



**UFCG**

**OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE  
FORMIGAS APLICADA NA  
SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA  
OPERAÇÃO DE SISTEMAS  
HIDROTÉRMICOS**

DALTON FRANÇA GUEDES FILHO

**SUPRA OMNES LUX LUCES**

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA  
OUTUBRO – 2012

DALTON FRANÇA GUEDES FILHO

Eng. Eletricista (Universidade Federal de Campina Grande – 2007)

# Otimização por colônia de formigas aplicada na solução do problema da operação de sistemas hidrotérmicos

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, Dr., UFCG

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Outubro de 2012

A presente pesquisa foi desenvolvida nas instalações do Grupo de Sistemas Elétricos da UFCG em parceria com o Departamento de Estudos de Sistemas de Transmissão da Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF.

À minha família, em especial à  
minha esposa, para as quais a  
sabedoria é fundamental.

# Agradecimentos

A parte dos agradecimentos é uma das mais difíceis de serem escritas pois a tarefa de nominar todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho de dissertação é muito árdua.

O perigo do agradecimento seletivo não reside nas indicações, mas sim nas omissões acidentais. Portanto, inicialmente, expresso os meus sentimentos de gratidão a todos aqueles que contribuíram, de perto ou de longe, para elaboração deste trabalho de dissertação. Mas eu não poderia deixar de agradecer diretamente àqueles que tiveram uma participação mais efetiva neste trabalho e é para eles que, com profunda gratidão, escrevo as próximas linhas.

Agradeço aos meus pais, Maria de Fátima e Dalton Guedes, pela cuidadosa educação que recebi, pela formação moral e intelectual que sempre me foi passada através do exemplo, pelo apoio incondicional nos momentos difíceis e por todos os momentos felizes que juntos vivemos.

Também não poderia deixar de me reportar aos meus queridos irmãos, Anderson, Roni e Danila, aos meus tios e demais familiares pelo permanente carinho e apoio, fundamentais ao meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Em especial, eu agradeço a minha esposa Sarah por sua estima, compreensão e paciência na minha ausência e nas horas difíceis.

Registro ainda minha gratidão ao meu orientador, o professor Dr. Benemar Alencar de Souza não apenas pela confiança em mim depositada mas também por sua permanente disponibilidade e solicitude. Ainda no âmbito acadêmico, agradeço também aos professores Doutores Cursino Jacobina e Edson Guedes por suas valorosas contribuições e pontuais ensinamentos.

Agradeço à Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF, em particular ao su-

perintendente Murilo Pinto, ao gerente do DES Fernando Alves e ao meu gerente imediato Valdson Simões pela compreensão, permissão e apoio para realização deste trabalho. Eu não poderia deixar de citar também os engenheiros Jurandir Cavalcanti, Eduardo Sodré, Carlos Alberto, Pedro Melo, Alberto Carvalho, João Marcelo e vários outros que compõem a força de trabalho das divisões DEPT, DEET e DEAT, pela excelente recepção, disponibilidade e bom humor permanente.

Expresso aqui meus sinceros sentimentos de gratidão a todo o conjunto de profissionais da Chesf que contribuíram de perto ou de longe para elaboração deste trabalho, com seus esclarecimentos a todas as minhas questões.

Finalmente, exprimo meu profundo agradecimento a todo o quadro de professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande, pela atenciosa presença e constante contribuição para a minha formação em Engenharia Elétrica.

"O planejamento não diz respeito a  
decisões futuras, mas às implicações  
futuras de decisões presentes"

---

Peter Drucker

# Resumo

Este trabalho trata da aplicação da meta-heurística construtiva baseada no comportamento das colônias de formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*) na elaboração de algoritmo de otimização aplicado na solução do problema da operação de sistemas hidrotérmicos (composto basicamente por usinas hidroelétricas e termoelétricas). Procurou-se resolver inicialmente, e a título de exemplo, um sistema simplificado com apenas uma usina hidroelétrica e uma central termoelétrica em um horizonte de cinco anos em base mensal. Os resultados encontrados apresentam-se muito consistentes e satisfatórios quando comparados com resultados obtidos a partir da aplicação de técnicas baseadas em Programação Dinâmica e Fluxo em Rede. Também foi simulada e analisada a inserção de geração eólica contemplando sua característica sazonal. O método empregado pode ser expandido para um conjunto maior de usinas com fontes primárias diferenciadas. Dessa forma, o ACO se mostrou promissor como possível ferramenta de auxílio no planejamento da expansão do setor elétrico considerando as características associadas às diversas fontes primárias de energia.

**Palavras-chave:** Otimização, Colônia de Formigas, Sistemas Hidrotérmicos, Planejamento Energético, Usinas Hidroelétricas, Centrais Termoelétricas, Parques eólicos.

# Abstract

This work presents the application of constructive metaheuristics based on the behaviour of ant colonies (Ant Colony Optimization - ACO) in the development of an optimization algorithm applied in the solution of a hydrothermal power system's operation problem (composed mainly by hydroelectric and thermoelectric power plants). Initially, and as an example, a simplified system with only one hydroelectric power plant and one thermoelectric power plant in a five-year horizon on a monthly basis was sought to solve. The results achieved are very consistent and satisfactory compared to results obtained from the application of techniques based on Dynamic Programming and Power Flow Network. It was also simulated and analyzed the integration of wind power generation along with its seasonal behaviour. This method can be expanded to a larger set of power plants with different primary sources. this way, the ACO is shown as a promisor and possible tool to help the expansion planning of electric power sector considering the associated characteristics of each of the various primary sources of electric energy.

**Keywords:** Optimization, Ant Colony, hydrothermal power system's, planning of system's, hydroelectric, thermoelectric and wind power plants.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> . . . . .	iv
<b>Resumo</b> . . . . .	vii
<b>Abstract</b> . . . . .	viii
<b>Índice</b> . . . . .	ix
<b>Índice de Tabelas</b> . . . . .	xi
<b>Índice de Figuras</b> . . . . .	xii
<b>1 Introdução Geral</b> . . . . .	1
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivo . . . . .	3
1.3 Metodologia . . . . .	3
1.4 Artigos técnicos publicados . . . . .	4
1.5 Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2 Sistemas Hidrotérmicos</b> . . . . .	7
2.1 Usinas Hidroelétricas . . . . .	8
2.2 Usinas Termoelétricas . . . . .	11
2.3 O Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos . . . . .	12
2.4 Modelos Oficiais do Setor Elétrico Nacional . . . . .	13
<b>3 Otimização por Colônia de Formigas</b> . . . . .	15
3.1 Comportamento real das formigas . . . . .	16
3.2 Meta-heurística construtiva . . . . .	16

---

3.2.1	Ant System - AS . . . . .	17
3.2.2	Elitist Ant System - EAS . . . . .	19
3.2.3	Ant Q . . . . .	19
3.2.4	Ant Colony System - ACS . . . . .	20
3.2.5	Max-Min Ant System - MMAS . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Sistema de Formigas Dinâmico - SFD . . . . .</b>	<b>22</b>
4.1	Modelo Matemático SFD . . . . .	22
4.2	Modelo Matemático de Usinas Hidroelétricas . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Solução do Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos . . . . .</b>	<b>27</b>
5.1	Aplicação do Modelo SFD a Sistemas Hidrotérmicos . . . . .	27
5.2	Estudo de Caso com a UHE Sobradinho . . . . .	29
5.3	Resultados comentados . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>43</b>
	<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	<b>45</b>

# Índice de Tabelas

2.1	Variáveis de UHE empregadas em modelos de otimização . . . . .	10
5.1	Dados da Usina Hidroelétrica Sobradinho . . . . .	31
5.2	Parâmetros do algoritmo de otimização . . . . .	33
5.3	Valores de potência na UHE Sobradinho e tempo de processamento para diferentes aberturas de busca. . . . .	34
5.4	Alterações realizadas nos dados de entrada do algoritmo. . . . .	36
5.5	Despacho médio e custo de operação referentes aos três métodos em foco. . .	37
5.6	Fator de capacidade típico aplicado na simulação do parque eólico . . . . .	39

# Índice de Figuras

2.1	Estrutura básica de uma usina hidroelétrica . . . . .	9
2.2	Variáveis do modelo matemático de usinas hidroelétricas . . . . .	10
2.3	Estrutura básica do ciclo Rankine . . . . .	11
2.4	Estrutura básica do ciclo Brayton . . . . .	12
5.1	Fluxograma ilustrando o algoritmo proposto para o SFD. . . . .	30
5.2	Curva característica do custo da complementação térmica. . . . .	31
5.3	Curva Cota-Volume no reservatório de Sobradinho. . . . .	32
5.4	Curva Cota-Vazão no reservatório de Sobradinho. . . . .	32
5.5	Desempenho do modelo em função do número de formigas. . . . .	34
5.6	Sensibilidade do algoritmo SFD frente a diferentes cenários de abertura nas decisões. . . . .	34
5.7	Persistência do algoritmo SFD em três simulações com 700 agentes e abertura igual a 20 sem alteração de parâmetros. . . . .	35
5.8	Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias. . . . .	36
5.9	Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias. . . . .	37
5.10	Trajetórias de armazenamento do reservatório obtidas com a aplicação de SFD, Fluxo em Rede e PDD. . . . .	39
5.11	Resultados apresentados pelos métodos SFD, FR e PDD. . . . .	40
5.12	Resultados apresentados pelos métodos SFD, FR e PDD. . . . .	41
5.13	Geração hidrotérmica e mercado atendido, modelo SFD. . . . .	41
5.14	Comparação entre os resultados obtidos com a aplicação de SFD com e sem geração eólica. . . . .	42

# 1

## Introdução Geral

A oferta de energia elétrica é condicionada ao aproveitamento de fontes primárias que muitas vezes apresentam características estocásticas e sazonais. Nos sistemas elétricos preponderantemente hidráulico, a oferta de energia elétrica e o custo de operação associado estão relacionados à disponibilidade e à gestão do recurso renovável. No caso de aproveitamentos incontroláveis sob o ponto de vista de despacho de geração, esta gestão torna-se muito simples uma vez que o despacho estará condicionado à disponibilidade do recurso afluyente em cada instante. A geração eólica e a geração hidráulica a fio d'água são exemplos de aproveitamentos cujo despacho de geração é função da disponibilidade instantânea do recurso primário. No entanto, quando o parque hidráulico de um sistema elétrico possui reservatórios de acumulação, a gestão do recurso renovável assume graus de complexidade elevados.

Na operação de reservatórios, é preciso considerar as previsões de vazão afluyente no sentido de se evitar fortes deplecionamentos ou vertimentos elevados. O deplecionamento do reservatório implica em perda de potência na usina hidroelétrica e progressivo aumento no despacho de fontes complementares com custos operacionais normalmente mais elevados. O vertimento, por sua vez, reflete uma política de otimização equivocada uma vez que o volume de água extravasado poderia ter sido turbinado em decisões passadas em substituição a despachos complementares com custos maiores. Ou seja, o planejamento da operação de sistemas elétricos preponderantemente hidráulico enfrenta periodicamente um dilema na operação. Por um lado, se a decisão reflete um despacho hidráulico grande e o período chuvoso é desfavorável, o sistema perderá capacidade de geração e dependerá de

fortes complementações cujos custos operacionais são progressivamente mais elevados. Por outro lado, se a decisão implica em baixo despacho hidráulico com complementação não-hidráulica maior e o período chuvoso é favorável, então poderá haver vertimentos. Portanto, o custo assumido em função do despacho não-hidráulico referente a decisões passadas ajuda a manter o reservatório em níveis operacionais mais seguros, mas pode também, no futuro, levar o sistema a verter volumes de água que poderiam ter sido turbinada no passado. É preciso encontrar um equilíbrio entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro do seu armazenamento.

Existem modelos matemáticos no setor elétrico nacional capazes de auxiliar os analistas no planejamento, coordenação e operação do sistema elétrico brasileiro. Estes modelos são baseados em Programação Dinâmica Dual Estocástica - PDDE<sup>1</sup> e alimentados por outros modelos que geram séries sintéticas de vazões<sup>2</sup> afim de representar os riscos inerentes às características estocásticas dos regimes hidrológicos.

Além dos modelos baseados em PDDE, uma outra formulação matemática baseada em Fluxo em Rede (Cicogna, 2003) com foco na resolução do problema da operação de sistemas hidrotérmicos será também citada neste trabalho.

## 1.1 Motivação

Os modelos matemáticos empregados no setor elétrico nacional, apesar de abrangentes e complexos, contemplam as fontes alternativas de energia como geração externa ao processo. Ou seja, esses modelos consideram estas fontes como carga negativa, descontando os valores de potência na carga dos submercados aplicando seus respectivos fatores de capacidade em base mensal(CEPEL, 2003).

A geração eólica, por exemplo, apresenta característica estocástica e sazonal (anual e diária). Esta fonte de energia tem sido progressivamente inserida na matriz elétrica nacional, sobretudo no submercado Nordeste. O montante de energia eólica licitado pelo Governo Federal nos últimos leilões para implantação na região Nordeste no horizonte 2015 somado aos empreendimentos resultantes do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas

---

<sup>1</sup>Modelos Newave e Decomp

<sup>2</sup>Modelos auto-regressivos periódicos

de Energia Elétrica - PROINFA representa cerca de 60% da potência instalada do parque hidráulico desta região. Considerando-se todos os empreendimentos habilitados nos certames supracitados, constata-se que o somatório da potência relacionada a esses projetos é superior à potência instalada do parque hidráulico da região Nordeste, ver (EPE, 2009a), (EPE, 2010) e (EPE, 2009b). Logo, é importante aplicar um tratamento diferenciado nos modelos matemáticos do setor elétrico no sentido de contemplar as incertezas associadas à geração eólica, tal como é feito para o parque hidráulico, ressaltando também sua característica horária.

## 1.2 Objetivo

Este trabalho visa elaborar um modelo matemático simplificado e flexível capaz de representar, simular e otimizar a operação de um sistema hidrotérmico regional, composto por uma usina hidrelétrica, uma termoelétrica e parques eólicos, contemplando suas características sazonais.

Pretende-se, com essa ferramenta, lançar as bases de um modelo de fácil entendimento e integração com novas ideias, capaz de resolver o problema da operação de sistemas hidrotérmicos de forma simplificada.

O modelo proposto será elaborado com base em um conjunto de técnicas *Ant Colony Optimization* - ACO e deverá ser capaz de permitir sua expansão futura, para um número maior de usinas com fontes primárias diversas, considerando suas incertezas.

