UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL

SISTEMA INTELIGENTE HÍBRIDO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS DE GERAÇÃO DE USINAS INDIVIDUALIZADAS

Leonardo Lopes Silva

Orientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende

Coorientador: Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso

Dissertação submetida ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA — PPGEL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Novembro de 2015 São João del-Rei – MG – BRASIL

Leonardo Lopes Silva

SISTEMA INTELIGENTE HÍBRIDO APLICADO AO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS HIDROTÉRMICOS DE GERAÇÃO DE USINAS INDIVIDUALIZADAS

Banca Examinadora
Orientador: Prof. Leonidas Chaves de Resende
Coorientador: Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso
Coortentador. 1701. Ediz Antonio da 10113eca Mariso
Profª. André Luís Marques Marcato
Profª. Eduardo Gonzaga da Silveira

Dedico este trabalho aos meus pais Ely Pacifico da Silva Filho e Maria Rita Lopes do Carmo Silva, e ao meu irmão Rodrigo Lopes Silva.

Agradecimentos

Sabendo que na vida não conseguimos nada sozinhos, após o término deste trabalho tenho muito que agradecer, na esperança de que estas palavras não fiquem apenas presas a estas páginas, mas que possam expressar profundamente meu sentimento de gratidão a todos que contribuíram para esta conquista.

Primeiramente, agradeço a Deus, arquiteto maior. A Ele, sou grato pelo dom da vida, por todas as oportunidades a mim oferecidas e pela minha família e amigos.

Aos meus queridos pais, Ely Pacifico da Silva Filho e Maria Rita Lopes Do Carmo Silva, faltam palavras de agradecimento. Seria impossível descrever aqui, com um texto menor do que toda esta dissertação, a força, o apoio e o carinho com que sempre me cercaram. Sem dúvidas, eles me ofereceram o suporte que foi essencial na concretização deste sonho realizado.

Agradeço imensamente ao meu irmão Rodrigo Lopes Silva, que sempre acreditou em meu potencial e me deu um grande apoio no decorrer de minha formação. Sei que grande parte desta conquista também pertence a ele.

Agradeço a todos os professores do PPGEL, que foram de fundamental importância em minha formação, em especial aos meus orientadores deste trabalho, Prof. Leonidas Chaves de Resende e Prof. Luiz Antônio da Fonseca Manso. A eles agradeço pelos ensinamentos, pela paciência, pelo apoio, pelos conselhos e pela amizade.

Aos meus amigos do curso de mestrado, que enfrentaram comigo diversas dificuldades e compartilharam agradáveis momentos, agradeço pela convivência, apoio e contribuição para esta importante etapa de minha vida.

Enfim, agradeço à UFSJ/CEFET-MG pela oportunidade e à CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Em decorrência dos elevados custos envolvidos no fornecimento de energia, torna-se necessário realizar diversos estudos para a obtenção do funcionamento adequado e econômico dos sistemas elétricos. O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos certamente constitui um desses estudos, no qual se busca o estabelecimento de uma política apropriada de administração do uso dos recursos energéticos disponíveis, garantindo qualidade e segurança no atendimento da demanda, e satisfazendo as restrições operativas do sistema.

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) está atravessou recentemente por um processo de desverticalização dos segmentos de geração, transmissão e distribuição. Com isto, surge a necessidade de conhecer estimativas mais apuradas do montante que cada usina hidrelétrica deve contribuir para suprir à carga, em diversos cenários hidrológicos e em todos os estágios do horizonte de planejamento.

O modelo NEWAVE, baseado em programação dinâmica dual estocástica, é utilizado atualmente no SEB para a determinação de estratégias ótimas de operação em médio prazo. Com o objetivo de desagregar a solução obtida para os reservatórios equivalentes de energia em usinas individualizadas, o modelo SUISHI-O é também utilizado. Ele acopla-se ao modelo NEWAVE através de suas funções de custo futuro e tem a capacidade de representar as não linearidades intrínsecas ao problema de despacho a usinas individualizadas. No entanto, este modelo é baseado em heurísticas operativas que buscam a operação em paralelo por faixas dos reservatórios, que em determinadas circunstâncias podem não garantir custos operativos ótimos.

Tendo em vista contornar esta barreira, esta dissertação apresenta um Sistema Inteligente Híbrido (SIH), baseada em computação evolutiva e Sistemas Fuzzy. No SIH proposto são utilizados operadores de mutação baseados em Lógica Fuzzy, Ajuste de Curva Polinomial e Diferença Vetorial Ponderada com objetivo de tornar o processo da busca da solução do problema do POSH mais eficiente.

Os resultados preliminares de um subsistema real brasileiro se apresentam satisfatórios. O algoritmo proposto tem se mostrado promissor para estudos relacionados ao POSH, sendo uma ferramenta útil de análise e, também, uma técnica alternativa ou complementar. As possibilidades e contribuições apontadas no presente trabalho são desafiadoras, servindo de base para novas abordagens no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos.

Abstract

Due to the high costs involved in the supply of energy, it is necessary to conduct several studies to obtain the adequate and economical operation of electrical systems. The planning of the operation of hydrothermal systems is certainly one of these studies, in which one seeks the setting of an appropriate management policy for the use of available energy resources, ensuring quality and safety in meeting demand, and meeting the operational constraints of the system.

The Brazilian Power Industry (Setor Elétrico Brasileiro, SEB) is going through a deverticalization of energy companies (generation, transmission and distribution) for the emergence of new agents (energy traders). With that situation comes the need to know more accurate estimates of the amount that each hydroelectric plant should contribute to supply its load in various hydrological scenarios and in all stages of the planning horizon.

The NEWAVE model based on stochastic dual dynamic programming, is currently used in SEB to determine optimal strategies of operation in the medium term. In order to disaggregate the solution obtained for the equivalent reservoirs of energy in individual plants, the SUISHI-O model is also used. It attaches to the NEWAVE model through its future cost functions and has the ability to represent non-linearity intrinsic to the problem of dispatching to individual plants. However, this model is based on heuristics seeking a parallel operation using water level in reservoirs, which under certain circumstances may not guarantee satisfactory quality costs.

In order to circumvent this barrier, this work presents an Intelligent Hybrid System (Sistema Intelligente Híbrido, SIH), based on evolutionary computation and fuzzy systems. In the proposed SIH are used mutation operators based on Fuzzy Logic, Polynomial Curve Fitting and Weighted Vector Difference in order to increase efficiency in the process of searching a solution for the POSH problem.

Preliminary results of a real Brazilian subsystem are satisfactory. The proposed algorithm is promising for studies related to POSH, being a useful tool for analysis and also an alternative or complementary technique. The possibilities and contributions outlined in this work are challenging, providing a basis for new approaches in the Operation Planning of Hydrothermal Systems.

Sumário

Banca	Exami	nadora	i
Dedica	atória		i
Agrade	ecimen	ntos	iii
Resum	10		iv
Abstra	ct		v
Sumár	io		v i
Lista d	e Tabe	elas	ix
Lista d	e Figur	ras	x
Lista d	e Abre	viações	.xiii
Capítu	lo 1 - I	ntrodução	1
1.1.	Cor	ntextualização	1
1.2.	For	rmulação do problema	3
1.3.	Ob.	jetivo	4
1.4.	Jus	tificativa	5
1.5.	Org	ganização do trabalho	5
Capítu	lo 2 - P	Planejamento da Operação do Sistema Hidrotérmico	7
2.1.	Арі	resentação	7
2.2.	Cod	ordenação hidrotérmica	7
2.3.	Но	rizontes de planejamento	7
2.4.	De	pendência temporal da operação	8
2.5.	For	rmulação matemática	9
2.6.	Mo	odelagem dos elementos do sistema hidrotérmico	. 11
2.	.6.1.	Vazão	. 11
2.	.6.2.	Volume	. 12
2.	.6.1.	Cota e altura da queda bruta	. 13
2.	.6.2.	Geração Hidráulica	. 14

2.6	.3.	Geração Térmica
2.6	.4.	Demanda
2.7.	Rev	isão Bibliográfica15
Capítulo	3 - Si	stema Inteligente Híbrido18
3.1.	Apr	esentação18
3.2.	Siste	ema Inteligente Híbrido18
3.3.	Con	nputação Evolutiva19
3.4.	Estr	atégia Evolutiva20
3.4	.1.	Indivíduos
3.4	.2.	População Inicial21
3.4	.3.	Avaliação dos Indivíduos
3.4	.4.	Mutação
3.4	.5.	Operador de Seleção
3.4	.6.	Parâmetros Iniciais
3.4	.7.	Critério de Parada23
3.4	.8.	Fluxograma da Estratégia Evolutiva24
3.5.	Siste	emas Fuzzy25
3.5	.1.	Teoria de Conjuntos Fuzzy25
3.5	.2.	Lógica Fuzzy27
3.5	.3.	Modelo de Inferência Fuzzy28
Capítulo	4 - Si	stema Inteligente Híbrido Proposto30
4.1.	Apr	esentação30
4.2.	Des	crição do SIH desenvolvido30
4.2	.1.	Leitura de dados31
4.2	.2.	Definição do sistema em estudo
4.2	.3.	Sistema Inteligente Híbrido (SIH)
4.2	.3.1.	População Inicial / População atual33
4.2	.3.1.	Reprodução

4.2.3	3.1.1.	Clonagem	35
4.2.3	3.1.2.	Mutação aleatória	35
4.2.3	3.1.3.	Mutação diferencial	36
4.2.3	3.1.4.	Mutação polinomial	38
4.2.3	3.1.5.	Mutação fuzzy	43
4.2.3	3.2.	Avaliação	50
4.2.3	3.3.	Classificação	51
4.2.3	3.4.	Seleção	51
4.2.3	3.5.	Apresentação dos resultados	51
4.2.3	3.6.	Critério de Parada	52
Capítulo !	5 - Resu	ltados	53
5.1.	Aprese	ntação	53
5.2.	Sistem	a teste I - 7 usinas em cascata	53
5.3.	Sistem	a teste II - 7 usinas em cascata em Y	60
5.4.	Sistem	a teste III - 35 usinas em cascata	68
Capítulo	6 - Cond	clusão	75
Referênc	ias Bibli	ográficas	. 77

Lista de Tabelas

Tabela 4-1 - Representação de um indivíduo resultante da mutação aleatória	. 36
Tabela 4-2 - Representação de um indivíduo resultante da mutação diferencial	. 38
Tabela 4-3 - Regras dos sistemas de inferência fuzzy	. 47
Tabela 5-1: Despacho Termelétrico Otimizado	. 54
Tabela 5-2: Despacho Termelétrico Otimizado - Sistema teste III	. 69

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Matriz de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2013)
Figura 1.2 - Número de publicações e respectivas citações ao longo dos anos
Figura 2.1 - Processo de decisão para sistemas hidroelétricos
Figura 3.1 - Representações das estruturas de dados dos indivíduos (cromossomo) com 10
caracteres (genes)22
Figura 3.2 - Fluxograma que apresenta os principais passos do algoritmo evolutivo24
Figura 3.3 - Função de pertinência na forma triangular26
Figura 3.4 - Partição fuzzy de uma variável linguística representando a temperatura27
Figura 3.5 - Diagrama típico de um modelo de inferência Mamdani28
Figura 4.1 - Fluxograma do SIH desenvolvido33
Figura 4.2 - Dados de entrada de uma usina hidrelétrica (Ilha Solteira)32
Figura 4.3 - Representação de um indivíduo formado por três usinas hidrelétricas em um
horizonte de estudo de seis meses33
Figura 4.4 - Representação gráfica de um indivíduo formado por três usinas hidrelétrica em un
horizonte de estudo de seis meses34
Figura 4.5 - Representação de um população formado por três usinas hidrelétricas em un
horizonte de estudo de seis meses N indivíduos34
Figura 4.6 - Representação gráfica de um indivíduo resultante da clonagem35
Figura 4.7 - Representação gráfica de um indivíduo formado por três usinas hidrelétrica em un
horizonte de estudo de seis meses40
Figura 4.8 - Representação gráfica de parte de um indivíduo formado por uma usina
hidrelétrica em um horizonte de estudo de 24 meses e as curvas equivalentes do ACP de grau
1, 2 e 342
Figura 4.9 - Representação gráfica de parte de um indivíduo formado por uma usina
hidrelétrica em um horizonte de estudo de 24 meses e as curvas equivalentes do ACP de grad
4, 5 e 6
Figura 4.10 - Representação de um indivíduo resultante da mutação polinomial baseado no
ACP de 5º grau
Figura 4.11 - Sistema de Inferência Fuzzy desenvolvido44
Figura 4.12 - Partição fuzzy do Volume Útil45
Figura 4.13 - Partição fuzzy do Vazão Defluente45
Figura 4.14 - Partição fuzzy do Geração Termoelétrica45

Figura 4.15 - Partição fuzzy da variável de saída (Delta Vazão)	. 46
Figura 4.16 - Relação entre as variáveis de entrada "Volume Útil" e "Vazão Defluente"	. 48
Figura 4.17 - Relação entre as variáveis de entrada "Volume Útil" e " Geração Térmica"	. 48
Figura 4.18 - Relação entre as variáveis de entrada "Vazão Defluente" e " Geração Térmica"	. 48
Figura 4.19 - Representação gráfica das entradas do SIF proposto	. 49
Figura 4.20 - Representação gráfica da saída do SIF proposto	. 50
Figura 4.21 - Apresentação dos resultados	. 52
Figura 5.1 - Sistema teste I - 7 usinas em cascata	. 54
Figura 5.2 - Dados técnicos da Usina Três Marias	. 55
Figura 5.3 - Dados técnicos da Usina Sobradinho	. 55
Figura 5.4 - Dados técnicos da Usina Itaparica	. 56
Figura 5.5 - Dados técnicos da Usina Moxoto	. 56
Figura 5.6 - Dados técnicos da Usina Paulo Afonso 1, 2 e 3	. 57
Figura 5.7 - Dados técnicos da Usina Paulo Afonso 4	. 57
Figura 5.8 - Dados técnicos da Usina Xingó	. 58
Figura 5.9 - Armazenamentos em hm³	. 58
Figura 5.10 - Armazenamentos em porcentagem do volume útil	. 59
Figura 5.11 - Geração total segmentada por fonte	. 59
Figura 5.12 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema I	. 60
Figura 5.13 - Sistema teste II - 7 usinas em cascata em Y	. 61
Figura 5.14 - Dados técnicos da Usina Furnas	. 62
Figura 5.15 - Dados técnicos da Usina Marimbondo	. 62
Figura 5.16 - Dados técnicos da Usina Água Vermelha	. 63
Figura 5.17 - Dados técnicos da Usina Emborcação	. 63
Figura 5.18 - Dados técnicos da Usina Itumbiara	. 64
Figura 5.19 - Dados técnicos da Usina São Simão	. 64
Figura 5.20 - Dados técnicos da Usina Ilha Solteira	. 65
Figura 5.21 - Trajetória ótima de armazenamento da cascata em Y de 7 usinas	. 65
Figura 5.22 - Trajetória ótima das vazões defluentes da cascata em Y de 7 usinas	. 66
Figura 5.23 - Geração hidrelétrica para a cascata em Y de 7 usinas	. 66
Figura 5.24 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema II	. 67
Figura 5.25 - Sistema teste III - 35 usinas em cascata	. 69
Figura 5.26 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Corumbá I, Corumbá I	III e
Corumbá IV	. 70

Figura 5.27 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Batalha, Serra do Facão e
Emborcação71
Figura 5.28 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Nova Ponte, Miranda e Capim
Branco 1
Figura 5.29 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Espora, Caçu e Foz do Rio
Claro71
Figura 5.30 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Itumbiaras, São Simão e Ilha
Solteira
Figura 5.31 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Camargo, Furnas e
Mascarenhas de Moraes
Figura 5.32 - Resultados obtidos pelo SIH proposto- Sistema III - Caconde, Marimbondo e Água
Vermelha72
Figura 5.33 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Geração hidrelétrica,
termoelétrica e custo73

Lista de Abreviações

ACP Ajuste de Curva Polinomial

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

CE Computação Evolutiva

CEPEL Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

DVP Diferença Vetorial Ponderada

EE Estratégia Evolutiva

IA Inteligência Artificial

LF Lógica Fuzzy

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

SEB Sistema Elétrico Brasileiro

SF Sistemas Fuzzy

SIH Sistema Inteligente Híbrido

SIN Sistema Interligado Nacional

UE Usina Eólica

UFV Usina Fotovoltaica

UHE Usina Hidrelétrica

UTE Usina Termoelétrica

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Contextualização

A eletricidade se tornou a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno. Residências, comércios e indústrias precisam dela para funcionar adequadamente. A maior parte dos avanços tecnológicos que alcançamos se deve a ela.

Para produzir energia elétrica é preciso obter a força necessária para girar as turbinas das usinas de eletricidade, pois estas usinas possuem geradores que transformam a energia mecânica (movimento) em energia elétrica. A força necessária em questão pode ser obtida de diversas fontes de energia primária.

No Brasil, a matriz de geração elétrica é de origem predominantemente renovável. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 80% da eletricidade no Brasil é gerada por meio de fontes renováveis (EPE, 2013).

O potencial hidrelétrico brasileiro é um dos maiores do mundo, sendo que, atualmente, sua matriz energética é composta, predominantemente, por esta fonte, ficando o restante distribuído entre as outras fontes de geração (ANEEL, 2013). A Figura 1.1 apresenta a matriz de energia elétrica do Brasil.

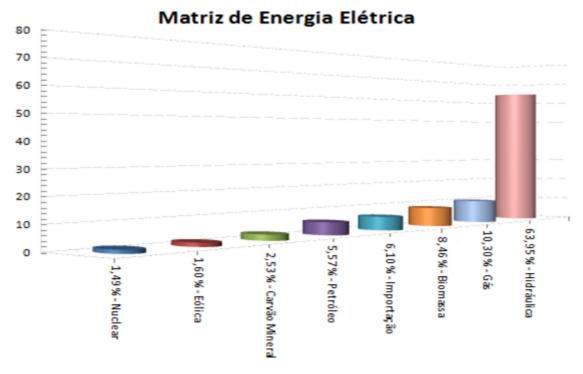


Figura 1.1 - Matriz de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2013)

A maioria das usinas em operação do Brasil se encontra interligada pelo chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, que devido as suas características é considerado um sistema hidrotérmico de grande porte com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (ONS, 2013).

O ONS visa operar o SIN de forma integrada, com transparência, equidade e neutralidade, de modo a garantir a segurança, a continuidade e a economia do suprimento de energia elétrica no país. Para isso é necessário desenvolver uma série de estudos e ações a serem exercidas sobre o sistema e seus agentes para trabalhar com estoque de energia de forma a garantir a segurança do suprimento contínuo em todo o país (ONS, 2013).

Entre estes estudos, está o planejamento da operação do sistema hidrotérmico, que visa determinar uma operação ótima que, para cada período do planejamento, produza metas de geração para as usinas do sistema de forma a minimizar o custo total de operação ao longo do horizonte considerado (ONS, 2013).

É importante ressaltar que o Setor Elétrico Brasileiro passou por uma reestruturação cujo principal objetivo é a introdução de um ambiente competitivo na geração. Entre as diversas modificações introduzidas pelo novo modelo para o setor está a desverticalização das empresas de energia (geração, transmissão e distribuição) e o surgimento de novos agentes como, por exemplo, os comercializadores de energia. Com isto surge a necessidade de conhecer estimativas mais apuradas do montante que cada usina hidrelétrica deve contribuir para o atendimento à carga própria em diversos cenários hidrológicos possíveis e em todos os estágios do horizonte de planejamento (MARCATO, 2002).

Atualmente o modelo NEWAVE, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), cuja principal finalidade é a realização do planejamento da operação mensal de médio prazo em sistemas hidrotérmicos interligados, é o utilizado no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Com o objetivo de desagregar a solução obtida para os reservatórios equivalentes de energia em usinas individualizadas, um conjunto de modelos alimentados pelos resultados do modelo NEWAVE também têm sido desenvolvidos pelo CEPEL, entre eles o modelo SUISHI-O (CEPEL, 2008).

