradoras torna-se cada vez maior. Desta forma, a programação da operação tem se tornado fundamental para um bom desempenho do SEP.

A programação da operação de sistemas termoeletricos tem como objetivo a minimização do custo operacional. Para tanto, deve-se determinar quais unidades termoeletricas de geração estarão em operação, atendendo aos requisitos de mercado e satisfazendo as restrições inerentes ao problema.

O horizonte de estudo na programação diária é curto, variando de um dia a duas semanas com discretização horária. Entretanto, deve ser o mais bem detalhado possível, uma vez que o grau de incerteza é menor, vide Figura 3.

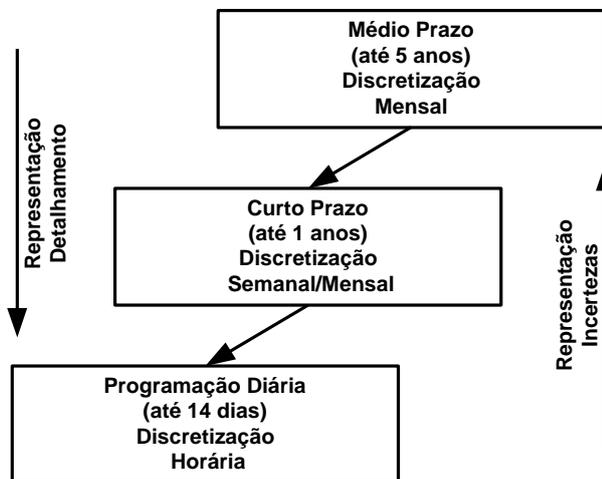


Figura 3 - Detalhamento x Incertezas.

A programação diária da operação pode ser dividida em dois problemas distintos:

- (i) Alocação de unidades geradoras<sup>1</sup>: considerando a presença de  $N$  unidades aptas a gerarem energia, deve-se determinar a combinação ótima horária, definindo o estado de cada unidade (ligada/desligada) que atenda as restrições do SEP.
- (ii) Despacho econômico<sup>2</sup>: diante do plano de programação obtido em (i), determinar a potência de saída de cada unidade geradora que minimize os custos associados à geração.

<sup>1</sup> Expresso em inglês por *Unit Commitment*

<sup>2</sup> Expresso em inglês por *Economic Dispatch*

A diferença entre ambos os problemas é a questão relacionada à variação da demanda ao longo do tempo. O despacho econômico define, exclusivamente, a quantidade de energia a ser produzida por cada unidade, não incidindo na determinação do estado das unidades geradoras. A variação da curva de carga, ao longo do dia, implica no acionamento e/ou desligamento de determinadas unidades geradoras, envolvendo novos custos e restrições, tornando o problema ainda mais complexo (SILVA JUNIOR, 2008a).

### 3.3 MODELAGEM DO PROBLEMA

Diversas considerações na modelagem do problema podem ser encontradas na literatura, como se vê na Figura 4, (DINIZ, 2007).



Figura 4 - Abordagens na Modelagem do Problema.

- Alocação de unidade térmica: Inclui a decisão de determinar o estado (ligado/desligado) das unidades geradoras ou considerar uma programação pré-determinada.
- Acoplamento estático ou dinâmico: o problema é dito estático quando a programação é pontual (horária), ou seja, não são considerados os acoplamentos temporais entre as decisões a serem tomadas durante todo o período de análise. Por outro lado, o planejamento dinâmico considera todo o acoplamento temporal existente.
- Sistema de transmissão: A consideração da rede de transmissão, limites de fluxo e perdas, é incipiente na literatura, sendo o SEP, geralmente, modelado como barra única.

Diante do quadro descrito anteriormente, a Figura 5 apresenta as possíveis abordagens que podem ser adotadas para a modelagem referente ao problema. O caminho tracejado indica a

abordagem a ser considerada neste trabalho, sendo esta uma das mais encontradas na literatura especializada.

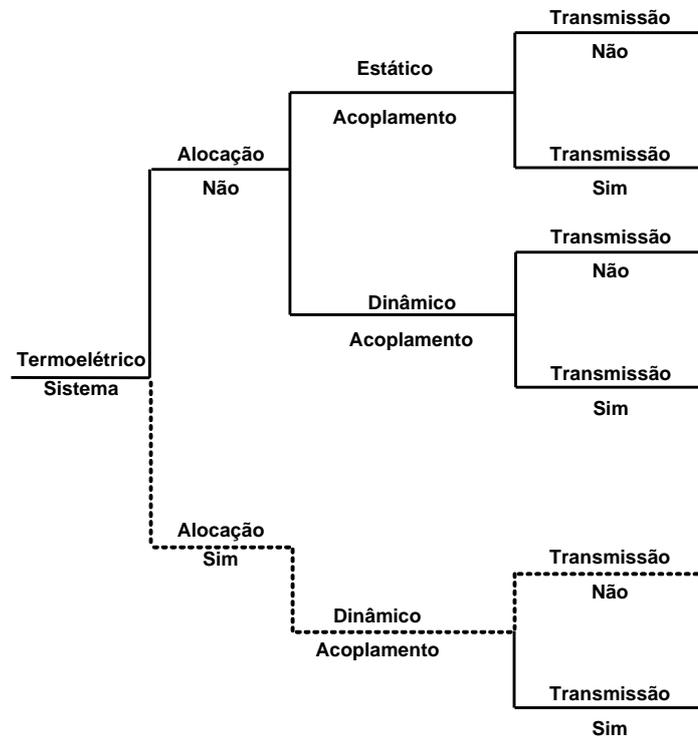


Figura 5 - Variantes do Problema.

### 3.4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nesta seção será descrita a formulação matemática considerada, neste trabalho, ao problema da programação diária da operação de sistemas termoeletricos de geração.

#### 3.4.1 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo (FOB) é definida como a minimização da soma dos custos de operação ( $C_1$ ), custos de partida ( $C_2$ ) e custo de parada ( $C_3$ ) para cada unidade geradora durante o período de operação. O problema pode ser matematicamente formulado de acordo com a equação (3.1):

$$\text{MinFOB} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.1)$$

sendo:

$$C_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [a_i + b_i \cdot P_i(t) + c_i \cdot P_i^2(t)] \cdot DO_i(t) \quad (3.2)$$

$$C_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N CP_i(t) \cdot DO_i(t) \cdot [1 - DO_i(t-1)] \quad (3.3)$$

$$C_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N CD_i(t) \cdot DO_i(t-1) \cdot [1 - DO_i(t)] \quad (3.4)$$

onde:

$T$  Período total de operação.

$N$  Número total de unidades térmicas.

$i$  Índice da unidade térmica.

$t$  Índice da hora.

$DO_i(t)$  Variável discreta [0,1] de decisão ligada/desligada da unidade térmica  $i$  na hora  $t$ . Determinada através da busca via colônia de Formigas.

$P_i(t)$  Potência ativa gerada pela unidade térmica  $i$  na hora  $t$ .

$CP_i(t)$  Custo de partida da unidade térmica  $i$  na hora  $t$ .

$CD_i(t)$  Custo de desligamento da unidade térmica  $i$  na hora  $t$ .

$a_i$  Coeficiente referente ao custo constante de combustível da unidade térmica  $i$  (\$/h).

$b_i$  Coeficiente referente ao custo linear de combustível da unidade térmica  $i$  (\$/MWh).

$c_i$  Coeficiente referente ao custo quadrático de combustível da unidade térmica  $i$  (\$/MW<sup>2</sup>h).

O custo de partida é dado em função do número de horas em que a unidade geradora  $i$  ficou desligada anteriormente, podendo ter um custo de partida a frio ou um custo de partida a quente. Logo o custo de partida é apresentado pela equação (3.5):

$$CP_i(t) = \begin{cases} CPq_i \rightarrow \text{se } TD_i \leq X_i^{off} \leq TD_i + tpf_i \text{ ou} \\ CPf_i \rightarrow \text{se } X_i^{off}(t) > TD_i + tpf_i \end{cases} \quad (3.5)$$

onde:

$CPq_i$  Custo (\$) de partida a quente da unidade térmica  $i$ .

$CPf_i$  Custo (\$) de partida a frio da unidade térmica  $i$ .

$TD_i$  Tempo mínimo de desligamento da unidade térmica  $i$ .

$tpf_i$  Tempo de partida a frio da unidade térmica  $i$ .

$X_i^{off}$  Número de horas consecutivas em que a unidade térmica  $i$  está desligada.

O custo de parada  $C_3$  é considerado, normalmente, como um valor constante. De acordo com os trabalhos presentes da literatura, o mesmo será considerado nulo neste trabalho

### 3.4.2 RESTRIÇÃO BALANÇO DE POTÊNCIA ATIVA DO SISTEMA

A restrição de balanço de potência ativa, equação (3.6), analisa o estado de equilíbrio do SEP, através da primeira lei de Kirchhoff. Logo, a soma da potência gerada por cada unidade térmica cada hora deve atender a demanda horária correspondente.

$$\sum_{i=1}^N DO_i(t).P_i(t) = D(t) \quad (3.6)$$

onde:

$D(t)$  Valor da demanda na hora  $t$ .

### 3.4.3 RESTRIÇÃO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

A potência gerada por cada unidade térmica do sistema está limitada a valores mínimos e máximos, vide equação (3.7).

$$P_{min_i} \leq P_i(t) \leq P_{max_i} \quad (3.7)$$

onde:

$P_{min_i}$  Limite mínimo de geração de potência ativa (MW) pela unidade térmica  $i$ .

$P_{max_i}$  Limite máximo de geração de potência ativa (MW) pela unidade térmica  $i$ .

### 3.4.4 RESTRIÇÃO DE RESERVA GIRANTE

É necessário prever uma folga, designada de reserva girante, entre a carga prevista e a potência total disponível entre as unidades geradoras em serviço, seja para suprir aumentos inesperados de carga ou desvios de previsão, seja para manter o serviço, em caso da perda da unidade geradora de maior capacidade. Vê-se a equação (3.8):

$$\sum_{i=1}^N DO_i(t).P_{max_i} \geq D(t) + RG(t) \quad (3.8)$$

onde:

$RG(t)$  Valor da reserva girante prevista na hora  $t$ .

### 3.4.5 RESTRIÇÃO DOS TEMPOS MÍNIMOS DE PARTIDA E PARADA

Estas restrições, equação (3.9), definem os tempos mínimos em que uma unidade deve estar ligada ou desligada consecutivamente. Ou seja, uma unidade deverá ficar ligada/desligada por um respectivo período de tempo antes de ter seu estado alterado para desligada/ligada. Os valores destes tempos são baseados em características técnicas inerentes a cada unidade geradora.

$$\begin{cases} X_i^{off} \geq TD_i \\ X_i^{on} \geq TP_i \end{cases} \quad (3.9)$$

onde:

$X_i^{off}$  Número de horas consecutivas em que a unidade térmica  $i$  está desligada.

$X_i^{on}$  Número de horas consecutivas em que a unidade térmica  $i$  está ligada.

$TD_i$  Tempo mínimo de desligamento da unidade térmica  $i$ .

$TP_i$  Tempo mínimo de partida da unidade térmica  $i$ .

### 3.5 DIFICULDADES DO PROBLEMA

Classificado matematicamente como um problema de programação não linear inteira mista, o problema apresenta as seguintes dificuldades:

- (i) Sua natureza combinatória pode levar a explosão combinatória devido ao elevado número de combinações possíveis, para um sistema com  $N$  máquinas e um horizonte de planejamento de  $P$  horas, o número de combinações possíveis é dada pela expressão  $(2^N - 1)^P$ . Se no sistema existirem seis máquinas com horizonte de planejamento de 24 horas, o número de combinações seria da ordem de  $1,53e^{43}$ .
- (ii) Região de solução não convexa, apresentado vários mínimos locais, o que faz com que os algoritmos de resolução possam ficar estagnados em uma solução subótima ou com tempos computacionais proibitivos.
- (iii) Natureza dinâmica do processo de decisão, que se por um lado limita as opções de decisão, por outro, ocasiona antagonismo em relação ao despacho econômico.