## 1.3 Metodologia

O método proposto neste trabalho para resolver o problema da operação de sistemas hidrotérmicos será implementado em ambiente *MATLAB*<sup>®</sup>.

O algoritmo será explorado para diferentes níveis de crescimento e decréscimo de formônio, assim como seu nível inicial, com ou sem restrições de máximo e mínimo conforme (Stützle e Hoos, 1999). Números variados de formigas serão aplicados a fim de se observar a sua influência no processo de convergência para a solução ótima. Pretende-se ainda variar o espaço de busca mudando a abertura (discretização) das possibilidades de despacho

hidráulico com o intuito de ganhar tempo computacional.

A consistência dos resultados será avaliada tomando-se como referência modelos baseados em Programação Dinâmica Determinística e algoritmos de fluxo em rede não linear, implementados na ferramenta de suporte à decisão *HydroLab*<sup>®</sup> (Cicogna, 1999).

## 1.4 Artigos técnicos publicados

Ao longo da nossa pesquisa foram publicados os seguintes artigos técnicos relacionados ao tema planejamento energético:

(**Guedes et al., 2009**) propõem uma abordagem ao problema do planejamento energético através de uma ferramenta computacional, complementar as já existentes, que faça uso de novas técnicas de otimização, tal como otimização colônia de formigas, cujas principais características sejam, entre outras, computação distribuída, desenvolvimento Wiki e programação em código aberto;

(**Sodré et al., 2009b**) realizam uma análise econômica de diversas fontes de energia elétrica tentando retratar o quadro de custo de produção de cada fonte e entender a composição destes buscando discutir o melhor direcionamento dos investimentos em geração elétrica. Este enfoque é necessário para que os investimentos em geração de energia elétrica atendam a busca por um custo energético módico ao país. Dessa maneira, diversos tipos de fonte foram analisados através do método de fluxo de caixa descontado (DCF) obtendo como resultado uma tarifa que retorna o investimento analisado para cada tipo de fonte;

(**Sodré et al., 2009a**) analisam os resultados dos Leilões de Energia Nova (LEN) referentes à expansão da geração de energia elétrica na Região Nordeste do Brasil. São analisados os LEN's de 2005 a 2008, que resultaram numa potência instalada de mais de 10.800 MW de térmicas na referida região. Esta análise foi feita à luz dos critérios utilizados para o Planejamento da Expansão Energética;

(**Guedes e Cavalcanti, 2009**) apresentam o panorama que se configura com a inclusão de geração eólica na matriz elétrica nacional, atrasos em obras de geração hidroelétrica e

exclusão de térmica indicativa. São avaliados aspectos referentes à evolução temporal da geração térmica e hidráulica, do custo marginal de operação, do custo total esperado de operação entre outros;

(**Guedes et al., 2011a**) apresentam a análise do regime de vento de diferentes regiões do Nordeste individualmente e em conjunto, avaliando as variações locais e globais na produção de energia elétrica associada;

(**Guedes et al., 2011b**) tratam da aplicação da meta-heurística construtiva baseada no comportamento das colônias de formigas na elaboração de algoritmo de otimização aplicado à solução do problema da operação de sistemas hidrotérmicos;

## 1.5 Organização do Trabalho

Para maior clareza do contexto em que se insere este trabalho e dos objetivos almejados, o corpo da dissertação em questão está estruturado da seguinte forma:

No **Capítulo 1** é apresentada uma introdução geral com foco no contexto do trabalho, motivação e objetivos a serem alcançados;

No **Capítulo 2** explora-se o conceito de sistemas hidrotérmicos, o problema da operação de sistemas hidrotérmicos, os modelos matemáticos oficiais do setor elétrico nacional e as características básicas de usinas hidroelétricas e termoelétricas;

No **Capítulo 3** apresenta-se a otimização por colônia de formigas, abordando inicialmente o comportamento real das formigas e em seguida a meta-heurística inspirada neste comportamento bem como a bibliografia básica relacionada a este tema;

No **Capítulo 4** são introduzidas as alterações propostas neste trabalho para adequação do método heurístico supracitado ao problema da operação de sistemas hidrotérmicos. Neste contexto, também é apresentado o modelo matemático de usinas hidroelétricas assim como a função de custo térmico empregada neste trabalho;

No **Capítulo 5** são contemplados os resultados referentes a um estudo de caso com a Usina Hidroelétrica de Sobradinho e inserção de parques eólicos;

No **Capítulo 6** encontram-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

# 2

## Sistemas Hidrotérmicos

Denomina-se hidrotérmico o sistema elétrico de geração composto preponderantemente por usinas hidroelétricas e termoelétricas. No Brasil, cerca de 90% da demanda por energia elétrica é suprida por usinas hidroelétricas, o restante é praticamente atendido por usinas termoelétricas (ONS, 2011a). São diversas usinas hidroelétricas e termoelétricas conectadas às cargas por intermédio de um grande e complexo sistema de transmissão em alta tensão. Trata-se de um sistema hidrotérmico de grandes dimensões (ONS, 2011b).

A energia elétrica é disponibilizada para a sociedade a partir da conversão de outras modalidades de energia. As fontes primárias encontradas na natureza apresentam características estocásticas e sazonais que dificultam o seu aproveitamento e posterior gerenciamento. É necessário, portanto, encontrar mecanismos para controlar e maximizar o aproveitamento do recurso primário disponível. Nesse sentido, em se tratando de aproveitamentos hidroelétricos, uma alternativa é a construção de reservatórios de acumulação, para armazenamento de água para uso futuro em períodos de estiagem, ou de compensação, para criação de desnível favorável a turbinas de maior potência em virtude do incremento na energia potencial.

Infelizmente, nem toda energia afluyente disponível na natureza pode ser estocada para uso futuro ou ter suas características naturais alteradas para mitigação das incertezas associadas. A energia eólica é um exemplo de fonte cujo despacho está condicionado à existência de vento. Trata-se de uma geração incontrolável que precisa ser compensada com outras fontes de geração de energia elétrica. Assim, para fazer frente à baixa produção hidroelétrica nos

períodos de estiagem bem como compensar as variações na produção de fontes alternativas, faz-se necessário instalar parques térmicos capazes de compensar a perda de potência nas usinas hidroelétricas em virtude do deplecionamento dos reservatórios e garantir reserva de água para operação futura evitando custos marginais de operação muito elevados, racionamentos ou mesmo cortes de carga.

## 2.1 Usinas Hidroelétricas

As usinas hidroelétricas são estruturas capazes de converter a energia potencial de quedas d'água em energia elétrica. Como o Brasil é um país favorecido por grandes quantidades de recursos hídricos em várias bacias hidrográficas com diversas possibilidades de aproveitamento hidrolétrico, essa alternativa para geração de energia elétrica torna-se a mais comum no sistema elétrico nacional. Além de ser abundante em nosso país, a fonte primária para as usinas hidroelétricas é limpa, renovável e barata. A tecnologia empregada nesses aproveitamentos é madura e bastante difundida em nosso país, colocando-nos como referência em aproveitamentos hidroelétricos (Bortini et al., 1999).

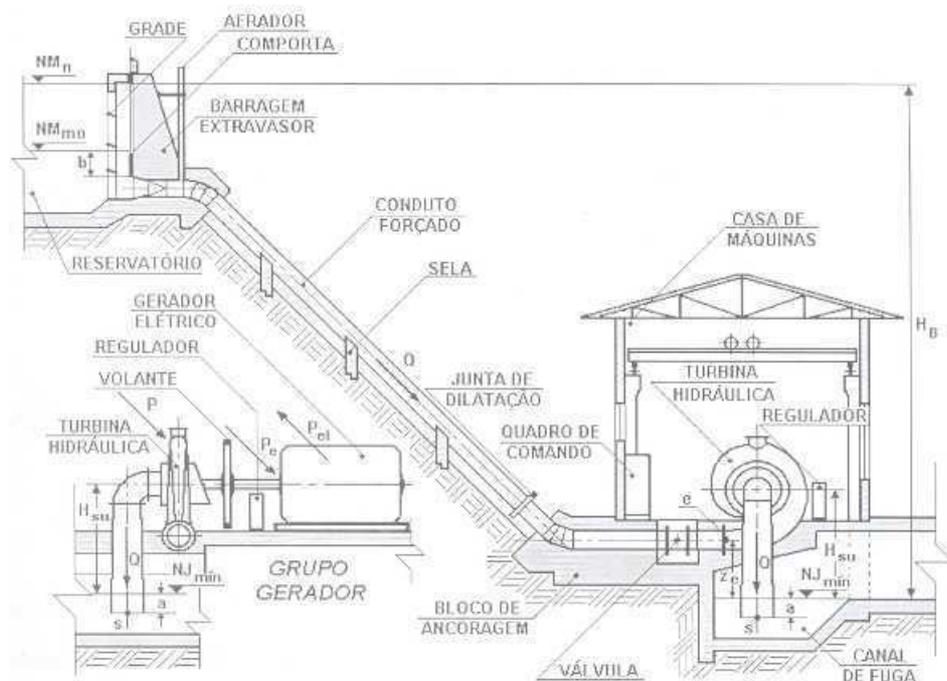
Uma usina hidroelétrica é composta basicamente por três partes fundamentais, a saber: barragem, casa de máquinas e vertedor. A barragem é construída com o objetivo de criar um reservatório para acumulação de água permitindo sua captação e desvio, regularização total ou parcial das vazões e amortecimento de ondas de enchente. Além disso, a barragem proporciona um desnível adequado a empreendimentos hidroelétricos ou condições de navegabilidade ao rio, garantindo a profundidade adequada (Bortini et al., 1999). Durante o processo de produção de energia elétrica a água armazenada no reservatório é direcionada para canais de adução e conduzida sob pressão por condutos forçados até o conjunto de turbinas na casa de máquinas. Ou seja, inicialmente ocorre transformação de energia potencial hidráulica em energia cinética e energia de pressão dinâmica no conduto forçado e em seguida essa energia é convertida em energia cinética de rotação pela turbina hidráulica cujo eixo encontra-se acoplado ao eixo de um gerador elétrico onde ocorre a conversão de energia cinética de rotação em energia elétrica (Schreiber e Gerhard, 1978).

Muitas vezes a área alagada necessária à formação do volume desejado para o empreendimento chega a valores ambientalmente inviáveis. Nesse caso, não havendo possibilidades para

construção de reservatórios de acumulação tenta-se ao menos construir reservatórios de compensação, caso contrário aproveita-se, quando viável, o desnível natural do rio com turbinas apropriadas (Fuchs et al., 1983).

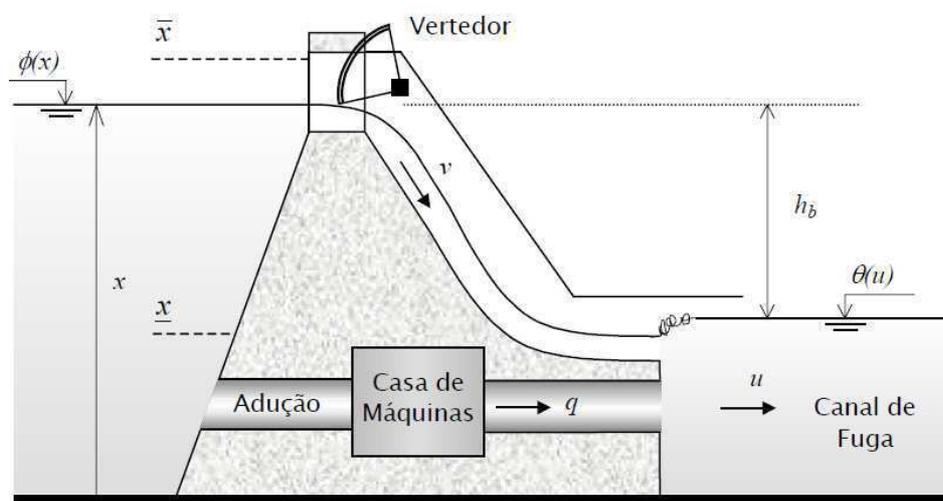
Quando a vazão turbinada na casa de máquinas não é suficiente para extravasar o volume de águas em excesso no reservatório faz-se uso dos vertedores cuja função é justamente manter sob controle a cota de montante (Schreiber e Gerhard, 1978).

A Figura 2.1 ilustra a estrutura básica de uma usina hidroelétrica de represamento em corte longitudinal com seus principais componentes. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema simplificado destacando-se as principais variáveis empregadas em modelos matemáticos de simulação e otimização da operação de sistemas elétricos com parques hidráulicos, ver Tabela 2.1.



Fonte: (Bortini et al., 1999)

Figura 2.1: Estrutura básica de uma usina hidroelétrica



Fonte: (Cicogna, 2003)

Figura 2.2: Variáveis do modelo matemático de usinas hidroelétricas

Tabela 2.1: Variáveis de UHE empregadas em modelos de otimização

$x$ :	Volume do reservatório [ $hm^3$ ]
$\bar{x}$ :	Volume máximo operativo do reservatório [ $hm^3$ ]
$\underline{x}$ :	Volume mínimo operativo do reservatório [ $hm^3$ ]
$\phi(x)$ :	Cota de montante [ $m$ ]
$\theta(u)$ :	Cota de jusante (canal de fuga) [ $m$ ]
$q$ :	Vazão turbinada (engolimento) [ $m^3/s$ ]
$\nu$ :	Vazão vertida [ $m^3/s$ ]
$y$ :	Vazão afluyente [ $m^3/s$ ]
$u$ :	Vazão defluente [ $m^3/s$ ]
$h_b$ :	Altura de queda bruta [ $m$ ]

## 2.2 Usinas Termoelétricas

As usinas termoelétricas processam variados tipos de combustíveis em diferentes ciclos termodinâmicos. No Brasil, segundo dados do Banco de Informações de Geração - BIG/ANEEL, encontram-se parques térmicos a gás natural, carvão, óleo combustível, óleo diesel, fissão nuclear e biomassa. O objetivo comum a todas essas tecnologias é o de acionar indiretamente o eixo de geradores elétricos para conversão da energia cinética de rotação em energia elétrica. Os dois ciclos termodinâmicos mais empregados no Brasil para geração de energia elétrica são o ciclo Rankine e o ciclo Brayton podendo haver a combinação desses dois ciclos para formação do chamado ciclo combinado. No primeiro, o fluido de trabalho é o vapor e no segundo trabalha-se com gás, ambos sob pressão.

Uma instalação a vapor é composta basicamente de caldeira, bomba, condensador, turbina e gerador conforme se observa na Figura 2.3.