O modelo SUISHI-O pode ser caracterizado como um detalhado modelo de simulação a usinas hidrelétricas individualizadas que operam em um sistema hidrotérmico interligado. Ele acopla-se ao modelo NEWAVE através de suas funções de custo futuro e tem a capacidade de representar as não linearidades intrínsecas ao problema de despacho a usinas individualizadas, mas é baseado em heurísticas operativas que buscam a operação em paralelo por faixas dos

reservatórios, que em determinadas circunstâncias podem não garantir custos operativos ótimos (CEPEL, 2001) (CEPEL, 2007) (DIAS, B. H., 2010)

Neste contexto, o atual trabalho trata da proposição de um Sistema Inteligente Híbrido (SIH) para o processo de otimização, baseada em Computação Evolutiva (CE) e Sistemas Fuzzy (SF), utilizando as propriedades das técnicas: Ajuste de Curva Polinomial (ACP) e Diferença Vetorial Ponderada (DVP), voltada para o Sistema Brasileiro, o qual possui características específicas que o diferencia dos demais sistemas no mundo, motivando o estudo e desenvolvimento de abordagens mais apropriadas.

1.2. Formulação do problema

O Brasil possui no total 2.996 empreendimentos em operação, totalizando 125.774.993 kW de potência instalada, sendo que 1.086 são usinas hidrelétricas (UHE), 1769 usinas termoelétricas (UTE), 104 usinas eólicas (UE) e 37 usinas fotovoltaicas (UFV) (ANEEL, 2013).

Em virtude que a oferta de energia elétrica brasileira é composta, predominantemente, pelas fontes do sistema hidrotérmico, o planejamento da operação do sistema hidrotérmico é essencial para a qualidade e confiabilidade do atendimento da demanda de energia.

Este planejamento é um problema de otimização complexo, dinâmico, estocástico, acoplado no tempo, acoplado no espaço, não linear, não separável, antagônico e de grande porte com apresentado a seguir (GORESTIN, CAMPODONICO, *et al.*, 1992) (PAREDES, 2007).

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico deve coordenar a geração elétrica das várias empresas do setor, de uma forma econômica, e garantir o atendimento da demanda com qualidade. Essa coordenação hidrotérmica possui características inerentes aos sistemas hidrotérmicos como acoplamento hidráulico e elétrico, dimensão dos sistemas, recursos limitados, incertezas das afluências futuras e outros, sendo assim um problema complexo.

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico também é um problema dinâmico e estocástico devido à existência de anormalidades nas vazões afluentes aos reservatórios, que variam sazonalmente e regionalmente e a imprecisão das previsões das afluências futura.

A disponibilidade da energia armazenada em forma de água nos sistemas hídricos depende da capacidade de armazenamento dos reservatórios e das afluências futuras ao sistema. Esta dependência estabelece uma conexão entre as decisões de operação em um

determinado período e as suas consequências futuras, o que faz do planejamento da operação do sistema hidrotérmico um problema acoplado no tempo.

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico também é um problema não linear, pois as funções de geração hidráulica, que descrevem a transformação de água armazenada em energia e do custo da geração térmica, são representadas por funções não lineares.

Nos sistemas hidráulicos existe o acoplamento operativo entre usinas pertencentes a uma mesma bacia hidrográfica, visto que a vazão defluente de uma usina afeta a operação das usinas situada à jusante (usinas em cascata). Em virtude disso o planejamento da operação do sistema hidrotérmico também é um problema acoplado no espaço.

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico também é um problema não separável, pois a energia gerada por uma usina hidrelétrica não é diretamente medida como função do estado da usina e sim em termos da economia resultante nos custos de geração térmica ou déficits evitados.

Os objetivos de mínimo custo e de confiabilidade não são complementares, fazendo do planejamento da operação do sistema hidrotérmico um problema antagônico. A existência de múltiplos reservatórios interligados, necessidade de otimização de múltiplos períodos e etc, tornam o planejamento da operação do sistema hidrotérmico um problema de grande porte.

1.3. Objetivo

O foco deste trabalho é a apresentação de um Sistema Inteligente Híbrido (SIH) para contribuir na solução do problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico com usinas individualizadas de médio prazo. O seu principal objetivo é verificar o desempenho do SIH proposto quando aplicado em sistemas reais.

O SIH proposto utiliza as propriedades das técnicas: Lógica Fuzzy (LF), Ajuste de Curva Polinomial (ACP) e Diferença Vetorial Ponderada (DVP) para complementar a operação de mutação da meta-heurística Estratégia Evolutiva (EE), buscando adapta-la para ser mais eficaz e eficiente na solução do problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico de médio prazo.

Os testes serão realizados com o objetivo de minimizar os custos da coordenação hidrotérmica de três sistemas teste. Os resultados dos sistemas teste I e II serão comparados com os obtidos respectivamente em (AMENDOLA, 2007) e (PASTOR HUMPIRI, 2005), nos quais foram empregadas meta-heurísticas evolutivas na solução do problema. Já os resultados do sistema teste III serão utilizados como desafio maior para o SIH proposto.

1.4. **Justificativa**

A pesquisa na área de planejamento da operação de sistemas elétricos pode ser justificada pelo conteúdo apresentado na Figura 1.2. Observa-se claramente uma tendência crescente no número de publicações e citações na área, em pesquisa realizada no banco de dados ISI - Web of Knowledge.



Figura 1.2 - Número de publicações e respectivas citações ao longo dos anos.
Palavras-chave utilizadas: energy planning systems operation.

Bases de dados: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH
Pesquisa realizada em 12 de novembro de 2013

Outro argumento que justifica essa pesquisa é o fato que, atualmente, um dos temas preferenciais de simpósio e congressos na área de sistemas elétricos de potência é o desenvolvimento de ferramentas para auxílio ao planejamento e operação elétrica e energética de sistemas interligado.

O SIH proposto se justifica pela busca de métodos capaz de conhecer estimativas mais apuradas do montante que cada usina hidrelétrica deve contribuir para o atendimento à carga própria em diversos cenários hidrológicos possíveis e em todos os estágios do horizonte de planejamento. A meta-heurística desenvolvida busca ser mais eficaz e mais a eficiente, em relação às outras meta-heurísticas evolutivas, agregando as propriedades das técnicas: Lógica Fuzzy (LF), Ajuste de Curva Polinomial (ACP) e Diferença Vetorial Ponderada (DVP) para complementar a operação de mutação da meta-heurística Estratégia Evolutiva (EE). Deste modo, contribuir para estudos futuros e, até mesmo, o desenvolvimento de um *software* para a coordenação de sistemas hidrotérmicos com usinas individualizadas de médio prazo baseado nesta metodologia.

1.5. Organização do trabalho

O capítulo 1 introduziu o tema da dissertação, descrevendo a contextualização, a formulação do problema, utilizando algumas referências bibliográficas sobre a coordenação de sistemas hidrotérmicos, bem como expõe os objetivos e as justificativas desse trabalho.

O capítulo 2 descreve o problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico, que consiste em otimizar o uso das hidrelétricas e das termoelétricas do sistema. Para isso apresenta as características, as complexidades e uma breve revisão bibliográfica do planejamento da operação do sistema hidrotérmico. Os principais componentes que constituem este sistema são apresentados, a modelagem matemática e características são mostradas com o fim de oferecer uma idéia da ordem de grandeza dos valores que tais componentes representam.

O Capítulo 3 descreve as propriedades a respeito de Sistema Inteligente Híbrido, Computação Evolutiva e Sistemas Fuzzy. Os principais componentes que constituem estes temas e que são relevantes ao atual trabalho são apresentados. Com o objetivo de fornecer ao leitor a base teoria introdutória para melhor compreensão do trabalho desenvolvido.

O Capítulo 4 apresenta o Sistema Inteligente Híbrido proposto empregado na solução do problema de Planejamento Energético da Operação, sendo definida a forma como o algoritmo foi implementado e descritas as particularidades e as adaptação para a solução do problema específico.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação do SIH proposto em parques hidrelétricos pertencentes ao Sistema Elétrico Brasileiro. Os testes são realizados com o objetivo de minimizar os custos da coordenação hidrotérmica de três sistemas teste.

Por fim, o Capítulo 6 traz as principais conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2 - Planejamento da Operação do Sistema Hidrotérmico

2.1. Apresentação

Neste capítulo, apresentam-se as características, as complexidades e uma breve revisão bibliográfica do planejamento da operação do sistema hidrotérmico. Os principais componentes que constituem este sistema são apresentados, a modelagem matemática e características são mostradas com o fim de oferecer uma idéia da ordem de grandeza dos valores que tais componentes representam.

2.2. Coordenação hidrotérmica

A coordenação hidrotérmica consiste em determinar os níveis de geração de energia elétrica adequada para atender à demanda de um sistema, quando existe a presença de unidades geradoras movidas à energia térmica e hidráulica interligadas eletricamente. A solução deste problema deve proporcionar o atendimento de uma demanda comum e determinar a combinação ótima dos geradores térmicos a serem ligados e seu nível de geração, bem como o planejamento hidrelétrico para essa situação, buscando minimizar o custo de produção do sistema. Desta forma, busca-se determinar estratégias de geração das usinas hidrelétricas do sistema, através de um planejamento do uso da água, com a finalidade de minimizar o custo de produção proveniente das usinas termelétricas do sistema ao longo do período de planejamento (PIEKUTOWSKI, LITWINOWICZ e FROWD, 1994) (SALAM, NOR e HAMDAM, 1998).

2.3. Horizontes de planejamento

A complexidade do problema faz com que a adoção de um único modelo matemático seja inviável, surgindo desta forma, a necessidade de fazer um planejamento em diversos subproblemas, visando garantir o atendimento da demanda. Cada um destes subproblemas possui um horizonte de planejamento diferente, e, também, uma representação da estocasticidade das afluências e das não linearidades do problema com diferentes graus de detalhamento (MARCATO, 2002).

Entre estes subproblemas estão: a programação da operação, o planejamento da operação de curto prazo e o planejamento da operação de médio prazo. A programação diária da operação possui o horizonte de apenas alguns dias, discretizados em etapas horárias ou de meia em meia hora. Não é representada a incerteza das vazões. Em contrapartida, a rede de transmissão é representada com precisão e o parque hidrotérmico é representado de forma detalhada, levando-se em conta as restrições relativas às máquinas e turbinas, tais como:

tomada e alívio de carga, faixas operativas das turbinas, entre outras. Já o planejamento da operação de curto prazo possui o horizonte de alguns meses e a incerteza relacionada às afluências aos reservatórios é representada através de uma árvore de vazões (MARCATO, 2002).

O Sistema Inteligente Híbrido desenvolvido neste trabalho visa à solução do problema do planejamento da operação de médio prazo, que possui os horizontes de estudo de um e de dois anos discretizado em etapas mensais. Ele é depende da capacidade de armazenamento e da regulação dos reservatórios. A ideia nesta etapa é elaborar uma estratégia que minimize o custo de operação do sistema através do uso ótimo dos recursos hidráulicos. Esta estratégia deverá levar em conta: as predições de consumo de energia e as condições hidrológicas futuras.

2.4. Dependência temporal da operação

Uma característica dos sistemas hidrotérmicos é a possibilidade de armazenar energia potencial em forma de água nos reservatórios que posteriormente poderá ser transformada em eletricidade pelas usinas. A disponibilidade desta energia está restringida pela capacidade de armazenamento dos reservatórios e pela incerteza das vazões afluentes futuras ao sistema. Isto introduz uma dependência entre a decisão operativa presente e os custos operativos futuros.

Em outras palavras, se as reservas de energia hidrelétrica são usadas imediatamente, com o objetivo de minimizar os custos térmicos, e acontece uma seca severa no futuro, poderia incorrer-se no uso de geração térmica de custo elevado ou produzir-se um racionamento de energia do sistema. Por outro lado, se privilegiam as reservas de energia hidrelétrica através de um uso mais intenso de geração térmica e as afluências futuras são altas, pode ocorrer um vertimento nos reservatórios do sistema, o que representaria um desperdício de energia e, consequentemente, um aumento no custo operativo (PEREIRA e CAMPODONICO, 1998) (SILVA, E.L. DA, 2001). O processo da tomada de decisões é ilustrado na Figura 2.1.

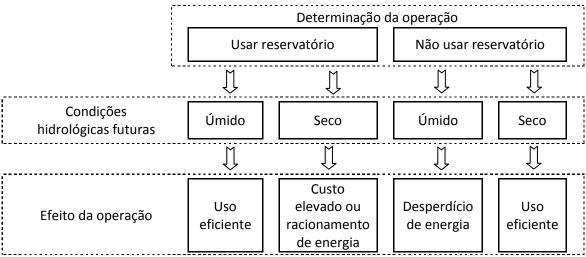


Figura 2.1 - Processo de decisão para sistemas hidroelétricos

2.5. Formulação matemática

O objetivo da coordenação hidrotérmica é minimizar o valor esperado do custo de operação durante o período de estudo, o qual está composto do custo de geração térmica mais uma penalidade por falha no atendimento da carga.

O modelo matemático da coordenação de sistemas hidrotérmicos utilizado neste trabalho é representado através das seguintes equações (CICOGNA, M.A., 1999):

Função objetivo

$$min \sum_{t=1}^{T} \left[\left(\sum_{j=1}^{J} \Psi_{j}(g_{j,t}) \right) \cdot \lambda_{t} \right]$$

$$\lambda_t = (1+r)^{-t}$$

Sujeito a:

Atendimento à demanda

$$G_t + P_t = D_t 3$$

$$G_t = \sum_{j=1}^{J} g_{j,t}$$

$$P_t = \sum_{j=1}^{I} p_{i,t}$$
5

$$P_t = \sum_{i=1}^{I} p_{i,t}$$

$$p_{i,t} = k_i \cdot h_{i,t} \cdot q_{i,t}$$

$$h_{i,t} = \Phi_i(x_{i,t}^{med}) - \Theta_i(u_{i,t}) - pc_{i,t}$$

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t} \tag{8}$$

$$x_{i,t}^{med} = \frac{x_{i,t} + x_{i,t+1}}{2}$$
 9

Balanço Hídrico

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left(a_{i,t} + \left(\sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t}\right) - u_{i,t}\right) \cdot \Delta t_t$$
 10

> Limites das variáveis

$$g_j^{mim} \le g_j \le g_j^{max}$$
 11

$$q_{i,t}^{mim} \le q_{i,t} \le q_{i,t}^{max}$$

$$u_{i,t}^{mim} \le u_{i,t} \le u_{i,t}^{max}$$

$$v_{i,t} \ge 0$$

$$x_{i,t}^{mim} \le x_{i,t} \le x_{i,t}^{max}$$

$$x_{i,T}^{med} \ge x_{i,1}^{med} \tag{16}$$

Em que:

Variável	Descrição	Unidade
t	Intervalos de tempo (mês)	
T	Total de intervalos de tempo (meses - horizonte em estudo)	
j	Usina termelétrica	
J	Total de usinas termelétricas do sistema	
i	Usina hidrelétrica	
I	Total de usinas hidrelétricas do sistema	
$\Psi_j(\cdot)$	Função custo da usina termelétrica <i>j</i>	(\$)
$g_{j,t}$	Geração de energia da usina termoelétrica \emph{j} durante o intervalo \emph{t}	(MWmédios)
λ_t	Fator de desconto para o intervalo $\it t$	

2.6. Modelagem dos elementos do sistema hidrotérmico

A seguir, são apresentados os componentes de um sistema hidrotérmico de potência enfocando a representação matemática de cada componente.

2.6.1. **Vazão**

A vazão é o volume de determinado fluido que passa por uma determinada seção de um conduto livre ou forçado, por uma unidade de tempo. Ou seja, é a rapidez com a qual um volume escoa (taxa de escoamento). No contexto de sistemas hidrotérmicos, é a vazão dos rios das diversas bacias hidrográficas que é importante. O ONS fornece relatórios anuais com os

dados de medições mensais e diárias das vazões naturais de todas as usinas em operação a partir de 1931. Em vista disto, o modelo proposto utiliza a curva da vazão Média de Longo Prazo (MLT), retiradas de (CCEE, 2013), para determinar as vazões afluentes e estimar as vazões defluente.

A vazão afluente é definida como sendo a vazão que chega a um determinado ponto, em particular uma usina hidrelétrica. A vazão afluente depende das condições hidrológicas naturais da bacia hidrográfica e das usinas hidrelétricas existentes a montante. No modelo proposto a vazão afluente é determinada pela MLT das usinas do sistema em estudo.

A vazão defluente é definida como sendo a vazão que sai de um determinado ponto, em particular uma usina hidrelétrica. Ela é a variável de decisão do modelo, ou seja, é a incógnita a ser determinada para a otimização do problema.

A vazão defluente é dividida em vazão turbinada e vazão vertida. A vazão turbinada é a parcela da vazão defluente que passa pelas turbinas e gera energia e a vazão vertida é aquela que passa pelos vertedouros da usina e não gera energia. Por razões óbvias, o vertimento em muitos casos, não é desejado, uma vez que uma determinada quantidade de água que poderia ser utilizada para gerar energia retorna ao rio por um caminho alternativo sem acionar as turbinas. As equações referentes às vazões descritas nesta seção são apresentadas pelas equações 8, 12, 13 e 14 reescritas a seguir.

$$u_{i,t} = q_{i,t} + v_{i,t}$$

$$q_{i,t}^{mim} \le q_{i,t} \le q_{i,t}^{max}$$

$$u_{i,t}^{mim} \le u_{i,t} \le u_{i,t}^{max}$$

$$v_{i,t} \ge 0$$

2.6.2. **Volume**

No contexto de sistemas hidrotérmicos, o volume é referente à quantidade de água estocada em um reservatório de uma usina hidrelétrica. Os reservatórios são estruturas que armazenam água para uso posterior na produção de eletricidade. Por causa da sua grande capacidade de armazenamento, estes elementos criam dependências temporais nas decisões de operação entre uma etapa (cheia) e outra etapa (seca).

Existem dois modos de classificação de usinas hidrelétricas em relação ao seu reservatório: usinas de reservatório e usinas a fio d'água. As usinas de reservatório possuem reservatórios de grande capacidade de regularização, com a capacidade de estocar água, que

são chamados de reservatórios de acumulação. As usinas a fio d'água possuem reservatório com pouca capacidade de regularização que são chamados de reservatórios de compensação.

No modelo proposto, o volume do reservatório é uma das restrições principais do problema. As limitações físicas dos reservatórios como: volume máximo e volume mínimo (equação 15), o fato de que obrigatoriamente o balaço hídrico deva ser respeitado e o fato de que o volume do reservatório no final do horizonte em estudo deva ser maio ou igual ao volume no início do horizonte (equação 16), torna volume do reservatório um dos fatores que mais restringe o conjunto de soluções factíveis do problema.

O balanço hídrico indica que o volume ao final da etapa t (início da etapa t+1) é igual ao volume início mais os volumes que chega ao reservatório (volumes afluentes) menos os volumes de saída (volumes turbinados e vertidos). O balanço hídrico é apresentado pela a equação 10 reescrita a seguir.

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left(a_{i,t} + \left(\sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t}\right) - u_{i,t}\right) \cdot \Delta t_t$$
 10

2.6.1. Cota e altura da queda bruta

A cota é a relação de uma superfície com o oceano. Cada usina hidrelétrica possui polinômios de 4º grau para representar a cota a montante (volume médio - cota do reservatório) e a cota a jusante (vazão - cota do canal de fuga).

Com o polinômio de 4° grau de cota a montante, a partir do volume médio em hm^3 armazenado no reservatório, é possível calcular-se a cota da superfície do reservatório em relação ao oceano em m. O volume médio é dado pela equação 9 reescrita a seguir.

$$x_{i,t}^{med} = \frac{x_{i,t} + x_{i,t+1}}{2}$$
 9

Já com o polinômio de 4° grau de conta a jusante, a partir da vazão defluente em m^3/s , é possível calcular-se a cota da superfície do canal de fuga em relação ao oceano em m.

Através da comparação dos polinômios de conta a montante e conta a jusante é possível calcular a altura de queda bruta do reservatório que é igual à diferença entre a cota a montante com a cota a jusante. A altura efetiva é chamada de queda líquida e é igual à altura de queda bruta menos as perdas hidráulicas, como apresentado na equação 7 reescrita a seguir.

$$h_{i,t} = \Phi_i(x_{i,t}^{med}) - \Theta_i(u_{i,t}) - pc_{i,t}$$
 7

Esses cálculos são importantes para o modelo porque por meio deles é possível considerar restrições físicas dos reservatórios como cota montante máxima e mínima, e utilizar a altura da queda líquida no cálculo da geração de energia.

2.6.2. **Geração Hidráulica**

Uma usina hidrelétrica é o conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração elétrica resultante do aproveitamento de quedas de água existentes num rio. O processo de geração elétrica baseia-se na transformação de energia potencial hidráulica em energia elétrica.