### 3.6 CONCLUSÕES GERAIS

Neste capítulo foram abordados os principais conceitos relacionados ao problema referente à programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. Para tanto, foram apresentadas as abordagens utilizadas para a resolução do problema, a formulação matemática e os principais pontos que tornam o problema complexo e de difícil solução. Além

disso, pode-se verificar a dificuldade de se conciliar soluções de qualidade com baixo esforço computacional.

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGIA PROPOSTA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será feita a apresentação da metodologia proposta, a qual tem como objetivo a resolução do problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração através do uso da Otimização bio-inspirada em Colônia de Formigas (OCF). Para tanto, duas etapas extras serão utilizadas com o objetivo de auxiliar a colônia no processo de busca: (i) o relaxamento da variável discreta referente à decisão de operação, possibilitando que a mesma assuma valores contínuos. Sendo, assim, possível obter o Limite Inferior de Custo (LIC) para o sistema termoeletrico em análise; (ii) a utilização de uma ordem de mérito baseada nos multiplicadores de Lagrange, associados às variáveis de decisão, visando melhorar o critério de busca da colônia. As informações oriundas destas duas etapas serão incorporadas ao critério de busca bio-inspirado, conforme será descrito a seguir.

### 4.2 ALGORITMO PROPOSTO

A seguir serão descritas as principais etapas do algoritmo proposto, cujo fluxograma é apresentado pela Figura 6.

#### **Etapa 1 - Entradas de Dados:**

Nesta etapa, são definidos os parâmetros de entrada necessários para a execução do algoritmo proposto, tais como: (i) o número de indivíduos da colônia; (ii) taxas de evaporação; (iii) número máximo de iterações; (iv) números de unidades geradoras; (v) demanda horária de carga; (vi) tempos mínimos de partida e parada; (vii) ordem de mérito. Além destas, outra informação de entrada é a condição inicial da primeira hora de operação de cada uma das unidades geradoras existentes.

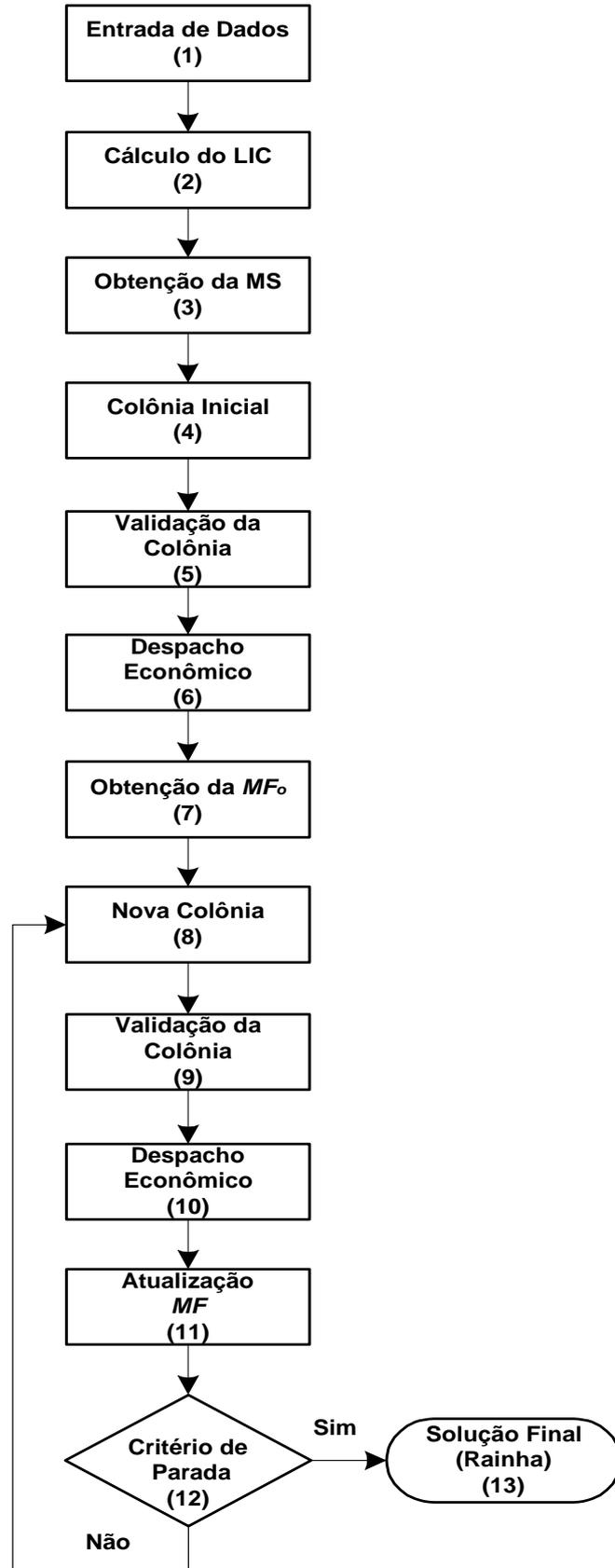


Figura 6 - Fluxograma do Algoritmo Proposto

## **Etapa 2 - Cálculo do Limite Inferior do Custo (LIC):**

Nesta segunda etapa, o problema é completamente relaxado. Para tanto, considera-se as variáveis discretas de decisão da operação  $DO(t)$  contínuas. Ou seja, as variáveis de decisão podem assumir qualquer valor contínuo dentro do intervalo discreto de operação  $[0,1]$ . Além disso, as restrições relativas aos tempos de partida e parada são negligenciadas, e os limites inferiores de geração são considerados iguais à zero. O objetivo desta etapa é obter, através do cálculo do custo de operação (LIC), uma sensibilidade do processo de busca da colônia, a fim de avaliar a distância entre soluções obtidas pela colônia (solução discreta) em relação ao LIC (solução contínua). Destaca-se que a solução discreta procurada apresentará custo igual ou superior ao LIC (GOLDBARG e LUNA, 2000).

## **Etapa 3 - Obtenção da Matriz de Sensibilidade (MS):**

A matriz de sensibilidade ( $MS$ ), referente às decisões de operação das unidades geradoras e proposta em (SILVA JUNIOR, 2008a), é formada pelos multiplicadores de Lagrange, associados às variáveis discretas de decisão da operação. Esta matriz tem como objetivo identificar, hora a hora (ordem de mérito horária), as unidades geradoras de maior relevância a serem colocadas em operação ou não. A matriz  $MS$ , no presente trabalho, é um dado de entrada para o algoritmo proposto e sua obtenção será descrita a seguir de acordo com (SILVA JUNIOR, 2008a).

O autor descreve que, a fim de evitar as dificuldades inerentes a problemas discretos, a variável decisão de operação ( $DO$ ) deve ser relaxada, assumindo valores contínuos dentro do intervalo  $[0,1]$ , passando o problema de programação inteira a ser formulado como programação contínua.

A função utilizada para representar a  $DO$  foi a função sigmoide, sendo a mesma justificada por possuir comportamento semelhante à função degrau unitário (representação ideal) e ser diferenciável em todo o seu domínio. A Figura 7 apresenta a comparação entre a função sigmoide e a degrau unitário, no que diz respeito aos dois estados possíveis de decisão (ligado/desligado).

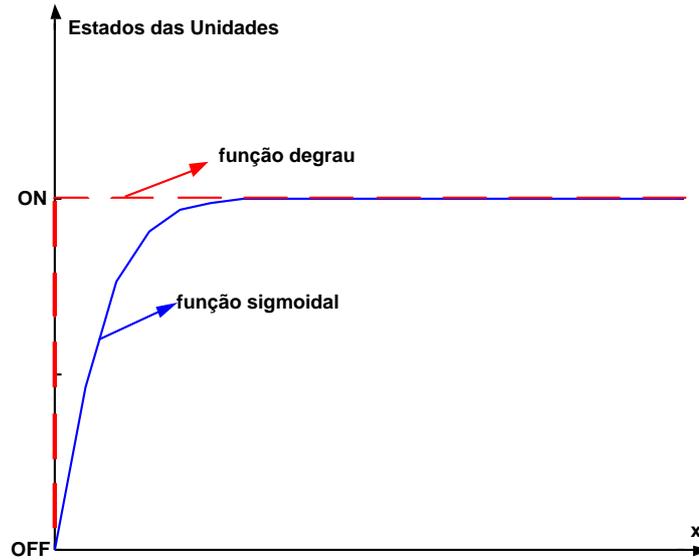


Figura 7- Função de Decisão da Operação.

A função sigmoide adotada em (SILVA JUNIOR, 2008a) é formulada pela equação (4.1) e (4.2).

$$DO_i(x_i^t) = \frac{e^{\alpha x_i^t} - 1}{e^{\alpha x_i^t} + 1} \quad (4.1)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i^t \leq x_i^{\max} \quad \dots \quad \pi_{ici}(t), \pi_{icj}(t) \quad (4.2)$$

onde:

$\alpha$  Parâmetro de inclinação da função sigmoideal.

$x_i^t$  Argumento referente a unidade geradora  $i$  na hora  $t$  na função sigmoideal.

$x_i^{\min}, x_i^{\max}$  Limites de canalização da função sigmoideal.

$\pi_{ici}(t), \pi_{icj}(t)$  Multiplicador de Lagrange associado ao argumento da função sigmoideal da unidade  $i$  na hora  $t$ ;

Devido à função de operação da decisão, assumir valores contínuos, a condição inicial torna-se um fator complicador, pois interfere diretamente na solução. Como forma de evitar esta situação indesejável, ao invés de se utilizar, diretamente o valor da  $DO$  como critério de decisão

para a elaboração da ordem de mérito, foi utilizado os multiplicadores de Lagrange associados à função decisão de operação, considerando os seguintes fatores:

- Intervalo rígido de canalização para argumento da  $DO$ ,  $0 \leq x_i^t \leq 0.0001$ , para todas as unidades geradoras existentes no sistema. Possibilitando a avaliação da sensibilidade da função objetivo ao acionamento de cada unidade geradora, em face da demanda solicitada, com  $DO(x_i^t) \rightarrow 1$ .
- Inclusão da unidade geradora fictícia denominada  $Pg_C$ . A nova unidade tem como função possibilitar a convergência do problema de otimização em função do estreitamento das restrições de canalização. Esta unidade apresenta como característica um alto custo operacional, quando comparada com as unidades existentes e tem a capacidade de atender, sozinha, a demanda e a reserva girante do sistema.

Diante da inserção da unidade geradora fictícia, uma parcela adicional  $D$ , equação (4.3), é incluída na FOB, equação (3.1), visando a obtenção da convergência de problema, bem com a obtenção dos multiplicadores de Lagrange associados à variável discreta de decisão  $[0/1]$  das unidades geradoras.

$$D = \sum_{t=1}^T \mu \times Pg_C(t) \quad (4.3)$$

onde:

$\mu$                       Custo operacional da unidade geradora fictícia (R\$/MWh).

$Pg_C(t)$               Potência ativa (MW) gerada pela unidade geradora fictícia na hora  $t$ .

Através das considerações adotadas anteriormente, o processo de otimização tenderá a colocar em funcionamento, inicialmente, as unidades geradoras com menor custo. Porém, com a imposição da restrição de canalização  $0 \leq x_i^t \leq 0.0001$ , as restrições de demanda e reserva girante, equações (3.6) e (3.8), só serão atendidas através da unidade geradora fictícia. Sendo assim, compete a esta unidade suprir, sozinha, o atendimento a demanda e reserva girante solicitada pelo sistema, apesar o seu alto custo operacional. Logo, tem-se como solução do problema de otimização os valores para os multiplicadores de Lagrange associados aos argumentos da função decisão de operação de cada uma das unidades geradoras existentes.

A partir do conhecimento dos multiplicadores de Lagrange é obtida a Matriz de Sensibilidade  $MS$ , equação (4.4). A matriz  $MS$  é formada pelos multiplicadores de Lagrange associados às variáveis  $DO$  e representa a sensibilidade da função objetivo em relação à tendência de acionamento das unidades geradoras, em relação à demanda horária solicitada durante o horizonte de estudo.

$$MS = \begin{bmatrix} \pi_{x1}(t) & \pi_{x2}(t) & \dots & \pi_{xN}(t) \\ \pi_{x1}(t+1) & \pi_{x2}(t+1) & \dots & \pi_{xN}(t+1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \pi_{x1}(T) & \pi_{x2}(T) & \dots & \pi_{xN}(T) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Como os valores dos multiplicadores são negativos, já que retratam a redução da função objetivo em tendência de acionamento das unidades, a ordem de mérito é obtida através da ordenação crescente dos valores dos multiplicadores de Lagrange, para cada instante  $t$  do período de operação.

#### Etapa 4 - Colônia Inicial:

O processo de busca é inicializado com uma população de indivíduos (formigas) que representam informações referentes à solução discreta do problema. Esse conjunto de indivíduos, que representa um conjunto de soluções, é denominado de colônia.

Cada solução foi representada por uma matriz cuja dimensão é dada por: (i) linhas da matriz: representam o número de horas de operação; (ii) colunas da matriz: representam o número de unidades termoeletricas (UTES) existentes. Os elementos desta matriz estão associados às decisões horárias de operação (0-1). A Tabela 2, tem como exemplo um indivíduo representando uma solução de operação para quatro unidades geradoras e três horas de operação.

Tabela 2 - Representação de um indivíduo da colônia.

$T$	$UTE1$	$UTE2$	$UTE3$	$UTE4$
$t=1$	1	1	1	0
$t=2$	0	1	1	0
$t=3$	1	1	0	1

O processo de busca tem início de forma completamente aleatória, sendo as soluções iniciais escolhidas ao acaso. Entretanto, como forma de garantir a viabilidade das soluções geradas, o processo de construção das soluções é feito hora a hora, de modo que a soma horária das capacidades máximas de geração das unidades termoeletricas colocadas em operação seja maior do que a demanda horária a ser atendida e a reserva horária prevista, conforme equação (4.5).

$$\sum_{i=1}^N Pmax_i(DO_i(t) = 1) \geq D(t) + RG(t) \quad (4.5)$$

### **Etapa 5 - Validação da Colônia:**

Esta etapa é realizada com o objetivo de garantir a viabilidade das soluções geradas, no que diz respeito aos tempos mínimos de parada e partida. Estas violações, caso existam, são tratadas através de procedimentos heurísticos propostos em (SILVA JUNIOR et al., 2006). A seguir estes procedimentos serão apresentados.

Como a demanda varia durante o período de operação, o acionamento e o desligamento das unidades geradoras ficam condicionados a esta variação da demanda. Desta forma a análise dos tempos mínimos de partida e parada é realizada após a obtenção da solução de cada indivíduo, obtida na etapa 4. De acordo com (SILVA JUNIOR et al., 2006) e (SENJYU et al., 2003) é proposta a seguinte análise heurística:

- Identificação das unidades geradoras que tiveram violação nas restrições dos tempos mínimos de partida e/ou parada e o intervalo das mesmas;
- Tratamento das transições (0→1): se o tempo em que a unidade  $i$  encontra-se ligada ( $X_i^{on}$ ), dentro do período mínimo de funcionamento, for maior ou igual a 2/3 do  $TP_i$  (Tempo Mínimo de Partida), a unidade  $i$  é ligada. Caso contrário a unidade é mantida desligada.
- Tratamento das transições (1→0): se o tempo em que a unidade  $i$  encontra-se desligada ( $X_i^{off}$ ), dentro do período mínimo de parada, for maior ou igual a 2/3 do  $TD_i$  (Tempo Mínimo de Desligamento), a unidade  $i$  é desligada. Caso contrário, a unidade é mantida ligada.

Conforme (SILVA JUNIOR et al., 2006), a adoção do fator 2/3 dos tempos mínimos foi um bom critério, sendo adotado de forma exclusivamente empírica.

Entretanto, a correção dos tempos mínimos pode ocasionar os seguintes cenários não desejáveis: (i) excessos de reserva girante, os quais podem ser solucionados através do desligamento de unidades geradoras de pior classificação na MS, desde que estas ações não acarretem em outras violações ou no desligamento de unidades com tempos mínimos unitários. (ii) não atendimento a demanda, que podem ser solucionados através do acionamento das unidades geradoras melhores classificação na MS, desde que estas ações não acarretem em outras violações ou no acionamento de unidades com tempos mínimos unitários.

Ao fim desta etapa, é obtida uma solução viável (programação final de operação), a qual atenda as restrições de demanda, reserva girante e tempos mínimos de partida e parada.

### **Etapa 6 - Despacho Econômico:**

De posse da programação final obtida por cada indivíduo, é realizado o despacho econômico para a obtenção da potência ativa horária para cada unidade termoeletrica e também da FOB associada a cada indivíduo. O despacho é feito através da técnica primal dual de pontos interiores, com a utilização da função FMINCON do software MatLab<sup>®</sup>.

### **Etapa 7- Obtenção Matriz de Feromônio Inicial ( $MF_0$ ):**

A matriz de feromônio inicial apresenta a mesma estrutura utilizada na representação do indivíduo, ou seja, representada por uma matriz cuja dimensão é dada pelo número de horas de operação pelo número de unidades termoeletricas (UTES) existentes. Na  $MF_0$  são armazenados os depósitos de feromônio de cada indivíduo. Este depósito é proporcional a qualidade da solução. Assim, soluções (FOB) cujos custos operacionais forem próximo do LIC contribuem de forma mais contundente na matriz  $MF$ , enquanto soluções que tenham custos operacionais mais distantes do LIC contribuem de forma mais superficial. O feromônio depositado pelo indivíduo  $m$  é dado pela equação (4.6):

$$\begin{cases} \Delta MF_0(m) = \frac{1}{|FOB(m) - LIC|} & \text{se } DO_i(t) = 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.6)$$

onde:

$\Delta MF_0$  Quantidade de feromônio depositado pela formiga  $m$ .

$FOB(m)$  Valor da função objetivo obtida pela formiga  $m$ .

$LIC$  Limite de Custo Inferior.

Desta forma, a quantidade total de feromônio depositado na  $MF$  é dada pela equação (4.7):

$$MF_0 = \sum_{k=1}^{nf} \Delta MF_0(m) \quad (4.7)$$

onde:

$MF_0$  Matriz de feromônio.

$nf$  Número de formigas da colônia.

As soluções que não forem factíveis, ou seja, que violem alguma das restrições do problema têm depósito nulo na  $MF$ .

A Figura 8 exibe o depósito de feromônio para uma determinada solução gerada pela formiga  $m$ . O depósito somente será computado para as UTEs que estão em operação. Como em (DORIGO e STÜTZLE, 2004), a inicialização do matriz de feromônio com um valor inicial favorece a exploração de novos caminhos logo no início do processo iterativo.

$T$	$UTE1$	$UTE2$	$UTE3$	$UTE4$
$t=1$	1	1	1	0
$t=2$	0	1	1	0
$t=3$	1	1	0	1

$T$	$UTE1$	$UTE2$	$UTE3$	$UTE4$
$t=1$				0
$t=2$	0			0
$t=3$			0	

Figura 8 - Representação do depósito de Feromônio.

### Etapa 8 - Nova Colônia:

A nova colônia, pela metodologia proposta, é composta, basicamente, por três tipos de indivíduos, conforme Figura 9.

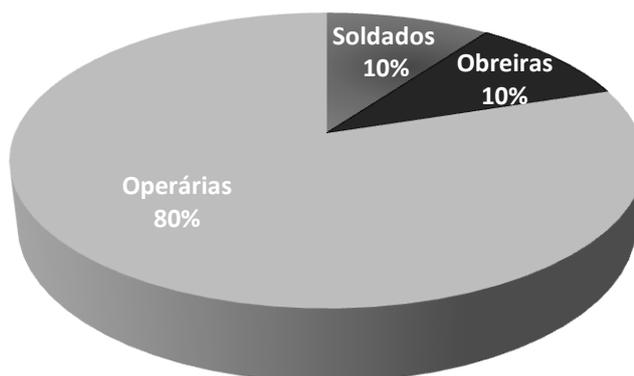


Figura 9 - Composição da Colônia.

- a) Soldados – Estes indivíduos percorrem a região de solução de forma completamente aleatória e correspondem a 10% da composição da colônia. Estes indivíduos têm papel importante na diversificação do processo de busca da colônia.
- b) Obreiras – Estes indivíduos percorrem a região de solução de acordo com a ordem de mérito baseadas nas informações horárias dos multiplicadores de Lagrange, obtidos pelo processo descrito na etapa 3. Correspondem a 10% da composição da colônia e trazem informações relevantes para a colônia, oriundas de um processo prévio de otimização.
- c) Operárias – Estas formigas percorrem a região de solução com base nas informações da matriz de feromônio ( $MF$ ) e representam 80% dos indivíduos da colônia.

Para as soluções geradas pelas formigas obreiras foram adotados alguns critérios de modo a permitir uma maior diversificação dessas soluções, em função da ordem de mérito estabelecida. Para tanto, é realizado um sorteio, representado através de uma roleta, Figura 10, onde a ordem de mérito a ser utilizada na hora  $t$  se dará de acordo com a região sorteada. As regiões são descritas da seguinte forma:

- Região A (20%) – utiliza-se a ordem de mérito da hora anterior,  $MS(t-1)$ ;
- Região B (20%) – utiliza-se a ordem de mérito da hora posterior,  $MS(t+1)$ ;
- Região C (40%) – utiliza-se a ordem de mérito da hora corrente,  $MS(t)$ ;
- Região D (20%) – utiliza-se ordem de mérito de uma hora aleatória,  $MS(?)$ .

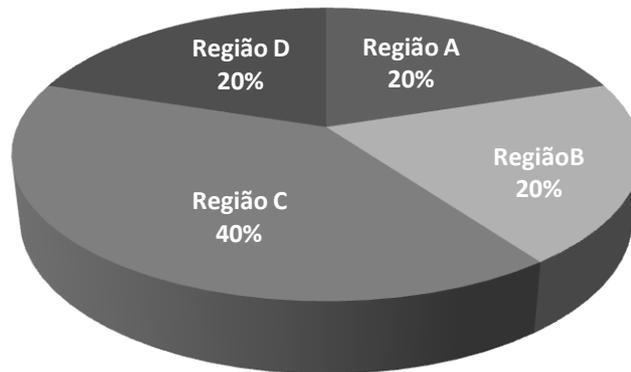


Figura 10 - Roleta Referente às Soluções Geradas pelas Obreiras

As soluções geradas pelas operarias são obtidas por meio de uma regra de decisão, baseada na equação (2.1), a qual fornece a probabilidade de cada formiga escolher a solução  $m$ , é dada pela equação (4.8).

$$P(m) = \frac{[MF(m)]^\varphi}{\sum([MF]^\varphi)} \quad (4.8)$$

onde:

$\varphi$  Parâmetro de controle que determina o peso relativo da influência da Concentração de feromônio. Adotou-se  $\varphi = 1$ .

Para realização do sorteio, é montado uma roleta para cada hora do horizonte de planejamento, onde cada gerador representa uma fatia da roleta, o tamanho de cada fatia é proporcional a quantidade de feromônio da unidade geradora, em relação à soma do feromônio total acumulado no instante  $t$ . Logo, soluções com maior quantidade de feromônio tem maiores chances de serem escolhidas. Entretanto, podem existir unidades geradoras que, para uma determinada hora, apresentam quantidades nulas de feromônio. Assim, de forma a fazer com que

todas as unidades geradoras tenham chance de serem escolhidas, estas são incluídas na roleta com uma probabilidade muito pequena. As unidades geradoras são, então, colocadas em operação através de um sorteio.

Destaca-se, ainda, a existência, na colônia, de uma formiga denominada de Rainha. Esta é única na colônia e tem como objetivo reforçar a trilha de feromônio na melhor solução encontrada durante o processo de busca.

### **Etapa 9 – Validação da Colônia:**

Após a definição da nova colônia, esta é validada, tal como na etapa 5.

### **Etapa 10 - Despacho Econômico:**

São definidos as potências horárias geradas por cada unidade, tal como na etapa 6.

### **Etapa 11 – Atualização Matriz de Feromônio:**

O depósito na matriz de feromônio ( $MF$ ) tem a mesma estrutura da equação (4.6). Estes depósitos têm como objetivo registrar as informações das soluções encontradas por todos os indivíduos da colônia. É a chamada inteligência coletiva. O depósito é acumulativo, tornando a quantidade de feromônio mais acentuada nas melhores soluções encontradas pela colônia.

O fenômeno da evaporação de feromônio, equação (2.3), é representado pelo coeficiente de evaporação  $\rho$ , que pode variar entre zero e o valor unitário e é dado pela equação (4.9).

$$MF^s(m) = (1 - \rho)MF^{s-1}(m) + \beta \times \Delta MF^s(m) \quad (4.9)$$

O algoritmo proposto utiliza uma taxa de evaporação diferenciada, em que soluções que estão próximas ao LIC apresentam uma taxa de evaporação menos acentuada do que nas soluções mais distantes. Assim, adotaram-se os seguintes valores para a taxa de evaporação: (i) Taxa de evaporação de 25% para a melhor solução encontrada; (ii) Taxa de evaporação de 75% para a pior solução encontrada; (iii) Taxa de evaporação de 50% para as demais soluções. Desta forma, evita-se que a busca fique estagnada em ótimos locais de pior qualidade.

Na equação (4.9), o parâmetro  $\beta$  é uma constante usada para enfatizar a proximidade da solução com o LIC. Esse fator multiplicativo é empírico e adotado igual a 1000.

A  $MF$  é atualizada de forma seqüencial (DORIGO e STÜTZLE, 2004), ou seja, é atualizada somente após todas as formigas construírem uma solução na iteração  $s$ , e ocorre de acordo com a equação (4.10).

$$MF^s = MF_0 + MF^{s-1} \quad (4.10)$$

onde:

$MF^s$             Quantidade total de feromônio depositado, na  $MF$ , na iteração  $s$ .

$MF^{s-1}(m)$     Quantidade de feromônio depositado, na  $MF$ , na iteração  $s-1$ .

$MF_0$             Matriz de feromônio inicial.

#### **Etapa 12 - Critério de Parada:**

Enquanto a convergência não é obtida, o processo iterativo retorna a etapa 8. Neste trabalho, foram adotados dois parâmetros como critério de parada: (i) Estagnação: O processo iterativo é finalizado quando a melhor solução encontrada pela colônia é a mesma durante um determinado número consecutivo de iterações previamente estabelecido; (ii) Número de iterações: O processo iterativo é finalizado quando o número máximo de iterações, previamente determinado, é atingido. Assim, o processo bio-inspirado de busca é encerrado quando um dos critérios estabelecidos é atingido.

#### **Etapa 13 - Solução Final:**

Após a convergência do processo iterativo, é obtida a solução final através da formiga rainha. Esta solução fornece a programação diária da operação, que corresponde ao menor custo operacional encontrada pelo processo de busca.

### **4.3 CONCLUSÕES GERAIS**

No presente capítulo, foi apresentado à metodologia proposta para a resolução do problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. A

metodologia empregada teve como base o algoritmo *Ant System*, porém com algumas adaptações para se adequar ao problema proposto, tais como: (i) a inclusão das informações dos multiplicadores de Lagrange no processo de busca; (ii) taxas de evaporação variadas; (iii) dois critérios de convergência para o algoritmo. Além disso, foi incluída uma etapa adicional para o cálculo do limite inferior de custo. Esta etapa teve como objetivo, direcionar melhor o processo de busca da colônia. O objetivo a ser alcançado, com as alterações descritas, consiste em obter soluções de boa qualidade, através de um número reduzido de indivíduos e assim, reduzir o esforço computacional.

# CAPÍTULO 5

## ESTUDO DE CASO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas pela metodologia proposta para resolução do problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. Para tanto, serão utilizados cinco sistemas termoeletrônicos de geração compostos respectivamente por quatro (VALENZUELA e SMITH, 2000), dez, vinte, quarenta e cem Unidades Termoeletrônicas (UTES) (KARZARLIS et. al, 1996). Os resultados obtidos pela metodologia proposta serão comparados com outras metodologias existentes na literatura.

### 5.2 ASPECTOS COMPUTACIONAIS E PARÂMETROS UTILIZADOS NO ALGORITMO

O algoritmo utilizado para implementação da metodologia foi desenvolvido em ambiente MatLab<sup>®</sup> versão 2008b, e executado com processador Pentium Dual Core, 1,86Hz e 2Gb de RAM. Para o algoritmo baseado em otimização por colônia de formigas, os seguintes parâmetros foram considerados: (i) colônia composta por cinquenta formigas (10% obreiras, 10% soldados e 80% operárias); (ii) estagnação máxima permitida de dez iterações; (iii) número máximo de cem iterações; (iv) evaporação para melhor solução de 25%; (v) evaporação da pior solução de 75%; (vi) evaporação das demais soluções 50%.

## 5.3 ESTUDO DE CASOS

### 5.3.1 SISTEMA 4UTES

Este sistema é composto por quatro unidades termoeletricas (VALENZUELA e SMITH, 2002) com um horizonte de planejamento de oito horas, os dados da demanda e das unidades termoeletricas para este sistema estão presentes no apêndice A.

As seguintes condições de simulação foram consideradas:

- (a) Caso A: sem a utilização da Matriz de Sensibilidade, ou seja, sem as informações dos multiplicadores de Lagrange via formigas obreiras;
- (b) Caso B: com a utilização da Matriz de Sensibilidade, ou seja, com as informações dos multiplicadores de Lagrange via formigas obreiras, 10% da colônia;

Na Tabela 3 são apresentados os custos operacionais para cada um dos casos considerados acima. Comparando os resultados, verifica-se que o uso da Matriz de Sensibilidade aumentou a eficiência do algoritmo, resultando em um menor custo operacional. Embora a diferença econômica percentual seja pequena, em sistemas reais, esta diferença tende a ser mais significativa.

Tabela 3 - Custo Operacional-Sistema 4UTES.

Simulações	Custo
(a)	\$74480
(b)	\$74476

A Figura 11 e a Figura 12 apresentam a evolução do custo operacional durante o processo iterativo para as simulações, considerando os casos (a) e (b). Por ser um sistema de pequeno porte, os dois casos simulados atingem a estagnação aproximadamente com o mesmo número de iterações, cinco para o caso (a) e em seis iterações para o caso (b).

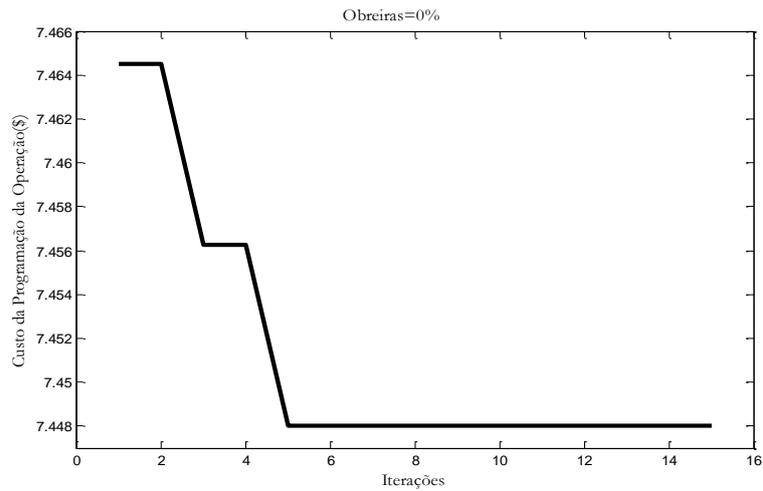


Figura 11 - Convergência-Sistema 4UTES: caso (a).

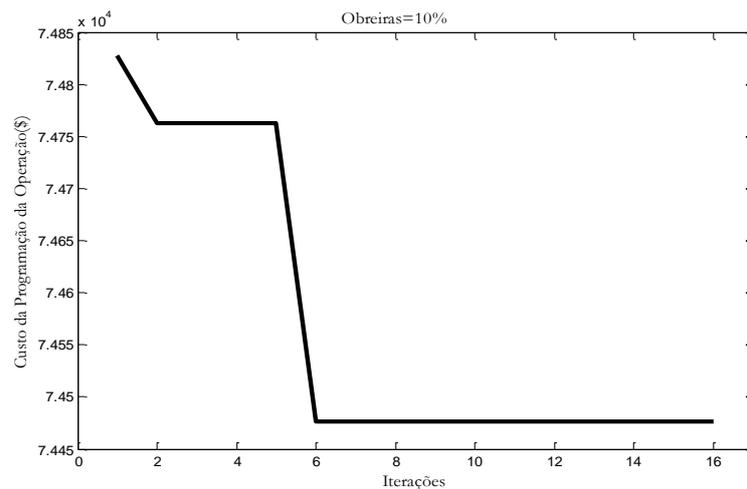


Figura 12 - Convergência-Sistema 4UTES: caso (b).

Através da Figura 13 e da Figura 14 é possível observar a distribuição de feromônio depositado pelas formigas durante todo o processo iterativo. A região em vermelho apresenta alta concentração de feromônio, enquanto na região em azul tem-se o menor nível de feromônio. Os pontos brancos são referentes às unidades termoeletrônicas em operação, durante o período de programação, oito horas.

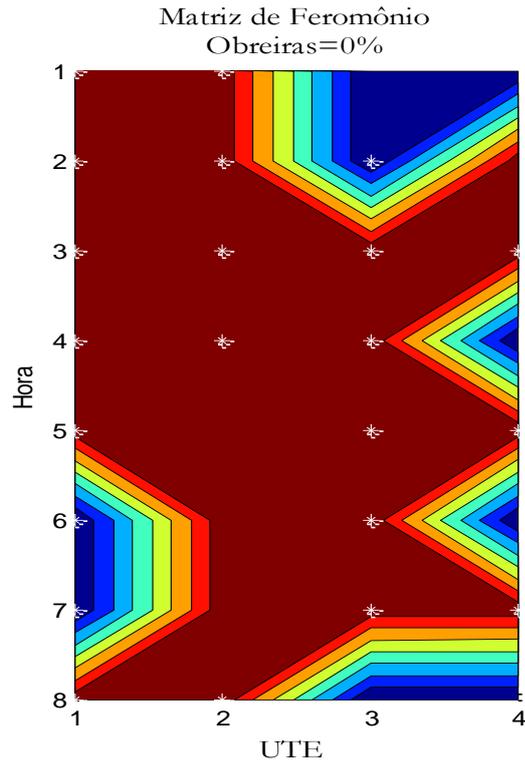


Figura 13 - Matriz de Feromônio-Sistema 4UTES: caso (a).

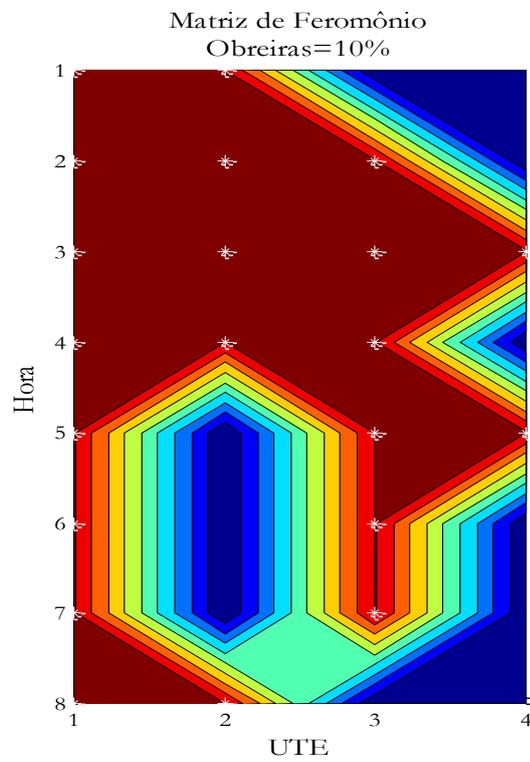


Figura 14 - Matriz de Feromônio-Sistema 4UTES: caso (b).

A Tabela 4 apresenta os valores dos custos operacionais referentes a um ciclo de dez simulações do algoritmo proposto, onde foram registradas a melhor solução e a pior solução, o valor médio das soluções e o tempo médio de simulação.

Tabela 4 - Desempenho do Custo Operacional-Sistema 4UTES.

Sistema	Melhor	Média	Pior	Tempo Médio Computacional (s)
4UTES	\$74476	\$74476	\$74476	27,03

O resultado obtido, pela metodologia proposta para o sistema 4UTES, Figura 15, foi comparado com outras metodologias encontradas na literatura, tais como: (i) MA( *Memetic Algorithm*) (VALENZUELA e SMITH, 2002), (ii) PSO-LR ( *Particle Swarm Optimization-Lagrangian Relaxation*) (BALCI e VALENZUELA, 2004).

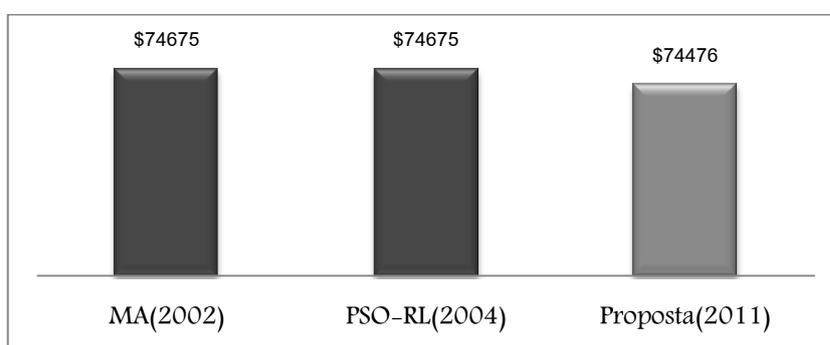


Figura 15 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 4UTES.

O custo operacional obtido pela metodologia proposta (\$74.476) apresenta um custo inferior em relação aos demais métodos. Como já mencionado, apesar da diferença econômica percentual ser mínima, em sistemas de maior porte a diferença tende a ser mais significativa.

### 5.3.2 SISTEMA 10UTES

O sistema composto por 10UTES é o mais difundido na literatura especializada, sendo originalmente constituído por dez unidades de geração, com um horizonte de planejamento de

vinte de quatro horas. Para este sistema, são encontradas variações no número de unidades, tais como 20, 40 e 100 UTEs. Os dados da demanda e das unidades termoeletricas para este sistema e de suas variações, que são duplicados de forma proporcional aos dados de geração e carga do sistema original, estão presentes no apêndice A.

As seguintes condições de simulação foram consideradas:

- (a) Caso A: sem a utilização da Matriz de Sensibilidade, ou seja, sem as informações dos multiplicadores de Lagrange via formigas obreiras;
- (b) Caso B: com a utilização da Matriz de Sensibilidade, ou seja, com as informações dos multiplicadores de Lagrange via formigas obreiras, 10% da colônia;

Na Tabela 5, são apresentados os custos operacionais para cada um dos casos considerados acima. Comparando os resultados, verifica-se que o uso da Matriz de Sensibilidade aumentou, novamente, a eficiência do algoritmo, resultando em um menor custo operacional. Sendo este sistema maior do que o anterior analisado, percebe-se que a diferença econômica percentual já se torna mais significativa. Isto porque, à medida que se aumenta o número de unidades geradoras a serem consideradas no sistema, aumenta, também, o grau de liberdade da escolha do gerador que deve entrar em operação.

Tabela 5 - Custo Operacional-Sistema 10UTEs.

Simulações	Sistema 10UTEs
(a)	\$581.432
(b)	\$563.937

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam a evolução do custo operacional durante o processo iterativo, para a simulação dos casos (a) e (b). Com a inserção das informações dos multiplicadores de Lagrange, o algoritmo foi capaz de encontrar uma solução de melhor qualidade com um número menor de iterações.

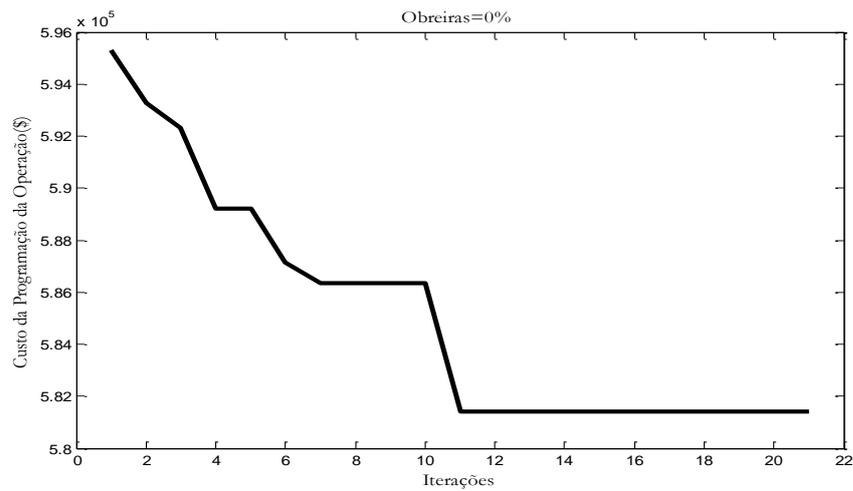


Figura 16 - Convergência-Sistema10UTEs: caso (a).

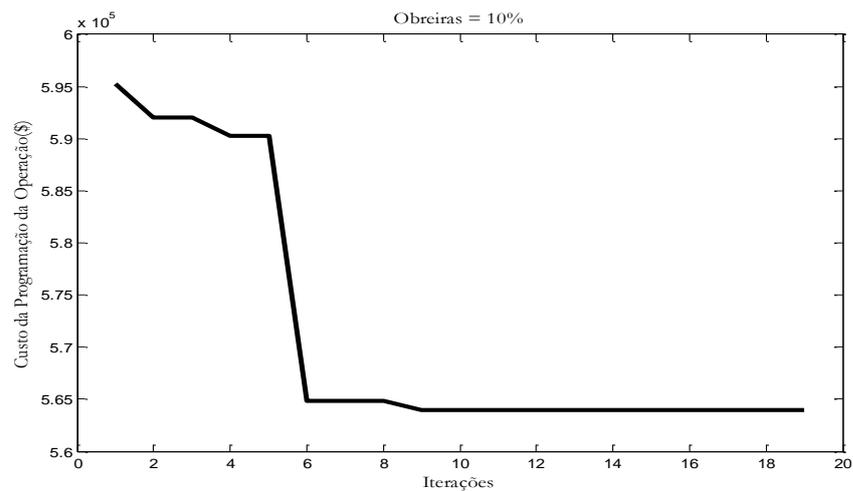


Figura 17 - Convergência-Sistema 10UTEs: caso (b).

O depósito de feromônio, durante o processo de busca para as simulações dos casos (a) e (b), pode ser observado através da Figura 18 e Figura 19. Na Figura 18, caso onde as informações dos multiplicadores de Lagrange não são adicionadas no algoritmo, o feromônio encontra-se espalhado de forma difusa pela região de solução, indicando que as informações da colônia não estão convergentes. Na Figura 19, com a inclusão da Matriz de Sensibilidade, a região de maior concentração de feromônio torna-se bem definida pelo algoritmo, indicando que a colônia está mais decidida em relação à solução encontrada.

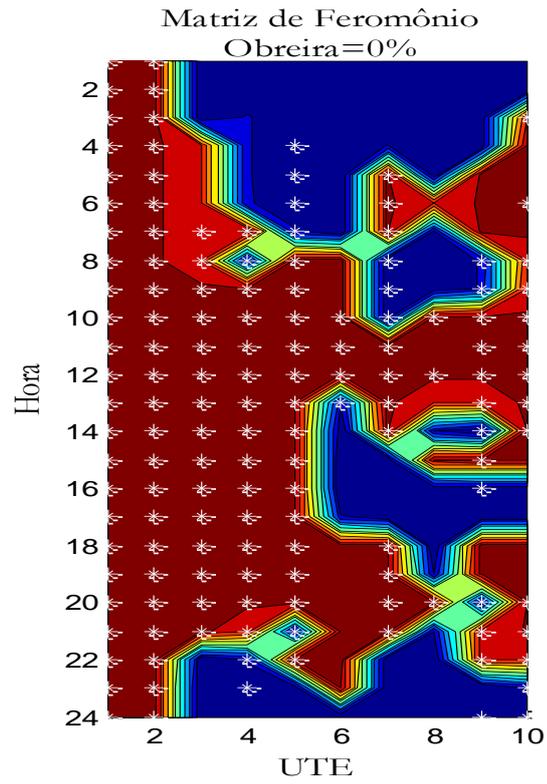


Figura 18 - Matriz de Feromônio-Sistema 10UTES: caso (a).

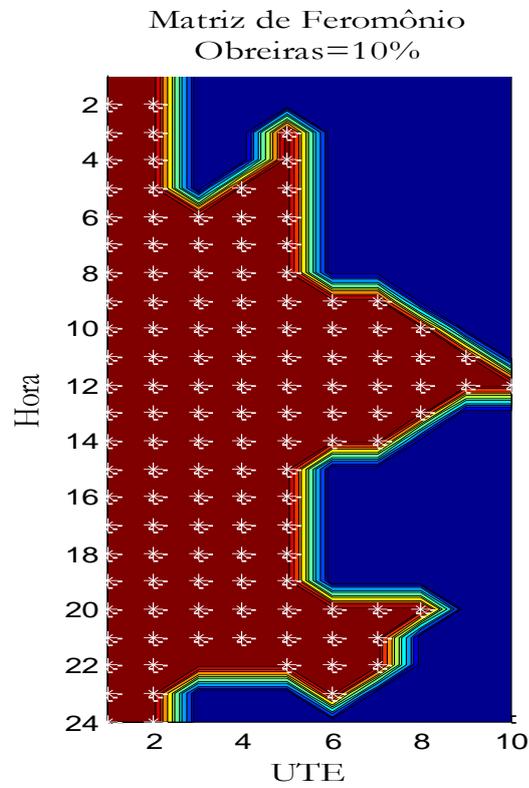


Figura 19 - Matriz de Feromônio-Sistema 10UTES: caso (b).

A Tabela 6 apresenta os valores dos custos operacionais referentes a melhor solução e a pior solução, o valor médio do custo obtido e o tempo computacional para o sistema 10UTES após dez simulações da metodologia proposta.

Tabela 6 - Desempenho do Custo Operacional-Sistema10UTES.

Sistema	Melhor	Média	Pior	Tempo Médio Computacional (s)
10UTES	\$563.937	\$563.977	\$563.945	60,70

Os resultados obtidos pela metodologia proposta, para o sistema composto por dez unidades geradoras, foram comparados com os resultados obtidos por outras metodologias presentes nas literaturas, são estas:

- *Hybrid Ant System Priority List* (HASP)( CHUSANAP IPUTT, 2008)
- *Enhanced Lagrangian Relaxation* (ELR) (ONGSAKUL e PETCHARAKS, 2004)
- *Selective Self Ant Colony Optimization* (SSACO)(CHUSANAPIPUTT et. al, 2007)
- *Lagrangian Relaxation-Genetic Algorithm* (LRGA) (CHENG et. al, 2000)
- *Modified Hybrid Particle Swarm Optimization* (MHPSO) (YEN et. al, 2011 )
- *Evolutionary Programming* (EP) (JUSTE et al, 1999)
- *Dynamic Programming Hopfield Neural Network* (DPHNN) (KUMAR e PALANISAMY, 2007)
- *Fuzzy Simulated Annealing Dynamic Programming* (FSADP)( PATRA et. al, 2009)
- *Dynamic Programming* (DP) (SINGHAL e SHARMA, 2011)
- *Genetic Algorithm* (GA) (KAZARLIS et. al, 1996)
- *Improved Binary Particle Swarm Optimization* (IBPSO) (YUAN et. al, 2009)

A Figura 20 traz a comparação entre os principais resultados encontrados na literatura e o resultado obtido pela metodologia, em que pode verificar que a metodologia proposta corresponde a segunda melhor solução, \$563.937, entre as demais.

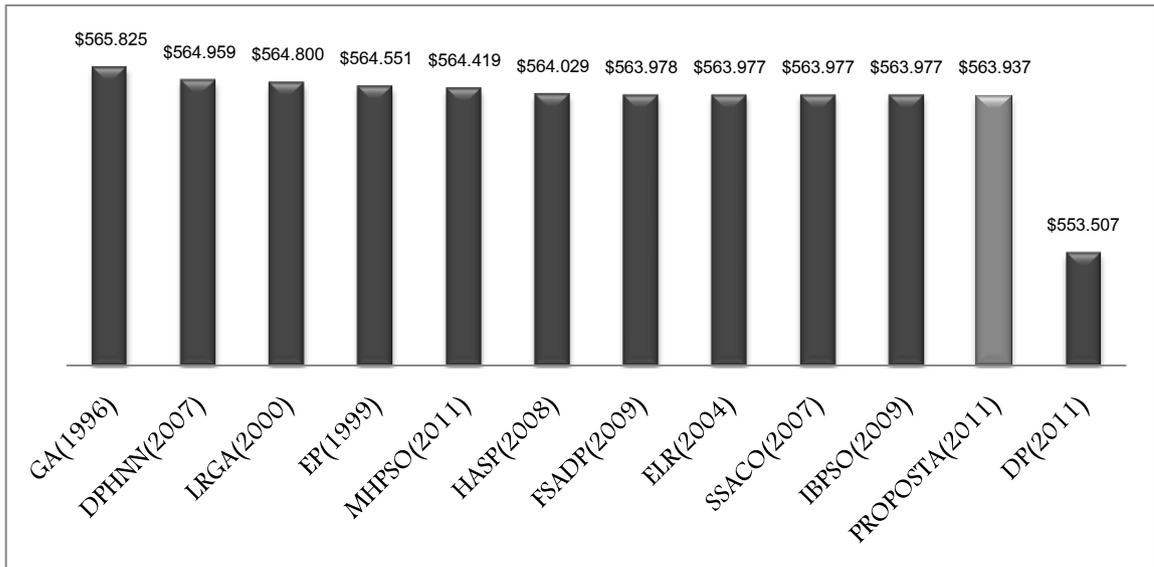


Figura 20 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 10UTES.

### 5.3.3 SISTEMAS 20, 40 E 100UTES

Nas análises que serão apresentadas a seguir são, na verdade, variações no número de unidades do sistema formado por 10 UTEs proposto por Kazarlis. Nestas situações, duplicações proporcionais dos dados de geração e carga do sistema original, são realizadas de modo a formar os novos sistemas.

A Tabela 7 apresenta o melhor, o pior, e o valor médio do custo operacional para os sistemas formados por vinte, quarenta e cem unidades termoelétricas e o tempo médio computacional, após dez simulações da metodologia proposta.

Tabela 7 - Desempenho do Custo Operacional.

Sistema	Melhor	Média	Pior	Tempo Médio Computacional (s)
20UTES	\$1.121.088	\$1.121.827	\$1.122.629	105,3
40UTES	\$2.240.839	\$2.241.621	\$2.242.305	145,7
100UTES	\$5.594.263	\$5.597.824	\$5.599.110	418,6

A Figura 21 traz a comparação entre os principais resultados encontrados na literatura e o resultado obtido pela metodologia, em que se pode verificar que a metodologia proposta apresenta a melhor solução, \$1.121.088, entre as metodologias.

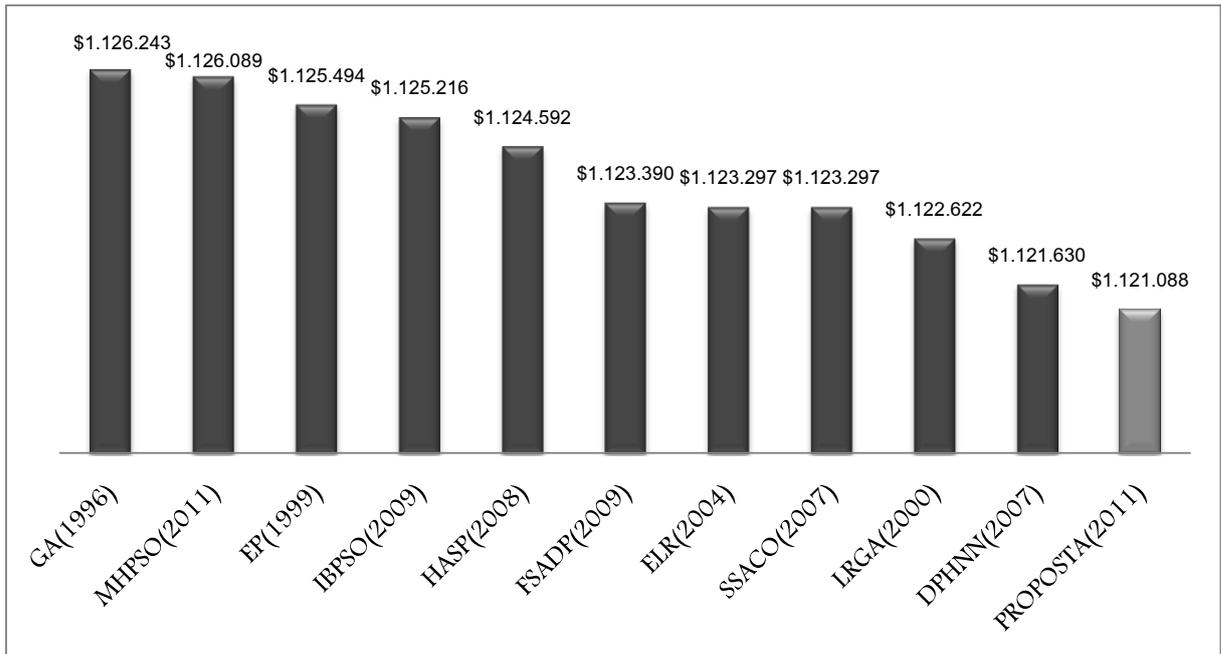


Figura 21 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 20UTEs.

A comparação entre as metodologias, para o sistema composto por quarenta unidades geradoras, é apresentada pela Figura 22. Percebe-se através da análise gráfica, que a metodologia proposta apresenta o menor custo operacional, \$2.240.839, entre as metodologias.

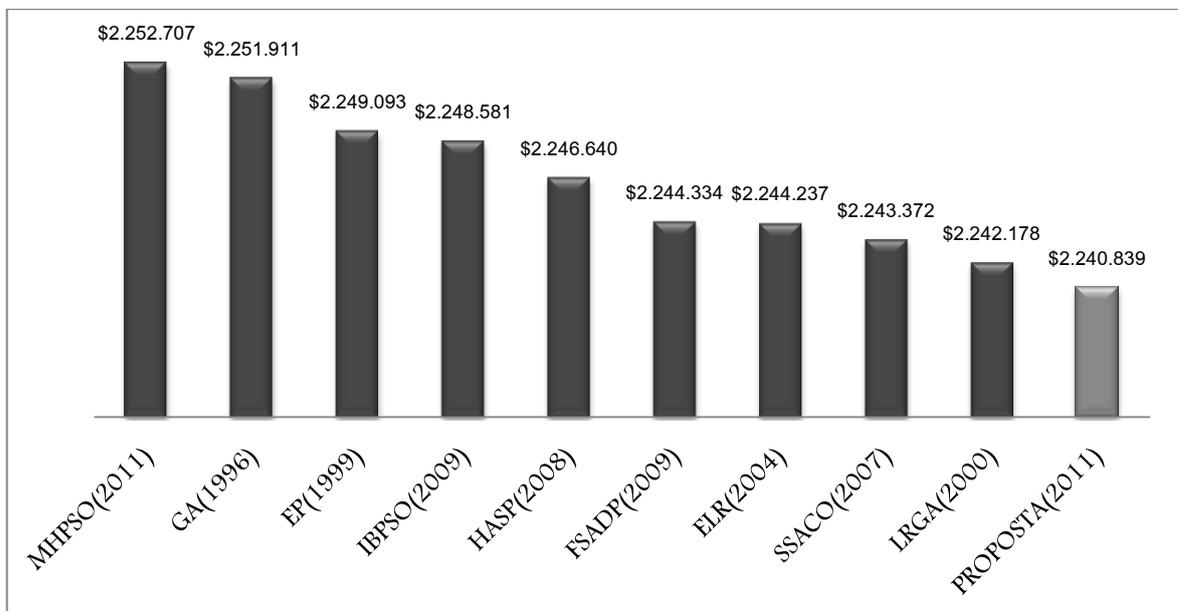


Figura 22 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 40UTEs.

A Figura 23 apresenta o gráfico comparativo entre os resultados encontrados na literatura e o obtido pela metodologia proposta para o sistema Kazarlis, constituído por cem unidades geradoras, onde se verifica que a programação diária de operação mais econômica corresponde à solução obtida pela metodologia proposta, \$5.594.263.

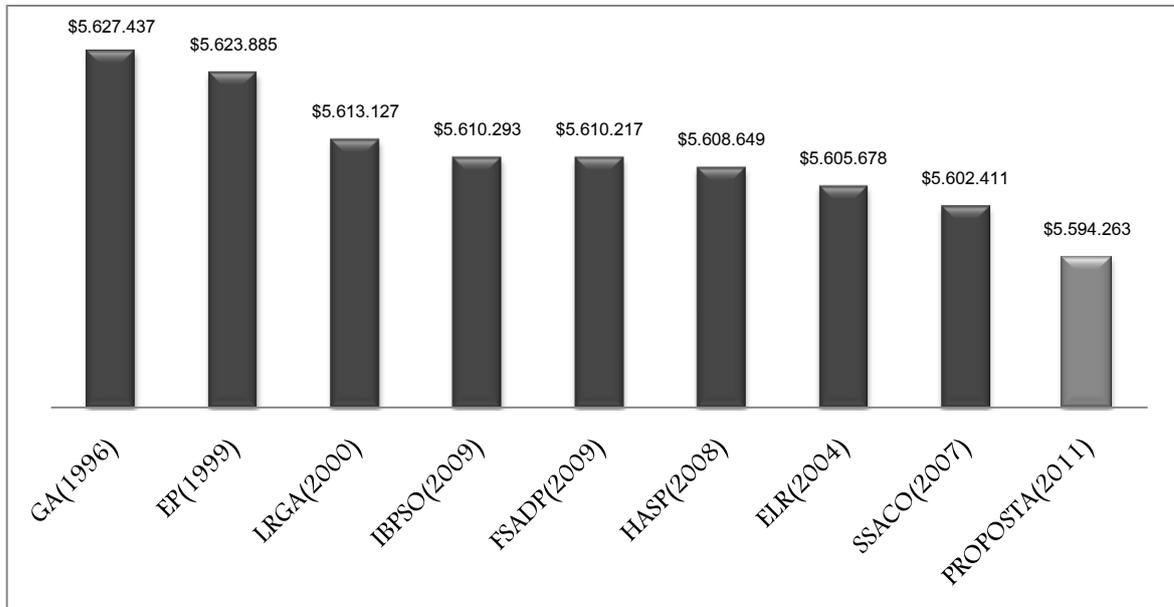


Figura 23 - Comparação dos Custos Operacionais-Sistema 100UTEs.

Outra análise realizada diz respeito à influência do percentual de obreiras na colônia. Assim, a Tabela 8 apresenta uma sensibilidade das soluções obtidas em relação o número de obreiras existentes na colônia.

Tabela 8 - Análise de Sensibilidade-Percentual de Obreiras.

Obreiras	Sistemas			
	10 UTEs	20 UTEs	40 UTEs	100 UTEs
>40%	\$563.999	\$1.125.219	\$2.246.928	\$5.612.953
20%	\$563.937	\$1.121.088	\$2.240.839	\$5.594.263
15%	\$563.937	\$1.121.088	\$2.240.839	\$5.594.263
10%	\$563.937	\$1.121.088	\$2.240.839	\$5.594.263
0%	\$581.432	\$1.184.284	\$2.408.727	\$6.072.421

Através da tabela acima pode se verificar que uma colônia composta por 10% de formigas obreiras é suficiente para garantir a eficiência do processo de busca proposto. Para um número acima dessa porcentagem de formigas obreiras na colônia, o processo começa a ficar tendencioso e o processo de busca tende a ficar comprometido.

A Tabela 9 apresenta o tempo computacional da metodologia proposta e dos demais métodos encontrados na literatura para o sistema composto por cem unidades geradoras, maior sistema em análise.

Tabela 9 - Comparação Tempo Computacional-Sistema100UTES

Sistema 100UTES		
Método	Tempo	
	Computacional (s)	CPU
HASP	73	1,5GHz
GA	15733	50MHz
IBSO	295	1,5GHz
EP	6120	160MHz
Proposta	418	1,86GHz

Como os computadores utilizados pelas metodologias possuem diferentes processadores (YUAN et. al, 2009), para realizar a comparação os tempos de processamento foram equalizados de acordo com a equação (5.1). A frequência base adotada é a da metodologia proposta (1,86GHz).

$$tempo_{eq}(s) = \frac{CPU(GHz)}{1,86GHz} \times tempo(s) \quad (5.1)$$

Tabela 10 - Comparação Tempo Computacional Equalizado-Sistema 100UTES.

Sistema 100 UTEs		
Método	Tempo	Custo
	Computacional (s)	Operacional (\$)
HASP	59	5.608.649
IBSO	238	5.610.293
Proposta	418	5.594.263
GA	423	5.627.437
EP	526	5.623.885

Verifica-se, através da Tabela 10, que para o maior sistema em estudo, 100 UTEs, que a metodologia proposta é a terceira computacionalmente mais eficiente, tendo encontrado a

melhor solução. Entretanto, destaca-se que a metodologia proposta pode ser convenientemente arranjada para implementação em uma arquitetura de processamento paralelo, o que viabilizaria a diminuição do tempo computacional gasto para sistemas de maior porte (JUNYONG et. al, 2009).

## 5.4 CONCLUSÕES GERAIS

Foram apresentados, os principais resultados obtidos pela metodologia proposta, para a resolução do problema da programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. Os sistemas utilizados para a aferição dos resultados, encontram-se em grande parte das publicações existentes na área, sendo estas usadas como parâmetros de comparação com a metodologia proposta.

As simulações foram realizadas considerando duas situações: sem a inclusão e com a inclusão das informações dos multiplicadores de Lagrange na Colônia, em que se pode concluir que a inclusão destas informações, possibilita um aumento da eficiência do processo de busca. Desta forma, pelos resultados apresentados, verifica-se que a metodologia desenvolvida mostra-se competitiva em relação às metodologias encontradas na literatura.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados obtidos pela metodologia proposta para cada caso analisado. São apresentadas as soluções obtidas pela metodologia proposta (1), a melhor solução conhecida na literatura (2) e a metodologia que originou a melhor solução (3).

Tabela 11 - Resumo dos Resultados Obtidos.

	Sistemas		
	Solução Obtida(1)	Solução Conhecida(2)	Metodologia(3)
04 UTEs	\$74476	\$74675	PROPOSTA
10 UTEs	\$563.937	\$553.507	DP
20 UTEs	\$1.121.088	\$1.121.630	PROPOSTA
40 UTEs	\$2.240.939	\$2.243.648	PROPOSTA
100 UTEs	\$5.594.263	\$5.602.411	PROPOSTA

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados através das simulações realizadas apontam para uma satisfatória eficiência da metodologia proposta para o problema referente à programação da operação de sistemas termoeletrônicos de geração. A metodologia proposta conciliou, para os casos analisados, um esforço computacional aceitável com a obtenção de soluções ótimas ou sub-ótimas. Os resultados alcançados podem ser creditados aos seguintes fatores:

- As informações econômicas oriundas dos multiplicadores de Lagrange, associadas às funções de decisão de operação na identificação das unidades geradoras a serem colocadas em operação e incorporadas ao processo de busca bio-inspirado;
- A obtenção do limite inferior de custo que, quando introduzida na determinação da quantidade de feromônio a ser depositada pela colônia, tende a direcionar as soluções para uma região de solução mais promissora;

Quanto à análise dos resultados:

- A metodologia proposta mostra-se competitiva em relação às principais técnicas de otimização utilizadas para a resolução do problema em questão, conciliando soluções de qualidade a um esforço computacional aceitável;
- Os confrontos entre os resultados apontam, na maioria das vezes, para diferenças percentuais financeiras muito pequenas entre as metodologias, existindo, inclusive, alternâncias de desempenho (qualidade das soluções) para diferentes sistemas;
- Apesar das pequenas diferenças econômicas entre as metodologias, deve-se ter em mente que para sistemas reais e/ou de grande porte, o montante financeiro envolvido é de ordem elevada e, portanto, quaisquer que sejam as economias obtidas são estas desejadas;

- A garantia de obtenção do ponto de mínimo global só pode ser obtida através da enumeração de todas as combinações possíveis de operação, o que nem sempre é possível devido ao elevado tempo de processamento;
- Apesar do bom desempenho obtido pelo índice de sensibilidade proposto, deve-se ter em mente que não há garantia da otimalidade das soluções encontradas, ou seja, assim como nas demais metodologias, o índice de proposto pode vir a gerar soluções subótimas.

## 6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Alguns possíveis desenvolvimentos futuros são descritos a seguir:

- Inclusão das restrições de tomada e retomada de carga das unidades de geração. Na prática, por problemas termodinâmicos, não é possível uma variação muito rápida de potência gerada pelas unidades termoelétricas. Sendo assim, definem-se taxas de tomada e retomada de carga (MW/h) que condicionam as alterações de geração em intervalos de tempo sucessivos;
- A consideração do sistema de transmissão na programação diária da operação de sistemas de termoelétricos de geração. Desta forma, tem-se uma programação mais realista, tornando-se possível, inclusive, analisar a influência dos limites de transmissão e das perdas ôhmicas na programação da operação.
- Incorporação das restrições inerentes à rede de gás natural (gasodutos), visando modelar a possibilidade de escassez de gás devido aos limites operacionais da rede;
- A modelagem das zonas operacionais proibidas (ADHINARAYANAN e SYDULU, 2008), (PEREIRA et al., 2005) e o efeito dos “pontos de válvula”, (CHIANG, 2005), (CHEN e YEH, 2006) inerentes às unidades geradoras. Estas restrições aumentam a complexidade do subproblema, referente ao despacho econômico, tornando-o não convexo.
- Uma opção de redução do tempo computacional seria a utilização de processamento paralelo (ROOSTA, 2000). O processamento paralelo permite que um algoritmo, que exija um elevado tempo computacional, tenha sua execução

distribuída entre vários processadores e memórias, possibilitando uma considerável redução no tempo de simulação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHINARAYANAN, T. AND SYDULU, M. **A Directional Search Genetic Algorithm to the Economic Dispatch Problem with Prohibited Operating Zones.** IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1 -5, 2008.

AL-KALAANI Y. **Power Generation Scheduling Algorithm Using Dynamic Programming.** Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, vol.71, issue 12, issn 0362-546X, pp.e641-e650, 15 December 2009.

BALCI, H. H. AND VALENZUELA J. F. **Scheduling Electric Power Generators Using Particle Swarm Optimization Combined with the Lagrangian Relaxation Method.** Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., vol. 14, no. 3, pp. 411–421, 2004.

BELEDE, L.; JAIN, A.; GADDAM, R.R. **Unit Commitment with Nature and Biologically Inspired Computing.** Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress, pp.824-829, 9-11 December 2009.

BENHAMIDA F.; ABDELBAR B. **Enhanced Lagrangian Relaxation Solution to the Generation Scheduling Problem.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.32, issue 10, issn 0142-0615, pp.1099-1105, December 2010.

BULLNHEIMER, B., HARTL, R. F., & STRAUSS, C. **A New Rank Based Version of the Ant System: A Computational Study.** Technical Report POM-03/97, Institute of Management Science, University of Vienna, Austria, 1997.

CHANG, G.W.; TSAI, Y.D.; LAI, C.Y.; CHUNG, J.S. **A Practical Mixed Integer Linear Programming Based Approach for Unit Commitment.** Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE , pp. 221- 225, vol.1, 6-10 June 2004.

CHEN, C. AND YEH, S. **Particle Swarm Optimization for Economic Power Dispatch with Valve-Point Effects.** IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 1 -5, 2006.

CHENG C. P.; LIU C.W.; LIU C. C. **Unit Commitment by Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithms.** Power Systems, IEEE Transactions on, vol.15, no.2, pp.707-714, May 2000.

CHIANG, C.-L. **Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels.** IEEE Trans. On Power Syst, vol. 20, pp. 1690 - 1699, 2005.

CHUSANAPIPUTT, S.; NUALHONG, D.; JANTARANG, S.; PHOOMVUTHISARN, S. **Relativity Pheromone Updating Strategy in Ant Colony Optimization for Constrained Unit Commitment Problem.** Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on, pp.1-8, 22-26 October 2006.

CHUSANAPIPUTT, S.; NUALHONG, D.; JANTARANG, S.; PHOOMVUTHISARN, S. **A Solution to Unit Commitment Problem Using Hybrid Ant System Priority List Method.** Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International, pp.1183-1188, 1-3 December 2008.

CHUSANAPIPUTT, S.; NUALHONG, D.; JANTARANG, S.; PHOOMVUTHISARN, S. **Unit Commitment by Selective Self-Adaptive ACO with Relativity Pheromone Updating Approach.** Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International, pp.36-41, 3-6 December. 2007

DENEUBOURG J.L.; ARON S.; GOSS S.; PASTEELS J.M. **The Self-Organizing Exploratory Pattern of The Argentine Ant.** Journal of Insect Behavior, vol.3, pp.159-168, 1990.

DINIZ, A.L.S. **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.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2007.

DORIGO, M. and STÜTZLE, T. **Ant Colony Optimization.** MIT Press, 2004.

DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian).** Ph.D. Thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.

DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L.M. **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem.** Evolutionary Computation, IEEE Transactions, vol.1, no.1, pp.53-66, April 1997.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. **Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents.** Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions, vol.26, no.1, pp.29-41, February 1996.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. **Positive Feedback as a Search Strategy.** Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1991.

EL-SHARKH, M.Y.; SISWORAHARDJO, N.S.; EL-KEIB, A.A.; RAHMAN, A. **Fuzzy Unit Commitment Using the Ant Colony Search Algorithm.** Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE, pp.1-6, 25-27 August 2010.

GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. **Ant-Q: A Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem**. Proceedings of ML-95, Twelfth International Conference on Machine Learning, Tahoe City, CA, A. Prieditis, S. Russell (Eds.), Morgan Kaufmann, pp.252–260, 1995.

GOLDBARG, M.C E LUNA, H.P., **Otimização Combinatória e Programação Linear**. 2ª edição, Rio de Janeiro, Editora Campus, 2000.

HUANG K-U.; YANG H-T.; HUANG C-L. **A New Thermal Unit Commitment Approach Using Constraint Logic Programming**. Power Systems, IEEE Transactions, vol.13, no.3, pp.936-945, August 1998.

JUNYONG, X.; XIANG H.; CAIYUN L.; ZHONG C. **A Novel Parallel Ant Colony Optimization Algorithm with Dynamic Transition Probability**. Computer Science-Technology and Applications, International Forum on, vol. 2, pp. 191–194, 2009.

JUSTE, K.A.; KITA, H.; TANAKA, E.; HASEGAWA, J. **An Evolutionary Programming Solution to the Unit Commitment Problem**. Power Systems, IEEE Transactions on , vol.14, no.4, pp.1452-1459, Nov 1999

KAZARLIS, S.A.; BAKIRTZIS, A.G.; PETRIDIS, V.A. **Genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem**. Power Systems, IEEE Transactions on , vol.11, no.1, pp.83-92, February 1996.

KEZHEN LIU; JILAI YU; HONG-CHUN SHU; YONG CHEN. **A New Advanced Genetic Algorithm for Optimal Unit Commitment of Power System**. Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific , pp.1-4, 27-31 March 2009.

KUMAR, S. S.; PALANISAMY, V. **A Dynamic Programming Based Fast Computation Hopfield Neural Network for Unit Commitment and Economic Dispatch**. Electric Power Systems Research, vol. 77, pp. 917-925, June 2007.

LAUER, G.S.; SANDELL, N.R.; BERTSEKAS, D.P.; POSBERGH, T.A. **Solution of Large-Scale Optimal Unit Commitment Problem**. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on , vol.PAS-101, no.1, pp.79-86, Jan 1982.

LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, D. **Formulation of Unit Commitment (UC) Problems and Analysis of Available Methodologies Used for Solving the Problems**. Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on, pp.1-6, 6-9 December 2010a.

LOGENTHIRAN, T.; SRINIVASAN, D. **Particle Swarm Optimization for Unit Commitment Problem**. Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on, pp.642-647, 14-17 June 2010b.

ONGSAKUL, W.; PETCHARAKS, N. **Unit Commitment by Enhanced Adaptive Lagrangian Relaxation. Power Systems**, IEEE Transactions on, vol.19, no.1, pp. 620- 628, February 2004.

PATRA, S.; GOSWAMI, S.K.; GOSWAMI , B. **Fuzzy and Simulated Annealing Based Dynamic Programming for the Unit Commitment Problem.** Expert Systems with Applications, vol. 36, pp. 5081-5086, April 2009.

PEREIRA, N, A., UNSIHUAY, C., SAAVEDRA, O. **Efficient Evolutionary Strategy Optimisation Procedure to Solve the Nonconvex Economic Dispatch Problem with Generator Constraints.** Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 152, pp. 653 – 660, 2005.

ROOSTA, SEYED H. **Parallel Processing and Parallel Algorithms: Theory and Computation.** Springer, p. 114, ISBN 0387987169, 2000.

SENJYU, T., SHIMABUKURO, K., UEZATO, K. and FUNABASHI, T. **A Fast Technique for Unit Commitment Problem by Extended Priority List.** IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, n°2, pp.882-888, May 2003.

SILVA JUNIOR, I.C.; CARNEIRO JUNIOR, S.; OLIVEIRA E. J.; PEREIRA,J.L.R.; Garcia P. A.N.; Marcato, A. L.M. **A Lagrangian Multiplier Based Sensitive Index To Determine The Unit Commitment Of Thermal Units.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.30, issue 9, issn 0142-0615, pp. 504-510, November 2008b.

SILVA JUNIOR, I.C.; OLIVEIRA, E.J.; PEREIRA, J.L.R.; GARCIA, P.A.N; CARNEIRO JUNIOR, S. **Determinação da Operação de Unidades Térmicas para o Estudo de Unit Commitment através de uma Análise de Sensibilidade.** Revista da Sociedade Brasileira de Automática (SBA), vol.17, n° 3, pp. 300-311, Setembro 2006.

SILVA JUNIOR, I.C. **Planejamento da Operação de Sistemas Termoelétricos Utilizando Análise de Sensibilidade Associada a Procedimentos Heurísticos.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2008a.

SIMOPOULOS, D.N.; KAVATZA, S.D.; VOURNAS, C.D. **Unit Commitment by an Enhanced Simulated Annealing Algorithm.** Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp.193-201, October. 29 -November 1 2006.

SINGHAL, P. K.R; SHARMA, R. N. **Dynamic Programming Approach for Large Scale Unit Commitment Problem.** Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2011 International Conference on , pp.714-717, 3-5 June 2011.

SISWORAHARDJO, N.S.; EL-KEIB, A.A. **Unit commitment Using the Ant Colony Search Algorithm.** Power Engineering 2002 Large Engineering Systems Conference, LESCOPE 02 , pp. 2- 6, 2002.

STÜTZLE, T.; HOOS, H. **The MAX-MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem.** Evolutionary Computation, 1997, IEEE International Conference, pp.309-314, 13-16 April 1997.

SUM-IM, T.; ONGSAKUL, W. **Ant Colony Search Algorithm for Unit Commitment.** Industrial Technology, 2003. IEEE International Conference on, vol.1, pp. 72- 77, 10-12 December 2003.

TINGFANG Y.; TING, T.O. **Methodological Priority List for Unit Commitment Problem.** Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference, vol.1, pp.176-179, 12-14 December 2008.

VAISAKH, K.; SRINIVAS, L.R. **Unit commitment by Genetic Evolving Ant Colony Optimization.** Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress, pp.1162-1167, 9-11 December 2009.

VALENZUELA J. AND SMITH A. **A Seeded Memetic Algorithm for Large Unit Commitment Problems.** J. Heuristics, vol. 8, no. 2, pp. 173–195, 2002.

XIAO, G.; SHOUZHI LI; XUANHONG WANG; RUI XIAO. **A Solution to Unit Commitment Problem by ACO and PSO Hybrid Algorithm.** Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on , vol.2, no., pp.7475-7479, 2009.

YEN, L. T. X.; SHARMA, D.; SRINIVASAN, D.; MANJI, P. N. **A Modified Hybrid Particle Swarm Optimization Approach for Unit Commitment.** Evolutionary Computation (CEC), 2011 IEEE Congress on, pp.1738-1745, 5-8 June 2011

YU, D.; WANG, Y.; GUO, R. **A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm Based Lambda-Iteration Method for Unit Commitment Problem.** Intelligent Systems (GCIS), 2010 Second WRI Global Congress on, vol.1, pp.19-22, 16-17 December 2010.

YUAN, X.; NIE, H.; SU A.; WANG L.; YUAN Y. **An Improved Binary Particle Swarm Optimization for Unit Commitment Problem.** Expert Systems with Applications, vol. 36, pp. 8049-8055, May 2009.

ZENDEHDEL, N.; KARIMPOUR, A.; OLOOMI, M. **Optimal Unit Commitment Using Equivalent Linear Minimum Up and Down Time Constraints.** Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International , pp.1021-1026, 1-3 December 2008.

# APÊNDICE A

## DADOS DOS SISTEMAS

Nesta seção, serão apresentados os dados dos sistemas utilizados neste trabalho. Serão apresentados os dados das unidades termoelétricas de geração, os dados de demanda e reserva do sistema.

### A.1 SISTEMA 4UTES

Tabela 12 - Demanda e Reserva Girante-Sistema 4UTES.

Hora	Demanda (MW)	Reserva (MW)
1	450	45
2	530	53
3	600	60
4	540	54
5	400	40
6	280	28
7	290	29
8	500	50

Tabela 13 - Dados Gerador-Sistema 4UTES.

	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4
$P_{min_i}$	300	250	80	60
$P_{max_i}$	75	60	25	20
$a_i$	684,75	585,62	213	252
$b_i$	16,83	16,95	20,74	23,6
$c_i$	0,0021	0,0042	0,0018	0,0034
$TP_i$	5	5	4	1
$TD_i$	4	3	2	1
$CPq_i$	500	170	150	0
$CPf_i$	1100	400	350	0.02
$\varphi f_i$	5	5	4	0
$INI$	8	8	-5	-6

## A.2 SISTEMA 10UTES

O sistema 10UTES, é denominado sistema Kazarlis, é originalmente constituído por 10 unidades termoeletricas e possui as variantes 20, 40 e 100 unidades. Para estes sistemas, é feita a duplicação proporcional dos dados de geração e de carga do sistema 10UTES.

Tabela 14 - Demanda e Reserva Girante-Sistema 10UTES.

Hora	Demanda (MW)	Reserva (MW)	Hora	Demanda (MW)	Reserva (MW)
1	700	70	13	1400	140
2	750	75	14	1300	130
3	850	85	15	1200	120
4	950	95	16	1050	105
5	1000	100	17	1000	100
6	1100	110	18	1100	110
7	1150	115	19	1200	120
8	1200	120	20	1400	140
9	1300	130	21	1300	130
10	1400	140	22	1100	110
11	1450	145	23	900	90
12	1500	150	24	800	80

Tabela 15 - Dados Gerador-Sistema 10UTES.

	UTE 1	UTE 2	UTE 3	UTE 4	UTE 5	UTE 6	UTE 7	UTE 8	UTE 9	UTE 10
$P_{min_i}$	455	455	130	130	162	80	85	55	55	55
$P_{max_i}$	150	150	20	20	25	20	25	10	10	10
$a_i$	1000	970	700	620	450	370	480	660	665	670
$b_i$	16,19	17,26	16,6	16,5	19,7	22,26	27,74	25,96	27,27	27,79
$c_i$	0,00048	0,00031	0,002	0,00221	0,00398	0,00712	0,0079	0,00413	0,00222	0,00173
$TP_i$	8	8	5	5	6	3	3	1	1	1
$TD_i$	3	3	5	5	6	3	3	1	1	1
$CPq_i$	4500	5000	550	560	900	170	260	30	30	30
$CPf_i$	9000	10000	1100	1200	1800	340	520	60	60	60
$tpf_i$	5	5	4	4	4	2	2	0	0	0
INI	8	8	-5	-5	-6	-3	-3	-1	-1	-1