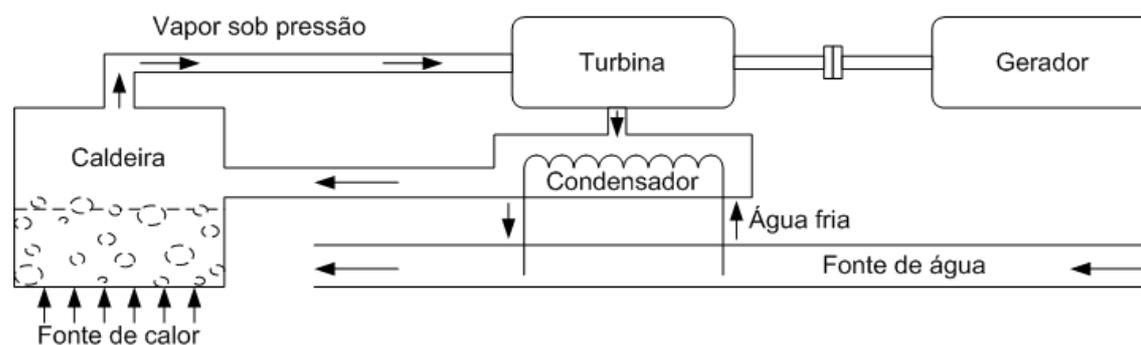


Figura 2.3: Estrutura básica do ciclo Rankine

Instalações que operam com ciclo Brayton são compostas basicamente por compressor, câmara de combustão, turbina a gás e gerador conforme é ilustrado na Figura 2.4.

É importante observar que o custo de operação das centrais termoelétricas está fortemente relacionado ao custo do combustível empregado no processo como fonte primária de energia. Dessa forma, quanto maior o custo do combustível maior será o custo de operação da planta.

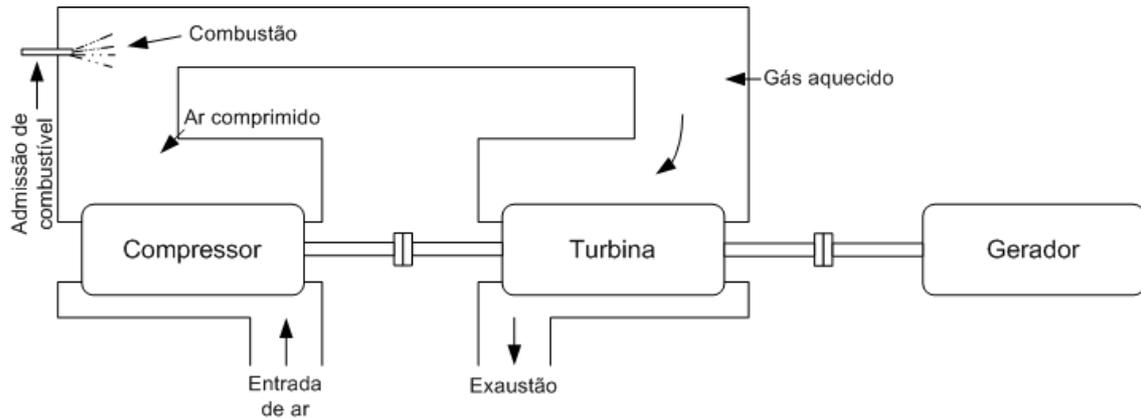


Figura 2.4: Estrutura básica do ciclo Brayton

## 2.3 O Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

O problema da operação de sistemas hidrotérmicos está relacionado às decisões periódicas que precisam ser tomadas quanto aos montantes de geração hidroelétrica e termoelétrica que devem ser despachados para atendimento da carga a cada instante e que minimize o custo esperado total de operação durante o horizonte em estudo. No caso de sistemas puramente térmicos, essas decisões são simplificadas e normalmente o despacho é realizado por ordem de mérito, isto é, a partir da mais barata. Com isso, o custo marginal de operação será o custo de atendimento de uma unidade de energia a cada instante. No entanto, em sistemas hidrotérmicos a função de custo é composta pela função de custo imediato referente ao despacho atual somada à função de custo futuro, relacionada às decisões operativas anteriores associadas a despachos hídricos e térmicos nas diferentes regiões elétricas do sistema (submercados). Ou seja, é preciso encontrar um equilíbrio entre o benefício presente do uso da água e o benefício futuro de seu armazenamento, medido em termos da economia esperada dos combustíveis das usinas termoelétricas (Araripe e Fortunato, 1990) e (CCEE, 2007).

A disponibilidade das usinas térmicas está relacionada à disponibilidade do combustível. Considerando-se o combustível sempre disponível parte-se para o gerenciamento dos recursos hídricos que embora sejam renováveis apresentam características estocásticas e sazonais que influenciam na sua disponibilidade futura. Ademais, conforme comentado no tópico anterior, o deplecionamento do reservatório diminui a queda bruta e conseqüentemente a potência da central hidroelétrica por limitações da turbina e embora não tenha sido comentado no tópico referente a usinas hidroelétricas, há também perdas no rendimento das máquinas (curva de

colina) e variação no engolimento máximo das turbinas em virtude de mudanças na queda líquida (curva chapéu) (Araripe e Fortunato, 1990). Dessa forma, a operação dos reservatórios em cotas muito baixas pode levar o sistema a custos marginais de operação elevados em virtude da complementação crescente das usinas termoelétricas caso ocorra um período chuvoso desfavorável. Por outro lado, a operação dos reservatórios em cotas elevadas pode levar o sistema a vertimentos indesejáveis caso haja períodos chuvosos favoráveis. Extravasar água pelos vertedores como consequência de decisões passadas favoráveis ao armazenamento é um resultado discrepante com políticas ótimas de operação (Cicogna, 2003).

Torna-se então fundamental conhecer o regime de vazões afluentes aos reservatórios do sistema para alimentar modelos matemáticos de otimização capazes de auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos com políticas ótimas de operação na busca do melhor uso dos recursos naturais disponíveis. Assim, diversas possibilidades de regimes hidrológicos devem ser avaliadas, pois as decisões operativas estão relacionadas aos cenários de afluências considerados.

Logo, o planejamento da operação e da própria expansão do sistema elétrico trabalha com previsões de mercado e de vazões afluentes com vistas à otimização da operação e ao dimensionamento adequado do sistema elétrico, levando em consideração indicadores estatísticos.

## 2.4 Modelos Oficiais do Setor Elétrico Nacional

O planejamento da operação energética nacional utiliza uma série de modelos matemáticos que contemplam diferentes horizontes de planejamento e graus de detalhamento para representação do sistema interligado nacional. Assim, têm-se modelos de longo, médio e curto prazo (ONS, 2009a) e (Araripe e Fortunato, 1990).

Na formulação de longo prazo, normalmente cinco anos, aplica-se o modelo de otimização hidrotérmica a subsistemas equivalentes interligados - NEWAVE, baseado em Programação Dinâmica Dual Estocástica - PDDE (CEPEL, 2001). Nesse modelo, as usinas hidroelétricas de cada submercado são agregadas em um reservatório equivalente por submercado com interconexões representadas por limites de intercâmbios. Nessa abordagem aplica-se um modelo autoregressivo periódico denominado PAR(p) para geração de séries de afluências

estocásticas a serem aplicadas num horizonte de estudo em base mensal, onde  $p$  é a ordem do citado modelo, isto é, o número de termos autoregressivos aplicado em cada período de previsão, ver (Maceira e Mercio, 1997) e (Kelman et al., 1992). O objetivo é o cálculo da política ótima de operação que minimiza o custo futuro de operação do sistema hidrotérmico.

Ainda com o objetivo de calcular a política ótima de operação do sistema hidrotérmico, porém em um horizonte de médio prazo, aplica-se o modelo para otimização da operação de médio prazo com base em usinas individualizadas - DECOMP (CEPEL, 2004). Esse modelo também se baseia na PDDE e considera as características físicas e restrições operativas das usinas hidroelétricas individualmente. Os resultados mensais obtidos pelo modelo NEWAVE são entradas para o modelo DECOMP que trata o problema em um horizonte anual com base mensal sendo o primeiro mês discretizado em base semanal. Tem-se assim, metas semanais de geração para cada agente gerador do Sistema Interligado Nacional.

Outros modelos são aplicados no setor elétrico nacional com diversas finalidades e podem ser encontrados em (ONS, 2009b).

# 3

## Otimização por Colônia de Formigas

Muitos métodos de otimização se inspiram no comportamento coletivo de animais e insetos na busca do bem estar da sua comunidade (Dorigo et al., 2006) e (de França, 2005). Um exemplo é encontrado nas colônias de formigas onde cada formiga recebe ajuda da comunidade durante a sua evolução e ao mesmo tempo contribui com a coletividade para o bem estar da colônia como um todo. Embora apresentem capacidades cognitivas individuais limitadas, as formigas são capazes de resolver, em coletividade, problemas complexos como encontrar o menor caminho entre o ninho e a fonte de alimento (Dorigo e Stützle, 2004).

A Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO) é uma meta-heurística construtiva baseada no comportamento das colônias de formigas. A primeira abordagem baseada em ACO foi proposta por Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo e Alberto Coloni, sendo chamada de *Ant System* - AS (Dorigo, 1992) e (Dorigo et al., 1991). O AS foi aplicado inicialmente na solução do problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* - TSP) (Bianchi et al., 2002) e no problema quadrático de alocação (*Quadratic Assignment Problem* - QAP) (Gambardella et al., 1999) e (Maniezzo et al., 1994).

Apesar de recente, diversos trabalhos podem ser encontrados sobre AS. Dorigo, Gambardella, Hoos e Stützle criaram versões variadas da primeira abordagem publicada, como o *Elitist Ant System* - EAS (Dorigo, 1992) e (Dorigo et al., 1996), *Ant Colony System* - ACS (Dorigo e Gambardella, 1997a), (Dorigo e Gambardella, 1997b) e (Gambardella e Dorigo, 1996), *MAX-MIN Ant System* - MMAS (Stützle e Hoos, 1999) e *Ant-Q* (Gambardella e

Dorigo, 1995).

### 3.1 Comportamento real das formigas

Ao saírem do ninho para procurar alimentos, as formigas, em um primeiro momento, se dispersam aleatoriamente. Para marcar o caminho percorrido, elas depositam ao longo do trecho explorado uma substância chamada feromônio. Essa substância química evapora com o tempo fazendo com que os caminhos longos apresentem uma baixa taxa de feromônio, deixando tal caminho menos atrativo para outras formigas pois as suas decisões se baseiam nas informações de feromônio referentes a todos os percursos. Assim, para caminhos curtos, a formiga chegará ao alimento e retornará ao ninho rapidamente e a taxa de feromônio se apresentará mais forte, passando a atrair cada vez mais formigas para o caminho mais curto. Mesmo apresentando uma alta taxa de feromônio, um dado caminho pode não ser escolhido, pois existem ainda variáveis aleatórias nas decisões das formigas. No entanto, a probabilidade de escolha de um determinado percurso é diretamente proporcional ao seu nível de feromônio (Stützle e Dorigo, 1999) e (Dorigo e Di Caro, 1999).

Com o passar do tempo, o feromônio depositado ao longo das opções referentes a distâncias maiores se apresentará cada vez mais fraco frente às taxas de feromônio associadas aos caminhos mais curtos. Dessa forma, as decisões referentes a caminhos longos serão paulatinamente esquecidas, prevalecendo as decisões por caminhos curtos. Com isso, todas as formigas passarão a seguir o caminho mais curto entre o ninho e a fonte de alimento. A solução ótima é, portanto, construída a partir do trabalho conjunto de todos os membros da colônia de formigas.

### 3.2 Meta-heurística construtiva

A Meta-heurística reúne um conjunto de conceitos aplicáveis na formulação de métodos heurísticos destinados a resolver diversos tipos de problemas do mundo real. Portanto, Meta-heurística Construtiva consiste em estabelecer estratégias de programação destinadas à construção de soluções viáveis de forma gradativa (Zapellini, 2009).

A seguir abordaremos as formulações matemáticas mais empregadas para representação

de formigas virtuais, mostrando suas diferenças e evoluções.

### 3.2.1 Ant System - AS

O AS, conforme já comentado, foi a primeira abordagem matemática, inspirada no comportamento das colônias de formigas, empregada para otimização de problemas combinatoriais como o TSP.

Inicialmente as formigas artificiais selecionam aleatoriamente um ponto de partida para então seguirem suas trajetórias tomando novas decisões de destino em cada estágio alcançado. Durante ou no fim do percurso de cada etapa, elas depositam feromônio de forma indiscriminada ou proporcionalmente à qualidade de sua solução dependendo da abordagem adotada. Dessa forma, haverá níveis diferenciados de feromônio relacionados a cada opção disponível cuja probabilidade de escolha é dada por (3.1).

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k(t)} [\tau_{il}(t)]^\alpha \eta_{il}^\beta} & \text{se } j \in N_i^k \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Considerando-se o caso do TSP,  $N_i^k(t)$  é o conjunto de cidades ainda não visitadas pela formiga  $k$ , localizada na cidade  $i$ , no instante  $t$ . O parâmetro  $\eta_{ij}$  é a visibilidade, informação que maximiza a probabilidade de escolha de cidades mais próximas, do trecho entre as cidades  $i$  e  $j$ , sendo  $\tau_{ij}(t)$  o nível de feromônio associado a esse mesmo trecho no instante  $t$ . A visibilidade de um dado percurso, no caso do TSP, é o inverso da sua distância. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes que influenciam as decisões das formigas virtuais alterando a importância do nível de feromônio ou da visibilidade em cada trecho quando do cálculo da probabilidade de escolha, conforme (3.1). Assim, para eliminar a influência da visibilidade, por exemplo, faz-se  $\beta$  igual a zero e  $\alpha$  diferente de zero. Com isso, as decisões levarão em consideração apenas o nível de feromônio nas trilhas.

O incremento de feromônio é uma etapa importante nos modelos baseados em colônia de formigas visto que o nível de feromônio associado a cada caminho influencia no cálculo da probabilidade de escolha relacionada. Torna-se, portanto, fundamental elaborar uma estratégia de atualização das taxas de feromônio nos diversos trechos do problema, procurando evitar não apenas a insistência em alternativas não ótimas como também a ineficiência na

exploração de outros trechos em virtude de altas taxas de feromônio concentradas em poucas alternativas.