Para aproveitar o potencial hidrelétrico de um determinado rio, geralmente interrompe-se seu curso normal através de uma barragem que provoca a formação de um lago artificial chamado reservatório. A água captada no lago formado pela barragem é conduzida até a casa de força através de canais, túneis e/ou condutos metálicos. Após passar pela turbina hidráulica, na casa de força, a água é restituída ao leito natural do rio, através do canal de fuga. Dessa forma, a potência hidráulica é transformada em potência mecânica quando a água passa pela turbina, fazendo com que esta gire, e, no gerador, que também gira acoplado mecanicamente à turbina, à potência mecânica é transformada em potência elétrica (ONS, 2013).

A potência média gerada em uma usina hidrelétrica pode ser representada por um modelo de entrada-saída, no qual a entrada corresponde ao volume de água turbinado e a altura da queda líquida da usina e a saída é a potência média gerada que matematicamente pode se expressar de acordo com a equação 6 reescrita a seguir:

$$p_{i,t} = k_i \cdot h_{i,t} \cdot q_{i,t} \tag{6}$$

2.6.3. Geração Térmica

Em usinas termelétricas, a energia elétrica é obtida da transformação de energia térmica em energia mecânica para a movimentação da turbina acoplada a um gerador. As usinas termelétricas diferenciam-se em relação ao tipo de combustível utilizado para a geração de energia e à forma como o combustível utilizado é queimado.

O custo associado à geração termelétrica deve inclui o custo do combustível e os custos de mão de obra, estoques de combustível, de manutenção e de capital. Como os custos de estoque, mão de obra, manutenção e de capital são independentes da geração de energia,

muitos modelos assumem que estes custos são fixos sendo, portanto ignorados. Assim só o custo variável de operação, dado pelo custo de combustível é modelado como uma função convexa e crescente da geração térmica. Na literatura, normalmente a função escolhida é quadrática (WOOD, A.J.; WOLLEMBERG, B.F., 1996) da forma:

$$\Psi_i(g_{i,t}) = \mathbf{a} \cdot g_{i,t}^2 + \mathbf{b} \cdot g_{i,t} + \mathbf{c}.$$
 17

 $\Psi_j\big(g_{j,t}\big) = \mathbf{a}\cdot g_{j,t}^{\ 2} + \mathbf{b}\cdot g_{j,t} + \mathbf{c}. \tag{17}$ Os parâmetros a, b, e c desta equação dependem das características de cada usina termoelétrica. Para estudos de médio prazo, no Brasil, é usual estabelecer uma relação linear entre o custo de operação e a potência média gerada pela usina através da seguinte equação:

$$\Psi_i(g_{j,t}) = \mathbf{a} \cdot g_{j,t} + \mathbf{b}.$$

Nesta representação o parâmetro a é o custo incremental da usina termoelétrica. Ressalta-se que para um sistema com usinas com custo linear, o problema de despacho termelétrico para cada estágio, resume-se a uma simples "lista de prioridades", onde as usinas são despachadas na ordem crescente de seu custo incremental.

2.6.4. **Demanda**

Existem diversas formas de representar a demanda de energia elétrica de um sistema, porém, a que é aplicada a esse estudo é a demanda média para todo o horizonte de planejamento e a demanda equivalente ao somatório da potência instalada de todas as hidrelétricas do sistema em estudo.

Para suprir a demanda do segundo caso é necessário que as hidrelétricas produzam a potência instalada constantemente durante todo o horizonte em estudo. Porém isso não é possível, pois existe a dependência temporal da operação. Com isso, ocorre à necessidade de utilizar a geração térmica, de forma otimizada, como complemento para suprir a demanda.

2.7. Revisão Bibliográfica

Uma das principais características dos modelos matemáticos utilizados na Coordenação de Sistemas Hidrotérmicos é a modelagem da natureza estocástica das vazões que chegam aos reservatórios. Algumas dessas modelagens podem ser descrita mais detalhadamente em (THOMAS, JR., H. A. AND FIERING, M. B., 1962), (VICENS, G. J., RODRIGUEZ-ITURBE, I., AND SCHAAKE JR., J. C., 1975), (HIPPEL, K. W., MCBEAN, A., AND MCLEOD, A. I., 1979), (PEREIRA, M. V. F., OLIVEIRA, G. C., COSTA, C. C. G., AND KELMAN, J., 1984), (MONDAL, M. S. AND WASIMIB, S. A, 2006) e (SALAS, J. D., SVEINSSON, O. G., LANE, W. L., AND FREVERT, D. K, 2006).

Em consequência disso, muitos autores têm utilizado técnicas de Programação Dinâmica Estocástica (PDE) para resolver o problema de Planejamento da Operação. A Programação Dinâmica é uma técnica proposta por Richard Bellman, em 1957, (R. BELLMAN, 1957) que apresenta elevada importância e popularidade em diversas áreas de estudo, principalmente, em função de sua capacidade de abordar com sucesso a estocasticidade e a não linearidade dos problemas. Além disso, a Programação Dinâmica caracteriza-se pela vantagem de decompor problemas complexos em uma série de problemas que são resolvidos recursivamente (W. YEH, 1985). A aplicação da PDE com esse intuito pode ser vista em (CELPE/ELETROBRAS, 1977), (SILVA, L. F. C. A., 1981), (STEDINGER, J. R., SULE, B. F., AND LOUCKS, D. P, 1984), (THANOS, T. E YEH, W. W.-G, 1987), (MACEIRA, M. E. P., TERRY, L., COSTA, F. S., DAM´AZIO, J. M., AND MELO, A. C. G., 2002) e (LOUCKS, D. E VAN BEEK, E., 2005).

Porém, a PDE apresenta problemas de escalabilidade causada pelo aumento combinatorio de número de variáveis de estado do problema à medida que aumenta o número de usinas (NEMHAUSER, G. L., 1966), (BERTSEKAS, D. P., 1976), (BERTSEKAS, D. P., 1995). Em vista disso, esta técnica é empregada considerando-se um modelo agregado das usinas hidroelétricas, ou seja, as usinas hidroelétricas que compõem o sistema não são representadas de forma individualizada, o que acarreta certo grau de subotimalidade na solução do problema (ARVANITIDS, N. V. E ROSING, J., 1970), (CARVALHO, M. A. P. E ROSENBLATT, J., 1977), (TERRY, L. A., CEPEL, DENE/DPE/ELETROBRÁS E DEOP/DOS/ELETROBRÁS, 1980), (DURAN, H., PUEH, C., DIAZ, J. E SANCHEZ, G., 1985).

Outra metodologia utilizada consiste no uso de Programação Dinâmica Estocástica Dual (PDED), a qual pode ser caracterizada como uma extensão da PDE (PEREIRA, M.V. E PINTO, L.M.V.G., 1985), (PEREIRA, M. V. F., 1989). Esta metodologia utiliza a técnica de Decomposição de Benders (BENDERS, J. F., 1962) buscando encontrar estratégias ótimas para a operação dos subsistemas interligados, enquanto as afluências são tratadas a partir de um modelo autorregressivo periódico (HIPEL, K. W.; MCLEOD, A. I., 1994) (MONDAL, M. S.;WASIMI, S. A., 2006).

A PDED permite reduzir o esforço computacional na solução do problema, trazendo, então, a possibilidade de se representar o sistema hidráulico mais detalhadamente. Esta metodologia deu origem ao modelo denominado NEWAVE, utilizado atualmente no Sistema Elétrico Brasileiro para a determinação de estratégias ótimas de operação em médio prazo (CEPEL, 2001) (DIAS, B. H., 2010).

Com o objetivo de desagregar a solução obtida para os reservatórios equivalentes de energia em usinas individualizadas, o modelo SUISHI-O é atualmente usadas pelo Sistema Elétrico Brasileiro. Ele acopla-se ao modelo NEWAVE através de suas funções de custo futuro e tem a capacidade de representar as não linearidades intrínsecas ao problema de despacho a usinas individualizadas. Porém é baseado em heurísticas operativas que buscam a operação

em paralelo por faixas dos reservatórios, que em determinadas circunstâncias podem não garantir custos operativos ótimos (CEPEL, 2007).

Em vista disto, como contribuição, o presente trabalho apresenta um Sistema Inteligente Híbrido (SIH) para o processo de otimização, baseada em Computação Evolutiva (CE) e Sistemas Fuzzy (SF), utilizando as propriedades das técnicas: Lógica Fuzzy (LF), Ajuste de Curva Polinomial (ACP) e Diferença Vetorial Ponderada (DVP), voltada para um subsistema brasileiro.

Um Sistema Inteligente Híbrido é a combinação de duas ou mais técnicas distintas, sendo pelo menos uma delas de inteligência Artificial (IA). No atual trabalho é desenvolvido a combinação da Computação Evolutiva com Sistemas Fuzzy.

A computação evolutiva (CE) é um conjunto de técnicas de busca e otimização estocástica inspirado na evolução natural das espécies. Nos últimos anos, tem despertado grande interesse acadêmico e econômico, uma vez que sua aplicabilidade tem sido demonstrada em inúmeras áreas da ciência e das engenharias, incluindo sistemas de potência.

Sistemas Fuzzy tem se mostrado como uma das áreas promissoras no campo de engenharia de sistemas e processamento de informação. Neste sentido, tem se verificado a proliferação de soluções práticas, que utilizam esta abordagem, para problemas do mundo real como, por exemplo, produtos eletrônicos como a câmera de filmar, máquinas de lavar e microondas, além de soluções no campo de controle de processos, instrumentação médica, sistemas de suporte à decisão, escolha de portfólio, entre outras.

Uma abordagem mais detalhada a respeito de Sistema Inteligente Híbrido, Computação Evolutiva e Sistemas Fuzzy é apresentada no Capítulo 3 a seguir.

Capítulo 3 - Sistema Inteligente Híbrido

3.1. Apresentação

Neste capítulo, apresentam-se as propriedades do Sistema Inteligente Híbrido, Computação Evolutiva e Sistemas Fuzzy. Os principais componentes que constituem estes temas que são relevantes ao atual trabalho são apresentados. A fim de fornecer ao leitor a base teoria introdutória para compreender o trabalho desenvolvido.

3.2. Sistema Inteligente Híbrido

Sistemas Inteligentes Híbridos são sistemas mais robustos desenvolvidos por meio da integração de diferentes técnicas, sendo pelo menos uma de Inteligência Artificial. Esses sistemas misturam métodos de Engenharia de Conhecimento e os fazem "trabalhar juntos" para obter uma melhor solução para o problema, quando comparada a usar um único método para o mesmo problema.

O desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido é motivado pelo fato que as técnicas já existentes podem ser apropriadas na solução de alguns problemas específicos, mas podem apresentar insuficiência na resolução de outros tipos de problemas. Em vista disto, um Sistema Inteligente Híbrido busca desfrutar das vantagens de diferentes técnicas para a solução do problema com o objetivo de superar as desvantagens dadas pela a utilização de apenas uma das técnicas.

(GOONATILAKE E KHEBBAL, 1995) apresentaram um tipo de classificação para sistemas híbridos levando em consideração a funcionalidade, arquitetura de processamento e requerimentos de comunicação. Esse esquema de classificação é composta de 3 classes; Substituição de Função; Híbridos Intercomunicativo e Híbridos Polimórficos.

Na classe de Substituição de Função estão os sistemas que se utilizam de uma técnica para implementar uma função de outra técnica. Essa técnica apenas tenta superar alguma limitação da técnica principal ou aperfeiçoar sua execução, não acrescentando funcionalidade ao sistema inteligente. Na classe dos Híbridos Intercomunicativos estão os sistemas que são formados por módulos independentes, nos quais cada um usa uma técnica inteligente para resolver uma das subtarefas do problema principal. Já na classe dos Híbridos Polimórficos estão os sistemas em que uma única técnica é adaptada para realizar uma tarefa inerente a outra técnica.

Neste contexto, o atual trabalho trata da proposição de um Sistema Inteligente Híbrido, da classe de Substituição de Função, utilizando as técnicas de inteligência computacional: Computação Evolutiva e Sistemas Fuzzy, e empregando as propriedades das técnicas: Ajuste de Curva Polinomial e Diferença Vetorial Ponderada, para complementar a operação de mutação da meta-heurística Estratégia Evolutiva, buscando adapta-la para ser mais eficaz e eficiente na solução do problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico de médio prazo.

3.3. Computação Evolutiva

Os conceitos de computação evolutiva têm sido empregados em uma variedade de disciplinas, desde ciências naturais e engenharia até biologia e ciência da computação. A ideia básica, surgida nos anos 50, é aplicar o processo de evolução natural como um paradigma de solução de problemas, a partir de sua implementação em computadores (VON ZUBEN, F.J., 2002).

Segundo as teorias Neo-Darwinianas, a evolução ocorre, por meio da seleção dos indivíduos que melhor se adaptam a um determinado ambiente. Nesse contexto, ao longo de gerações, alguns desses indivíduos se recombinam (cruzamento) e sofrem variações (mutações) contribuindo com a diversidade populacional no processo evolutivo que se enquadra.

Nos anos 60, o Algoritmo Genético começou a ser pensado por John Holland, e desenvolvido durante as décadas de 60 e 70 por ele, seus alunos e colegas da Universidade de Michigan. Em 1965 Biernet, Schwefel, e Rechenberg introduziram as Estratégias Evolutivas (Evolutions strategie, nome original em Alemão). Fogel, Owens e Walsh, em 1966 desenvolveram a técnica da Programação Genética (HOLLAND, 1992) (RECHENBERG, 1965) (FOGEL L. J., OWENS A. J., WALSH M. J., 1966).

Esses algoritmos evolutivos se enquadram na subárea da computação bio-inspirada conhecida por computação evolutiva. A computação evolutiva baseia-se nos mecanismos evolutivos encontrados na natureza, tais como a auto-organização e o comportamento adaptativo, sendo este um grupo de métodos baseados nas teorias Neo-Darwinianas que consideram o processo evolutivo das espécies. Onde se considera que os indivíduos mais aptos e melhor adaptados têm mais chances de se reproduzirem e sobreviver. Também há a possibilidade de replicação das características dos indivíduos mais aptos para as próximas gerações (DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J., 2005) (FRIEDBERG, R. M., 1958) (FRIEDBERG, R. M.; DUNHAM, B.; NORTH, J. H., 1959).

A vantagem da computação evolutiva está na possibilidade de resolver problemas pela simples descrição matemática do que se quer ver presente na solução, não havendo necessidade de se indicar explicitamente os passos até o resultado, que certamente seria

específico para cada caso. É lógico que os algoritmos evolutivos correspondem a uma sequência de passos até a solução, mas estes passos são os mesmos para uma ampla gama de problemas, fornecendo robustez e flexibilidade. Sendo assim, a computação evolutiva deve ser entendida como um conjunto de técnicas e procedimentos genéricos e adaptáveis, a serem aplicados na solução de problema complexos, para os quais outras técnicas conhecidas são ineficazes ou nem sequer são aplicáveis (VON ZUBEN, F.J., 2002).

A desvantagem da computação evolutiva está na não garantia da convergência para uma solução ótima em alguns casos. Pois, nesses casos, se abre mão da garantia de obtenção da solução ótima para se conquistar uma solução satisfatória. Podendo, nos casos onde os algoritmos não sejam eficientes, inserir outros recursos que incrementar sua convergência.

Esses algoritmos possuem itens comuns, como a necessidade de definição da função objetivo ou fitness, que é o tipo de representação dos dados de cada indivíduo, seguido da geração de descendentes e da avaliação do quão adaptado cada indivíduo está em relação ao ambiente (BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z, 2000).

O principio da evolução das espécies é a base para os algoritmos evolutivos, deste modo, existe correspondência entre alguns termos da linguagem adotada em ambiente computacional e na Biologia. Essas correspondências são apresentadas a seguir, sendo que os termos do lado esquerdo são biológicos e os do lado direito são computacionais:

Cromossomo → Indivíduo; Gene \rightarrow Caractere; Valor do caractere; Alelo \rightarrow Lócus Posição do caractere; \rightarrow Genótipo \rightarrow Vetor de caracteres que representa o indivíduo Interpretação do vetor de caracteres. Fenótipo \rightarrow

Nesses algoritmos, cada indivíduo representa uma solução potencial do problema. Por meio de transformações com certo grau de aleatoriedade, a população evolui para regiões melhores no espaço de busca. Essas transformações são chamadas de recombinação, mutação e seleção.

A seção a seguir deste capítulo enfatizam apenas o Estratégias Evolutivas que é utilizada nesse trabalho.

3.4. Estratégia Evolutiva

As estratégias evolutivas (EE) constituem uma classe de algoritmos evolutivos utilizados principalmente para resolver problemas de otimização. Consiste em uma simulação de uma evolução neo-Darwiniana, onde uma população de soluções candidatas de um

problema é submetida aos operadores evolutivos. Os tópicos seguintes apresentam com mais detalhes as representações e os operadores utilizados na Estratégia Evolutiva.

3.4.1. Indivíduos

Em termos computacionais, cada indivíduo é codificado por uma única sequencia numérica, que deve representar uma solução como um todo e ser o mais simples possível. Na terminologia originada da teoria da evolução natural e da genética, cada cromossomo contém a codificação (genótipo) de uma possível solução do problema (fenótipo). Os cromossomos são usualmente implementados na forma de listas de atributos, onde cada atributo é conhecido como gene. Os possíveis valores que um determinado gene pode assumir são denominados alelos.

A definição da estrutura de dados dos indivíduos varia de acordo o problema, não havendo um padrão pré-estabelecido. Porém, usualmente, as representações utilizam vetores de dados do tipo Binário, Inteiro, Real ou Imaginário conforme (BRIANEZE, J. R., SANTOS, C. H. S.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H. E., 2007). A Figura 3.1 mostra um exemplo dessa estrutura de dados.

Representação Binária

0 1 0 0 1 1 1 1 0 1 Representação inteira 78 98 10 23 55 40 39 51 36 62 Representação Real 23.56 78.65 0.12 4.3 60.5 84.86 99.01 4.27 7.94 38.07

Figura 3.1 - Representações das estruturas de dados dos indivíduos (cromossomo) com 10 caracteres (genes).

3.4.2. **População Inicial**

O método mais comum utilizado na criação da população inicial é a inicialização aleatória dos indivíduos. Porém pode ser utilizado algum conhecimento inicial a respeito do problema caso esteja disponível. Em problemas com restrição, na maioria dos casos, toma-se cuidado para não gerar indivíduos inválidos na etapa de inicialização.

3.4.3. Avaliação dos Indivíduos

A função objetivo ou função de *fitness* avalia, em cada geração, a probabilidade de sobrevivência e reprodução de um indivíduo dentro da população, ou seja, uma medida de adaptação do indivíduo ao ambiente (DE CASTRO, L. N., 2006). A função objetivo é que o fornece uma medida, de acordo com as especificações do problema, do bom desempenho do indivíduo.

A definição da função de avaliação deve considerar a descrição do problema abordado. Se o problema é restrito, é importante escolher uma função que leva em conta as restrições do problema, evitando gerar indivíduos infactíveis. A função de fitness pode incorporar um termo de penalidade, por exemplo.

3.4.4. **Mutação**

A mutação é o operador evolutivo responsável pela transformação dos indivíduos nesse processo evolutivo. Ela basicamente é a mudanças aleatórias das propriedades dos indivíduos, fazendo com que na maioria dos casos, seu valor de adaptação no ambiente seja modificado, ou seja, seu valor de fitness sofra alterações. Em outras palavras, é o operador evolutivo responsável pela diversificação da população existente e pela exploração do espaço de busca pelo ótimo global.

Se a codificação for binária, o processo de mutação consiste na troca do valor do gene selecionado, ou seja, mudar o valor de 1 para 0 ou vice-versa (HOLLAND, 1992). Nos demais casos, os principais operadores especiais aplicados são:

- Mutação por inversão (MICHALEWICZ, Z., 1996);
- Mutação uniforme (MICHALEWICZ, Z., 1996);
- Mutação não uniforme (MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M., 1996);
- Mutação gaussiana (MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M., 1996).

3.4.5. **Operador de Seleção**

A seleção é um operador evolutivo que permite selecionar as configurações da população corrente que devem fazer parte da nova população. O operador de seleção para os algoritmos evolutivos seguem os mesmos paradigmas dos mecanismos biológicos. Na natureza o mecanismo de seleção favorece a sobrevivência do indivíduo mais adaptado.

A seleção dos indivíduos em uma geração pode ocorrer através de diferentes critérios de avaliação dos valores de adaptação do indivíduo ao ambiente. Porém, alguns mecanismos de seleção também se valem de avaliações aleatórias dos indivíduos.

Destacam-se na literatura, dentre várias técnicas para efetuar a seleção dos indivíduos da população, os seguintes métodos:

- Seleção proporcional (Roulette Wheel);
- Seleção por torneio;
- Seleção por Rank;
- Seleção elitista.