No AS, a atualização dos níveis de feromônio é feita aplicando-se (3.2), onde  $\rho \in (0, 1]$  é a taxa de evaporação,  $\tau_{ij}(t)$  é o nível de feromônio no trecho  $ij$  no instante  $t$ ,  $n_f$  é o número total de formigas e  $\Delta\tau_{ij}$  é o incremento a ser realizado pelo agente  $k$  nesse mesmo trecho no instante  $t$ , dado por (3.3).

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^{n_f} \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.2)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{se } k \text{ percorre o trecho } ij \text{ em sua solução} \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (3.3)$$

Na expressão (3.3)  $Q$  é uma constante e  $L_k$  é a distância percorrida pela formiga  $k$  após percorrer todas as  $n_c$  cidades.

Salienta-se que a primeira decisão de todas as formigas é tomada ao acaso, as demais levam em consideração (3.1). O nível inicial de feromônio em cada trecho deve ser inicializado com valor diferente de zero para evitar divisão por zero. Após a realização de uma expedição, isto é, ter visitado todas as cidades, atualiza-se o nível de feromônio de cada trecho entre cidades, segundo (3.2), evaporando parte do feromônio já depositado afim de minimizar a influência de alternativas ruins. O processo é repetido até o algoritmo encontrar o conjunto de decisões que promovem a melhor alternativa para visitar todas as cidades, sem repetição, com menor distância de percurso.

A abordagem supracitada é conhecida como *AS Ant-Cycle* por tratar da atualização dos níveis de feromônio apenas no final da expedição, isto é, após visitar as  $n_c$  cidades. Em (Dorigo et al., 1996) encontra-se, ainda, duas outras abordagens que variam do *AS Ant-Cycle* por praticarem a atualização do feromônio a cada nova decisão de cidade a ser visitada além de aplicarem um incremento  $\Delta\tau_{ij}^k$  constante para cada trecho  $ij$  no caso da abordagem *AS Ant-Density* ou inversamente proporcional à distância do citado trecho em se tratando da abordagem *AS Ant-Quantity*.

### 3.2.2 Elitist Ant System - EAS

O EAS é um melhoramento do AS, onde aparece a figura das formigas de elite. Nessa abordagem, após todas as formigas terem visitado o total de cidades do problema, haverá diversas soluções, entre as quais será escolhida, para reforço de feromônio, aquela que apresenta o menor comprimento  $L$ . Isto é, o melhor percurso, em cada expedição, será reforçado com o intuito de aumentar a atratividade da melhor solução apresentada, conforme (3.4), onde  $\Delta\tau_{ij}^{best}$  é definido de forma análoga a  $\Delta\tau_{ij}^k$  em (3.3).

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k + e \Delta\tau_{ij}^{best} \quad (3.4)$$

O coeficiente  $e$ , em (3.4), é o número de formigas de elite que irão reforçar o nível de feromônio nas trilhas do melhor percurso, apresentado a cada expedição. Valores elevados de  $e$  podem reforçar demasiadamente os níveis de feromônio das trilhas que compõem o melhor percurso e evitar que as formigas explorem novas rotas.

### 3.2.3 Ant Q

A modificação básica introduzida por *Ant-Q* na modelagem do AS diz respeito a atualização dos níveis de feromônio nos diversos trechos que compõem o percurso total. Em AS o nível de feromônio é ajustado após todas as formigas terem concluído a passagem por todas as cidades. A alteração proposta por *Ant-Q* acrescenta atualizações de feromônio sempre que a formiga muda de cidade, conforme (3.5).

$$\tau_{ij}(t + 1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \gamma \max_{l \in N_j^k} (\tau_{jl}) \quad (3.5)$$

Como pode ser observado em (3.5), a cada escolha de novo destino, o feromônio referente ao trecho escolhido é evaporado e atualizado com um valor proporcional à maior taxa observada a partir da cidade  $j$  em um conjunto de trechos ainda não visitados. Ou seja, para um deslocamento da cidade  $i$  (instante  $t$ ) para a cidade  $j$  (instante  $t + 1$ ), por exemplo, evapora-se a taxa de feromônio  $\tau_{ij}(t)$ , referente ao trecho  $i - j$ , a uma taxa de evaporação igual a  $\rho$  e ao mesmo tempo incrementa-se o nível de feromônio deste mesmo trecho com

o valor  $\max_{l \in N_j^k}(\tau_{jl})$  multiplicado pela constante  $\gamma \in (0, 1]$ . O valor de  $\gamma$  é atribuído arbitrariamente de acordo com a experiência e resultados obtidos. Com esse procedimento, consegue-se sinalizar para as formigas que chegarão à cidade  $i$  vantagens ou desvantagens do deslocamento para a cidade  $j$  pois o trecho  $i - j$  terá sido atualizado com o valor máximo de feromônio observado a partir da cidade  $j$ . Assim, para um valor elevado de  $\max_{l \in N_j^k}(\tau_{jl})$  a formiga que chegar à cidade  $i$  tenderá a tomar a decisão de seguir para a cidade  $j$  pois ao chegar em  $j$  haverá pelo menos um trecho com alto nível de feromônio. Trata-se, portanto, de uma previsão construída por uma formiga  $k$  para as demais formigas. A tentação de tomar a decisão por influência da previsão é regulada por  $\gamma$ .

### 3.2.4 Ant Colony System - ACS

As diferenças básicas entre ACS e AS dizem respeito às políticas de atualização dos níveis de feromônio e decisões sobre destinos seguintes.

Em ACS aplica-se a regra de atualização global (após todas as formigas terem concluído suas expedições) de feromônio apenas com a melhor formiga, isto é, atualizam-se apenas os trechos percorridos pela formiga com menor comprimento  $L_k$ . Também é aplicada uma regra de atualização local (em cada trecho visitado) dos níveis de feromônio na medida em que as formigas se deslocam durante a construção da solução.

É introduzida uma nova regra de transição de estado e um parâmetro  $\psi_0$  que delimita sua aplicação de acordo com a variável aleatória  $\psi$  uniformemente distribuída entre 0 e 1. Ou seja, atribui-se aleatoriamente um valor para  $\psi$  antes de aplicar a regra de transição de (3.6).

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{l \in N_i^k(t)} \{[\tau_{il}][\eta_{il}]^\beta\} & \text{se } \psi \leq \psi_0 \\ \text{Regra de AS} & \text{c.c.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Se  $\psi \leq \psi_0$  aplica-se a regra de (3.6), caso contrário toma-se a decisão segundo a regra de transição do AS, (3.1). Ajustes no parâmetro permitem orientar as formigas em suas decisões, levando-as a explorar novos caminhos ou seguir para aqueles de maior concentração de feromônio.

### 3.2.5 Max-Min Ant System - MMAS

Max-Min *Ant System* recebe esse nome por limitar os níveis de feromônio entre valores máximos e mínimos  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ . Além disso, os níveis de feromônio são inicializados com valores correspondentes ao limite máximo e suas atualizações são realizadas apenas pela formiga que apresenta a melhor solução a cada estágio ou após ter concluído a expedição, conforme regra de atualização mostrada em (3.7).

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^{best} \quad (3.7)$$

# 4

## Sistema de Formigas Dinâmico - SFD

Consoante o abordado em tópicos anteriores, *Ant Colony Optimization - ACO* representa um conjunto de técnicas de otimização inspiradas no comportamento das colônias de formigas. Tais técnicas têm sido empregadas com sucesso na solução de muitos problemas combinatoriais. Neste capítulo são apresentados o modelo matemático de usinas hidroelétricas e a técnica de otimização Sistema de Formigas Dinâmico baseada nos modelos ACO citados neste trabalho.

### 4.1 Modelo Matemático SFD

O Sistema de Formigas Dinâmico foi desenvolvido para aplicação em problemas de configuração dinâmica, nos quais a meta  $M$  referente a uma decisão  $D$  em um estágio  $t$  pode ser diferente em novas expedições em virtude das decisões tomadas nos estágios anteriores. Ou seja, o resultado de uma decisão depende das decisões tomadas no presente e no passado, podendo ser diferente para cada agente da colônia de formigas nas expedições iniciais, pois a uniformidade será alcançada com a convergência nas decisões dos agentes envolvidos no processo de otimização em tela. Isto acontece em problemas cujos estados dependem de um histórico de decisões tomadas no passado. Vale salientar que a primeira expedição de cada agente da colônia de formigas é feita com base em decisões tomadas aleatoriamente.

A expressão (4.1) é empregada no cálculo da meta  $M$  imposta a cada agente  $k$  da colônia de formigas após decisão tomada em cada estágio  $t$ . Isto é, a decisão  $D$  tomada por cada

agente  $k$  gera, em cada estágio do problema, uma meta  $M$ , inversamente proporcional à tendência da solução global ( $\Gamma$ ), que deve ser atendida por esse agente para alcançar o próximo estágio e tomar nova decisão. Essa regra permite que os agentes com melhores resultados encontre menores obstáculos nas suas expedições. Com isso, estabelece-se uma ordem de mérito nas conclusões de expedições e conseqüentemente na sinalização para os demais agentes sobre a atratividade de uma determinada rota ou conjunto de decisões.

$$M_D^k(t) = \exp\left(\frac{1}{\Gamma}\right) \quad (4.1)$$

A cada estágio  $t$  do problema está associado um vetor  $F(t)$  que registra o nível de feromônio relacionado a cada alternativa de decisão do estágio  $t$ . Este vetor sofre evaporação a uma taxa ( $\rho$ ) sempre que um agente completa uma expedição. Isto é, aplica-se (4.2) sempre que um agente alcança o último estágio da solução global.

$$F(t) = (1 - \rho) F(t) \quad (4.2)$$

Os níveis de feromônio são inicializados com um valor  $Q$  e atualizados após cada agente concluir sua expedição (solução global). Esta atualização é realizada por todos os agentes da colônia de formigas conforme regra de atualização mostrada em (4.3), onde  $T_k$  é o conjunto de decisões tomadas pelo agente  $k$  durante a construção da sua solução e  $\Omega$  é um parâmetro que indica a qualidade da solução global. Ou seja, quanto melhor a qualidade da solução global alcançada maior será a quantidade de feromônio atribuída ao conjunto de decisões que geraram essa solução.

$$\tau_i(t) = \tau_i(t) + \begin{cases} \exp(\Omega) & \text{se } i \in T_k \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \quad (4.3)$$

A decisão  $D$  tomada em cada estágio  $t$  segue a regra de decisão apresentada em (4.4). Onde  $p_i^k(t)$  é a probabilidade do agente  $k$  decidir pela opção  $i \in I$ , sendo  $I$  o conjunto de alternativas de decisões que podem ser tomadas.  $\tau_i(t)$  é a taxa de feromônio associada à opção  $i$  no instante  $t$ . Nesta regra de decisão, apenas o nível de feromônio é levado em consideração no cálculo do vetor de probabilidades, não há, portanto, nenhuma outra informação envolvida que justifique a aplicação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  abordados nas formulações tradicionais de ACO.

Os valores do vetor de probabilidades são alterados constantemente pelos diversos agentes em virtude de mudanças nos vetores de feromônio. Por isso, sempre que um agente precisa tomar uma decisão, é necessário calcular o vetor de probabilidades para alimentar uma roleta com as diversas opções de decisão onde é realizado um sorteio. A opção com maior probabilidade terá maiores chances de ser escolhida, porém é possível que uma opção com baixa probabilidade seja contemplada, tendo em vista o caráter aleatório.

$$p_i^k(t) = \frac{\tau_i(t)}{\sum_{i=1}^I \tau_i(t)} \quad (4.4)$$

Após concluir sua expedição o agente retorna ao ponto de partida e reinicia o cálculo de nova solução (inicia nova expedição) levando em consideração a experiência acumulada por toda a coletividade. Dessa forma, os vetores feromônio apresentarão distribuições diferentes durante a evolução do algoritmo de otimização, tendendo para a trajetória de solução ótima.

## 4.2 Modelo Matemático de Usinas Hidroelétricas

A seguir é apresentada a demonstração da equação da potência elétrica para uma usina hidroelétrica.

A energia potencial  $E_p$  relacionada a um volume de água  $\vartheta$  com densidade específica  $\rho_{esp}$  e massa  $m = \rho_{esp}\vartheta$ , submetida à aceleração da gravidade  $g$  a uma altura  $h_b$ , é dada por (4.5).

$$E_p = m g h_b \quad (4.5)$$

Considerando-se o rendimento turbina-gerador  $\eta_{tg}$  e o rendimento do conjunto hidráulico  $\eta_p$ , calcula-se a energia elétrica  $E_e$  aplicando-se (4.6).

$$E_e = \eta_{tg} \eta_p E_p = \eta_{tg} \eta_p m g h_b = \eta_{tg} \eta_p \rho_{esp} \vartheta g h_b \quad (4.6)$$

Como a energia elétrica  $E_e$  é a potência elétrica  $P_e$  no tempo  $t$  e o volume de água  $\vartheta$  no tempo  $t$  é a vazão  $q$ , temos a expressão (4.7), onde  $\kappa = \rho_{esp} g$  e  $h_l = \eta_p h_b$  é a queda líquida.

$$P_e = \kappa \eta_{tg} q h_l \quad (4.7)$$

O rendimento  $\eta_{tg}$  do conjunto turbina gerador varia de acordo com as condições de operação do sistema. No entanto, neste trabalho não será contemplada a variação deste coeficiente em função da curva colina da unidade geradora bem como a variação do engolimento máximo da turbina em função da altura de queda líquida  $h_l$ .

A altura de queda bruta  $h_b$  é a diferença entre a cota de montante  $NA_m$ , dada pelo polinômio cota-volume  $\phi(x)$ , e a cota de jusante  $NA_j$  que varia com a vazão defluente (engolimento + vertimento) segundo o polinômio cota-vazão  $\theta(u)$ , conforme (4.8).

$$h_b = \phi(x) - \theta(u) \quad (4.8)$$

É comum representar as perdas hidráulicas por valores em metro a partir de (4.7), fazendo  $h_l = h_p$  e aplicando-se o valor da perda de potência e de vazão turbinada em cada período. Com isso, aplica-se (4.9).

$$h_l = h_b - h_p \quad (4.9)$$

Aplicando-se a Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada - TEIF e a Taxa de Indisponibilidade Programada em (4.7), chega-se a (4.10).

$$P_e = \kappa \eta_{tg} q h_l (1 - TEIF) (1 - IP) \quad (4.10)$$

O volume do reservatório da usina hidroelétrica no início de cada estágio do horizonte de estudo será igual ao volume final do reservatório no estágio anterior, dado por (4.11).

$$x(t+1) = x(t) + y(t) - q(t) - \nu(t) \quad (4.11)$$

Como o volume do reservatório e a vazão defluente são consequências do regime de vazões afluentes ao reservatório em cada período e das vazões turbinadas na usina, o gerenciamento da geração de energia elétrica é realizado com o controle da vazão turbinada, pois as vazões afluentes são variáveis incontrolláveis no processo de otimização do despacho.