Na seleção proporcional (*Roulette Wheel*) quanto maior o *fitness* de um indivíduo, maior a probabilidade dele passar para a próxima geração. Essa técnica atribui a cada indivíduo de uma população uma probabilidade de passar para a próxima geração proporcional ao seu *fitness* medido, em relação à somatória do *fitness* de todos os indivíduos da população. Vale a pena resaltar que a seleção de indivíduos por esta técnica pode fazer com que o melhor indivíduo da população seja perdido (FOGEL, D. B, 1994) (MICHALEWICZ, Z., 1996).

A técnica de seleção por torneio é por meio de jogos (torneios) entre a população. Um conjunto k de indivíduos é escolhido aleatoriamente e o indivíduo ganhador do jogo é aquele que tem a função de adaptação de melhor qualidade, geralmente o valor k é pequeno. Após n jogos, termina-se o processo de seleção, sendo n o tamanho da população.

A seleção baseada em *Rank* utiliza as posições dos indivíduos quando ordenados de acordo com o *fitness* para determinar a probabilidade de seleção, por meio de mapeamento lineares ou não lineares (BACK, T., D.B & MICHALEWICZ, Z, 1997).

Na seleção elitista, é selecionada uma porcentagem dos melhores indivíduos e o restante por meio de *Roullet Wheel*. Uma variação deste mecanismo é simplesmente passar os *n* melhores indivíduos para próxima geração.

3.4.6. Parâmetros Iniciais

Os parâmetros iniciais: tamanho da população, taxa de mutação e o critério de parada afetam diretamente o desempenho do algoritmo evolutivo desenvolvido. Apesar disso, ainda não existe um critério sistemático e genérico que estabeleçam esses parâmetros.

O tamanho da população estabelece o número de indivíduos na população, comprometendo a eficiência e o desempenho global do algoritmo evolutivo. Se o tamanho da população for pequeno, essa população fornecerá uma baixa cobertura do espaço de busca do problema. Já se o tamanho da população for grande, ocorrerá uma alta cobertura do espaço de busca, porém demandará recursos computacionais elevados.

A taxa de mutação fornece, de certa maneira, o efeito da mutação no indivíduo e depende muito da aplicação. Se a taxa de mutação for baixa, a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca é alta, pois evita que uma dada posição fique estagnada em um determinado valor. Em contrapartida, se a taxa de mutação for alta, a busca se torna praticamente aleatória e a probabilidade de uma boa solução ser descartada é alta.

3.4.7. Critério de Parada

O critério de parada do algoritmo depende basicamente do problema em questão. Ele é responsável em estabelecer regras para o término dos algoritmos evolutivos. Os principais critérios utilizados são: número máximo de interação, repetição do indivíduo ótimo em determinado número de gerações consecutivas, e critérios específicos que satisfaçam especificações do problema.

3.4.8. Fluxograma da Estratégia Evolutiva

Na Figura 3.2 é apresentada uma visualizada do algoritmo básico de Estratégia Evolutiva.

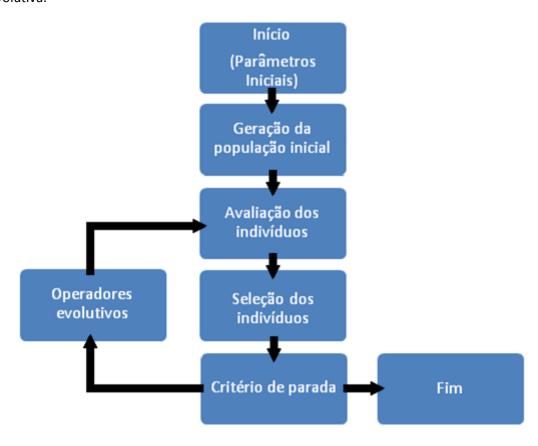


Figura 3.2 - Fluxograma que apresenta os principais passos do algoritmo evolutivo.

Inicialmente são estabelecidos os parâmetros iniciais: tamanho da população, taxa de mutação, critério de parada (quantidade de gerações) e alguns outros parâmetros pertinentes a cada tipo de algoritmo. O passo seguinte é a geração (geralmente randômica) de uma população de indivíduos, ou cromossomos, que correspondem a soluções candidatas do problema.

Nesses algoritmos há um bloco principal que traz uma estrutura de repetição, a qual representa as gerações (iterações) que ocorrerão para a evolução da população. Durante a evolução, alguns indivíduos da população são manipulados por um conjunto de operadores evolutivos. O objetivo desse processo que imita a reprodução genética é formar novos indivíduos e aumentar a diversidade da população, ajudando na busca pela melhor solução. Os

indivíduos são então avaliados, segundo uma medida de adaptação, o fitness, e os mais bem adaptados são selecionados para a próxima geração.

Essa estrutura será repetida enquanto uma condição de parada não for satisfeita. A condição de parada indica geralmente a existência, na população, de um indivíduo que representa uma solução aceitável para o problema, ou o alcance de um número prédeterminado de gerações.

3.5. Sistemas Fuzzy

Estratégias de natureza imprecisa são utilizadas por pessoas para a solução de diversos problemas do dia a dia. Muito destes problemas são processos bastante complexos e são resolvidos com base em informações aproximadas. Como exemplo, considere a realidade do gerenciamento de um projeto. Sabe-se através da experiência do especialista em projetos que quanto maior a duração do projeto, maior o risco. Por meio desta informação pode perceber duas afirmações: "o projeto A é muito longo" então "o risco do projeto é Alto".

Baseado em informações deste tipo a Teoria de Conjuntos Fuzzy e os Conceitos de Lógica Fuzzy podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos informações imprecisas expressas por um conjunto de regras linguísticas. Deste modo, como um conjunto de regras da forma "se ... então ...", pode-se desenvolver um algoritmo capaz de representar um sistema de inferência baseado nessas regras. Em outras palavras, a Teoria de Conjuntos Fuzzy e Lógica Fuzzy fornecem o ferramental matemático para se lidar com um conjunto de regras linguísticas.

A lógica fuzzy estende os conceitos da lógica booleana clássica para os números reais. Ao contrário da lógica clássica, que tem somente dois valores, verdadeiro ou falso, a lógica fuzzy é multivalorada, onde os valores são conjuntos fuzzy e o produto final é o raciocínio aproximado.

Sistemas fuzzy são sistemas computacionais reconhecidos pela sua simplicidade teórica e pela maneira intuitiva e direta que são aplicados. Essencialmente, estes sistemas são capazes de processar o conhecimento de forma compreensível e de manipular incertezas e imprecisões visando solucionar problemas reais complexos.

3.5.1. **Teoria de Conjuntos Fuzzy**

Um conjunto fuzzy ${\bf A}$ é caracterizado por uma função de pertinência (ou função característica) $\mu_A(x)$, a qual associa a cada elemento de um domínio, espaço ou um universo de discurso ${\bf X}$, um número real no intervalo unitário [0,1], com o valor de $\mu_A(x)$ em ${\bf X}$ representando o grau de pertinência de ${\bf X}$ em ${\bf A}$.

As funções de pertinência associadas aos conjuntos fuzzy dependem não somente do conceito a ser representado, mas também do contexto no qual são usadas. As funções podem ter diferentes formas. A forma das funções de pertinência utilizada neste trabalho foi a triangular, a qual é descrita por meio da equação (2.19), como segue:

$$\mu_{A}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases}$$
19

nas quais:

 $\mu_A(x)$: função de pertinência da variável x;

m: valor modal;

a: parâmetro de dispersão inferior;

b : parâmetro de dispersão superior.

A Figura 3.3 apresenta um gráfico da função de pertinência com a forma triangular como exemplo.

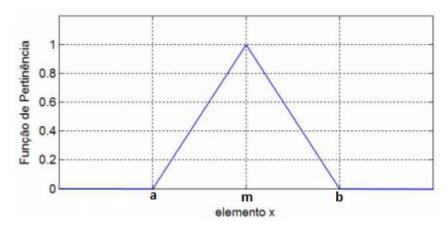


Figura 3.3 - Função de pertinência na forma triangular

As operações fuzzy basicas são complemento, união e interseção:

Complemento

O complemento de um conjunto fuzzy A do universo de discurso U pode ser denotado por $\dashv A$, com uma função de pertinência definida por:

$$\mu_{\dashv A}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{20}$$

Desta forma o complemento corresponde ao conectivo "NÃO".

União

A união de dois conjuntos fuzzy A e B do universo de discurso U pode ser denotado por $A \cup B$ ou A + B, pela a seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A \cup B} = \max \left[\mu_A(x), \mu_B(x) \right]$$
 21

Desta forma a união corresponde ao conectivo "OU".

Interseção

A Interseção de dois conjuntos fuzzy A e B do universo de discurso U pode ser denotado por $A \cap B$ ou $A \cdot B$, pela a seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A \cap B} = \min \left[\mu_A(x), \mu_B(x) \right]$$
 22

Desta forma a interseção corresponde ao conectivo "E".

3.5.2. **Lógica Fuzzy**

A primeira etapa para a solução de um problema complexo geralmente é, estruturar o conhecimento sobre o problema em conceitos gerais e, depois observar as relações essenciais entre esses conceitos. A entidade utilizada para representar de modo impreciso um conceito ou uma variável de um dado problema é a variável linguística. Ela admite como valores apenas expressões linguísticas como "frio", "muito grande", "aproximadamente alto" e etc, diferentemente das variáveis numéricas que admite apenas valores precisos.

A expressão linguística pode ser representada por um conjunto fuzzy existente no universo de discurso no qual esta variável está definida. Na Figura 3.4 é mostrado um exemplo de partição fuzzy de uma variável linguística chamada "Temperatura" no universo de discurso entre 0 e 50 graus na escala Celsius de temperatura.

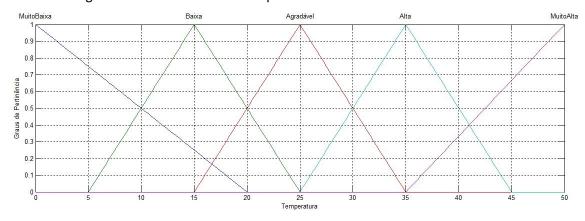


Figura 3.4 - Partição fuzzy de uma variável linguística representando a temperatura

A representação por meio de regras de produção fuzzy é a maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento fuzzy. Uma regra de produção normalmente é formada de duas partes principais:

se (antecedente) então (consequente)

O antecedente é composto por um conjunto de condições que determinam o processo de consequente da regra, quando satisfeita (mesmo parcialmente), por um mecanismo de inferência fuzzy. Já o consequente é composto por um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com a aplicação de uma regra.

3.5.3. Modelo de Inferência Fuzzy

O modelo de Inferência Fuzzy utilizado no presente trabalho é o modelo de Mamdani. Este processo de solução de conflito transforma uma informação qualitativa em outra informação qualitativa, por meio de uma conversão. O conjunto fuzzy gerado durante o processo de inferência pode então ser utilizado diretamente em um diagnóstico qualitativo de tomada de decisão.

A Figura 3.5 ilustra o fluxo dos dados por meio de um modelo de inferência Mamdani. As entradas do sistema submetem-se a três transformações para tornarem-se saídas do sistema. Primeiro, um processo de fuzzificação que usa funções de pertinência predefinidas que mapeia cada entrada do sistema em um ou mais graus de pertinência. Então, as regras, da base de regras, (também predefinidas), são avaliadas combinando graus de pertinência para formar as forças de saídas. Por último, o processo de defuzzificação calcula as saídas do sistema, baseando-se nas forças e em funções de pertinência.

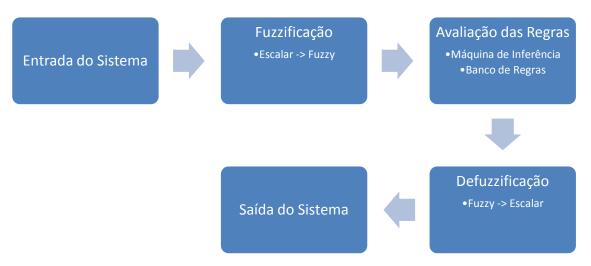


Figura 3.5 - Diagrama típico de um modelo de inferência Mamdani

Fuzzificação é o processo de designar ou calcular um valor para representar o grau de pertinência de uma entrada, em um ou mais grupos qualitativos, chamados conjuntos fuzzy. Para realização deste cálculo é realizado a inferência Máx-Min, que utiliza as operações de união e de interseção entre conjuntos por meio dos operadores de máximo e de mínimo. Neste processo os antecedentes de cada regra são processados por meio da interseção fuzzy entre os graus de pertinência das entradas. Este processo gera um grau de pertinência de para cada regra de produção, transformando informações quantitativas em informações qualitativas.

A avaliação das regras é a etapa em que a máquina de inferência recebe os valores fuzzy, processa as regras existente no Banco de Regras e gera um conjunto fuzzy de saída. Nesta etapa, os graus de pertinências gerados por cada regra limitam os valores máximos dos

conjuntos fuzzy de saída gerados por cada regra. Uma operação global de união compõem um conjunto fuzzy para cada variável de saída, contendo informações sobre todas as regras para as entradas atuais. Desta forma, ocorre o processo de transformação de uma informação qualitativa em outra informação qualitativa, por meio de uma conversão.

Defuzzificação é o processo que transforma informações qualitativas em uma informação quantitativa, sendo um processo de especificação. Os métodos mais utilizados neste processo são o método do centro de massa e o método da média dos máximos.

O objetivo aqui é apenas apresentar conceitos da Teoria de Conjuntos Fuzzy, da Lógica Fuzzy e de Sistemas de Inferências Fuzzy relevantes ao atual trabalho, de modo a permitir ao leitor uma base teoria introdutória para compreender o trabalho desenvolvido. Para um estudo mais detalhado do assunto é sugerido à leitura dos seguintes livros e trabalhos: (PEDRYCZ, W. & GOMIDE, F., 1998), (LIN, C-T. & LEE, C.S. G., 1996), (ZIMMERMANN, H-J., 1994), (GOMIDE, F., GUDWIN, R., TANSCHEIT, R., 1995) e (MENDEL, J. M., 1995). Todos eles contêm listas completas de referências a publicações relevantes na área de Sistemas Fuzzy

Capítulo 4 - Sistema Inteligente Híbrido Proposto

4.1. Apresentação

Neste Capítulo, é apresentado o Sistema Inteligente Híbrido proposto empregado na solução do problema de Planejamento da Operação do Sistema Hidrotérmico, sendo definida a forma como o algoritmo foi implementado e descritas as particularidades e as adaptação para a solução do problema específico.

O Sistema Inteligente Híbrido (SIH) desenvolvido tem o objetivo de determinar a vazão defluente média mensal, para calcular o montante de geração hidráulica de cada usina que compõe o sistema em estudo, tendo como objetivo principal a minimização do custo de operação sujeito às restrições físicas e operacionais do sistema.

A metodologia utilizada foi desenvolvida em MATLAB, que é uma linguagem de programação muito fácil de aprender, fácil de utilizar e, quando bem utilizado, aumenta, em muito, a produtividade. É também uma ferramenta profissional muito usada mundialmente, principalmente por engenheiros, sobretudo por pesquisadores que tem contato com trabalhos experimentais.

O MATLAB trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Essa linguagem foi escolhida por integrar análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar, onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional. Alem disso, o programa dispõe de diversas extensões (chamadas toolboxes ou blocksets) como o Fuzzy Logic Toolbox ™, que foi utilizado neste trabalho por permitir modelar comportamentos de sistemas complexos usando as regras da lógicas simples, e implementar essas regras em um sistema de inferência fuzzy.

4.2. Descrição do SIH desenvolvido

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma completo do programa desenvolvido. Nos subtópicos seguintes é apresentada a descrição de cada etapa deste fluxograma.

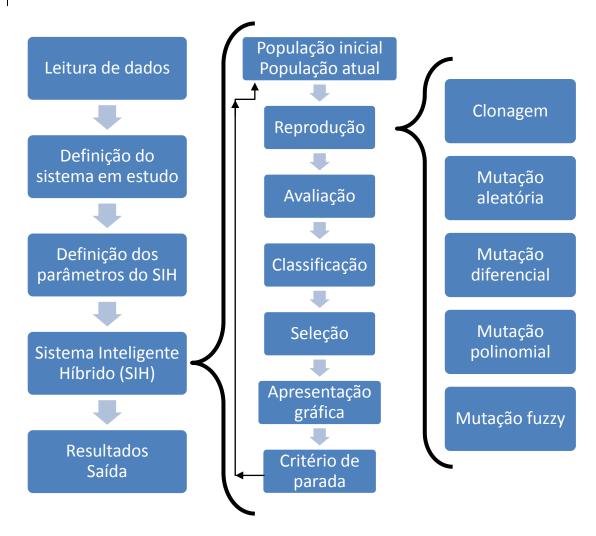


Figura 4.1 - Fluxograma do SIH desenvolvido

4.2.1. Leitura de dados

Primeiramente, na Leitura de dados, é realizada a leitura dos arquivos disponibilizados pelo deck de preços, encontrado na biblioteca virtual da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). O deck de preços é o conjunto de arquivos necessários para o processamento dos programas Newave e Decomp. Os arquivos de entrada de interesse para o atual programa, HIDR.DAT e VAZOES.DAT, são binários. Então para realizar a leitura dos arquivos citados, a CCEE disponibiliza os arquivos executáveis desenvolvidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - hydroedit.exe e vazedit.exe (CCEE, 2013). Por meio destes executáveis foi possível obter as planilhas, *arquivo.xls*, com todos os dados de entradas necessários para o programa desenvolvido. A Figura 4.2 apresenta, como exemplo, os dados de entrada referente a uma hidrelétrica por meio dos executáveis hydroedit.exe. Além dos dados das usinas apresentados, o histórico de vazão e a MLTs também são utilizados no programa.

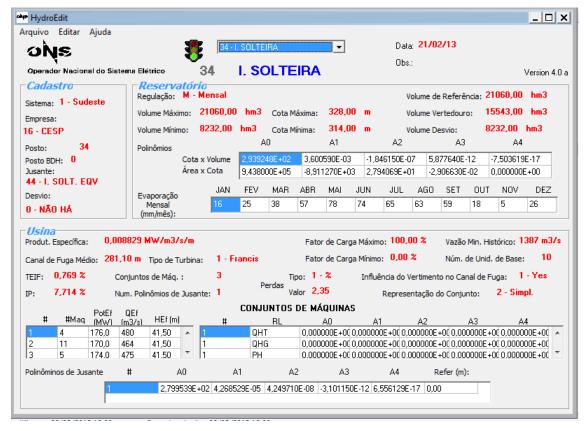


Figura 4.2 - Dados de entrada de uma usina hidrelétrica (Ilha Solteira)

4.2.2. Definição do sistema em estudo

Em seguida, na definição do sistema em estudo, são estabelecidas pelo usuário, as usinas hidrelétricas que farão parte da simulação. O usuário determina as usinas por meio do número de referência. Cada uma das usinas possui um número que serve para identificá-la e funciona como se fosse uma carteira de identidade da usina. O número de referência corresponde também à posição da usina no arquivo HIDR.DAT. Nesta etapa, o usuário define também o horizonte em estudo (número de mês em estudo) e o tipo da vazão afluente utilizada. A vazão afluente pode ser escolhida do histórico de vazões ou pode ser a MLT.

4.2.3. Sistema Inteligente Híbrido (SIH)

Realizada as etapas anteriores, a metodologia desenvolvida está pronta para atuar. O programa desenvolvido tem o objetivo de determinar a vazão defluente média, com discretização mensal, para calcular o montante de geração hidráulica de cada usina que compõe o sistema em estudo, tendo como objetivo principal a minimização do custo de operação sujeito às restrições físicas e operacionais do sistema. A metodologia adotada é resumida nos seguintes passos:

I. Uma população inicial de pais, μ indivíduos, factíveis é criada com comprimento igual ao horizonte T;

- II. A população de μ pais é submetida ao processo de reprodução. Este processo é constituído pela clonagem, mutação aleatória, mutação diferencial, mutação polinomial e a mutação fuzzy. Como resultado, é gerada uma população de λ filhos.
- III. Os **λ** filhos são avaliados.
- IV. Os novos μ pais são escolhidos, sendo um quarto pela seleção elitista e o restante de forma aleatória.
- V. Se o critério de parada não foi atingido então voltar ao passo II.

No presente algoritmo os parâmetros de entrada são:

T: Total de intervalos de tempo (meses - horizonte do planejamento)

 $a_1 \dots a_T$: Vetor de vazão afluente E os parâmetros de saídas são:

u₁ ... **u**_T: Vetor de vazão defluente

 $x_1 \dots x_T$: Vetor de volume dos reservatórios

Portanto, com base na Computação Evolutiva, uma população inicial é formada como segue.