Dessa forma, decidindo-se quais vazões turbinar em cada período, os estados do sistema serão conseqüências dessas decisões. Assim, volume armazenado, vertimento, custo operacional e geração hidroelétrica serão gerenciados indiretamente pelo controle de vazão turbinada em cada período.

# 5

## Solução do Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

Neste capítulo, apresenta-se a solução do problema da operação de sistemas hidrotérmicos com uma abordagem ACO baseada nas variantes apresentadas neste trabalho e chamada de Sistema de Formigas Dinâmico - SFD. Para tanto, o problema é modelado de forma a permitir a aplicação do método supracitado. Os resultados apresentados pela abordagem SFD são comparados com as soluções apontadas pela ferramenta de suporte à decisão *HydroLab*<sup>®</sup> (Cicogna, 2003), desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Campinas - UNICAMP. Essa ferramenta computacional contempla uma cadeia de planejamento energético com métodos de otimização determinística baseados em Fluxo em Rede não linear com arcos capacitados (HydroMax) e Programação Dinâmica (HydroProgDin/HydroSim), este último modelo permite contemplar políticas de operação considerando aspectos determinísticos e estocásticos.

### 5.1 Aplicação do Modelo SFD a Sistemas Hidrotérmicos

No modelo SFD, os agentes da colônia de formigas devem decidir sobre os percentuais de vazão a ser turbinada em cada estágio do horizonte de análise. A partir das decisões periódicas, são calculados e atualizados periodicamente todos os estados do sistema. Ou seja, partindo-se de um volume inicial informado no início do primeiro estágio, decide-se com base na regra de decisão adotada, o valor percentual do engolimento máximo  $q_{max}$  a ser turbinado

em cada estágio, observando-se a restrição de vazão defluente mínima.

Deve ser observado que o percentual de turbinamento empregado em um determinado estágio poderá estar relacionado a um valor de potência diferente daquele observado quando se emprega esse mesmo percentual em outros estágios com estados sistêmicos diferentes. Pois à medida que o sistema é operado, o volume do reservatório sofre alterações em cada estágio. Conseqüentemente, a queda líquida  $h_l$  varia constantemente influenciando diretamente a potência da usina hidroelétrica para uma mesma vazão.

Na formulação SFD, a variável  $\Gamma$  aplicada em (4.1) é função da complementação termoelétrica média referentes aos estágios 1 a  $t$ , conforme (5.1), onde  $K_\Gamma$  é uma constante. Assim, atribui-se a cada agente da colônia de formigas, após decisão tomada, uma meta a ser cumprida antes de tomar nova decisão (chegar a novo estágio). Essa meta, pode ser interpretada como uma distância a ser percorrida para chegar a um novo estágio de decisão. Como todas as formigas apresentam um valor fixo de passo, aquela que apresentar uma complementação térmica média menor, frente às demais, durante a evolução da sua solução, conseguirá concluir sua expedição em menor tempo. Cria-se com isso, uma ordem de mérito na etapa de atualização de feromônio, visto que os agentes praticam essa atualização no término das suas expedições, o que permite que as melhores formigas sinalizem para os demais agentes da colônia a atratividade da sua solução.

$$\Gamma(t) = \left( \frac{K_\Gamma}{GT_{med(1at)}} \right)^3 \quad (5.1)$$

A estratégia de atualização do nível de feromônio relacionado a cada uma das alternativas de turbinamento é uma característica importante em ACO. Na abordagem SFD, os níveis de feromônio são atualizados aplicando-se (4.2) e (4.3). O parâmetro  $\Omega$  em (4.3) é calculado aplicando-se (5.2), onde  $K_\Omega$  é uma constante e  $CT_k$  é o custo térmico total referente à solução global proposta pelo agente  $k$ .

$$\Omega = \left( \frac{K_\Omega}{CT_k} \right)^3 \quad (5.2)$$

O percentual  $\xi$  do engolimento máximo  $q_{max}$  turbinado em cada estágio  $t$  segue a regra de decisão apresentada em (4.4). Onde  $\tau_i(t)$  representa o nível de feromônio relacionado ao

percentual de turbinamento  $i$  no estágio  $t$ .

Aplicando-se (5.3) encontra-se o turbinamento que deve ser realizado pelo agente  $k$  em cada estágio  $t$  do problema, sendo  $q_{min}$  o turbinamento mínimo.

$$q_k(t) = \xi_k(t) (q_{max} - q_{min}) + q_{min}, \quad 0 < \xi_k \leq 100\% \quad (5.3)$$

Em resumo, a estratégia descrita acima permite criar uma ordem de mérito na etapa de atualização do nível de feromônio referente às diversas opções de turbinamento em cada estágio. Isto é feito mantendo-se um passo de evolução fixo para cada formiga e atribuindo a cada uma delas uma meta (distância entre estágios) a ser cumprida (percorrida) após cada decisão. Ou seja, em cada "loop" do algoritmo as formigas dão um passo e aquela com menor percurso (meta) concluirá antecipadamente a sua meta, chegando a um novo estágio e tomando nova decisão, recebendo nova meta e seguindo assim até o fim da expedição, quando então atualizará os níveis de feromônio e inicializará nova solução. Como o algoritmo está em "loop", as demais formigas continuarão sua solução (evolução passo a passo) até concluírem suas expedições e atualizarem os níveis de feromônio, para então iniciarem nova solução até o algoritmo convergir. Assim, todas as formigas contribuirão para a formação da solução final levando em consideração a experiência de expedições anteriores, conforme fluxograma apresentado na Figura (5.1).

## 5.2 Estudo de Caso com a UHE Sobradinho

Foi realizado um estudo de caso com a Usina Hidroelétrica Sobradinho, no rio São Francisco, de propriedade da Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF. Os dados referentes a essa usina são apresentados na Tabela 5.1.

O reservatório da UHE Sobradinho é considerado o maior lago artificial do mundo, sendo responsável não apenas pelo controle de cheias no Rio São Francisco mas também pela regularização da vazão para um conjunto de usinas hidroelétricas instaladas em cascata, entre outros benefícios proporcionados. Neste estudo de caso, foram considerados dados de vazão afluente referentes à Média de Longo Termo - MLT. Essa consideração, conforme visto em (Siqueira et al., 2006), implica em resultados semelhantes à abordagem estocástica em ter-

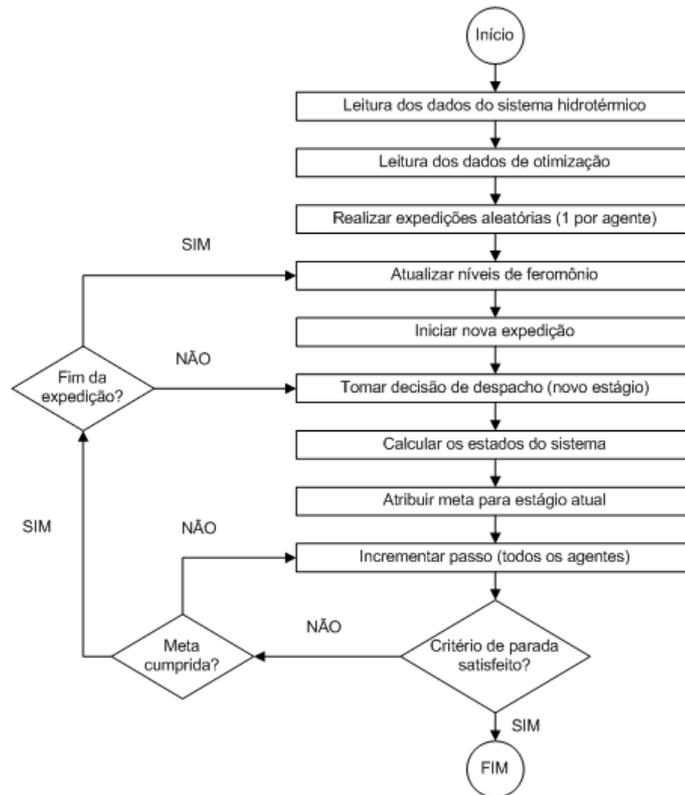


Figura 5.1: Fluxograma ilustrando o algoritmo proposto para o SFD.

mos de geração hidroelétrica e custo de operação em estudos de longo prazo, tendo em vista o longo histórico de vazões naturais registrado na bacia do Rio São Francisco. Esta mesma referência conclui que a abordagem estocástica não introduz melhorias significativas no processo de programação dinâmica em estudos de longo prazo, apesar do esforço computacional empregado.

É possível, em estudos de planejamento de longo prazo e desprezando-se informações como o tempo de viagem da água entre usinas (em geral menor do que o tempo base do estudo), considerar uma planta equivalente para simular todo o parque hidráulico instalado. Essa representação tem eficiência razoável quando os reservatórios possuem grande capacidade de regularização e a região apresenta características hidrológicas homogêneas (Araripe e Fortunato, 1990). A simulação a usinas individualizadas, na configuração em cascata, deve concentrar esforços na gestão dos recursos hídricos armazenados na cabeceira uma vez que a operação das usinas a fio d'água dispostas a jusante é condicionada ao volume de água afluente ao empreendimento disponível em cada estágio de operação, normalmente o volume de água liberado na cabeceira, quando a vazão incremental é desprezível.

Tabela 5.1: Dados da Usina Hidroelétrica Sobradinho

Potência máxima:	1050MW
Engolimento máximo:	3833m <sup>3</sup> /s
Defluência mínima:	1300m <sup>3</sup> /s
Volume máximo operacional:	34116hm <sup>3</sup>
Volume mínimo operacional:	5447hm <sup>3</sup>
Cota de montante - máximo operativo:	392,5m
Cota de montante - mínimo operativo:	380,5m
Produtibilidade específica:	0,0101MW/m <sup>3</sup> /s/m
IP - Taxa de Indisponibilidade Programada:	0,08091
TEIF - Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada:	0,02533

A complementação térmica empregada neste estudo de caso aplica a função quadrática de custo térmico apresentada em (5.4). A característica incremental do custo desta complementação térmica é mostrada na Figura (5.2). Observa-se que a complementação térmica crescente leva o sistema a custos marginais de operação progressivamente mais elevados.

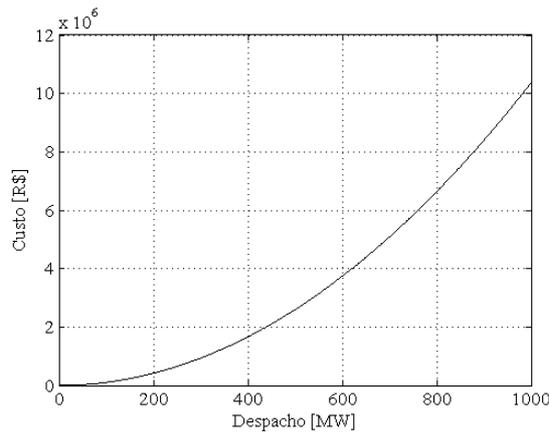


Figura 5.2: Curva característica do custo da complementação térmica.

$$Custo(t) = 0,00002 (MWh)^2 \quad (5.4)$$

O polinômio cota-volume, obtido a partir de medições em campo, que fornece a cota de montante (cota do reservatório) em função do volume no reservatório é apresentado em (5.5) e produz a curva mostrada na Figura (5.3).

$$\phi(x) = -9,545989^{-18} x^4 + 1,155989^{-12} x^3 - 5,35159^{-8} x^2 + 0,00139669 x + 374,179 \quad (5.5)$$

A cota no canal de fuga é calculada a partir do polinômio cota-vazão em (5.6), obtido

a partir de medições em campo, que fornece o valor da cota de jusante em função da vazão defluente, isto é, vazão turbinada somada ao vertimento, se houver. A curva descrita por esse polinômio é ilustrada na Figura (5.4).

$$\theta(u) = -7,702299^{-16} u^4 + 2,50828^{-11} u - 2,96873^{-7} u^2 + 0,00196401 u + 359,6538 \quad (5.6)$$

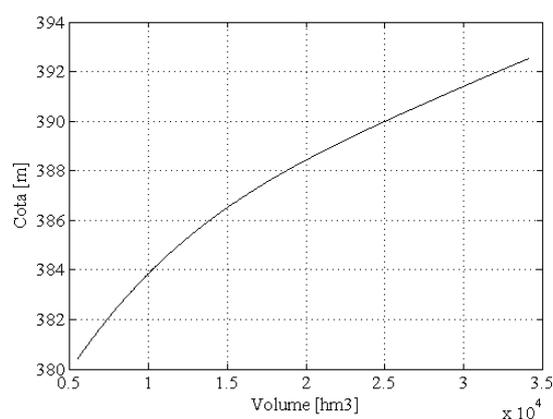


Figura 5.3: Curva Cota-Volume no reservatório de Sobradinho.

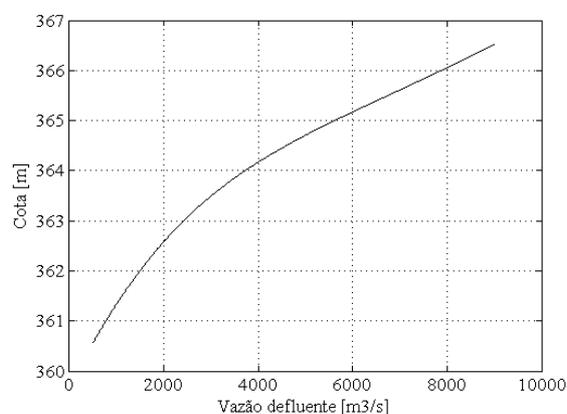


Figura 5.4: Curva Cota-Vazão no reservatório de Sobradinho.

Os valores dos parâmetros referentes ao processo de otimização são apresentados na Tabela 5.2.

### 5.3 Resultados comentados

Neste tópico são apresentados resultados do estudo de caso realizado com a UHE Sobradinho.

Tabela 5.2: Parâmetros do algoritmo de otimização

Volume inicial do reservatório:	70%
Passo da formiga:	0,001
Taxa de evaporação:	5%
Critério de parada (desvio padrão entre soluções):	0,1
Segundo critério de parada (n <sup>o</sup> máximo de passos):	900000
$K_{\Gamma}$ :	igual ao mercado [MW]
$K_{\Omega}$ :	maior custo verificado nas expedições aleatórias

Foram adotadas as seguintes premissas:

- Mercado (carga) constante e igual a 1050MW;
- Engolimento máximo da usina constante e igual ao engolimento efetivo;
- Perda hidráulica constante e igual a 0,5 m;
- Taxa de desconto igual a 12% a.a.