4.2.3.1. População Inicial / População atual

A população inicial é formada por um conjunto de indivíduos (soluções candidatas) gerados de forma aleatória.

O indivíduo é formado por valores de vazão defluente médio de cada usina hidrelétrica do sistema, para cada mês do horizonte em estudo. O indivíduo apresenta também o valor da taxa de mutação de cada usina do sistema em estudo, como apresentado na Figura 4.3. Deste modo, a taxa de mutação também varia durante o processo evolutivo, caracterizando então um sistema auto-adaptativo.

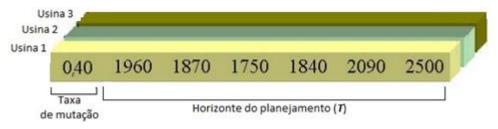


Figura 4.3 - Representação de um indivíduo formado por três usinas hidrelétricas em um horizonte de estudo de seis meses

A forma gráfica de apresentação do indivíduo é mostrada na Figura 4.4, nesta forma a taxa de mutação não é apresentada.

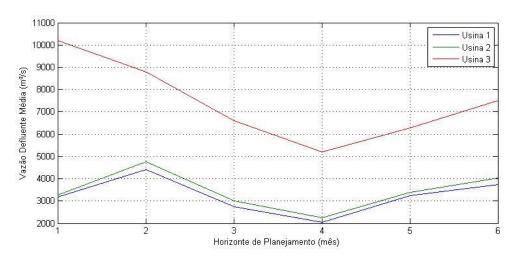


Figura 4.4 - Representação gráfica de um indivíduo formado por três usinas hidrelétrica em um horizonte de estudo de seis meses

A população é formada pelo conjunto de indivíduos, portanto, é uma matriz tridimensional, como pode visualizar-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

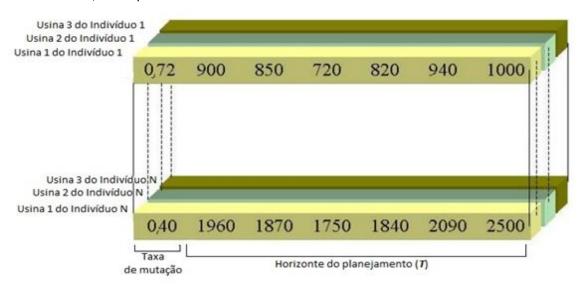


Figura 4.5 - Representação de um população formado por três usinas hidrelétricas em um horizonte de estudo de seis meses N indivíduos

Logo após a sua formação, a população inicial se torna a população atual que será submetida ao processo de reprodução descrito a seguir.

4.2.3.1. Reprodução

A população atual é submetida ao processo de reprodução. Este processo é constituído pela clonagem, mutação aleatória, mutação diferencial, mutação polinomial e a mutação fuzzy.

4.2.3.1.1. Clonagem

A clonagem é o processo responsável pela manutenção dos indivíduos da população atual (os pais) na disputa pela sobrevivência do processo evolutivo. Nesta etapa é realizada apenas uma cópia da população atual, ou seja, os filhos gerados nesse processo são idênticos aos seus respectivos pais.

Considerando o indivíduo apresentado na Figura 4.4 como parte da população atual (os pais), após o processo de clonagem o filho resultante deste indivíduo é apresentado na Figura 4.6.

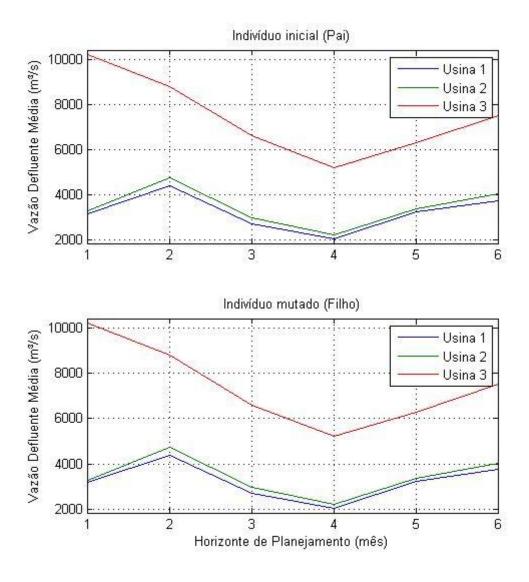


Figura 4.6 - Representação gráfica de um indivíduo resultante da clonagem

4.2.3.1.2. Mutação aleatória

A mutação aleatória é o primeiro processo responsável pela diversificação da população existente e pela exploração do espaço de busca pelo ótimo global. Neste processo, toda a população atual sofre mutação aleatória. A quantidade e as posições dos caracteres de

cada indivíduo que sofrerão mutação são determinadas de forma aleatória e sofrem a mutação com a taxa de mutação corespondente de cada usina hidrelétrica. A mutação realizada pode ser positiva ou negativa (a vazão média pode aumentar ou diminuir), isso também é determinado de forma aleatória.

Considerando o indivíduo apresentado na Figura 4.4 como parte da população atual (os pais). Esse indivíduo é formado por uma matriz com 3 linhas e 7 colunas, totalizando 21 elemento. Considerando que de forma aleatória, neste processo de mutação, é determinado que 5 elementos deste indivíduo nas posições [4 11 12 17 21] sofram mutação com a taxa de mutação correspondentes da sua posição, o filho resultante deste indivíduo pode ser então como apresentado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Representação de um indivíduo resultante da mutação aleatória

Indivíduo inicial (Pai)							
	Taxa de						
Usina	mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
1	0,051	3170	4405	2732	2056	3246	3753
2	-0,068	3262	4748	2995	2236	3379	4041
3	0,098	10200	8786	6612	5206	6283	7515
Resultado da mutação (Filho)							
	Taxa de						
Usina	mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
1	0,051	3170	4405	2871	2056	3246	3753
2	-0,068	3262	4748	2791	2084	3379	4041
3	0,098	10200	9647	6612	5206	6283	8251
Mutação (Diferença entre o Filho e o Pai)							
	Taxa de						
Usina	mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 2 Mês 3		Mês 5	Mês 6
1	0,000	0	0	139	0	0	0
2	0,000	0	0	-204	-152	0	0
3	0,000	0	861	0	0	0	736

4.2.3.1.3. Mutação diferencial

A mutação diferencial foi desenvolvida baseada na Evolução Diferencial (ED) proposta originalmente por (STORN, R.; PRICE, K., 1995). O objetivo deste operador é agregar, ao SIH desenvolvido, a robustez e a eficiência para a minimização de funções não-lineares e não-diferenciáveis no espaço contínuo da ED, buscando adicionar as seguintes característica (CHENG, S. -L.; HWANG, C., 2001):

- Menor tendência de se concentrar em mínimos locais, pois a busca pelo ótimo global é
 feita através da manipulação de uma população de soluções ou, em outras palavras,
 por uma busca simultânea em diferentes áreas do espaço de soluções;
- Eficiência na solução de problemas de otimização de funções objetivo que não requerem informações relativas à derivadas;
- Permite que os parâmetros de entrada e saída sejam representados como ponto flutuante sem nenhum esforço computacional;
- A não necessidade de manter um tamanho grande de população.

Na mutação diferencial, toda a população atual sofre mutação. Como na mutação aleatória, a quantidade e as posições dos caracteres de cada indivíduo que sofrerão mutação são determinadas de forma aleatória, e sofrem a mutação com a taxa de mutação correspondente de cada usina hidrelétrica. A diferença desta mutação para a mutação aleatório é que a mutação diferencial é baseada na Diferença Vetorial Ponderada (DVP) de um indivíduo da geração atual com o melhor indivíduo da geração anterior.

Considere novamente o indivíduo apresentado na Figura 4.4 como parte da população atual (os pais). E considerando que de forma aleatória, neste processo de mutação, é determinado que 10 elementos deste indivíduo nas posições [2, 3, 4, 8, 11, 12, 14, 17, 20, 21] sofram mutação com a taxa de mutação correspondentes da sua posição. Das posições determinadas são calculadas a diferença do indivíduo atual com o melhor indivíduo da geração anterior. Esta diferença é multiplicada pelo módulo da taxa de mutação correspondente, sendo denotada por diferença ponderada, e é usada para perturbar o indivíduo atual. Como exemplo, o filho resultante deste indivíduo pode ser então apresentado como na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Representação de um indivíduo resultante da mutação diferencial

Indivíduo inicial (Pai)							
Usina	Taxa de mutação	Mês 1	ês 1 Mês 2 Mês 3 Mês 4		Mês 5	Mês 6	
1	0,051	3170	4405	2732	2056	3246	3753
2	-0,068	3262	4748	2995	2236	3379	4041
3	0,098	10200	8786	6612	5206	6283	7515
Melhor indivíduo da geração anterior							
Usina	Taxa de mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
1	0,071	3187	4427	2779 2040		3215	3787
2	0,058	3237	4786	2987	2987 2193		4061
3	0,048	10183 8813 6644 5175 62		6293	7526		
Resultado da mutação (Filho)							
	Taxa de	_		Mâc 2 Mâc 4			
Usina	mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 3 Mês 4		Mês 5	Mês 6
1	0,051	3171	4406	2734 2056		3246	3753
2	-0,059	3262	4748	2994 2233		3379	4042
3	0,098	10200	10200 8789 6612 5206 6284		6284	7516	
Mutação (Diferença entre o Filho e o Pai)							
Usina	Taxa de mutação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
1	0,000	1	_	1 2 0		0	0
2	0,009	0	0	-1	-3	0	1
3	0,000	0	3	0	0	1	1

4.2.3.1.4. Mutação polinomial

A mutação polinomial foi desenvolvida baseada no Ajuste de Curva Polinomial (ACP) por Método dos Mínimos Quadrados. Este método é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados.

O método de Ajuste de Curva Polinomial (ACP) por mínimos quadrados foi utilizado na mutação polinomial para obter um novo indivíduo (filho) com o mínimo erro médio quadrático em relação ao indivíduo inicial (pai). Alem de ser uma forma distinta de gerar um novo indivíduo, a mutação polinomial proposta possibilita gerar esse novo indivíduo de tal forma que, as diferenças do somatório de todos os elementos do novo indivíduo (filho) com o somatório de todos os elementos do indivíduo inicial (pai) é nula ou a mínima possível. Isso

quer dizer que o que foi subtraído de um elemento do indivíduo devido à mutação é somado em outro elemento do mesmo indivíduo.

Esta propriedade é importante para o SIH desenvolvido porque umas das restrições do problema de otimização deste trabalho é o volume do reservatório, que possui os limites de máximo e mínimo, e possui a restrição do volume final ser igual ou maior do que o volume inicial, como pode ser visto na equação 16 reescrita a seguir.

$$x_{i,T}^{med} \ge x_{i,1}^{med} \tag{16}$$

A relação de transformação de vazão defluente média para volume médio do reservatório é obtida da multiplicação por um fator Δt_t , como visto na equação 10 reescrita a seguir.

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left(a_{i,t} + \left(\sum_{k \in \Omega_i} u_{k,t}\right) - u_{i,t}\right) \cdot \Delta t_t$$
 10

Desta forma, considerando que o indivíduo inicial fosse um indivíduo factível, ou seja, um indivíduo que respeite todas as restrições inclusive a do volume final dada pela equação 16, é importante que o volume médio final do novo indivíduo permaneça inalterado após a mutação, ou seja, se a mutação resultou na diminuição do volume médio de um determinado mês referente a um indivíduo, o volume médio de outro mês referente a este mesmo indivíduo deve aumentar, assim gerar um novo indivíduo também factível.

Para que isso ocorra, a diferenças do somatório de todos os elementos do novo indivíduo (filho) com o somatório de todos os elementos do indivíduo inicial (pai) precisa ser nula ou a mínima possível. Como essa propriedade é encontrada no método dos mínimos quadrados, a mutação polinomial aqui descrita agrega essa propriedade ao SIH desenvolvido.

A forma gráfica de apresentação do indivíduo é mostrada na Figura 4.7. Nesta figura podemos visualizar que a vazão de cada usina pode ser representada por uma curva. Neste operador de mutação, o ajuste de curva polinomial (método dos mínimos quadrados) é aplicado em cada curva resultando em uma nova curva com o mínimo erro médio quadrático em relação a inicial.

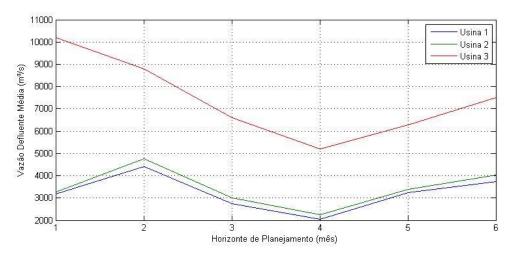


Figura 4.7 - Representação gráfica de um indivíduo formado por três usinas hidrelétrica em um horizonte de estudo de seis meses

O Matlab disponibiliza a função polyfit que realiza este ajuste de curva polinomial. Esta função tem como saída os coeficientes do polinômio de grau N resultante do ajuste de curva polinomial, e tem como dados de entrada os elemento do eixo horizontal e vertical de cada curva (mês e a vazão média de cada usina) e o grau do polinômio do ajuste desejado. O Matlab disponibiliza também a função polyval que, por meio dos coeficientes do polinômio apresenta o valor desejado (o ponto na curva). Por meio destas funções foi que o operador mutação polinomial foi desenvolvido.

Para entendermos melhor a mutação polinomial vamos considerar apenas parte de um indivíduo, a vazão defluente média de apenas uma usina durante o horizonte de estudo de 24 meses. Primeiramente, na mutação polinomial, ocorre o sorteio do grau do polinômio N entre 1 e 6. Em seguida é calculado um novo conjunto de valores de vazão média defluente, por meio do ajuste de curva polinomial (ACP) com o grau do polinômio sorteado. Como ilustração, a Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam essas duas curvas com o grau do polinômio variando de 1 a 6.

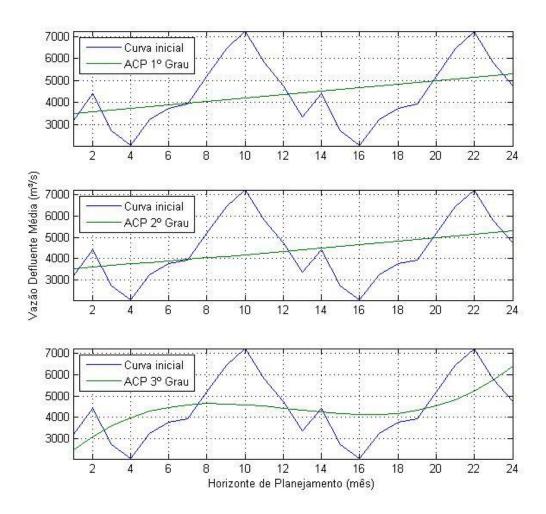


Figura 4.8 - Representação gráfica de parte de um indivíduo formado por uma usina hidrelétrica em um horizonte de estudo de 24 meses e as curvas equivalentes do ACP de grau 1, 2 e 3

Após os cálculos do ajuste de curva polinomial, é calculada a diferença ponto a ponto das duas curvas (Curva resultante do ACP e a Curva inicial). Essa diferença é então, multiplicada por uma fator aleatório entre 0 e 1 e somada a curva inicial. O resultado é a nova curva que é parte do novo indivíduo.

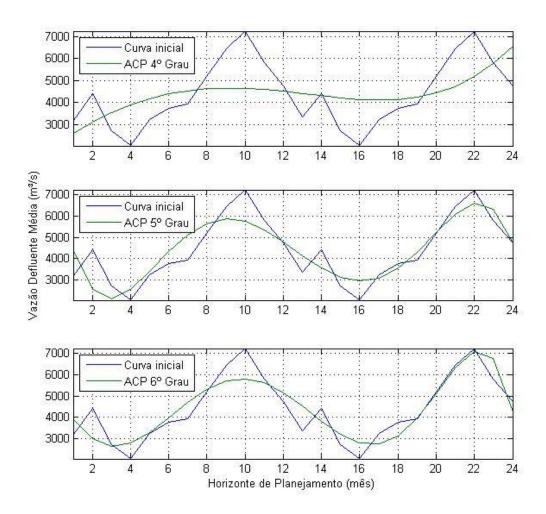


Figura 4.9 - Representação gráfica de parte de um indivíduo formado por uma usina hidrelétrica em um horizonte de estudo de 24 meses e as curvas equivalentes do ACP de grau 4, 5 e 6

A mutação polinomial baseada no ajuste de curvas de um polinômio de 5º grau, de parte de um indivíduo (apenas uma usina hidrelétrica), em um horizonte de planejamento de 24 meses é exemplificada na Figura 4.10. Em conformidade com o descrito anteriormente, na Figura 4.10 é possível visualizar como a mutação polinomial funciona. Neste caso, o fator aleatório entre 0 e 1 multiplicado a diferença ponto a ponto das duas curvas (Curva resultante do ACP e a Curva inicial) foi 0.36.

Podemos perceber, então, que o novo indivíduo gerado pela mutação polinomial se encontra sempre entra as duas curvas (Curva resultante do ACP e a Curva inicial) e que a diferenças do somatório de todos os elementos do novo indivíduo (filho) com o somatório de todos os elementos do indivíduo inicial (pai) será sempre nula ou a mínima. Neste exemplo a diferença deste somatório foi nula como esperado.

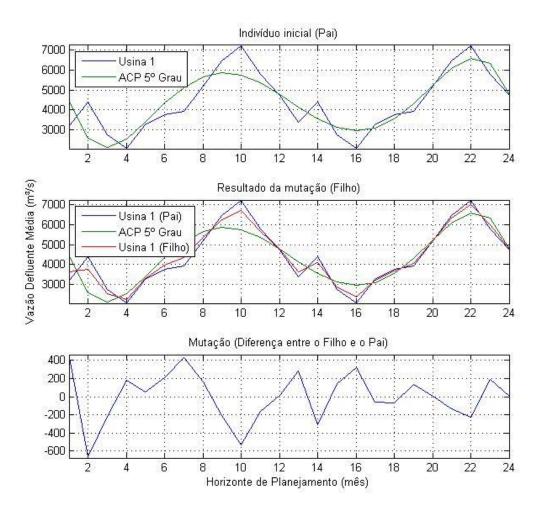


Figura 4.10 - Representação de um indivíduo resultante da mutação polinomial baseado no ACP de 5º grau

4.2.3.1.5. Mutação fuzzy

A mutação Fuzzy foi desenvolvida baseada no Sistema de Inferência Fuzzy (SIF). Os sistemas de inferência fuzzy são baseados em regras de produção que fazem uso das variáveis linguísticas para executar um processo de tomada de decisão. A base de conhecimento destes sistemas consiste em um conjunto de regras de produção fuzzy do tipo "se…então", e têm seu funcionamento baseado em três etapas: fuzzificação, procedimentos de inferência e defuzzificação, como visto nas Seção 3.5 deste trabalho.

O sistema de inferência fuzzy proposto tem por objetivo realizar a mutação na direção de um indivíduo melhor. Analisando as características atuais do indivíduo (vazão, volume do reservatório, custo da geração térmica) a mutação é realizada de forma a respeitar as restrições e diminuir a geração térmica.

O Sistema de Inferência Fuzzy foi desenvolvido por meio da extensão (toolbox ou blockset) *Fuzzy Logic Toolbox™*, do Matlab como apresentado na Figura 4.11.

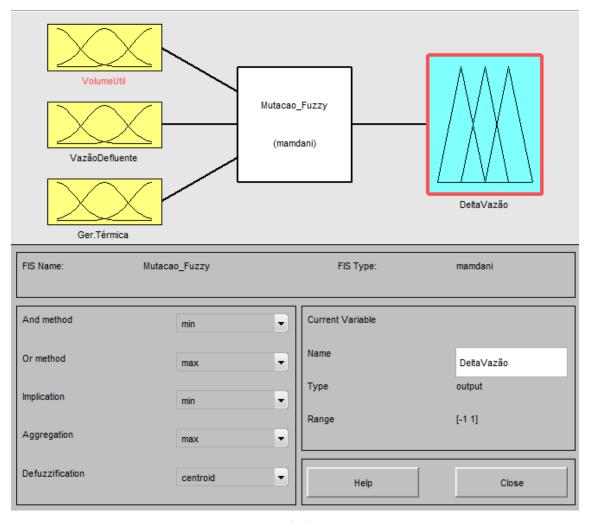


Figura 4.11 - Sistema de Inferência Fuzzy desenvolvido

A Figura 4.11 apresenta o Sistema de Inferência Fuzzy desenvolvido e suas características. Devido à simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana, o Sistema de Inferência Fuzzy desenvolvido foi preparado utilizando-se o Método de Mamdani na etapa de inferência, e o Método do centro de massa (centroid), na etapa de defuzzificação.