O desempenho do modelo<sup>1</sup> em função do número de formigas é apresentado na Figura 5.5. Observa-se na Figura 5.5(a), em escala logarítmica, que o algoritmo proposto converge para um patamar de aproximadamente  $664MW_{médio}$  e que o tempo computacional apresenta característica crescente em função do número de agentes empregados. Na Figura 5.5(b) é apresentada a evolução do valor presente do custo de operação do sistema em função do número de agentes da colônia de formigas.

Foram feitas simulações com diferentes aberturas do espaço de busca, aplicando uma colônia de formigas com 700 agentes, tendo em vista avaliar o desempenho do algoritmo em termos de resultado e esforço computacional (tempo de processamento). Os resultados são apresentados na Tabela 5.3 e na Figura 5.6.

O algoritmo SFD não sinalizou tendência de convergência com relação a variação da taxa de evaporação entre 1 e 15%.

Na Figura 5.7 são apresentados três resultados de simulações idênticas contemplando colônias de formigas com 700 agentes e abertura igual a 20. Verifica-se persistência nas

<sup>1</sup>Foi utilizado um computador desktop: processador Intel Core Duo 3GHz de frequência e 2GBytes de memória RAM

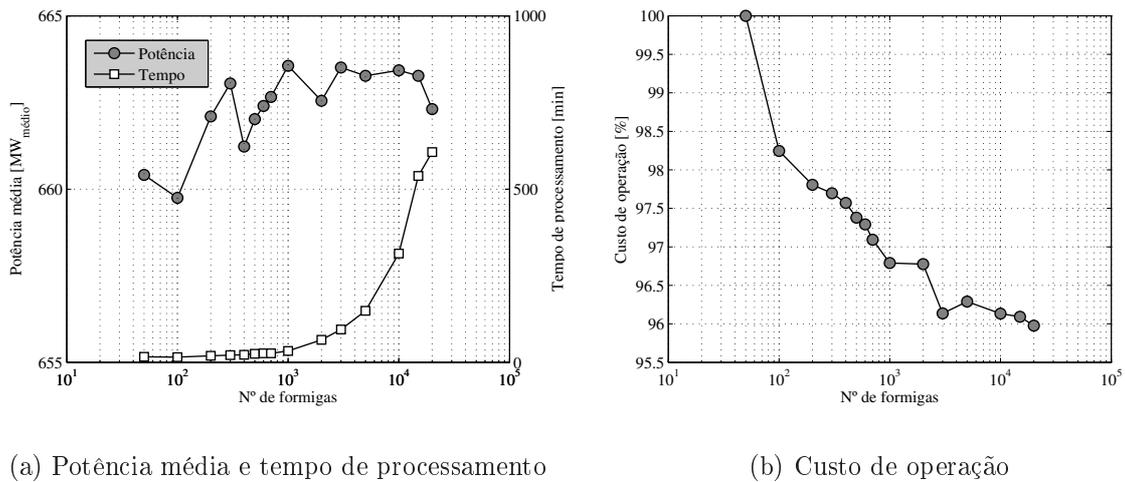


Figura 5.5: Desempenho do modelo em função do número de formigas.

Tabela 5.3: Valores de potência na UHE Sobradinho e tempo de processamento para diferentes aberturas de busca.

Abertura	Tempo de processamento [min]	Potência [ $MW_{médio}$ ]
100	35	663,08
50	30	662,54
25	31	663,80
20	26	663,78

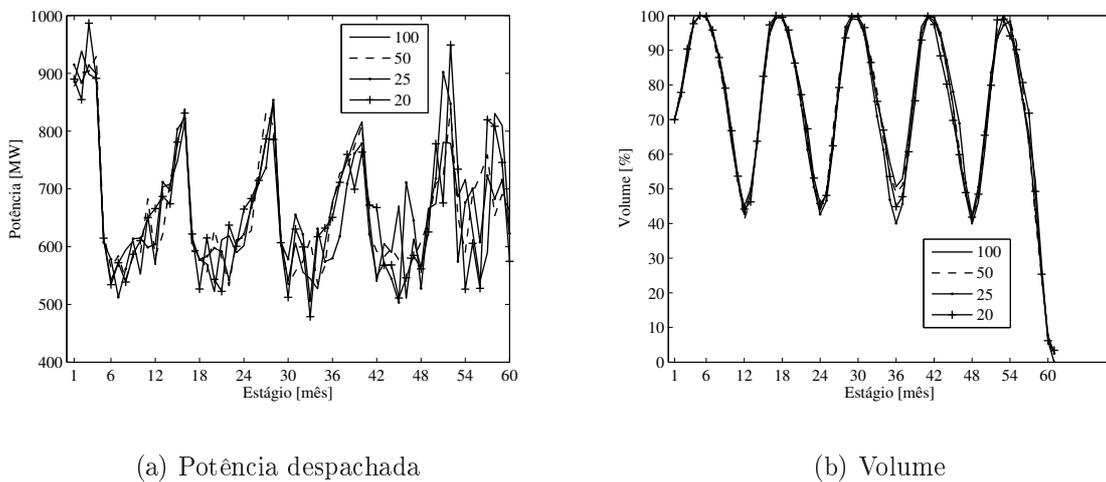


Figura 5.6: Sensibilidade do algoritmo SFD frente a diferentes cenários de abertura nas decisões.

soluções propostas pelo algoritmo SFD, tendo os agentes optado por alternativas muito próximas de despacho na UHE Sobradinho na maioria dos estágios.

Os resultados apresentados até o momento foram publicados em (Guedes et al., 2011b),

este informe técnico aborda também de forma clara e objetiva os aspectos relacionados ao problema da operação de sistemas hidrotérmicos.

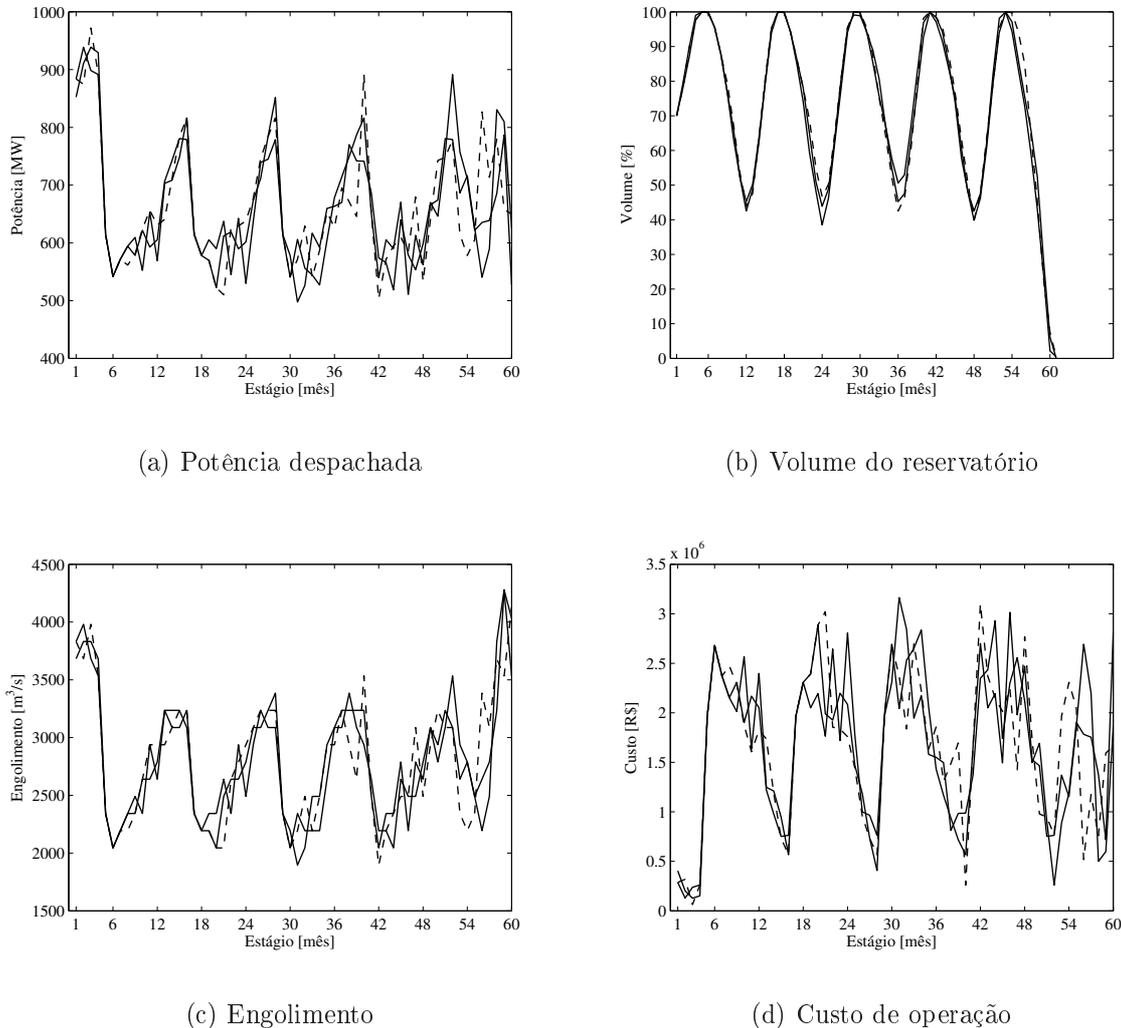


Figura 5.7: Persistência do algoritmo SFD em três simulações com 700 agentes e abertura igual a 20 sem alteração de parâmetros.

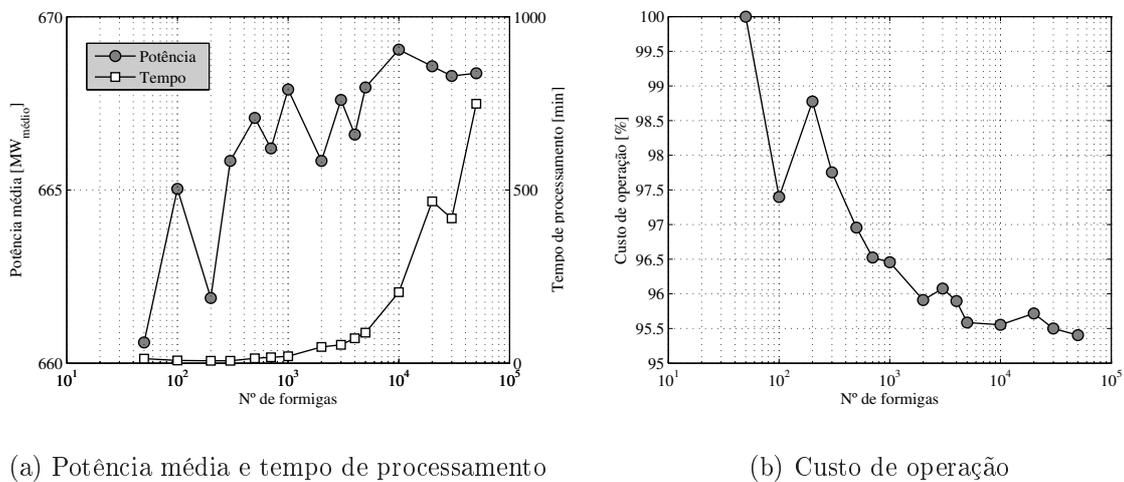
Para reduzir o esforço computacional e melhorar os resultados apresentados anteriormente, foram contempladas as alterações mostradas na Tabela 5.4. As perdas hidráulicas são calculadas para cada valor de vazão turbinada na usina, conforme equação apresentada nesta tabela. Essa correção nas perdas é importante pois o seu valor influencia diretamente no cálculo da potência da usina em cada estágio.

Os benefícios alcançados com as alterações realizadas em termos de desempenho do modelo SFD em função do número de formigas podem ser constatados na Figura 5.8. Observa-se na Figura 5.8(a), em escala logarítmica, que o algoritmo proposto converge para um novo

Tabela 5.4: Alterações realizadas nos dados de entrada do algoritmo.

Passo	0,005
Taxa de evaporação	1%
Perdas hidráulicas	$P_h = c q^2$ , onde $c = 4, 20856E - 08$

patamar de aproximadamente  $669MW_{médio}$  e que o tempo de processamento apresenta característica crescente em função do número de agentes empregados, no entanto esse esforço computacional foi reduzido. Na Figura 5.8(b) é apresentada a evolução do valor presente do custo de operação do sistema em função do número de agentes da colônia de formigas.



(a) Potência média e tempo de processamento

(b) Custo de operação

Figura 5.8: Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias.

Um aumento no número de agentes da colônia de formigas promove maior persistência nos resultados, levando o algoritmo a apresentar trajetórias muito próximas em diferentes simulações. Na Figura 5.9 são apresentadas as trajetórias apontadas como solução ótima em simulações com o emprego de 700, 20000, 30000 e 50000 agentes. Observa-se nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b) que o emprego de 700 agentes leva o algoritmo a uma resposta próxima daquelas apresentadas pelas colônias de formigas com um número maior de agentes. No entanto, em alguns períodos do horizonte de estudo, os resultados se apresentam relativamente distantes, principalmente nos últimos estágios. É importante observar que as simulações com 20, 30 e 50 mil agentes apresentam um desvio padrão menor entre suas trajetórias de soluções quando comparadas com as trajetórias obtidas nas três simulações realizadas com 700 agentes, conforme Figura 5.7.