As variáveis de entrada são: volume útil do reservatório, vazão defluente e geração termoelétrica. Os termos linguísticos do volume útil são: "Vazio", "Médio" e "Cheio"; já a vazão defluente e a geração termoelétrica possuem como conjunto de termos linguísticos "Baixa", "Média" e "Alta". O universo de discurso das variáveis é entre 0 e 1 por unidade (PU). As partições fuzzy das variáveis de entradas são apresentadas nas Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

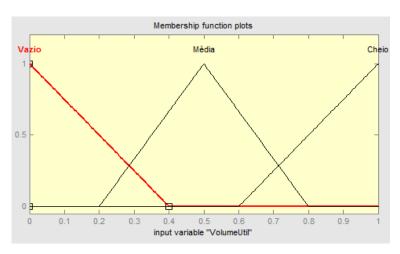


Figura 4.12 - Partição fuzzy do Volume Útil

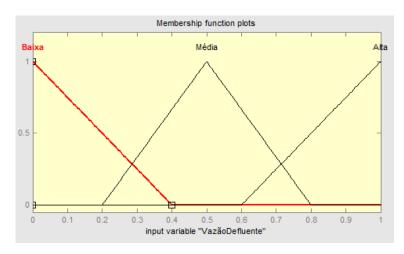


Figura 4.13 - Partição fuzzy do Vazão Defluente

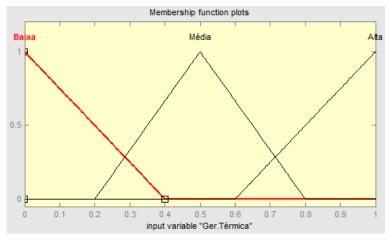


Figura 4.14 - Partição fuzzy do Geração Termoelétrica

A variável de saída é a Delta Vazão, que corresponde a variação da vazão defluente resultante da mutação. Seu universo de discurso é entre -1 e 1 por unidade (PU) e possui como conjunto de termo linguístico os termos: "Diminuir Muito", "Diminuir Pouco", "Manter"

"Aumentar Pouco" e "Aumentar Muito". A partição fuzzy da variável de saída é apresentada na Figura 4.15.

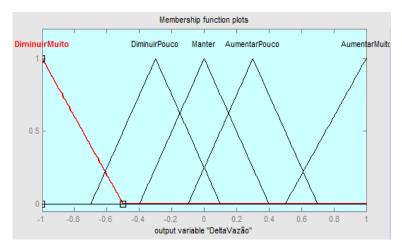


Figura 4.15 - Partição fuzzy da variável de saída (Delta Vazão)

Na abordagem proposta nesta pesquisa, especializou-se um sistema composto por 27 regras de inferência. As regras dos sistemas de inferência fuzzy implementado são apresentadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Regras dos sistemas de inferência fuzzy

Regra	١	/olume Útil	Vazão Defluente		Geração Térmica		Delta Vazão Defluente	
1	se	Vazio	e se	Baixa	e se	Baixa	então	Manter
2	se	Médio	e se	Baixa	e se	Baixa	então	Manter
3	se	Cheio	e se	Baixa	e se	Baixa	então	Aumentar Pouco
4	se	Vazio	e se	Média	e se	Baixa	então	Diminuir Pouco
5	se	Médio	e se	Média	e se	Baixa	então	Manter
6	se	Cheio	e se	Média	e se	Baixa	então	Manter
7	se	Vazio	e se	Alta	e se	Baixa	então	Diminuir Muito
8	se	Médio	e se	Alta	e se	Baixa	então	Diminuir Pouco
9	se	Cheio	e se	Alta	e se	Baixa	então	Manter
10	se	Vazio	e se	Baixa	e se	Médio	então	Aumentar Pouco
11	se	Médio	e se	Baixa	e se	Médio	então	Aumentar Muito
12	se	Cheio	e se	Baixa	e se	Médio	então	Aumentar Muito
13	se	Vazio	e se	Média	e se	Médio	então	Manter
14	se	Médio	e se	Média	e se	Médio	então	Aumentar Pouco
15	se	Cheio	e se	Média	e se	Médio	então	Aumentar Muito
16	se	Vazio	e se	Alta	e se	Médio	então	Diminuir Pouco
17	se	Médio	e se	Alta	e se	Médio	então	Manter
18	se	Cheio	e se	Alta	e se	Médio	então	Aumentar Pouco
19	se	Vazio	e se	Baixa	e se	Alta	então	Aumentar Pouco
20	se	Médio	e se	Baixa	e se	Alta	então	Aumentar Muito
21	se	Cheio	e se	Baixa	e se	Alta	então	Aumentar Muito
22	se	Vazio	e se	Média	e se	Alta	então	Aumentar Pouco
23	se	Médio	e se	Média	e se	Alta	então	Aumentar Muito
24	se	Cheio	e se	Média	e se	Alta	então	Aumentar Muito
25	se	Vazio	e se	Alta	e se	Alta	então	Manter
26	se	Médio	e se	Alta	e se	Alta	então	Aumentar Pouco
27	se	Cheio	e se	Alta	e se	Alta	então	Aumentar Pouco

As Figuras Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam a relação entre as variáveis de entrada: "Volume Útil", "Vazão Defluente" e "Geração Térmica" com a variável de saída "Delta Vazão Defluente".

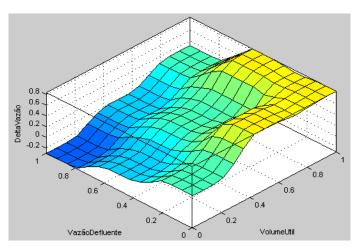


Figura 4.16 - Relação entre as variáveis de entrada "Volume Útil" e "Vazão Defluente"

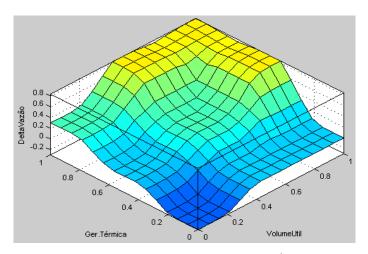


Figura 4.17 - Relação entre as variáveis de entrada "Volume Útil" e " Geração Térmica"

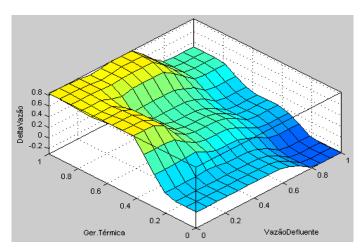


Figura 4.18 - Relação entre as variáveis de entrada "Vazão Defluente" e " Geração Térmica"

Para entendermos melhor a mutação fuzzy vamos considerar apenas parte de um indivíduo, a vazão defluente média de apenas uma usina durante o horizonte de estudo de 24

meses. O volume útil e a geração térmica corespondentes a este indivíduo são apresentados na Figura 4.19.

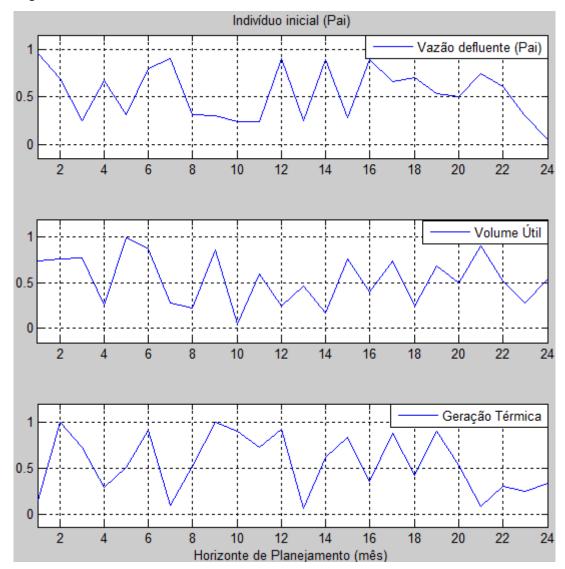


Figura 4.19 - Representação gráfica das entradas do SIF proposto

Como saída, o SIF proposto apresenta os resultados apresentados na Figura 4.20. Analisando estes resultados é possível observar que esta mutação tende a aumentar a vazão de um indivíduo quando a geração térmica corespondente é alta, o volume útil do reservatório é alto e a vazão defluente é baixa (mês 9 por exemplo). Tende a diminuir quando a vazão defluente é alto (mês 7 por exemplo).

Todas as regras apresentadas na Tabela 4-3 possibilitam que essa mutação se torne mais eficiente do que uma simples mutação aleatória tornando o SIH proposto mais eficiente na busca da solução do problema proposto.

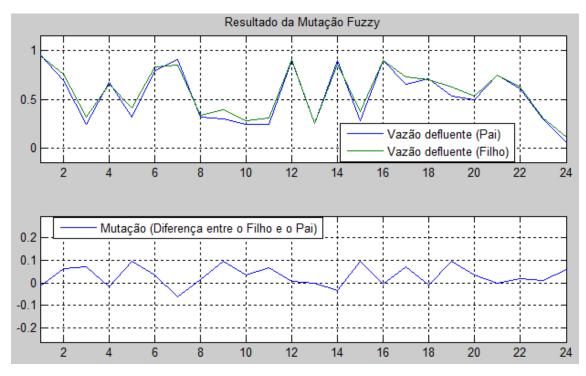


Figura 4.20 - Representação gráfica da saída do SIF proposto

4.2.3.2. Avaliação

A função de avaliação é dada pelo custo operativo no período de planejamento em conjunto com a adaptação do indivíduo factível. A função avaliação para cada indivíduo infactível será o custo operativo avaliado no ponto infactível mais uma função de penalização K(x,u). Deste modo, considerando a função objetivo apresentada na Equação 1, a função avaliação do SIH proposto é apresentada na Equação 23 a seguir.

$$\sum_{t=1}^{T} \left[\left(\sum_{j=1}^{J} \Psi_{j}(g_{j,t}) \right) \cdot \lambda_{t} \right] + K(x,u)$$
23

$$K(x,u) = \alpha (A(x_i) + B(u_i))$$

$$A(x_i) = \begin{cases} x^{min} - x_i & se \quad x_i < x^{min} \\ x_i - x^{max} & se \quad x_i > x^{max} \\ 0 & se \quad x^{min} > x_i > x^{max} \end{cases}$$
 25

$$B(u_{i}) = \begin{cases} u^{min} - u_{i} & se \ u_{i} < u^{min} \\ u_{i} - u^{max} & se \ u_{i} > u^{max} \\ 0 & se \ u^{min} > u_{i} > u^{max} \end{cases}$$
 26

Em que:

 $A(x_i)$: É o desvio do volume do reservatório com relação aos seus limites

 $B(u_i)$: É o desvio da vazão defluente com referência a seus limites

α Constante das soluções infactíveis

A constante α recebe valor de modo a garantir que a avaliação das soluções infactíveis sejam sempre piores que a avaliação de qualquer solução factível.

4.2.3.3. Classificação

A classificação é realizada de acordo com o resultado da avaliação de cada indivíduo. Nesta etapa os indivíduos são organizados de forma crescente em relação ao custo operativo avaliado.

4.2.3.4. **Seleção**

Nesta etapa são selecionados os indivíduos que devem fazer parte da nova população. No SIH propostos foi implementado uma variação da seleção elitista, selecionando os n melhores indivíduos (n=25% da população) e o restante de forma aleatória.

4.2.3.5. Apresentação dos resultados

Nesta etapa, o SIH proposto apresenta ao usuário as características do melhor indivíduo da geração atual. O usuário visualiza dados importantes de todo o horizonte em estudo como: Vazão afluente incremental, Cota montante Altura da queda líquida, Variação da vazão defluente, Vazão defluente em m³/s, Vazão defluente em pu, Volume do reservatório em hm³, Volume do reservatório em pu, Volume útil do reservatório em pu, Produção hidrelétrica, Produção termoelétrica e Custo.

Com exemplo, a Figura 4.21 ilustra a apresentação dos resultados do melhor indivíduo, durante o processo evolutivo, de um sistema formado por 3 usina hidrelétricas (Três Marias, Sobradinho e Itaparica) com horizonte de estudo de 12 meses.

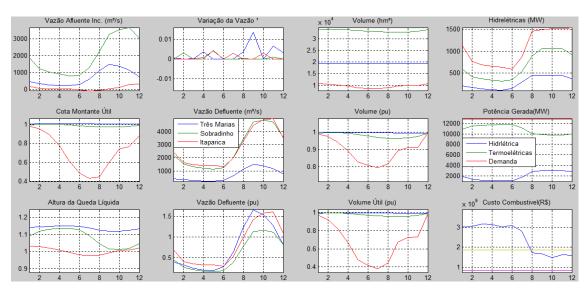


Figura 4.21 - Apresentação dos resultados

Deste modo esta etapa permite ao usuário acompanhar o processo evolutivo e analisar a convergência da solução do problema em questão.

4.2.3.6. Critério de Parada

O critério de parada do algoritmo depende basicamente do problema em questão. Ele é responsável em estabelecer regras para o fim do processo evolutivo. Foram adotados dois critérios de parada:

- número de gerações, onde se pré-determina o número de gerações que o algoritmo executará;
- estagnação, a quantidade de gerações para as quais o melhor indivíduo pode se repetir é fixada e se esse número for atingido o algoritmo será interrompido.

Deste modo, como critérios de parada para o SIH proposto, assumiu-se o número máximo de gerações, fixado em 10.000, que foi suposto como suficiente para a estabilização do melhor indivíduo. Adicionalmente, considerou-se uma solução como estagnada caso o melhor indivíduo não evoluísse por mais de 200 gerações.

Capítulo 5 - Resultados

5.1. Apresentação

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação do SIH proposto em parques hidrelétricos pertencentes ao Sistema Elétrico Brasileiro.

Para o efeito de comparação dos resultados obtidos e a verificação de desempenho, o SIH proposto foi aplicado a três sistemas teste. O primeiro sistema teste foi sugerido por (AMENDOLA, 2007) basicamente o existente no subsistema nordeste, que está distribuído na cascata do rio São Francisco e é formada por sete usinas. O segundo sistema teste foi sugerido por (PASTOR HUMPIRI, 2005) constituído por uma cascata em Y formada por sete importantes usinas do Sistema Sudeste Brasileiro. Com o objetivo de verificar o desempenho do SIH proposto em sistemas maiores o algoritmo proposto foi aplicado em um terceiro sistema teste composto por 35 usinas hidroelétricas abrangendo grande parte do Sistema Sudeste Brasileiro.

5.2. Sistema teste I - 7 usinas em cascata

O algoritmo proposto foi aplicado a um sistema teste formado basicamente pelo parque hidrelétrico do subsistema nordeste. Este sistema é uma cascata formada por sete usinas sendo que três usinas com reservatório e quatro usinas a fio d'água (ver Figura 5.1). O objetivo do despacho hidrotérmico deste sistema teste é a realização do planejamento com as seguintes características:

- Horizonte de planejamento de dois anos discretizados em 24 estágios mensais.
- Restrição da equação 16 inativa (o volume dos reservatórios no final do horizonte de planejamento não precisa ser igual ou maior do que o volume dos reservatórios no início do horizonte de planejamento).
- Carga própria a ser atendida de 8.500 MW-médios.
- Vazões incrementais afluente por usina, em cada mês, iguais às média mensais de longo termo (MLT).
- O período adotado é baseado no ano hidrológico com o início no mês de maio (início do período seco) e o final o mês de abril (final do período úmido).



Figura 5.1 - Sistema teste I - 7 usinas em cascata

Para obter o despacho termoelétrico mais econômico possível, foi adotado a otimização prévia do Despacho Econômico Termelétrico (DET) por faixa de operação para todo intervalo de operação das usinas termoelétricas conforme a Tabela 4-1 a seguir.

Tabela 5-1: Despacho Termelétrico Otimizado

Faixa (MW)	Custo horário (R\$/h)
0 ≤ <i>g</i> _{j,t} ≤638	$60g_{j,t}$
$638 < g_{j,t} \le 985$	66,74 <i>g</i> _{j,t} -4.300,12
985< $g_{j,t} \le 1136$	71,29 <i>g</i> _{<i>j</i>,<i>t</i>} -8.781,87
1136 < $g_{j,t}$ ≤1356	82,72 <i>g</i> _{j,t} -21.766,35
$1356 < g_{j,t} \le 1542$	87,12 <i>g</i> _{j,t} -27.732,75
$1542 < g_{j,t} \le 1889$	130,5 <i>g</i> _{<i>j</i>,<i>t</i>} -94.624,71
1889 < g _{j,t}	855,31 <i>g</i> _{j,t} -1.463.790,80

Os dados técnicos utilizados neste estudo são apresentados a seguir (ver Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8).

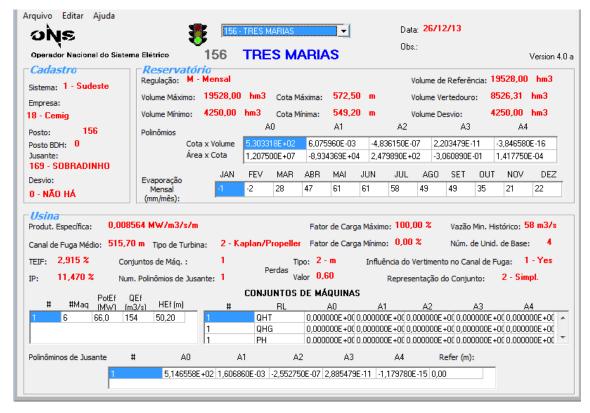


Figura 5.2 - Dados técnicos da Usina Três Marias

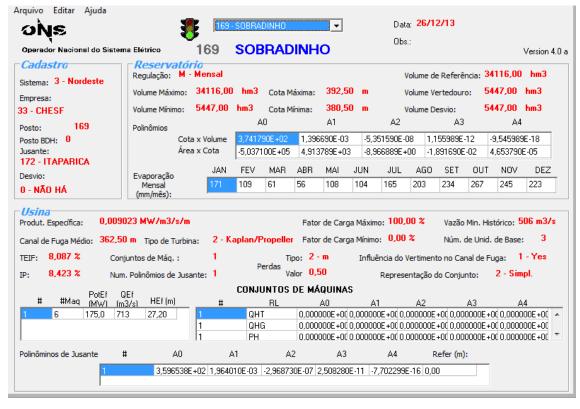


Figura 5.3 - Dados técnicos da Usina Sobradinho

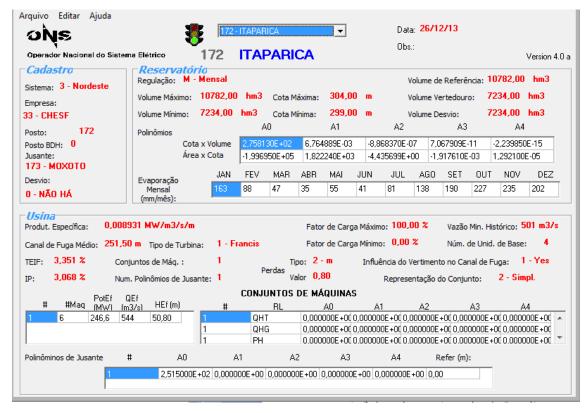


Figura 5.4 - Dados técnicos da Usina Itaparica

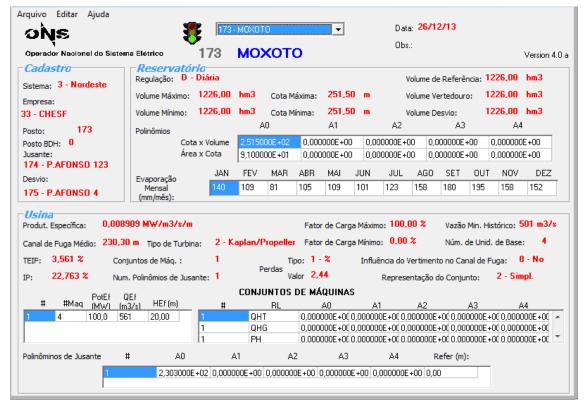


Figura 5.5 - Dados técnicos da Usina Moxoto



Figura 5.6 - Dados técnicos da Usina Paulo Afonso 1, 2 e 3



Figura 5.7 - Dados técnicos da Usina Paulo Afonso 4



Figura 5.8 - Dados técnicos da Usina Xingó

Para o efeito de comparação dos resultados obtidos, a Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 a seguir apresentam a política de operação das usinas com reservatório encontrada no caso 6 em (AMENDOLA, 2007).

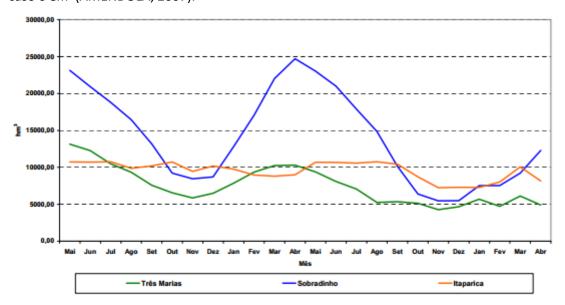


Figura 5.9 - Armazenamentos em hm³

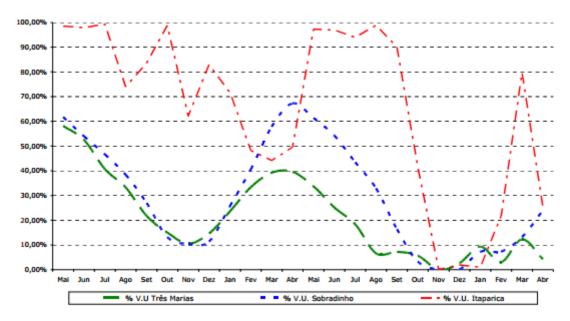


Figura 5.10 - Armazenamentos em porcentagem do volume útil

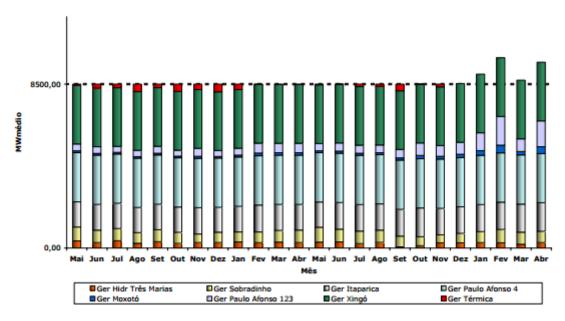


Figura 5.11 - Geração total segmentada por fonte

Os resultados obtidos pelo SIH proposto são apresentados na Figura 5.12 a seguir.

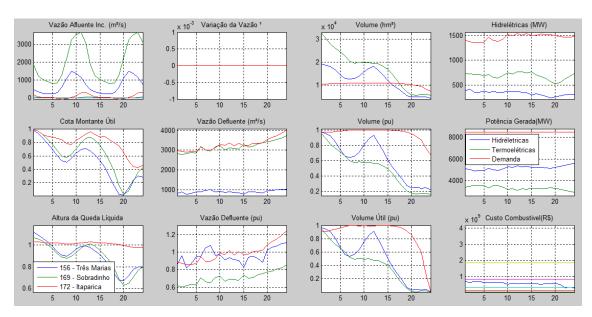


Figura 5.12 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema I

Analisando os resultados obtidos é possível constatar que o SIH proposto obteve bons resultados em relação aos obtidos em (AMENDOLA, 2007). Não se buscou obter, neste estudo, resultados idênticos aos encontrados em (AMENDOLA, 2007), uma vez que não foram encontrados todos os dados necessários para a reprodução dos resultados. Alem do mais, existe o fato que a natureza estocástica das duas heurísticas empregadas pode conduzir a resultados sobremaneira diferentes. Porém buscou-se obter resultados semelhantes, principalmente em relação às trajetórias de volume útil e o comportamento ótimo típico de usinas em cascata.

Analisando as trajetórias de volume útil das duas heurísticas empregadas, é possível constatar que as soluções encontradas são otimizadas, umas vez que todo volume útil dos reservatórios foram utilizados e que os reservatórios atingiram os seus picos de armazenamento ao fim da época de cheia de cada bacia. Neste sistema é possível verifica também que Três Marias e Sobradinho operaram segundo a sazonalidade das afluências naturais e Itaparica mantém um armazenamento elevado na maior parte do tempo.

Portanto o SIH proposto obteve resultados satisfatórios quando aplicado ao sistema teste I. Por meio deste algoritmo é possível determinar as vazões que possibilitam um bom aproveitamento dos recursos hídricos, de forma que minimizassem o comportamento termelétrico.

5.3. Sistema teste II - 7 usinas em cascata em Y

O algoritmo proposto foi aplicado a um sistema teste formado por importantes usinas do parque hidrelétrico do subsistema sudeste brasileiro. Este sistema é uma cascata em Y

formada por sete usinas com reservatório e é apresentado na Figura 5.13. O objetivo do despacho hidrotérmico deste sistema teste é a realização do planejamento com as seguintes características:

- Horizonte de planejamento de um ano discretizado em 12 estágios mensais.
- Restrição da equação 16 ativa (Volume dos reservatórios no início do horizonte de planejamento é igual ou maior do que o volume dos reservatórios no final do horizonte de planejamento).
- Carga própria a ser atendida de 12.824 MW-médios.
- Vazões incrementais afluentes por usina, em cada mês, iguais às 110% das médias mensais de longo termo (MLT).
- O período adotado é baseado no ano hidrológico com o início no mês de maio (início do período seco) e o final o mês de abril (final do período úmido).

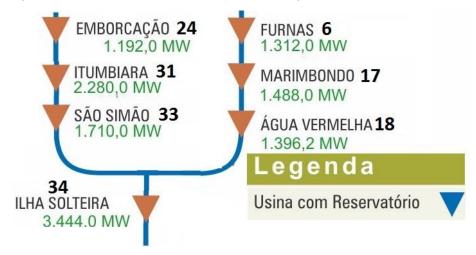


Figura 5.13 - Sistema teste II - 7 usinas em cascata em Y

Para obter o despacho termoelétrico mais econômico possível, foi adotado a otimização previa do Despacho Econômico Termelétrico (DET) por faixa de operação para todo intervalo de operação das usinas termoelétricas conforme a Tabela 5-1 já apresentada anteriormente.

Os dados técnicos utilizados neste estudo são apresentados a seguir (ver Figura 5.14, Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.25).

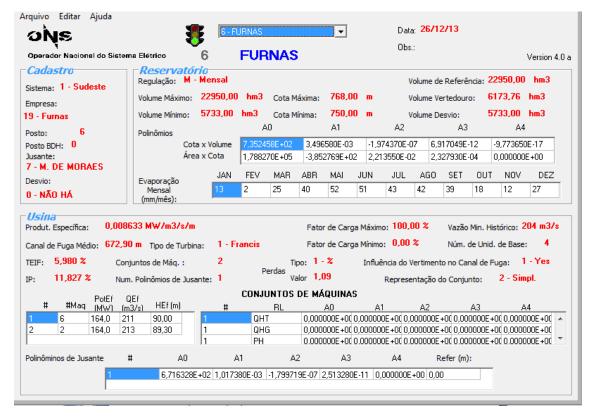


Figura 5.14 - Dados técnicos da Usina Furnas

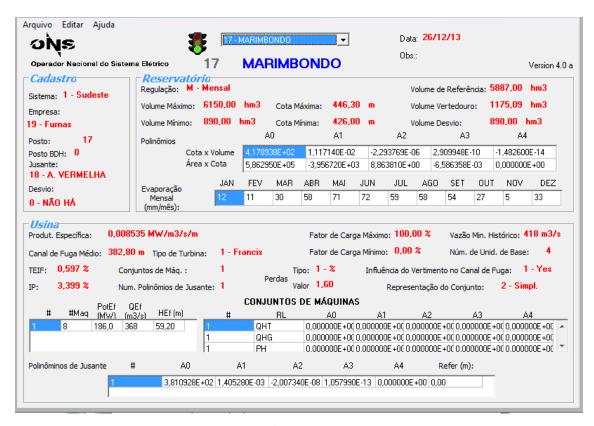


Figura 5.15 - Dados técnicos da Usina Marimbondo

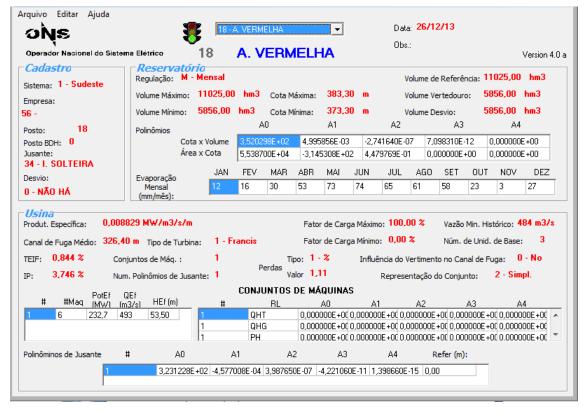


Figura 5.16 - Dados técnicos da Usina Água Vermelha



Figura 5.17 - Dados técnicos da Usina Emborcação

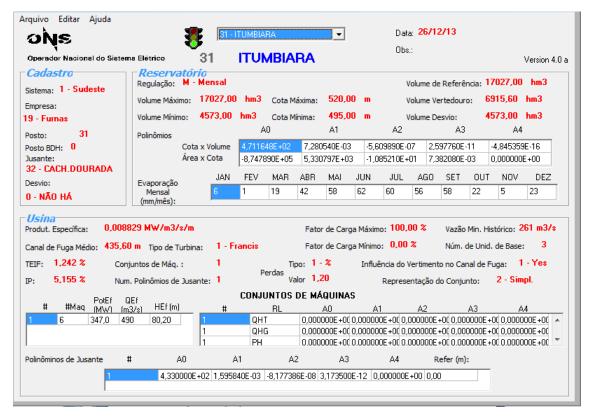


Figura 5.18 - Dados técnicos da Usina Itumbiara

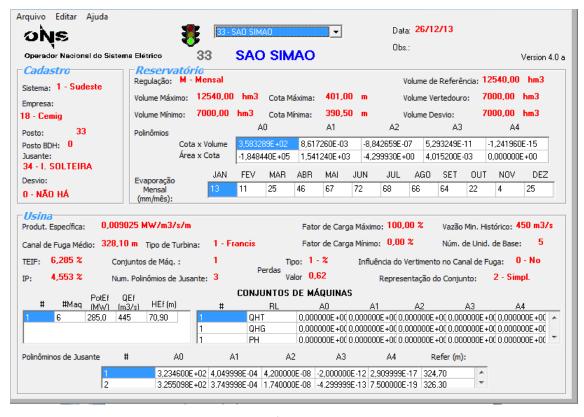


Figura 5.19 - Dados técnicos da Usina São Simão

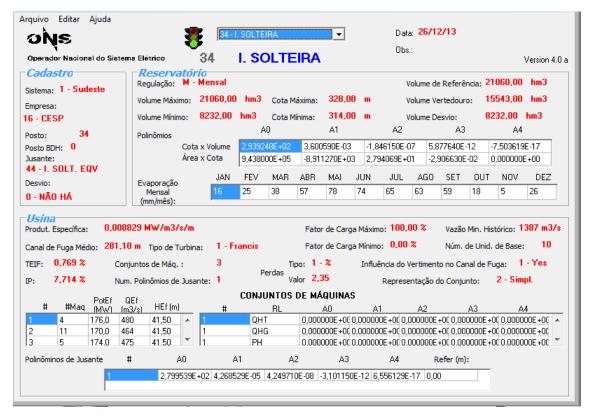


Figura 5.20 - Dados técnicos da Usina Ilha Solteira

Para o efeito de comparação dos resultados obtidos, a Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 a seguir apresentam a política de operação das usinas com reservatório encontrada no estudo VI em (PASTOR HUMPIRI, 2005).

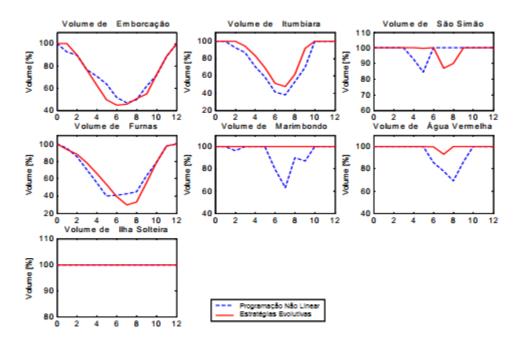


Figura 5.21 - Trajetória ótima de armazenamento da cascata em Y de 7 usinas

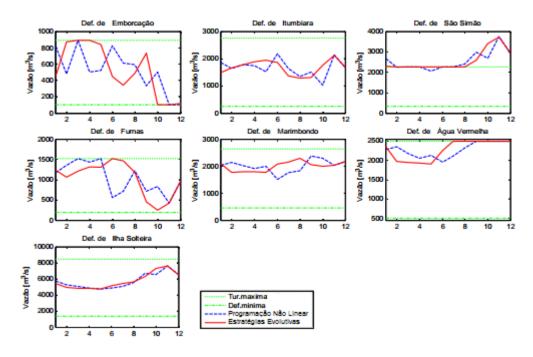


Figura 5.22 - Trajetória ótima das vazões defluentes da cascata em Y de 7 usinas

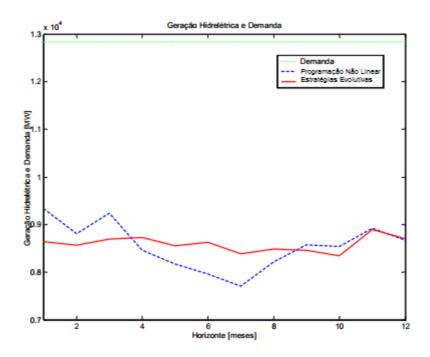


Figura 5.23 - Geração hidrelétrica para a cascata em Y de 7 usinas

Os resultados obtidos pelo SIH proposto são apresentados na Figura 5.24 a seguir.

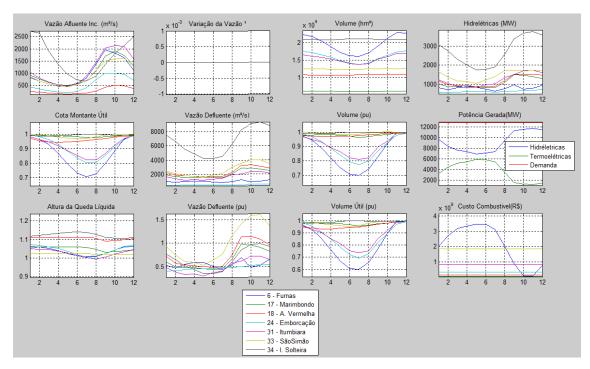


Figura 5.24 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema II

Analisando os resultados obtidos é possível constatar que o SIH proposto, mais uma vez, obteve bons resultados em relação aos resultados obtidos em (PASTOR HUMPIRI, 2005). Não se buscou obter, neste estudo, resultados idênticos aos encontrados em (PASTOR HUMPIRI, 2005), uma vez que não foram encontrados todos os dados necessários para a reprodução dos resultados. Alem do mais, existe o fato que a natureza estocástica das duas heurísticas empregadas pode conduzir a resultados diferentes. Porém buscou-se obter resultados semelhantes, principalmente em relação às trajetórias de volume útil e o comportamento ótimo típico de usinas em cascata.

Analisando as trajetórias de volume útil das duas heurísticas empregadas, é possível constatar que as soluções encontradas foram otimizadas. Observa-se que sempre as usinas mais a montante (Furnas, Emborcação e Itumbiara) tendem a apresentar maior deplecionamento com referência às usinas de jusante, que tende a operar como usinas a fio d'água. Como neste estudo a quantidade de vazão afluente é grande, as usinas de jusante são forçadas a deplecionar um pouco seu nível do reservatório para assim obter um bom aproveitamento dos recursos hídricos, de forma que minimizassem o comportamento termelétrico.

Neste estudo é possível analisar também as trajetórias de vazão defluentes das duas heurísticas empregadas. Observa-se que existem semelhanças nos resultados encontrados. As trajetórias de vazão defluentes apresentam comportamentos parecidos, como por exemplo, o

fato do vertimento ocorrido na usina de São Simão no período úmido. Portanto o SIH proposto obteve, novamente, resultados satisfatórios quando aplicado ao sistema teste II.

5.4. Sistema teste III - 35 usinas em cascata

O algoritmo proposto foi aplicado a um sistema teste formado pela maior parte das usinas do parque hidrelétrico do subsistema sudeste brasileiro. Este sistema é uma cascata formada por trinta e cinco usinas sendo que vinte e uma usinas com reservatório e quatorze usinas a fio d'água (ver Figura 5.25). O objetivo do despacho hidrotérmico deste sistema teste é a realização do planejamento com as seguintes características:

- Horizonte de planejamento de um ano discretizado em 12 estágios mensais.
- Restrição da equação 16 ativa (Volume dos reservatórios no início do horizonte de planejamento é igual ou maior do que o volume dos reservatórios no final do horizonte de planejamento).
- Carga própria a ser atendida de 20.000 MW-médios.
- Vazões incrementais afluente por usina, em cada mês, iguais às média mensais de longo termo (MLT).
- O período adotado é baseado no ano hidrológico com o início no mês de maio (início do período seco) e o final o mês de abril (final do período úmido).

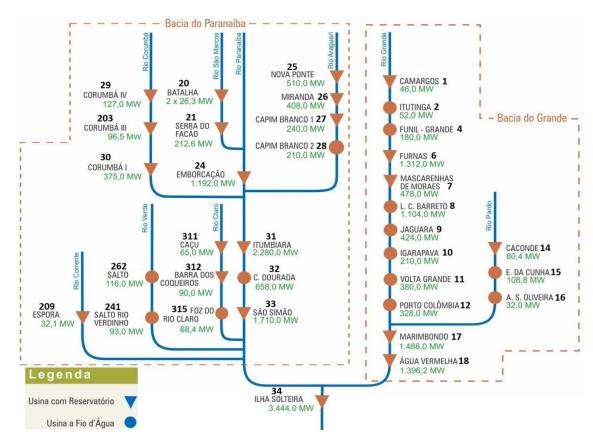


Figura 5.25 - Sistema teste III - 35 usinas em cascata

Para obter o despacho termoelétrico mais econômico possível, foi adotado a otimização previa do Despacho Econômico Termelétrico (DET) por faixa de operação para todo intervalo de operação das usinas termoelétricas conforme a Tabela 5-2 a seguir.

Tabela 5-2: Despacho Termelétrico Otimizado - Sistema teste III

Faixa (MW)	Custo horário (R\$/h)
$0 \le g_{j,t} \le 500$	50 g _{j,t}
$500 < g_{j,t} \le 2300$	75 g _{j,t}
$2300 < g_{j,t} \le 4500$	$100g_{j,t}$
$4500 < g_{j,t} \le 7500$	150 $g_{j,t}$
$7500 < g_{j,t} \le 10000$	$250~g_{j,t}$
$10000 < g_{j,t} \le 15000$	$350 g_{j,t}$
15000 < g _{j,t}	750 g _{j,t}

Os dados técnicos utilizados neste estudo foram retirados do banco de dados disponibilizado pela CCEE em (CCEE, 2013) como apresentado na Seção 31.1.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e são apresentados a seguir. As Figuras Figura 5.26, Figura 5.27, Figura 5.28, Figura 5.29, Figura 5.30, Figura 5.31, Figura 5.32 e Figura 5.33 apresentam os resultados das usinas com reservatório do sistema teste III apresentados pelo SIH proposto.

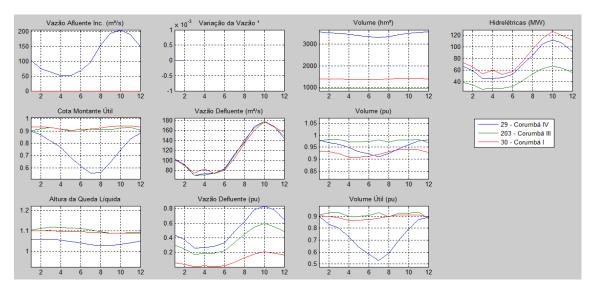


Figura 5.26 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Corumbá I, Corumbá III e Corumbá IV

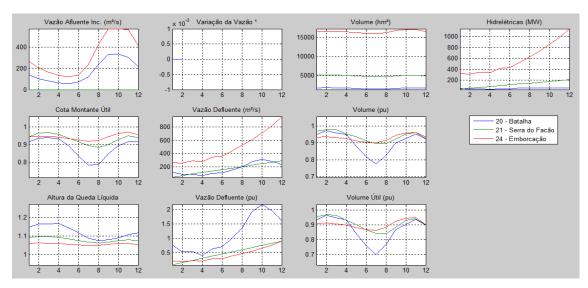


Figura 5.27 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Batalha, Serra do Facão e Emborcação

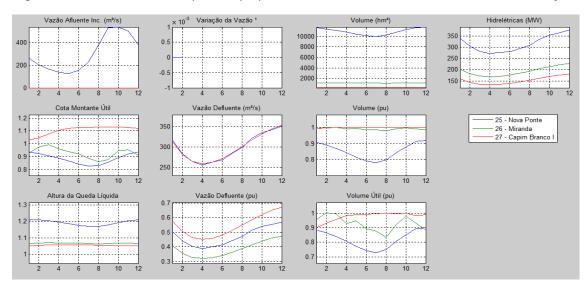


Figura 5.28 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Nova Ponte, Miranda e Capim Branco 1

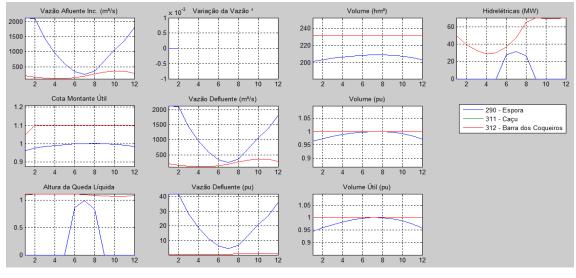


Figura 5.29 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Espora, Caçu e Foz do Rio Claro

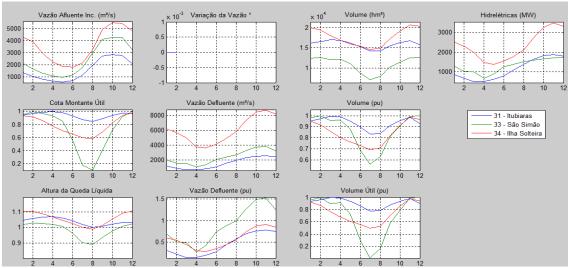


Figura 5.30 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Itumbiaras, São Simão e Ilha Solteira

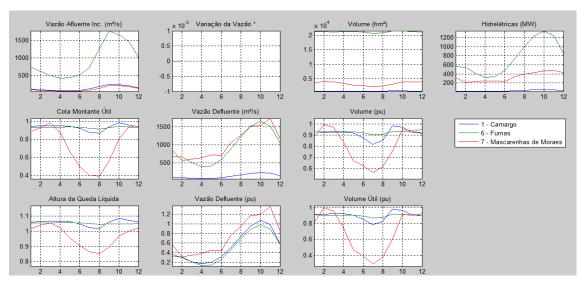


Figura 5.31 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Camargo, Furnas e Mascarenhas de Moraes

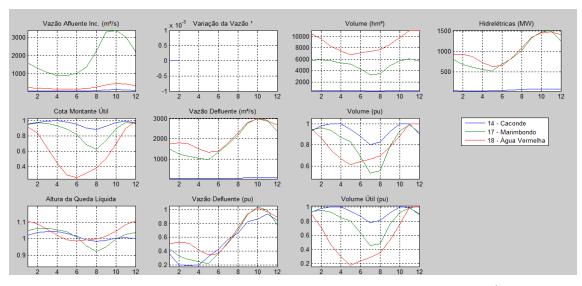


Figura 5.32 - Resultados obtidos pelo SIH proposto- Sistema III - Caconde, Marimbondo e Água Vermelha

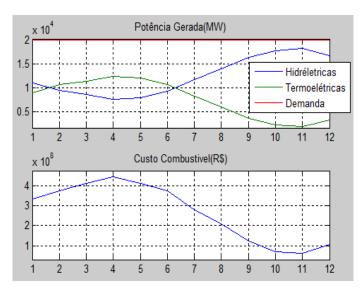


Figura 5.33 - Resultados obtidos pelo SIH proposto - Sistema III - Geração hidrelétrica, termoelétrica e custo

Como já constatado nos resultados dos testes anteriores, as usina de cabeceira tendem a apresentar maior deplecionamento com referência às usinas de jusante, possuindo assim a função de regularização do sistema. Esse comportamento pode ser verificado nas trajetórias do volume dos reservatórios obtidos pelo SIH proposto, pelas três cascatas mais a montante do sistema em estudo, formadas pelas usinas Corumbá I, III, IV, Batalha, Serra do Facão, Nova Ponte, Miranda e Capim Branco I, apresentadas nas Figuras Figura 5.26, Figura 5.27 e Figura 5.28

A Figura 5.29 apresenta os resultados obtidos para as usinas Espora, Caçu e Barras dos Coqueiros. Essas usinas possuem reservatórios de baixa capacidade de armazenamento, tendo praticamente o funcionamento de usina a fio d'água.

A Figura 5.30 apresenta os resultados obtidos para as usinas Itumbiara, São Simão e Ilha Solteira. Essas usinas estão localizadas no final de cascatas em Y, recebendo as vazões defluentes de mais de uma usina a montante. Diferentemente das usinas a jusante de uma cascata simples, elas participam significativamente da regularização do sistema devido às afluências favoráveis que possibilitaram a enchimento do reservatório no período chuvoso.

A Figura 5.31 apresenta os resultados obtidos para as usinas Camargo, Furnas e Mascarenhas de Moraes. Essas usinas fazem parte de uma cascata simples, porém não apresentam o comportamento típico otimizado de usinas em cascata. Esse comportamento pode ser justificado pela vazão afluente incremental da usina Furna que é muito superior em comparação à vazão afluente incremental da usina a montante Camargo.

A Figura 5.32 apresenta os resultados obtidos para as usinas Caconde, Marimbondo e Água Vermelha. A usina Caconde é uma usina de cabeceira de uma cascata simples e apresentou deplecionamento como esperado. As usinas Marimbondo e Água vermelha estão localizadas no final de cascatas em Y e devido às afluências favoráveis apresentaram depleciamento significativo.

A Figura 5.33 apresenta, de forma geral, os resultados referentes à geração hidrelétrica, termoelétrica e o custo envolvido. É possível verificar certa uniformidade na complementação térmica o que caracterizando um sistema otimizado.

Capítulo 6 - Conclusão

O foco deste trabalho é a apresentação de um Sistema Inteligente Híbrido (SIH) para contribuir na solução do problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico com usinas individualizadas de médio prazo. O seu principal objetivo é verificar o desempenho do SIH proposto quando aplicado em sistemas reais. Neste contexto, o desempenho da ferramenta computacional proposta foi de forma geral muito positivo.

O SIH proposto utiliza as propriedades das técnicas: Lógica Fuzzy (LF), Ajuste de Curva Polinomial (ACP) e Diferença Vetorial Ponderada (DVP) para complementar a operação de mutação da meta-heurística Estratégia Evolutiva (EE), buscando adapta-la para ser mais eficaz e eficiente na solução do problema do planejamento da operação do sistema hidrotérmico de médio prazo. Com isso, o algoritmo proposto mostrou-se promissor para o estudos em questão, disponibilizando uma ferramenta distinta e útil para a análise do planejamento energético, sendo de análise aberta e de rápida implementação.

Os testes foram realizados com o objetivo de minimizar os custos da coordenação hidrotérmica de três sistemas teste. Os resultados dos sistemas teste I e II foram comparados com os obtidos respectivamente em (AMENDOLA, 2007) e (PASTOR HUMPIRI, 2005), nos quais foram empregadas meta-heurísticas evolutivas na solução do problema. Já os resultados do sistema teste III foram utilizados como desafio maior para o SIH proposto. Apesar de que a natureza estocástica das diferentes heurísticas empregadas poça conduzir a resultados sobremaneira diferentes, observa-se que a nova técnica proposta mostrou um bom desempenho nos casos apresentados.

É importante resaltar que o modelo atualmente usado pelo Sistema Elétrico Brasileiro é baseado em heurísticas operativas que buscam a operação em paralelo por faixas dos reservatórios. Porém o SIH proposto apresentou resultados diferentes a esta operação. Reforçando a ideia que em determinadas circunstâncias, a operação em paralelo por faixas dos reservatórios podem não garantir custos operativos ótimos. Com tudo isso, percebesse que as possibilidades e contribuições apontadas no presente trabalho são promissoras e desafiadoras, servindo de base para novas abordagens no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos brasileiro.

Como sugestão para trabalhos futuros, algumas melhorias ainda podem ser investigadas em relação aos parâmetros do sistema de inferência fuzzy, principalmente no ajuste das funções de pertinência, do número de regras e dos consequentes das regras.

O tempo computacional requerido para a apresentação da solução pode ser apontado como uma dificuldade desta proposta, tanto que não foi considerado com objetivo do trabalho. Em vista disso, um possível avanço é a realização de um estudo com objetivo de comparar o tempo computacional do modelo proposto com diferentes modelos, incluindo o modelo adotado atualmente pelo Sistema Elétrico Brasileiro.

Uma das questões mais importantes associadas ao problema de planejamento da geração de médio prazo está relacionada ao tratamento das incertezas nas vazões afluentes. É necessário a realização de um estudo com objetivo de otimizar o planejamento não só para um cenário de afluências, mas para um grande conjunto de cenários, de modo que a decisão leve em conta as incertezas futuras nestas vazões.

Finalmente, com o objetivo de apresentar resultados mais completos, alguns possíveis avanços na modelagem proposta podem ser realizados com os seguintes objetivos:

- Possibilitar o acoplamento a um modelo de decisão estratégica, como o NEWAVE.
- Considerar restrições operativas locais decorrentes do uso múltiplo da água, tais como, vazão máxima para controle de cheias, vazão mínima para saneamento ou navegação e desvio de vazão do rio para irrigação;
- Calcular a energia firme do sistema e da participação de cada usina para um período crítico informado pelo usuário;
- Calcular a energia garantida de um sistema hidrotérmico a um certo risco pré-fixado;
- Considerar patamares de carga.
- Considerar restrições de transmissão.

Novos estudos de metodologias diferentes estão sendo realizados, com grande expectativa de formar uma base teória consistente para a proposição de um Sistema Inteligente Híbrido mais completo e robusto capaz de realizar o planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro.

Referências Bibliográficas

- AMENDOLA, A. F. **Meta-Heurística de Otimização Aplicadas à Coordenação Hidrotérmica**. Dissetação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 109. 2007.
- ANEEL. **BIG Banco de Informações de Geração**. http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm: Atualizado em: 11/2013, 2013.
- ARVANITIDS, N. V. E ROSING, J. **Optimal operation of multireservoir system using a composite representation**. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems: PAS-89(2): 327–335., 1970.
- BACK, T., D.B & MICHALEWICZ, Z. **Handbook of Evolutionary Computation**. Institute of Physics Publishing and Oxford University Press: [s.n.], 1997.
- BÄCK, T.; FOGEL, D. B.; MICHALEWICZ, Z. **Evolutionary Computation 2 Advanced Algorithms and Operators**. Institute of Physics Publishing: United Kingdom, 2000.
- BENDERS, J. F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. Numerische Mathematik, v. 4, n. 0029-599X (print), 0945-3245 (electronic): p. 238–252, 1962.
- BERTSEKAS, D. P. Dynamic Programming and Stochastic Control. Academic Press: , 1976.
- BERTSEKAS, D. P. **Dynamic Programming and Optimal Control**. Vol. 1, Athena Scientific: Belmont, Massachusetts, 1995.
- BRIANEZE, J. R., SANTOS, C. H. S.; HERNÁNDEZ-FIGUEROA, H. E. **Evolutionary Algorithms Applied to Microstrip Antennas Design**. 2nd. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007) IEEE, Edinburgh.: [s.n.], 2007.
- CARVALHO, M. A. P. E ROSENBLATT, J. **Modelo de simula, c^ao a subsistemas equivalentes**. IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica: , 1977.
- CCEE. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Biblioteca Virtual: (www.ccee.org.br/ portal/faces/pages_publico/.ccee./deck_de_precos), visitado em dezembro, 2013.
- CELPE/ELETROBRAS. Modelo de Programação Dinâmico Estocástico para a Operação de Sistemas Hidrotérmicos. Relatório técnico de CELPE: N. 144/77, 1977.
- CEPEL. Manual de Referência Modelo NEWAVE. Rio de Janeiro: Relatório Técnico, 2001.
- CEPEL. Manual de Referência do Programa SUISHI-O 6.10 Modelo de Simulação à Usinas Individualizadas para Subsistemas Hidrotérmicos Interligados. Rio de Janeiro: Relatório Técnico DP/DEA 51566/07 e 51572/07, 2007.
- CEPEL. Levantamento das diferenças numéricas e metodológicas entre os modelos SUISHI-O e NEWAVE. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica: CEPEL, 2008.

- CHENG, S. -L.; HWANG, C. **Optimal approximation of linear systems by a differential evolution algorithm**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics ?: Part A: Systems and Humans, Vol. 31, No. 6, pp. 698-707, 2001.
- CICOGNA, M.A. Modelo de Planejamento da Operação energética de sistemas hidrotèrmicos a usinas individualizadas orientado por objetos. Dissertação de Mestrado: FEEC/UNICAMP, 1999.
- DE CASTRO, L. N. Fundamentals of Natural Computing Basic Concepts, Algorithms, and Applications. Chapman & Hall/CRC, US: [s.n.], 2006.
- DE CASTRO, L. N., VON ZUBEN, F. J. Recent Developments in Biologically Inspired Algorithms. Miami: Idea Group Publishing, 2005.
- DIAS, B. H. Programação Dinâmica Estocástica e Algoritmo de Fechos Convexos no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotémicos. Tese (Doutorado) PUC-Rio: Rio de Janeiro, 2010.
- DURAN, H., PUEH, C., DIAZ, J. E SANCHEZ, G. Optimal operation of multireservoir system using an aggregation-decomposition approach. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems: 104(8): 2086–2092., 1985.
- EPE. **Balanço Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética : Ministério de Minas e Energia, 2013.
- FOGEL L. J., OWENS A. J., WALSH M. J. **Artificial Intelligence Through Simulated Evolution**. New York: John Wiley & Sons, 1966.
- FOGEL, D. B. **An Introduction to Simulated Evolutionary Computation**. IEEE Transactions on Neural Networks: no.1, v. 5, 1994.
- FRIEDBERG, R. M. A learning machine: part I. p. 2-13: IBM Journal, v. 2, 1958.
- FRIEDBERG, R. M.; DUNHAM, B.; NORTH, J. H. A learning machine: part II. p. 282-287: IBM Journal, v. 3, 1959.
- GOMIDE, F., GUDWIN, R., TANSCHEIT, R. Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. Proc. 6 th: [s.n.], 1995.
- GOONATILAKE E KHEBBAL. **Intelligent Hubrid Systems**. Capítulo Inteligent hybrid systems: issues, classification and future direction, pp. 1-20: Volume 1 of Goonatilake & Khebabal Goonatilake & khebabal, 1995.
- GORESTIN, B. G. et al. **Stochastic optimization of a hydro-thermal system including network constraints**. IEEE Transaction on Power Systems: Vol. 7, No 2, pp. 791-797, May, 1992.
- HIPEL, K. W.; MCLEOD, A. I. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Elsevier Science Pub Co: ISBN 0444892702, 1994.
- HIPPEL, K. W., MCBEAN, A., AND MCLEOD, A. I. **Hydrologic generating model selection.** J. Water Resour.Plann. Manege.: Div. Am. Soc. Civ. Eng., 105-WR2:223–242, 1979.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. Second edition. ed. University of Michigan: MIT Press, 1992.
- LIN, C-T. & LEE, C.S. G. Neural Fuzzy Systems. Prentice: Hall, 1996.
- LOUCKS, D. E VAN BEEK, E. Water Resources Systems Planning and Management. Unesco Publishing:., 2005.

- MARCATO, A. L. M. Representação híbrida de sistemas equivalentes e individualizados para o planejamento da operação de médio prazo de sistemas de potência de grande porte. Tese (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2002.
- MENDEL, J. M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial. Proc. IEEE: Vol. 83: 345-377., 1995.
- MICHALEWICZ, Z. & SCHOENAUER, M. Evoutionary Algorithms for Constrained Parameter Optimization Problems. Evolutionary Computation, 4(1):1-32.: [s.n.], 1996.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. 3. ed. Springe-Verlag: [s.n.], 1996.
- MONDAL, M. S. AND WASIMIB, S. A. **Generating and forecasting monthly flows of the ganges river with par model**. Journal of Hydrology: 323:41–56, 2006.
- MONDAL, M. S.; WASIMI, S. A. Generating and forecasting monthly flows of the ganges river with PAR model. Journal of Hydrology, v. 323, n. 1-4, p. 41–56: ISSN 0022-1694, 2006.
- NEMHAUSER, G. L. Introduction to Dynamic Programming. John Wiley: New York, 1966.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. www.ons.org.br: Atualizado em: 11/2013, 2013.
- PAREDES, R. W. J. **Desenvolvimento de uma metodologia para a coordenação hidrotérmica de longo prazo em mercado elétrico competitivo**. Dissetação (mestrado). Universidade Federal do Maranhão. São Luíz, p. 88. 2007.
- PASTOR HUMPIRI, C. J. Estratégias Evolutivas no Planejamento Energético da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência. Dissertação de Mestrado: UNICAMP, 2005.
- PEDRYCZ, W. & GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets:** Analysis and Design. MIT: Press., 1998.
- PEREIRA, M. V. F. **Optimal stochastic operations scheduling of large hydroelectric systems**. In: International Journal of Electric Power and Energy Systems: v. 11, n. 5, p.161–169, 1989.
- PEREIRA, M. V. F., OLIVEIRA, G. C., COSTA, C. C. G., AND KELMAN, J. **Stochastic streamflow models for hydroelectric systems (brazil)**. Water Resources Research: 20-3:379–390, 1984.
- PEREIRA, M. V. F.; CAMPODONICO, N. A. K. R. Long-term hydro scheduling based on stochastic models. Zurich: [s.n.], 1998.
- PEREIRA, M.V. E PINTO, L.M.V.G. **Stochastic optimization of a multireservoir hydroelectric system:** a decomposition approach. Water Resources Research 21(6): 779-792, 1985.
- PIEKUTOWSKI, M. R.; LITWINOWICZ, T.; FROWD, R. J. IEEE Transaction on Power Systems. Optimal Short-Term Scheduling for a Large-Scale Cascaded Hydro System, Maio 1994.
- R. BELLMAN. Dynamic Programming. Princeton University Press, Princeton: N. J., 1957.
- RECHENBERG, I. **Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem**. v. 1122: Royal Aircraft Establishment, 1965.

- SALAM, S.; NOR, K. M.; HAMDAM, A. R. IEEE Transaction on Power Systems. **Hydrothermal Sheduling Based Lagrangin Relaxation Approach to Hydrothermal Coordenation**, Fev 1998.
- SALAS, J. D., SVEINSSON, O. G., LANE, W. L., AND FREVERT, D. K. **Stochastic streamflow simulation using sams-2003**. journal of Irrigation and Drainage Engineering: 132-2:112–122., 2006.
- SILVA, E.L. DA. **Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica**. Editora: Sagra Luzzatto, 2001.
- SILVA, L. F. C. A. **Modelo de Interc^ambio a Subsistemas Equivalentes**. Dissertação de Mestrado: COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.
- STEDINGER, J. R., SULE, B. F., AND LOUCKS, D. P. **Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization**. Water Resources Research: 20-11:1499–1505, 1984.
- STORN, R.; PRICE, K. **Differential evolution:** a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuos spaces. Technical Report TR-95-012: International Computer Science Institute, Berkeley, 1995.
- TERRY, L. A., CEPEL, DENE/DPE/ELETROBRÁS E DEOP/DOS/ELETROBRÁS. **Modelo a Sistema Equivalente Descrção Geral**. Relatório Técnico: CEPEL Eletrobrás, 1980.
- THANOS, T. E YEH, W. W.-G. Use of stochastic dynamic programming for reservoir management. Water Resources Research23(6): 983–996, 1987.
- THOMAS, JR., H. A. AND FIERING, M. B. **Design of Water Resoucers Sytems.** Number 12 in Cambridge, Mass.: Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analusis of river basins by simulation, harvard university press edition., 1962.
- VICENS, G. J., RODRIGUEZ-ITURBE, I., AND SCHAAKE JR., J. C. Bayesian generation of synthetic streamflows. Water Resources Management: 11-6:827–838, 1975.
- VON ZUBEN, F.J. **Computação Evolutiva:** uma Abordagem Pragmática. ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/tutorial/tutorialEC.pdf.: [s.n.], 2002.
- W. YEH. **Reservoir management and operations models:** A state-of-the-art review. Water Resources Research: vol. 21, no. 12, pp. 1797–1818, 1985.
- WOOD, A.J.; WOLLEMBERG, B.F. **Power Generation Operation and Control**. John Wiley, New York: 2nd. edition, 1996.
- ZIMMERMANN, H-J. **Fuzzy Set Theory and Its Applications.** 2nd Edition: Kluwer Academic Publishers, 1994.