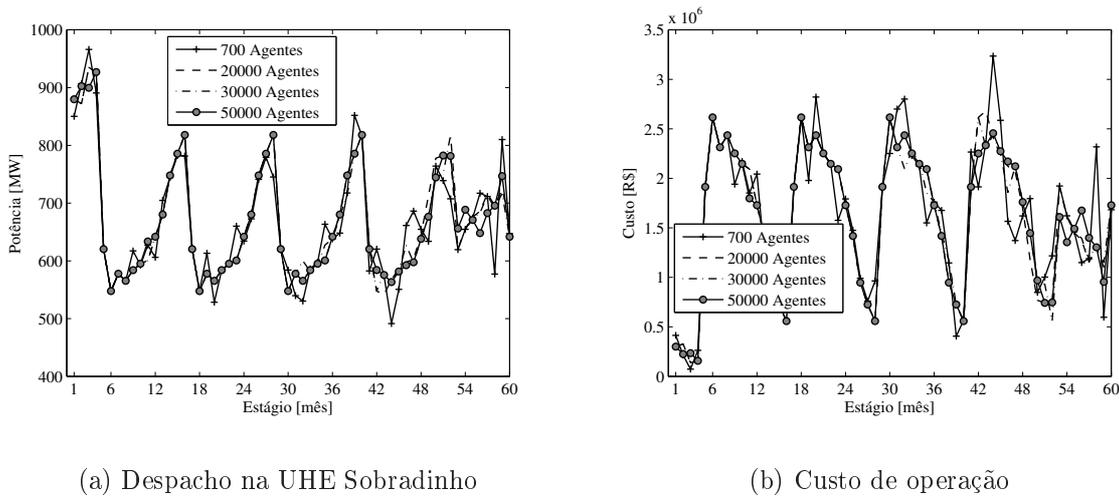


Figura 5.9: Desempenho do modelo em função do número de formigas, considerando algumas melhorias.

Neste trabalho, para efeito de comparação com outros métodos, serão adotados os resultados apresentados na Figura 5.9 encontrados com a aplicação de uma colônia de formigas com 50 mil agentes em um espaço de busca  $20^{60}$  (abertura igual a 20). Ressalta-se que os demais resultados apresentados nesta mesma figura apontaram trajetórias de soluções muito próximas.

São usados como referência os modelos baseados em Fluxo em Rede<sup>2</sup> e em Programação Dinâmica Determinística - PDD<sup>3</sup>.

O SFD se mostra muito consistente e coerente nas soluções, tendo apresentado um valor maior de potência média despachada e menor custo de operação, ver Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Despacho médio e custo de operação referentes aos três métodos em foco.

Método:	SFD	FR	PDD
Despacho médio [ $MW_{média}$ ]:	668,37	664,82	656,77
Custo de operação:	100%	106,45 %	109,96 %

Para enfatizar a trajetória de armazenamento do reservatório aplicada nos três modelos em foco, apresenta-se na Figura 5.10 o comportamento dos modelos em termos de vazão defluente (descarga da usina + vertimento) frente à vazão afluyente aplicada (MLT). Na Figura

<sup>2</sup>Módulo HydroMax da ferramenta de suporte à decisão HydroLab, desenvolvida pela Universidade de Campinas - Unicamp.

<sup>3</sup>Módulo HydroProgDin/HydroSim da ferramenta de suporte à decisão HydroLab, desenvolvida pela Universidade de Campinas - Unicamp.

5.10(a) é apresentada, para cada modelo em foco, o volume de água afluyente e defluyente na UHE Sobradinho. Verifica-se nos últimos estágios valores elevados de descarga referentes aos métodos SFD e FR, fato que esvazia o reservatório conforme será mostrado. As Figuras 5.10(b), 5.10(c) e 5.10(d) mostram claramente os períodos de acumulação e deplecionamento do reservatório, com a aplicação dos métodos SFD, FR e PDD respectivamente. O distanciamento entre as duas curvas dos modelos SFD e Fluxo em Rede, no final do horizonte, mostra que a descarga da usina foi muito maior do que o volume afluyente nesses dois casos, o que implicou em forte deplecionamento do reservatório. Isso acontece porque o compromisso do modelo de otimização está limitado ao horizonte de estudo. Ou seja, como não há compromisso com o futuro além do horizonte de estudo, o modelo esvazia o reservatório. Essa característica não é observada no modelo baseado em PDD pois neste caso é aplicada uma política de operação, calculada e simulada.

Na Figura 5.11 são apresentados os resultados em termos de vazão defluyente, potência da UHE Sobradinho, custo de operação e perdas hidráulicas bem como a vazão MLT aplicada como entrada do processo de simulação.

A trajetória de armazenamento e a queda líquida para os três métodos em análise são apresentadas na Figura 5.12.

Na Figura 5.13, observa-se claramente a complementaridade entre geração hidroelétrica e termoelétrica no atendimento à carga constante em simulação realizada com o modelo SFD.

Em (Guedes e Cavalcanti, 2009) e (Guedes et al., 2011a) constata-se que a geração eólica na região Nordeste do Brasil apresenta característica complementar quando comparada com a produção hidroelétrica da região. Ou seja, durante o primeiro semestre, quando a geração hidráulica apresenta maior oferta, a geração eólica é mais baixa e o contrário se observa no segundo semestre de cada ano.

Para avaliar o efeito da complementação eólica na oferta de energia do sistema em estudo, foi realizada uma simulação SFD, com 50 mil agentes e abertura igual a 20, considerando uma inserção eólica de  $500MW$  instalados no primeiro estágio do horizonte e fator de capacidade apresentado na Tabela 5.6. Com isso, a geração eólica média anual introduzida foi de  $207,92MW_{médio}$ , cujo valor foi adicionado ao mercado constante de  $1050MW_{médio}$  a ser

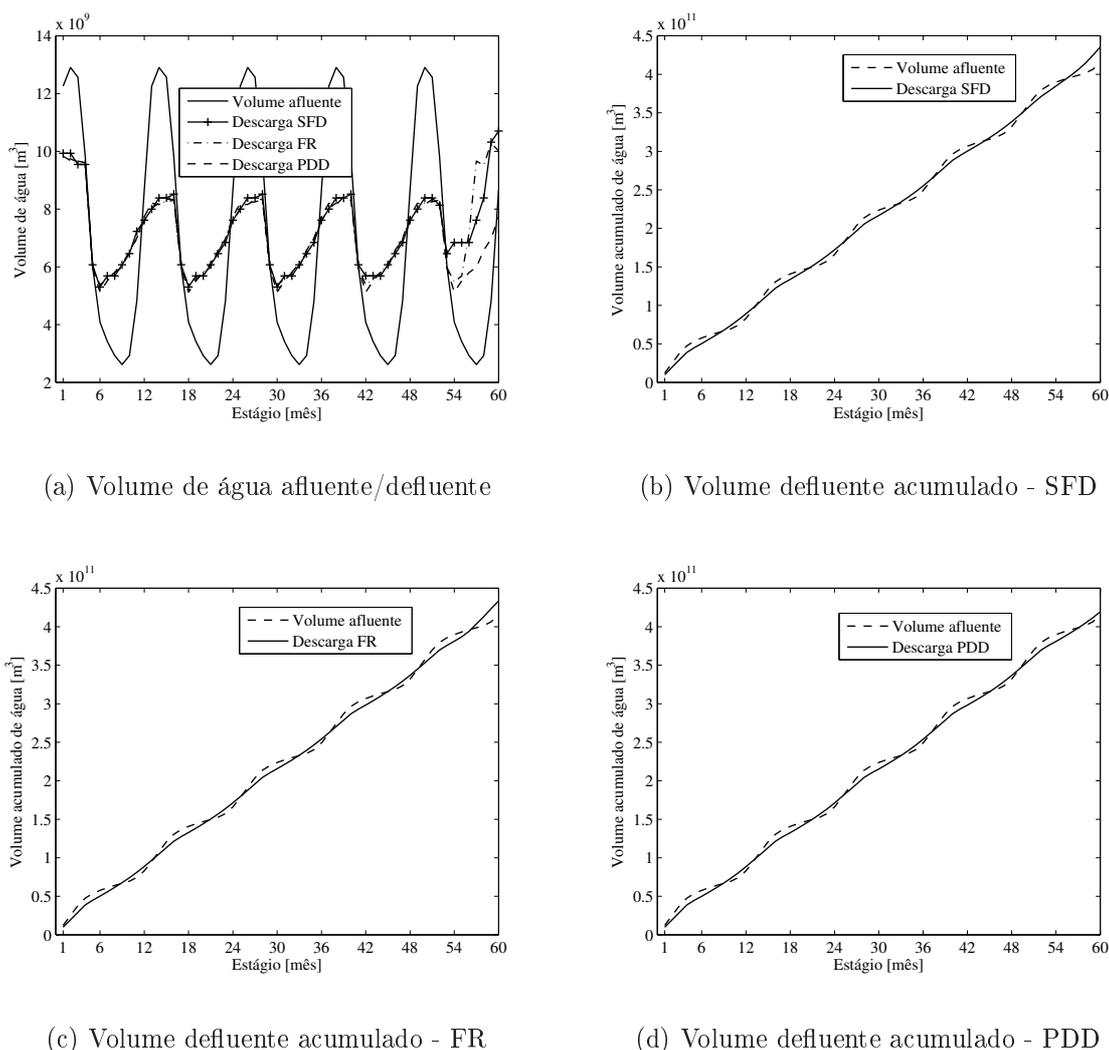


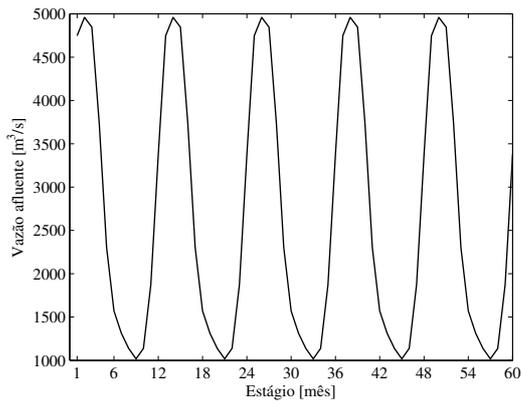
Figura 5.10: Trajetórias de armazenamento do reservatório obtidas com a aplicação de SFD, Fluxo em Rede e PDD.

atendido.

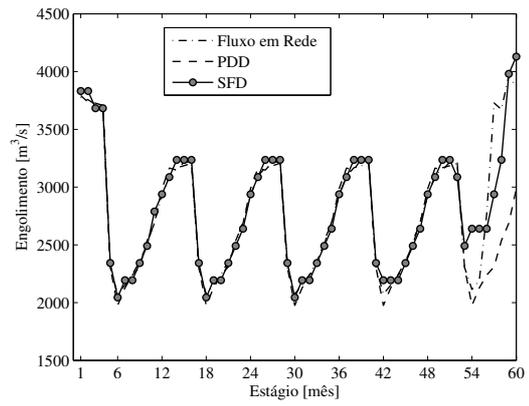
Tabela 5.6: Fator de capacidade típico aplicado na simulação do parque eólico

jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0,35	0,3	0,28	0,29	0,3	0,31	0,38	0,48	0,59	0,67	0,58	0,46

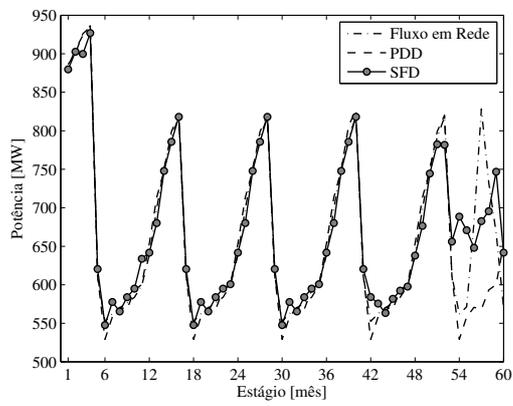
Os resultados obtidos com a inserção eólica supracitada são apresentados na Figura 5.14. Observa-se que o sistema opera com maior segurança energética, mantendo níveis de reservatório acima de 50%, fato que contribui também para aumento de potência na usina em virtude da maior queda proporcionada (houve de fato um aumento de  $3,6MW_{\text{médio}}$  no despacho da UHE em estudo). O valor presente do custo de operação (custo térmico), no entanto, sofreu uma redução de apenas 2,65%. Isso significa que o mercado excedente



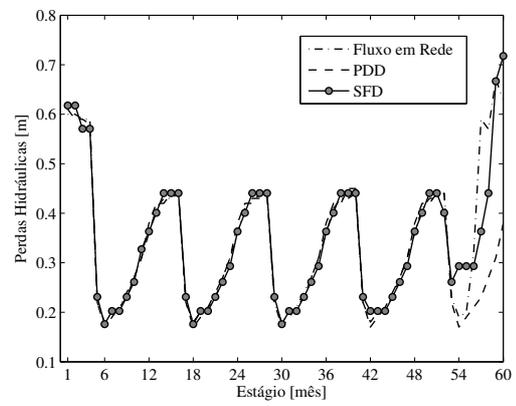
(a) Vazão MLT



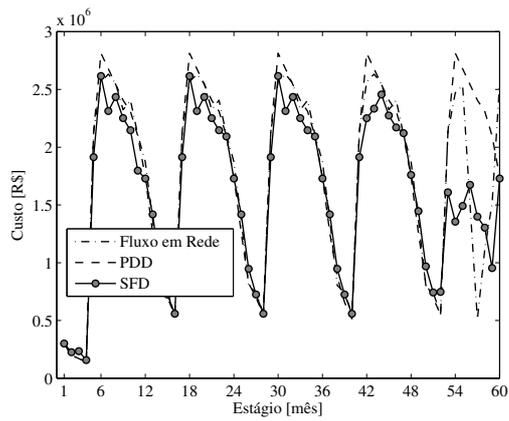
(b) Engolimento da usina



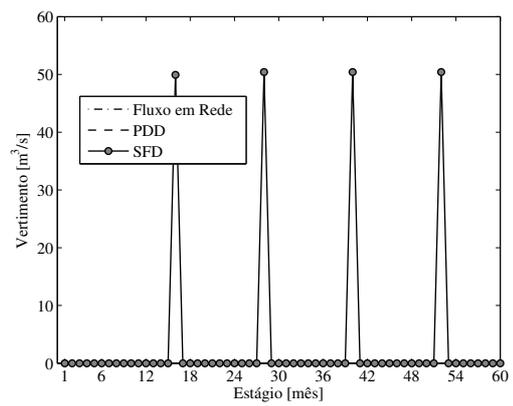
(c) Potência



(d) Perdas hidráulicas

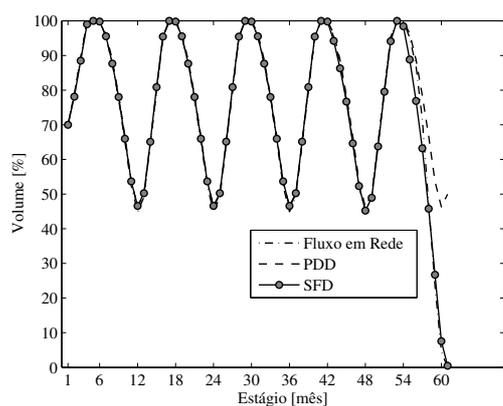


(e) Custo de operação

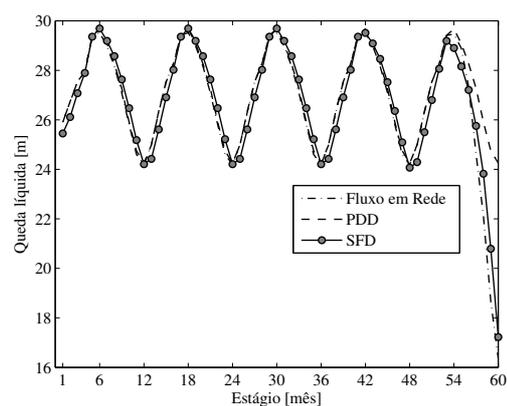


(f) Vertimento

Figura 5.11: Resultados apresentados pelos métodos SFD, FR e PDD.



(a) Volume do reservatório



(b) Queda líquida

Figura 5.12: Resultados apresentados pelos métodos SFD, FR e PDD.

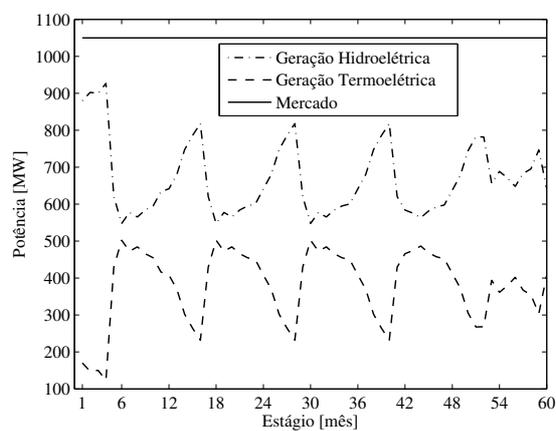
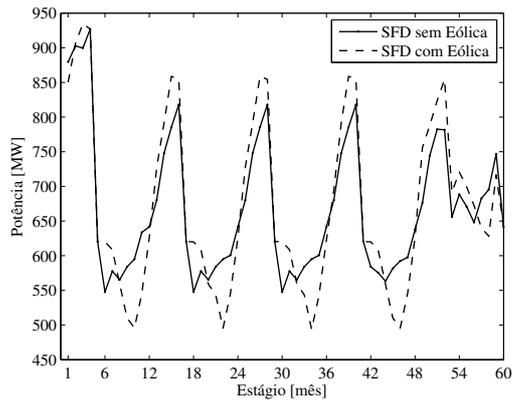
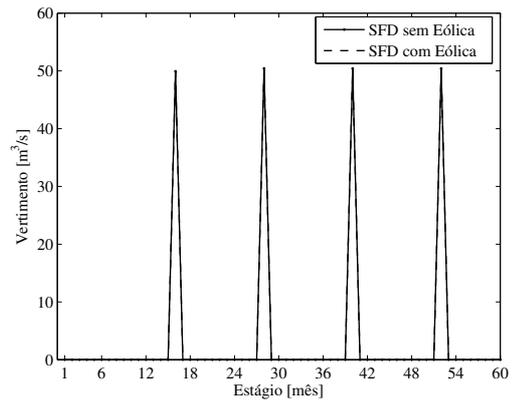


Figura 5.13: Geração hidrotérmica e mercado atendido, modelo SFD.

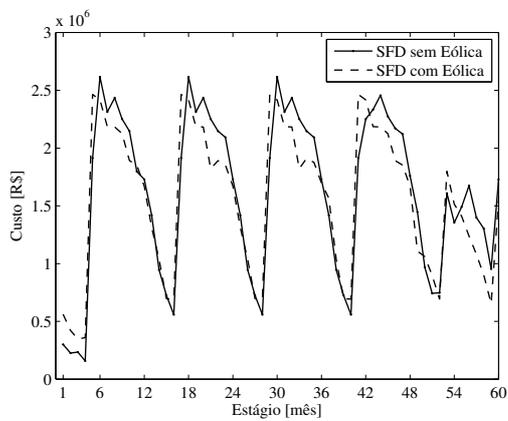
( $207,92 MW_{\text{média}}$ ) foi praticamente todo atendido pela geração eólica.



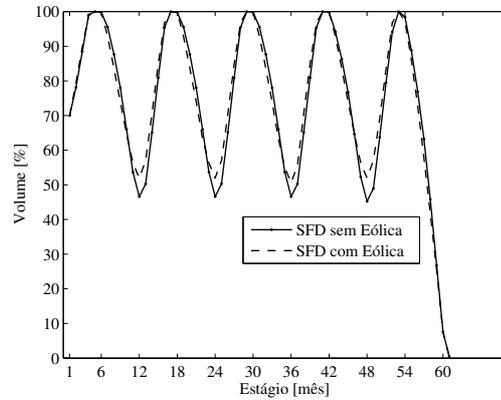
(a) Geração na UHE Sobradinho



(b) Vertimento na UHE Sobradinho



(c) Custo de operação



(d) Volume na UHE Sobradinho

Figura 5.14: Comparação entre os resultados obtidos com a aplicação de SFD com e sem geração eólica.

# 6

## Conclusões

O modelo Sistema de Formigas Dinâmico - SFD apresentou desempenho satisfatório em termos de solução do Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos, neste caso composto pela UHE Sobradinho e um parque termoelétrico fictício. Nesta configuração, o despacho da UHE supracitada convergiu para um patamar de potência média entre 668 e 669  $MW_{médio}$  a partir da aplicação de colônias de formigas com números de agentes superiores a 5000. No entanto, o esforço computacional tem característica exponencial em função do número de agentes da colônia de formigas.

A aplicação de um número crescente de agentes não produz benefícios significativos em termos de potência média despachada, mas estabiliza o algoritmo em uma trajetória de turbinamento mais suave e sempre coincidentes em diferentes simulações. Esta característica evita picos de complementação térmica e conseqüentemente de custo operacional, melhorando a resposta em termos de valor esperado do custo de operação.

O SFD não se mostrou sensível com a variação da taxa de evaporação, entre 1 e %15. A limitação do nível de feromônio entre valores mínimo e máximo também não trouxe, a princípio, melhorias para o processo de otimização em tela. No entanto, esta estratégia combinada com a alteração de outros parâmetros como passo da formiga e taxa de evaporação podem proporcionar melhorias em termos de resposta mais rápida.

A diminuição do espaço de busca traz benefícios em termos de esforço computacional. Foram apresentados resultados para aberturas iguais a 100, 50, 25 e 20. Comparando-se os

dois extremos, percebe-se uma redução de 9 minutos, reduzindo o tempo de processamento de 35 para 26 minutos, em simulações com 700 agentes.

O valor do passo da formiga é outro parâmetro que tem influência crescente com o número de agentes em jogo, aliviando consideravelmente o esforço computacional.

Na comparação com modelos baseados em Fluxo em Rede - FR e Programação Dinâmica Determinística - PDD, o SFD se mostrou bastante promissor. Os resultados são coerentes, chegando a apresentar soluções com custo operacional 6,45% e 9,96% menores em comparação com os resultados apontados por FR e PDD respectivamente. No entanto, o esforço computacional exigido é um fator negativo no método SFD.

Como não foi imposto um nível meta para a operação do reservatório, este foi esvaziado no último ano de operação pois o compromisso do modelo, no processo de otimização, se limita ao horizonte de estudo. Ou seja, para evitar o esvaziamento do reservatório, é necessário impor metas de armazenamento para o último período do horizonte de planejamento.

As simulações contemplando a fonte eólica apresentaram resultados satisfatórios, evidenciando a possibilidade de incorporação de novas fontes de energia no processo de simulação.

Este trabalho mostrou a possibilidade de aplicação da meta-heurística construtiva baseada no comportamento das colônias de formiga na elaboração de ferramentas de apoio à decisão na seara do planejamento energético. Contudo, muitas melhorias podem ser feitas para ajustar os diversos parâmetros do modelo afim de sintonizar uma resposta mais rápida e incorporar novas plantas hidroelétricas.

Ainda como trabalho futuro, tendo em vista a forte penetração da fonte de geração eólica no submercado Nordeste, pode ser feita uma análise em base horária afim de capturar os efeitos dessa fonte intermitente no parque hidráulico da região. Para tanto, faz-se mister adicionar as demais plantas hidroelétricas deste submercado de forma individualizada.

# Referências Bibliográficas

- Araripe e Fortunato (1990). *Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica*. Eletrobras, 1ª edição.
- Bianchi, L., Gambardella, L. M., e Dorigo, M. (2002). An ant colony optimization approach to the probabilistic traveling salesman problem. *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN VII: 7ª Conferência Internacional*. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha.
- Bortini, Souza, Zulcy, Santos, e Henri (1999). *Centrais Hidrelétricas: Estudos para Implementação*. Eletrobras, 1ª edição.
- CCEE (2007). *Procedimento de Comercialização: Estabelecer Preço de Liquidação de Diferenças*. MME, São Paulo, SP, 2ª edição.
- CEPEL (2001). *Manual de Referência do Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes - NEWAVE*. Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ.
- CEPEL (2003). *Manual do Usuário do Modelo Estratégico de Geração Hidrotérmica a Subsistemas Equivalentes - NEWAVE*. Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 11ª edição.
- CEPEL (2004). *Manual de Referência do Modelo DECOMP*. Eletrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 12ª edição.
- Cicogna, M. A. (1999). Modelo de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas orientado por objetos. Dissertação de Mestrado, FEEC/Unicamp, Campinas, SP.
- Cicogna, M. A. (2003). *Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP.
- de França, F. O. (2005). Algoritmos bio-inspirados aplicados à otimização dinâmica. Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, SP.

- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Tese de Doutorado, Politecnico di Milano, Itália.
- Dorigo, M., Birattari, M., e Stützle, T. (2006). Ant Colony Optimization: Artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE Computational Intelligence Magazine*.
- Dorigo, M. e Di Caro, G. (1999). The Ant Colony Optimization meta-heuristic. In Corne, D., Dorigo, M., e Glover, F., editors, *New Ideas in Optimization*. McGraw-Hill, Londres, Reino Unido.
- Dorigo, M. e Gambardella, L. M. (1997a). Ant colonies for the traveling salesman problem. *BioSystems*.
- Dorigo, M. e Gambardella, L. M. (1997b). Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., e Colorni, A. (1991). Positive feedback as a search strategy. Relatório Técnico, Departamento de Eletrônica, Politecnico di Milano, Italy.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., e Colorni, A. (1996). The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Parte B*.
- Dorigo, M. e Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Bradford Book, 1ª edição.
- EPE (2009a). *Leilão de Energia de Reserva 2009*. MME, Rio de Janeiro, RJ.
- EPE (2009b). *Leilão de Energia de Reserva 2009*. MME, Rio de Janeiro, RJ.
- EPE (2010). *Leilões de Fontes Alternativas 2010*. MME, Rio de Janeiro, RJ.
- Fuchs, Santos, e Souza (1983). *Centrais Hidro e Termelétricas*. Edgard Blucher, 1ª edição.
- Gambardella, L. M. e Dorigo, M. (1995). Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In Prieditis, A. e Russell, S., editors, *Machine Learning: Proceedings of the Twelfth International Conference on Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers, São Francisco, CA.
- Gambardella, L. M. e Dorigo, M. (1996). Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation – CEC’96*. IEEE Press, Piscataway, NJ.

- Gambardella, L. M., Taillard, . D., e Dorigo, M. (1999). Ant colonies for the quadratic assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*.
- Guedes, D. e Cavalcanti, J. (2009). Análise energética do impacto da geração eólica com atraso em obras do sistema elétrico brasileiro. *SBSE*.
- Guedes, D., Guedes, R., Lima, F., Cavalcanti, J., Melo, P., e Cavalcanti, A. (2011a). Caracterização do regime de vento da região nordeste do brasil versus geração de energia elétrica e requisitos de reserva girante. *XIV-ERAC*.
- Guedes, D., Sodr e, E., Vieira, J. M., Melo, G. H., Silva, C. A., e Alves, F. (2009). Uma proposta para o planejamento da expansão de longo prazo utilizando otimiza o colônia de formigas. *XIII-ERAC*.
- Guedes, D. F., de Souza, B. A., e Leite, M. F. (2011b). Ant colony optimization - aco aplicada na soluço do problema da opera o de sistemas hidrotérmicos. *CMNE*.
- Kelman, Oliveira, e Maceira (1992). Modelo de séries hidrológicas (msh) - manual de metodologia. Relatório Técnico, CEPEL, Rio de Janeiro, RJ.
- Maceira e Mercio (1997). Stochastic sreamflow model for hydroelectric systems. *Probabilistic Methods Applied to Power Systems - PMAPS*.
- Maniezzo, V., Colorni, A., e Dorigo, M. (1994). The ant system applied to the quadratic assignment problem. Relatório Técnico, IRIDIA, Faculté des Sciences Appliquées, Universit  Libre de Bruxelles.
- ONS (2009a). *Procedimentos de Rede, Submódulo 18.2*. ANEEL, Brasilia, DF.
- ONS (2009b). *Sistemas e modelos computacionais, Módulo 18*. ANEEL, Brasilia, DF.
- ONS (2011a). *Informativo Preliminar Diário da Opera o*. ANEEL, Brasilia, DF.
- ONS (2011b). *Mapa do Sistema de Transmissão*. ANEEL, Brasilia, DF.
- Schreiber e Gerhard (1978). *Usinas Hidrelétricas*. Edgard Blucher, 1<sup>a</sup> edi o.
- Siqueira, T. G., Zambelli, M., Cicogna, M., Andrade, M., e Soares, S. (2006). Stochastic dynamic programming for long term hydrothermal scheduling considering different streamflow models. *9<sup>o</sup> International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH*.

- Sodré, E., Alves, F., Marcelo, J., Guedes, D., e Melo, G. (2009a). O impacto dos leilões de energia nova no planejamento da expansão da oferta. *SNPTEE*.
- Sodré, E., Alves, F., Marcelo, J., Guedes, D., Melo, G., e Leal, N. (2009b). Uma análise de competitividade para geração de energia elétrica. *XIII-ERIAC*.
- Stützle, T. e Dorigo, M. (1999). ACO algorithms for the traveling salesman problem. In Miettinen, K., Neittaanmäki, P., Mäkelä, M. M., e Périaux, J., editors, *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*. Chichester, UK.
- Stützle, T. e Hoos, H. (1999). Max-min ant system. *Elsevier Science*.
- Zapelini, C. Z. (2009). Um estudo abrangente sobre metaheurística, incluindo um histórico. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP.