

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIOS:  
Implementação de Ferramentas Baseadas em Técnicas de Modelagem Orientada a  
Objetos em Sistemas de Apoio à Decisão**

**WALTER PEREIRA VIANNA JUNIOR**

*Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.*

**Orientador: Antônio Eduardo Leão Lanna**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes

IPH/UFRGS

Prof. Dr. Amauri de Almeida Machado

UFPEl

Prof. Dr. José Paulo Soares de Azevedo

COPPE/UFRJ

Porto Alegre, setembro de 2007.

Dedico este trabalho a minha esposa Christiana e a nossas filhas Mariana e Giovanna, botões de flor que cultivamos no jardim da nossa vida em comum.

# APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Professor Doutor Antônio Eduardo Leão Lanna da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Professor Doutor João Soares Viegas Filho da Universidade Federal de Pelotas.

Desejo agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa concedida.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, na figura de todos os seus professores e demais funcionários pelo suporte e apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Alagoas, em especial à Coordenadoria de Edificações, e aos amigos que dela fazem parte, por ter possibilitado a licença através da qual permaneci em Porto Alegre com a finalidade de executar este trabalho.

Ao Professor Doutor Antonio Eduardo Leão Lanna pela orientação, amizade e paciência ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor João Soares Viegas Filho pela amizade e co-orientação e pelo suporte ao longo de todo esse trabalho, como também ao Professor Doutor Amauri Almeida Machado por me terem transmitido os conhecimentos necessários em Modelagem Orientada a Objetos.

A todos os amigos mestrandos e doutorandos do IPH.

Ao bacharel em informática Adriano Rochedo Conceição pelo valioso apoio técnico na área de programação.

Ao amigo Flávio Tröger e sua esposa Lauren, aos seus pais Sr Carl e Dona Lílian pelo suporte fornecido nas inúmeras vezes em que estive em Pelotas.

Aos amigos Alex Gama, Eduardo Setton, Gustavo Carvalho, sempre dispostos a oferecer uma palavra de estímulo.

Aos amigos Valmir Pedrosa, Sidney Agra e Marllus Neves pela paciência em ler o texto e pelos conselhos dados.

A Jussara Silva, Jussara Barbieri, Elisabete Oliveira, Jocenara Cantini, Nadir Solari e Márcia Feijó, que, nas suas respectivas funções no IPH, dão exemplo de eficiência e dedicação.

A Lígia Campos sempre disposta a nos oferecer atenção e palavras de carinho.

A Renato Garcia e Patrícia Agnes, Sr. Sérgio, Dona Fifina, Dona Lourdes, tia Rita e tia Cida, que nos receberam em Porto Alegre como se fôssemos membros de sua família.

A meus sogros Dona Marise e Sr. Moacir e a minha cunhada Cinthia que sempre deram significado pleno à palavra família.

A meus pais Walter e Anete pelo exemplo, pela dedicação, pela educação, pelo amor incondicional e aos meus irmãos Otavio e Luciana, pois a família na qual nascemos é a base de tudo.

A minha esposa Christiana pelo amor, paciência, apoio incondicional ao longo dessa jornada. Meu porto seguro.

A Deus, pois mesmo se tratando de uma trabalho voltado à ciência, sem Ele nada faz sentido.

## RESUMO

As diferentes formas de abordagem sistêmica no planejamento de sistemas de recursos hídricos podem ser divididas em simulação, otimização e análise multi-objetivo. Para a utilização e avaliação dessas abordagens, devem ser adotados critérios de desempenho distintos como é o caso dos índices de confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade.

Devido então à complexidade da gestão, se busca o desenvolvimento de Sistemas de Apoio à Decisão – SAD – aplicados à área de recursos hídricos que devem ser interativos e adaptativos, de forma a superar a diferença existente entre o que se desenvolve em centros de pesquisa e o que se utiliza no dia-a-dia profissional. Para tanto, o paradigma da Modelagem Orientada a Objetos – MOO – apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas procedurais utilizadas na programação tradicional.

O SAD utilizado neste trabalho foi o Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas – SAGBAH, com destaque para o modelo PROPAGARMOO que é voltado a simular a propagação de vazões em uma bacia submetida a decisões operacionais, relacionadas ao suprimento de demandas hídricas e descarga de reservatórios. Através da MOO, foram implementados e testados, no PROPAGARMOO, um editor de modelos de programação linear e dois algoritmos de otimização por procura direta denominados de algoritmos genéticos mono e multi objetivo.

O PROPAGARMOO, então, foi utilizado para avaliar duas abordagens implicitamente estocásticas para a derivação e otimização de regras decisórias: a primeira promove o ajuste dos parâmetros de uma regra de decisão cuja morfologia é estabelecida previamente, usando para isso registros históricos de vazão; a segunda promove o ajuste de uma regra de decisão, cuja morfologia é estabelecida previamente ou posteriormente, tendo por base os registros históricos de vazão e as descargas ótimas, obtidas por modelagem. Toda a metodologia foi aplicada à bacia do rio Curu, no Ceará, cujo sistema possui 3 (três) reservatórios de grande porte considerados estratégicos para o atendimento às demandas hídricas existentes.

Finalmente se comprovou as virtudes da MOO na implementação de ferramentas de otimização num SAD aplicado a recursos hídricos e o melhor desempenho da abordagem implicitamente estocástica na derivação de regras decisórias para operação de reservatórios, quando os parâmetros dessas regras são otimizados através de algoritmos genéticos.

## ABSTRACT

The different ways of systemic approach in the planning of water resources systems, can be divided in simulation, optimization e multi-objective analysis. For the use and evaluation of them, it must be adopted some distinct criteria of performance as it is the case of the reability, resiliency and vulnerability indexes.

Once that the water resources planning is each time more complex, it must be seek the development of Decision Support Systems – DSS – applied to the area of water resources must be interactive and adaptable in a way that overcomes the difference that exist between what is developed in the research centers and what it is used “in practice” in the professional day-by-day. One of the ways to be trailed for this says about the paradigm of the Object-Oriented Modeling – OOM – which has many advantages in relation to used procedural techniques in the traditional programming.

The SAD used in this work was the System of Support to Management of Watershed – SAGBAH, in which, among its models, one makes it stand out is the PROPAGRAMOO related to the simulation and the propagation of outflows in the basin submitted to operational decisions, related to the supplies of the water demands and discharge of reservoirs. Through the OOM had been implemented and tested, in the PROPAGARMOO, a publisher of linear programming models and two algorithms of optimization for direct search called genetic algorithms, mono and multi objective.

The PROPAGARMOO then was used to evaluate two implicitly stochastic approaches for the derivation and optimization of decision rules: the first one promotes the adjustment of the parameters of a decision rule whose morphology is established previously, using for that historical registers of outflows. The second one promotes the adjustment of a decision rules whose morphology is established previously or later, having for base, the historical registers of outflows and the optimum discharges, gotten from modeling. All the methodology was applied to the basin of Curu river in Ceará – Brazil, whose system has three big strategic reservoirs used to answer the existing water demands.

Finally it was proved the virtues of the MOO in the implementation of tools of optimization in a water resources applied SAD and the optimum performance of the implicitly stochastic approach in the derivation of decide rules for operation of reservoirs, when the parameters of these rules are optimized through genetic algorithms.

# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
SUMÁRIO.....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Definição do problema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Justificativa da tese.....	3
1.4 Estrutura da tese .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Sistemas de Apoio à Decisão (SAD).....	5
2.1.1 Definições relativas à SAD.....	6
2.1.2 Composição de um SAD .....	8
2.2 A Modelagem Orientada a Objetos.....	10
2.3 O Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos .....	12
2.3.1 A Abordagem Sistêmica.....	13
2.4 Sistemas de Recursos Hídricos e sua configuração.....	17
2.5 Otimização de Sistemas de Recursos Hídricos por Programação Linear .....	19
2.6 Otimização de Sistemas de Recursos Hídricos por Procura Direta.....	28
2.7 Avaliação do desempenho de um Sistema de Recursos Hídricos .....	38
2.7.1 Confiabilidade .....	38
2.7.2 Elasticidade.....	39
2.7.3 Vulnerabilidade .....	41
3 METODOLOGIA.....	44
3.1 PROPAGARMOO .....	45
3.2 Bibliotecas de classe agregadas ao PROPAGARMOO .....	49
3.2.1 Otimização por AG Mono-objetivo.....	49
3.2.2 Otimização por AG Multi-objetivo .....	54
3.2.3 Editor de modelos de PL .....	60
3.2.4 Conversor de modelo literal para MPS.....	61
3.3 Trinômio: Regra operacional – Parametrização – Simulação Iterativa.....	62
3.3.1 Rotina de inicialização da otimização .....	63
3.3.2 Rotina de finalização .....	68
3.4 Regras operacionais adotadas para a otimização por AG .....	71
3.4.1 Regra Padrão Modificada .....	71
3.4.1.1 Fase tática para os PC's com reservatório.....	73
3.4.1.2 Fase tática para os PC's sem reservatório .....	74
3.4.2 Curva Guia.....	75
3.4.2.1 Curva Guia sem avaliação de déficit .....	76
3.4.2.2 Curva Guia com avaliação de déficit.....	77
3.5 Critérios para avaliação do desempenho do sistema.....	78
3.6 Montagem das funções objetivo através dos índices probabilísticos .....	82
3.6.1 Somatório das confiabilidades.....	82
3.6.2 Somatório das elasticidades.....	83

3.6.3	Somatório das vulnerabilidades.....	83
3.7	Modelo de PL Adotado .....	83
3.7.1	Função objetivo .....	84
3.7.2	Restrição física do balanço hídrico em todos os PC's.....	85
3.7.3	Restrição relativa à definição das demandas em cada PC .....	88
3.7.4	Restrição relativa à definição dos retornos das demandas de cada PC.....	89
3.7.5	Restrição relativa à relação entre os armazenamentos final e inicial de cada reservatório .....	90
3.7.6	Restrição relativa à relação entre os valores de precipitação, evaporação e armazenamento de cada reservatório.....	91
3.7.7	Restrição relativa ao valor máximo das demandas a serem atendidas mensalmente .....	92
3.7.8	Restrição relativa ao valor máximo dos armazenamentos.....	93
3.7.9	Restrição relativa ao valor mínimo dos armazenamentos .....	94
3.8	Obtenção de regras operacionais do resultado do modelo de PL.....	94
3.8.1	Regra Padrão Modificada .....	95
3.8.2	Descargas como função das disponibilidades dos reservatórios .....	95
3.8.3	Curva Guia.....	96
4	APLICAÇÃO E RESULTADOS .....	98
4.1	Etapas da aplicação da metodologia.....	98
4.2	Resultado da aplicação da MOO na implementação de ferramentas de otimização no PROPAGARMOO.....	99
4.3	Etapas da utilização do PROPAGARMOO para a otimização de regras operacionais para reservatórios .....	104
4.3.1	Área de aplicação.....	106
4.3.2	Topologia Adotada para a bacia e localização dos PCs .....	107
4.3.3	Demandas e prioridades.....	108
4.3.4	Cenário de estudo .....	110
4.4	Comparação entre o método de Rosenbrock e o método do AG Mono objetivo.....	112
4.5	A aplicação do Algoritmo Genético Mono-Objetivo para otimização das regras operacionais.....	115
4.5.1	Resultado da otimização dos parâmetros da regra padrão modificada.....	115
4.5.2	Resultado da otimização dos parâmetros da regra da Curva Guia .....	118
4.5.3	A questão da convergência do Algoritmo Genético Mono-objetivo.....	120
4.6	A aplicação do Algoritmo Genético Multi-objetivo para obtenção das regras operacionais de melhor compromisso .....	125
4.6.1	Obtenção dos parâmetros da regra padrão modificada para a solução de melhor compromisso .....	126
4.6.1.1	Variabilidade dos parâmetros da regra padrão modificada .....	127
4.6.1.2	Valores mínimos de cada aptidão no conjunto de Pareto.....	131
4.6.2	Obtenção dos parâmetros da regra da curva guia para a solução de melhor compromisso.....	133
4.6.2.1	Variabilidade dos parâmetros da regra da Curva Guia, sem a consideração do déficit hídrico.....	133
4.6.2.2	Valor mínimo de cada aptidão, no conjunto de Pareto para a Curva Guia, sem a consideração do déficit hídrico.....	138
4.6.2.3	Variabilidade dos parâmetros da regra da curva guia, com consideração do déficit hídrico.....	140
4.6.2.4	Valores mínimos de cada aptidão, no conjunto de Pareto para a Curva Guia, com a consideração do déficit hídrico.....	145
4.6.3	A questão da convergência do Algoritmo Genético Multi-Objetivo.....	146
4.6.3.1	Regra Padrão Modificada .....	147



4.6.3.2	Curva Guia, sem verificação de déficit hídrico .....	153
4.6.3.3	Curva Guia com verificação de déficit hídrico.....	156
4.7	A aplicação dos modelos de Programação Linear.....	159
4.7.1	Linearização da relação área versus volume .....	159
4.7.2	Uma abordagem infrutífera de melhorar a linearização da função área versus volume .....	160
4.7.3	O resultado do atendimento às demandas no modelo de PL .....	162
4.8	Extração das regras operacionais dos resultados do modelo de PL .....	167
4.8.1	Valores das curvas guias obtidas através do cálculo de médias .....	168
4.8.2	Simulação das curvas guias obtidas através do cálculo de médias.....	169
4.8.3	Tentativa de obtenção da Regra Padrão Modificada através dos resultados das descargas do modelo de PL .....	170
4.8.4	Utilização de Regressão Linear e Múltipla para obtenção de regra operacional através da resposta do modelo de PL.....	172
4.8.5	Simulação das regras operacionais obtida pelo processo de regressão simples e composta .....	179
4.9	Uma comparação entre os melhores resultados obtidos.....	181
4.10	Análise, nos PCs, dos resultados da otimização por procura direta, para cada função objetivo otimizada .....	182
4.10.1	FO01 – Somatório das confiabilidades.....	183
4.10.2	FO02 – Somatório das elasticidades.....	185
4.10.3	FO03 – Somatório das vulnerabilidades.....	187
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	189
5.1	Conclusões.....	189
5.2	Recomendações .....	193
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	194

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Dados necessários para geração da população inicial do algoritmo SCE-UA. ....	33
Tabela 2.2: Indivíduos gerados aleatoriamente pelo algoritmo e ordenados segundo o valor de suas aptidões e divididos em dois complexos. ....	33
Tabela 2.3: Formação de um sub-complexo com geração de novos indivíduos. ....	34
Tabela 2.4: Dados necessários para geração da população inicial do algoritmo MOCOM-UA. ....	36
Tabela 2.5: Indivíduos gerados aleatoriamente pelo algoritmo e ordenados segundo o Ranking de Pareto. ....	36
Tabela 2.6: Formação aleatória do simplex após a classificação de Pareto e geração de novo indivíduo. ..	37
Tabela 4.1: Características dos três grandes açudes da bacia do rio Curu. ....	107
Tabela 4.2: Localização dos PC's para a bacia do rio Curu. ....	108
Tabela 4.3: Prioridades de uso para as águas brutas. ....	109
Tabela 4.4: Ordem de prioridade adotada para a bacia do rio Curu. ....	109
Tabela 4.5: Informações sobre as demandas consideradas. ....	110
Tabela 4.6: Valores de demanda mensal para os pontos característicos (m <sup>3</sup> /s). ....	111
Tabela 4.7: Valores de demanda atual para irrigação para cada PC (m <sup>3</sup> /s). ....	111
Tabela 4.8: Escalas de desenvolvimento utilizadas para compor o cenário de 2020. ....	111
Tabela 4.9: Fatores de desenvolvimento utilizados para criação de exemplo hipotético. ....	113
Tabela 4.10: Valores dos parâmetros para o pior e o melhor indivíduo para cada aptidão. ....	113
Tabela 4.11: Resultado da otimização da regra operacional, através do método de Rosenbrock. ....	114
Tabela 4.12: Resultado da otimização da regra operacional, através do método dos AG Mono-objetivo. ....	114
Tabela 4.13: Valores das funções objetivo com a operação do sistema segundo a Regra Padrão modificada. ....	116
Tabela 4.14: Comparação entre os valores das funções objetivo obtidas por otimização da regra padrão modificada e por simulação da regra padrão. ....	116
Tabela 4.15: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha. ....	117
Tabela 4.16: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com minimização da função objetivo 02 – Negativo da Elasticidade. ....	117
Tabela 4.17: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade. ....	118
Tabela 4.18: Valores das funções objetivo com a operação do sistema sujeita à regra da Curva Guia, com e sem a verificação do déficit a priori. ....	118
Tabela 4.19: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha. ....	119
Tabela 4.20: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 02 – Negativo da elasticidade. ....	119
Tabela 4.21: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade. ....	119
Tabela 4.22: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha. ....	119
Tabela 4.23: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 02 – Negativo da elasticidade. ....	119
Tabela 4.24: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade. ....	120
Tabela 4.25: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo. ....	132
Tabela 4.26: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório General Sampaio referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo. ....	133
Tabela 4.27: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Pentecoste referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo. ....	133
Tabela 4.28: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Caxitoré referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo. ....	133
Tabela 4.29: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo, para a regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico). ....	139

Tabela 4.30: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório General Sampaio, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	140
Tabela 4.31: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório Pentecoste, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	140
Tabela 4.32: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório Caxitoré, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	140
Tabela 4.33: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo, para a regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico).....	145
Tabela 4.34: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório General Sampaio, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	146
Tabela 4.35: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório Pentecoste, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	146
Tabela 4.36: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório Caxitoré, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.....	146
Tabela 4.37: Valores dos coeficientes angular e linear das funções área versus volume para os três reservatórios.....	160
Tabela 4.38: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Gen Sampaio.....	160
Tabela 4.39: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Pentecoste.....	160
Tabela 4.40: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Caxitoré.....	160
Tabela 4.41: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Gen Sampaio (m <sup>3</sup> ): .....	168
Tabela 4.42: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Pentecoste (m <sup>3</sup> ): .....	168
Tabela 4.43: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Caxitoré (m <sup>3</sup> ).....	168
Tabela 4.44: Valores das funções objetivo para a simulação das regras dos volumes meta.....	170
Tabela 4.45: Variabilidade nos valores do parâmetro Alfa, quando da existência de racionamento, para o reservatório Gen. Sampaio no mês de maio.....	171
Tabela 4.46: Impossibilidade de cálculo dos valores do parâmetro Alfa, quando da existência de racionamento, para o reservatório Pentecoste no mês de janeiro.....	172
Tabela 4.47: Valores das descargas (m <sup>3</sup> ) observadas do mês de setembro para cada um dos reservatórios.....	174
Tabela 4.48: Valores das descargas observadas (m <sup>3</sup> ) do mês de outubro para cada um dos reservatórios.....	175
Tabela 4.49: Valores das descargas observadas (m <sup>3</sup> ) do mês de novembro para cada um dos reservatórios.....	175
Tabela 4.50: Valores das descargas observadas do mês de dezembro para cada um dos reservatórios....	176
Tabela 4.51: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório General Sampaio.....	178
Tabela 4.52: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório Pentecoste.....	178
Tabela 4.53: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório Caxitoré.....	178
Tabela 4.54: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório General Sampaio.....	179
Tabela 4.55: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório Pentecoste.....	179
Tabela 4.56: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório Caxitoré.....	179
Tabela 4.57: Significado dos dígitos referentes a cada regra operacional.....	180
Tabela 4.58: Valores das funções objetivo para a simulação das regras obtidas por regressão onde a descarga de cada reservatório é função da disponibilidade própria ou do sistema.....	181
Tabela 4.59: Valores das funções objetivo obtidas de acordo com o processo de obtenção das regras operacionais.....	182

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema representativo de um SAD (Fonte: Adaptado de Dunn et alli, 1996). .....	8
Figura 2.2: Representação topológica de um sistema de recursos hídricos (Fonte: Viegas Filho, 2000). ....	17
Figura 2.3: Esquema do balanço hídrico em um reservatório.....	25
Figura 2.4: Opções de procura para geração de novos indivíduos. (Fonte: Adaptado de Watanabe et alli, 2003).....	30
Figura 2.5: Comportamento dos índices de desempenho. (fonte: adaptado de Amisial e Barrios, 1986)....	42
Figura 3.1: Localização adotada para os PC's da bacia do rio Curu. ....	47
Figura 3.2: Ambiente de programação do editor de Pascal Script. ....	48
Figura 3.3: Fluxograma do algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1992).....	50
Figura 3.4: Fluxograma do algoritmo de evolução dos complexos. (Duan et al., 1992).....	51
Figura 3.5: Fluxograma de evolução do subcomplexo (Pais).....	53
Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo genético multi-objetivo MOCOM-UA. ....	55
Figura 3.7: Fluxograma da estratégia de evolução da população no algoritmo MOCOM-UA. ....	56
Figura 3.8: Fluxograma para definição de não-dominância.....	57
Figura 3.9: Fluxograma para o Ranqueamento de Pareto. ....	59
Figura 3.10: Estratégia de evolução de cada um dos simplexes formados no MOCOM-UA.....	60
Figura 3.11: Planilha para leitura de informações necessárias aos parâmetros das regras operacionais. ..	64
Figura 3.12: Planilha com lista de PC's e o número de reservatórios estratégicos a montante de cada um deles. ....	65
Figura 3.13: Aparência da planilha criada e salva pela rotina de inicialização, para conter informações a respeito da convergência do processo de otimização por AG mono-objetivo. ....	67
Figura 3.14: Aparência da planilha criada e salva pela rotina de inicialização, para conter informações a respeito da convergência do processo de otimização por AG multi-objetivo.....	67
Figura 3.15: Imagem de acompanhamento da variação dos parâmetros. ....	68
Figura 3.16: Diagrama de fluxo para a regra padrão modificada. ....	74
Figura 3.17: Diagrama de fluxo para a regra da curva guia sem verificação dos déficits. ....	77
Figura 3.18: Diagrama de fluxo para a regra da curva guia com verificação dos déficits.....	78
Figura 3.19: Algoritmo para cálculo dos índices probabilísticos.....	80
Figura 4.1: Aspecto geral da área de projeto do PROPAGARMOO. ....	99
Figura 4.2: Escolha do otimizador por procura direta a ser utilizado.....	100
Figura 4.3: Janela Dados do projeto.....	101
Figura 4.4: Janela Rotinas do usuário (para simulação).....	101
Figura 4.5: Janela Otimização, onde são definidas as rotinas de otimização.....	102
Figura 4.6: Compilador de Pascal Script. ....	102
Figura 4.7: Janela do gerenciador de equações (Editor de modelos de PL).....	103
Figura 4.8: Topologia adotada para a bacia do rio Curu. ....	108
Figura 4.9: Trecho utilizado para comparação entre Rosenbrock e AG Mono-objetivo.....	112
Figura 4.10: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.....	121
Figura 4.11: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.....	121
Figura 4.12: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.....	121
Figura 4.13: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais. ....	122
Figura 4.14: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais. ....	122
Figura 4.15: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais. ....	122
Figura 4.16: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada. ....	123
Figura 4.17: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada. ....	123
Figura 4.18: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada. ....	123
Figura 4.19: Ausência de convergência na variação das aptidões de novos indivíduos.....	124
Figura 4.20: Início da convergência no processo de otimização.....	125



Figura 4.42: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.....	137
Figura 4.43: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. General Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos. ....	137
Figura 4.44: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.....	137
Figura 4.45: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.....	140
Figura 4.46: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Gen Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.....	141
Figura 4.47: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.....	141
Figura 4.48: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.....	141
Figura 4.49: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Gen Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.....	142
Figura 4.50: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.....	142
Figura 4.51: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.....	142
Figura 4.52: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. General Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.....	143
Figura 4.53: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.....	143
Figura 4.54: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.....	143
Figura 4.55: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. General Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.....	144
Figura 4.56: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.....	144
Figura 4.57: Variação do Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	148
Figura 4.58: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	148
Figura 4.59: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	149
Figura 4.60: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	149
Figura 4.61: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	150
Figura 4.62: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	150
Figura 4.63: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	150
Figura 4.64: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada. ....	151
Figura 4.65: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões. ....	151

Figura 4.66: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões. ....	152
Figura 4.67: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões. ....	152
Figura 4.68: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões. ....	152
Figura 4.69: Variação do Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	153
Figura 4.70: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	153
Figura 4.71: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	154
Figura 4.72: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	154
Figura 4.73: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	154
Figura 4.74: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	155
Figura 4.75: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	155
Figura 4.76: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos. ....	155
Figura 4.77: Variação do Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento no valor das aptidões. ....	156
Figura 4.78: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	156
Figura 4.79: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	157
Figura 4.80: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	157
Figura 4.81: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	157
Figura 4.82: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	158
Figura 4.83: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	158
Figura 4.84: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões. ....	158
Figura 4.85: Regressão linear da função área versus volume do reservatório General Sampaio. ....	159
Figura 4.86: Regressão linear da função área versus volume do reservatório Pentecoste. ....	159
Figura 4.87: Regressão linear da função área versus volume do reservatório Caxitoré. ....	160
Figura 4.88: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC01. ....	162
Figura 4.89: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC02. ....	163
Figura 4.90: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC03. ....	163
Figura 4.91: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC04. ....	163
Figura 4.92: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC05. ....	163
Figura 4.93: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC06. ....	164
Figura 4.94: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC07. ....	164
Figura 4.95: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC08. ....	164
Figura 4.96: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC09. ....	164
Figura 4.97: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC10. ....	165
Figura 4.98: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC11. ....	165
Figura 4.99: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC12. ....	165
Figura 4.100: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC13. ....	165
Figura 4.101: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC14. ....	166
Figura 4.102: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC15. ....	166

<b>Figura 4.103: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC16.....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 4.104: Intervalos de tempo onde se concentram as falhas no atendimento às demandas terciárias. ....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 4.105: Variação do índice de confiabilidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 4.106: Variação do índice de confiabilidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 4.107: Variação do índice de confiabilidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 4.108: Variação do índice de confiabilidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 4.109: Variação do índice de elasticidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 4.110: Variação do índice de elasticidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 4.111: Variação do índice de elasticidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 4.112: Variação do índice de elasticidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 4.113: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 4.114: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios. ....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 4.115: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.....</b>	<b>188</b>
<b>Figura 4.116: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.....</b>	<b>188</b>



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>AG</b>	Algoritmo Genético;
<b>COGERH</b>	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará;
<b>DI</b>	Demanda de Irrigação;
<b>DNOCS</b>	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca;
<b>DU</b>	Demanda Urbana;
<b>FO</b>	Função Objetivo;
<b>FUNCEME</b>	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos;
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
<b>IPLANCE</b>	Instituto de Planejamento do Estado do Ceará;
<b>LINDO</b>	Linear, Interactive and Discrete Optimization;
<b>MMARHAL</b>	Ministério do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Amazônia Legal;
<b>MOCOM-UA</b>	Multi-objective Complex Evolution - University of Arizona;
<b>MODHAC</b>	Modelo Hidrológico Auto Calibrável
<b>MOO</b>	Modelagem Orientada a Objetos;
<b>MOSCEM-UA</b>	Multi-objective Shuffled Complex Evolution Metropolis- University of Arizona;
<b>MPS</b>	Mathematical Programming Systems
<b>PC</b>	Ponto característico;
<b>PERH</b>	Plano Estadual de Recursos Hídricos;
<b>PL</b>	Programação Linear;
<b>PLIRHINE</b>	Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste;
<b>RES</b>	Reservatório;
<b>RHS</b>	Right-Hand Side;
<b>SAD</b>	Sistema de Apoio à Decisão;
<b>SAGBAH</b>	Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacia Hidrográfica;
<b>SCE-UA</b>	Shuffled Complex Evolution - University of Arizona;
<b>SRH</b>	Secretaria de Recursos Hídricos;
<b>SUDENE</b>	Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Definição do problema

Segundo Grigg (1985), John F. Kennedy teria dito:

“Qualquer um que resolver os problemas hídricos vai ser premiado com dois prêmios Nobel: - Um pela paz e outro pela ciência”

Esta afirmação define bem qual é a dimensão dos problemas a serem enfrentados por aqueles que se dispõem a estudar e propor metodologias a serem utilizadas no planejamento e gestão de recursos hídricos. Entre esses problemas, está o da escassez hídrica crescente, que leva à necessidade de uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis, envolvendo aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos, sociais e a tomada de decisões por vários atores que, por seu turno, possuem objetivos e juízos de valor diferentes, conferindo à gestão um caráter multidisciplinar.

As decisões a serem tomadas são atos exclusivamente humanos, que se valem de instrumentos como os Sistemas de Apoio à Decisão - SAD's - que aumentam a capacidade de análise, compreensão e controle dos processos decisórios, do contexto nos quais esses processos estão inseridos e das conseqüências das ações a serem efetivadas.

O desenvolvimento de SAD's deve suportar interações e adaptações, de forma a superar a divergência existente entre o que se desenvolve em centros de pesquisa e o que se utiliza no dia-a-dia profissional. Deve-se buscar a integração do conhecimento especializado em diferentes locais e épocas, visando elevar o compartilhamento daquilo que é desenvolvido e uma maior reutilização dos códigos computacionais produzidos. Utiliza-se, para isso, um padrão denominado de arquitetura aberta, onde inúmeras contribuições são acrescentadas a uma base comum de modelos computacionais, fazendo com que o SAD seja capaz de se adaptar a um número cada vez maior de situações específicas (Viegas Filho, 2000).

Ainda, segundo Viegas Filho (2000), para atingir esse padrão de arquitetura aberta, verifica-se que uma ferramenta passível de utilização é o paradigma da Modelagem Orientada a Objetos, que através de três processos de organização mental - diferenciação, distinção entre todo e parte, percepção de classes distintas - e de seus mecanismos funcionais básicos - encapsulamento, hereditariedade, polimorfismo, associações, ligações e agrupamentos - apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas procedurais utilizadas na

programação tradicional de sistemas computacionais, aplicados aos SAD's desenvolvidos para a área de recursos hídricos.

Entre as utilizações de SAD's, uma das que mais se destacam diz respeito ao dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos, entre os quais se encontram reservatórios, adutoras, bombeamentos, projetos de irrigação, entre outros. Estes são, então, representados através de modelos numéricos dentro de uma metodologia sistêmica de planejamento, que busca conciliar recursos escassos e demandas abundantes. Sendo assim, essa metodologia busca, atualmente, unir as vantagens apresentadas por procedimentos de otimização e simulação, sem perder de vista a necessidade de preencher a lacuna entre o que se desenvolve academicamente e o que se utiliza na prática profissional.

Nesse contexto, a simulação tem por objetivo reproduzir o comportamento da bacia hidrográfica, testando inclusive a aplicabilidade de soluções consideradas ótimas. Já a otimização busca, entre soluções ditas viáveis, aquela que melhor atende a um determinado objetivo, de alguma maneira mensurável.

Em particular, a otimização de sistemas de recursos hídricos procura alterar a distribuição temporal e espacial das disponibilidades hídricas de uma bacia, através de medidas estruturais, como a construção de novos reservatórios, e não-estruturais, como a adoção de regras operacionais, de maneira que os objetivos atuais e futuros do sistema sejam atendidos o mais completamente possível. Esses objetivos são traduzidos por relações matemáticas que representam, por exemplo, um melhor retorno econômico ou um menor custo econômico ou ainda índices de desempenho que devem ser maximizados ou minimizados.

## **1.2 Objetivos**

O que se busca no presente trabalho é definir regras decisórias para a operação de sistemas de reservatórios e, em paralelo, testar a vantagem da MOO na implementação de ferramentas de otimização num SAD.

Em outras palavras, este trabalho se configura numa tese voltada ao desenvolvimento tecnológico, cujo objetivo geral é a instrumentalização de um Sistema de Apoio à Decisão aplicado a sistemas de Recursos Hídricos, constituídos por Redes Hidrográficas e destinados ao Planejamento de Uso da Água, com ferramentas de otimização. Essas ferramentas são aplicadas ao dimensionamento e à operação desses sistemas, baseadas em técnicas de Procura Direta e de Programação Linear, utilizando o paradigma da Modelagem Orientada a Objetos como ferramenta para essa instrumentalização.

Para a presente tese, algumas hipóteses iniciais foram formuladas entre as quais se destacam:

1. A Modelagem Orientada a Objetos é vantajosa para implementação de ferramentas de otimização num Sistema de Apoio à Decisão aplicado a Sistemas de Recursos Hídricos;
2. Algoritmos genéticos têm grande potencial de utilização para a obtenção de parâmetros ótimos de regras decisórias para a operação de sistemas de reservatórios;
3. Algoritmos genéticos têm melhor performance que o método de Rosenbrock numa abordagem de otimização, por procura direta, de regras operacionais de reservatórios;
4. A abordagem por procura direta tem melhor performance que a abordagem por programação linear, para a otimização de regras operacionais de reservatórios.

Para comprovar essas hipóteses, paralelamente ao objetivo geral, serão desenvolvidas e testadas abordagens para a operação de sistemas complexos de recursos hídricos. Essas abordagens são assim definidas:

1. Adotando uma abordagem implicitamente estocástica, ajustar os parâmetros de regras de decisão para operação de um sistema de reservatórios, cuja morfologia será estabelecida previamente, utilizando para isso registros históricos de vazão e pluviometria;
2. Adotando, preliminarmente, uma abordagem determinística, ditar descargas e armazenamentos ótimos para um sistema de reservatórios e, posteriormente, adotar uma abordagem implicitamente estocástica para ajustar regras de decisão, cuja morfologia será estabelecida posteriormente, tendo por base as descargas e os armazenamentos ótimos obtidos por um modelo de programação linear.

### **1.3 Justificativa da tese**

Conforme já comentado anteriormente, é premente a necessidade de uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis. Como essa gestão envolve aspectos multidisciplinares, os analistas de recursos hídricos devem se valer da utilização de Sistemas de Apoio à Decisão - SAD, que, por sua vez devem se adaptar a situações distintas.

Assim sendo, a presente tese se justifica devido à necessidade de desenvolver um SAD capaz de aproximar o trabalho realizado no meio acadêmico àquele realizado cotidianamente por profissionais denominados de analistas de sistemas de recursos hídricos. Além disso, este trabalho se justifica no sentido de que procura dirimir divergências no tocante à utilização de

abordagens – como simulação ou otimização, ou ainda, como otimização por procura direta ou por programação linear – na derivação de regras ótimas para a operação de um sistema de reservatórios.

## **1.4 Estrutura da tese**

De maneira a facilitar o entendimento do presente trabalho e as fases para a sua elaboração, o mesmo foi dividido em 5 (cinco) capítulos descritos a seguir.

O “Capítulo 1 – Introdução” tem por objetivo fornecer uma breve introdução ao presente trabalho, definindo o problema abordado, inserindo-o no contexto geral da gestão dos recursos hídricos, estabelecendo os objetivos gerais e específicos, apresentando as abordagens a serem tomadas e a justificativa do porquê da escolha do tema.

Já o “Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica” estabelece o embasamento teórico necessário para que os objetivos enumerados no capítulo anterior sejam alcançados. Os principais temas abordados nesse capítulo dizem respeito aos conceitos relativos a sistemas de apoio à decisão e à modelagem orientada a objetos. Relativo ao planejamento de recursos hídricos se discute a abordagem sistêmica e a sua configuração. Em seguida apresentam-se a programação linear e o método por procura direta, com destaque para os algoritmos genéticos. Finalmente definem-se os métodos de avaliação de desempenho a serem utilizados: a confiabilidade, a elasticidade e a vulnerabilidade.

No “Capítulo 3 – Metodologia”, descrevem-se as duas fases distintas de como os conhecimentos apresentados na revisão bibliográfica foram aplicados no trabalho. Essas duas fases se caracterizam pela utilização da Modelagem Orientada a Objetos para a implementação de ferramentas de otimização num SAD aplicado a recursos hídricos e pela utilização dessas ferramentas no intuito de estabelecer regras ótimas de operação de um sistema de reservatórios.

Dando continuidade ao trabalho, no “Capítulo 4 – Aplicação e resultados” apresentam-se as fases de aplicação da metodologia apresentada no capítulo anterior. Descreve-se então como utilizar as ferramentas de otimização implementadas no PROPAGARMOO e a bacia utilizada para testar as metodologias desenvolvidas no trabalho. Os resultados obtidos também estão descritos nesse capítulo.

Finalmente, no “Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações” descrevem-se as conclusões finais e se explicita o fato do alcance dos objetivos inicialmente estabelecidos, enumerando algumas recomendações para aqueles que venham a seguir com a discussão do tema trabalhado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esse capítulo tem por objetivo estabelecer o embasamento teórico necessário para que os objetivos anteriormente enumerados no capítulo anterior sejam alcançados.

Sendo assim, num primeiro momento são descritas as características dos sistemas de apoio à decisão, utilizados devido à complexidade das ações buscadas num processo de tomada de decisão.

Uma vez que se utilizará a Modelagem Orientada a Objetos como ferramenta para a implementação de instrumentos de otimização num SAD aplicado a recursos hídricos, suas vantagens serão então listadas.

Finalmente, serão discutidos aspectos relacionados ao planejamento de recursos hídricos principalmente no que se refere ao processo de otimização e a métodos de avaliação do desempenho de um sistema de reservatórios.

### **2.1 Sistemas de Apoio à Decisão (SAD)**

Segundo Jones e Brown (2002), ao utilizar SAD's no processo de tomada de decisão, está se fazendo uso da estratégia "dividir e conquistar", que se traduz no fato da delegação do processamento das informações modeladas para os sistemas computacionais, enquanto, simultaneamente, os tomadores de decisão processam, cognitivamente, as informações não-modeladas, até finalmente chegar a uma decisão, baseados nas respostas fornecidas pelo SAD e nas informações não-modeladas. Esses mesmos autores salientam ainda que, no final desse processo, os tomadores de decisão podem ignorar os resultados fornecidos pelo SAD, ou, ainda, reprocessar as informações modeladas.

Essa estratégia, enfim, leva em consideração o fato de que fórmulas e algoritmos são executados mais rapidamente, com precisão e consistência, pelos sistemas computacionais, enquanto os seres humanos possuem a vantagem do julgamento final dos resultados, baseados nas informações não-modeladas, que fazem parte do seu juízo de valor e de conhecimentos adquiridos anteriormente.

Na fase de projeto e execução do planejamento de recursos hídricos, é analisada uma gama de problemas complexos, aos quais, por sua vez, é associada uma série de soluções distintas entre si. Alguns desses problemas podem ser, por exemplo, a definição de volumes de reservatórios a serem construídos ou a definição de áreas de irrigação a serem implantadas,

ou ainda, a tentativa de aumento da eficiência de sistemas de recursos hídricos já existentes, onde medidas não-estruturais devem ser priorizadas.

Há que se levar em conta que o desenvolvimento tecnológico tem colocado à disposição dos decisores sistemas de hardware capazes de lidar com um volume maior de dados, reduzindo custos, aumentando a eficiência de pacotes computacionais e diminuindo o tempo de processamento.

Segundo Carlsson (2002), as principais conseqüências da utilização de SAD's foram as seguintes:

- Os tomadores de decisão conseguiram mais eficientemente que antes, tratar com problemas difíceis não-estruturados ou semi-estruturados que, até então, necessitavam de uma experiência muito extensa e conhecimento de experts;

- Tornou-se possível, aos tomadores de decisão, tomar mais e melhores decisões sem utilizar ferramentas extremamente avançadas de otimização e sem dominar modelagem avançada;

- Os tomadores de decisão começaram a fazer uso sistemático do seu conhecimento e experiência no processo de solução de problemas interativamente.

Resumidamente, o que se busca é ultrapassar os seguintes obstáculos (Carlsson, 2002):

- As pessoas têm restrições cognitivas na adoção de sistemas inteligentes;
- As pessoas não entendem realmente o apoio que podem ter e desconsideram a utilização de SAD's em favor de experiências e visões passadas;
- As pessoas se frustram com as teorias que realmente não entendem;
- As pessoas acreditam que conseguem mais apoio falando com outras pessoas.

### **2.1.1 Definições relativas à SAD**

Sprague e Carlson (1982) apud Sprague e Watson (1991) definem SAD como um sistema interativo baseado em computação que auxilia os decisores na utilização de dados e modelos para resolver problemas não-estruturados ou sub-especificados.

Já Johnson (1986) define que um SAD é um sistema computacional integrado de hardware e software utilizados por gerentes e operadores como auxiliar às decisões operacionais e suas implementações; e ainda para o conhecimento da provável performance do sistema, permitindo a incorporação do julgamento do operador durante o processo de análise, fornecendo assim oportunidade de sinergismo entre homem e máquina.

O que se busca, então, é superar a limitação racional humana de lidar com grandes quantidades de informações e conhecimentos e uma das formas é o desenvolvimento de SAD's.

Nesse desenvolvimento existem papéis específicos a serem desempenhados que são os seguintes:

a) Decisor ou usuário:

- É aquele que tem de ser capaz de entrar em ação para tomar a decisão, responsabilizando-se pelas suas conseqüências;

b) Intermediário ou facilitador:

- Conforme conotação dada por Ensslin (1995), é aquele que serve de acessor ao decisor ou usuário quando este não interage diretamente com o SAD;

c) Projetista:

- É aquele que projeta e constrói Geradores de SAD's e a partir destes constrói SAD's específicos para determinados propósitos;

d) Suporte técnico:

- Desenvolve recursos ou componentes complementares para SAD, garantindo inclusive sua manutenção, quando necessária;

e) Criador:

- Desenvolve recursos ou componentes adicionais para o SAD, como novos bancos de dados, novos modelos de análise e novos componentes para exibição e manipulação de dados.

Viegas Filho (2000) argumenta, ainda, que, no âmbito dos SAD's aplicados a recursos hídricos, os atores identificados com a função de decisores (usuários) são profissionais especialistas nos assuntos que envolvem a gestão e o planejamento de recursos hídricos, possuindo, porém, pouca afinidade na área de Sistemas de Informações, Linguagens computacionais e na construção de SAD's propriamente dita. Já os Criadores teriam exatamente a realidade oposta. Assim, se inclui um outro papel junto ao Facilitador, Projetista e Suporte Técnico, que compete a um profissional da área de recursos hídricos e com boa formação complementar na área de informática e de sistemas de apoio à decisão, denominado então de *Analista de Sistemas de Recursos Hídricos*, e que tem como principal atividade a de



orientar a estruturação dos problemas decisórios, a construção de SAD's específicos, a construção de geradores de SAD, a construção de componentes para SAD e a análise e interpretação dos resultados obtidos na utilização de SAD's específicos.

Compete ao analista de sistemas de recursos hídricos a análise do domínio do problema para o qual o SAD deve ser utilizado como, por exemplo, identificar situações reais nas quais ferramentas de otimização podem ser utilizadas. Essas situações se configuram num *estudo de caso*, que por seu turno se configura numa proposição relativa ao domínio da aplicação do SAD.

Ao analista de sistemas de recursos hídricos quando da utilização de SAD's aplicados a recursos hídricos, cabe a montagem do modelo representativo do sistema de recursos hídricos do estudo de caso e a utilização de linguagem específica, montando, inclusive, exemplos educativos para futuros usuários do SAD (ou componente) desenvolvido.

## 2.1.2 Composição de um SAD

Um SAD é composto basicamente de três elementos:- uma interface entre homem e máquina, um sub-sistema de dados e um sub-sistema composto de modelos matemáticos computacionais (ver figura 2.1)

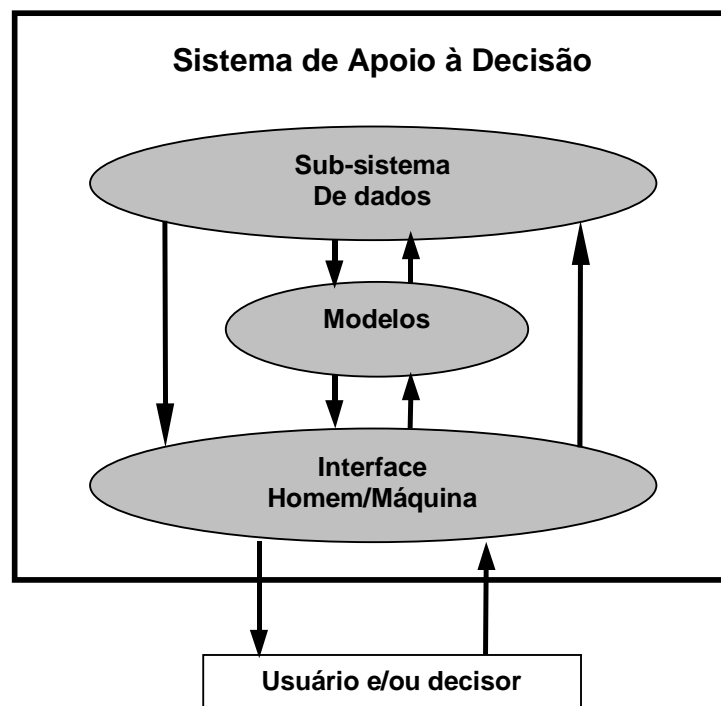


Figura 2.1: Esquema representativo de um SAD (Fonte: Adaptado de Dunn et alli, 1996).

Dessa composição surgiu o paradigma DDM: Diálogo-Dados-Modelos, representado pela decomposição dos SAD's em três subsistemas a seguir detalhados.

a) Subsistema Diálogo:

Esse subsistema corresponde à interface entre homem/máquina e diz respeito à forma de comunicação entre o usuário e o sistema, que deve ser amigável, capacitando o usuário ao acesso aos dados e à utilização dos modelos de forma flexível, sem necessidade de treinamentos extensivos e sem apresentar barreiras ao uso interativo. A linguagem utilizada nesse subsistema deve ser tal que as respostas do processamento sejam claras e a apresentação dos modelos permita ao projetista integrar o seu conhecimento e experiência, ou ainda contribuições de especialistas no assunto objeto de aplicação do SAD.

b) Subsistema Dados:

Esse subsistema deve ser encarado como de grande importância para o sistema, uma vez que se constitui como sua matéria prima. A esse subsistema deve ser garantida a eficiência na entrada, armazenamento e utilização de informações. Ou seja, segundo Viegas Filho (2000), esse subsistema é o responsável pela alimentação e manutenção dos dados disponíveis para serem submetidos à manipulação e análise.

c) Subsistema Modelos:

O subsistema de modelos é composto pelos recursos para análise e manipulação das informações disponíveis. São aplicativos matemáticos que, de acordo com seus propósitos, podem ser de simulação ou de otimização. De acordo com o tratamento da aleatoriedade dos dados, eles podem ser determinísticos ou estocásticos.

Cabe aqui definir *sistema* como um conjunto organizado de partes integradas por seres ou órgãos ou ainda coisas, que possuem uma estrutura e que interagem entre si, constituindo uma unidade, para atingir uma finalidade específica, de acordo com um plano ou princípio (Instituto de Pesquisas Espaciais, 1972 apud Pilar, 1998). Já *modelo* é definido como uma representação da realidade, na maioria das vezes com simplificações do fenômeno real (Loucks, 1992), que finalmente é expresso ou descrito em forma esquemática, com o auxílio de métodos matemáticos (Ventzel, 1983 apud Pilar, 1998).

O subsistema em questão é, então, constituído de modelos com diferentes características e propósitos, objetivando representar o sistema em estudo por intermédio da manipulação do conjunto de dados disponíveis. Essa manipulação é feita através de uma representação matemática dos diferentes elementos que lhe são componentes e a partir do uso de ferramentas originadas de áreas distintas como o cálculo diferencial e vetorial, a análise sistêmica ou pesquisa operacional, a estatística, entre outros. (Viegas Filho, 2000).

## 2.2 A Modelagem Orientada a Objetos

Para facilitar a análise e compreensão dos sistemas a serem modelados, e construir SAD's com um padrão de arquitetura aberta, verifica-se que um dos caminhos a serem trilhados diz respeito à utilização do paradigma da Modelagem Orientada a Objetos, que, através de três processos de organização mental (diferenciação, distinção entre todo e parte, percepção de classes distintas) e de seus mecanismos funcionais básicos (encapsulamento, hereditariedade, polimorfismo, associações, ligações e agrupamentos), apresenta uma série de vantagens em relação às técnicas procedurais utilizadas na programação tradicional de sistemas computacionais como os SAD's desenvolvidos para a área de recursos hídricos.

De acordo com Meyer (1988), são sete os passos em direção à felicidade baseada em objetos:

- a) Estrutura modular baseada em objetos: os sistemas devem ser modularizados na base da sua estrutura, onde os dados são objetos;
- b) Abstração de dados: objetos devem ser descritos como implementações de tipos de dados abstratos, ou seja, em classes;
- c) Gerenciamento automático de memória: objetos inúteis devem ser descartados (destruídos) pelo sistema de linguagem subalterno, sem a intervenção do programador;
- d) Classes: qualquer tipo não simples é um módulo, e todo módulo de alto nível é uma classe;
- e) Herança: uma classe pode ser definida como uma extensão ou restrição de outra;
- f) Polimorfismo e ligação dinâmica: às entidades do programa deve ser permitido se referir a objetos de mais de uma classe, e deve ser permitido, às operações, ter diferentes resultados em classes diferentes;
- g) Herança múltipla e repetida: deve ser possível declarar uma classe como herdeira de mais de uma classe, e mais de uma para uma mesma classe.

Para o entendimento de cada um desses termos, o autor do presente trabalho aconselha a leitura do capítulo 3: “FUNDAMENTOS DA MODELAGEM ORIENTADA A OBJETOS” da tese de doutorado de João Soares Viegas Filho defendida em 2000, no IPH-UFRGS. Nesse trabalho estão discutidas as características, e os fundamentos nos quais se baseiam a MOO assim como as fases características de sua utilização.

As características da MOO, então, acabam por produzir uma série de vantagens dessa metodologia em relação ao método tradicional procedural de se desenvolver sistemas computacionais, o que justifica a sua utilização na presente tese. Essas vantagens são as seguintes:

a) Administração da complexidade:

- Consiste na divisão do problema a ser analisado em partes segundo uma visão sistêmica, ou seja, em um todo integrado no qual cada parte represente uma função (serviço) ou conjunto de funções bem definidas. Cada uma dessas partes, por sua vez, pode ser subdividida até que o sistema inteiro fique reduzido a células elementares (módulos), totalmente controláveis e compreensíveis, dentro de algum modelo conhecido e capaz de ser representado através das linguagens formais de modelagem computacional, cada uma representando uma função bem definida;

b) Aumento de produtividade:

- As principais chaves dessa vantagem são a reutilização e a extensibilidade. Ao contrário de copiar e modificar os módulos, são utilizadas bibliotecas de classes desenvolvidas pelo próprio modelador, fornecidas por terceiros ou contidas no próprio ambiente de desenvolvimento orientado a objetos utilizado. É possível, ainda, o desenvolvimento de estruturas-modelo de classes especializadas (“frameworks”) que permitem a construção de aplicativos, igualmente especializados, a partir de componentes pré-elaborados, como é o caso de aplicativos para simular sistemas de recursos hídricos.

A reutilização e a extensibilidade na MOO ocorrem devido ao encapsulamento, à herança e tipo simples: o encapsulamento constrói muros em torno dos dados e dos códigos; a herança encoraja a generalização do código primeiro, e depois a sua especificação para o caso particular; as partes gerais são freqüentemente reutilizáveis; e, finalmente quando uma variável, parâmetro, ou arranjo pode conter qualquer coisa, existem menos restrições construídas no código (Smith, 1991).

Nas palavras de Yourdon (1990) apud Reinoso (1993):

...no desenvolvimento tradicional tende-se a tratar cada novo projeto como um exercício intelectual nunca antes contemplado; análise e projeto começam literalmente com uma folha de papel em branco. Por outro lado, ao usar métodos orientados a objetos, a tendência é usar *projeto por extensão*. Isto é, assume-se que o novo sistema a desenvolver corresponde simplesmente a uma extensão ou refinamento de algo que já tenha sido construído.

c) Localização de mudanças:

- Como a manutenção é uma fase constante da MOO, torna-se necessário fazer algumas modificações no código computacional do software desenvolvido. Como esse mesmo software tem uma característica modular, as mudanças necessárias são usualmente localizadas nas classes, ou mesmo isoladas em uma nova subclasse, e não espalhadas em toda aplicação.

Essa vantagem ocorre devido ao encapsulamento e ao polimorfismo: - Enquanto o encapsulamento isola códigos de outros códigos, o polimorfismo remove a necessidade de declarações do tipo “interruptor” e outros conhecimentos globais de estado. Mais que ter que mudar vários módulos, com efeitos desconhecidos, muda-se um objeto, com efeitos locais a esse objeto.

Além do exposto anteriormente, a MOO aumenta a extensibilidade e robustez, melhora a flexibilidade, a manutenibilidade, e a utilização do programa computacional resultante, em relação ao desenvolvimento tradicional (Korson, 1990 e Meyer, 1988 apud Reinoso, 1993). O processo de análise e projeto torna-se muito mais intuitivo, de fácil documentação e acompanhamento, na medida em que os elementos básicos dos programas correspondem aos elementos do mundo real, objeto de estudo da aplicação. Em outras palavras, a hierarquia de classes força a consideração do projeto antes da codificação (Smith, 1991).

Uma outra vantagem da utilização da MOO é que a mesma apresenta um alto grau de *uniformidade*. Ou seja, não é necessário fazer distinções entre as entidades que representam um único valor e aquelas que representam uma estrutura de dados de mais alto nível, possibilitando assim a representação direta de entidades do mundo real que requerem uma complexa estrutura de dados para descrevê-las (Borges, 1996).

O processo de programação da forma como é concebido e estruturado com a utilização da MOO estimula o trabalho em grupo, a reutilização e o refinamento de comandos.

## **2.3 O Planejamento de Sistemas de Recursos Hídricos**

Segundo Grigg (1985), planejamento é uma arte e uma ciência, principalmente uma arte. No sentido de ciência econômica, é a forma de conciliar recursos escassos e necessidades abundantes (Barth, 1987).

Em se tratando de recursos hídricos, essa condição de escassez pode ser encontrada sob o ponto de vista quantitativo ou qualitativo (ou ambos concomitantemente). Já as necessidades de manifestam nas várias formas de demandas.

Lanna (1999) ressalta ainda que, por ser um recurso escasso, sob o ponto de vista da ciência economia, a água é dotada de valor econômico, o que só reforça a necessidade de planejamento. Além disso, devido a economias de escala, o planejamento de sistemas de recursos hídricos sempre será feito diante de uma realidade de múltiplos propósitos.

Em outras palavras, o planejamento dos recursos hídricos vem da necessidade de lidar com os conflitos de uso das águas, que Lanna (1997) classifica como:

- Conflitos de destinação de uso, ou de propósitos;
- Conflitos de disponibilidade qualitativa;
- Conflitos de disponibilidade quantitativa.

Além desses conflitos, verifica-se que, na presença de reservatórios, outro problema surge: como operar os sistemas de recursos hídricos de uma forma temporalmente distribuída.

A Comissão Nacional de Água dos Estados Unidos (Grigg, 1985) apresenta a seguinte definição: planejamento é um processo criativo e analítico de:

1. Definir o conjunto de possíveis objetivos;
2. Coletar a informação necessária para desenvolver e analisar sistematicamente cursos alternativos de ações para atingir tais objetivos;
3. Disponibilizar as informações e conseqüências das ações alternativas de modo seguro e apropriado;
4. Produzir procedimentos detalhados para executar as ações;
5. Recomendar cursos de ações como apoio aos tomadores de decisão na decisão de um conjunto de objetivos e cursos de ações a seguir.

Pode-se afirmar que não existe uma metodologia única para o desenvolvimento de modelos para o planejamento dos recursos hídricos. Na verdade, os objetivos do planejamento mudam constantemente, temporalmente e espacialmente, variando deste as necessidades de dimensionamento, operação e até de correção de sistemas.

### **2.3.1 A Abordagem Sistêmica**

Segundo Lanna(1997), “A análise de sistemas de recursos hídricos é uma técnica de solução de problemas complexos de engenharia de recursos hídricos a partir da abordagem sistêmica e do uso de técnicas computacionais agregadas à modelagem matemática de sistemas de recursos hídricos”.

Conforme já definido anteriormente, aqui também *sistema* é entendido como um conjunto de elementos arbitrariamente extraídos do mundo real, que guardam entre si uma relação e um propósito bem definidos, e o *modelo* é a representação matemática desse sistema.

Assim sendo, a abordagem sistêmica auxilia o planejador, ou tomador de decisões, a identificar uma série de alternativas para solucionar um problema e a escolher, entre essas, aquela que, segundo seus objetivos e juízos de valor, seja a melhor.

Segundo Labadie (1987) e Andreu (1993), a abordagem sistêmica deve ser efetuada através dos seguintes passos:

- 1º) Definição e caracterização dos problemas operacionais;
- 2º) Identificação dos componentes do sistema no tempo e no espaço e coleta de dados relevantes;
- 3º) Definição dos objetivos gerais e específicos;
- 4º) Definição dos métodos e critérios de avaliação, que determinarão se as soluções alternativas permitiram alcançar os objetivos propostos;
- 5º) Criação de alternativas viáveis física, econômica e socialmente, para o sistema e para a sua administração;
- 6º) Avaliação das alternativas possíveis e seleção da melhor, usando tecnologia, tempo, recursos humanos e financeiros disponíveis;
- 7º) Revisão, atualização e retroalimentação, para checar se os objetivos originais foram alcançados, com a incorporação das novas informações obtidas.

Como o principal problema com o qual devemos lidar, em se tratando de sistemas de recursos hídricos, é a escolha da melhor forma de alocar recursos escassos (a água), uma das abordagens possíveis de serem aplicadas é a da Pesquisa Operacional, que segundo Gross (1979) apud Arsam (2001), é um ramo da matemática aplicada ao processo de tomada de decisão.

Segundo Ventzel (1983) apud Pilar (1998), os problemas com que lida a Pesquisa Operacional podem ser classificados em problemas diretos e problemas recíprocos. Os primeiros procuram dar resposta à pergunta “*o que aconteceria se*” em determinada circunstância adota-se uma determinada solução. Essa pergunta é então respondida através de processos de *simulação*. Já os problemas recíprocos tentam dar resposta à pergunta “*como*” escolher uma solução viável que maximize um índice de eficiência. Esses problemas então são resolvidos por *otimização*.

Verifica-se que os engenheiros, que estão mais próximos dos processos decisórios, sentem-se mais à vontade quando lidam com modelos de simulação. Já pesquisadores sentem-se mais à vontade quando lidam com processos de otimização, argumentando inclusive que a obtenção de uma solução ótima global só pode ser obtida por otimização. Os engenheiros, por sua vez, contra-argumentam que uma solução “quase-ótima” já é suficiente, posto que os modelos de simulação representam mais fielmente o problema real, e o resultado ótimo da otimização, sob o ponto de vista matemático, pode não corresponder à solução real, já que o modelo de otimização necessita de uma série de simplificações.

O parágrafo anterior é apenas um dos motivos apresentados na literatura que leva à existência de uma brecha entre o que é desenvolvido nos centros de pesquisa e o que é utilizado na prática dos processos de tomada de decisão. Yeh (1985) e Simonovic (1992) asseguram que, objetivando sanar ou pelo menos diminuir essa brecha, existe uma tendência da utilização de modelos que incorporem, na medida do possível, os fatores positivos da otimização e da simulação.

Segundo Simonovic (1992), então, as diferentes formas de abordagem sistêmica no planejamento de sistemas de recursos hídricos seriam: simulação, otimização e análise multiobjetivo.

a) Simulação:

- Segundo Ackoff (1961) e Maass et. alli. (1962), apud Yeh (1985), simulação é uma técnica de modelagem que é usada para aproximar o comportamento de um sistema de maneira computacional, representando todas as características do sistema através de descrições algébricas e matemáticas. Já Simonovic (1992) define que um modelo de simulação é caracterizado por uma representação de um sistema físico utilizado para prever a resposta do mesmo sob um dado conjunto de condições.

b) Otimização:

- A otimização é efetuada por modelos que permitem aos usuários gerar decisões operacionais e de planejamento que podem ser, de alguma forma e do ponto de vista matemático, mensuradas como ótimas. A maioria dos modelos de otimização é baseada em algum tipo de técnica de programação matemática e podem ser classificados nos seguintes grupos (Simonovic, 1992):

- Programação linear: são aqueles modelos onde a função-objetivo e as restrições podem ser expressas em forma algébrica linear, com coeficientes constantes conhecidos.



Quando as variáveis de decisão são restritas a valores inteiros, esses modelos são chamados de modelos de *programação linear inteira*. Já quando apenas algumas variáveis de decisão são inteiras, eles são chamados de modelos de *programação linear mista*;

- *Programação não-linear*: nesse grupo estão incluídos aqueles modelos onde a função objetivo e/ou alguma (ou algumas) restrições possuem termos não-lineares;

- *Programação dinâmica*: são aqueles modelos nos quais as variáveis de decisão possuem uma característica seqüencial própria. Podem ser aplicados quando o problema pode ser representado como uma seqüência de estratégias, onde uma ou mais decisões em um estágio afetem diretamente e unicamente o estágio subsequente. Podem, então, ser utilizados para resolver problemas lineares e não-lineares;

Amisial e Barrios (1986) incluem ainda nessa classificação os métodos chamados *métodos de busca*, os quais são de natureza iterativa, que começam com uma avaliação inicial de uma função objetivo, e buscam melhorar esse valor, de maneira seqüencial, alterando os valores dos parâmetros (das variáveis) até encontrar solução ótima, de acordo com algum critério de convergência. São usados principalmente nos casos em que a função objetivo é não diferenciável, se a avaliação das derivadas da função objetivo é mais difícil que a avaliação da própria função objetivo, ou se suas derivadas parciais são descontínuas.

c) *Análise Multi-objetivo (ou Multi-critério)*:

- Ao contrário dos métodos anteriores que buscam a decisão ótima de acordo com apenas um critério, representado pela função objetivo, nessa análise o processo de decisão se divide, basicamente, em duas etapas (Pilar, 1998):

- Determinação do conjunto de decisões *dominantes*, ou *não-inferiores*, ou *de Pareto*;

- Eleição da melhor solução de compromisso, segundo alguns critérios estabelecidos pelos tomadores de decisão.

Segundo Simonovic (1992), as vantagens desse tipo de análise sobre os demais é que a mesma pode incorporar objetivos incomensuráveis (como questões ambientais, sociais, etc.), disponibiliza explicitamente funções de “trade-off” entre os critérios de análise, e trata os problemas de maneira mais realista, pois elimina a necessidade de um único critério de avaliação, ou seja, de uma única função objetivo.

## 2.4 Sistemas de Recursos Hídricos e sua configuração

Tanto quanto para a aplicação do paradigma da MOO e para o processo da análise sistêmica, anteriormente descritas, um dos primeiros passos é a abstração das principais características e entidades que compõe um sistema de recursos hídricos. Essa abstração levará então à identificação e desenvolvimento dos conceitos que compõem o *domínio do problema*. De forma análoga, para representarmos esse sistema através de modelos, seja de simulação ou otimização, o procedimento é o mesmo.

Em outras palavras, a abstração das principais características e entidades que compõe um sistema de recursos hídricos identificará os elementos que serão representados, sob a ótica da MOO, através de *classes*, *objetos*, *atributos*, *comportamentos* e *operações*, e sob o ponto de vista da modelagem matemática, através de equações, inequações e redes de fluxo.

Viegas Filho (2000) faz uma divisão de um sistema de recursos hídricos, apresentado topologicamente na Figura 2.2, reunindo em grupos os principais componentes e determinando o que se pretende examinar durante o processo de simulação e otimização desse sistema.

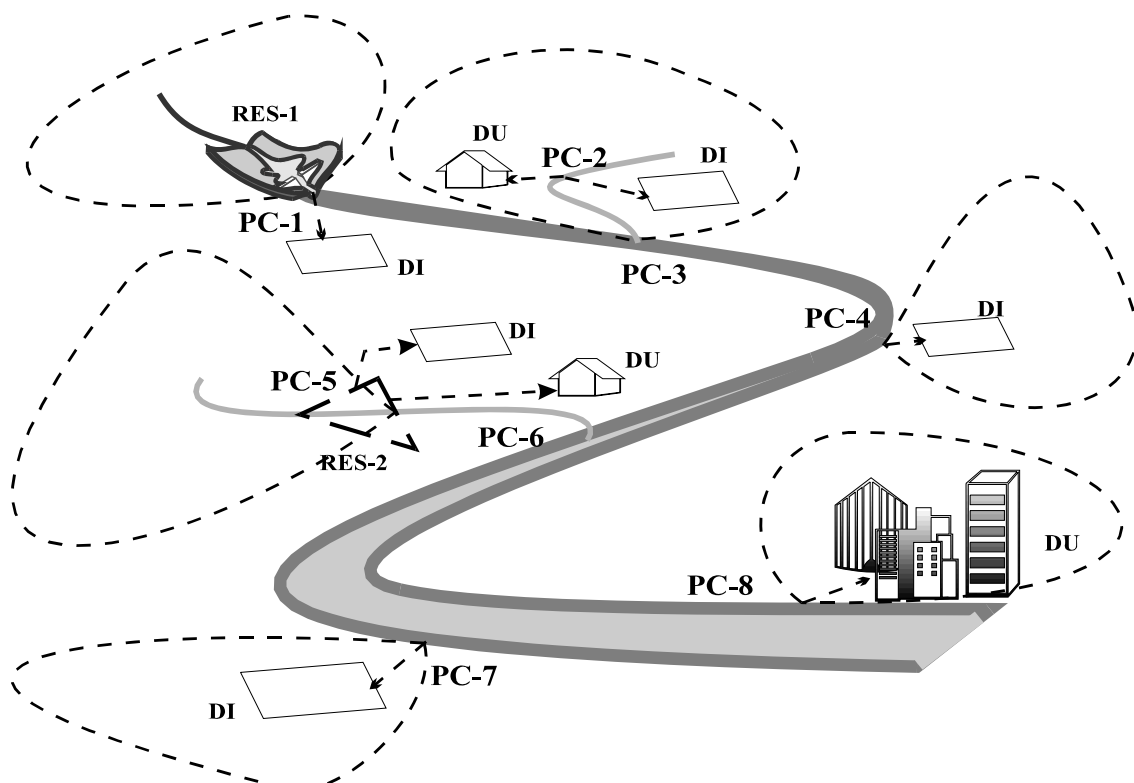


Figura 2.2: Representação topológica de um sistema de recursos hídricos (Fonte: Viegas Filho, 2000).

Essa divisão foi então feita de acordo com os seguintes grupos:

a) Sistema físico natural:

- Nesse grupo estão os elementos que representam o ciclo hidrológico, contendo os processos que condicionam a disponibilidade hídrica de que dispõe o sistema de recursos hídricos. Fazem parte desse grupo os seguintes elementos:

- *Atmosfera*, que é representada, principalmente, por dados de precipitação e evapotranspiração;

- *Bacia Hidrográfica*, que é composta por elementos como Superfície da bacia e das sub-bacias constituintes, camada sub-superficial, aquífero e canais naturais;

b) Estruturas de controle:

Nesse grupo estão incluídos os elementos que alteram a disponibilidade, espacial e temporal, hídrica da Bacia hidrográfica, cujos principais elementos são:

- *Reservatórios*, que permitem o armazenamento de água, para regularização de vazões, atendimento de demanda, e/ou amortecimento de cheias;

- *Canais artificiais*, que são responsáveis pelo escoamento canalizado artificial da bacia;

- *Diques*, que servem como limitadores do leito maior dos cursos d'água com o objetivo de evitar danos devido à extrapolação da calha natural;

- *Tomadas d'água*, que são utilizadas para o suprimento hídrico, retirando água dos cursos naturais e artificiais existentes na bacia;

c) Demandas:

As demandas hídricas são as razões primordiais da existência dos sistemas de recursos hídricos. Nesse grupo então estariam reunidas todas as espécies de demanda que o sistema atende (ou tenta atender), como por exemplo:

- *Demandas difusas*, que estão espalhadas por toda bacia e são insignificantes, para serem tratadas de forma especial, mas devem ser descontadas da disponibilidade;

- *Demandas urbanas*, destinadas ao abastecimento urbano;

- *Demandas agrícolas*, destinadas ao suprimento hídrico agrícola;

- *Demandas industriais*, destinadas ao uso de água que participam diretamente de processos industriais;

- Outras tais como demandas para diluição de efluentes, para navegação, para atender à vazão ecológica, etc.

d) Sistema institucional de operação e controle do sistema de recursos hídricos:

Nesse grupo estão incluídos os elementos que condicionam a operação dos elementos físicos do sistema, de acordo com os seus propósitos, e podem ser constituídos de:

- *Limitações legais*, que se referem à manutenção de vazões mínimas nos canais, ou a limites máximos de descarga de efluentes, por exemplo;
- *Planejamento estratégico*, que é constituído por regras que controlam a operação de reservatórios e atendimento a demandas, por exemplo;
- *Operação tática*, que é constituída também por regras que condicionam a operação do sistema, porém num intervalo de tempo menor que o do planejamento estratégico.

e) Elementos de controle do sistema:

Aqui estão incluídos aqueles elementos que permitem a integração da modelagem do sistema real com a modelagem computacional. Podem ser constituídos por:

- *Projeto e área de projeto*, que são a base de controle computacional do sistema modelado e o elemento delimitador da sua abrangência;
- *Pontos característicos*, que representam de forma segmentada a rede de drenagem da bacia, e que são escolhidos de acordo com a importância de pontos reais que existem na bacia, como, por exemplo, reservatórios, confluência de rios, ponto de demanda significativa ou conjunto de demandas;
- *Controle do processo de simulação e otimização*, constituído pelos elementos que controlem a inicialização, a variação temporal do modelo, as listas de eventos discretos que caracterizam o processo da simulação, a representação dos processos dinâmicos que acontecem na bacia, a representação matemática dos processos que se deseja otimizar, etc.;
- *Análise de resultados*, constituída por todos os elementos que efetuem computacionalmente toda a gama de análises que se deseja efetuar, como estatísticas, de risco, econômicas e financeiras, etc.

## **2.5 Otimização de Sistemas de Recursos Hídricos por Programação Linear**

São inúmeros os casos relatados da aplicação de modelos de programação linear na otimização do dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos com as mais diferentes configurações e objetivos. Como exemplo, podemos citar: Vieira Neto (1991); Tao e Lenox (1991); Sheer et alli. (1992); Valdés et alli (1992); Mohan e Raipure (1992); Oliveira (1995); Lund e Ferreira (1996); Pilar (1998) e Santana (1998).

O’Laoghaire e Himmelblau (1974), por sua vez, adotam uma estratégia para resolver um problema de otimização de sistemas de recursos hídricos na qual existem duas fases:

- Na primeira é efetuada a otimização das dimensões do sistema onde se faz a escolha de quais projetos de construção de reservatórios serão executados. Essa otimização poderia também se referir à escolha de quais projetos de irrigação deveriam ser executados como é o caso em Pilar (1998). Sendo, então, as restrições relacionadas ao capital disponível, a vazões disponíveis e a elementos institucionais. Essa fase é chamada de *Problema de Orçamento de Capital* e é resolvida através da formulação de programação linear com inteiros e utilizando o algoritmo “Branch and Bound”.

- Na segunda fase, após definida a dimensão do sistema, o problema é denominado de Problema de Política Operacional, sujeito às restrições relativas a demandas e limites físicos a serem obedecidos, e resolvido através da formulação de rede de fluxo.

Nas seções a seguir será descrito como efetuar as formulações de programação linear e como compatibilizar um sistema de recursos hídricos com essa formulação.

a) A formulação da Programação Linear:

- A programação linear (PL) é um método de programação matemática, ou técnica de otimização, no qual a função objetivo a ser otimizada, em forma algébrica linear, possui coeficientes constantes conhecidos. Ou seja, de forma resumida, diríamos que a PL possui o conjunto de restrições e a função objetivo lineares.

A formulação geral do problema poderia ser escrita da seguinte maneira (PUCCINI, 1977):

$$FO : Max Z = C^T \times X \quad \text{ou} \quad FO : Min Z = C^T \times X \quad 2.1$$

Sujeito a:

$$A \times X \leq B \quad 2.2$$

$$x_i \geq 0 \quad \therefore [X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)] \quad 2.3$$

Nessa formulação chamada de *forma vetorial padrão*, tem-se que:

$Z$  : é o valor da função objetivo a ser otimizado (maximizado ou minimizado), podendo ser dito que é uma função linear das variáveis  $x_n$  ;

$C^T$  : é a matriz linha de benefícios unitários (no caso de um problema de minimização, seriam custos unitários), ou de coeficientes da função objetivo, de dimensão  $1 \times n$  ;

$A$  : é a chamada matriz tecnológica, de dimensão  $m \times n$  ;

$B$  : é o vetor de recursos disponíveis, de dimensão  $m \times 1$ .

Uma outra forma de apresentar o mesmo problema é a chamada *forma matricial* (PUCCINI, 1977):

$$FO : Max Z \tag{2.4}$$

Sendo:

$$Z = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Sujeito à:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Uma terceira forma de representação é na *forma de equações lineares*, na qual se introduzem *variáveis de folga* ou *residuais*, ficando o problema com a seguinte representação:

$$FO : Max Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n + 0y_1 + 0y_2 + \dots + 0y_n \tag{2.7}$$

Sujeito à:

$$\begin{array}{rcl} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + y_1 & = & b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + y_1 & = & b_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + y_m & = & b_m \end{array} \tag{2.8}$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0) \tag{2.9}$$

$$(y_1, y_2, \dots, y_n \geq 0) \tag{2.10}$$

Quando a inequação é de “maior ou igual a ( $\geq$ )”, a variável de folga terá sinal negativo no lado esquerdo da igualdade. Após essa transformação, as restrições ficam como um sistema de  $m$  equações com  $n + m$  incógnitas, sendo  $n$  incógnitas  $x_i$  e  $m$  incógnitas  $y_i$ .

Esclarecendo novamente: o escalar que se deseja otimizar ( $Z$ ), é descrito por uma função linear conhecida como *função objetivo*. Os coeficientes  $c_i$  são os *coeficientes da função objetivo*. As incógnitas  $x_i$  são ditas *variáveis de decisão*. Os coeficientes  $a_{ij}$  correspondem aos *coeficientes técnicos*, enquanto o vetor  $a_j$  é uma atividade. Os coeficientes  $b_i$  são chamados de *coeficientes do lado direito das equações*, ou ainda, *requerimentos* ou *disponibilidades* (Santana, 1998).

Ruelle (1993) apud Pilar (1998), chama a atenção para o fato de que, apesar da longa história que têm os problemas de PL, apenas há pouco tempo se tornaram disponíveis algoritmos eficientes para resolução desses problemas, sendo os mais conhecidos o *método simplex*, o *método do elipsoide* e o *método dos pontos interiores*.

No que diz respeito à formulação do problema de programação linear, um fato que deve ser levado em conta é que para toda formulação original, denominada de *primal*, existe uma outra formulação denominada de *dual*. Se a formulação primal for de maximização, a dual será de minimização, e vice-versa. Esse conceito de dualidade amplia a utilidade da PL, pois permite a realização de análise de sensibilidade das soluções através dos conceitos de *preço sombra* e *custo de oportunidade*.

Em diversas publicações, nas mais diversas áreas, são encontradas metodologias e algoritmos computacionais desenvolvidos para solucionarem problemas de PL. Além disso, encontram-se softwares que utilizam esses algoritmos, para serem adquiridos, gratuitamente ou mediante pagamento, capazes de resolverem problemas de PL com milhares de restrições e variáveis.

Um desses softwares é o LINDO, cujo nome representa as iniciais de *Linear, Interactive and Discrete Optimization*, sendo um dos mais famosos softwares comerciais disponíveis mundialmente, estando disponível em diversas versões capazes de resolverem problemas de diferentes magnitudes. No endereço da LINDO Systems na Internet ([www.lindo.com](http://www.lindo.com)) está disponível uma versão gratuita.

Uma das vantagens da utilização do LINDO é que o mesmo é capaz de reconhecer o formato MPS – Mathematical Programming Systems (Murtagh e Saunders, 1987 apud Santana, 1998). Esse formato é uma técnica que permite, com relativa facilidade, a edição de grandes sistemas de equações lineares, tarefa que seria impraticável manualmente.

Um dos obstáculos (provavelmente o maior) a ser transposto na aplicação da PL para a otimização de sistemas de recursos hídricos é o da necessidade de linearidade das equações e inequações que compõem a formulação do problema. Fenômenos não-lineares envolvidos devem ser “linearizados”, e essas adequações podem levar a um desvio da realidade do problema a ser resolvido. Labadie (1987) acrescenta que, apesar dessas adequações, os resultados da otimização por PL garantem a obtenção de um ótimo global e podem ser analisados através de um posterior processo de simulação para enfim ser obtido o ótimo real.

Uma das técnicas mais conhecidas para promover a linearização de funções não-lineares é a chamada *programação separável*, que consiste em linearizar uma curva em trechos de reta. Uma outra forma de contornar o problema da não-linearidade é de adotar um procedimento iterativo de uso da PL, onde os resultados, de algumas variáveis, de cada “rodada” do problema são ajustados sucessivamente até que se verifique uma convergência, desses resultados, no processo iterativo (Barbosa, 1997).

Cabe nessa seção o comentário de que a mesma está muito longe de esgotar o assunto desenvolvido e de que o leitor deve procurar em Santana (1998), Pilar (1998) e Loucks et alli. (1981) muito mais detalhes e outras referências sobre esses assuntos.

#### b) Compatibilização de um sistema de recursos hídricos e a formulação da PL:

A compatibilização de um sistema de recursos hídricos com a formulação de programação linear se dá principalmente através de quatro aspectos básicos:

- O primeiro diz respeito às variáveis de decisão da formulação de PL, que num sistema de recursos hídricos baseados em redes hidrográficas, serão representados pelos seguintes resultados: vazões que passaram por determinados pontos de controle, descargas de reservatórios, implantação (ou não) de perímetros irrigados, volumes definidos de reservatórios, etc.;

- O segundo, que diz respeito à função objetivo que se deseja otimizar, é representado pelo desejo de diminuir custos ou maximizar benefícios, na definição das dimensões (e posterior operação) dos elementos componentes do sistema;

- O terceiro diz respeito às restrições do modelo, que são traduzidas aqui basicamente por: respeito à lei de conservação de massa em cada ponto de interesse, respeito aos limites físicos (mínimos e máximos) dos elementos constituintes e respeito a políticas institucionais ou operacionais;

- Finalmente, o quarto aspecto básico diz respeito às disponibilidades do modelo de PL, aqui traduzidos pelas entradas no sistema, constituídas basicamente pelas afluições hídricas e pela pluviometria.



Procuraremos então detalhar um pouco mais esses aspectos listados acima:

a) Função objetivo a ser otimizada:

Como num sistema de recursos hídricos podem existir inúmeras soluções possíveis (dimensão de reservatórios e canais, vazões defluentes, etc.), o objetivo da análise é determinar aquela solução considerada mais eficiente. Isso pode ser feito através de dois caminhos, representados pelas seguintes *funções objetivo*:

$Max\{f(x)\}$ : representa a função objetivo de maximização de benefícios, onde  $f(x)$  representa a função matemática dos benefícios. Essa função matemática geralmente é traduzida pelo Valor Presente de Benefícios Líquidos (VPBL) que por sua vez traduz o retorno econômico provocado pela operação do sistema;

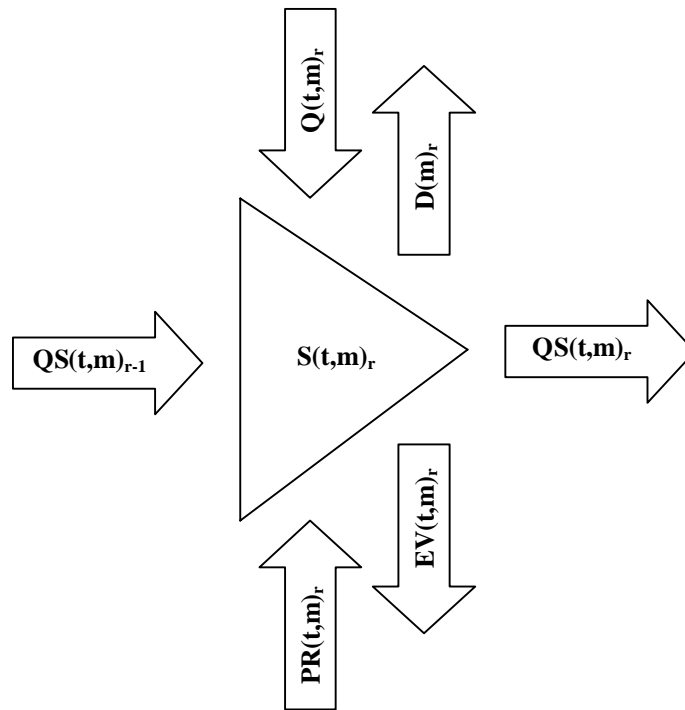
$Min\{f(x)\}$ : corresponde a uma função objetivo de minimização de custos, onde  $f(x)$  representa a função matemática de custos que também são atualizados para valores presentes no momento da análise do sistema.

Outros tipos de benefícios (ou custos) podem ser levados em conta, como por exemplo benefícios ambientais ou sociais, cuja utilização só é limitada pela capacidade dos modeladores em transformar esses retornos em valores mensuráveis, em termos econômicos ou matemáticos.

b) Restrições do modelo:

b.1) Balanço hídrico em reservatórios:

A lei de conservação de massa aplicada a um reservatório segue o esquema apresentado na figura 2.3:



**Figura 2.3: Esquema do balanço hídrico em um reservatório**

Esse esquema pode ser traduzido matematicamente e ajustado para formulação de PL, o que resulta na seguinte restrição:

$$S(t,m)_r - S(t,m-1)_r - Q(t,m)_r - QS(t,m)_{r-1} - PR(t,m)_r + QS(t,m)_r + D(m)_r + EV(t,m)_r = 0 \quad 2.11$$

Onde:

$S(t,m)_r$  é o armazenamento no reservatório  $r$ , no fim do mês  $m$ , do ano  $t$ ;

$S(t,m-1)_r$  é o armazenamento no reservatório  $r$ , no fim do mês  $m-1$ , do ano  $t$ ;

$Q(t,m)_r$  é a vazão da bacia incremental contribuinte do mês  $m$ , do ano  $t$ ;

$QS(t,m)_{r-1}$  é a vazão de chegada no reservatório  $r$ , no mês  $m$  e no ano  $t$ . Essa vazão resume o que aconteceu à montante desse reservatório, ou seja, é o somatório da descarga, turbinada e vertida, do reservatório anterior (se houver) com as vazões incrementais das bacias dos pontos de controle à montante e com influencia no reservatório  $r$ , descontada dos atendimentos às demandas à montante;

$QS(t,m)_r$  é a vazão de saída do reservatório  $r$ , no mês  $m$  e no ano  $t$ . Essa vazão é a soma das vazões turbinadas e vertidas no reservatório (quando for o caso);

$PR(t,m)_r$  é a precipitação sobre a lâmina d'água do reservatório  $r$ , no mês  $m$  e no ano  $t$ ;

$EV(t,m)_r$  é a evaporação do lago do reservatório  $r$ , no mês  $m$  e no ano  $t$ ;

$D(m)_r$ , são as demandas supridas pelo reservatório  $r$ , no mês  $m$ . Podem ser compostas de demandas com prioridades diferentes, e pode incluir demandas fixas e variáveis;

Verifica-se que os termos referentes à precipitação e à evaporação não são relações lineares, que, como já foi comentado, devem ser linearizadas para se ajustarem à formulação de PL. Além disso, se utilizou nesse esquema um intervalo de tempo mensal, o que não impede a escolha de outro qualquer, como semanal, quinzenal, etc. e será omitido daqui por diante.

b.2) Balanço hídrico num ponto sem reservatório:

O balanço hídrico num ponto de controle sem reservatório é dado pela seguinte expressão:

$$QS(t)_n - QS(t)_{n-1} - Q(t)_n + D(t)_n = 0 \quad 2.12$$

Onde:

$QS(t)_n$  é a vazão que sai de um determinado ponto de controle (ou trecho de rio)  $n$ , no intervalo temporal de análise que estiver sendo utilizado;

$QS(t)_{n-1}$  é a vazão que sai do ponto de controle (ou trecho de rio)  $n-1$ , que está localizado à montante de  $n$ , no intervalo temporal de análise que estiver sendo utilizado. Poder-se-ia simplesmente dizer que é a vazão que entra no ponto de controle  $n$ ;

$Q(t)_n$  é a vazão da bacia incremental contribuinte ao ponto de controle  $n$ ;

$D(t)_n$  representa as demandas que são atendidas no ponto de controle  $n$ .

A expressão da equação 3.12 representaria toda a dinâmica de um sistema de recursos hídricos que não possuísse reservatórios. As variáveis  $Q$  são de entrada e não controláveis, e as variáveis  $QS$  são resultados do balanço entre disponibilidades e suprimentos.

Quanto à variável  $D$ , duas perspectivas são possíveis:

- Se a equação for aplicada em toda bacia para analisar as relações entre as disponibilidades e o grau de atendimento às demandas associadas à variável  $D$ , estamos diante de um modelo de simulação (Lanna, 1997);

- Porém se a variável  $D$  estiver associada à implantação (ou não), ou do atendimento (ou não) de projetos de irrigação (por exemplo), essas variáveis assumem a característica de variáveis de decisão e o modelo passa a ser de otimização. Uma aplicação interessante nesse caso é o trabalho de Pilar (1998).

b.3) Limites físicos:

Os armazenamentos em reservatórios sempre estarão sujeitos aos seus limites físicos. Logo as variáveis  $S$ , explicadas no item b apresentam ainda as seguintes restrições:

$$S(t)_n \geq S_{\min,n} \quad 2.13$$

$$S(t)_n \leq S_{\max,n} \quad 2.14$$

Os valores  $S_{\min,n}$  e  $S_{\max,n}$  correspondem aos armazenamentos do volume morto e do nível operacional máximo do reservatório  $n$  em questão. Caso o modelo de otimização tenha como objetivo definir exatamente o volume dos reservatórios, se utilizará apenas a primeira restrição.

Há ainda a possibilidade de se limitar as vazões nos canais artificiais e naturais de acordo com as suas capacidades máximas de escoamento;

b.4) Restrições relativas a políticas institucionais ou operacionais:

Podemos incorporar restrições aos modelos de otimização que dizem respeito à obediência a políticas institucionais ou operacionais. Um dos casos mais comuns é a determinação de um limite mínimo de vazão a ser mantido nos canais de forma a evitar danos ao ambiente (ou para atender a necessidades de navegabilidade), que pode ser traduzido pela seguinte expressão:

$$QS(t)_n \geq Q_{\text{ecol}} \quad 2.15$$

Onde  $Q_{\text{ecol}}$  é a chamada vazão ecológica.

Por outro lado, a existência de municípios situados à margem de cursos d'água pode estabelecer um limite máximo de vazão com o objetivo de evitar o transbordamento da calha e a inundação de determinadas áreas, causando prejuízos econômicos. Esse limite seria reproduzido pela seguinte expressão:

$$QS(t)_n \leq Q_{\max} \quad 2.16$$

Onde  $Q_{\max}$  é uma vazão máxima relativa à capacidade de escoamento da calha do rio.

Outro caso bem característico é a estipulação de determinados valores de vazão turbinada (ou armazenamentos) para os reservatórios do sistema, com o objetivo de manter metas de produção de energia, gerada por hidroelétricas.

Nessa seção não se tem o objetivo de esgotar todas as possibilidades de restrições encontradas em sistemas de recursos hídricos, apenas de demonstrar a evidente possibilidade de compatibilizá-los com modelos de PL.

c) Vantagens e desvantagens da otimização por PL:

Com base na literatura consultada, as seguintes vantagens podem ser mencionadas:

- A PL garante um *ótimo global* na resolução de problemas;
- A PL não tem problemas de dimensionalidade;
- A PL é uma técnica relativamente simples e compreensível por qualquer profissional que trabalhe na operação de sistemas de recursos hídricos e não requer sistemas de hardware sofisticados;
- A existência de softwares comerciais ou gratuitos, já prontos, com farta documentação e que podem ser facilmente adquiridos, inclusive pela Internet;
- A PL possui flexibilidade para adaptação a uma grande variedade de problemas de variáveis dimensões;
- A noção de dualidade em algumas situações leva a menores exigências computacionais e possibilita a realização de análise de sensibilidade dos resultados;
- Para resolução de um problema de PL, nenhum conjunto de valores iniciais para as variáveis é necessário.

Por outro lado, poderíamos listar as seguintes desvantagens:

- Limitação quanto à exigência da linearidade das funções que descrevem os fenômenos envolvidos, não encontrada em muitas aplicações relacionadas a problemas de recursos hídricos;
- As técnicas utilizadas para contornar a desvantagem anterior podem levar à formulação de modelos que estejam muito distantes do problema real.

## **2.6 Otimização de Sistemas de Recursos Hídricos por Procura Direta**

Otimização é a busca do valor de uma variável ou de  $n$  variáveis, que proporcionem o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, que representa um objetivo

desejado e obedecidas as restrições (TUCCI, 1998). No caso de sistemas de recursos hídricos, a otimização pode ser utilizada, por exemplo, para determinar os valores de parâmetros, que definem regras operacionais de reservatórios, tendo como objetivo melhorar funções que representem o desempenho do sistema.

Os métodos de busca direta são métodos de natureza iterativa, que começam com uma avaliação inicial de uma função objetivo, e buscam melhorar esse valor, de maneira seqüencial, alterando o valor dos parâmetros até encontrar a solução ótima. São usados principalmente nos casos em que a função objetivo é não-diferenciável, se a avaliação das derivadas parciais da função é mais difícil que a avaliação da própria função ou se suas derivadas parciais são descontínuas.

A calibração automática de parâmetros de modelos chuva-vazão é um exemplo da utilização de métodos de otimização por busca direta. Tucci (1998) salienta que um dos métodos mais utilizados para esse fim é o método de Rosenbrock. Esse método foi utilizado pelo autor do presente trabalho para a otimização de parâmetros de regras operacionais de reservatórios na sua dissertação de mestrado obtendo bons resultados (VIANNA JR, 1998).

Outro método interessante é o denominado de algoritmos genéticos introduzidos por Holland (1975). Esses algoritmos também já foram utilizados para a calibragem de parâmetros de modelos hidrológicos e podemos citar como exemplo os trabalhos de Collischonn (2001), Collischonn e Tucci (2001) e Diniz (1999). No próximo item se descreverá um pouco mais de detalhes sobre esse método.

#### a) Algoritmos Genéticos:

- Algoritmos genéticos (AG) são métodos de otimização por procura direta inspirados nos mecanismos estudados pela genética relativos à evolução de populações de seres vivos e foram introduzidos por John Holland (HOLLAND, 1975 apud CARVALHO E LACERDA, 1999).

Suas características mais gerais se baseiam nos conceitos de população, reprodução e gerações, e no princípio da seleção e sobrevivência dos mais aptos proposto por Charles Darwin, no qual pais mais adaptados têm maior probabilidade de gerar descendentes, os quais são semelhantes, mas não totalmente iguais a seus geradores.

Adotando a nomenclatura utilizada pela genética, o termo *população*, em se tratando de AG, é o conjunto de soluções, ou *indivíduos*, do problema de otimização em foco. Cada *indivíduo*, ou solução particular, é definido pelo conjunto de parâmetros, denominados de *genes*, relativos ao problema (modelo chuva-vazão, regras operacionais de reservatórios). Já a

*aptidão* de cada indivíduo é o valor de uma determinada função objetivo utilizada para avaliar o grau de desempenho de determinado modelo.

O AG, resumidamente, possui as seguintes fases: gera-se aleatoriamente um conjunto de indivíduos que formarão a população; avalia-se cada indivíduo calculando suas aptidões; formam-se complexos (grupos de indivíduos) para a evolução da população, onde os indivíduos de melhor aptidão têm mais chance de participar da reprodução de novos indivíduos.

Quanto à manipulação dos valores dos parâmetros, basicamente os AG se dividem em puros e reais. Os primeiros utilizam a representação binária dos valores dos parâmetros, e as operações para formação de novos indivíduos são o “crossover” e a “mutação”.

Já os AG ditos reais utilizam os valores dos genes de cada indivíduo diretamente para gerar novos indivíduos dentro do espaço de validade de cada um dos seus genes. Essa geração está representada pela seguinte figura:

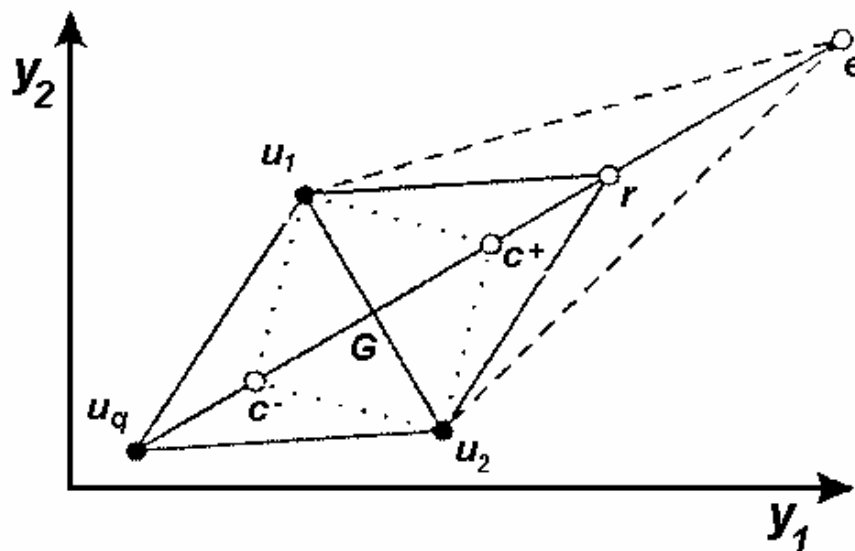


Figura 2.4: Opções de procura para geração de novos indivíduos. (Fonte: Adaptado de Watanabe et alli, 2003)

Na figura 2.4 estão representados, para o caso em que cada indivíduo possui dois genes ( $y_1$  e  $y_2$ ), os seguintes elementos:

1. Reflexão: definida por  $r = 2G - u_q$ , onde  $G$  é o vetor centróide dos indivíduos  $u_1$  e  $u_2$ , e  $u_q$  é o indivíduo de pior aptidão;
2. Expansão: definida por  $e = 3G - 2u_q$ ;
3. Contração positiva: definida por  $c^+ = (3G - u_q)/2$ ;
4. Contração negativa: definida por  $c^- = (G + u_q)/2$ .

Além desses elementos de procura, é definida uma mutação gerada aleatoriamente dentro do espaço de validade dos genes dos indivíduos de cada complexo formado. Nesse caso e na contração negativa, não é testada a validade do novo indivíduo. Além disso, algumas dessas opções de procura podem não ser utilizadas pelo algoritmo adotado. Deve-se comentar que nem todas essas opções de procura precisam ser implementadas no algoritmo.

Os AG podem ser ainda mono-objetivo, quando avaliam apenas uma aptidão, ou multi-objetivo quando avaliam mais de uma aptidão. A seguir, como representante do primeiro grupo, será descrito, resumidamente, o algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) desenvolvido por Duan et al. (1992). Já para o caso de otimização multi-objetivo será descrito o MOCOM-UA (Multi-objective complex evolution) desenvolvido por Sorooshian et al. (1998).

b) Otimização por AG mono-objetivo:

Duan et al. (1992) apresentam um método baseado na combinação de técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização local, denominado SCE-UA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona), o que pode ser traduzido por “Evolução de Complexos Misturados” (DINIZ, 1999).

Esse algoritmo opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função objetivo. Cada um desses pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo.

Durante o procedimento, é gerada uma amostra de pontos espalhados no espaço hiperdimensional, que define a região onde os parâmetros são considerados válidos, ou seja, dentro de um intervalo de valores que vai de um limite mínimo até um limite máximo, definido pelo usuário.

Ao longo do procedimento, a amostra de pontos evolui em conjunto, até que os pontos se concentrem em uma região muito pequena, ou mesmo sobre um ponto do espaço, em que está localizado o ponto ótimo.

Os passos do algoritmo, conforme descritos por Sorooshian e Gupta (1995), são os seguintes:

1º) Início: São selecionados os valores dos parâmetros  $p$  e  $m$ , que definem, respectivamente, o número de complexos (conjuntos nos quais é dividida a amostra de pontos) e o número de pontos em cada complexo. O tamanho da amostra  $s$  é igual ao produto de  $p$  e  $m$ . Sendo  $n$  o número de variáveis do problema de otimização, então os valores de  $p$  e  $m$  devem ser tais que:  $p \geq 1$ , e  $m \geq n + 1$ ;



2º) Geração da amostra: São gerados  $s$  grupos de parâmetros, cada um entre os seus próprios limites máximo e mínimo previamente definidos, formando um conjunto  $D$ . Esses grupos caracterizam pontos no espaço hiperdimensional e são gerados aleatoriamente, utilizando uma distribuição uniforme;

3º) Hierarquização dos pontos: Os *pontos* gerados no passo 2 são avaliados com a função objetivo, cujos valores são utilizados para organizá-los na amostra, em ordem crescente, de maneira que o primeiro ponto apresente o menor (melhor) valor;

4º) Divisão em complexos: A amostra  $D$  de  $s$  pontos é dividida em  $p$  complexos, cada um contendo  $m$  pontos. A divisão é feita de maneira que cada um dos complexos tenha pontos bons (baixos valores da função objetivo) e pontos ruins (altos valores da função objetivo). A divisão em complexos segue a regra  $A^k = \{x_j^k, f_j^k\}$  onde  $x_j^k = x_{k+p(j-1)}$  e  $f_j^k = f_{k+p(j-1)}$ , para  $j = 1, \dots, m$ . Onde  $k$  é o número do complexo, que varia de 1 a  $p$ ;  $j$  é o número do ponto dentro do complexo, que varia de 1 a  $m$ ;  $x$  é o grupo de parâmetros e  $f$  é o valor da função objetivo, sendo que  $x$  e  $f$  estão originalmente organizados em uma amostra de tamanho  $s$ , isto é,  $x_j$  e  $f_j$  ( $j = 1, \dots, s$ );

5º) Evolução dos complexos: Cada complexo é submetido a um processo de evolução independente, na direção de um ótimo da função objetivo. Essa evolução é realizada através da geração de novos pontos através de contração (negativa ou positiva), reflexão, expansão e mutação, onde a escolha dos pontos que serão utilizados como “pais” é aleatória e depende de um valor de probabilidade acumulada, associado a cada ponto, função da classificação de cada ponto no complexo;

6º) Mistura dos complexos: Os complexos  $A^k$  são novamente agrupados no conjunto  $D$ , que contém toda a amostra de  $s$  pontos;

7º) Teste de convergência: Os pontos da amostra são testados para avaliar se é satisfeito um critério de convergência previamente definido. Em caso positivo, o algoritmo se encerra. Caso contrário o procedimento recomeça no quarto passo.

Para ilustrar esses 7 passos tome-se o seguinte exemplo: seja a minimização da função objetivo definida pela equação matemática:

$$FO = x_1^2 + x_2^2 \quad 2.17$$

Os dados iniciais para a geração da amostra são dados na tabela 2.1. Entre esses, a quantidade de indivíduos por complexo e da população são calculados pelo algoritmo. Os demais são informados pelo usuário.

**Tabela 2.1 Dados necessários para geração da população inicial do algoritmo SCE-UA.**

Quantidade de parâmetros	Quantidade de complexos	Quantidade de Inds por complexo	Quantidade de Inds da população	Valores máximo e mínimo do parâmetro $x_1$		Valores máximo e mínimo do parâmetro $x_2$	
2	2	5	10	-1	2	-1	1

De acordo com esses dados são gerados aleatoriamente 10 indivíduos cujas características, após a execução do segundo, terceiro e quarto passos do algoritmo, são resumidas na tabela 2.2.

**Tabela 2.2: Indivíduos gerados aleatoriamente pelo algoritmo e ordenados segundo o valor de suas aptidões e divididos em dois complexos.**

Indivíduo gerado	Número aleatório	Valor do parâmetro $x_1$	Valor do parâmetro $x_2$	Valor da aptidão (FO)	Complexo
7	0,36	0,07	-0,29	0,09	1
5	0,29	-0,13	-0,42	0,20	2
9	0,25	-0,24	-0,50	0,30	1
1	0,19	-0,44	-0,63	0,58	2
2	0,62	0,87	0,24	0,81	1
8	0,12	-0,63	-0,75	0,96	2
3	0,65	0,95	0,30	1,00	1
10	0,02	-0,95	-0,97	1,83	2
4	0,80	1,39	0,60	2,29	1
6	0,89	1,68	0,78	3,43	2

Conforme o quinto passo do algoritmo, para cada indivíduo de cada complexo é calculada uma probabilidade acumulada de escolha para a formação do sub-complexo, ou seja, dos “pais” que formarão novos indivíduos. Essa escolha deve ser realizada de forma aleatória, de acordo com a probabilidade anteriormente calculada, e sem repetição de indivíduos. Um exemplo de formação de sub-complexo, a partir do complexo 1, com a geração de um novo indivíduo é ilustrado na tabela 2.3.

**Tabela 2.3: Formação de um sub-complexo com geração de novos indivíduos.**

Indivíduos escolhidos do complexo	Número do Ind na população	Valor do parâmetro $x_1$	Valor do parâmetro $x_2$	Valor da aptidão (FO)
1	7	0,07	-0,29	0,09
2	9	-0,24	-0,50	0,30
4	3	0,95	0,30	1,00
Indivíduos gerados	Centroide	-0,09	-0,39	
	Reflexão	-1,13	-1,08	Inválido
	Expansão	-2,17	-1,78	Inválido
	Contr posit	-0,61	-0,74	0,91
	Contr negat	0,43	-0,04	0,19
	Mutação	-0,16	-0,44	0,22

Como se percebe por essa tabela, os indivíduos gerados por reflexão e expansão são invalidados, visto que o valor de pelo menos um dos seus parâmetros estar fora do espaço de validade. Nesse exemplo, o indivíduo gerado por contração negativa é aceito e substitui o indivíduo de número 3 na população. Como se verá no capítulo de metodologia, a expansão e a contração positiva podem não ser utilizadas para a geração de novos indivíduos. Os autores do algoritmo SCE-UA indicam ainda que o sub-complexo deve gerar apenas um descendente e que cada complexo deve evoluir  $2n+1$  vezes, sendo  $n$  o número de variáveis (ou parâmetros).

c) *Otimização por AG multi-objetivo:*

O problema de otimização multi-objetivo pode ser expresso como o seguinte problema de otimização:

$$\text{minimize } F(\theta) = \{f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)\} \quad 2.18$$

Onde  $f_1(\theta), \dots, f_m(\theta)$  são as  $m$  funções objetivo não comensuráveis a serem minimizadas simultaneamente com respeito aos parâmetros  $\theta$  do modelo.

A característica extrema desse problema é que a solução não será, em geral, única. É comum haver muitas soluções com a propriedade na qual o deslocamento de uma solução para outra resulta na melhora do valor de uma função objetivo e, simultaneamente, na deterioração do valor de, pelo menos, uma outra. Tais soluções são chamadas de Pareto, Não dominadas, Não inferiores, ou Soluções eficientes.

Por definição, qualquer membro  $\theta_p$  do conjunto de Pareto tem as seguintes propriedades:

1.  $F(\theta_p)$  é estritamente menor que  $F(\theta_d)$  para todos os membros  $\theta_d$  não contidos no conjunto de Pareto, isto é  $\{f_i(\theta_p) < f_i(\theta_d), \text{ para } i = 1, \dots, m\}$ ;
2. Não é possível achar um  $\theta_p^*$  dentro do conjunto de Pareto, tal que  $F(\theta_p^*)$  é estritamente menor que  $F(\theta_p)$ .

O item 1 estabelece que o espaço de soluções pode ser dividido em “boas” soluções e “piores” soluções. O item 2 diz que, na falta de informação adicional, não é possível distinguir nenhuma das “boas” soluções como sendo objetivamente melhor que qualquer das outras “boas” soluções. (não existe uma única “melhor” solução).

SOROOSHIAN et. alli. (1998) apresentam o método de otimização global de evolução de complexos multi-objetivo denominado de MOCOM-UA (Multi-objective complex evolution). Esse método combina as forças da procura aleatória controlada, com a evolução competitiva, Ranking de Pareto, e uma estratégia de “downhill simplex search” multi-objetivo. O procedimento de classificação de Pareto segue os seguintes passos:

- 1º) Tomam-se os  $s$  pontos da amostra e identificam-se aqueles que são dominados por pelo menos um ponto, e os que são não-dominados;
- 2º) Aos pontos que são não-dominados atribui-se o índice 1;
- 3º) Os pontos com o índice 1 são retirados e os pontos restantes são novamente analisados;
- 4º) Aos pontos que são não dominados nessa segunda análise, atribui-se o índice 2;
- 5º) Os pontos com o índice 2 também são retirados e os pontos restantes são analisados;
- 6º) Os passos se repetem até que se encontre um grupo de pontos em que não podem ser definidos dominados e não-dominados. Esses pontos recebem o índice  $R_{\max}$ , onde  $R_{\max}$  é o número de passos necessários para não existir mais dominância entre os pontos.

A estratégia de todo o algoritmo se inicia com uma amostra de  $s$  pontos distribuídos aleatoriamente por todo o espaço válido de dimensão  $n$ , dos parâmetros  $U^0(\theta)$ , que representa a incerteza inicial dos parâmetros. Na falta de informação prévia sobre a localização do ótimo de Pareto, uma distribuição uniforme é utilizada. Para cada ponto, o vetor multi-objetivo  $F(\theta)$  é computado, e a população é classificada usando o procedimento de classificação de Pareto, sugerido por GOLDBERG (1989). “Simplexes” (sub-complexos) de  $n + 1$  pontos são

então selecionados da amostra de acordo com um método de seleção aleatória, baseado na classificação de Pareto. Cada simplex (sub-complexo) é desenvolvido (submetido à evolução) numa direção de melhora, usando uma extensão multi-objetivo da estratégia de procura “downhill simplex”. O processo de evolução produz novos pontos, a cada nova geração, que são, em média, melhores que os pontos originais. A aplicação iterativa dos procedimentos de classificação e evolução leva a população a convergir em direção ao conjunto de Pareto. O procedimento termina automaticamente quando todos os pontos na amostra se tornam mutuamente não-dominados.

Para ilustrar os passos do algoritmo de otimização multi-objetivo, tome-se o seguinte exemplo: seja o objetivo a obtenção de um conjunto de soluções ditas não-dominadas para duas aptidões definidas pelas equações matemáticas:

$$FO_1 = x_1^2 + x_2^2$$

$$FO_2 = (x_1 - 1)^2 + x_2^2$$
2.19

Os dados iniciais para a geração da amostra são informados pelo usuário e reproduzidos na tabela 2.4.

**Tabela 2.4: Dados necessários para geração da população inicial do algoritmo MOCOM-UA.**

Quantidade de parâmetros	Quantidade de Inds da população	Valores máximo e mínimo do parâmetro $x_1$		Valores máximo e mínimo do parâmetro $x_2$	
2	10	-1	2	-1	1

Uma vez gerada a população inicial de maneira aleatória, a mesma deve ser classificada segundo o ranqueamento de Pareto. Essa situação é ilustrada na tabela 2.5.

**Tabela 2.5: Indivíduos gerados aleatoriamente pelo algoritmo e ordenados segundo o Ranking de Pareto.**

Indivíduo gerado	Número aleatório	Valor do parâmetro $x_1$	Valor do parâmetro $x_2$	Valor da aptidão 1 ( $FO_1$ )	Valor da aptidão 2 ( $FO_2$ )	Ranking de Pareto	Prob de escolha de cada Ind	Prob acumulada de cada Ind
4	0,36	0,09	-0,28	0,08	0,91	1	0,15	0,15
9	0,64	0,91	0,28	0,91	0,08	1	0,15	0,29
10	0,59	0,77	0,18	0,63	0,08	1	0,15	0,44
1	0,34	0,01	-0,33	0,11	1,08	2	0,12	0,56
8	0,75	1,25	0,50	1,80	0,31	2	0,12	0,68
2	0,26	-0,21	-0,47	0,26	1,68	3	0,09	0,76
6	0,87	1,61	0,74	3,16	0,93	3	0,09	0,85
5	0,13	-0,61	-0,74	0,91	3,13	4	0,06	0,91
7	0,96	1,88	0,92	4,36	1,61	4	0,06	0,97
3	1,00	1,99	1,00	4,97	1,98	5	0,03	1,00

Ainda segundo essa mesma tabela, a probabilidade de escolha de cada indivíduo deve ser calculada, assim como a probabilidade acumulada. A primeira depende diretamente do ranking de Pareto e a segunda servirá para a escolha aleatória de  $n + 1$  indivíduos necessários a formação de cada simplex. No presente exemplo, apenas um simplex será formado, uma vez que apenas o indivíduo 3 da população possui o valor de classificação máximo  $R_{\max} = 5$ .

A formação do simplex com a geração de novos indivíduos é ilustrada na tabela 2.6.

**Tabela 2.6: Formação aleatória do simplex após a classificação de Pareto e geração de novo indivíduo.**

Indivíduos escolhidos da população	Número aleatório	Valor do parâmetro $x_1$	Valor do parâmetro $x_2$	Valor da aptidão 1 (FO <sub>1</sub> )	Valor da aptidão 2 (FO <sub>2</sub> )	Ranking de Pareto
3	0,998	1,99	1,00	4,97	1,98	5
9	0,638	0,91	0,28	0,91	0,96	1
10	0,591	0,77	0,18	0,63	0,77	1
Inds gerados	Centroide	0,84	0,23			Validação
	Reflexao	-0,31	-0,54	0,38	2,00	S
	Contr neg	1,42	0,61	2,39	0,55	S

Neste caso, a validade do individuo gerado por reflexão é confirmada. Como o mesmo é não-dominado em relação aos demais indivíduos do simplex, este é inserido na população no lugar do indivíduo 3.

d) *Vantagens e desvantagens da Otimização de Sistemas de Recursos Hídricos por Procura Direta:*

De acordo com Collischonn e Tucci (2001), as limitações dos métodos de otimização por procura direta estão relacionadas aos seguintes fatos: a função objetivo nem sempre retrata bem o comportamento esperado das funções que se deseja otimizar; a solução pode convergir para parâmetros inconsistentes; o valor mínimo da função objetivo pode ser local e não global; quando o número de parâmetros cresce muito, o processo iterativo pode ser lento; quando existem muitas incertezas nos dados observados, as mesmas são transferidas para o ajuste; e finalmente os parâmetros podem ser interdependentes.

Por outro lado, os mesmos apresentam as seguintes vantagens: não requer conhecimento da forma do sistema que se procura otimizar; uma solução aproximada pode ser verificada em qualquer tempo durante o desenrolar dos cálculos; permite uma solução objetiva e lógica para o conjunto dos parâmetros; em um tempo relativamente curto, pode-se obter resultados satisfatórios; adapta-se bem ao uso de computadores digitais; e finalmente não necessitam das derivadas das funções.

Já a utilização dos algoritmos genéticos, por se tratar de um método de procura direta com a agregação de um determinado grau de aleatoriedade, agrega as vantagens listadas acima e superam algumas das desvantagens anteriormente listadas, apresentando, por exemplo, propriedades de convergência global e robustez em identificar susceptibilidade e interdependência dos parâmetros a serem otimizados. (WATANABE et. alli., 2003).

## 2.7 Avaliação do desempenho de um Sistema de Recursos Hídricos

A avaliação de desempenho da operação de sistemas de recursos hídricos se dá, geralmente, através da verificação do número de falhas no atendimento às demandas previstas. Porém apenas esse critério pode não descrever claramente essa avaliação.

Para tentar cobrir outras características da avaliação do desempenho de um sistema de recursos hídricos, Hashimoto et alli. (1982) discutem três critérios: a *confiabilidade* ( $\alpha$ ) do sistema, a *elasticidade* ( $\psi$ ) e a *vulnerabilidade* ( $\nu$ ).

### 2.7.1 Confiabilidade

O índice de confiabilidade ( $\eta$ ) é definido como a probabilidade de um funcionamento sem falha, ou seja, com êxito no atendimento às demandas previstas do sistema, durante todo o intervalo de tempo de interesse. No caso do sistema de reservatórios, a confiabilidade é função da demanda, dos afluxos ao sistema, das capacidades dos diversos reservatórios do sistema e das políticas de operação.

Logo:

$$\eta = \text{Pr ob}(x \in S) \quad 2.20$$

Portanto, matematicamente tem-se:

$$Z_t = \begin{cases} 1, & \text{se } x_t \in S \\ 0, & \text{se } x_t \in F \end{cases} \quad 2.21$$

Finalmente:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_t \quad 2.22$$

Onde:

- $x$  • É a demanda atendida;
- $S$  • Representa os estados satisfatórios do sistema;
- $F$  • Representa os estados insatisfatórios do sistema, ou seja, quando a demanda atendida foi menor que a prevista;
- $N$  • É o tamanho da amostra, ou seja, é o período de simulação.

## 2.7.2 Elasticidade

Também conhecido como *resiliência*, o índice de elasticidade ( $\varphi$ ) avalia o quão rapidamente o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento à demanda, uma vez que a falha tenha ocorrido. Se o sistema, em estado de falha, tender a permanecer num estado insatisfatório por muito tempo, essa tendência pode ter sérias implicações sobre o sistema. Um sistema que tenha muitas falhas, mas que tende a se recuperar rapidamente, é, em alguns casos, preferível a um sistema com poucas falhas, mas em que as mesmas se recuperem lentamente.

A elasticidade é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório.

Se  $w_t$  é o indicador da transição de um estado de êxito a outro de falha, esse índice pode ser definido como:

$$w_t = \begin{cases} 1, & \text{se } x_t \in S \text{ e } x_{t+1} \in F \\ 0, & \text{de qualquer outro jeito} \end{cases} \quad 2.23$$

A longo prazo, o valor prometido de  $w_t$  é igual à probabilidade  $P$  de que o sistema esteja em um período satisfatório  $S$  e passe para um período insatisfatório  $F$  no próximo intervalo de tempo. Então:

$$P = \text{Prob}(x_t \in S, x_{t+1} \in F) \quad 2.24$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t \quad 2.25$$



O tempo médio de permanência em  $F$  durante uma simulação de  $N$  períodos,  $TF$ , é calculado com o tempo total em falha dividido pelo número de vezes que tenha havido o estado  $F$ . Ou seja:

$$TF = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (1 - z_t)}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N w_t} \quad 2.26$$

Se  $N$  se aproxima do infinito, o valor de  $TF$  é a extensão esperada de tempo para que o comportamento do sistema permaneça em um estado insatisfatório, uma vez que tenha ficado insatisfatório. O valor esperado de  $TF$  é dado como:

$$E[TF] = \frac{1 - \eta}{P} \quad 2.27$$

Desde que a elasticidade é dada pelo inverso do valor esperado de  $TF$ , tem-se:

$$\varphi = \frac{P}{1 - \eta} = \frac{\text{Prob}(x_t \in S \text{ e } x_{t+1} \in F)}{\text{Prob}(x_t \in F)} \quad 2.28$$

A longo prazo, o número de transições de êxito a falha deve ser igual ao número de transições de falha a êxito:

$$\text{Prob}(x_t \in S \text{ e } x_{t+1} \in F) = \text{Prob}(x_t \in F \text{ e } x_{t+1} \in S) \quad 2.29$$

Logo, a elasticidade é equivalente à média da probabilidade de recuperação de um conjunto de falhas de um período de tempo único:

$$\varphi = \frac{\text{Prob}(x_t \in F; x_{t+1} \in S)}{\text{Prob}(x_t \in F)} \quad 2.30$$

$$\varphi = \text{Prob}(x_{t+1} \in S / x_t \in F) \quad 2.31$$

HASHIMOTO et all. (1982) comentam que se  $x_{t+1} \in S$  e  $x_t \in F$  são eventos probabilisticamente independentes, a elasticidade pode reduzir-se a medida da confiança:

$$\varphi = \Pr ob(x_{t+1} \in S) \quad 2.32$$

### 2.7.3 Vulnerabilidade

O índice de vulnerabilidade ( $\gamma$ ) mede a importância da severidade das conseqüências das falhas do sistema, ou seja, se refere à magnitude da falha, se esta ocorre.

Para expressar a vulnerabilidade matematicamente, considera-se  $X_t$  a variável que representa o comportamento do sistema, que por sua vez pode tomar valores discretos de  $x_1$  até  $x_N$ . Para construir um indicador quantitativo da vulnerabilidade do sistema, para falhas severas que ocorram, se associa a cada estado de falha discreta um indicador numérico da severidade do estado  $S_j$ , sendo  $E_j$  a probabilidade de que  $x_j$  corresponde a  $S_j$  seja a mais insatisfatória falha que ocorra na permanência do conjunto num estado insatisfatório  $F$ .

A vulnerabilidade pode ser descrita como:

$$\gamma = \sum_{j \in F} S_j \times E_j \quad 2.33$$

Existem várias medidas razoáveis para que toda a vulnerabilidade do sistema possa ser expressa em função da severidade máxima de permanência. Por exemplo: tomar todas as permanências em  $F$  e identificar como  $S_j$  seus piores valores. A vulnerabilidade seria dada como:

$$\gamma = \sum_{j=1}^{NPF} S_j \times E_j \quad 2.34$$

Onde:

- $E_j$  • É definido como o número de falhas em cada intervalo contínuo;
- $S_j$  • É o valor do maior déficit de atendimento à demanda em cada um desses intervalos, dividido pelo número de falhas;

- $NPF$  • É o número de períodos de falhas contínuas (uma falha isolada também é considerada como intervalo contínuo).

Amisial e Barrios (1986) comentam que esses índices possuem comportamento propício à análise multi-objetivo, uma vez que a melhora de um dos índices deve provocar uma piora nos demais. Mesmo para um determinado valor fixo de um deles, os demais podem assumir valores diferentes. Essa situação é retratada na figura 3.9 abaixo. Ao analisar o exemplo representado na figura, deve-se ter em mente que as melhores situações, sob o ponto de vista de cada um dos índices analisados separadamente, correspondem a uma maior confiabilidade, ou a uma maior elasticidade, ou ainda a uma menor vulnerabilidade.

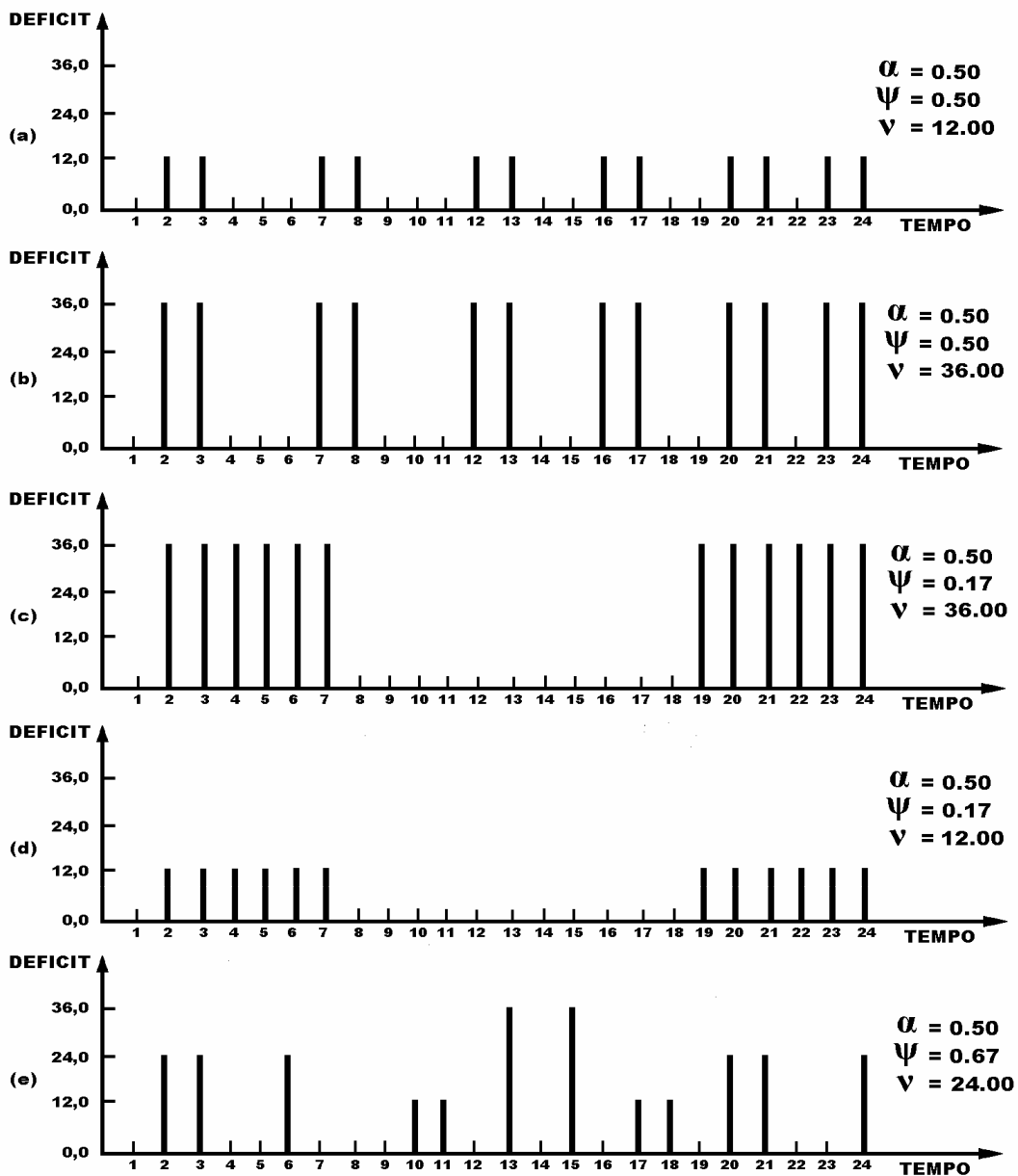


Figura 2.5: Comportamento dos índices de desempenho. (fonte: adaptado de Amisial e Barrios, 1986).

Nessa figura percebe-se que, para um mesmo valor da confiabilidade, nas letras de (a) a (e), os valores dos outros índices podem ser completamente diferentes, com a vulnerabilidade sendo pior na situação (e) e a elasticidade sendo pior em (a). Nas figuras (a) e (b), para mesmos valores de confiabilidade e elasticidade, a vulnerabilidade é o dobro em (b). Já para o caso das letras (b) e (c), para valores iguais de confiabilidade e vulnerabilidade, a elasticidade é melhor em (b). Comparando (c) e (d), a vulnerabilidade é menor em (d). E finalmente, para uma mesma confiabilidade a situação em (e) é a melhor do ponto de vista da elasticidade, mas não do ponto de vista da vulnerabilidade.

Dessa forma, esses índices se tornam propícios para a otimização e análise mono-objetivo por serem grandezas que representam objetivos distintos, e para a análise multi-objetivo por serem objetivos conflitantes.

Em Vianna Jr. (1998), encontra-se uma aplicação desses índices, os quais foram utilizados para compor funções objetivo utilizadas na otimização, por procura direta, e na avaliação, da operação de um sistema de reservatórios. Já Viegas (2000) utiliza esses mesmos índices como exemplo de uso de um SAD orientado a objetos, no projeto de novas classes.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia a ser aplicada se caracteriza por possuir duas fases distintas. Na primeira delas se utiliza a Modelagem Orientada a Objetos para a implementação de ferramentas de otimização num SAD aplicado a recursos hídricos. Já na segunda fase se define a metodologia adotada para a utilização dessas ferramentas de otimização no intuito de estabelecer regras ótimas de operação de um sistema de reservatórios. Assim sendo, tem-se as seguintes fases:

#### **A. Fase 1: Implementação de ferramentas de otimização num SAD aplicado a recursos hídricos.**

Para se efetuar a implementação das ferramentas de otimização se optou pela adoção da Modelagem Orientada a Objetos, na qual, para cada um dos algoritmos escolhidos, foram identificados seus objetos característicos e os processos necessários para o funcionamento dos mesmos. As ferramentas de otimização implementadas foram as seguintes:

1. Algoritmo Genético Mono-Objetivo;
2. Algoritmo Genético Multi-Objetivo;
3. Editor de Modelos de Programação Linear;
4. Conversor de modelos literais de PL para o formato MPS.

Essa fase está detalhada no item 3.2 a seguir.

#### **B. Fase 2: Utilização das ferramentas de otimização para estabelecer regras ótimas de operação de um sistema de reservatórios da bacia do rio Curu.**

Para definir a operação ótima do sistema de múltiplos reservatórios, com múltiplos propósitos da bacia do rio Curu, adotou-se uma abordagem implicitamente estocástica, com os seguintes passos:

1. Adoção de uma regra de operação específica, com parâmetros a serem ajustados, através da otimização por procura direta;
2. Uso de registros históricos de vazão para calibração dos parâmetros, obtendo-se a regra operacional ótima;
3. Montagem e resolução de um modelo de programação linear, com objetivo explícito de determinar as descargas mensais dos reservatórios e atender às demandas planejadas levando em conta as suas prioridades;
4. Abstração de regras operacionais da solução obtida pelo modelo de PL;

5. Simulação das regras operacionais obtidas por procura direta e através do modelo de PL, para comparar o desempenho das metodologias.

No primeiro passo, foram adotados três tipos de regras operacionais: regra padrão de decisão, regra padrão de decisão modificada e regra da curva guia.

No segundo passo, utilizou-se o PROPARMOO executando um processo de simulação controlado por duas técnicas de busca, que iterativamente aperfeiçoam os parâmetros das regras operacionais, para cada objetivo adotado.

No terceiro passo, utiliza-se o editor de modelos de PL, implementado no PROPARMOO, para a montagem de um modelo de PL.

No quarto passo, uma vez tendo sido executado o modelo de PL, os valores das variáveis de decisão são organizados de maneira que sejam abstraídas regras operacionais para o sistema de reservatórios.

Finalmente as regras operacionais são simuladas de maneira a, através de critérios de avaliação do desempenho do sistema, comparar as duas metodologias de obtenção de regras operacionais para os reservatórios.

Para o que se denominou anteriormente de fase 2, os itens da metodologia a seguir estão assim relacionados: os itens 3.3 a 3.6 estão relacionados diretamente aos passos 1 e 2; o item 3.7 está relacionado diretamente ao passo 3; o item 3.8 está relacionado diretamente ao passo 4.

### **3.1 PROPAGARMOO**

O programa PROPAGARMOO simula a propagação de vazões em uma bacia submetida a decisões operacionais, relacionadas ao suprimento de demandas hídricas e descarga de reservatórios.

Esse modelo de propagação é o resultado do esforço dos professores Antônio Eduardo Leão Lanna (UFRGS) e João Soares Viegas F<sup>o</sup> (UFPEL) que, a partir da versão anterior desenvolvido em linguagem FORTRAN, na plataforma DOS, o desenvolveram segundo o paradigma da Modelagem Orientada a Objetos, utilizando-se a Linguagem Borland Object Pascal e o ambiente de programação Delphi.

No PROPAGARMOO, a bacia em estudo é discretizada em sub-bacias, unidas por trechos fluviais, nas extremidades dos quais são definidos os pontos característicos (PC's). Esses PC's representam, de forma segmentada, a rede de drenagem da bacia inteira. Para a montagem dessa rede de drenagem, está disponível uma interface com editor gráfico onde,

através de uma área de projeto e de uma barra de ferramentas hidrológicas, são introduzidos os PC's (que podem possuir reservatórios ou não), os trechos de rio que unem os PC's, as sub-bacias responsáveis pela afluência hídrica e as demandas hídricas.

Na perspectiva da MOO, todos os elementos supracitados, constituintes de uma rede de drenagem, são tratados como objetos, dotados de atributos e de métodos a ele aplicáveis.

A escolha da quantidade de PC's é feita de tal forma que cada um represente a saída d'água de um reservatório ou um ponto de demanda significativa, ou ainda represente o somatório de um conjunto de demandas (Normalmente cada PC representa um único ponto de demanda, porém nos casos em que existem muitos pontos de demanda de menor magnitude, opta-se por representar um conjunto delas por um único ponto).

Assim cada um dos PC's que pode estar, ou não, submetido ao controle de reservatório, recebe uma afluência hídrica das bacias incrementais, resultante do processo de transformação de chuva em vazão e de afluências hídricas concentradas, originadas dos PC's à montante.

Para cada PC é estabelecida uma classificação hierárquica, (PC's de jusante tem maior hierarquia) que sistematiza a propagação de vazões em toda a bacia, em cada intervalo de simulação. Ao se fazer a propagação em um PC de ordem hierárquica superior, as afluências, vindas de PC's de montante (de menor hierarquia), já foram calculadas. A figura 3.1 apresenta a localização dos PC's definida para a bacia do rio Curu.

As demandas a serem atendidas em cada PC são divididas em três ordens de prioridades distintas: demandas primárias, secundárias e terciárias, estabelecendo-se, entre as mesmas, uma relação de preferência ao seu atendimento.

Os intervalos de tempo para a simulação são o cinquentidial (5 dias), decendial (10 dias), quinzenal e mensal. O programa supõe que as vazões afluentes no PC mais à montante da bacia hidrográfica possam atingir o trecho mais à jusante no mesmo intervalo de tempo de simulação, ou seja, não é incorporado o tempo de passagem da água nem o amortecimento. Neste trabalho utilizou-se apenas o intervalo mensal.

As decisões operacionais são introduzidas numa rotina definida pelo usuário e é composta de uma série de operações e comandos utilizando a linguagem denominada Pascal Script. Nessa rotina é efetuado o planejamento estratégico, quando são estabelecidas as políticas operacionais para todos os PC's. Numa segunda fase, de operação tática, e durante a simulação executada sem a interferência do usuário, é verificado se as decisões estratégicas podem ser implementadas.

A linguagem Pascal Script, supracitada, foi construída e integrada ao PROPAGARMOO por ocasião da tese de doutorado de Viegas F<sup>o</sup> (2000), a partir de um

trabalho acadêmico desenvolvido por Conceição (2000), que desenvolveu um compilador baseado na linguagem Pascal.

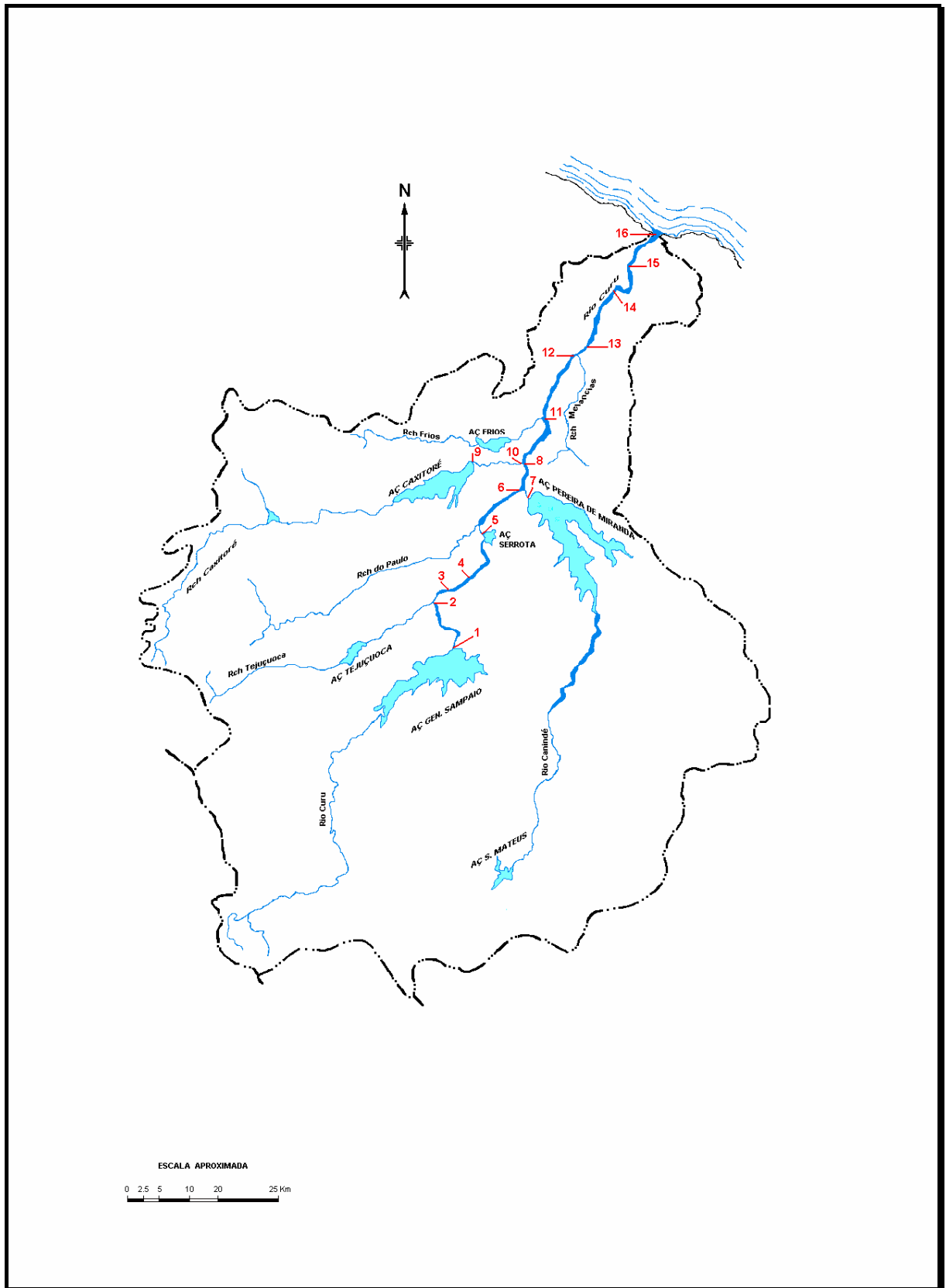


Figura 3.1: Localização adotada para os PC's da bacia do rio Curu.



Para se fazer uso da linguagem Pascal Script na programação das rotinas definidas pelo usuário, o PROPAGARMOO disponibiliza um editor denominado Editor de Pascal Script (Conceição, 2000), que é ativado a partir de menu ou de ícone localizado numa janela de definição das rotinas do usuário. O ambiente de desenvolvimento do editor tem o aspecto apresentado na figura 3.2.

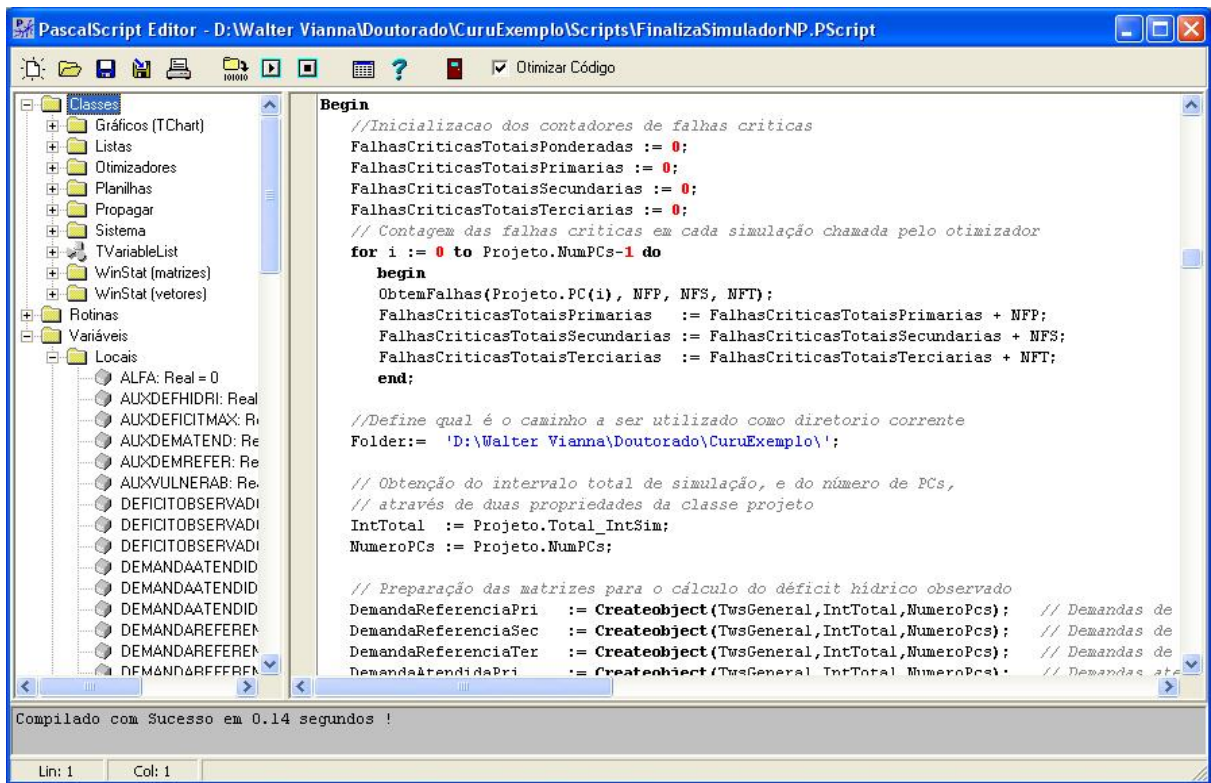


Figura 3.2: Ambiente de programação do editor de Pascal Script.

Conforme se pode verificar na mesma figura, o editor possui, na lateral esquerda, uma área que relaciona todas as classes de objetos, métodos de classes e rotinas de uso geral que estão disponíveis para o usuário através das bibliotecas associadas ao compilador (TRÖGER, 2002). Já na lateral direita, o editor possui uma área de edição, onde o usuário desenvolve o código com as tarefas que deseja para a rotina que estiver programando. O editor disponibiliza ainda um compilador interno que, ao ser acionado, informa ao usuário se está tudo correto, ou as inconsistências que devem ser corrigidas.

O Pascal Script permite a introdução de comentários no código (iniciando-os por barras duplas, ou limitando-os entre chaves) e possibilita a declaração de 5 (cinco) tipos de variáveis (Integer, Real, Boolean, String e Object).

Neste trabalho não serão apresentados os scripts montados para o controle do processo de otimização e/ou simulação, pois o autor considera que a sua transcrição nos itens da metodologia aplicada não é necessária para um melhor entendimento da mesma. Porém todos

os scripts utilizados estarão disponíveis nos anexos do presente trabalho e detalhes mais precisos sobre os fundamentos básicos da linguagem Pascal Script podem, e devem, ser procurados nos trabalhos de Viegas F<sup>o</sup> (2000) e Tröger (2002). Assim sendo, nos demais itens relativos à metodologia, o autor recomenda aos leitores que, se necessário, busquem nos anexos as scripts que mostram como cada rotina foi implementada no PROPAGARMOO.

## **3.2 Bibliotecas de classe agregadas ao PROPAGARMOO**

Com o objetivo de instrumentalizar o PROPAGARMOO com métodos de otimização, foram escolhidos e estudados os métodos de Algoritmo Genético Mono-Objetivo e de Algoritmo Genético Multi-Objetivo. Além disso, se optou por instrumentalizar o PROPAGARMOO com um editor de modelos de programação linear, que possibilitasse a leitura das informações necessárias diretamente dos objetos já definidos na área de projeto, onde o usuário do sistema tenha realizado a montagem da rede de drenagem que representa a bacia em estudo.

Os passos que levaram à implementação dos algoritmos, através da modelagem orientada a objetos, são detalhados nos itens a seguir.

### **3.2.1 Otimização por AG Mono-objetivo**

O algoritmo genético mono-objetivo escolhido, para ser implementado segundo a MOO, foi o SCE-UA, já descrito no capítulo de revisão bibliográfica. Assim, o primeiro passo da metodologia foi a identificação das principais variáveis de entrada que serão necessárias, identificando as mesmas como atributos da classe e os métodos que devem ser implementados em cada classe.

Nesse algoritmo deve ser efetuada a definição dos parâmetros que serão utilizados no processo de otimização. Uma vez definido cada um deles, é necessário definir também seus valores máximos e mínimos, ou seja, o espaço viável para os mesmos. Na linguagem do algoritmo genético, cada parâmetro é denominado de gen, e o conjunto de genes, define um indivíduo. Já o conjunto de indivíduos define a população (o conjunto de soluções a serem utilizadas para o processo de otimização).

Assim sendo, foram identificados os fluxogramas principais que compõem o algoritmo e estes estão representados nas figuras a seguir. O primeiro deles representa o aspecto geral do algoritmo SCE-UA (DUAN el alli, 1992) e está reproduzido na figura 3.3.

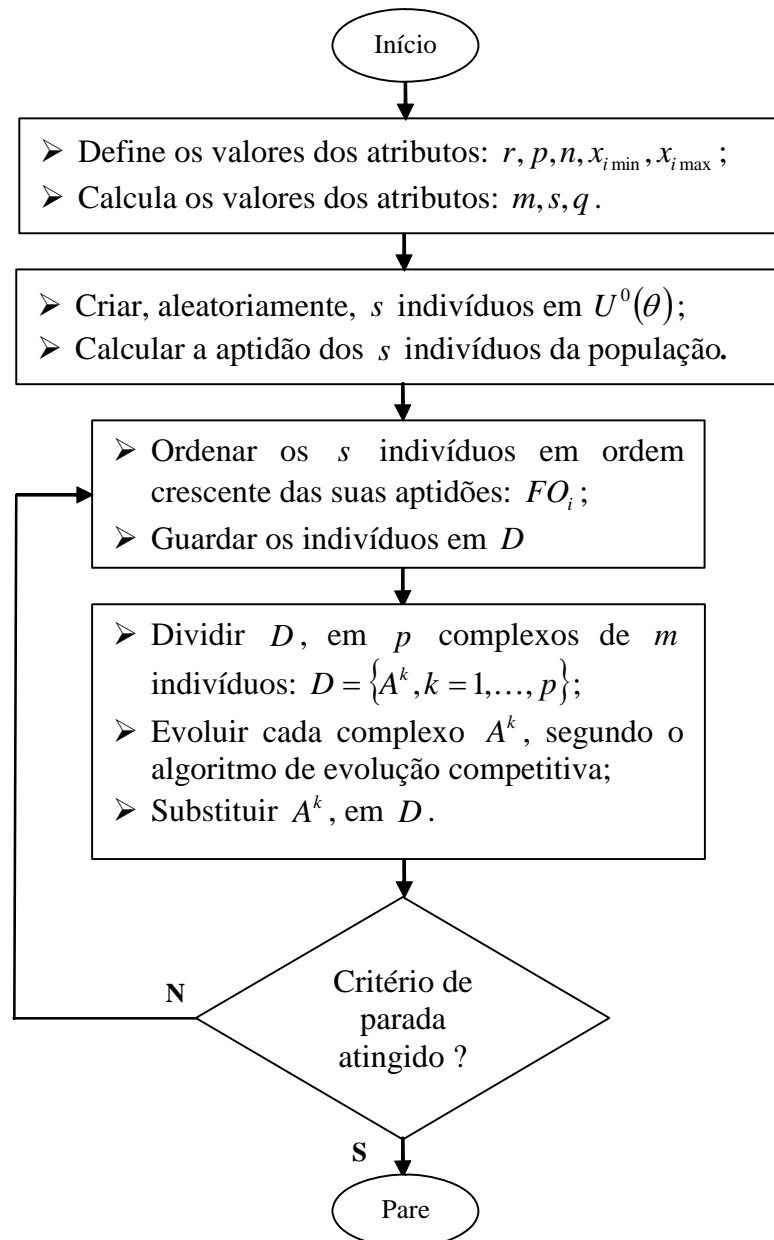


Figura 3.3: Fluxograma do algoritmo SCE-UA (Duan et al., 1992).

Nesse diagrama tem-se que:

- $r$  • Critério de parada do algoritmo: número de evoluções da população;
- $p$  • Número de complexos em que vai ser dividida a população;
- $n$  • É o número de gens de cada indivíduo, ou seja, o número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções (no caso do presente trabalho, número de parâmetros de cada regra operacional);
- $x_{i\min}$  • É o valor mínimo do gen  $i$ , com  $i = 1 \dots n$ ;
- $x_{i\max}$  • É o valor máximo do gen  $i$ , com  $i = 1 \dots n$ ;
- $m$  • É o número de indivíduos que compõem cada complexo, definido através da relação:  $m = 2n + 1$ . Cada indivíduo é definido por  $n$  genes, cujos valores são definidos através de  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$  e de um número aleatório gerado pelo sistema;

- $s$  • É o número de indivíduos da população, ou seja, o número de pontos que serão utilizados para a otimização mono-objetivo:  $s = p \times m$ ;
- $q$  • Número de indivíduos que comporão cada subcomplexo (pais), definido através da relação:  $q = n + 1$ ;
- $U^0(\theta)$  • É o espaço de validade dos gens de cada indivíduo da população, definido pelos valores mínimo e máximo de cada gen;
- $FO_i$  • Valor da aptidão (função objetivo) de cada um dos indivíduos  $i$  da população, com  $i = 1, \dots, s$ ;
- $D$  • É a localização de cada indivíduo na população;
- $A^k$  • Complexos nos quais será dividida a população, com  $k = 1, \dots, p$ ;

Em seguida se reproduz o algoritmo de evolução de cada complexo, nos quais serão divididos os indivíduos que formam a população. Esse algoritmo está representado na figura 3.4 a seguir.

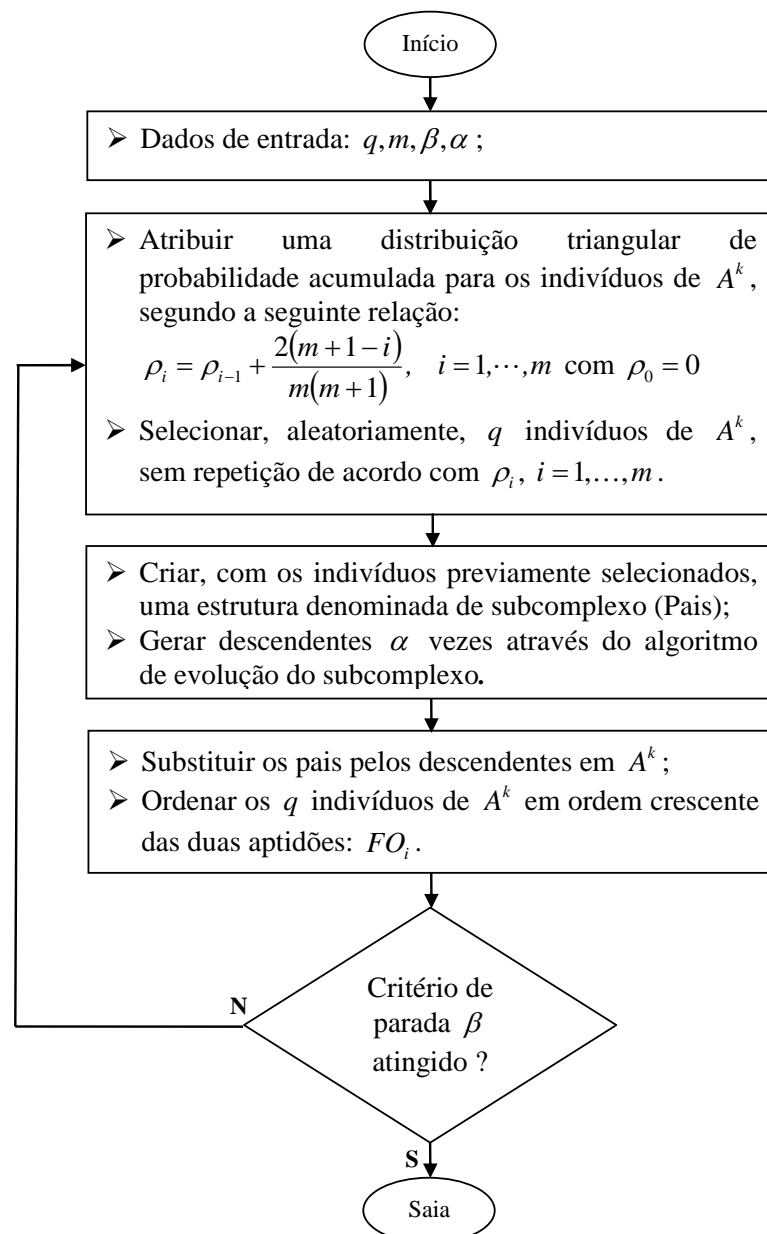


Figura 3.4: Fluxograma do algoritmo de evolução dos complexos. (Duan et al., 1992).

Nesse diagrama tem-se que:

- $q$  • Número de indivíduos que farão parte de cada subcomplexo;
- $m$  • É o número de indivíduos que comporão cada complexo, definido através da relação:  $m = 2n + 1$ . Cada indivíduo é definido por  $n$  genes, cujos valores são definidos através de  $x_{i_{\min}}$ ,  $x_{i_{\max}}$  e de um número aleatório gerado pelo sistema;
- $\beta$  • Número de vezes que cada complexo vai evoluir. Seu valor tem como indicação dos autores do algoritmo a relação:  $\beta = 2n + 1$ ;
- $\alpha$  • Número de vezes que cada subcomplexo vai evoluir: Esse atributo define quantos “filhos” cada conjunto de “pais” vai gerar. No presente trabalho se optou por adotar o valor de  $\alpha = 1$ , sugerido pelos autores do algoritmo SCE-UA (DUAN, SOROOSHIAN e GUPTA, 1992);
- $A^k$  • Complexo que estiver sendo evoluído;
- $\rho_i$  • Valores das probabilidades de escolha de cada indivíduo, dentro do complexo, para compor cada subcomplexo (pais);
- $FO_i$  • Aptidão (ou valor da função objetivo) de cada indivíduo do complexo em evolução;

O próximo fluxograma representa o processo de evolução de cada subcomplexo, e está representado pela figura 3.5, e para o mesmo tem-se a seguinte notação:

- $q$  • Número de indivíduos que farão parte de cada subcomplexo;
- $n$  • É o número de gens de cada indivíduo, ou seja, o número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções (no caso do presente trabalho número de parâmetros de cada regra operacional);
- $A^k$  • Complexo que estiver sendo evoluído;
- $Ind_i$  • Cada indivíduo, escolhido dentro do complexo  $A^k$ , para compor cada subcomplexo (pais). O mesmo é caracterizado por um ponto de dimensão  $n$ ;
- $Ind_{cen}$  • Indivíduo denominado de centróide. O valor de cada um de seus gens é a média entre os gens dos indivíduos que fazem parte do subcomplexo, excetuando-se o  $Ind_{pior}$ ;
- $Ind_{pior}$  • Indivíduo que tem o maior (pior) valor de aptidão dentro do subcomplexo.
- $Ind_{ref}$  • Indivíduo obtido por reflexão do  $Ind_{pior}$ , em relação ao  $Ind_{cen}$ . Salienta-se novamente que cada indivíduo é caracterizado matematicamente por um vetor de dimensão  $n$ ;
- $U^0(\theta)$  • É o espaço de validade dos gens de cada indivíduo da população, definido pelos valores mínimo e máximo de cada gen;
- $FO_{ref}$  • Aptidão (ou valor da função objetivo) do  $Ind_{ref}$ ;
- $FO_{pior}$  • Aptidão do  $Ind_{pior}$ ;
- $Ind_{con}$  • Indivíduo obtido por contração do  $Ind_{pior}$ , em relação ao  $Ind_{cen}$ ;
- $FO_{con}$  • Aptidão do  $Ind_{con}$ ;
- $H$  • Menor hipercubo de dimensão  $n$  no qual o complexo  $A^k$  esteja contido;

- $Ind_{mut}$  • Indivíduo obtido por mutação dentro do hiper-cubo  $H$  ;
- $FO_{mut}$  • Aptidão do  $Ind_{mut}$  .

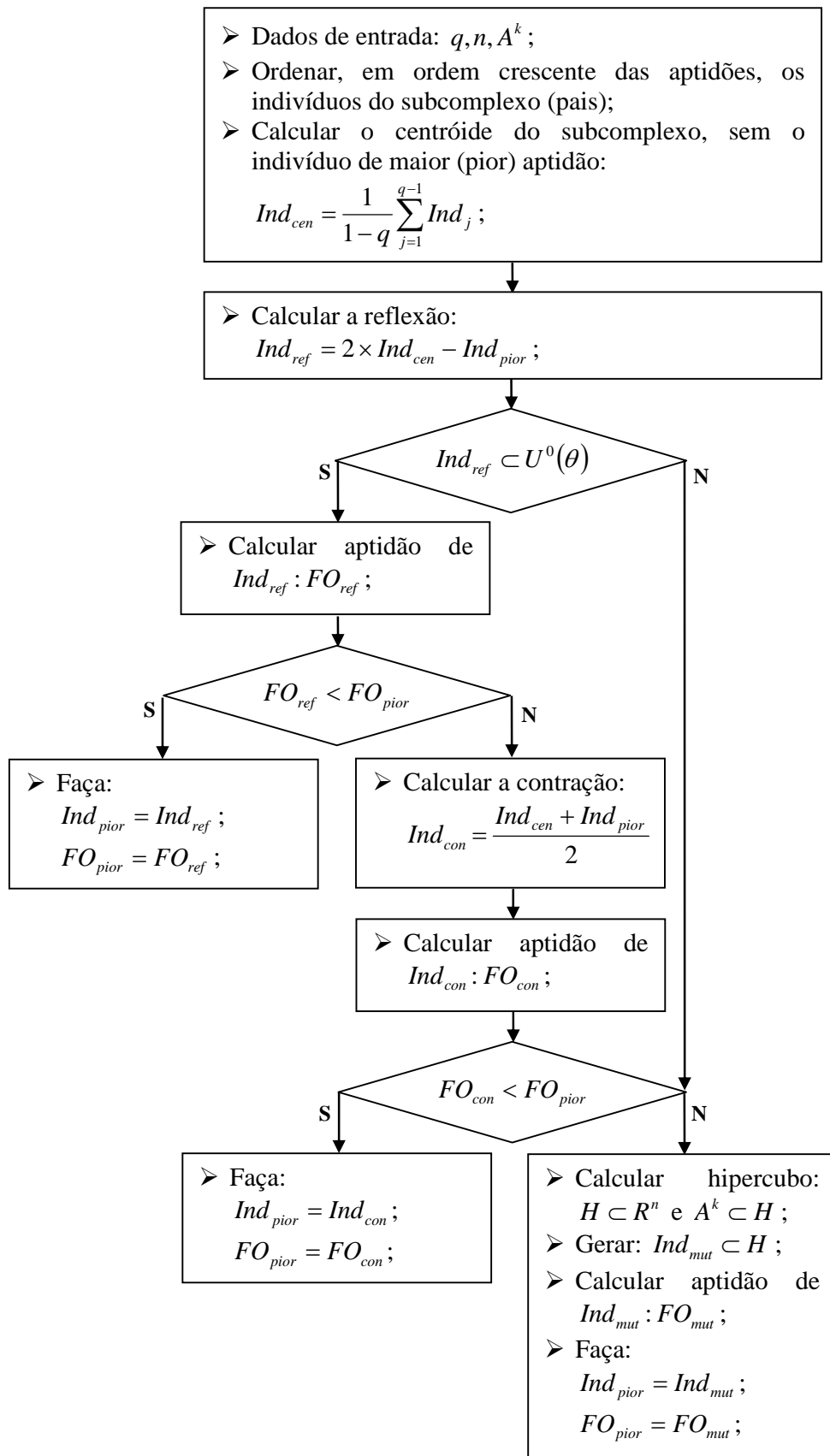


Figura 3.5: Fluxograma de evolução do subcomplexo (Pais).

De acordo com o estudo dos fluxogramas anteriores, dos atributos e métodos descritos, com os objetos identificados e com os serviços que cada um desses objetos deverá prestar, foram adotadas 6 (seis) classes que reproduzem o comportamento do algoritmo SCE-UA, estando representadas nos anexos do presente trabalho.

O passo seguinte à definição da estrutura das classes, com os seus respectivos atributos e métodos, é a implementação das mesmas, no modelo PROPAGARMOO, através da Programação Orientada a Objetos. Essa implementação, conforme já comentado anteriormente, foi efetivada em ambiente de programação Delphi, com a linguagem Object Pascal, que possui recursos para a orientação a objetos, porém não será aqui detalhada por fugir ao escopo deste trabalho.

### **3.2.2 Otimização por AG Multi-objetivo**

O algoritmo genético multi-objetivo escolhido para ser implementado no PROPAGARMOO foi o método de otimização global de evolução de complexos multi-objetivo denominado de MOCOM-UA (Multi-objective complex evolution), apresentado por Sorooshian et al. (1998). Esse método combina as forças da procura aleatória controlada, com a evolução competitiva, Ranking de Pareto, e uma estratégia de “downhill simplex search” multi-objetivo.

O algoritmo MOCOM-UA também já foi descrito no capítulo de revisão bibliográfica e, mais uma vez, o primeiro passo da metodologia foi a identificação das principais variáveis de entrada que serão necessárias, identificando as mesmas como atributos da classe e os métodos que devem ser implementados em cada classe.

Nesse algoritmo, assim como também é feito para o SCE-UA, deve ser efetuada a definição dos parâmetros que serão utilizados no processo de otimização. Uma vez definido cada um deles, os gens cujo conjunto define cada indivíduo da população, é necessário definir também seus valores máximos e mínimos, ou seja, o espaço viável para os mesmos.

Aqui surge a primeira diferença entre os algoritmos mono e multi-objetivo: enquanto no primeiro cada indivíduo possui e é julgado conforme o valor de uma única aptidão, no caso da otimização multi objetivo cada indivíduo é julgado conforme os valores que possui para um conjunto de aptidões, cuja quantidade é definida pelo usuário do sistema.

Assim sendo, identificaram-se os fluxogramas principais que compõem o algoritmo e estes estão representados nas figuras a seguir. O primeiro deles representa o aspecto geral do algoritmo MOCOM-UA (SOROOSHIAN et al. 1998), estando reproduzido na figura 3.6.

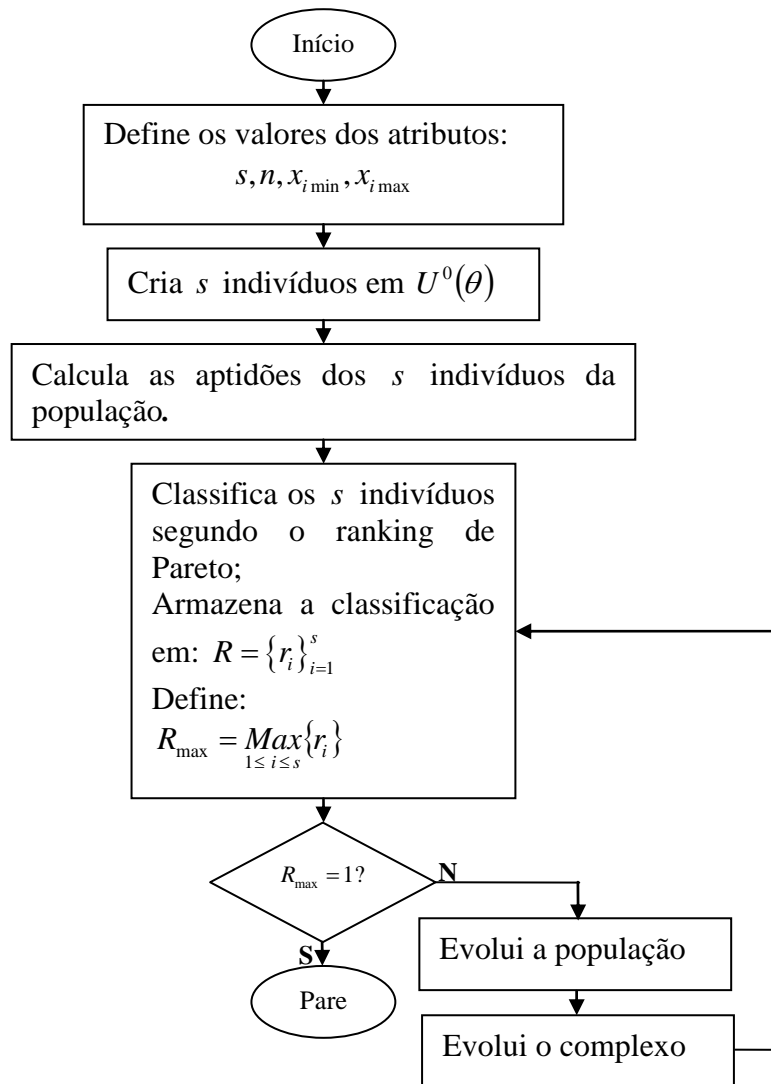


Figura 3.6: Fluxograma do algoritmo genético multi-objetivo MOCOM-UA.

Nesse diagrama tem-se que:

- $s$ 
  - É o número de indivíduos da população, ou seja, o número de pontos que serão utilizados para a otimização multi-objetivo;
- $n$ 
  - É o número de gens de cada indivíduo, ou seja, o número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções (no caso do presente trabalho número de parâmetros de cada regra operacional);
- $x_{i \min}$ 
  - É o valor mínimo do gen  $i$ , com  $i = 1 \dots n$ ;
- $x_{i \max}$ 
  - É o valor máximo do gen  $i$ , com  $i = 1 \dots n$ ;
- $U^0(\theta)$ 
  - É o espaço de validade dos gens de cada indivíduo da população, definido pelos valores mínimo e máximo de cada gen;
- $D$ 
  - É a localização de cada indivíduo na população;
- $R = \{r_i\}_{i=1}^s$ 
  - É o conjunto do ranking de Pareto para cada indivíduo da população;
- $R_{\max}$ 
  - É o maior valor obtido através do ranqueamento de Pareto;



O próximo fluxograma a ser apresentado demonstra a maneira como ocorre a evolução da população, ou seja, como a mesma é dividida em unidades menores denominadas de simplex. O mesmo está reproduzido na figura 3.7.

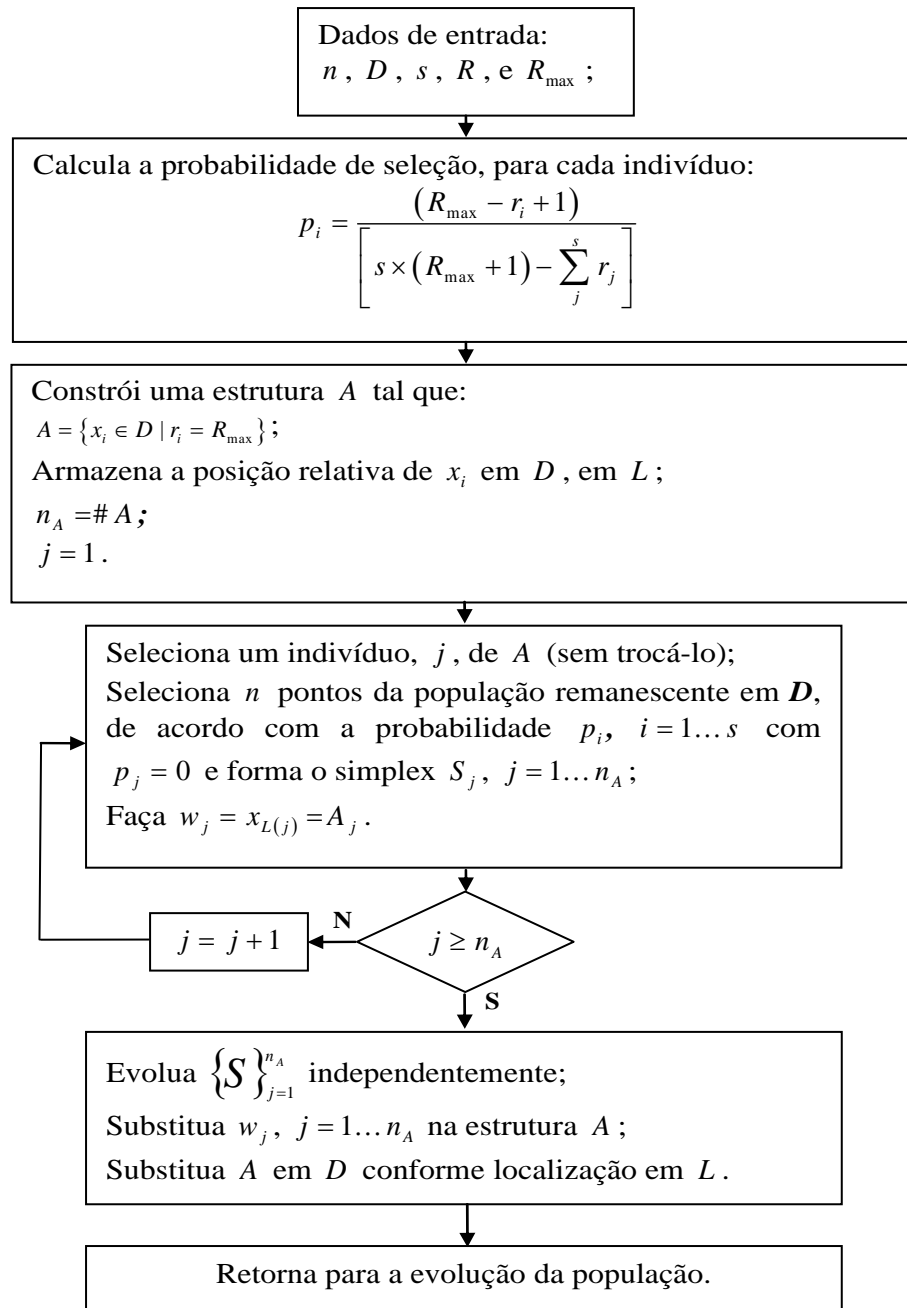


Figura 3.7: Fluxograma da estratégia de evolução da população no algoritmo MOCOM-UA.

Nesse diagrama tem-se que:

- $n$ 
  - É o número de gens de cada indivíduo, ou seja, o número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções (no caso do presente trabalho, número de parâmetros de cada regra operacional);
- $D$ 
  - É a localização de cada indivíduo na população;
- $s$ 
  - É o número de indivíduos da população, ou seja, o número de pontos que serão utilizados para a otimização multi-objetivo;

- $R$  • É o conjunto do ranking de Pareto para cada indivíduo da população;
- $R_{\max}$  • É o maior valor obtido através do ranqueamento de Pareto;
- $p_i$  • É a probabilidade de escolha de cada indivíduo da população para formar o complexo, segundo uma função densidade de probabilidade, isto é:  $\sum_i^s p_i = 1$ ;
- $A$  • É um objeto que armazenará todos os indivíduos  $x_i$  que foram ranqueados com  $R_{\max}$  na população;
- $L$  • É a localização, na população, dos indivíduos armazenados em  $A$ ;
- $n_A$  • É o número de indivíduos armazenados em  $A$ ;
- $j$  • Variável auxiliar para contar quantos simplexes  $S_j$  serão formados, variando de 1 até  $n_A$ ;
- $S_j$  • São os simplexes formados com cada indivíduo  $x_i$  de  $A$ , mais  $n$  indivíduos da população, escolhidos conforme  $p_i$ ;
- $w_j$  • São os  $n_A$  indivíduos fracos a serem substituídos na população.

Nos algoritmos anteriores, verifica-se que já se faz necessário definir duas questões fundamentais da otimização multi-objetivo: a caracterização de dominância entre um indivíduo e outro, e a classificação segundo o ranking de Pareto, de acordo com essas relações de dominância. Conforme já descrito no capítulo anterior, um indivíduo é considerado não-dominado por outro se pelo menos o valor de uma de suas aptidões for igual ou inferior ao valor da aptidão correspondente do outro indivíduo. Lembra-se aqui o fato de que o algoritmo é de minimização (aptidão melhor é a menor), e o número de aptidões a serem avaliadas é definido pelo usuário. Assim sendo, o fluxograma em que se defini a não-dominância entre dois indivíduos é representada na Figura 3.8.

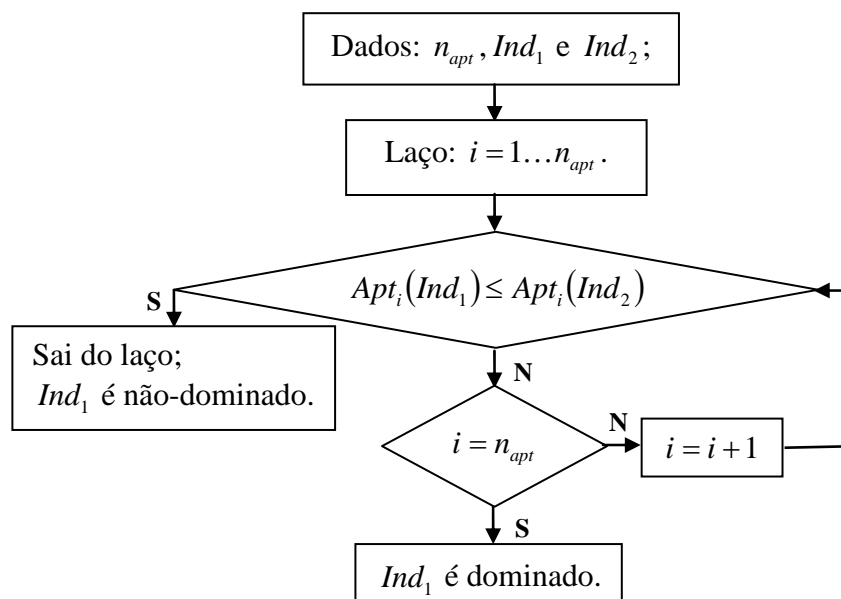


Figura 3.8: Fluxograma para definição de não-dominância.

Nesse diagrama tem-se que:

- $n_{apt}$  • É o número de aptidões segundo as quais serão julgados os indivíduos;
- $Ind_1$  • É o indivíduo que será julgado como dominado ou não-dominado em relação ao  $Ind_2$ ;
- $Ind_2$  • É o indivíduo que será utilizado para julgar o  $Ind_1$  como dominado ou não-dominado;
- $Apt_i(Ind_1)$  • É o conjunto das aptidões do  $Ind_1$ , onde  $i = 1, \dots, n_{apt}$ ;
- $Apt_i(Ind_2)$  • É o conjunto das aptidões do  $Ind_2$ , onde  $i = 1, \dots, n_{apt}$ ;

O próximo fluxograma, dentro do qual se necessita da definição de não dominância, é uma das principais etapas do algoritmo multi-objetivo. Ou seja, é a representação da maneira pela qual todos os indivíduos são classificados segundo o ranking de Pareto. Esse ranqueamento está representado na figura 3.9, no qual também se define qual é o valor máximo desse ranqueamento em cada etapa de evolução da população. Para o mesmo, tem-se que:

- $s$  • É o número de indivíduos da população, ou seja, o número de pontos que serão utilizados para a otimização multi-objetivo;
- $n_{apt}$  • É o número de aptidões segundo as quais serão julgados os indivíduos;
- $R_{max}$  • É o maior valor obtido através do ranqueamento de Pareto;
- $R(i)$  • É o conjunto do ranking de Pareto para cada indivíduo da população;
- $IRD$  • É uma variável booleana, utilizada no algoritmo, que permanecerá com valor verdadeiro sempre que se encontrar uma situação de dominância entre indivíduos que estejam num mesmo ranking de Pareto.

O último fluxograma apresentado diz respeito à estratégia de evolução de cada um dos simplexes formados de acordo com a quantidade de indivíduos que obtiveram o valor  $R_{max}$  no ranqueamento de Pareto efetuado. Esse fluxograma é representado na figura 3.10, no qual teremos:

- $n$  • É o número de gens de cada indivíduo, ou seja, o número de parâmetros de cada ponto do espaço de soluções (no caso do presente trabalho, número de parâmetros de cada regra operacional);
- $U^0(\theta)$  • É o espaço de validade dos gens de cada indivíduo da população, definido pelos valores mínimo e máximo de cada gen;
- $S$  • Simplex que estiver sendo evoluído;
- $Ind_{cen}$  • Indivíduo denominado de centróide. O valor de cada um de seus gens é a média entre os gens dos indivíduos que fazem parte do simplex, exetutando-se o  $Ind_{pior}$ ;
- $Ind_{pior}$  • Indivíduo que tem o maior (pior) valor de aptidão dentro do sub-complexo.

- $Ind_{ref}$  • Indivíduo optido por reflexão do  $Ind_{pior}$ , em relação ao  $Ind_{cen}$ . Salienta-se novamente que cada indivíduo é caracterizado matematicamente por um vetor de dimensão  $n$ ;
- $Ind_{con}$  • Indivíduo optido por contração do  $Ind_{pior}$ , em relação ao  $Ind_{cen}$ .

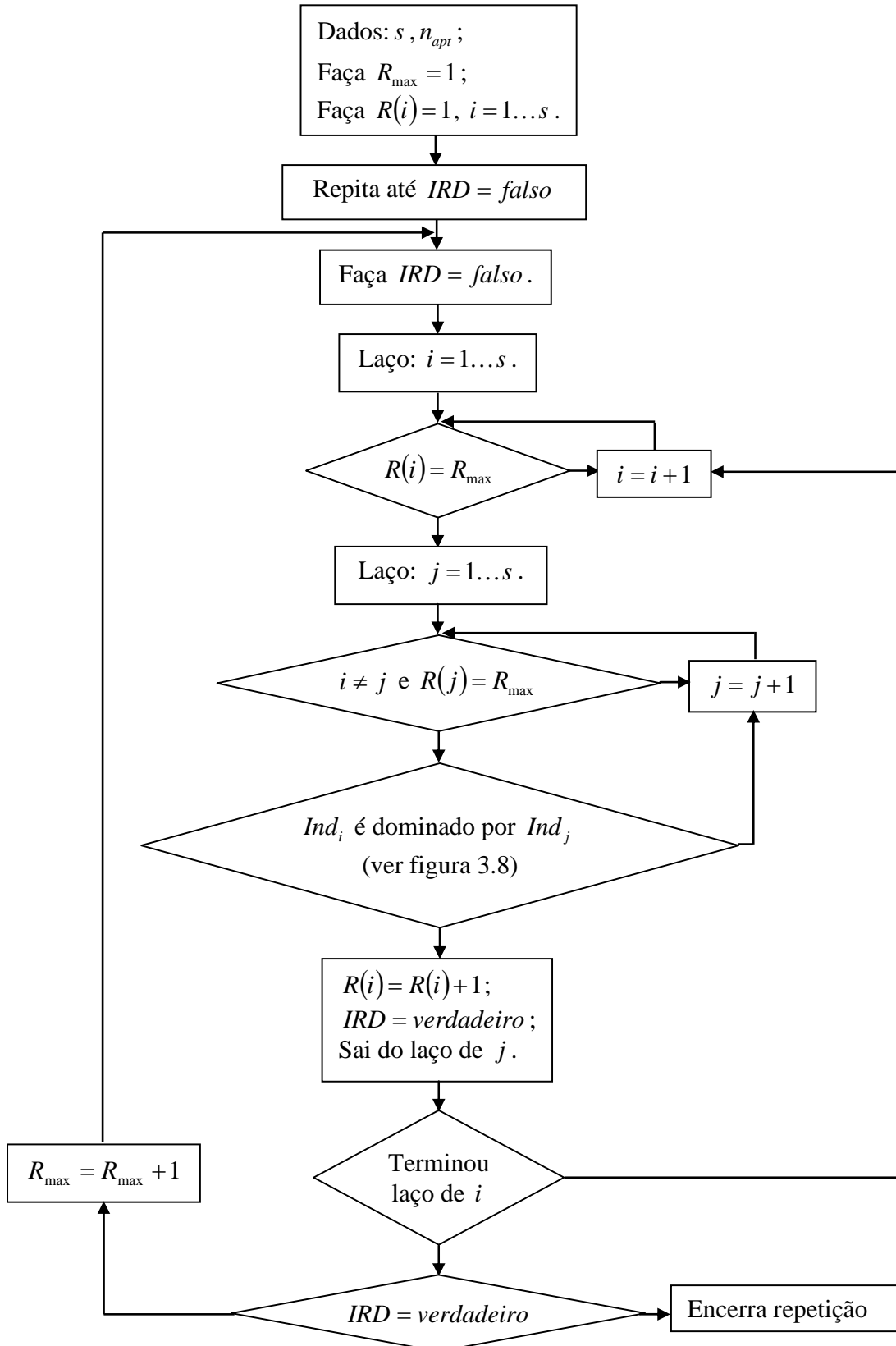
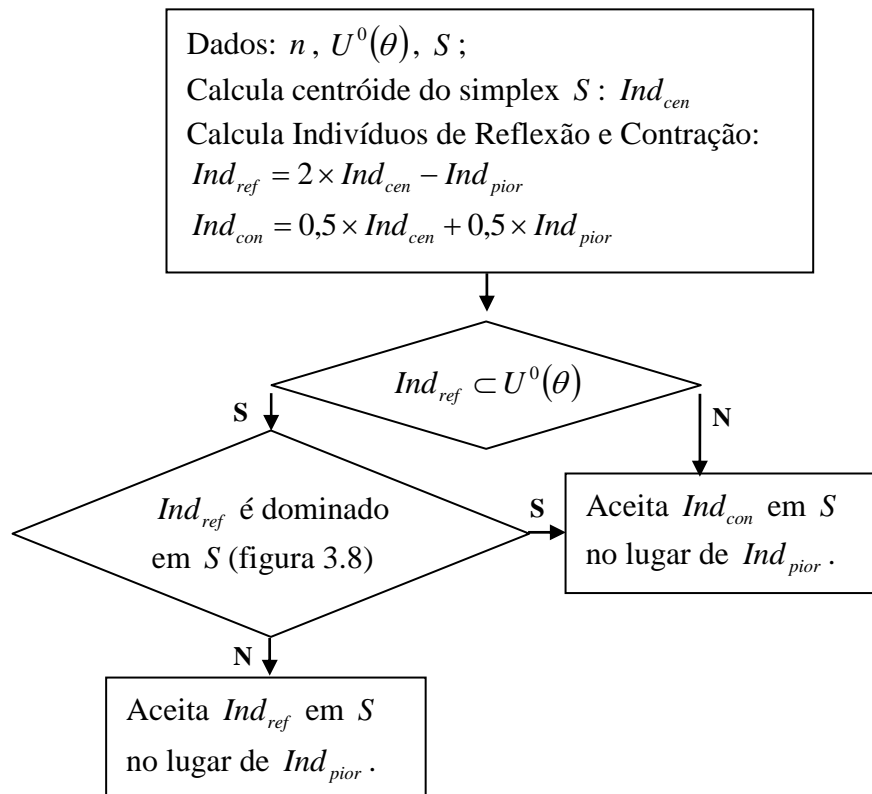


Figura 3.9: Fluxograma para o Ranqueamento de Pareto.



**Figura 3.10:** Estratégia de evolução de cada um dos simplexes formados no MOCOM-UA.

Finalmente, da mesma forma que comentado no item anterior, de acordo com o estudo dos fluxogramas relativos ao algoritmo genético multi objetivo MOCOM-UA, dos atributos e métodos, objetos identificados e com os serviços que cada um desses objetos deverá prestar foram adotadas 5 (seis) classes que reproduzem o comportamento do algoritmo MOCOM-UA. Estas também estão reproduzidas nos anexos deste trabalho.

Conforme já comentado no final do item anterior, o passo seguinte é a implementação das classes definidas através da Programação Orientada a Objetos. Essa implementação foi efetivada em ambiente de programação Delphi, e novamente não será aqui detalhada por fugir ao escopo deste trabalho.

### 3.2.3 Editor de modelos de PL

Para possibilitar ao PROPAGARMOO ser utilizado como plataforma de montagem de modelos de programação linear, se agregou ao mesmo um editor de modelos literais de PL. Através da utilização de métodos em Pascal Script, acessam-se as informações a serem utilizadas para a montagem da função objetivo e das restrições, tais como: nomes a serem utilizados para as variáveis de decisão, volumes máximos e mínimos de reservatórios, valores máximos de demandas a serem atendidas, configuração da rede de drenagem para montagem de restrição de balanço hídrico, etc.

Uma vez coletadas as informações necessárias através do acesso a objetos, definidos na área de projeto do PROPAGARMOO, essas são manipuladas e convertidas em formato texto que, por fim, são escritas no editor, através de um comando em Pascal Script com o seguinte aspecto:

```
//Escreve no editor a equação literal contida na variável <equação>  
Projeto.Equacoes_Escrever(equação);
```

Nesse exemplo, a variável *equação*, previamente declarada como uma variável do tipo *string*, armazena a restrição que se deseja incluir no modelo.

A utilização de comandos em Pascal Script em conjunto com o editor de modelos literais de PL confere uma versatilidade tal ao PROPAGARMOO que informações adicionais armazenadas em planilhas eletrônicas, do excel por exemplo, podem ser acessadas agregando informações para a construção do modelo, que porventura não estejam acessíveis através dos objetos do projeto em estudo. Informações como custos, restrições de compatibilidade entre variáveis, coeficientes de linearização de curvas do tipo área versus volume de reservatório, etc.

### 3.2.4 Conversor de modelo literal para MPS

O formato MPS – Mathematical Programming Systems (MURTAGH e SAUNDERS, 1987) é uma técnica muito poderosa na edição de grandes sistemas de equações lineares. Geralmente os softwares de otimização existentes no mercado lêem esse formato e assim se torna útil, para quem deseja trabalhar com grandes sistemas de equações lineares, o desenvolvimento de uma metodologia específica para a geração de um arquivo em formato MPS, a partir da leitura do resultado do editor de modelos literais de PL, já comentado no item anterior.

Uma desvantagem desse formato é a rigidez quanto às posições de cada elemento dentro do arquivo do problema de PL em questão. Porém, como o modelo literal já estaria pronto nessa fase, o conversor passa a ser apenas um algoritmo de leitura de linhas das quais devem ser extraídas informações simples como: nome do modelo, nome das equações, variáveis de decisão utilizadas, valores dos coeficientes das variáveis em cada equação e o valor do termo denominado de RHS que fica após o sinal de igualdade em quase todas as equações, menos na equação relativa à função objetivo. Uma vez lidas essas informações, as mesmas devem ser inseridas em seções próprias do formato MPS, que são as seguintes: *NAME*, *ROWS*, *COLUMNS*, *RHS*, *RANGES*, e *BOUNDS*.

Cada uma dessas seções tem um objetivo específico e apenas as duas últimas são optativas. A estrutura de cada uma delas, como já comentado, é muito rígida, e os detalhes dessa estrutura podem ser verificados em Murtagh e Sauders (1987), Santana (1998), ou Vianna Jr. (2002).

O Objetivo, então, da implementação de um conversor de modelos literais para o formato MPS é possibilitar a flexibilização da escolha do analista de recursos hídricos quanto à utilização do software de resolução de modelos de PL disponível, desde que o mesmo seja capaz de ler o formato MPS.

### **3.3 Trinômio: Regra operacional – Parametrização – Simulação Iterativa**

A otimização de regras operacionais por procura direta se baseia em um trinômio onde devem ser efetuadas: a escolha da regra operacional, a parametrização da regra escolhida, e a simulação iterativa da operação do sistema.

A simulação iterativa, por seu turno, deve ser controlada de tal forma, que os valores dos parâmetros devem ser modificados em cada simulação, sendo então avaliadas as conseqüências dessa mudança de acordo com algum índice de desempenho, que se denomina simplesmente de função objetivo, ou aptidão, como no caso do algoritmo genético.

No ambiente do PROPAGARMOO, já com a implementação dos algoritmos de otimização por procura direta, basicamente 4 (quatro) rotinas devem ser programadas pelo usuário, de maneira a intervir ou organizar todo o processo envolvido na otimização por procura direta. São elas:

1. A rotina de inicialização (da otimização);
2. A rotina geral de planejamento;
3. A rotina de cálculo da função objetivo;
4. A rotina de finalização (da otimização).

Na primeira delas, denominada de rotina de inicialização, é efetuada, principalmente, a informação dos dados necessários para o otimizador escolhido, incluindo a definição dos parâmetros que condicionam a regra operacional.

Já na segunda rotina, é efetuado o planejamento da operação dos reservatórios, de acordo com a regra operacional escolhida. Detalhes sobre a implementação da regra operacional escolhida serão fornecidos no item 3.4 referente às regras operacionais adotadas.

Na rotina de cálculo da função objetivo é que se define como se fará a avaliação da função objetivo, ou aptidão, que define se a mudança nos valores dos parâmetros da regra

operacional melhorou a performance do sistema. Detalhes sobre a programação dessa rotina serão apresentadas nos itens 3.5 e 3.6.

A rotina de finalização tem a função de, findo o processo de otimização pelo usuário, armazenar as informações que forem consideradas pertinentes sobre o resultado do processo como um todo.

### **3.3.1 Rotina de inicialização da otimização**

Conforme já comentado, na rotina de inicialização do processo de otimização, o usuário, através de programação em Pascal Script, deve informar os dados necessários para a utilização do otimizador de sua escolha.

Embora a montagem de rotinas diferentes para cada tipo de otimizador seja possível, resultando em códigos mais enxutos, o autor deste trabalho optou por montar rotinas mais genéricas, onde se introduz comandos que identificam qual é o otimizador que está acionado no PROPAGARMOO. Assim, essa rotina foi organizada segundo as seguintes tarefas:

1. Declaração e definição dos tipos de variáveis a serem utilizadas no script;
2. Definição de diretório para leitura e salvamento de dados;
3. Criação de objeto para receber uma planilha de dados que conterá informações necessárias para a criação dos parâmetros, verificação de sua existência no diretório e acesso à mesma;
4. Transformação em vetores dos dados, lidos numa planilha, referentes aos parâmetros das regras operacionais de cada reservatório;
5. Criação de objeto para receber a planilha com o nome de cada PC e o número de reservatórios estratégicos à montante dos mesmos, verificação de sua existência no diretório e acesso à mesma;
6. Transformação em vetor, com o número de reservatórios estratégicos, a montante de cada PC, de uma linha específica da planilha;
7. Leitura da quantidade de PC's, através do objeto projeto;
8. Criação de um vetor que conterá uma lista com os nomes dos PC's e leitura dos mesmos na planilha já acessada;
9. Criação de matrizes para conter os índices de desempenho para cada PC e prioridade de demanda, e de um vetor com os valores das funções objetivo disponibilizadas;
10. Transformação em variáveis globais das matrizes e vetores a serem utilizadas durante a execução de outras rotinas;
11. Remoção da memória de alguma lista de parâmetros pré-existente;
12. Identificação de que otimizador esta sendo utilizado pelo sistema e definição dos dados necessários para o otimizador em questão;
13. Definição de que o sistema mostrará na tela, a dinâmica de variação da FO indicada no primeiro índice. Caso se trate de otimização multi-objetivo, definem-se as outras variações de FO a serem mostradas;
14. Criação dos parâmetros e definição de suas características;
15. Teste para saber se o otimizador corrente é o algoritmo genético mono objetivo. Verificação se será lida alguma população pré-existente. Criação e preenchimento de uma planilha com informações sobre o processo de otimização;

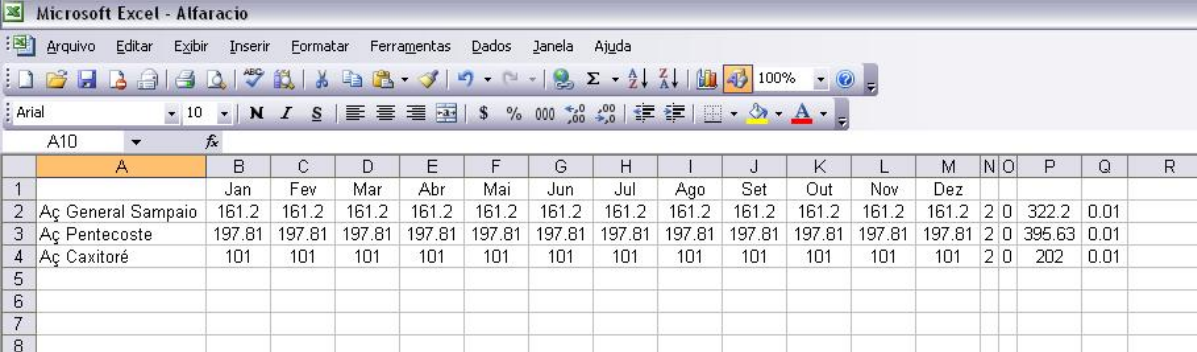


16. Teste para saber se o otimizador corrente é o algoritmo genético multi-objetivo. Verificação se será lida alguma população pré-existente. Criação e preenchimento de uma planilha com informações sobre o processo de otimização;
17. Definição de que a variação dos parâmetros deverá ser mostrada em uma janela;
18. Liberação do espaço da memória dos objetos criados nesse script e que não precisam ficar disponíveis para outras rotinas.

No que diz respeito à primeira tarefa a ser executada, ela é intrínseca a todo script que o usuário desejar montar, para as rotinas que se fizerem necessárias. Na rotina de inicialização montada neste trabalho, foram utilizadas os tipos *Integer*, *String* e *Object*.

Na segunda tarefa, com o objetivo de facilitar a leitura e salvamento de dados durante a execução da rotina, foi criada uma variável do tipo string (literal), com a função de armazenar todo o caminho necessário para definição do diretório a ser utilizado.

Uma planilha de dados que conterá informações necessárias para a criação dos parâmetros deve ser montada e a mesma deverá ter o seguinte aspecto da figura 3.11. Conforme essa mesma figura, verifica-se que os dados a serem lidos na mesma são os seguintes: os valores iniciais dos parâmetros (será um parâmetro para cada mês), o valor do passo de variação, valor mínimo, valor máximo e tolerância na variação do valor dos mesmos. Esses dados serão lidos em uma próxima etapa.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez					
2	Aç General Sampaio	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	161.2	2 0	322.2	0.01		
3	Aç Pentecoste	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	197.81	2 0	395.63	0.01		
4	Aç Caxitoré	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	2 0	202	0.01		
5																		
6																		
7																		
8																		

**Figura 3.11: Planilha para leitura de informações necessárias aos parâmetros das regras operacionais.**

Uma vez que o usuário tenha montado essa planilha, a mesma é acessada pelo script. Para tanto, um objeto do tipo planilha é criado, é verificado se existe no diretório a planilha a ser lida, e em caso afirmativo, a mesma é armazenada no objeto criado.

Uma vez que a planilha tenha sido acessada, suas linhas são transformadas em vetores, a partir de determinada coluna, para que os dados sejam utilizados no momento de definição das características dos parâmetros.

A próxima etapa, de número 5, diz respeito à criação de outro objeto para receber a planilha com o nome de cada PC e o numero de reservatórios estratégicos à montante dos mesmos. Essa planilha possui a aspecto da figura 3.12.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	PC01	PC02	PC03	PC04	PC05	PC06	PC07	PC08	PC09	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	3	3	3	3	3	3
3																
4																
5																

**Figura 3.12:** Planilha com lista de PC's e o número de reservatórios estratégicos a montante de cada um deles.

Para a leitura da planilha acima, também é criado um objeto do tipo planilha e é feita a verificação de sua existência no diretório. A seguir, a linha com o número de reservatórios estratégicos é transformado em um vetor, e a quantidade de PC's é verificada através do objeto projeto.

Na etapa 8 cria-se então um vetor, do tipo lista de strings, para conter os nomes dos PC's e realiza-se a leitura dos nomes na planilha já acessada.

A seguir é realizada a criação de matrizes para conter os índices de desempenho para cada PC e prioridade de demanda, e de um vetor com os valores das funções objetivo disponibilizadas.

A próxima etapa, de número 10, diz respeito à transformação em variáveis globais das matrizes e vetores anteriormente criados. Essa transformação tem por objetivo facilitar o acesso e a manipulação dessas variáveis em outras rotinas. Assim nas rotinas que são iterativamente executadas, não se faz necessário criar e destruir essas variáveis, uma vez que elas ficam disponíveis durante todo o processamento, armazenadas na memória. Uma vez terminado o processo de otimização, elas são finalmente destruídas na rotina de finalização.

Na próxima etapa se inicia propriamente dito a definição dos parâmetros e das informações necessárias para a utilização de um dos otimizadores disponíveis no PROPAGARMOO. A primeira coisa a ser feita, por segurança, é a remoção da memória de alguma lista de parâmetros pré-existente.

Conforme já comentamos anteriormente, se optou por estruturar uma rotina de inicialização que identificasse qual o otimizador acionado pelo usuário. Dessa forma se criou um algoritmo de teste para saber qual seria esse otimizador. Uma vez identificado, uma série de informações necessária é fornecida.

Se o otimizador for o algoritmo genético multi-objetivo as seguintes informações devem ser fornecidas: o número de FO's que serão utilizadas no processo, o tamanho da população, a quantidade máxima de evoluções da população, e a definição de que haverá salvamento da

população durante o processo de otimização, informando onde e em que arquivo a população será salva.

Se o otimizador for o Rosenbrock, devem ser fornecidos: o passo de decrescimento de cada parâmetro, o número máximo de simulações, o tempo máximo de processamento e a tolerância para a variação da FO.

Já se o otimizador for o algoritmo genético mono-objetivo, as seguintes informações devem ser fornecidas: o número de complexos que serão utilizados no processo (que automaticamente define o tamanho da população), a quantidade máxima de evoluções da população, e a definição de que haverá salvamento da população durante o processo de otimização, informando onde e em que arquivo a população será salva.

A necessidade de definir a possibilidade de salvamento intermediário da população e a sua posterior utilização para reiniciar o processo se deveu ao fato de que o processo de otimização por AG é inerentemente mais demorado que por Rosenbrock. Assim, para evitar maiores prejuízos, causados, por exemplo, por uma falta de energia, se introduziu esse método na classe dos otimizadores por AG.

Uma vez definidas as informações necessárias para o otimizador, pode-se definir que o sistema mostrará na tela, a dinâmica de variação da FO indicada no primeiro índice. Caso se trate de otimização multi-objetivo, definem-se as outras variações de FO a serem mostradas.

Na etapa de número 14 é realizada a criação dos parâmetros das regras operacionais. Na aplicação deste trabalho, foram utilizados 36 parâmetros conforme será detalhado no item 3.4. Cada um deles deve ser criado, e as seguintes informações devem ser fornecidas: seu nome e os valores: inicial, do passo de variação, mínimo, máximo e da tolerância na variação do valor dos mesmos. Essas informações, por seu turno, foram armazenadas nos três vetores criados por essa rotina, na etapa de número 4 (quatro).

Na etapa descrita acima, deve se ter em mente que, dependendo do otimizador escolhido, pode se optar por deixar a cargo do sistema decidir que informações serão úteis e simplesmente não utilizar as demais. Cabe ainda ao sistema identificar a quantidade de parâmetros a serem otimizados.

Na próxima etapa, de número 15, devem ser realizadas as seguintes ações: testar se o otimizador corrente é o algoritmo genético mono-objetivo, verificar se será lida alguma população pré-existente e criar e preencher uma planilha com informações sobre o processo de otimização. Essas informações serão necessárias durante o processo de teste e utilização dos otimizadores por AG para acompanhar e estudar a convergência do processo, conforme veremos no capítulo de aplicação. Essa planilha é um objeto tipo *TSpreadSheetBook*, que possibilita a criação e manipulação de várias folhas dentro da mesma. Uma vez preenchido o

cabeçalho da planilha, a mesma é salva no diretório desejado e transformada em variável global, a ser preenchida na rotina de cálculo da função objetivo, sempre que houver mudança de geração. Nesse momento a aparência da planilha é a da figura 3.13.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Estadísticas das gerações da população										0
2	Geração	Média das FOs	Desvio Padrão das FOs	Tempo do início do Windows	Tempo em horas do sistema	Tempo em hora,min, sec do sistema					
3								30772000	38166.77	18:34:34	
4											
5											

**Figura 3.13:** Aparência da planilha criada e salva pela rotina de inicialização, para conter informações a respeito da convergência do processo de otimização por AG mono-objetivo.

Há ainda um teste para saber se o otimizador corrente é o algoritmo genético multi-objetivo. Nesse caso, testa-se se será iniciado o processo de otimização com uma população pré-existente. Da mesma forma que no caso do AG Mono, se optou por criar e preencher uma planilha com informações sobre o processo de otimização. Aqui também o motivo da utilização dessa planilha é o armazenamento de dados para futuro estudo da convergência do processo de otimização. A planilha com os dados iniciais preenchidos está reproduzida na figura 3.14.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Estadísticas das gerações da população															0	
2	Geração	Média da F002	Média da F003	Média da F004	Desvio Padrão da F002	Desvio Padrão da F003	Desvio Padrão da F004	Fator RMax	Inds Piores	Tempo do início do Windows	Tempo em horas do sistema	Tempo em hora,min,sec do sistema			Tempo do início do Windows	Tempo em horas do sistema	Tempo em hora,min,sec do sistema
3															28382656	38180,7393	17:44:36
4																	
5																	

**Figura 3.14:** Aparência da planilha criada e salva pela rotina de inicialização, para conter informações a respeito da convergência do processo de otimização por AG multi-objetivo.

Embora não seja necessário, o usuário pode optar por acompanhar visualmente a variação no valor dos parâmetros, correspondendo à etapa de número 17. A imagem exibida na tela do computador é reproduzida na figura 3.15.

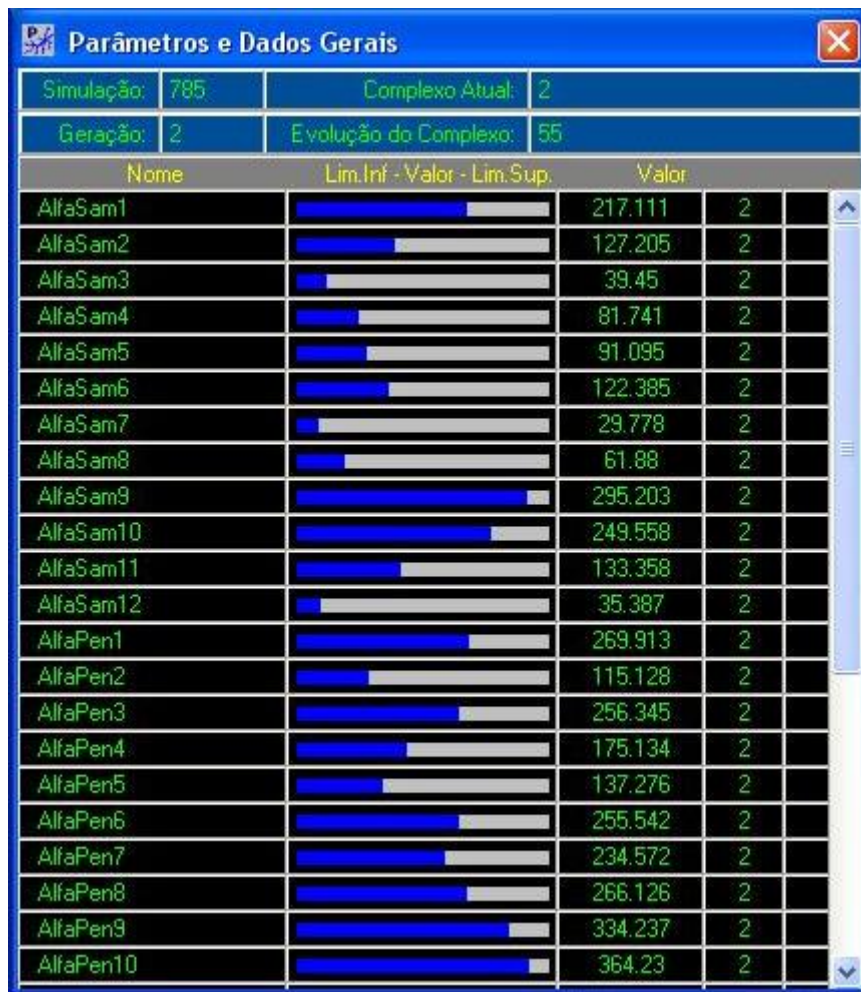


Figura 3.15: Imagem de acompanhamento da variação dos parâmetros.

Finalmente, no final do script, liberam-se do espaço da memória os objetos criados e que não precisam ficar disponíveis para outras rotinas.

### 3.3.2 Rotina de finalização

Na rotina de finalização do processo de otimização, o usuário, através de programação em Pascal Script, tem a possibilidade de efetuar a programação de tarefas que julgar necessárias, após a finalização do processo de otimização. Essa finalização ocorrerá ao se atingir um determinado critério, no caso do Rosenbrock ou do AG multi-objetivo, ou ainda no caso em que o usuário acredite que o processo já chegou a um bom termo, como é o caso do AG mono-objetivo.

Aqui também a montagem de rotinas diferentes para cada tipo de otimizador é possível, porém, novamente, o autor deste trabalho optou por montar rotinas mais genéricas, onde se introduz comandos que identificarão qual é o otimizador que está acionado no PROPAGARMOO. Essa rotina então foi organizada segundo as seguintes tarefas:

1. Declaração e definição dos tipos de variáveis a serem utilizadas no script;
2. Definição do caminho do diretório, dos intervalos de simulação, do número de PC's do projeto e do número de parâmetros utilizados no processo de otimização;
3. Recuperação da variável global que contém uma planilha com as informações salvas a respeito da convergência da otimização por AG;
4. Obtenção do número da geração atual via sistema;
5. Teste para saber se o otimizador em operação é o AG mono-objetivo e, em caso positivo, preenchimento de alguns dados na planilha anteriormente recuperada;
6. Teste para saber se o otimizador em operação é o AG multi-objetivo e, em caso positivo, preenchimento de alguns dados na planilha anteriormente recuperada;
7. Recuperação dos objetos globais, criados na rotina de inicialização da otimização;
8. Criação de nova folha dentro da planilha, para conter informações sobre o atendimento à demanda primária e preenchimento de cabeçalho e de informações da mesma;
9. Criação de nova folha dentro da planilha, para conter informações sobre o atendimento à demanda secundária e preenchimento de cabeçalho e de informações da mesma;
10. Criação de nova folha dentro da planilha, para conter informações sobre o atendimento à demanda terciária e preenchimento de cabeçalho e de informações da mesma;
11. Criação de nova folha dentro da planilha, para conter informações sobre o valor final dos parâmetros utilizados no processo de otimização;
12. Teste para saber se o otimizador utilizado é o Rosenbrock. Em caso positivo, a folha da planilha é preenchida com informações relativas a esse otimizador;
13. Em caso negativo do teste anterior, se recupera o número de indivíduos que fazem parte da atual aplicação e realização de novo teste para saber se o otimizador utilizado é o AG mono-objetivo. Em caso positivo, a folha da planilha é preenchida com informações relativas a esse otimizador;
14. Em caso negativo do teste anterior, a folha da planilha é preenchida com informações relativas ao otimizador AG multi-objetivo;
15. Criação de nova folha dentro da planilha para conter os valores de todas as FO's calculadas na última simulação;
16. Salvamento da planilha em diretório previamente especificado, informando em forma de mensagem qual foi esse diretório;
17. Visualização da planilha na tela do computador, informando em forma de mensagem que a otimização foi concluída;
18. Liberação do espaço da memória, dos objetos utilizados na rotina.

Na rotina de finalização, foram utilizadas variáveis dos tipos: *real*, *integer*, *string* e *object*.

Uma vez declaradas as variáveis, se inicia a rotina com a definição do caminho do diretório, dos intervalos de simulação, do número de PC's do projeto e do número de parâmetros utilizados no processo de otimização.

Uma vez que a planilha criada na rotina de inicialização foi definida como variável global a mesma tem que ser recuperada, para, assim, ser preenchida com dados úteis para estudar o resultado do processo de otimização.

Outra informação a ser acessada via projeto é o valor contido no contador de gerações do processo de otimização por AG.

Como se optou por montar um script de finalização que fosse de utilização possível pelos três tipos de otimizadores, foi necessário introduzir testes que verificassem qual o otimizador utilizado, podendo assim preencher a planilha de acordo com essa escolha. O primeiro desses testes é para saber se está sendo utilizado o AG mono-objetivo. Em caso positivo, o cabeçalho da primeira página é preenchido de acordo com esse otimizador.

O próximo teste efetuado é para saber se esta sendo utilizado o AG multi-objetivo, sendo então o cabeçalho da primeira página preenchido de acordo com esse otimizador.

A próxima etapa é a recuperação dos objetos que contêm informações sobre os índices de desempenho no atendimento às demandas, de cada prioridade, em cada um dos PC's da bacia, e dos valores estimados para as funções objetivo disponibilizadas, dados esses relativos à última simulação iterativa realizada.

A próxima etapa é a criação de nova folha dentro da planilha, para conter informações sobre o atendimento à demanda primária e preenchimento de cabeçalho e de informações da mesma. Essa etapa é idêntica às etapas 9 e 10 listadas acima. Ou seja, cada uma delas reproduz os mesmos comandos, diferenciando apenas no que se refere à prioridade da demanda.

Algo que se deve comentar é que, ao ser criada uma nova folha dentro de uma planilha do tipo *TSpreadSheetBook*, essa folha fica automaticamente ativa para ser acessada, podendo ter seus dados lidos ou escritos. Se for necessário tornar ativa uma outra folha que não tenha sido a última a ser criada, é necessário, através de um comando, torná-la ativa.

Não é possível ativar simultaneamente mais de uma folha, e aquela que se deseja ativar deve ser especificada por um índice que se inicia por 0 (zero) no caso da primeira folha da planilha.

Após a criação e preenchimento das folhas relativas a cada prioridade de demanda, uma nova folha é criada dentro da planilha, para conter informações sobre o valor final dos parâmetros utilizados no processo de otimização.

O próximo teste a ser executado é se o otimizador utilizado é o Rosenbrock. Em caso positivo, a folha da planilha é preenchida com informações relativas a esse otimizador, ou seja, os nomes e os valores finais dos 36 parâmetros utilizados na aplicação.

Em caso negativo do teste que indicaria ser o Rosenbrock o otimizador utilizado, se recupera o número de indivíduos que fazem parte da atual aplicação. Realiza-se novo teste para saber se o otimizador utilizado é o AG mono-objetivo. Em caso positivo, a folha da planilha é preenchida com informações relativas a: nomes dos parâmetros utilizados na

aplicação, valores dos parâmetros para cada um dos indivíduos que fazem parte da população adotada, e valor da aptidão (FO) de cada um desses indivíduos.

Finalmente, se for identificado que o otimizador é o AG multi-objetivo, a folha da planilha é preenchida com informações relativas ao mesmo, ou seja: nomes dos parâmetros utilizados na aplicação, valores dos parâmetros para cada um dos indivíduos que fazem parte da população adotada, e valores das aptidões (FO's) de cada um desses indivíduos.

Na próxima etapa é efetuada a criação de nova folha dentro da planilha para conter os valores de todas as FO's calculadas na última simulação, e esses valores são gravados nessa folha.

Uma vez terminado o preenchimento da planilha com os dados referentes ao processo de otimização, a mesma é salva em diretório previamente especificado, informando em forma de mensagem qual foi esse diretório. Optou-se ainda por visualizar a planilha na tela do computador, informando em forma de mensagem que a otimização foi concluída.

Finalmente, numa última etapa, se define a liberação do espaço da memória, dos objetos utilizados na rotina.

### **3.4 Regras operacionais adotadas para a otimização por AG**

Duas regras operacionais foram adotadas para testar a eficiência dos otimizadores implementados no PROPAGARMOO. A primeira delas, denominada regra padrão modificada, condiciona a operação dos reservatórios a dois parâmetros mensais: um impõe um racionamento preventivo às descargas e o outro implica formação de um volume de espera no caso de reservatórios localizados em bacias sujeitas a enchentes. A segunda regra, denominada de curva guia, condiciona a operação dos reservatórios a volumes de referência mensais que devem ser mantidos, ou atingidos, mensalmente.

#### **3.4.1 Regra Padrão Modificada**

Conforme descrição feita no capítulo de revisão bibliográfica, a regra padrão modificada possui dois parâmetros mensais: o primeiro deles estabelece um racionamento preventivo, nas descargas dos reservatórios, quando estes estão com seus níveis de armazenamento se aproximando de seus níveis mínimos; o segundo estabelece a formação de volume de espera quando as afluições aos reservatórios são tais que seus volumes se aproximam dos valores de sua capacidade máxima.



Conforme descrito no capítulo referente à área de aplicação, a mesma não está sujeita à ocorrência de cheias, portanto os parâmetros relacionados à formação de um volume de espera não foram utilizados ( $\beta_{z,t} = 0$ ). Como neste trabalho 3 (três) reservatórios foram considerados estratégicos e o intervalo de simulação escolhido foi o mensal, foram otimizados 36 parâmetros, ou seja, uma regra operacional para cada mês do ano, para cada reservatório estratégico.

Antes de o script montado para a rotina de simulação efetivamente aplicar a regra operacional, as seguintes tarefas são executadas:

1. Obtenção o intervalo de simulação atual;
2. Obtenção do número de intervalos de simulação;
3. Obtenção do número de PC's do projeto;
4. Obtenção do mês e ano correspondentes ao intervalo de tempo da simulação;
5. Inicialização dos objetos PC da rede;
6. Recuperação de variáveis globais que contêm informação a respeito do número de reservatórios estratégicos a montante de cada PC e uma lista com os nomes dos PC's;
7. Recuperação dos objetos definidos como parâmetros da regra operacional;
8. Acesso aos objetos PC e leitura dos valores dos retornos das demandas, das demandas e afluências hídricas;
9. Cálculo dos déficits hídricos de cada PC, no intervalo de tempo vigente;
10. Obtenção dos volumes atuais de cada um dos reservatórios;
11. Determinação da disponibilidade hídrica atual das associações de reservatórios e determinação da parcela de contribuição de cada reservatório para o atendimento dos déficits hídricos dos PC's de jusante;
12. Criação e preenchimento da matriz de parcelamento da responsabilidade de atendimento às demandas de jusante;
13. Criação de um vetor que será utilizado para armazenar o valor do racionamento calculado para a descarga de cada reservatório.

Cada uma dessas etapas é efetuada utilizando comandos em Pascal Script e a possibilidade de acesso às informações contidas nos objetos definidos através da biblioteca de classes do PROPAGARMOO.

Na etapa 6 da lista anterior, algumas variáveis globais criadas e definidas na rotina de inicialização da otimização são acessadas todas as vezes que a rotina de simulação for executada, para que informações, como a quantidade de reservatórios estratégicos, a montante de cada PC, sejam lidas.

Uma vez que em cada intervalo de tempo o valor dos parâmetros mensais para a regra padrão modificada é modificado pelo algoritmo de otimização interno ao PROPAGARMOO, deve-se acessar o objeto parâmetro, para utilizar o seu valor definido para o intervalo de tempo atual.

Tendo os objetos PC já inicializados, os mesmos devem ser acessados para leitura dos valores de retorno das demandas, das demandas planejadas e das afluências hídricas. Uma vez que demandas, seus retornos, e afluências mensais sejam conhecidos, devem ser calculados os déficits hídricos de cada PC, no intervalo de tempo atual, para futura determinação da descarga a ser efetuada em cada reservatório.

Como nem todos os PC's, devido à topologia adotada para a rede, têm todos os três reservatórios estratégicos disponíveis para suprir o seu déficit hídrico, associações entre os reservatórios devem ser feitas. Assim os PC's de 11 a 16 podem ser atendidos pela associação entre os três reservatórios, mas o PC 08 pode apenas ser atendido pelos reservatórios nos PC's 01 e 08. Uma vez que essas associações sejam efetuadas, o parcelamento de responsabilidade de atendimento às demandas de jusante é calculado e armazenado em uma matriz para futura utilização. Esse parágrafo se refere às etapas supracitadas de 10 a 12.

Finalmente um vetor para conter os valores dos racionamentos aplicados à descarga de cada um dos reservatórios é criado.

A aplicação da regra padrão modificada propriamente dita pode ser então desmembrada em duas fases. A primeira condiciona a operação dos reservatórios, definindo suas descargas e a segunda condiciona o atendimento às demandas nos PC's sem reservatórios localizados mais a jusante do sistema.

### 3.4.1.1 Fase tática para os PC's com reservatório

As decisões táticas referentes aos PC's com reservatório são definidas na rotina de simulação, utilizada no processo de otimização, onde são corrigidas as previsões de atendimento a cada demanda, como também a previsão de descarga para cada reservatório.

Essas decisões são efetuadas conforme o diagrama de fluxo descrito na figura 3.16, no qual se tem que:

- |              |  |
|--------------|--|
| $Disp(z)$    | • Disponibilidade hídrica do reservatório $z$ , calculada para o intervalo atual da simulação iterativa;   |
| $X_{pr}(z)$  | • É a descarga prevista, para cada reservatório $z$ , na rotina de simulação, a ser mantida ou alterada após a verificação da necessidade de racionamento; |
| $X_{pl}(z)$  | • É a descarga planejada, para cada reservatório $z$ , a ser efetivada após aplicação da regra padrão modificada;  |
| $Rac$        | • É o índice de racionamento calculado na aplicação da regra padrão modificada;  |
| $Alfa(z,t)$  | • É o parâmetro de racionamento para o reservatório estratégico $z$ , no intervalo de simulação $t$ ;  |
| $Racio(z,t)$ | • É o racionamento a ser imposto aos PC's à jusante do reservatório $z$ , na sua parcela de responsabilidade, no intervalo de simulação presente           |

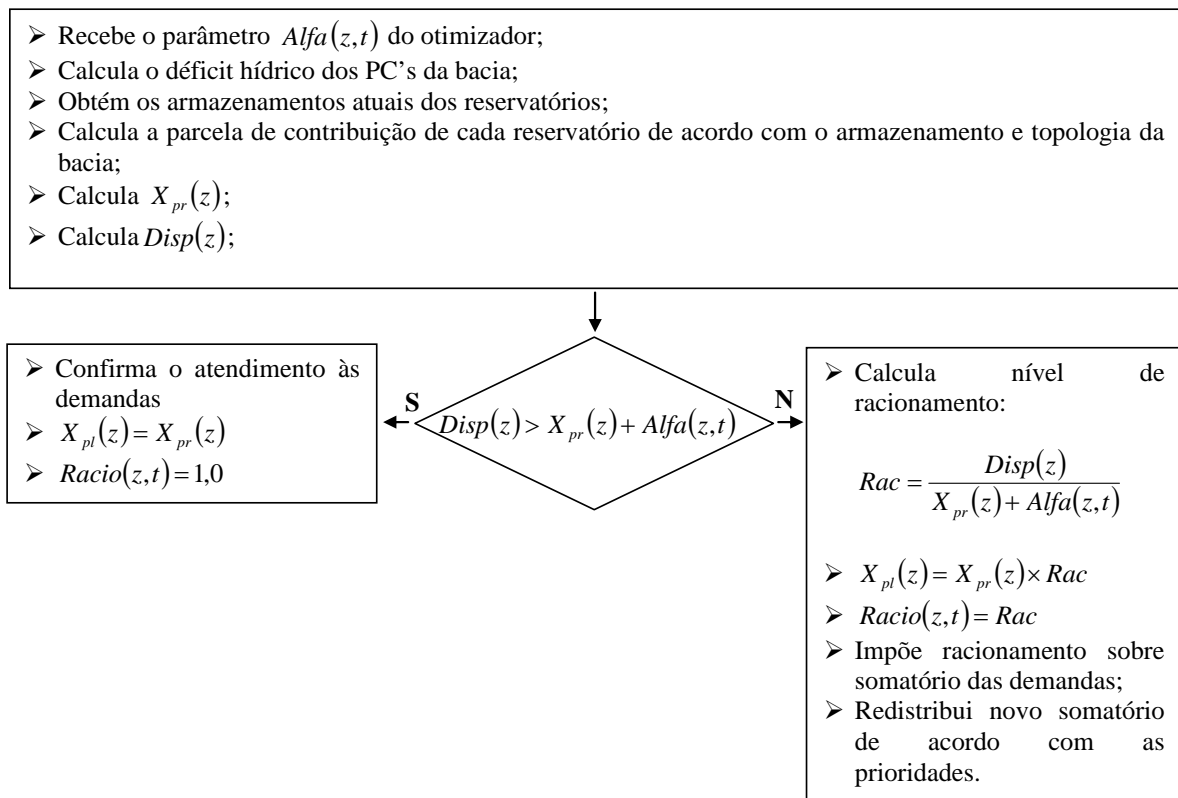


Figura 3.16: Diagrama de fluxo para a regra padrão modificada.

As tarefas a serem executadas, segundo esse diagrama, são traduzidas em Pascal Script e o algoritmo montado na rotina de simulação iterativa do processo de otimização encontra-se nos anexos deste trabalho.

### 3.4.1.2 Fase tática para os PC's sem reservatório

Para os PC's localizados a jusante dos reservatórios considerados estratégicos na bacia, o racionamento é determinado da seguinte forma:

$$RAC = \sum_{z=1}^{NREST} PARC_{z,j} \times RACIO_z \quad 3.1$$

Onde:

- $RAC$  • É o racionamento a ser imposto no somatório das demandas do PC em exame;
- $NREST$  • É o número de reservatórios, considerados estratégicos, localizados a montante do PC em exame;
- $PARC_{z,j}$  • É a matriz de parcelamento de atendimento à demanda, determinada na rotina de simulação, para o reservatório  $Z$  e para o PC  $j$  em exame;
- $RACIO_z$  • É o vetor de racionamento, determinado na rotina de simulação, para o reservatório  $z$ .

O somatório para o cálculo do racionamento só considera os reservatórios estratégicos que se localizam à montante do PC em questão, sendo definidos segundo a topologia da bacia. O racionamento (quando necessário) é então efetuado sobre o somatório das demandas a serem atendidas no PC em questão. Esse somatório é redistribuído de acordo com a prioridade das demandas e de acordo com a disponibilidade hídrica neste intervalo de computação.

Uma vez que os objetos criados no início da rotina (matriz de parcelamento e vetor de racionamento) já tenham sido utilizados, no final da mesma eles devem ser destruídos.

### **3.4.2 Curva Guia**

A regra da curva guia condiciona as descargas dos reservatórios a volumes de referência que devem ser mantidos em cada intervalo de tempo. Esses volumes de referência podem se configurar em volumes mínimos e máximos. Normalmente o objetivo de se definir volumes máximos nos reservatórios diz respeito à manutenção de um volume de espera para controle de cheias. Como a área de aplicação não está sujeita a cheia, a definição de volumes máximos não foi utilizada.

Da mesma forma como já explicado no item 3.4.1 acima, antes de aplicar a regra operacional, as seguintes tarefas são executadas:

1. Obtenção do intervalo de simulação atual;
2. Obtenção do número de intervalos de simulação;
3. Obtenção do número de PC's do projeto;
4. Obtenção do mês e ano correspondentes ao intervalo de tempo da simulação;
5. Inicialização dos objetos PC da rede;
6. Recuperação de variáveis globais que contêm informação a respeito do número de reservatórios estratégicos a montante de cada PC e uma lista com os nomes dos PC's;
7. Recuperação dos objetos definidos como parâmetros da regra operacional;
8. Acesso aos objetos PC e leitura dos valores dos retornos das demandas, das demandas e afluências hídricas;
9. Cálculo dos déficits hídricos de todos os PC's, no intervalo de tempo vigente;
10. Obtenção dos volumes atuais de cada um dos reservatórios;
11. Determinação da disponibilidade hídrica atual das associações de reservatórios e determinação da parcela de contribuição de cada reservatório para o atendimento dos déficits hídricos dos PC's de jusante;
12. Definição da descarga a ser efetivada em cada reservatório através da regra da curva guia;
13. Confirmação das demandas a serem atendidas nos PC's de jusante.

Até a etapa de número 11 relacionada acima, a única que guarda alguma diferença em relação à rotina de aplicação da regra da curva guia é a de número 6, pois, no caso do presente item, os nomes dos parâmetros são outros.

Na etapa de número 7, assim como no item 3.4.1 acima, é realizado o acesso ao objeto parâmetro (da regra da curva guia), definido para o intervalo de tempo atual, e cujo valor é modificado pelo algoritmo de otimização, interno ao PROPAGARMOO.

Uma vez concluídas as etapas descritas acima, passa-se à aplicação da regra operacional propriamente dita na etapa de número 12. Conforme será comentado mais detalhadamente no capítulo de aplicação, a regra da curva guia passou a possuir duas abordagens: na primeira delas a observação de volumes de referência nos reservatórios leva em consideração tão-somente a disponibilidade hídrica de cada reservatório, em cada intervalo de tempo; já a segunda abordagem observa ainda os déficits hídricos mensais a serem efetivamente sanados.

Após a definição das descargas a serem efetuadas, as demandas planejadas das três prioridades recebem os valores totais informados pelo usuário, quando da montagem do projeto em questão. No momento em que o algoritmo interno ao PROPAGARMOO efetivamente executar a simulação, é que se verifica a necessidade ou não de racionamento em cada PC, processo esse que não sofre influência do usuário do sistema.

#### **3.4.2.1 Curva Guia sem avaliação de déficit**

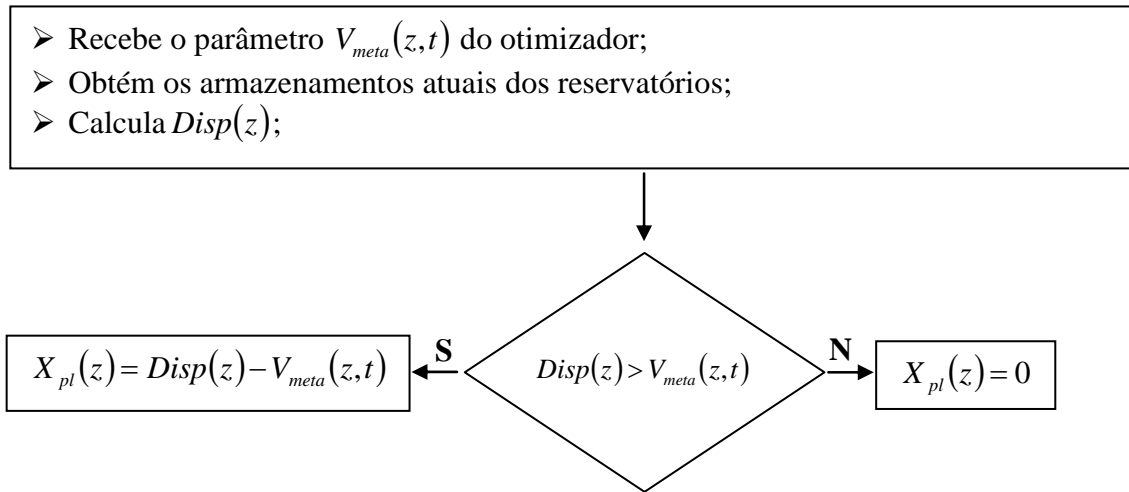
A utilização da Curva Guia sem avaliação de déficit teve como objetivo a implementação de uma regra mais simples que a regra padrão modificada. Assim sendo, quando não se avaliam os déficits hídricos dos PC's, as etapas listadas no item anterior sofrem algumas alterações:

- Na etapa de número 5 apenas os PC's que têm reservatório são inicializados;
- Na etapa de número 6 apenas o objeto global que tem a lista com os PC's da bacia é recuperado;
- As etapas de números 8 e 9 não são executadas;
- Na etapa de número 11 apenas a disponibilidade de cada reservatório é determinada.

Sendo assim, a regra da curva guia sem a verificação dos déficits hídricos segue o diagrama apresentado na figura 3.17, na qual se tem:

- $V_{meta}(z, t)$  • É o parâmetro da regra da curva guia para o reservatório  $z$ , referente ao tempo  $t$ ;
- $Disp(z)$  • Disponibilidade hídrica do reservatório  $z$ , calculada para o intervalo atual da simulação iterativa;
- $X_{pr}(z)$  • É a descarga prevista, para cada reservatório  $z$ , na rotina de simulação, a ser mantida ou alterada após a verificação da necessidade de racionamento;

- $X_{pl}(z)$
- É a descarga planejada, para cada reservatório  $z$ , a ser efetivada após aplicação da regra da curva guia.



**Figura 3.17: Diagrama de fluxo para a regra da curva guia sem verificação dos déficits.**

Os comandos em pascal script que obedecem ao diagrama acima estão reproduzidos nas rotinas descritas nos anexos.

### 3.4.2.2 Curva Guia com avaliação de déficit.

Durante a fase de aplicação, mais detalhada no capítulo seguinte, se notou a necessidade de se agregar à regra da curva guia a verificação dos déficits hídricos a serem supridos pelos reservatórios. A curva guia com verificação dos déficits segue então o diagrama reproduzido na figura 3.18. Os comandos em pascal script que obedecem a esse diagrama também estão nas rotinas reproduzidas nos anexos.

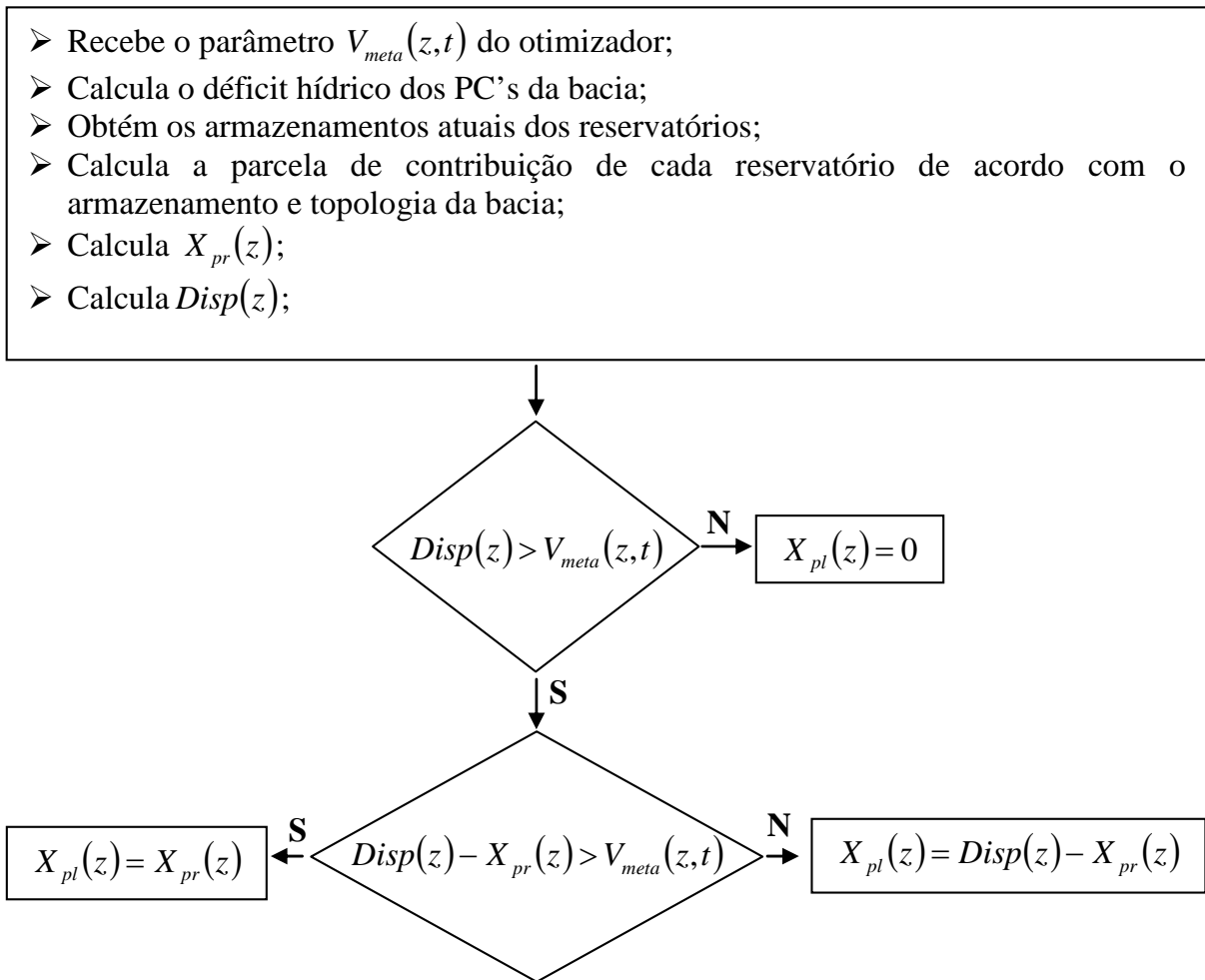


Figura 3.18: Diagrama de fluxo para a regra da curva guia com verificação dos déficits.

### 3.5 Critérios para avaliação do desempenho do sistema

No processo de otimização por procura direta, no qual se objetiva determinar os valores dos parâmetros das regras que condicionam a operação de um sistema de reservatório, necessário se faz que se adotem critérios de avaliação do desempenho desse sistema.

Esses critérios fornecem uma boa descrição do comportamento do sistema, podendo então ser utilizados para avaliar os efeitos causados por diferentes regras de operação preestabelecidas para os reservatórios, ou mesmo auxiliar na avaliação de futuros projetos a serem implantados. Na presente metodologia se fará uso dos chamados índices probabilísticos definidos por HASHIMOTO et alli. (1982). Ou seja: a *confiabilidade*, a *elasticidade* e a *vulnerabilidade*.

Em geral, se utiliza apenas a confiabilidade do sistema para avaliar o seu comportamento. Para tal, se faz necessário minimizar a possibilidade de ocorrerem falhas. Porém, a maneira pela qual seria possível incrementar esse índice acarretaria adoção de medidas estruturais, que, por sua vez, seriam acompanhadas por um custo econômico cada vez mais alto e ainda assim limitadas por fatores físicos e climatológicos.

Assim, uma maneira de melhorar o comportamento do sistema, sem tentar eliminar completamente a possibilidade de falhas, é tentar diminuir o grau de severidade das falhas que porventura ocorram, como também aumentar a capacidade de recuperação do sistema a um estado satisfatório, uma vez que a falha ocorra.

Dessa forma, a inclusão da vulnerabilidade e da elasticidade, como índices de avaliação, se faz necessária para um completo estudo do comportamento do sistema.

Os critérios de avaliação do sistema são calculados para todos os PC's, para o intervalo total de simulação. Embora se pretenda utilizar apenas esses três critérios para a montagem das funções objetivo a serem utilizadas, o autor do presente trabalho optou por utilizar o mesmo algoritmo de cálculo que outrora utilizou em sua dissertação (VIANNA JR. 1998). Assim outros critérios são calculados apesar de seus valores não serem utilizados, neste trabalho, para montagem de outras funções objetivo. Essa opção não traz nenhum prejuízo para o trabalho uma vez que apenas os índices probabilísticos são suficientes para medir o desempenho do sistema de maneira apropriada e sob aspectos diferentes. Além disso, alguns dos índices probabilísticos guardam uma relação direta de correspondência com os outros índices. Assim, por exemplo, a confiabilidade ao ser maximizada, através da minimização da probabilidade de falha, corresponde diretamente à minimização do número de falhas, também calculado. Já a vulnerabilidade, ao ser minimizada, corresponde diretamente à minimização do somatório dos déficits hídricos, outro índice calculado.

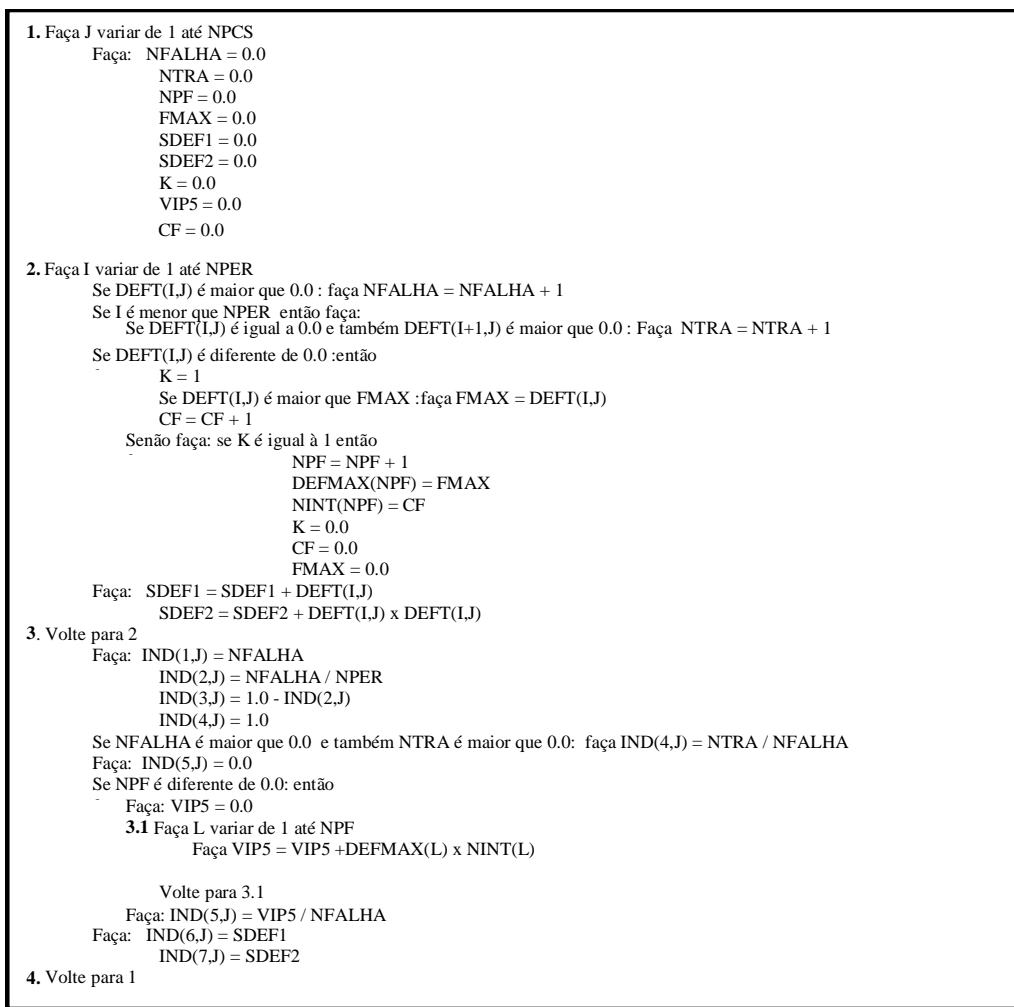
Antes do cálculo dos índices se faz necessário calcular os valores dos déficits hídricos observados nos PC's e para as três prioridades de demanda. A parte do script que executa esses cálculos o faz seguindo as seguintes etapas:

1. Cria as matrizes a serem utilizadas para o cálculo do déficit hídrico observado nos PC's, para as três prioridades de demanda;
2. Cria o vetor para armazenamento do maior déficit observado em cada intervalo contínuo de falhas, para futura utilização no cálculo do índice de vulnerabilidade;
3. Estabelece o nível de tolerância para a não-consideração de uma falha no atendimento;
4. Varredura das três prioridades de demanda estabelecidas para o projeto;
5. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC;
6. Acesso aos valores de demanda planejada e demanda atendida através do objeto PC, verificando se houve déficit no atendimento, para cada uma das prioridades de demanda;
7. Armazenamento na matriz do valor do déficit hídrico observado para cada um dos PC's e para cada uma das prioridades de demanda.

Essas etapas de mensuração dos déficits são executadas na rotina de cálculo da função objetivo, implementada pelo usuário do PROPAGARMOO.



Uma vez calculado os déficits, devem ser calculados os índices probabilísticos. Para tal procedimento pode ser utilizado o algoritmo que está descrito na figura 3.19.



**Figura 3.19: Algoritmo para cálculo dos índices probabilísticos.**

Nesse algoritmo tem-se que:

- |               |   |
|---------------|---|
| <i>NPCS</i>   | • É o número de PC's do sistema;  |
| <i>NPER</i>   | • É o número de intervalos de simulação;  |
| <i>NFALHA</i> | • É o contador de falha no atendimento às demandas (ou de existência de déficit hídrico); |
| <i>NTRA</i>   | • É o contador de intervalo de simulação com falha, precedido por período sem falha;      |
| <i>NPF</i>    | • É o contador de períodos contínuos de falhas;   |
| <i>CF</i>     | • É o contador de falhas em cada intervalo contínuo de falhas;                            |
| <i>FMAX</i>   | • É o registrador, temporário, das maiores falhas em cada período de falha;               |
| <i>VIP5</i>   | • É uma variável auxiliar para o cálculo do índice de vulnerabilidade de cada PC;         |
| <i>SDEF1</i>  | • É o acumulador do somatório dos déficits hídricos;                                      |

<i>SDEF2</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É o acumulador do somatório do quadrado dos déficits hídricos;</li> </ul>
<i>K</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É o indicador de que a computação encontra-se em um período contínuo de falhas;</li> </ul>
<i>DEFT(i, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É a matriz dos valores dos déficits hídricos observados em cada intervalo <math>i</math>, para cada PC <math>j</math>;</li> </ul>
<i>DEFMAX(NPF)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DEFMAX(NPF) é o vetor que armazena a maior falha de cada período contínuo de falhas;</li> </ul>
<i>NINT(NPF)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NINT(NPF) é o vetor que armazena o número de intervalos de cada período contínuo de falhas;</li> </ul>
<i>IND(?, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É a matriz dos valores dos critérios de avaliação para cada PC <math>j</math>;</li> </ul>
<i>IND(1, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores do número de falhas para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(2, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores da probabilidade de falha para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(3, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores da confiabilidade para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(4, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores da elasticidade para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(5, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores da vulnerabilidade para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(6, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores do somatório dos déficits para cada PC;</li> </ul>
<i>IND(7, j)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• São os valores do somatório dos quadrados dos déficits para cada PC.</li> </ul>

Esse algoritmo é executado para todos os PC's e para todas as prioridades de demandas utilizadas neste trabalho, segundo as seguintes etapas:

1. Criação de um vetor para armazenamento dos déficits máximos observados em cada intervalo contínuo de falhas;
2. Obtenção de matrizes e vetor definidos e criados como objetos globais na rotina de iniciação da otimização;
3. Iniciação com valor nulo de algumas variáveis auxiliares;
4. Cálculo e armazenamento dos valores dos índices de desempenho.

O código em linguagem Pascal Script, que cumpre essas etapas segundo o algoritmo apresentado na figura 3.19, é reproduzido nos anexos.

As matrizes criadas e utilizadas nas etapas descritas acima, para as quais não foi necessário criar objetos globais, são destruídas no final da rotina de cálculo da função objetivo.

## 3.6 Montagem das funções objetivo através dos índices probabilísticos

Conforme discutido anteriormente, para se efetuar o processo iterativo de otimização, torna-se necessária a adoção de funções objetivo para avaliar a resposta do sistema quando submetido às variações nos valores das variáveis, que aqui serão os parâmetros de racionamento (regra padrão modificada) ou os níveis de armazenamentos dos reservatórios (regra da curva guia).

Quando se objetiva melhorar o desempenho de um sistema de recursos hídricos, segundo um valor de determinado índice probabilístico, dependendo do índice utilizado, esse melhoramento é traduzido pela minimização ou maximização do seu valor. Por outro lado, todos os algoritmos de procura direta utilizados nessa metodologia buscam tão-somente minimizar o valor da função objetivo utilizada. Assim sendo, ao se escolher um índice, cuja melhora seja condicionada à maximização do seu valor, deve-se utilizar algum artifício para compatibilizar esse fato àquele relacionado ao funcionamento do algoritmo implementado.

### 3.6.1 Somatório das confiabilidades

Quando se busca melhorar o desempenho de um sistema, segundo o índice de confiabilidade, o seu valor deve ser maximizado. Por outro lado, maximizar a confiabilidade tem o mesmo significado que minimizar a ocorrência de falhas no atendimento às demandas, ou a probabilidade desta vir a ocorrer.

Como o algoritmo de otimização está de tal forma estruturado que busca sempre minimizar o valor da FO, busca-se maximizar o valor da confiabilidade do sistema, minimizando o somatório ponderado dos maiores valores de probabilidade de falha de cada demanda. Esse objetivo é traduzido pela seguinte expressão:

$$\max FO2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 P_i \times [\max(\eta_i)] \right\} \quad 3.2$$

Onde:

- $P_i$  • É um fator de ponderação para a demanda  $i$  ;
- $\max(\eta_i)$  • É o valor máximo encontrado, para a probabilidade de falha ao atendimento à demanda de prioridade  $i$ , entre todos os PC's.

### 3.6.2 Somatório das elasticidades

Da mesma maneira que ocorre com o índice de confiabilidade, aqui também, quando se busca melhorar o desempenho do sistema segundo o índice de elasticidade, este deve ter o seu valor maximizado.

Aqui, para maximizar o índice de elasticidade do sistema, no atendimento às demandas, utilizou-se o artifício de minimizar o inverso algébrico da elasticidade. Esse objetivo corresponde à seguinte expressão:

$$\max FO3 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 (-1) \times P_i \times [\min(\varphi_i)] \right\} \quad 3.3$$

Onde:

- $P_i$  • É um fator de ponderação para a demanda  $i$ ;
- $\min(\varphi_i)$  • É o valor mínimo encontrado para a elasticidade no atendimento à demanda de prioridade  $i$ , entre todos os PC's.

### 3.6.3 Somatório das vulnerabilidades

Quando se busca melhorar o desempenho do sistema segundo o índice de vulnerabilidade, este deve ter o seu valor minimizado. Assim sendo, aqui o que se busca é minimizar os três maiores índices de vulnerabilidade, no atendimento às demandas. Esse objetivo então corresponde à seguinte expressão:

$$\min FO4 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 P_i \times [\max(\gamma_i)] \right\} \quad 3.4$$

Onde:

- $P_i$  • É um fator de ponderação para a demanda  $i$ ;
- $\max(\gamma_i)$  • É o valor máximo encontrado, para a vulnerabilidade no atendimento à demanda de prioridade  $i$ , entre todos os PC's.

## 3.7 Modelo de PL Adotado

O modelo adotado tem o objetivo específico de atender às demandas hídricas associadas em todos os PC da bacia, levando em conta o grau de prioridade no atendimento das mesmas,

determinando ainda as descargas e volumes mensais operados pelos três reservatórios da bacia, através da técnica de programação linear (PL) determinística. Esse modelo maximiza o somatório ponderado das demandas primárias, secundárias e terciárias atendidas mensalmente.

A montagem do modelo de PL será, então, realizada através de um script que utiliza todas as vantagens do acesso aos objetos contidos no projeto da Bacia do Rio Curu utilizado. Além disso, todas as restrições e a função objetivo são montadas e registradas num editor de texto implementado no PROPAGARMOO durante a execução do presente trabalho. Para escrever alguma informação literal no referido editor, é utilizado um comando próprio em *pascal script*.

O script então possui uma série de variáveis que são definidas através de declarações, podendo ser dos tipos, *integer*, *real*, *string*, ou *object*.

Uma vez que as variáveis a serem utilizadas pelo script tenham sido definidas, os valores de algumas delas devem ser previamente informados para utilização nos comandos do resto do script. Algumas dessas variáveis são utilizadas para definir as seguintes informações:

1. Variável para esvaziar uma equação literal;
2. O ano inicial de análise;
3. O número de anos da análise;
4. O número de intervalos mensais de análise;
5. Os intervalos mensais, inicial e final
6. O número de PC's do projeto.

Essas informações são introduzidas ou acessadas através de objetos do projeto montado no PROPAGARMOO. As explicações sobre a formulação da função objetivo e das restrições utilizadas estão discutidas nos itens a seguir.

### 3.7.1 Função objetivo

Conforme comentário anterior, o objetivo do modelo de PL é determinar as descargas e armazenamentos dos reservatórios de maneira a atender às demandas associadas aos PC's da bacia, levando em conta ainda a prioridade de cada uma delas. Assim sendo, a formulação da função objetivo será assim representada:

$$FO = \sum_{t=1}^{N_{int}} \sum_{j=1}^{NPCs} \sum_{k=1}^3 P(k) \times D(k, j, t) \quad 3.5$$

Onde:

- $FO$  • Função objetivo a ser maximizada no modelo de PL;
- $N_{int}$  • Número de intervalos mensais da ótica de análise do modelo de PL;
- $NPCs$  • Número de PC's do projeto estruturado no PROPAGARMOO;
- $P(k)$  • Peso atribuído à demanda de prioridade  $k$ .

Como a atribuição dos pesos tem o objetivo de estabelecer, inequivocamente, a diferença de prioridade entre as demandas, os valores adotados na metodologia foram tais, que o atendimento à demanda primária é considerado 100 vezes mais “importante” que o atendimento à demanda secundária que, por sua vez, tem seu atendimento considerado 100 vezes mais importante que o atendimento à demanda terciária.

De forma a aproveitar a potencialidade dos comandos em Pascal Script e generalizar o máximo possível a montagem da função objetivo, a parte do script que realiza essas tarefas possui as seguintes etapas:

1. Registro no modelo das palavras reservadas *MAX* e *FO*;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC;
3. Verificação do número de demandas associadas a cada PC;
4. Varredura das demandas e acesso seqüencial a cada um dos objetos Demanda;
5. Identificação da prioridade da demanda;
6. Varredura dos intervalos de tempo e montagem da equação para cada prioridade;
7. Registro da equação editor de texto.

### 3.7.2 Restrição física do balanço hídrico em todos os PC's

A restrição física principal de todo modelo de PL trata-se, naturalmente, de um balanço de massa em cada PC da bacia. Em outras palavras, em cada ponto característico, o somatório de toda a água que a ele aflui deve ser igual ao somatório de toda a água que dele deflui.

Assim, para um PC que tenha reservatório, a restrição de balanço hídrico pode ser assim representada:

$$S(j,t) - S(j,t+1) + P(j,t) - E(j,t) + Q_M(j,t) - D(j,t) - Q_J(j,t) + Q_{SB}(j,t) = 0 \quad 3.6$$

Onde:

- $S(j,t)$  • Este termo corresponde ao armazenamento inicial no PC  $j$ , no intervalo  $t$ . É uma variável de decisão que tem o seu valor nulo nos PC's que não possuem reservatórios, tendo ainda limitações máximas e mínimas, ou outras, como por exemplo, derivadas de políticas

- operacionais;
- $S(j, t+1)$  • Este termo corresponde ao armazenamento (final) no PC  $j$ , no intervalo  $t+1$ . Também é uma variável de decisão sujeita às mesmas limitações já comentadas;
  - $P(j, t)$  • Este termo diz respeito ao cálculo da precipitação sobre a superfície líquida do reservatório. Seu valor é nulo em se tratando de PC's que não possuam reservatório. Posteriormente deveremos tratar desse termo desenvolvendo-o em função da variação do armazenamento;
  - $E(j, t)$  • Este termo diz respeito ao cálculo da evaporação da superfície líquida do reservatório. Seu valor é nulo em se tratando de PC's que não possuam reservatório. Também deveremos tratar desse termo desenvolvendo-o em função da variação do armazenamento;
  - $Q_M(j, t)$  • Este termo se refere ao deflúvio dos Pontos Característicos localizados imediatamente à jusante do PC. Deverá ser desmembrado para corresponder ao somatório dos deflúvios e dos retornos das demandas atendidas;
  - $D(j, t)$  • Este termo se refere ao somatório das demandas a serem atendidas pelo PC em questão. Funcionará como variável de decisão, devendo ser desmembrada conforme as diversas prioridades de demandas a serem atendidas;
  - $Q_J(j, t)$  • Este termo se refere ao deflúvio de cada Ponto de passagem. Se o PC for reservatório, corresponde ao vertimento ou descarga operados;
  - $Q_{SB}(j, t)$  • Este termo se refere à vazão incremental ao PC em questão. Por ser um valor conhecido, em se tratando de uma abordagem determinística, deve ter o seu valor acumulado no chamado termo de disponibilidade, do lado direito da equação de restrição, conforme a formulação de programação linear.

Conforme esses comentários, a equação anterior, em se tratando de um PC sem reservatório, teria o seguinte aspecto:

$$Q_M(j, t) - D(j, t) - Q_J(j, t) + Q_{SB}(j, t) = 0 \quad 3.7$$

Ainda, de acordo com o exposto acima, temos que:

$$Q_M(j, t) = Q_J(j-1, t) + R(j-1, t) \quad 3.8$$

A qual, na formulação própria da PL, deverá ser assim apresentada:

$$Q_M(j, t) - Q_J(j-1, t) - R(j-1, t) = 0 \quad 3.9$$

Onde

$Q_j(j-1,t)$  • Este termo se refere ao deflúvio do PC de montante.

$R(j-1,t)$  • Este termo se refere ao retorno das demandas atendidas no PC de montante.

Em Pascal Script foi criado um método que varre automaticamente toda a rede montada para a Bacia na área de projeto do PROPAGARMOO, identificando quando um PC é, ou não, reservatório, além da própria estrutura hierárquica da rede. Esse método tem como parâmetro de entrada o intervalo de tempo, com a seguinte sintaxe:

*Projeto.Equacoes\_GerarBalancoHidrico(iInt);*

Esse método foi criado no intuito de facilitar o trabalho do usuário, com pouca experiência, que quiser montar o seu modelo de PL. Uma vez adquirida essa experiência, tal usuário pode passar a utilizar outros métodos já disponíveis em Pascal Script, reduzindo a necessidade de utilização de algumas variáveis e restrições, deixando assim o modelo de PL mais enxuto. A utilização do método de montagem automática, da restrição de balanço hídrico, num projeto do PROPAGARMOO resultará na montagem, por exemplo, para um determinado intervalo de tempo, das seguintes equações:

E1)  $QM011 = 0.0$   
E2)  $SF011 + SI011 + PR011 - EV011 + QM011 - DM011 - QJ011 = - 832982.4$   
E3)  $QM091 = 0.0$   
E4)  $SF091 + SI091 + PR091 - EV091 + QM091 - DM091 - QJ091 = - 715132.8$   
E5)  $QM071 = 0.0$   
E6)  $SF071 + SI071 + PR071 - EV071 + QM071 - DM071 - QJ071 = - 1486512.0$   
E7)  $QM021 - QJ011 - RT011 = 0.0$   
E8)  $QM021 - DM021 - QJ021 = - 24105.6$   
E9)  $QM101 - QJ091 - RT091 = 0.0$   
E10)  $QM101 - DM101 - QJ101 = - 24105.6$   
E11)  $QM031 - QJ021 - RT021 = 0.0$   
E12)  $QM031 - DM031 - QJ031 = - 168739.2$   
E13)  $QM041 - QJ031 - RT031 = 0.0$   
E14)  $QM041 - DM041 - QJ041 = - 0$   
E15)  $QM051 - QJ041 - RT041 = 0.0$   
E16)  $QM051 - DM051 - QJ051 = - 144633.6$   
E17)  $QM061 - QJ051 - RT051 = 0.0$   
E18)  $QM061 - DM061 - QJ061 = - 96422.4$   
E19)  $QM081 - QJ071 - QJ061 - RT071 - RT061 = 0.0$   
E20)  $QM081 - DM081 - QJ081 = - 179452.8$   
E21)  $QM111 - QJ101 - QJ081 - RT101 - RT081 = 0.0$   
E22)  $QM111 - DM111 - QJ111 = - 24105.6$

As equações de E1 até E6 se referem a PC's com reservatórios e de hierarquia 1 (um), o que levou o método em questão a, automaticamente, determinar que a vazão de montante aos PC's em questão tem valor nulo. Já as demais equações se referem a PC's sem reservatório,



para os quais, como possuem hierarquia superior a 1 (um), a vazão de montante está relacionada à vazão defluente e ao retorno das demandas atendidas. Como no caso das restrições E19 e E21, o método identifica automaticamente quais PC's possuem mais de um PC de jusante ligado ao mesmo.

As variáveis do modelo possuem as duas primeiras letras relacionadas ao termo do balanço a que se referem, os dois primeiros dígitos relativos ao número do PC e os demais dígitos relativos ao intervalo de tempo (neste caso aparece apenas o dígito 1 relativo ao primeiro intervalo de tempo).

### 3.7.3 Restrição relativa à definição das demandas em cada PC

Uma vez que a equação de balanço hídrico tenha sido montada, alguns termos devem ser desmembrados dando origem a novas restrições. A restrição devido à demanda atendida em cada PC pode ter a seguinte representação:

$$D(j,t) = \sum_{k=1}^3 D(k,j,t) \quad 3.10$$

Onde:

$$\sum_{k=1}^3 D(k,j,t) \quad \bullet \text{ Este termo se refere ao somatório das demandas de prioridade primária, secundária e terciária, a serem atendidas em cada PC. Deve-se levar em conta que nem todos os PC's possuem as três prioridades.}$$

Em se tratando da formulação do modelo de PL, a equação anterior deverá tomar a seguinte estrutura:

$$D(j,t) - \sum_{k=1}^3 D(k,j,t) = 0 \quad 3.11$$

No modelo de PL a ser montado, o aspecto dessa restrição, em se tratando de um PC que tenha as três prioridades, tomará o seguinte aspecto:

$$DMD0150) DM0150 - DS0150 - DT0150 - DP0150 = 0.0$$

Essa restrição responde pela definição das demandas a serem atendidas no intervalo de tempo 50, no PC01, que tem todas as três prioridades.

A parte do script que realiza a tarefa de montagem da restrição relativa à definição das demandas em cada PC possui as seguintes etapas sequenciais:

1. Varredura dos intervalos de tempo;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC;
3. Identificação da quantidade e do tipo (prioridade) de cada demanda de cada PC;
4. Montagem e registro da equação de definição das demandas no editor de texto.

### 3.7.4 Restrição relativa à definição dos retornos das demandas de cada PC

Essa restrição diz respeito ao fato de que os retornos (parcela não-consuntiva) das demandas atendidas em cada PC ficam automaticamente disponíveis para os PC's imediatamente a jusante. Assim sendo, o desmembramento do termo relativo ao retorno de cada PC (para jusante) fica assim representado:

$$R(j,i) = \sum_{k=1}^3 coef_k \times D(k, j, t) \quad 3.12$$

Onde:

- $coef_k$  • Este termo se refere ao coeficiente de demanda não-consuntiva de cada prioridade de demanda

A expressão acima deverá ficar com a seguinte estrutura:

$$R(j,i) - \sum_{k=1}^3 coef_k \times D(k, j, t) = 0 \quad 3.13$$

No modelo de PL a ser montado, o aspecto dessa restrição, em se tratando de um PC que tenha as três prioridades, porém com uso não-consuntivo para duas delas, tomará o seguinte aspecto:

$$RTN01298) RT01298 - 0.1 DT01298 - 0.6 DP01298 = 0.0$$

Essa restrição responde pela definição do retorno das demandas a serem atendidas no intervalo de tempo 298, no PC01. Nesse caso, a demanda terciária tem índice não-consuntivo igual a 0,1 e a primária igual a 0,6.

A parte do script que realiza a montagem do bloco de definição dos retornos das demandas em cada PC possui as seguintes etapas:

1. Varredura dos intervalos de tempo;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC, evitando montar a restrição para o último PC da rede;
3. Identificação da quantidade e do tipo (prioridade) de cada demanda de cada PC;
4. Acesso a cada um dos objetos Demanda e verificação se o fator de retorno é não-nulo;
5. Montagem e registro da equação de definição do retorno das demandas de cada PC no editor de texto.

### **3.7.5 Restrição relativa à relação entre os armazenamentos final e inicial de cada reservatório**

Conforme descrito no item 3.7.2 acima, o método de montagem automática do balanço hídrico utiliza duas variáveis para identificar os armazenamentos finais e iniciais de cada PC com reservatório. Usuários mais experientes podem utilizar apenas a mudança dos dígitos relativos ao intervalo de tempo para diferenciar essas variáveis.

No caso da utilização do método de montagem automática, uma restrição que igualará o armazenamento final no tempo  $t$  ao armazenamento inicial do tempo  $t+1$  terá que ser adicionada ao modelo e essa restrição tomará o seguinte aspecto:

$$ARM09316) SI09316 - SF09315 = 0.0$$

Essa restrição responde pela igualdade do armazenamento inicial no intervalo 316 ao armazenamento final no intervalo 315, do PC 09.

A montagem do bloco de definição da restrição discutida no presente item possui as seguintes etapas executadas seqüencialmente:

1. Varredura dos intervalos de tempo;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC, verificando se se trata de um reservatório;
3. Verificação se se trata do intervalo de tempo inicial. Caso seja, monta a restrição que define o armazenamento inicial do reservatório no intervalo de tempo inicial;
4. Em caso contrário, monta a restrição que define a igualdade entre os armazenamentos inicial e final;
5. Registro da equação de restrição dos armazenamentos no editor de texto.

Caso seja necessário, pode-se introduzir alguma restrição relativa aos armazenamentos finais dos reservatórios no último intervalo de tempo. No presente trabalho não se adotou essa possibilidade.

### 3.7.6 Restrição relativa à relação entre os valores de precipitação, evaporação e armazenamento de cada reservatório

A evaporação e a precipitação são, na realidade, funções não-lineares do armazenamento no reservatório. Porém essa dificuldade pode ser evitada se for aceitável a sua linearização. Assim, uma das abordagens possíveis é a adoção de uma relação linear entre a área da superfície e o armazenamento (volume) de um reservatório (PILAR, 1998). Tem-se então uma relação do tipo:

$$\text{Área}(j,t) = a + b \left( \frac{S(j,t) + S(j,t+1)}{2} \right) \quad 3.14$$

Onde:

- $\text{Área}(j,t)$  • É a área da superfície líquida do reservatório  $j$  no intervalo de tempo  $t$ ;
- $a$  • É o coeficiente linear da relação entre área e volume do reservatório;
- $b$  • É o coeficiente angular da relação entre área e volume do reservatório.

Sabe-se ainda que:

$$P(j,t) = p_r(j,t) \times \text{Área}(j,t) \quad 3.15$$

$$E(j,t) = e_r(j,t) \times \text{Área}(j,t) \quad 3.16$$

Onde:

- $p_r(j,t)$  • É a taxa de precipitação mensal para o reservatório  $j$  no intervalo de tempo  $t$ ;
- $e_r(j,t)$  • É a taxa de evaporação mensal para o reservatório  $j$  no intervalo de tempo  $t$ .

As equações anteriormente descritas serão organizadas para dar origem às seguintes relações, já na formulação padrão de PL, entre a evaporação, precipitação e os armazenamentos para cada reservatório:

$$P(j,t) - CBP \times S(j,t+1) - CBP \times S(j,t) = CAP \quad 3.17$$

$$E(j,t) - CBE \times S(j,t+1) - CBE \times S(j,t) = CAE \quad 3.18$$

Onde:

$$\begin{aligned}
CBP &= 0,5 \times p_r(j,t) \times b \\
CAP &= p_r(j,t) \times a \\
CBE &= 0,5 \times e_r(j,t) \times b \\
CAE &= e_r(j,t) \times a
\end{aligned}
\tag{3.19}$$

Essas restrições tomarão o seguinte aspecto no modelo de PL:

$$EVP0187) EV0187 - 0.0051 SI0187 - 0.0051 SF0187 = 291188.829$$

$$PRC0187) PR0187 - 0.0081 SI0187 - 0.0081 SF0187 = 464074.263$$

Essas restrições respondem pela relação entre evaporação e precipitação e a variação do armazenamento no intervalo 187, do PC 01.

A montagem do bloco de definição da restrição relativa à relação entre precipitação, evaporação e armazenamento é executada seqüencialmente segundo as seguintes etapas:

1. Iniciação de parte dos coeficientes relativos à evaporação e precipitação em cada reservatório, com o devido ajuste de milímetro para metro;
2. Varredura dos intervalos de tempo;
3. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC, verificando se se trata de um reservatório;
4. Montagem da restrição que define a relação entre a evaporação e os armazenamentos inicial e final de cada reservatório, com a devida utilização da informação da taxa de evaporação unitária contida no objeto PC;
5. Registro da equação de restrição da evaporação no editor de texto
6. Montagem da restrição que define a relação entre a precipitação e os armazenamentos inicial e final de cada reservatório, com a devida utilização da informação da taxa de precipitação unitária contida no objeto PC;
7. Registro da equação de restrição da precipitação no editor de texto.

### **3.7.7 Restrição relativa ao valor máximo das demandas a serem atendidas mensalmente**

Algo que se tem que levar em conta é que, uma vez, que na função objetivo a ser maximizada, quanto maior for a prioridade das demandas, maior serão os valores dos coeficientes das variáveis relativas às mesmas, o modelo de PL, ao ser executado, tenderá a atribuir a essas variáveis os maiores valores possíveis. Assim sendo, será necessário limitar essas variáveis aos valores das demandas planejadas, em cada intervalo de tempo.

No software LINDO, assim como em outros softwares de programação linear, existem palavras reservadas que determinam esse limite sem a necessidade de utilização de equações

de restrição para isso. No caso do LINDO, a palavra reservada para valores máximos é SUB (Sub Upper Bound). Após o término do modelo de PL, todas as variáveis que tiverem limite superior devem ser listadas com a palavra SUB antes da mesma e o valor máximo depois. Por exemplo:

*SUB DS1175 11249.28*

Essa instrução limita automaticamente a variável da demanda secundária do PC 11, no intervalo 75, a um valor máximo de 11249,28  $m^3$ .

Para a conversão da demanda planejada de  $m^3/s$  para  $m^3$  por intervalo de tempo (no caso presente mensal) se achou por bem considerar inclusive as diferenças de meses com 28, 29, 30 e 31 dias.

A montagem do bloco de definição dos valores máximos das demandas é feita segundo as seguintes etapas:

1. Iniciação das variáveis que conterão a quantidade de segundos em meses de 28, 29, 30 e 31 dias;
2. Varredura dos intervalos de tempo, com verificação de quantos dias em o intervalo, para a escolha do conversor de  $m^3/s$  para  $m^3$  por intervalo apropriado;
3. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC;
4. Identificação da quantidade de demandas de cada PC;
5. Acesso a cada um dos objeto Demanda e verificação do valor planejado para mesma;
6. Montagem e registro do termo de definição do valor máximo das demandas de cada PC, de cada intervalo de tempo, no editor de texto.

### **3.7.8 Restrição relativa ao valor máximo dos armazenamentos**

Uma das restrições físicas a que estão sujeitos os reservatórios é a sua capacidade máxima em cada intervalo de tempo. Da mesma forma que no item anterior, aqui também se pode fazer uso da palavra reservada SUB, para evitar a utilização de equações de restrição. Um exemplo dessa utilização seria:

*SUB SF07319 395638000*

Essa linha de instrução num arquivo de PL indica que o valor máximo do armazenamento do reservatório do PC 07 é de 395638000  $m^3$  no intervalo de tempo 319.

A montagem do bloco de definição dos valores máximos dos armazenamentos dos reservatórios é feita segundo as seguintes etapas:

1. Varredura dos intervalos de tempo;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC, verificando se se trata de um reservatório;
3. Acesso ao valor de seu armazenamento máximo com Montagem e registro do termo de definição do valor máximo do armazenamento de cada PC (reservatório), de cada intervalo de tempo, no editor de texto.

### **3.7.9 Restrição relativa ao valor mínimo dos armazenamentos**

Assim como os armazenamentos dos reservatórios devem ser limitados a um valor máximo, também deve haver um valor mínimo em cada intervalo de tempo. Essa limitação então pode ser feita através da palavra reservada SLB (Sub Lower Bound).

Um exemplo dessa utilização seria:

```
SLB SF07319 18500000
```

Esta linha de instrução num arquivo de PL indica que o valor mínimo do armazenamento do reservatório do PC 07 é de 18500000  $m^3$  no intervalo de tempo 319.

A montagem do bloco de definição dos valores mínimos dos armazenamentos dos reservatórios é feita segundo as seguintes etapas:

1. Varredura dos intervalos de tempo;
2. Varredura dos PC's da rede e acesso seqüencial a cada um dos objetos PC, verificando se se trata de um reservatório;
3. Acesso ao valor de seu armazenamento mínimo com montagem e registro do termo de definição do valor mínimo do armazenamento de cada PC (reservatório), de cada intervalo de tempo, no editor de texto.

## **3.8 Obtenção de regras operacionais do resultado do modelo de PL**

No modelo de PL determinístico montado, as variáveis de decisão estão relacionadas às demandas (de três prioridades diferentes) atendidas em cada PC, e aos armazenamentos e descargas mensais em cada reservatório.

Embora a seqüência de armazenamentos e descarga se configure em valores “ótimos”, uma vez que a mesma é constituída da melhor opção de valores para a maximização da função objetivo, não se pode afirmar que se configure numa regra de operação ótima para os reservatórios. Essa afirmação está ligada ao fato de que os dados utilizados para a montagem do modelo, como precipitação, evaporação e vazões incrementais, são dados históricos e a

única certeza é que os mesmos não voltarão a ocorrer. O que se espera da pluviometria e fluviometria futura da bacia é que a mesma “repita” o comportamento médio do passado.

Assim sendo, o que se deve fazer com relação à solução do modelo de PL é a abstração de regras operacionais que melhor representem a relação entre as variáveis de decisão, principalmente descargas e armazenamentos dos reservatórios, passando então a adotar uma abordagem implicitamente estocástica.

Foram escolhidas 3 (três) metodologias distintas de obtenção de regras operacionais e a seguir é detalhado qual a relação entre as mesmas e as variáveis do modelo.

Uma vez obtidas essas regras operacionais as mesmas devem ser simuladas no PROPAGARMOO de maneira a verificar os valores dos índices de desempenho obtidos com as mesmas e compará-los com os valores obtidos pelas regras operacionais otimizadas pelos algoritmos de busca direta anteriormente implementados.

### 3.8.1 Regra Padrão Modificada

Uma vez que a regra padrão modificada estabelece racionamentos preventivos nas descargas dos reservatórios, para determinar essa regra através da solução do modelo de PL, o procedimento a ser adotado deve constar das seguintes etapas:

1. Organização em uma planilha, dos valores das variáveis do modelo que definem as descargas dos reservatórios em cada intervalo de tempo;
2. Organização, na mesma planilha, dos valores das descargas determinadas pela simulação da operação dos reservatórios, submetidos à regra padrão de decisão;
3. Determinação do valor do racionamento mais característico, no conjunto de dados mensais de descarga dos reservatórios, comparando-se os valores obtidos pela simulação com os obtidos pelo modelo de PL.

### 3.8.2 Descargas como função das disponibilidades dos reservatórios

Nesta metodologia o que se buscou foi estabelecer uma relação entre a descarga de cada um dos três reservatórios e a disponibilidade hídrica do sistema. Assim essa relação pode ser definida pela seguinte expressão matemática:

$$X_{j,t} = a_t + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad \text{com } j = 1 \dots 3 \text{ e } t = 1 \dots 12 \quad 3.20$$

Onde:



- $X_{j,t}$  • É a descarga de cada reservatório  $j$ , em cada intervalo de tempo  $t$ ;
- $a_t, b_t, c_t, d_t$  • Coeficientes determinados por regressão simples ou múltipla;
- $Disp_{j,t}$  • É a disponibilidade de cada reservatório  $j$ , em cada intervalo de tempo  $t$ .

A relação anterior é desmembrada em duas possibilidades: na primeira a descarga de cada reservatório depende apenas da sua própria disponibilidade, e na segunda depende das disponibilidades dos três reservatórios. Haverá ainda a possibilidade de realizar a regressão considerando o coeficiente  $a_t$  nulo, ou não-nulo.

Quando for utilizada a regressão simples, a descarga de cada reservatório será definida em função apenas de sua própria disponibilidade e assim teremos as seguintes relações possíveis, para cada intervalo de tempo mensal:

$$X_{1,t} = a_t + b_t \times Disp_{1,t} + 0 \times Disp_{2,t} + 0 \times Disp_{3,t} \quad 3.21$$

$$X_{1,t} = 0 + b_t \times Disp_{1,t} + 0 \times Disp_{2,t} + 0 \times Disp_{3,t} \quad 3.22$$

$$X_{2,t} = a_t + 0 \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + 0 \times Disp_{3,t} \quad 3.23$$

$$X_{2,t} = 0 + 0 \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + 0 \times Disp_{3,t} \quad 3.24$$

$$X_{3,t} = a_t + 0 \times Disp_{1,t} + 0 \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.25$$

$$X_{3,t} = 0 + 0 \times Disp_{1,t} + 0 \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.26$$

Quando for utilizada a regressão múltipla, a descarga de cada reservatório será definida em função da disponibilidade de todos os reservatórios e assim teremos as seguintes relações possíveis, para cada intervalo de tempo mensal:

$$X_{1,t} = a_t + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.27$$

$$X_{1,t} = 0 + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.28$$

$$X_{2,t} = a_t + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.29$$

$$X_{2,t} = 0 + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.30$$

$$X_{3,t} = a_t + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.31$$

$$X_{3,t} = 0 + b_t \times Disp_{1,t} + c_t \times Disp_{2,t} + d_t \times Disp_{3,t} \quad 3.32$$

### 3.8.3 Curva Guia

A regra da curva guia se caracteriza pela adoção de um volume que deve ser mantido, em cada reservatório do sistema, em cada intervalo de tempo. Assim sendo, é razoável

acreditar que, se os valores das variáveis relativas aos armazenamentos dos reservatórios forem organizados mês a mês, cada um desses conjuntos pode fornecer informações que levem a obter os valores dos parâmetros da curva guia, através de medidas de tendência central. Entre essas medidas têm-se:

1. Média;
2. Moda;
3. Média harmônica;
4. Média geométrica.

## **4 APLICAÇÃO E RESULTADOS**

Neste capítulo estão descritos as etapas de aplicação da metodologia e os resultados obtidos. Em primeiro lugar se explicará as etapas da aplicação da MOO para a implementação das ferramentas de otimização no PROPAGARMOO e seus resultados e depois a própria aplicação dessas ferramentas na otimização de regras operacionais para um sistema de reservatórios.

### **4.1 Etapas da aplicação da metodologia**

Como no capítulo de metodologia, e tendo em vista os objetivos buscados, foi conveniente dividir em duas partes distintas esta fase do presente trabalho.

Numa primeira etapa se realizou, através da modelagem orientada a objetos, a implementação de ferramentas de otimização num sistema de apoio a decisões aplicado a recursos hídricos. O sistema em foco se trata do SAGBAH – Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas – sistema este voltado a analisar a adequação de políticas de gerenciamento de bacias hidrográficas (LANNA, 1993). Esse sistema vem sendo objeto e ferramenta de estudos de uma série de pesquisas realizadas por alunos de mestrado e doutorado no IPH – UFRGS. Vários de seus modelos componentes vêm tendo a sua estrutura modificada através de dissertações, teses e projetos levados a cabo sob a orientação e coordenação do professor PhD Antônio Eduardo Leão Lanna. Entre esses modelos se destaca o PROPAGARMOO, totalmente reestruturado sob o paradigma da MOO, resultado de uma tese anteriormente defendida no IPH. (VIEGAS, 2000).

O PROPAGARMOO, assim como a sua versão em linguagem FORTRAN, destina-se a simular a propagação de vazões numa bacia sujeita às decisões gerenciais de atendimento a demandas e a operação de reservatórios.

Numa segunda fase se realizou a utilização das ferramentas de otimização implementadas no PROPAGARMOO com o objetivo de propor, testar e comparar metodologias de otimização de regras operacionais para um sistema de reservatórios.

Essas duas etapas estarão descritas nos itens que se seguem.

## 4.2 Resultado da aplicação da MOO na implementação de ferramentas de otimização no PROPAGARMOO

Através da utilização da Modelagem Orientada a Objetos, foram agregados ao PROPAGARMOO dois algoritmos de otimização por procura direta: o algoritmo genético mono-objetivo SCE-UA e o algoritmo genético multi-objetivo MOCOM-UA. Além disso, foram agregados um editor de modelos de Programação Linear e um conversor de modelos lineares para o formato MPS.

A área de projeto do PROPAGARMOO está reproduzida na figura 4.1, onde deve ser definida a rede de drenagem do projeto a ser utilizado no processo de otimização e/ou simulação.

O que otimizar será alvo da escolha do analista de recursos hídricos como também a técnica a ser utilizada. No presente trabalho se buscou otimizar regras operacionais para os reservatórios considerados estratégicos na bacia, através dos algoritmos genéticos mono e multi objetivos e através de modelos de programação linear.

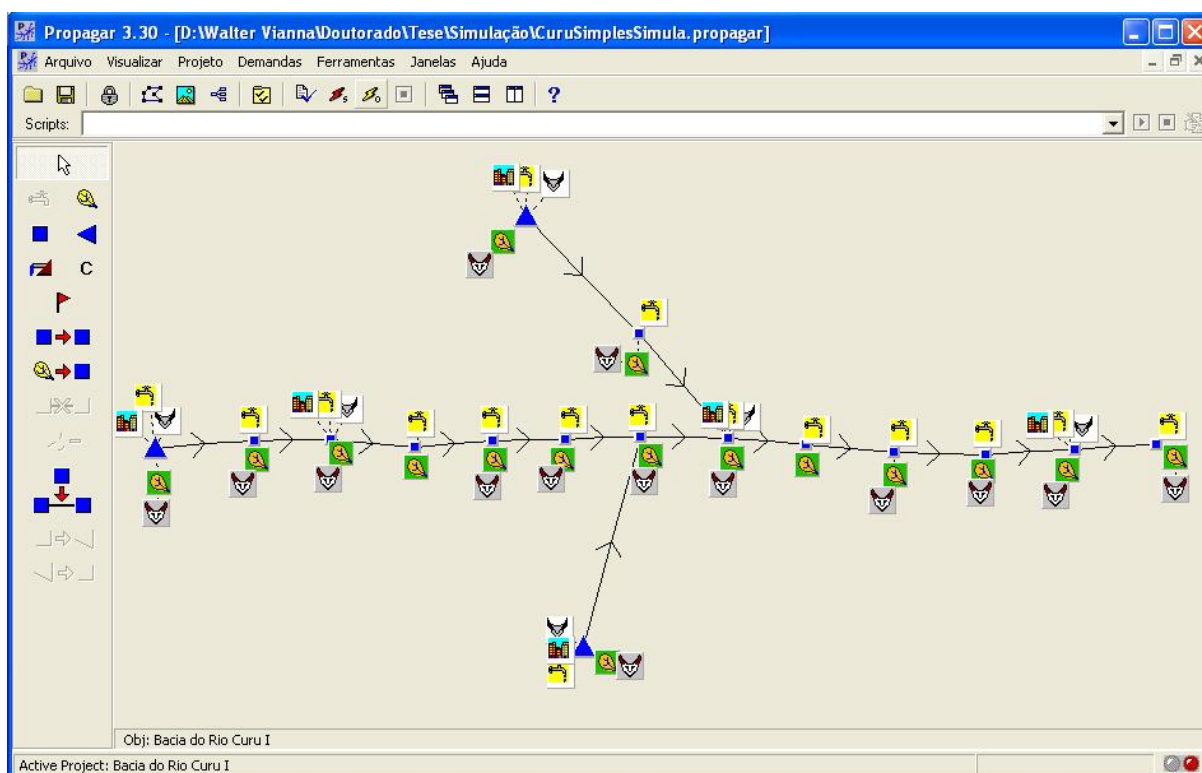
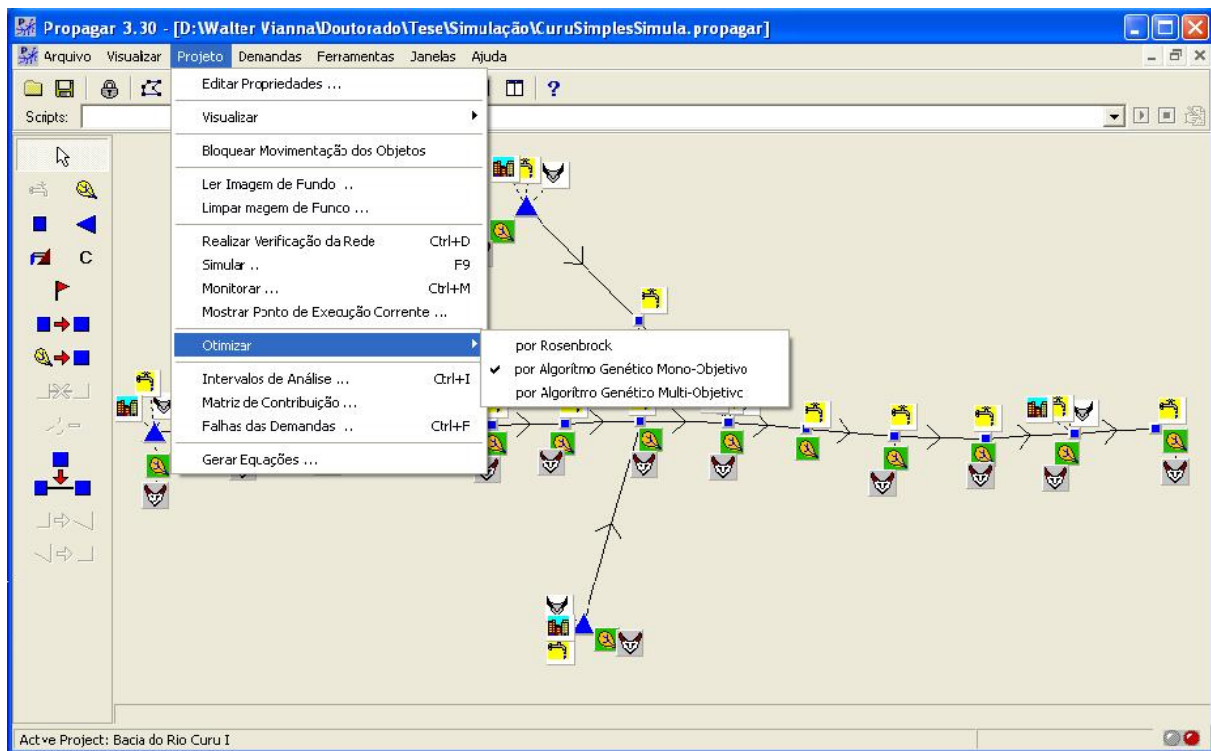


Figura 4.1: Aspecto geral da área de projeto do PROPAGARMOO.

Uma vez definido o projeto, se a otimização a ser efetuada for utilizar a técnica de procura direta, deverá ser definido, através no menu *Projeto/Otimizar*, que algoritmo deverá ser utilizado. (figura 4.2).



**Figura 4.2: Escolha do otimizador por procura direta a ser utilizado.**

Para a execução do processo de otimização por procura direta, se faz necessário definir uma rotina de simulação (iterativa) e três rotinas de otimização. Ao se clicar duas vezes sobre a área de projeto do PROPAGARMOO, é apresentada a janela *Dados do projeto* (figura 4.3) na qual devem ser preenchidos alguns dados como: nome, escolha do simulador, diretórios de saída e pesquisa, intervalos de simulação, etc. Ainda, através dessa mesma janela, são acessadas outras duas janelas onde se definem as rotinas de simulação iterativa e de controle da otimização.

Ao se clicar no botão *Rotinas de simulação*, da janela *Dados do Projeto*, se têm acesso a outra janela denominada *Rotinas do Usuário* (figura 4.4). Para a utilização da otimização por procura direta, a *Rotina geral de planejamento* deve ser definida pelo usuário e será repetida durante a otimização.

Por outro lado, ao se clicar no botão *Rotinas de otimização*, da janela *Dados do Projeto*, se tem acesso à janela denominada *Otimização* (figura 4.5), onde devem ser definidas três rotinas a serem executadas no processo de otimização: *rotina de inicialização*, *rotina de cálculo da função objetivo* e *rotina de finalização*. Dessas apenas a segunda será executada repetidas vezes enquanto durar o processo de otimização.

**Dados do Projeto** [X]

Nome:	Bacia do Rio Curu	Descrição:	Sistemas de Reservatórios
Comentários:			
Operação do sistema de reservatórios da Bacia do Rio Curu de forma desagregada, com cada reservatório sendo responsável pelo atendimento das demandas imediatamente a jusante e com a regra miupe			
Simulador Ativo:	<input type="radio"/> Propagar DOS <input checked="" type="radio"/> Propagar WIN		
Propagar DOS:	Descrição do Programa PropDos 0 Teste teste teste		
PropDOS0	<input type="button" value="..."/>		
Diretório de Saída:	<input type="button" value="..."/>		
Diretório de Pesquisa:	<input type="button" value="..."/>		
Anos de Execução:	1962 - 1988		
Intervalo de Simulação:	<input type="button" value="Mensal"/>		
	<input type="button" value="Nível de Falha Crítica (%):"/>		
	50		
Scripts:			
<input type="text"/>			<input type="button" value="Adicionar"/> <input type="button" value="Remover"/> <input type="button" value="Editar"/>
Opções de Interface:			
- Duplo-Click em um componente			
<input checked="" type="radio"/> Abrir diálogo para edição dos dados <input type="radio"/> Executar script padrão			
- Visualização de HTML			
<input checked="" type="radio"/> Mostrar no Navegador interno <input type="radio"/> Mostrar no Navegador padrão do Sistema Operacional			
Opções de Balanço Hídrico:			
<input type="checkbox"/> Permitir vazões negativas nas sub-bacias			
Rotinas da Simulação		Rotinas da Otimização	
<input type="button" value="Ok"/>	<input type="button" value="Cancelar"/>		

Figura 4.3: Janela Dados do projeto.

**Rotinas do Usuário** [-] [X]

Rotina geral de planejamento			
Scripts\PlanejaOtimizador_RPModific12x3.PScript	...	Editar	Limpar
Rotina geral de operação (executado somente por PCs reservatórios)			
	...	Editar	Limpar
Rotina geral de cálculo de energia (executado somente por PCs reservatórios)			
	...	Editar	Limpar
Rotina de uso geral (executada opcionalmente após a simulação)			
	...	Editar	Limpar
<input type="button" value="Ok"/>			

Figura 4.4: Janela Rotinas do usuário (para simulação).

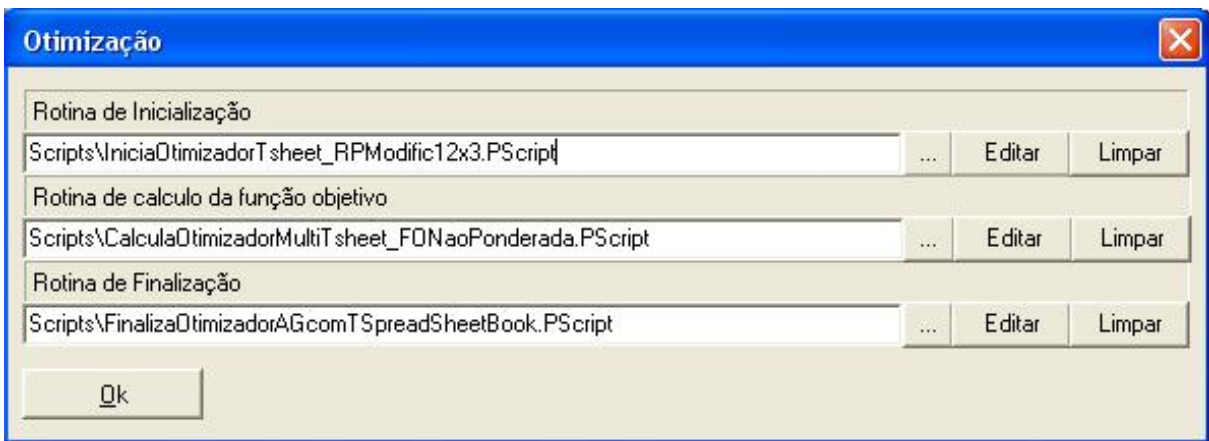


Figura 4.5: Janela Otimização, onde são definidas as rotinas de otimização.

Todas as rotinas a serem executadas pelo PROPAGARMOO no processo de otimização são editadas no compilador de Pascal Script (figura 4.6) e podem ser armazenadas para futura utilização num diretório do computador.

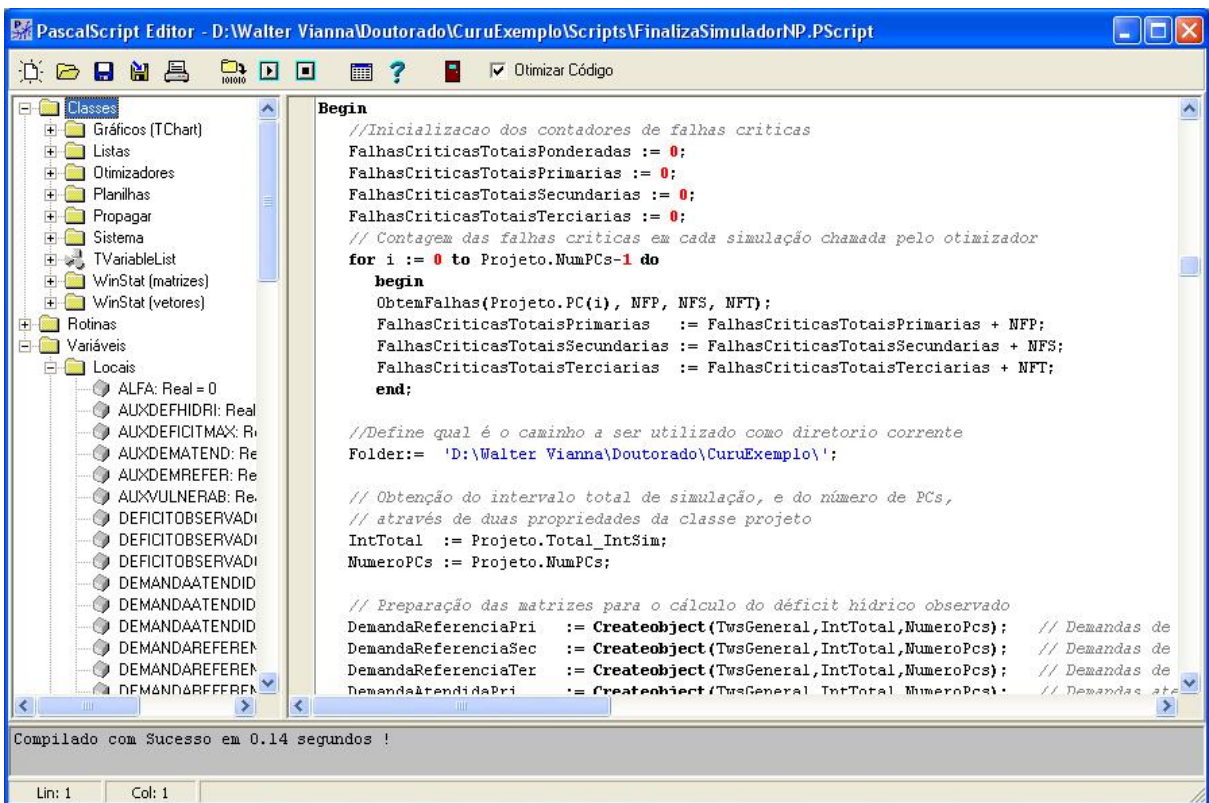
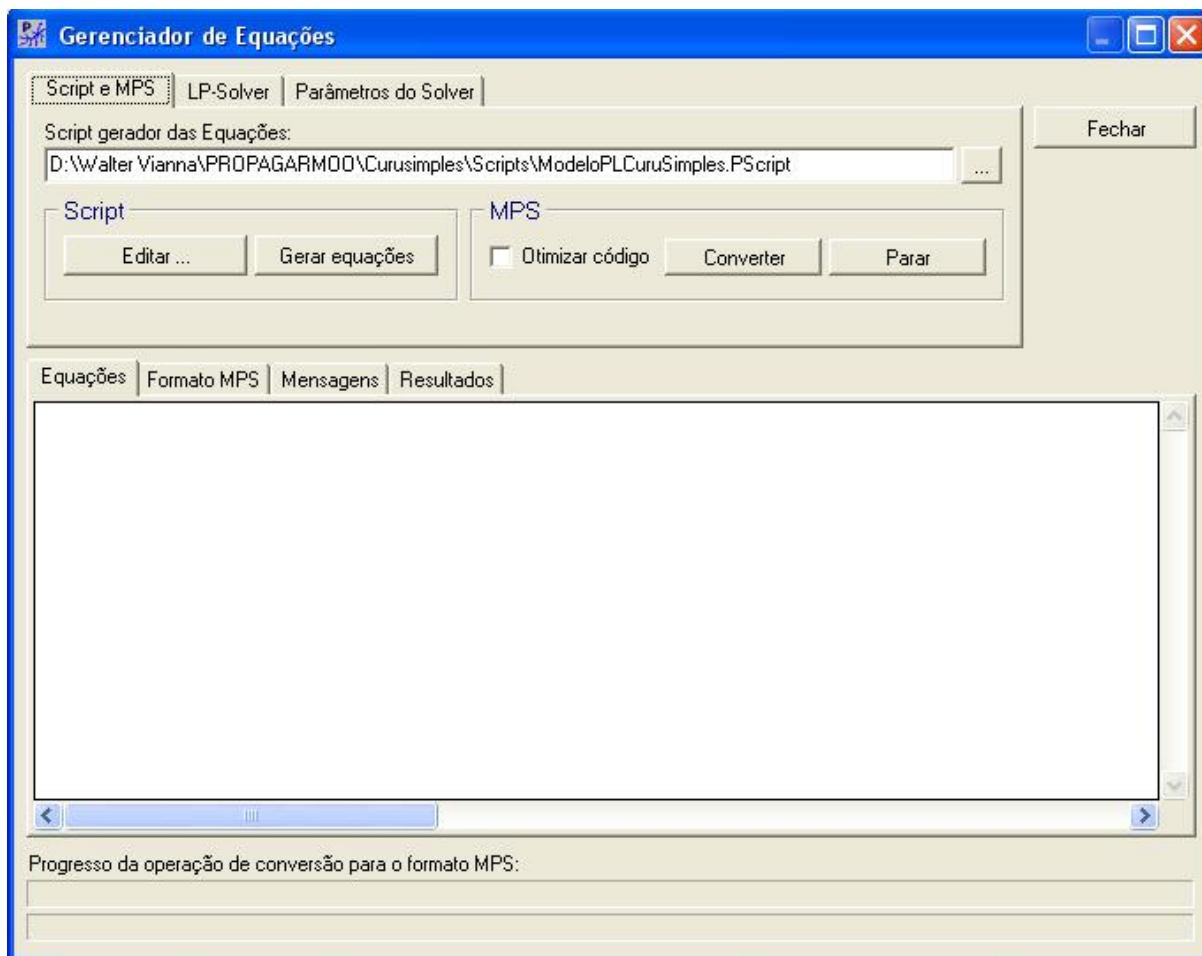


Figura 4.6: Compilador de Pascal Script.

Uma vez definidos o projeto, o otimizador a ser utilizado e as rotinas necessárias, o processo de otimização é iniciado acionando com o *mouse* o botão de iniciação da otimização, na janela inicial do PROPAGARMOO (figura 4.1). A finalização do processo se dará ao ser atingido o critério de parada definido ou a qualquer tempo, pelo usuário, acionando com o *mouse* o botão de finalização da otimização.

Já para a montagem e utilização de um modelo de PL, deve-se acessar o menu *Projeto/Otimizar*, o qual apresentará uma janela (figura 4.7) onde deve ser indicado qual o *script* a ser executado para a edição do modelo. A mesma janela possui ainda o botão de acesso ao editor/compilador de Pascal Script.

Uma vez executado o script desejado, o modelo de PL será escrito na área de edição dessa mesma janela, podendo ainda ser executada a conversão do modelo literal para o formato MPS. Para que o conversor funcione apropriadamente, o modelo literal deverá seguir o padrão de sintaxe adotado pelo software LINDO.



**Figura 4.7: Janela do gerenciador de equações (Editor de modelos de PL).**

Quanto à utilização do gerenciador de equações e do conversor para MPS, deve-se apresentar uma ressalva: após a implementação dos mesmos e no início da sua utilização, se percebeu que o conversor para MPS perdeu a sua importância para o presente trabalho e para qualquer analista que venha a utilizar o PROPAGARMOO como plataforma de montagem de modelos de PL. Pois, todos os softwares de resolução de PL possuem a capacidade de ler o formato literal de modelos, apenas mudando alguns detalhes de sintaxe. Assim sendo, o conversor passou a ser útil apenas numa situação hipotética, na qual o especialista em recursos hídricos conhece apenas a sintaxe literal do LINDO e quer (ou necessita) utilizar um



outro software de otimização capaz de ler o formato MPS. Como a grande vantagem do modelo literal é a facilidade de leitura e compreensão de cada equação do modelo de PL, passa a ser mais vantajoso o aprendizado prévio da sintaxe literal utilizada por qualquer um dos softwares de resolução que vier a ser utilizado.

O autor do presente trabalho acredita que esse fato vem a ser uma das melhores contribuições fornecidas através desta tese.

### **4.3 Etapas da utilização do PROPAGARMOO para a otimização de regras operacionais para reservatórios**

Uma vez que o autor do presente trabalho verificou em sua dissertação de mestrado (VIANNA JR., 1998) que o processo de otimização por procura direta era eficiente e obteve regras operacionais melhores que a regra padrão, utilizada para realizar um diagnóstico da operação conjunta dos reservatórios estratégicos da bacia, essa regra foi utilizada no presente trabalho apenas em algumas análises. Em outras palavras, o diagnóstico do sistema operado por uma regra operacional, sem parâmetros, não foi utilizado para testar se regras operacionais condicionadas por parâmetros obtinham melhores resultados, segundo os índices de avaliação utilizados (confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade), quando esses parâmetros são obtidos por um processo de otimização de procura direta. Isso se deveu ao fato de que o autor já haver chegado a essa conclusão anteriormente.

Assim, na utilização das ferramentas de otimização implementadas no PROPAGARMOO, procurou-se:

- Comparar o desempenho entre dois métodos de otimização por procura direta, Rosenbrock e Algoritmo Genético Mono-objetivo, na otimização dos parâmetros de regras operacionais, utilizando apenas uma parte do sistema de reservatórios;
- Utilizar o método de otimização do Algoritmo Genético Mono-objetivo para a obtenção de um conjunto de parâmetros que utilizasse duas regras operacionais, a Regra Padrão Modificada e a Curva Guia, para todo o sistema de reservatórios;
- Utilizar o método de otimização Algoritmo Genético Multi-objetivo para a obtenção de um conjunto de soluções ditas não-inferiores;
- Obter regras operacionais através de modelos de Programação Linear, comparando-as com as obtidas através do método por procura direta.

A aplicação, então, se desenvolveu segundo as seguintes etapas:

Primeiro se escolheu um trecho da bacia com influência de apenas um reservatório, para que o número de parâmetros fosse reduzido, e então se comparou o desempenho do método de Rosenbrock e do método do Algoritmo Genético Mono-objetivo no processo de obtenção de valores de parâmetros, que condicionam regras operacionais, que otimizassem três funções objetivo. Essas funções objetivo, por sua vez, representam índices de desempenho para a operação do sistema, segundo os critérios de confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade.

Numa segunda etapa se utilizou o método do Algoritmo Genético Mono-objetivo para otimizar uma série de regras operacionais que condicionassem a operação conjunta dos três reservatórios estratégicos da bacia, cujas capacidades são superiores a 100 hm<sup>3</sup>. Foram utilizadas três funções objetivo para esse processo de otimização.

Na terceira etapa foi utilizado o método do Algoritmo Genético Multi-objetivo para a obtenção de um conjunto de soluções, para as regras operacionais consideradas não-inferiores, levando em conta, simultaneamente, as mesmas três funções objetivo utilizadas anteriormente.

Na quarta etapa de aplicação do trabalho, foi otimizada a operação do sistema através de um modelo de PL, onde as variáveis de decisão estavam relacionadas ao atendimento das demandas na bacia, às descargas efetuadas pelos reservatórios e aos volumes mensais dos mesmos. Nesse processo os pesos atribuídos às demandas atendidas buscaram representar a ordem de prioridade de atendimento às demandas na bacia, buscando maximizar uma função objetivo. Uma vez obtidos os valores das variáveis de decisão, os valores mensais de descarga e armazenamento dos reservatórios foram utilizados para, através de medidas de tendência central, regressão simples e múltipla, se obter regras operacionais para o sistema de reservatórios. Uma vez obtidas essas regras, as mesmas foram comparadas com as obtidas anteriormente com o método de procura direta, usando como critério as funções objetivo relativas à confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade.

Nas simulações efetuadas iterativamente para otimização dos parâmetros das regras operacionais e para a montagem do modelo de programação linear, foi utilizada uma série de vazões médias mensais, com extensão homogênea de 27 anos. A série foi gerada deterministicamente com o modelo MODHAC (LANNA, A. E., SCHWARZBACH, M. , 1989) para as sub-bacias incrementais a cada PC a partir da pluviometria, compreendendo o período de 1962 a 1988. A calibração do modelo MODHAC foi efetuada para o posto de São Luiz do Curu para o período de 1968 a 1985 que é o único com dados fluviométricos disponíveis para a bacia em estudo (CEARÁ, 1992).

Também é importante salientar que o computador utilizado para a aplicação do PROPAGARMOO na otimização de regras operacionais para reservatórios foi um AthlonXP de 1.6Ghz. Essa informação é importante, pois computadores com desempenho de hardware melhor terão um desempenho melhor no que diz respeito à convergência dos algoritmos utilizados.

#### **4.3.1 Área de aplicação**

A bacia utilizada no presente trabalho está localizada no estado do Ceará, cuja área de semi-árido corresponde a 18% do território nacional, dos quais 92,5% do pertencem ao Polígono das secas. Já a bacia do rio Curu, que corresponde a 5,76% da área total do estado, tem 90% de sua área no polígono das secas e o restante na zona litorânea.

Esse estado sempre se fez presente em estudos de âmbito global para o Nordeste, efetuados por órgãos governamentais. Pode-se citar o PLIRHINE - Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste, efetuado pela SUDENE - Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste.(CEARÁ, 1992).

Mais recentemente, foi elaborado o PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, pela Secretaria de Recursos Hídricos, o qual separou as unidades de planejamento definidas no PLIRHINE em dois blocos: o bloco 1, formado apenas pela bacia do rio Jaguaribe e o bloco 2, formado pelas bacias do rio Coreaú, do rio Acaraú, do litoral, do rio Curu, Metropolitanas e a do rio Parnaíba.

A bacia do rio Curu, correspondente à unidade de planejamento Nº 08, constitui-se em uma das mais exploradas hidricamente no estado, em face da existência de projetos de irrigação, tanto públicos como privados. Dos projetos públicos destacam-se os perímetros irrigados General Sampaio e Curu-recuperação, os quais totalizam uma área em operação da ordem de 500 ha e o projeto Curu-Paraipaba com área de operação de 2084 ha, com planos para ampliação, devendo chegar a 6792 ha.

Possui uma boa infra-estrutura de estradas, e a proximidade da capital do estado, Fortaleza, facilita muito o escoamento da produção e o acesso aos mercados e aos serviços urbanos.

Destacam-se na bacia 3 açudes, considerados estratégicos pelas suas capacidades: açude Pereira de Miranda (ou Pentecoste), açude General Sampaio, e açude Caxitoré. Suas características estão resumidas na tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Características dos três grandes açudes da bacia do rio Curu.**

Nome do reservatório	Município	Início de construção	Término de construção	Capacidade total de armazenamento (hm <sup>3</sup> )	Rendimento máximo anual (hm <sup>3</sup> )
Pereira de Miranda	Pentecoste	1950	1956	395.63	127,00
General Sampaio	General Sampaio	1932	1935	322.20	63,50
Caxitoré	Pentecoste	1958	1962	202.00	49,70

(Fonte: CEARÁ, 1992, KEMPER, 1997)

Essa bacia foi escolhida então, como área de aplicação do presente trabalho, devido às características anteriormente descritas e também devido a este autor ter trabalho na FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, onde pode ter acesso a informações relativas à bacia. Além disso, foi possível obter, através da COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, dados atualizados do cadastro dos irrigantes da bacia, com localização e valores das demandas necessárias. Uma vez que a mesma bacia foi utilizada por ocasião da sua dissertação de mestrado, maiores detalhes sobre a mesma encontram-se em Vianna Jr. (1998).

#### **4.3.2 Topologia Adotada para a bacia e localização dos PCs**

A topologia adotada, de acordo com a figura 4.8, para a aplicação do presente trabalho teve por objetivo representar a bacia do rio Curu através de PCs definidos de acordo com a localização dos três reservatórios principais (General Sampaio, Pentecoste e Caxitoré), com a confluência de alguns cursos d'água principais e com a localização dos principais pontos de demanda (ou de um conjunto delas). Essas demandas, por seu turno, representam cidades, irrigantes particulares ou projetos públicos de irrigação. A localização desses PCs está detalhada na tabela 4.2.

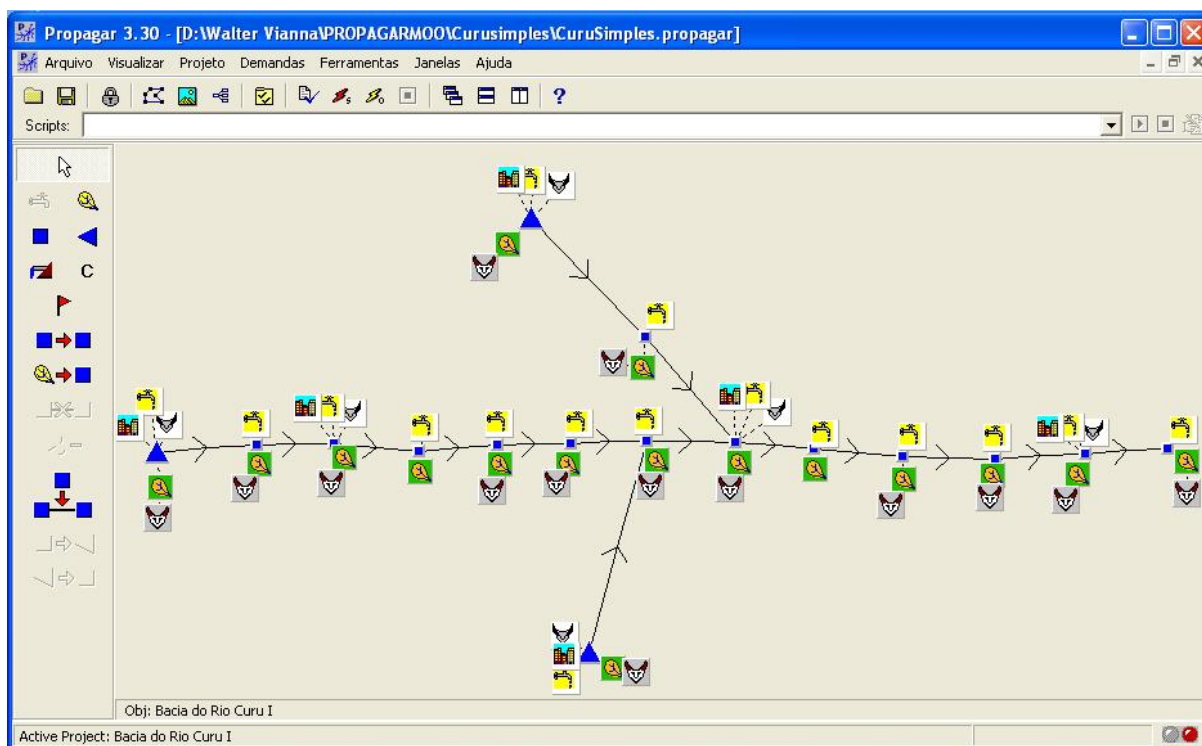


Figura 4.8: Topologia adotada para a bacia do rio Curu.

Tabela 4.2: Localização dos PC's para a bacia do rio Curu.

PC	Localização
01	Rio Curu, no ponto de descarga do açude General Sampaio.
02	Rio Curu, à montante do encontro com o riacho Tejuçuoca.
03	Rio Curu, no município de Apuiarés.
04	Rio Curu (conforme Figura 4.8).
05	Rio Curu, no ponto de descarga do açude Serrota.
06	Rio Curu, à montante do encontro com o rio Canindé.
07	Rio Canindé, no ponto de descarga do açude Pereira de Miranda (Pentecoste).
08	Rio Curu, à montante do encontro com o riacho Caxitoré.
09	Riacho Caxitoré, no ponto de descarga do açude Caxitoré.
10	Riacho Caxitoré, próximo à sua foz.
11	Rio Curu, à montante do encontro com o riacho Frios.
12	Rio Curu, à montante do encontro com o riacho Melancias.
13	Rio Curu, na comunidade de Curral Grande.
14	Rio Curu, na tomada d'água do Projeto Curu-Paraipaba.
15	Rio Curu (conforme Figura 4.8).
16	Rio Curu, na sua foz.

### 4.3.3 Demandas e prioridades

Conforme determinado pelo decreto 23.067 de 11/02/94 do governo do estado do Ceará (LEGISLAÇÃO, 1994), são 5 (cinco) as prioridades de uso para as águas brutas no estado. Essas prioridades são descritas na tabela 4.3.

**Tabela 4.3: Prioridades de uso para as águas brutas.**

Prioridade	Usos
1	Abastecimento doméstico direto.
2	Abastecimento coletivo especial (hospitais, quartéis, presídios e colégios).
3	Abastecimento coletivo de cidades, distritos, povoados e demais núcleos habitacionais.
4	Abastecimento para fins industriais, comerciais ou para prestação de serviços.
5	Abastecimento para fins agrícolas (irrigação, pecuária ou piscicultura).
6	Outros usos

(Fonte: LEGISLAÇÃO, 1994)

No presente trabalho foram adotadas 3 (três) ordens de prioridade para as demandas (tabela 4.4), que se adequam à apresentada anteriormente, seguindo o que determina a legislação federal e a estadual. Não foi considerada nessa aplicação nenhuma restrição quanto à vazão mínima, ou ecológica, a ser garantida no curso do rio Curu. Isso foi feito levando-se em consideração o fato de o rio ser perene apenas devido à operação dos reservatórios do sistema. Além disso, a legislação estadual especifica como de última prioridade a vazão para preservação ecológica (MOLINAS, 1996).

**Tabela 4.4: Ordem de prioridade adotada para a bacia do rio Curu.**

Prioridade	Usos
1	Abastecimento humano urbano
2	Abastecimento animal e industrial
3	Abastecimento para agricultura

Para a composição dos valores das funções objetivo utilizadas no processo de otimização, utilizando os algoritmos de procura direta (iterativa), poderiam ser atribuídos pesos para cada uma dessas hierarquias, como foi feito pelo autor deste trabalho na ocasião de sua dissertação de mestrado (VIANNA JR. 1998).

Essa atribuição de pesos às diferentes hierarquias de demandas leva o método aplicado a buscar atendê-las, privilegiando o atendimento às demandas de maior prioridade e mantendo uma reserva hídrica nos reservatórios para operação futura dos mesmos. No presente trabalho, essa possibilidade não foi adotada, uma vez que, ao distribuir a disponibilidade hídrica em cada um dos PC's, o PROPAGARMOO é dotado de um método que automaticamente distribui a disponibilidade hídrica segundo a hierarquia de cada demanda.

A não-adoção desses pesos foi equivocada, conforme comentaremos nos resultados, pois as falhas nas demandas de maior prioridade não foram reduzidas ao máximo. Por outro lado, a adoção de pesos faria os reservatórios adotarem uma operação mais conservativa, acumulando água para, efetivamente, tentar atender às demandas de maior prioridade ao longo de todos os intervalos de simulação.

Já para o modelo de PL a adoção de pesos para cada hierarquia é inevitável, pois, assim, ao maximizar a função objetivo, as demandas primárias (de maior peso) serão atendidas antes das demandas secundárias, que por sua vez serão atendidas antes das demandas terciárias. Os valores adotados são arbitrários e deveriam ser estipulados pelo decisor (gestor), ou eventualmente negociados junto ao comitê da bacia. Nessa aplicação, os valores utilizados buscaram caracterizar que a demanda primária é 100 vezes mais relevante que a demanda secundária que por sua vez é 100 vezes mais relevante que a demanda terciária.

Os retornos das demandas, de acordo com os métodos internos do PROPAGARMOO, foram considerados como disponíveis para o PC imediatamente à jusante daquele onde as mesmas foram supridas. Os valores adotados para os mesmos foram os admitidos pela SRH/MMARHAL para projetos no Nordeste e estão resumidos na tabela 4.5, assim como o peso atribuído a cada demanda (no modelo de PL).

**Tabela 4.5: Informações sobre as demandas consideradas.**

	Demanda primária	Demanda secundária	Demanda terciária
Peso atribuído	10000	100	1
Retorno adotado	60%	0%	10%

#### 4.3.4 Cenário de estudo

O cenário de estudo escolhido para aplicar as metodologias propostas foi o previsto para o ano de 2020, devido à possibilidade de utilização das projeções das demandas difusa, primária e secundária, contidas no PERH (CEARÁ, 1992) e no relatório do projeto Aridas (GONDIM FILHO, 1994). Os valores de demanda difusa são referentes às demandas que estão de tal forma diluídas nas bacias contribuintes de cada PC, que são descontadas diretamente das vazões afluentes aos mesmos, pois não podem ser adicionadas a nenhuma das ordens de prioridade. Considerou-se que os níveis de demanda para irrigação (demanda terciária) permanecerão os mesmos registrados pelo cadastro dos irrigantes da bacia do rio Curu, obtido na Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do estado do Ceará, sendo esses valores alterados apenas para o PC referente à captação d'água para o Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba, já que, quando completamente implantado, mais que duplicará a sua demanda hídrica (KEMPER, 1997). Para compor os valores das demandas para 2020, os modelos multiplicam os valores atuais de demanda pelos valores das escalas de desenvolvimento respectivas. Os dados referentes a essas demandas foram montados através da demanda atual (tabelas 4.6 e 4.7) e de valores de escala de desenvolvimento (tabela 4.8), que são informados no arquivo de entrada de dados para os modelos.

**Tabela 4.6: Valores de demanda mensal para os pontos característicos (m3/s).**

PC	Demanda difusa	Demanda Primária	Demanda Secundária
01	0,029	0,014	0,004
02	0,001	0,000	0,000
03	0,007	0,031	0,019
04	0,000	0,000	0,000
05	0,006	0,000	0,000
06	0,004	0,000	0,000
07	0,055	0,072	0,037
08	0,003	0,000	0,000
09	0,023	0,088	0,020
10	0,001	0,000	0,000
11	0,001	0,018	0,003
12	0,000	0,000	0,000
13	0,004	0,000	0,000
14	0,006	0,000	0,000
15	0,004	0,025	0,083
16	0,003	0,000	0,000

(Fonte: GONDIM FILHO, 1994; CEARÁ, 1992)

**Tabela 4.7: Valores de demanda atual para irrigação para cada PC (m3/s).**

PC	Valores mensais da demanda terciária											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
01	0,017	0,013	0,009	0,019	0,023	0,048	0,066	0,054	0,018	0,018	0,018	0,018
02	0,130	0,101	0,043	0,060	0,077	0,093	0,105	0,118	0,130	0,135	0,136	0,133
03	0,024	0,018	0,007	0,011	0,014	0,017	0,020	0,022	0,024	0,025	0,025	0,024
04	0,041	0,032	0,013	0,019	0,025	0,038	0,050	0,050	0,041	0,043	0,043	0,042
05	0,351	0,266	0,175	0,172	0,208	0,334	0,407	0,416	0,357	0,375	0,372	0,365
06	0,004	0,003	0,002	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
07	0,272	0,205	0,171	0,148	0,171	0,395	0,556	0,516	0,316	0,299	0,293	0,285
08	0,022	0,016	0,013	0,011	0,013	0,021	0,021	0,023	0,023	0,024	0,024	0,023
09	0,039	0,029	0,021	0,019	0,022	0,050	0,067	0,063	0,040	0,042	0,042	0,041
10	0,089	0,066	0,047	0,035	0,042	0,075	0,086	0,093	0,093	0,098	0,096	0,093
11	0,054	0,040	0,028	0,020	0,049	0,118	0,125	0,112	0,127	0,168	0,159	0,122
12	0,131	0,099	0,073	0,056	0,065	0,112	0,125	0,137	0,137	0,144	0,141	0,138
13	0,670	0,518	0,383	0,298	0,338	0,520	0,571	0,644	0,693	0,732	0,716	0,697
14	0,529	1,956	1,414	1,105	1,276	2,153	2,452	2,645	2,633	2,776	2,707	2,636
15	0,466	0,367	0,272	0,218	0,245	0,384	0,429	0,468	0,478	0,507	0,495	0,482
16	0,105	0,083	0,061	0,049	0,056	0,086	0,094	0,103	0,108	0,115	0,112	0,109

(Fonte: Cadastro dos irrigantes da bacia do rio Curu).

**Tabela 4.8: Escalas de desenvolvimento utilizadas para compor o cenário de 2020.**

PC	Demanda primária	Demanda secundária	Demanda terciária
01	2,0	1,4	1,0
02	1,0	1,0	1,0
03	2,2	1,4	1,0
04	1,0	1,0	1,0
05	1,0	1,0	1,0
06	1,0	1,0	1,0
07	2,3	1,4	1,0
08	1,0	1,0	1,0
09	2,8	2,0	1,0
10	1,0	1,0	1,0
11	1,9	1,4	1,0
12	1,0	1,0	1,0
13	1,0	1,0	1,0
14	1,0	1,0	2,3
15	2,4	2,6	1,0
16	1,0	1,0	1,0



## 4.4 Comparação entre o método de Rosenbrock e o método do AG Mono objetivo

Com o objetivo de comparar o desempenho entre o método de Rosenbrock implementado previamente no PROPAGARMOO e o método do Algoritmo Genético Mono Objetivo, implementado atualmente no PROPAGARMOO (como um dos produtos do presente trabalho), foi selecionada parte do sistema utilizado na presente aplicação. Essa seleção corresponde ao trecho do sistema compreendido entre o PC01 – Açude General Sampaio e o PC07 (localizado no rio Curu à montante da foz do riacho Caxitoré) e está representada na figura 4.9. Para essa comparação, utilizaram-se as três funções objetivo já anteriormente mencionadas, que no método de algoritmos genéticos, recebe o nome de aptidão (não se utilizará esse termo, preferindo o autor utilizar a sigla FO). Assim o objetivo é minimizar a probabilidade de falhas, o negativo da elasticidade e a vulnerabilidade do sistema.

Buscou-se, então, otimizar os parâmetros da regra operacional denominada Volume Meta, a qual, para o único reservatório contido no trecho, é condicionada por 12 parâmetros que representam os 12 volumes meta mensais a serem impostos ao reservatório durante os 27 anos de operação do mesmo.

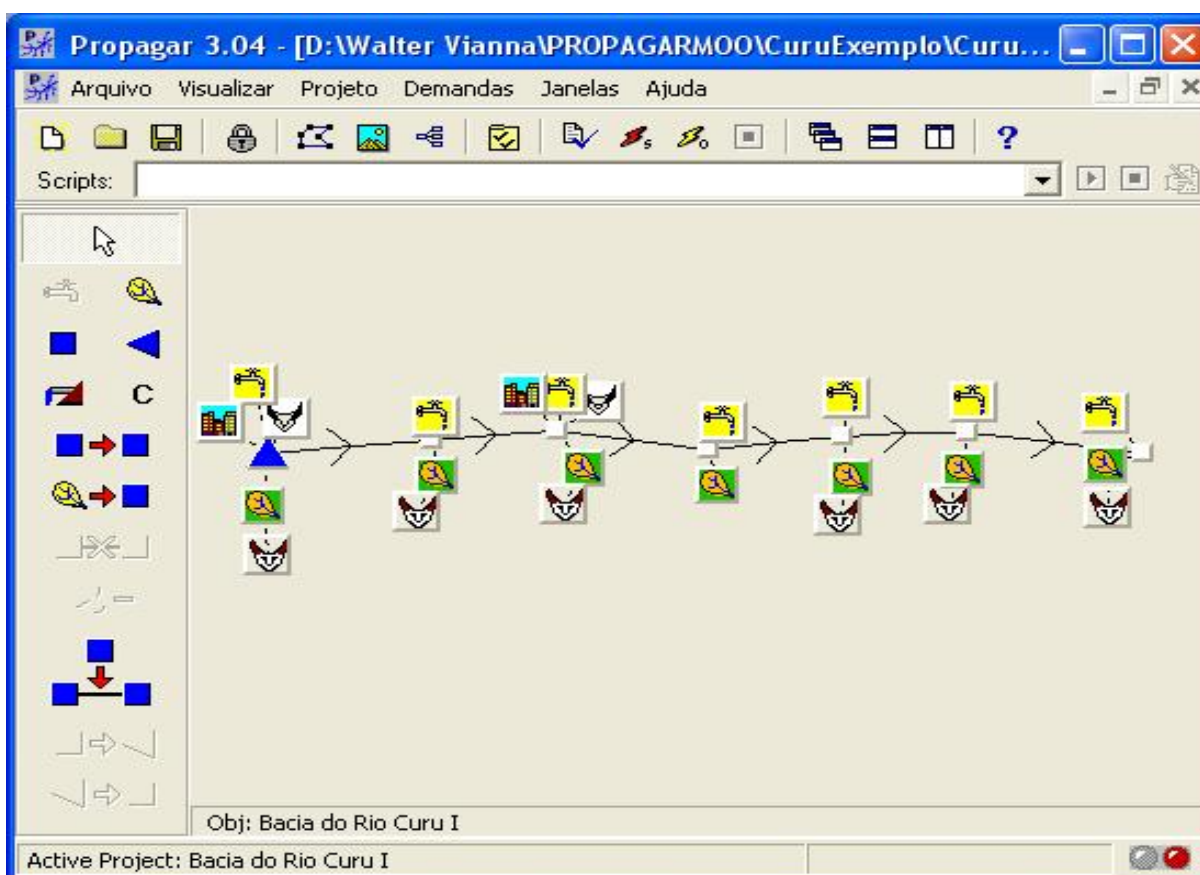


Figura 4.9: Trecho utilizado para comparação entre Rosenbrock e AG Mono-objetivo.

Antes de iniciar o processo de otimização, uma simulação com a regra padrão foi realizada, percebendo-se que a mesma seria suficiente para o atendimento de todas as demandas, ou seja, a operação simples do reservatório General Sampaio, pela regra padrão, anularia todas as falhas com conseqüente probabilidade de falhas e vulnerabilidade nulas, e elasticidade máxima possível. Sendo assim, para que o processo de otimização (minimização) das funções objetivo tivesse sentido, foi criada uma situação hipotética de aumento demasiado das demandas através do aumento da escala de desenvolvimento de todas as demandas, provocando, assim, falhas e a possibilidade de melhoria das funções objetivo através da otimização dos parâmetros que condicionam uma regra operacional. Nesse caso, a regra operacional utilizada para essa comparação foi a curva guia de volumes mínimos com cálculo de déficit hídrico mensal. Os valores utilizados para as escalas de desenvolvimento estão apresentados na tabela 4.9.

**Tabela 4.9: Fatores de desenvolvimento utilizados para criação de exemplo hipotético.**

Tipo de Demanda	Fator de Desenvolvimento	PCs a que pertencem
Primária	6	PC01 e PC03
Secundária	4	PC01 e PC03
Terciária	10	Todos

O próximo passo então foi gerar um conjunto (uma população) de 100 soluções aleatórias (indivíduos) para cada uma das funções objetivo (aptidões) a serem otimizadas, através do método de algoritmo genético implementado no PROPAGARMOO. A otimização por algoritmos genéticos era iniciada, e interrompida quando se completava a geração inicial da população. Dessa população se retirou o melhor e o pior indivíduo (pior e melhor conjunto de parâmetros da regra operacional) conforme tabela 4.10.

**Tabela 4.10: Valores dos parâmetros para o pior e o melhor indivíduo para cada aptidão.**

			Volume meta											FO	
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
FO01	i n d	Melhor	77,95	193,38	1,14	216,28	149,55	307,00	170,18	280,30	57,43	109,56	198,90	137,82	6,16049
		Pior	294,18	321,76	115,82	5,15	241,26	276,48	273,42	116,24	216,10	311,88	146,04	138,32	6,18519
FO02	i v	Melhor	100,92	261,68	5,43	284,67	47,95	311,15	291,22	38,92	121,49	150,57	312,75	10,63	-13,81317
		Pior	310,39	136,78	229,83	215,94	83,33	215,25	173,76	226,58	80,93	104,80	27,53	217,49	-13,78796
FO03	i d u o	Melhor	99,35	12,88	14,64	37,38	151,34	133,43	40,79	143,14	23,80	0,99	218,08	14,82	6,76672
		Pior	302,65	192,34	232,46	114,68	318,73	231,70	233,79	159,42	10,10	145,98	300,71	266,45	6,81045

Cada uma dessas soluções foi então utilizada como solução inicial para a otimização através do método de Rosenbrock, assim como o processo de otimização por algoritmos genéticos foi reiniciado a partir da população anteriormente gerada, para cada uma das funções objetivo (aptidões).

O resultado da otimização com o método de Rosenbrock, ou seja, os novos valores dos parâmetros e das aptidões, está na tabela 4.11 e, comparando com a tabela anterior, verifica-se que esse método conseguiu, alterando os valores dos parâmetros, encontrar soluções um pouco melhores apenas para as soluções iniciais adotadas quando o objetivo era minimizar a função objetivo 02.

**Tabela 4.11: Resultado da otimização da regra operacional, através do método de Rosenbrock.**

			Volume meta											FO	
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
FO01	i n d	Melhor	79,95	195,38	3,14	218,28	151,55	309,00	172,18	282,30	59,43	111,56	200,90	139,82	6,16049
		Pior	296,18	320,76	117,82	7,15	243,26	278,48	275,42	118,24	218,10	313,88	148,04	140,32	6,18518
FO02	i v	Melhor	39,17	260,92	0,11	287,27	114,37	305,67	301,32	322,02	202,76	240,86	309,50	117,38	-13,81495
		Pior	249,52	246,07	0,12	262,68	82,64	108,81	109,05	135,19	81,64	90,77	188,51	321,98	-13,79786
FO03	i d u o	Melhor	101,35	14,88	16,64	39,38	153,34	135,43	42,79	145,14	25,80	2,99	220,08	16,82	6,76672
		Pior	304,65	194,34	234,46	116,68	320,73	233,70	235,79	161,42	12,10	147,98	302,71	268,45	6,81045

Já o resultado da otimização com o método do algoritmo genético mono-objetivo, de acordo com a tabela 4.12, encontrou indivíduos com melhores aptidões (conjunto de parâmetros com menores valores para as funções objetivos), ou, no mínimo, confirmou a melhor aptidão encontrada na população inicial como a melhor aptidão no final do processo de otimização.

**Tabela 4.12: Resultado da otimização da regra operacional, através do método dos AG Mono-objetivo.**

			Volume meta											FO	
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov		Dez
FO01	i n d	Melhor	108,24	123,69	0,04	239,61	134,78	174,17	230,23	188,20	13,13	72,96	124,40	165,44	6,14506
		Pior	66,55	144,94	0,10	72,21	106,49	89,11	259,81	135,57	16,41	199,92	93,43	117,94	6,14506
FO02	i v	Melhor	142,51	0,15	0,09	187,07	19,96	231,99	106,98	255,76	244,19	191,63	202,65	152,88	-13,81566
		Pior	141,03	23,29	0,04	199,03	150,97	203,87	206,71	69,58	194,12	107,13	73,50	50,22	-13,81495
FO03	i d u o	Melhor	55,77	246,60	157,73	242,45	223,94	126,14	70,78	167,11	144,68	134,46	67,17	283,95	6,76672
		Pior	125,97	189,82	246,45	253,67	168,30	205,25	14,35	49,45	291,05	22,72	286,17	105,42	6,76672

Levando-se em conta esses resultados, para a obtenção das regras operacionais dos reservatórios de toda a bacia, foi então utilizado apenas o método de otimização por algoritmos genéticos, conforme detalharemos os resultados a seguir.

Essa decisão deve-se ao fato de que, de acordo com a comparação realizada anteriormente, o AG mono-objetivo é mais eficiente que o método de Rosenbrock. Além disso, o autor deste trabalho já havia verificado, durante a realização da sua dissertação de mestrado, que o método de Rosenbrock torna-se cada vez menos eficiente, na medida em que se aumenta o número de parâmetros de uma regra operacional a ser otimizada.

## **4.5 A aplicação do Algoritmo Genético Mono-Objetivo para otimização das regras operacionais**

Diferentemente do método de Rosenbrock que utiliza apenas um conjunto de parâmetros de cada vez e vai modificando seus valores de maneira a encontrar a solução ótima, o algoritmo genético se utiliza de um conjunto de soluções, denominado de população, onde cada solução (conjunto de parâmetros) recebe o nome de indivíduo.

Conforme já comentado no capítulo relativo à metodologia, o número de indivíduos a serem gerados para compor a população depende da quantidade de parâmetros que condiciona cada regra operacional e do número de complexos adotados para o processo. O número de indivíduos por complexo, no caso da presente aplicação, foi automaticamente determinado pelo algoritmo implementado, pois seu valor corresponde a  $2n + 1$ , onde  $n$  é o número de parâmetros de cada regra operacional.

Como estamos trabalhando com três reservatórios estratégicos e cada uma de suas regras operacionais (tanto a do tipo Curva Guia, como a Regra Padrão Modificada) é condicionada por 12 parâmetros mensais, a regra que condicionará a operação de todo o sistema possuirá 36 parâmetros e assim cada complexo possuirá automaticamente 73 indivíduos. O número de complexos adotado nessa aplicação foi de 4, o que automaticamente determinou que, para a otimização, segundo cada função objetivo, o algoritmo genético implementado no PROPAGARMOO manipulou simultaneamente 292 indivíduos (292 conjuntos de 36 parâmetros).

Essa característica de manipular um conjunto de soluções simultaneamente pode se configurar numa grande vantagem da aplicação dos algoritmos genéticos, pois assim se torna possível realizar um estudo da variabilidade dos parâmetros (que condicionam as regras operacionais), de maneira a determinar a variabilidade de cada um deles. Na presente aplicação, esse estudo não foi realizado, pois o autor se concentrou no objetivo de otimizar as regras operacionais, e assim só o conjunto de parâmetros com menor valor de função objetivo (aptidão) encontrado será aqui apresentado.

### **4.5.1 Resultado da otimização dos parâmetros da regra padrão modificada**

O processo de otimização foi efetuado de acordo com três funções objetivo já mencionadas, ou seja, o somatório das probabilidades de falha (que indiretamente maximiza a confiabilidade do sistema), o somatório do valor negativo das elasticidades (maximizando a própria elasticidade) e o somatório das vulnerabilidades. Os valores encontrados para cada

uma delas encontram-se na tabela 4.13, assim como os valores das demais funções que estavam fora do processo em cada momento. Em outras palavras, durante o processo de otimização (minimização), apenas uma das três funções objetivo é utilizada pelo algoritmo implementado. Porém as demais são calculadas para se ter noção de seus valores quando não estivessem sendo minimizadas.

**Tabela 4.13: Valores das funções objetivo com a operação do sistema segundo a Regra Padrão modificada.**

		Valores das funções objetivo otimizadas		
		F.O.1	F.O.2	F.O.3
		<b>4,09</b>	<b>-38,64</b>	<b>2,52</b>
Valores das demais funções objetivo quando fora do processo de otimização	F.O.1		7,81	8,83
	F.O.2	-34,74		-31,10
	F.O.3	2,60	3,55	

O que se pode perceber é que, uma vez que as funções objetivo utilizadas representam realmente objetivos distintos e caracteristicamente antagônicos, os valores das funções objetivo calculadas, quando estão fora do processo de otimização, são piores (maiores) que seus valores quando estão sendo efetivamente utilizadas no processo. Resultado esse que já era esperado.

Uma outra comparação que se deve levar em conta em relação a esses resultados diz respeito aos valores obtidos para as funções objetivo quando da otimização mono-objetivo e os valores das mesmas quando se simula a chamada Regra Padrão. (esta sem parâmetros a serem otimizados). Esses valores estão descritos na tabela 4.14:

**Tabela 4.14: Comparação entre os valores das funções objetivo obtidas por otimização da regra padrão modificada e por simulação da regra padrão.**

Processo	Algoritmo	Regra Operacional	População	Função Utilizada	Individuo	F.O. 1	F.O. 2	F.O. 3
Otimização	AGMono	Padrão Modificada	292 Inds	F.O.1	melhor	<b>4,0895</b>	-34,7402	2,5960
				F.O.2		7,8056	<b>-38,6407</b>	3,5463
				F.O.3		8,8302	-31,0971	<b>2,5246</b>
Simulação	-	Padrão	-	-	-	<b>0,9506</b>	<b>-25,8999</b>	<b>5,1049</b>

O que se percebe, de acordo com os valores apresentados na tabela 4.14, é que a regra operacional que melhor condiz com o objetivo de minimizar as falhas do sistema, aumentando a confiabilidade (e conseqüentemente minimizando a probabilidade de falha, esta representada pela F.O. 1), é a regra padrão (sem parâmetros). Resultado esse lógico, uma vez que, se não há racionamento preventivo, o sistema atenderá às demandas na medida do que estiver armazenado nos seus reservatórios. Aqui cabem duas ressalvas:

A primeira diz respeito a que, no processo de otimização da regra padrão modificada, o algoritmo genético utilizado não foi capaz de obter o mesmo resultado da simulação da regra

padrão simplesmente zerando os valores de todos os parâmetros (a regra padrão modificada com seus parâmetros nulos corresponde a regra padrão). Esse resultado que vai de encontro ao que se esperaria de um algoritmo eficiente pode estar relacionado com o caráter aleatório de sua procura, no espaço de soluções, além dos valores nulos de todos os parâmetros estarem localizados na origem do espaço de soluções multi dimensional.

A segunda ressalva diz respeito à não-utilização de pesos para as prioridades das demandas. Conforme já comentado, essa adoção é que levaria a um comportamento mais restritivo do sistema de maneira a realmente atender às prioridades adotadas para as demandas. Assim, o autor deste trabalho acredita que a adoção de pesos levaria o algoritmo genético a encontrar valores melhores para todas as funções objetivo (aptidões), quando otimiza os parâmetros da regra padrão modificada, em relação à simulação da regra padrão (sem parâmetros).

Uma evidência do que discutimos no parágrafo anterior, e de acordo com a mesma tabela 4.14, são os resultados obtidos para as outras duas aptidões. Verifica-se que a otimização da regra padrão modificada levou o sistema a obter melhores valores para a elasticidade e vulnerabilidade do sistema. Esse resultado, enfim, fortalece a noção de que a simples minimização das falhas é insuficiente como meio de estudar a performance de um sistema de recursos hídricos, conforme discutido no capítulo de revisão bibliográfica.

Quanto às tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 a seguir, as mesmas apresentam os valores dos parâmetros mensais que condicionam a operação ótima para todo o sistema, segundo a regra padrão modificada, para cada um dos reservatórios, e de acordo com a função objetivo otimizada.

**Tabela 4.15: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros de racionamento (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	21,93	13,27	18,79	177,98	25,73	125,97	158,69	142,97	43,29	104,84	148,25	38,68
Pentecoste	68,40	38,72	2,21	19,99	50,97	83,21	177,43	263,95	75,74	24,52	62,34	128,55
Caxitore	49,78	72,65	6,92	108,81	36,93	120,63	113,22	33,24	0,26	106,67	68,48	63,44

**Tabela 4.16: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com minimização da função objetivo 02 – Negativo da Elasticidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros de racionamento (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	8,26	301,50	13,82	77,80	89,12	112,30	196,84	111,52	132,12	7,82	53,11	225,86
Pentecoste	56,20	324,21	33,59	78,91	300,68	176,95	200,74	260,34	140,87	268,44	33,71	343,42
Caxitore	67,78	74,26	123,68	74,48	110,92	16,22	128,49	39,22	27,44	83,82	109,86	184,38

**Tabela 4.17: Valores dos parâmetros ótimos da regra padrão modificada, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros de racionamento (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	86,38	150,29	239,44	300,50	218,84	50,71	182,58	162,11	249,17	178,05	72,95	37,99
Pentecoste	274,89	46,78	393,48	373,34	270,60	137,03	178,72	105,73	93,17	197,82	51,47	78,56
Caxitore	10,50	21,37	190,98	200,33	134,26	114,49	114,58	123,28	100,95	65,34	82,19	101,03

## 4.5.2 Resultado da otimização dos parâmetros da regra da Curva Guia

Da mesma forma que no item anterior, o processo de otimização foi efetuado de acordo com três funções objetivo.

Aqui cabe o comentário de que, durante o processo de otimização e posterior simulação de verificação da regra otimizada, se notou que a utilização pura e simples de uma curva guia para a determinação da descarga a ser efetuada em cada reservatório, leva o mesmo a descarregar mais que o necessário para atender aos déficits nos PCs num determinado mês. Assim à Regra da Curva Guia foi associada uma verificação da real necessidade de descarga do reservatório. Então, quando se considera o déficit, o mesmo é calculado a priori em cada intervalo de operação (em cada intervalo de tempo mensal) e esse déficit, convertido em descarga necessária, era operado se a Curva Guia assim o permitisse. Os valores encontrados para cada uma das funções objetivo encontram-se na tabela 4.18.

**Tabela 4.18: Valores das funções objetivo com a operação do sistema sujeita à regra da Curva Guia, com e sem a verificação do déficit a priori.**

			Valores das funções objetivo otimizadas		
			F.O.1	F.O.2	F.O.3
			<b>2,27</b>	<b>-45,08</b>	<b>3,74</b>
Valores das demais funções objetivo quando fora do processo	Curva Guia é aplicada após a verificação do déficit hídrico a ser atendido pelo reservatório.	F.O.1	3,12		3,04
		F.O.2	-43,25	-41,82	
		F.O.3	4,43	6,52	
			<b>4,24</b>	<b>-42,15</b>	<b>3,75</b>
de otimização.	Curva Guia é aplicada sem a verificação do déficit hídrico a ser atendido pelo reservatório.	F.O.1	6,22		5,81
		F.O.2	-37,75	-38,39	
		F.O.3	6,39	7,68	

O que se pode perceber verificando as três últimas colunas da tabela 4.18 é que o processo de otimização utilizando a Regra da Curva Guia, com a consideração de déficit mensal a priori, resulta em melhores valores das funções objetivo utilizadas. Assim, por exemplo, o valor do somatório das probabilidades de falha para a otimização sem consideração do déficit foi de 4,24 enquanto que com a consideração esse valor foi menor: 2,27. Ao se comparar os valores das funções objetivo quando estão momentaneamente fora do processo de otimização, seus valores também são piores quando não há verificação a priori do déficit hídrico. Por exemplo, o valor da F.O.2, quando a F.O.1 estava sendo otimizada,

sem a verificação do déficit, foi de  $-37,75$ , enquanto que seu valor foi de  $-43,25$  quando a curva guia era otimizada com a verificação a priori do déficit. Essas constatações só reforçam a conclusão de que a operação do sistema com a Curva Guia, sem a consideração do déficit a priori, leva o mesmo a um comportamento perdulário no que diz respeito ao uso das reservas hídricas dos reservatórios.

A seguir, nas tabelas 4.19 a 4.24, são apresentados os valores dos parâmetros mensais dos reservatórios para a regra operação do sistema segundo a Curva Guia, de acordo com cada função objetivo utilizada no processo de otimização.

**Tabela 4.19: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	147,07	169,87	234,22	273,13	289,97	187,91	154,95	98,05	74,17	49,50	27,00	5,04
Pentecoste	158,39	219,99	248,31	235,48	271,21	252,69	281,15	241,70	256,60	239,06	270,61	207,46
Caxitoré	129,80	100,36	115,55	118,42	153,06	127,73	102,51	100,03	96,56	98,31	41,88	133,08

**Tabela 4.20: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 02 – Negativo da elasticidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	1,92	223,09	231,54	246,40	174,69	285,73	98,84	248,04	28,63	194,89	5,02	108,39
Pentecoste	239,35	236,62	243,27	263,61	315,44	348,41	248,54	299,10	179,10	314,48	246,86	292,10
Caxitoré	36,76	94,46	107,17	124,82	107,35	121,31	85,17	131,73	128,92	159,34	136,38	133,09

**Tabela 4.21: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, sem a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	208,94	57,84	195,16	156,33	204,90	211,55	194,13	186,64	178,44	134,68	163,97	94,49
Pentecoste	234,29	196,60	230,56	218,04	269,95	262,53	271,92	260,38	220,80	186,95	261,83	180,10
Caxitoré	122,64	85,71	123,00	128,57	143,56	152,04	135,38	118,51	100,35	115,25	75,61	61,76

**Tabela 4.22: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 01 – Probabilidade de falha.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	13,6	9,42	32,66	43,47	51,4	70,7	36,05	35,09	13,06	37,64	10,16	7,06
Pentecoste	78,08	24,13	160,02	327,65	60,96	178,12	0,93	161,53	188,44	193,01	20,66	85,2
Caxitoré	31,07	170,93	183,45	167,98	199,04	1,74	174,7	30,87	11,64	29,11	66,24	7,81

**Tabela 4.23: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 02 – Negativo da elasticidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	61,52	10,27	195,45	12,30	35,03	255,46	42,79	11,93	274,20	51,21	202,50	22,42
Pentecoste	263,45	207,85	201,67	290,59	221,42	230,32	118,63	231,98	359,11	290,99	194,43	74,32
Caxitoré	53,44	51,41	110,43	160,66	128,74	74,79	59,60	96,73	160,21	70,84	185,69	131,31



**Tabela 4.24: Valores dos parâmetros ótimos da regra da curva guia, com a consideração a priori do déficit, com a minimização da função objetivo 03 – Vulnerabilidade.**

Reservatórios	Valores mensais dos parâmetros (volumes) que condicionam a Regra da Curva Guia (hm <sup>3</sup> )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
General Sampaio	23,54	283,71	300,62	281,41	286,17	276,76	90,42	75,35	66,84	19,04	25,65	34,16
Pentecoste	180,60	38,23	342,02	350,47	313,68	150,08	162,19	66,53	130,34	78,84	57,40	134,22
Caxitoré	183,77	9,55	189,22	176,15	94,38	181,68	122,06	79,77	158,90	86,73	133,19	90,24

### 4.5.3 A questão da convergência do Algoritmo Genético Mono-objetivo

Uma questão que se faz necessário comentar é a necessidade de estabelecer um critério de convergência, ou parada, no processo de otimização dos métodos de procura direta. O método de Rosenbrock utiliza basicamente dois critérios: a precisão do valor da função objetivo e a precisão dos valores das variáveis, ou seja, a invariabilidade no valor de todos os parâmetros que condicionam as regras operacionais.

O método de Rosenbrock utiliza apenas um conjunto de parâmetros e vai mudando o valor de cada um deles, de maneira a encontrar a direção do melhor gradiente no que diz respeito à direção de melhora da função objetivo, no espaço de soluções. Assim a convergência ao valor ótimo se dá em tempo relativamente curto, porém, não raramente, leva a um valor de ótimo local, e não global.

Já no caso do Algoritmo Genético Mono Objetivo, que trabalha com um conjunto de soluções, denominado de população, cada uma delas composta por um conjunto de parâmetros, se fez necessário, conforme já descrito na metodologia, implementar alguma maneira de verificação da convergência para a solução (o indivíduo) a ser considerada ótima em meio ao conjunto de soluções (na população). O critério adotado então foi o de calcular a cada geração os valores da média e do desvio padrão dos valores da função objetivo (aptidão) da população. Essa convergência está representada nas figuras 4.10 a 4.18 a seguir, relativas a cada uma das funções objetivo otimizadas.

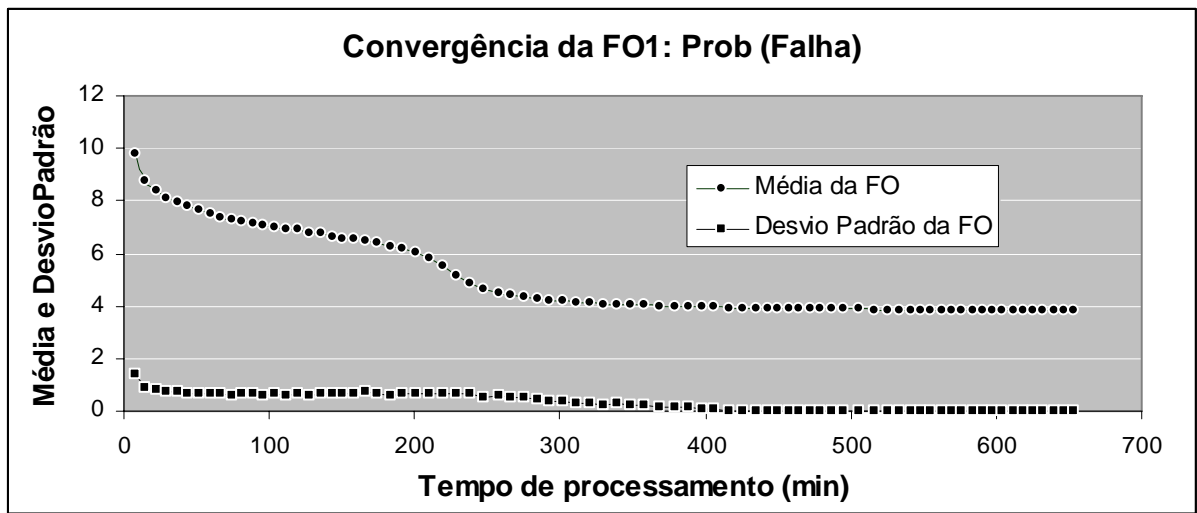


Figura 4.10: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.

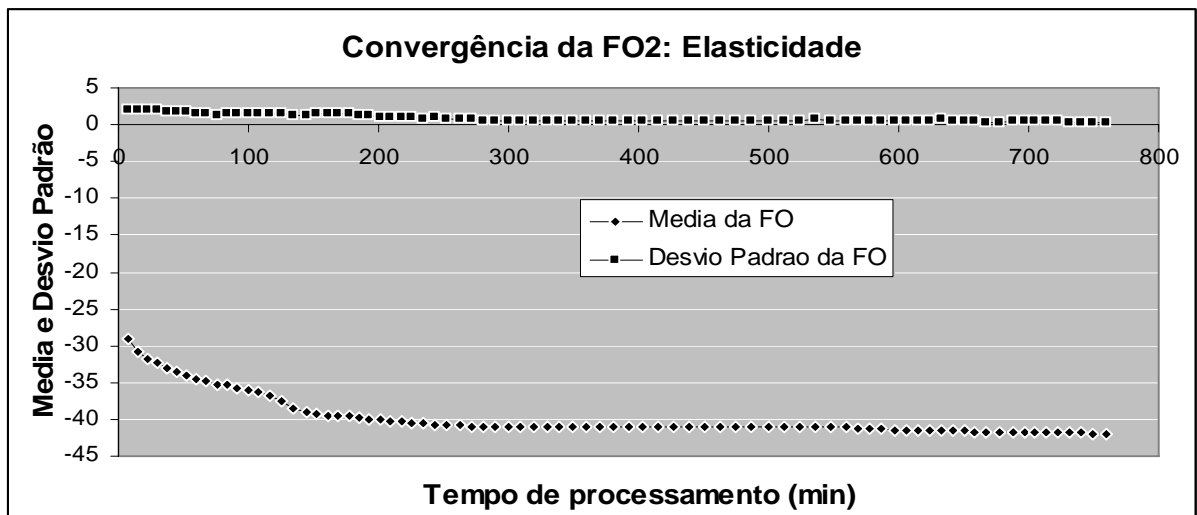


Figura 4.11: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.

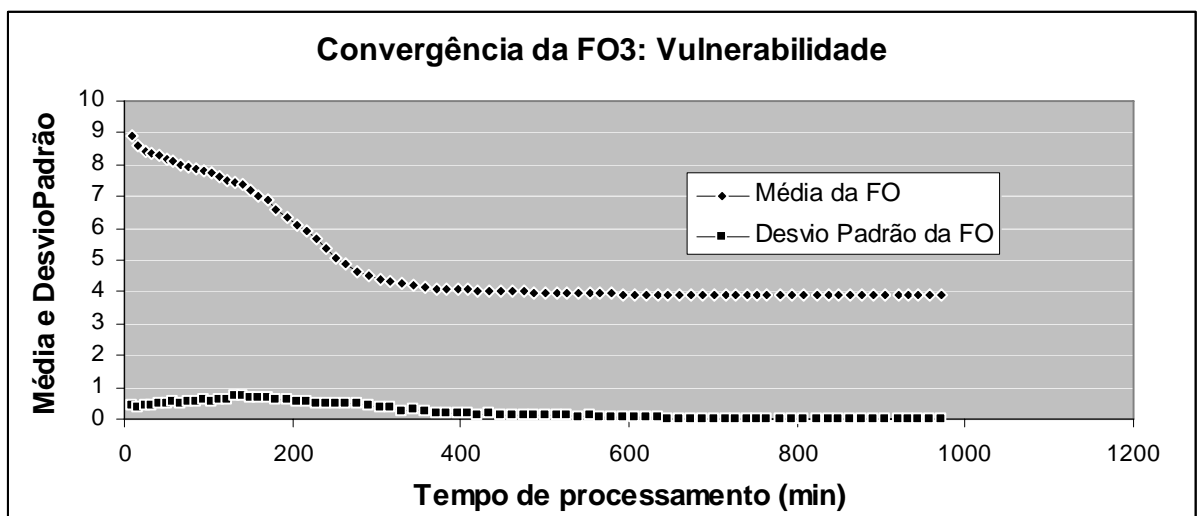


Figura 4.12: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, sem a consideração dos déficits mensais.

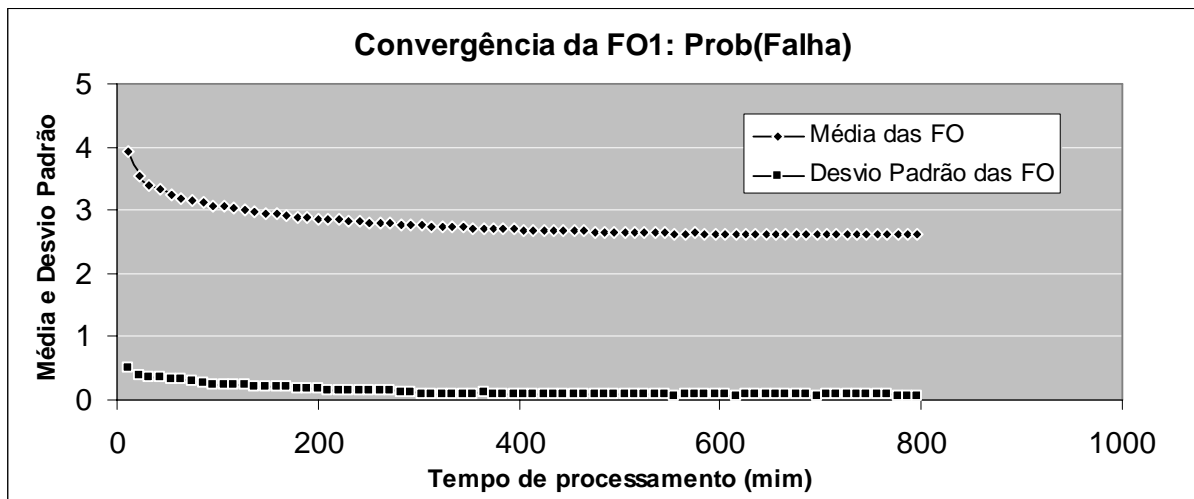


Figura 4.13: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais.

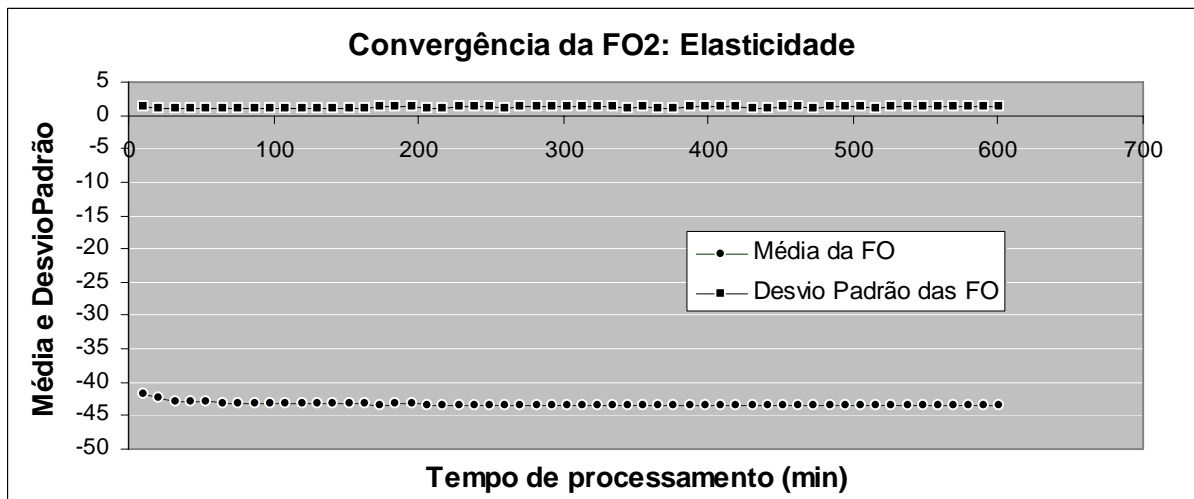


Figura 4.14: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais.

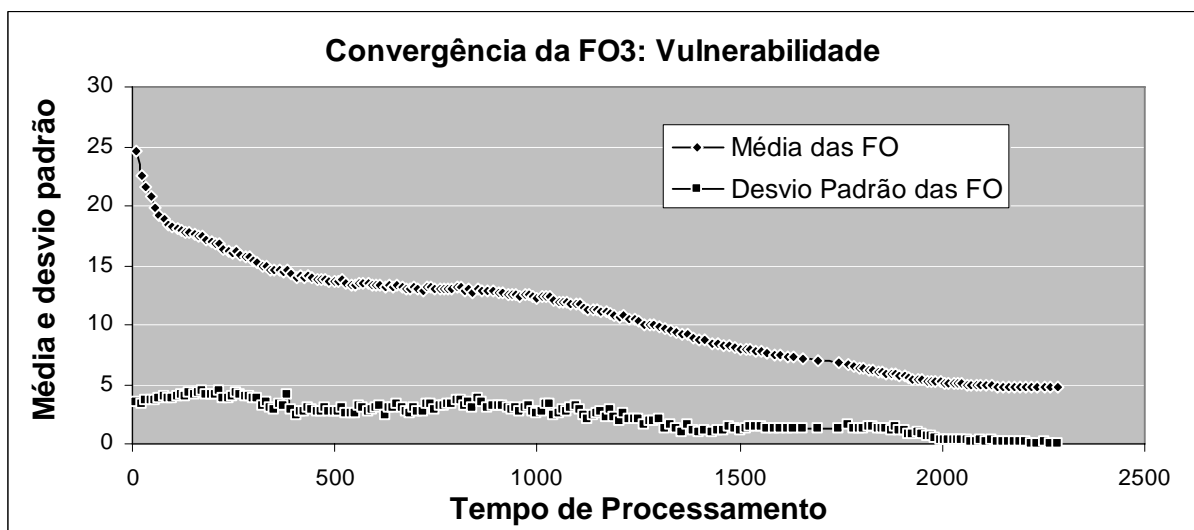


Figura 4.15: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra da Curva Guia, com a consideração dos déficits mensais.

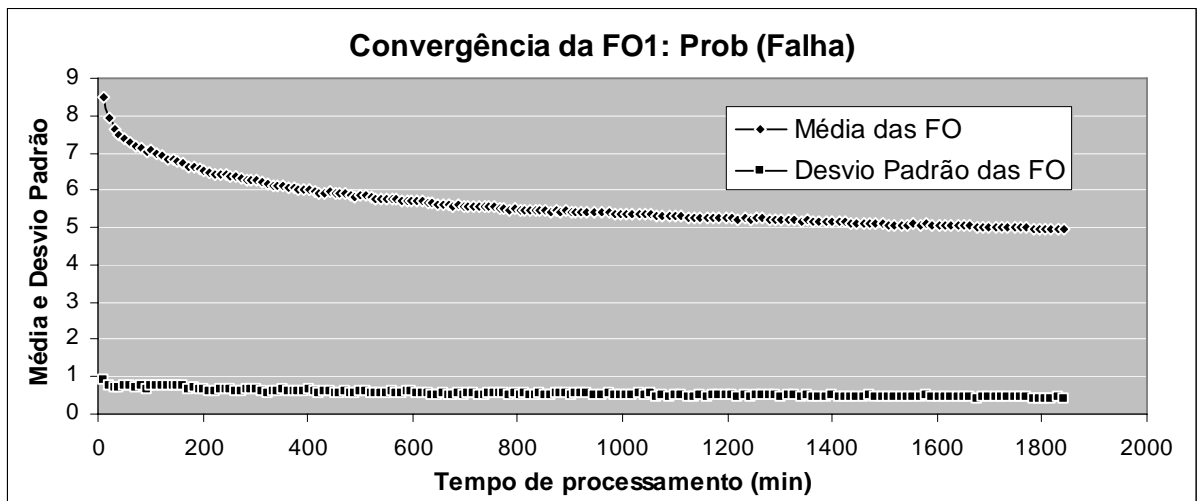


Figura 4.16: Convergência da aptidão FO1, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada.

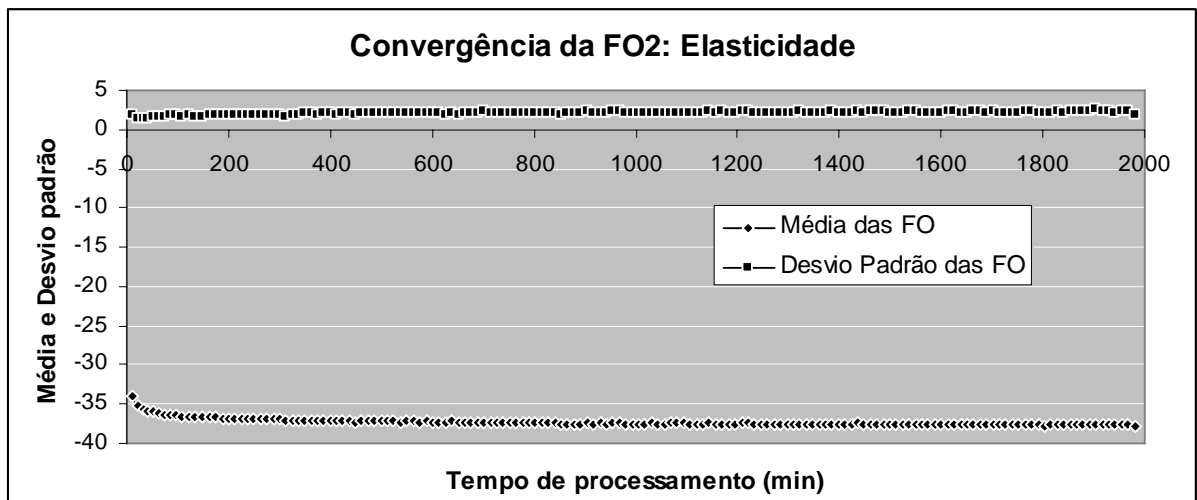


Figura 4.17: Convergência da aptidão FO2, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada.

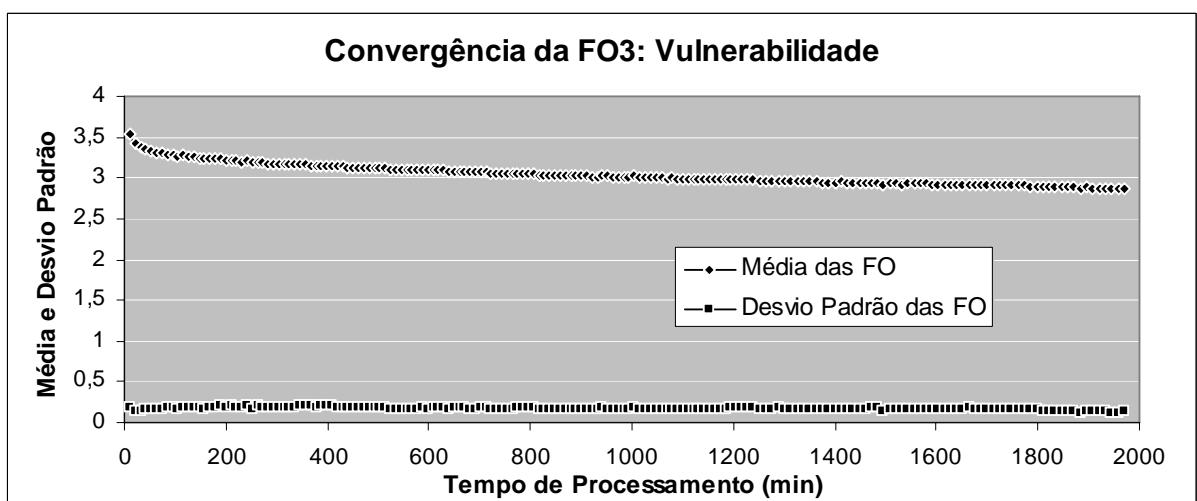


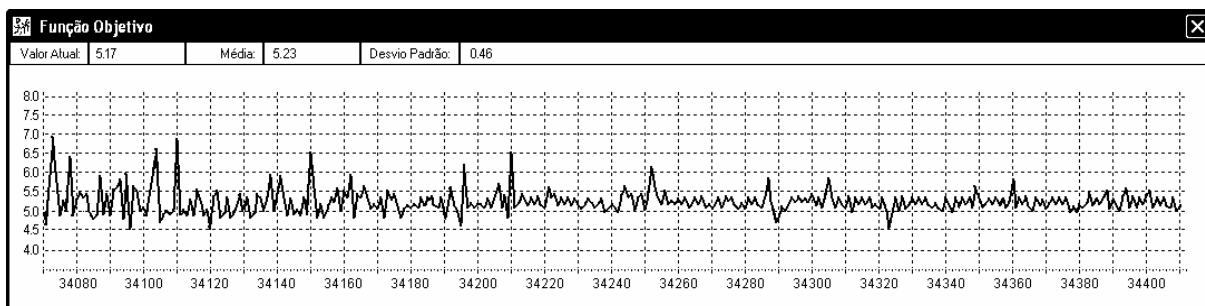
Figura 4.18: Convergência da aptidão FO3, da população, durante o processo de otimização dos parâmetros da Regra Padrão Modificada.

Conforme se percebe pela análise das figuras anteriores, a convergência para o ótimo na utilização do algoritmo genético pode ser bastante demorada. Aqui cabem dois comentários:

O primeiro comentário diz respeito ao *hardware* utilizado no processo de otimização, pois, na medida em que processadores dos computadores estão cada vez mais rápidos, essa demora na convergência é algo relativo, dependendo inclusive da configuração do *hardware* utilizado. Ainda, devido à característica do algoritmo, que divide o conjunto de soluções (população de indivíduos) em complexos, a computação em paralelo de alguns processos poderia levar à diminuição do tempo de processamento.

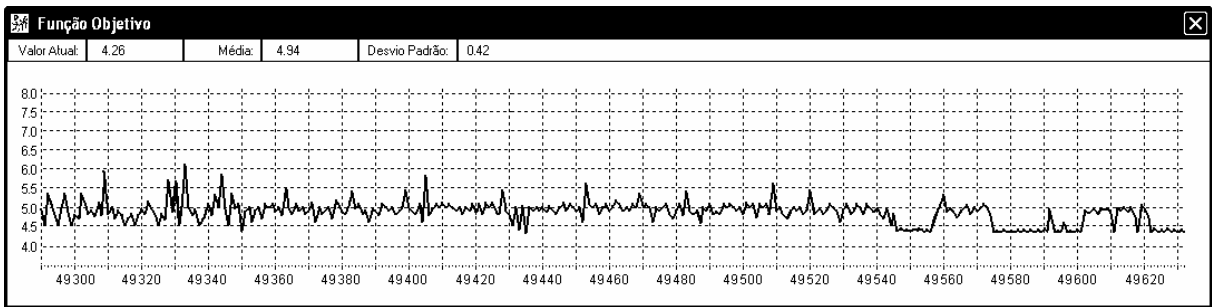
O segundo é que, uma vez que o algoritmo trabalha com um conjunto de soluções, denominado de população, antes da convergência para o ótimo, um dos indivíduos dessa população já pode ser considerado como a solução ótima desejada. Dessa forma deve-se acompanhar a evolução da variação da função objetivo, durante o processamento. Ou seja, acompanhar a variação no valor da aptidão de cada novo indivíduo que vai sendo agregado na população durante a evolução de cada complexo.

Enquanto a convergência não se inicia, o que se percebe é que, em uma dada geração da população, as aptidões dos novos indivíduos variarão com certa uniformidade em torno da média, como um sistema elástico, que, a cada valor acima da média, responderá com um valor abaixo da mesma. Além disso, a média das aptidões diminuirá a cada nova geração, conforme se percebe na figura 4.19.



**Figura 4.19: Ausência de convergência na variação das aptidões de novos indivíduos.**

Por outro lado, quando a convergência para o ótimo se inicia, os valores das aptidões dos novos indivíduos criados pelo algoritmo começam a se comportar “não-elasticamente”. Ou seja, a variação das aptidões apresentará um patamar inferior, como se não ultrapassassem mais um determinado valor, o que pode ser verificado no exemplo da figura 4.20.



**Figura 4.20: Início da convergência no processo de otimização.**

Dado que os melhores indivíduos permanecem na população e os piores são substituídos por outros, quando houver a criação de novos indivíduos que repetidamente apresentarem valores de aptidão limitados por um patamar inferior, se interrompe o processo, antes de uma convergência mais efetiva, e se escolhe na população atual aquele indivíduo de melhor aptidão (menor valor de FO). Esse será considerado como a solução que representa o valor ótimo da FO.

Conforme já discutido anteriormente, por se tratar de um processo de procura direta, a solução considerada como ótima pode não ser realmente o ótimo global. Porém, essa mesma solução pode ser considerada como excelente do ponto de vista de um processo que une a possibilidade de simular a regra operacional considerada como ótima, com um método de procura que possui as vantagens de um processo aleatório de otimização.

## **4.6 A aplicação do Algoritmo Genético Multi-objetivo para obtenção das regras operacionais de melhor compromisso**

Da mesma forma que o algoritmo genético mono-objetivo, o algoritmo genético multi-objetivo se utiliza de um conjunto de soluções, denominado de população, onde cada solução (conjunto de parâmetros) recebe o nome de indivíduo. Porém, ao contrário do algoritmo mono-objetivo que define o número de indivíduos através da quantidade de parâmetros de cada regra operacional e do número de complexos escolhido pelo usuário do sistema, no algoritmo genético multi-objetivo a quantidade de indivíduos da população é escolhida diretamente pelo usuário do sistema.

Assim sendo, para realização dessa aplicação, foram utilizados os seguintes tamanhos da população: 100, 200, 300 e 500 indivíduos (soluções ou conjunto de parâmetros). Esses valores foram arbitrários com o objetivo de comparar a convergência da otimização e a variabilidade das soluções de acordo com o tamanho da população.

No caso da otimização multi-objetivo, também se trabalhou com três reservatórios estratégicos, sendo cada uma de suas regras operacionais condicionada por 12 parâmetros

mensais. Desta forma, a regra que condiciona a operação de todo o sistema possui 36 parâmetros, ou seja, quando da escolha de 100 indivíduos para a população, o algoritmo manipula simultaneamente 100 indivíduos caracterizados, cada um, por 36 genes (parâmetros); na população de 200 indivíduos, manipula simultaneamente 200 indivíduos caracterizados, cada um, por 36 genes (parâmetros), e assim sucessivamente.

O processo de otimização foi efetuado utilizando simultaneamente as três funções objetivo (aptidões) já mencionadas, ou seja, o somatório das probabilidades de falha (que indiretamente maximiza a confiabilidade do sistema), o somatório do valor negativo das elasticidades (maximizando a própria elasticidade) e o somatório das vulnerabilidades.

O objetivo então era encontrar um conjunto de soluções ditas não-dominadas, ou seja, um conjunto de soluções que pertencesse ao ótimo de Pareto. Conforme já discutido em capítulos anteriores, esse conjunto ótimo é caracterizado pela obtenção do valor do índice de Pareto igual a 1.

Alguns problemas de convergência ocorreram durante o processo de otimização multi-objetivo, que serão discutidos no item 4.6.3 abaixo.

O que podemos adiantar, para um melhor entendimento do que se obteve como resultado na otimização multi-objetivo, é que o conjunto das soluções não-dominadas se encontra numa região dita de melhor compromisso entre as aptidões (funções-objetivo) utilizadas. Em outras palavras, numa região, do espaço de soluções, onde os menores (melhores) valores de uma determinada aptidão são obtidos sem piorar demasiadamente os valores das demais aptidões. Uma vez obtido esse conjunto de soluções, procurou-se verificar duas questões:

- Qual o grau de variabilidade dos parâmetros da regra padrão modificada, em cada uma das populações?

- Quais os valores das aptidões das soluções que, pertencendo ao conjunto ótimo, segundo Pareto, e situado numa região de melhor compromisso do espaço de soluções, possuíam os menores valores de cada aptidão (função-objetivo), quando se classifica em ordem crescente o conjunto, de acordo com cada aptidão, separadamente?

#### **4.6.1 Obtenção dos parâmetros da regra padrão modificada para a solução de melhor compromisso**

Neste item serão apresentados os resultados obtidos quando se buscou obter a solução da otimização multi-objetivo dos parâmetros que condicionam a denominada regra padrão modificada.

Salienta-se que não foi obtida a convergência do algoritmo genético multi-objetivo para as populações de 300 e 500 indivíduos. As considerações sobre como contornar esse fato serão discutidas nos itens a seguir.

#### 4.6.1.1 Variabilidade dos parâmetros da regra padrão modificada

Um detalhe que se procurou verificar no resultado do processo de otimização foi o grau de variabilidade dos parâmetros da regra padrão modificada para cada um dos tamanhos populacionais utilizados. Assim sendo os valores médios, mínimos e máximos de cada parâmetro mensal podem ser visualizados nas figuras a seguir referentes a cada um dos três reservatórios do sistema.

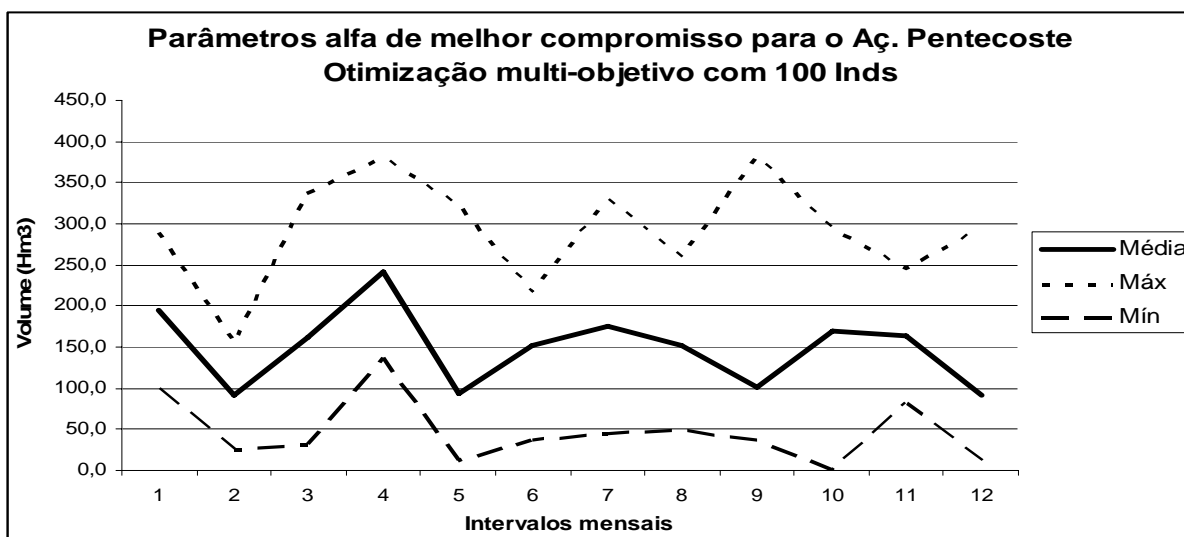


Figura 4.21: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 100 indivíduos.

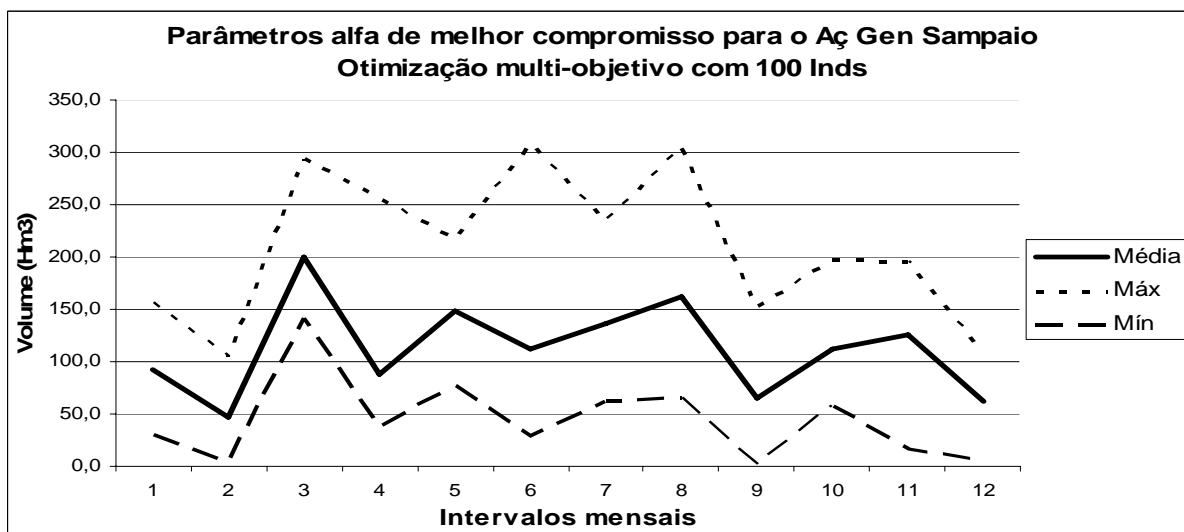


Figura 4.22: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Gen. Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 100 indivíduos.



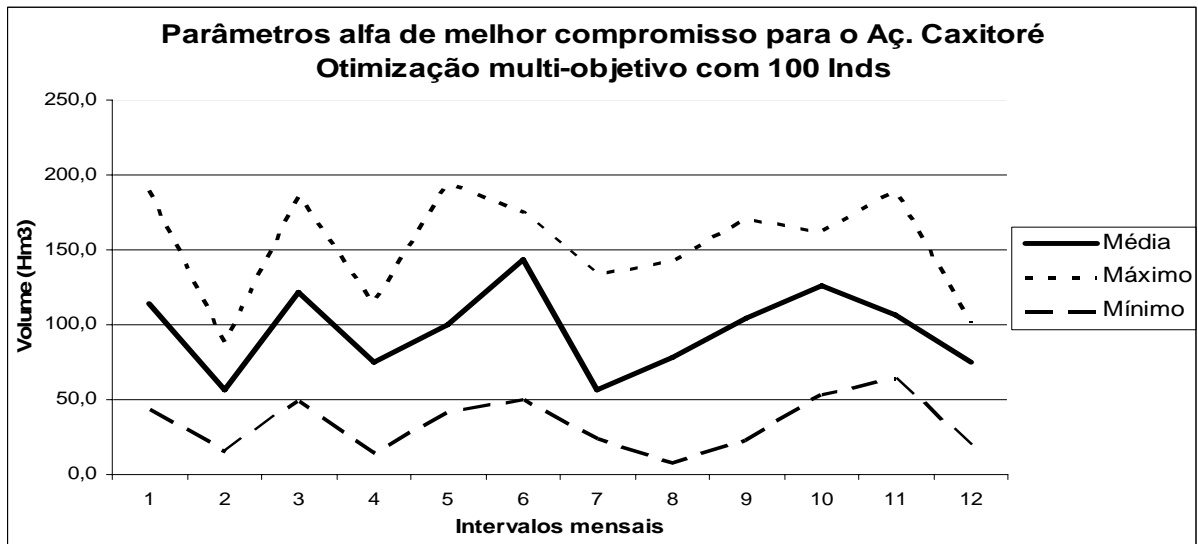


Figura 4.23: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 100 indivíduos.

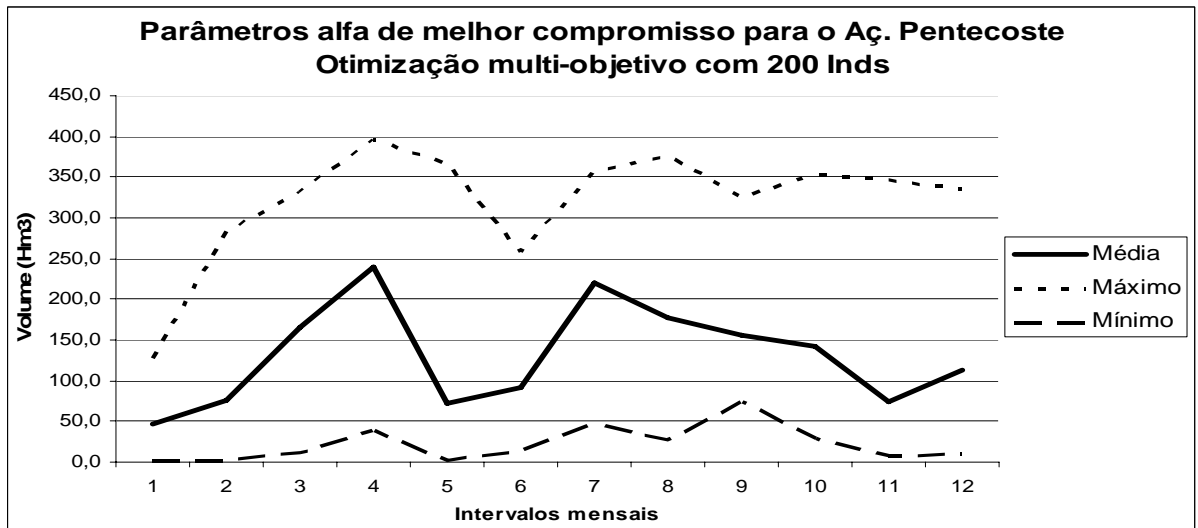


Figura 4.24: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 200 indivíduos.

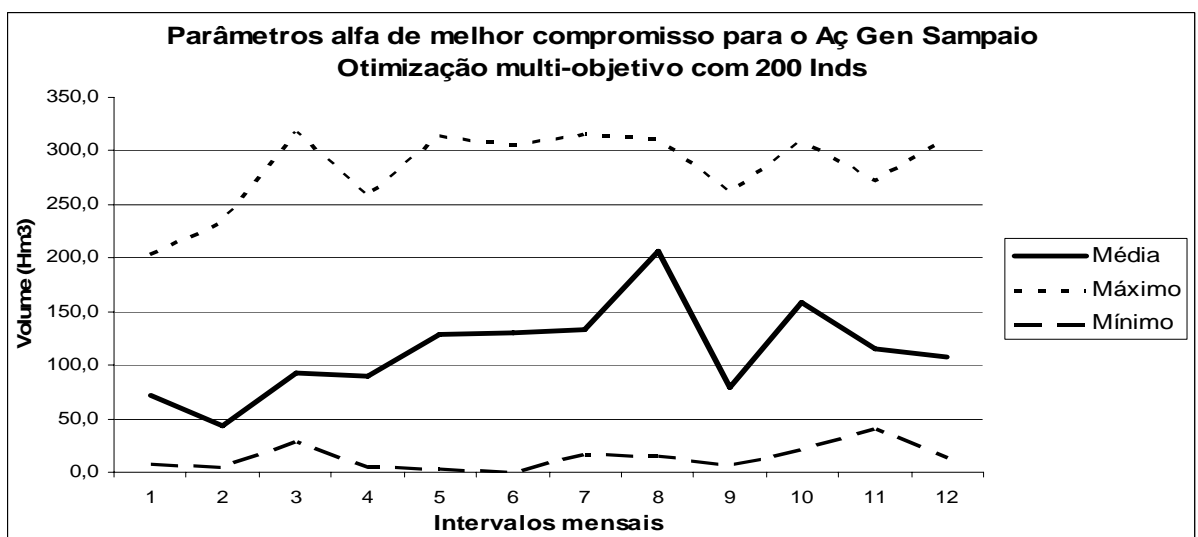


Figura 4.25: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Gen. Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 200 indivíduos.

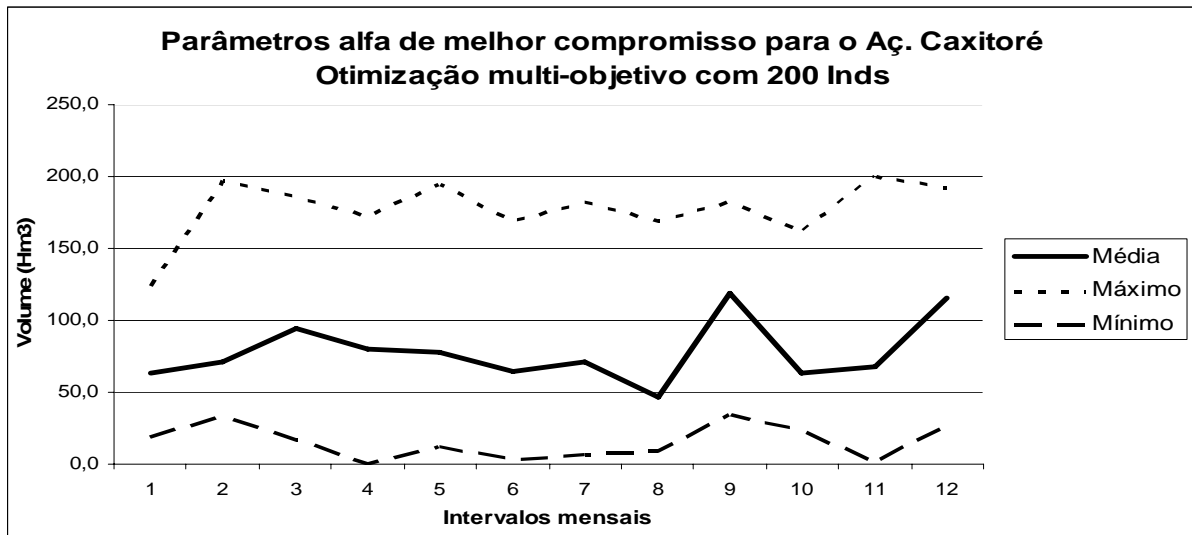


Figura 4.26: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 200 indivíduos.

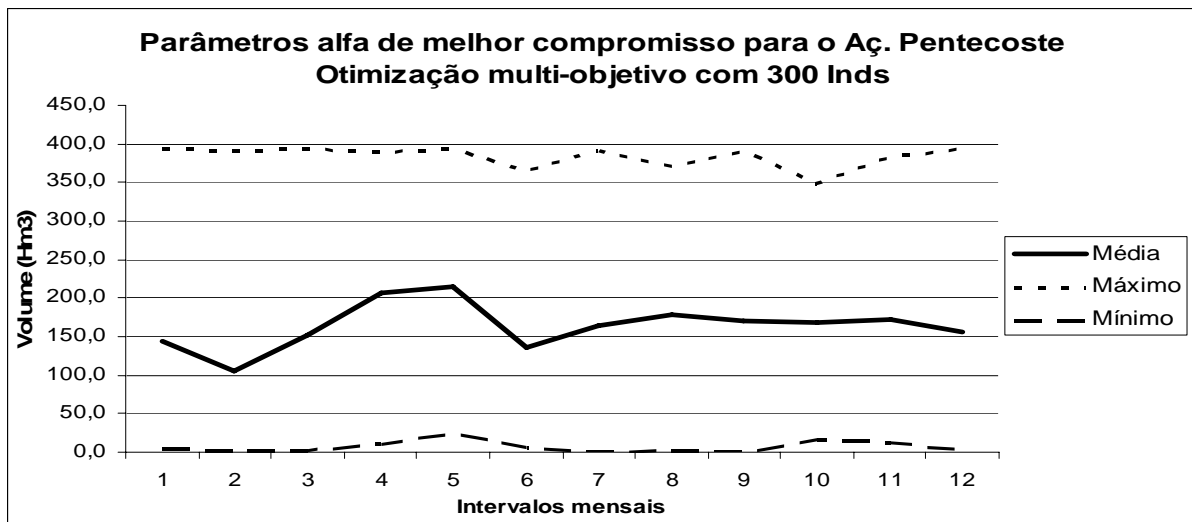


Figura 4.27: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 300 indivíduos.

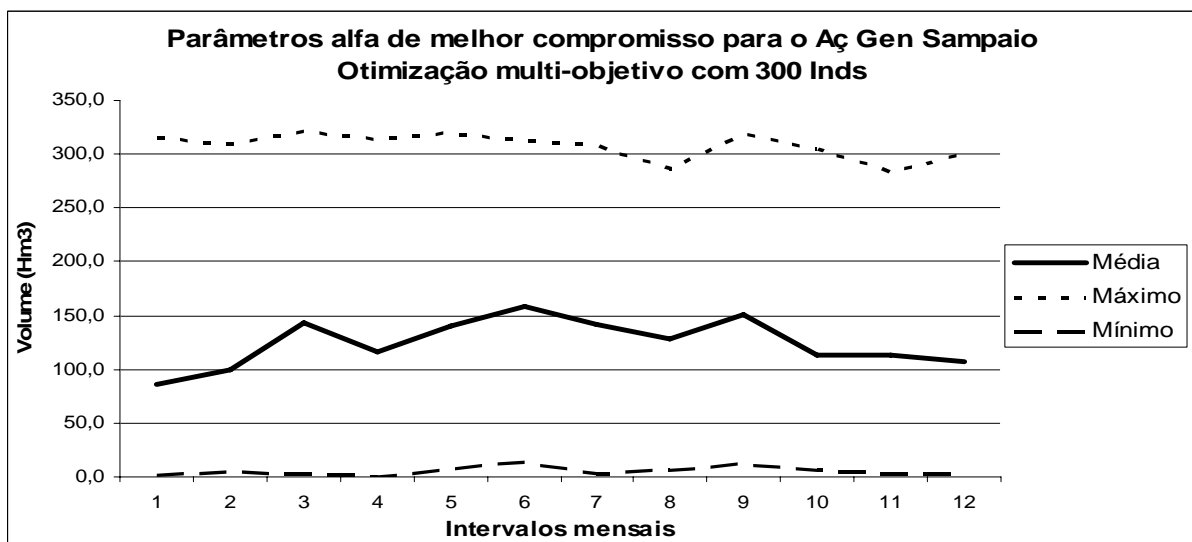


Figura 4.28: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Gen. Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 300 indivíduos.

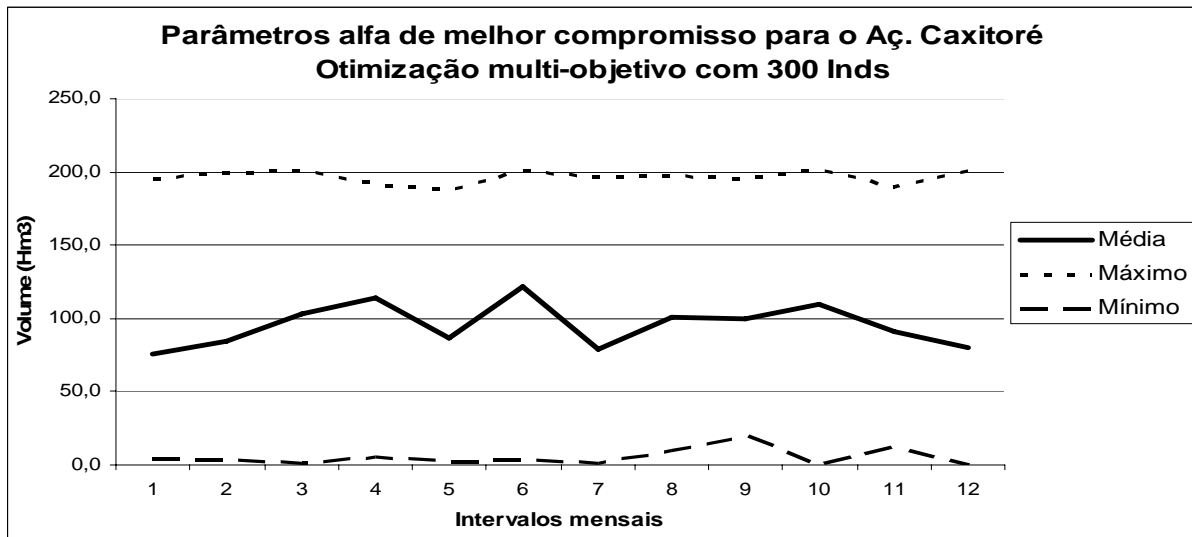


Figura 4.29: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 300 indivíduos.

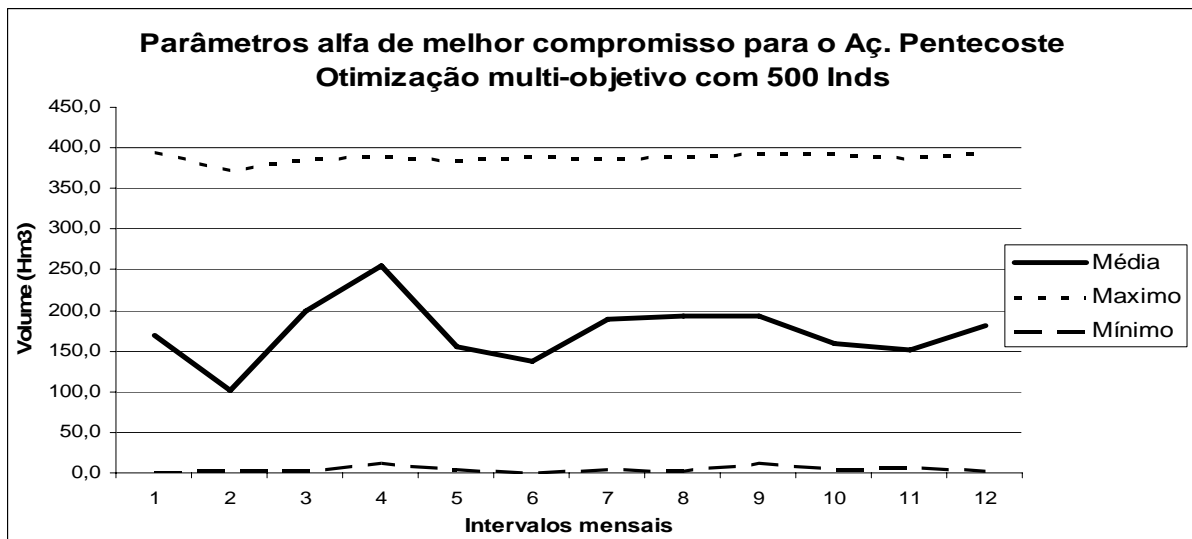


Figura 4.30: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 500 indivíduos.

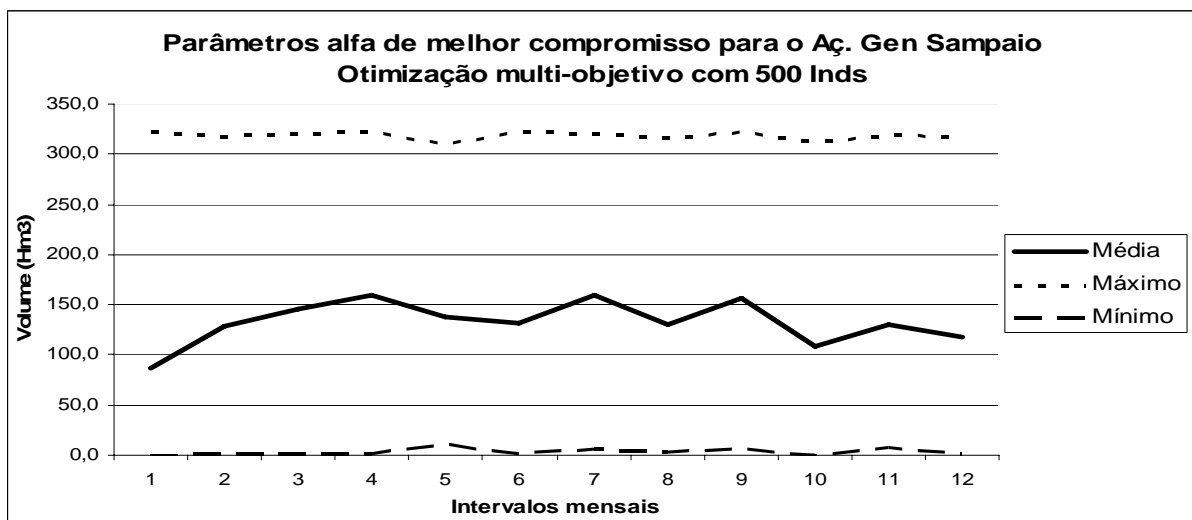


Figura 4.31: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Gen Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 500 indivíduos.

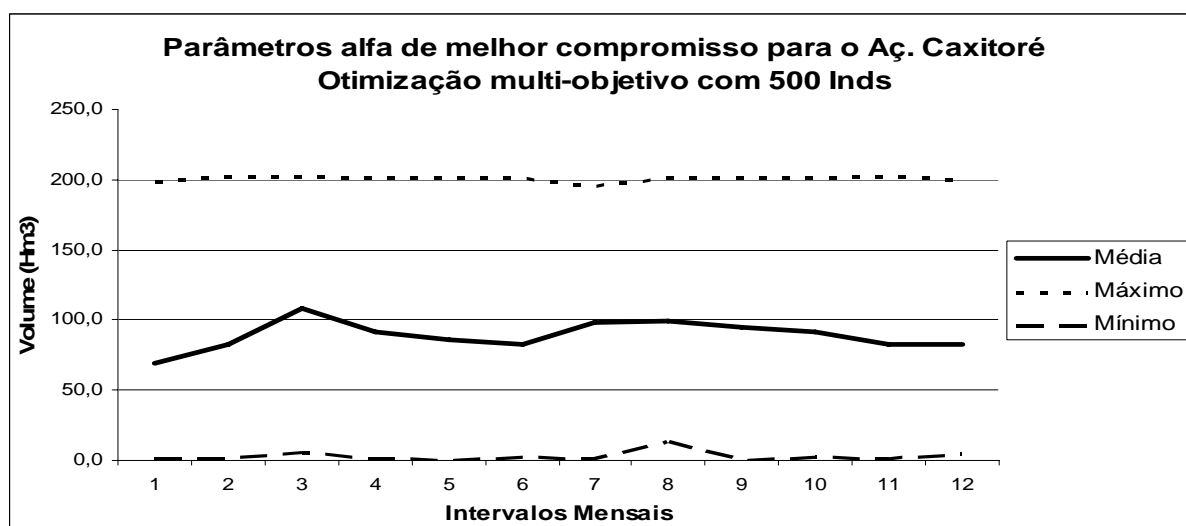


Figura 4.32: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo utilizando uma população de 500 indivíduos.

O que se percebe, analisando as figuras acima referentes a cada um dos reservatórios: Pentecoste (figuras 4.21, 4.24, 4.27 e 4.30), General Sampaio (figuras 4.22, 4.25, 4.28 e 4.31) e Caxitoré (figuras 4.23, 4.26, 4.29 e 4.32), é que a variabilidade nos valores dos parâmetros da regra padrão modificada é muito alta quando se utiliza uma população de 100 indivíduos. Além disso, quanto maior for o número de indivíduos, ou seja, quando se aumenta o tamanho da população utilizado para o processo de otimização multi-objetivo, mais impraticável se torna a possibilidade de utilizar os resultados para a obtenção de uma fronteira de validade para cada parâmetro mensal da regra operacional. Essa conclusão se torna mais evidente diante do fato de que a convergência para o ótimo de Pareto não foi atingida nas populações de 300 e 500 indivíduos, como comentaremos no item 4.6.3 abaixo.

#### 4.6.1.2 Valores mínimos de cada aptidão no conjunto de Pareto

Uma vez que o conjunto de soluções obtidas pertence ao conjunto ótimo, segundo Pareto, e situa-se numa região de melhor compromisso do espaço de soluções, o que se fez foi o seguinte: todas as soluções foram armazenadas em uma planilha eletrônica e classificadas, em ordem crescente, segundo cada uma das três aptidões, separadamente.

Dessa forma foram obtidas, para cada tamanho de população, três indivíduos: um com o menor (melhor) valor para a FO 1, outro com o menor valor para a FO 2 e um terceiro com o menor valor para a FO 3.

Mesmo para as populações de 300 e 500 indivíduos, para as quais não foi obtida a convergência para o ótimo de Pareto, essa classificação foi efetuada, uma vez que podemos considerar o seguinte detalhe: na população utilizada no processo de otimização multi-objetivo, no qual não há convergência, se forem retirados todos os indivíduos dominados, o

grupo restante será um conjunto ótimo de Pareto e situado numa região de melhor compromisso entre as aptidões. Os três indivíduos encontrados na classificação crescente das três aptidões, utilizando a população inteira, com certeza estarão nesse grupo não-dominado. Assim foi obtida a seguinte tabela comparativa dos processos de otimização:

**Tabela 4.25: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo.**

Algoritmo	População	Ordem Aptidão	Indivíduo	F.O. 1	F.O. 2	F.O. 3
AGMulti	100 Inds	FO1	8	6,7407	-30,4333	2,3301
		FO2	39	7,7130	-35,9502	2,4444
		FO3	4	6,9660	-31,2129	<b>2,2735</b>
	200 Inds	FO1	105	<b>6,0340</b>	-29,1681	2,6225
		FO2	13	8,3457	-37,5564	3,1515
		FO3	135	6,7099	-30,2160	2,3827
	300 Inds	FO1	273	6,1327	-32,6866	2,3723
		FO2	102	8,7840	-37,9187	3,1769
		FO3	200	6,4012	-31,6962	2,3003
	500 Inds	FO1	440	6,6975	-32,9109	2,3965
		FO2	109	7,7901	<b>-38,3136</b>	3,1272
		FO3	6	7,2901	-29,3270	2,2862
AGMono	292 Inds	FO1	melhor	<b>4,0895</b>	-34,7402	2,5960
		FO2		7,8056	<b>-38,6407</b>	3,5463
		FO3		8,8302	-31,0971	<b>2,5246</b>

Na tabela 4.25, destaca-se que os melhores indivíduos obtidos no processo de otimização multi-objetivo foram: o indivíduo 105 da população de 200 indivíduos, segundo a FO1; o indivíduo 109 da população de 500 indivíduos, segundo a FO2; e o indivíduo 4 da população de 100 indivíduos, segundo a FO3.

Ainda, de acordo com a mesma tabela 4.25, o que se percebe é que o algoritmo genético mono-objetivo obteve valores melhores (menores) para as aptidões 1 e 2 (F.O.1 e F.O.2 respectivamente), ou seja, teve um desempenho melhor no que se refere a otimizar a regra operacional quando o objetivo era minimizar a probabilidade de falha e a elasticidade do sistema. O mesmo não ocorreu quando se tratou de minimizar a vulnerabilidade. O que se verifica na tabela é que vários dos valores da FO3, vulnerabilidade, são menores nos resultados obtidos pelo algoritmo genético multi-objetivo em relação ao valor obtido quando se minimizou mono objetivamente a aptidão 3, ou seja, a F.O. 3.

Esse resultado se caracteriza numa inconsistência, pois, se o algoritmo genético encontra o conjunto de soluções numa região de melhor compromisso entre as funções objetivo, cada um dos valores destas não deveria ser melhor que os valores obtidos pelo algoritmo genético mono-objetivo quando utilizado para minimizar individualmente cada uma delas.

Nas tabelas seguintes se encontram os valores dos parâmetros da regra padrão modificada, para cada um dos reservatórios, que, pertencendo à solução dita não-dominada do

ótimo de Pareto, representam aqueles indivíduos (conjunto de parâmetros) que minimizam, separadamente, cada uma das aptidões (funções objetivo).

**Tabela 4.26: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório General Sampaio referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório General Sampaio											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	105	200 lnds	63,29	44,92	87,16	30,82	133,28	120,24	131,18	205,14	75,55	146,63	166,51	83,51
2	109	500 lnds	22,23	0,93	174,30	52,03	32,24	48,95	113,14	6,60	274,81	93,63	109,90	185,89
3	4	100 lnds	94,29	52,71	179,42	88,24	165,63	94,98	135,22	155,93	67,07	99,09	119,18	67,24

**Tabela 4.27: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Pentecoste referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Pentecoste											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	105	200 lnds	54,8	42,58	122,8	149,74	60,96	65,95	145,03	137,88	137,72	127,18	108,43	92,45
2	109	500 lnds	114,28	332,05	171,19	114,98	280,3	23,64	188,94	349,34	311,43	165,91	6,08	323,26
3	4	100 lnds	197,92	71,4	142,5	250	87,79	150,82	173,77	130,56	89,69	179,28	175,69	99,66

**Tabela 4.28: Valores dos parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Caxitoré referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da regra padrão modificada para o reservatório Caxitoré											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	105	200 lnds	65,89	92,12	78,7	73,65	79,61	53,55	52,59	8,35	99,72	76,13	86,35	99,72
2	109	500 lnds	83,25	194,74	15,45	201,42	124,83	37,28	90,9	161,07	33,99	22,2	18,15	157,41
3	4	100 lnds	104,56	48,54	114,02	80,39	109,23	139,58	56,84	69,06	101,71	129,76	97,13	80,08

## 4.6.2 Obtenção dos parâmetros da regra da curva guia para a solução de melhor compromisso

Neste item serão apresentados os resultados obtidos quando se buscou obter a solução da otimização multi-objetivo dos parâmetros que condicionam a denominada regra da curva guia.

Conforme já comentado no item 4.5.2 acima, à regra da curva guia foi associada uma verificação da real necessidade de descarga do reservatório. Então quando se considera o déficit, o mesmo é calculado a priori em cada intervalo de operação e este déficit, convertido em descarga necessária, é operado se a curva guia assim o permitir. Nos quatro itens que se seguem, estão descritos então os resultados obtidos, para a otimização multi-objetivo, quando se considera, ou não, o déficit hídrico na aplicação da regra operacional nos reservatórios.

### 4.6.2.1 Variabilidade dos parâmetros da regra da Curva Guia, sem a consideração do déficit hídrico

Com relação ao resultado da otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem a consideração do déficit, se verificou qual foi o grau de variabilidade dos parâmetros para cada um dos tamanhos populacionais utilizados. Essa variabilidade pode ser visualizada nas figuras a seguir referentes a cada um dos três reservatórios do sistema.

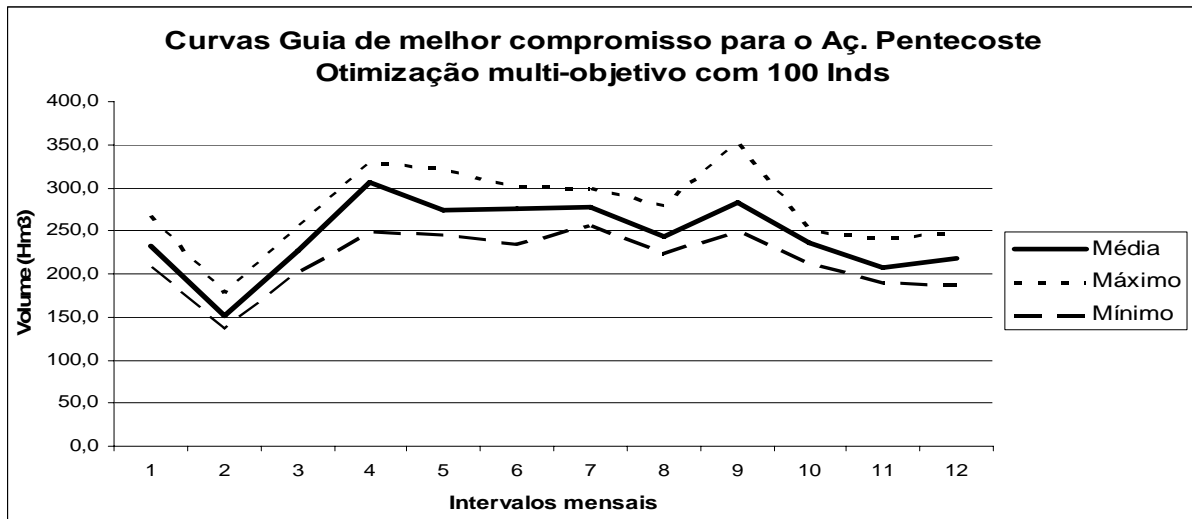


Figura 4.33: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.

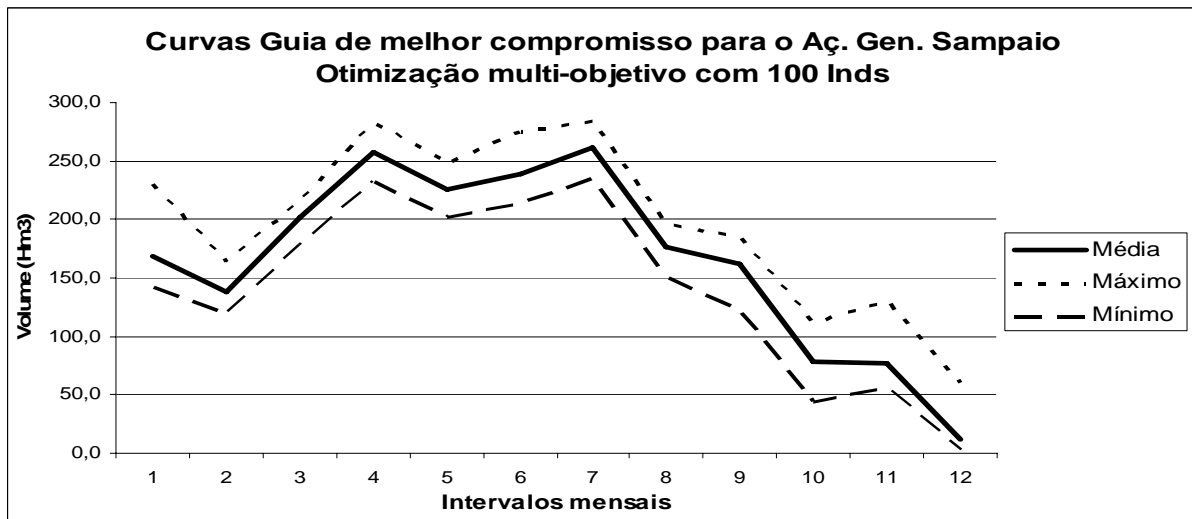


Figura 4.34: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. General Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.

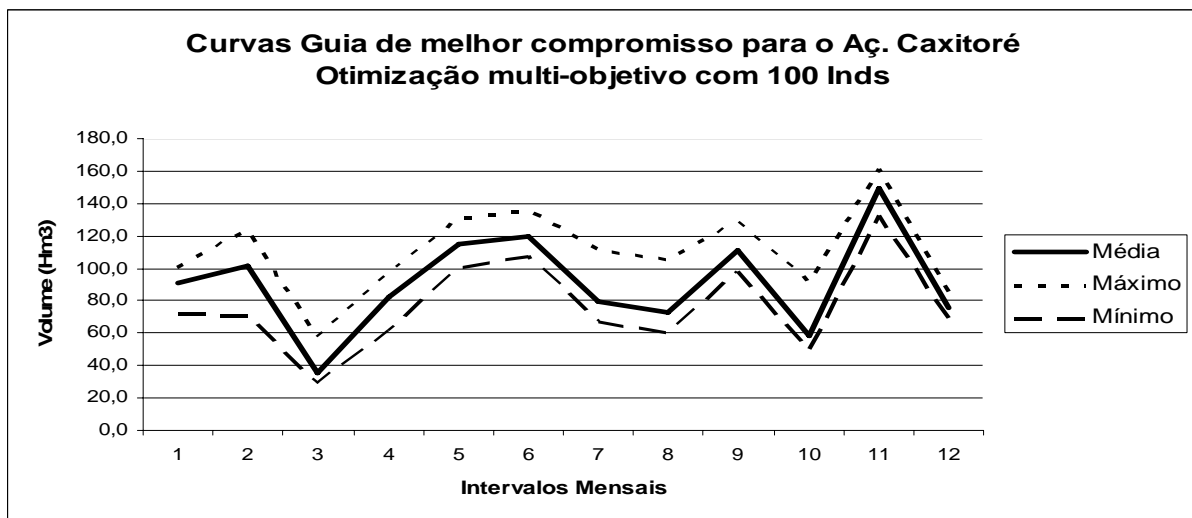


Figura 4.35: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.

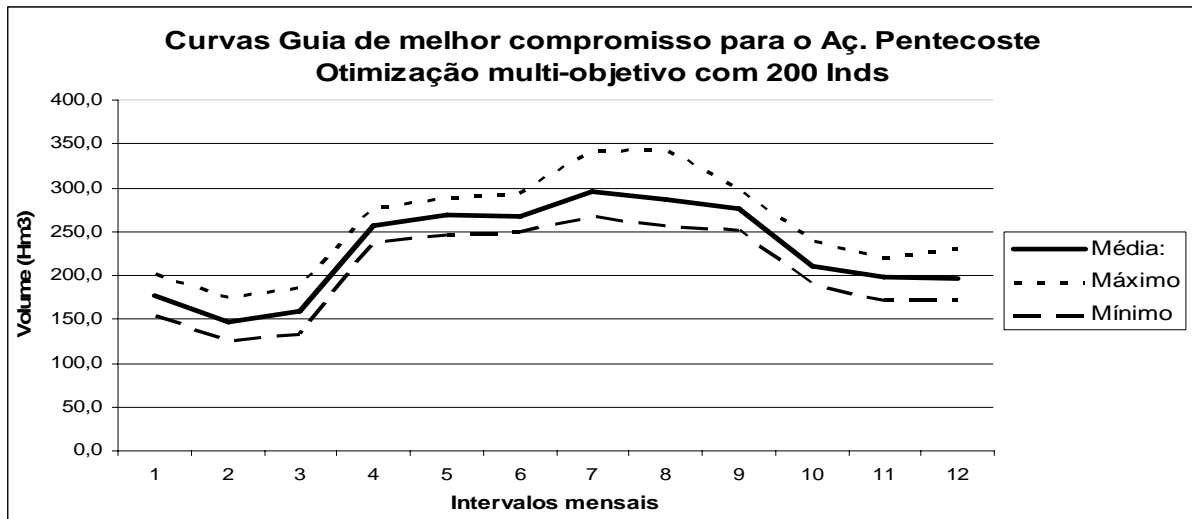


Figura 4.36: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.

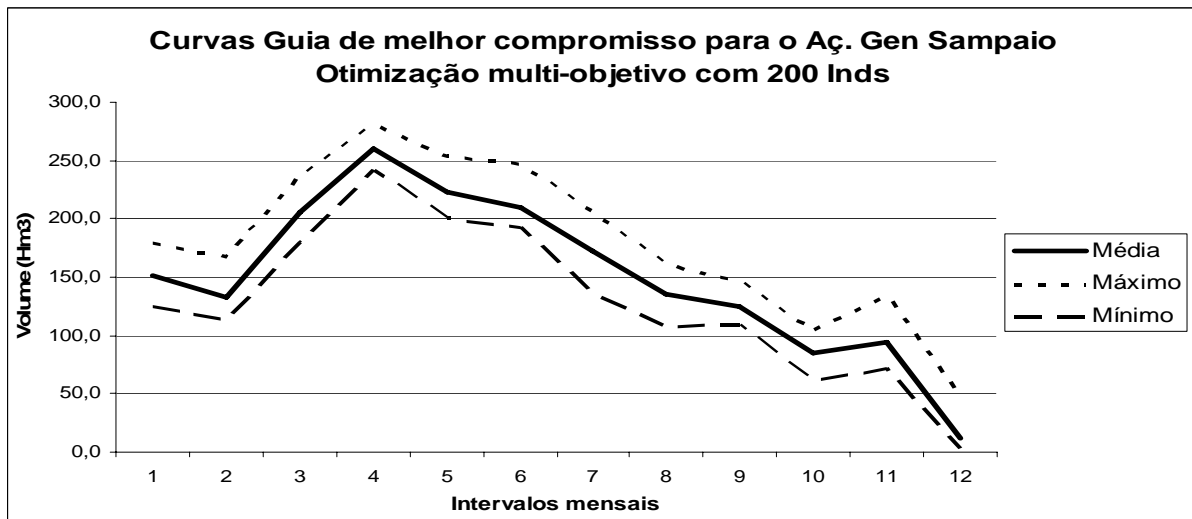


Figura 4.37: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. General Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.

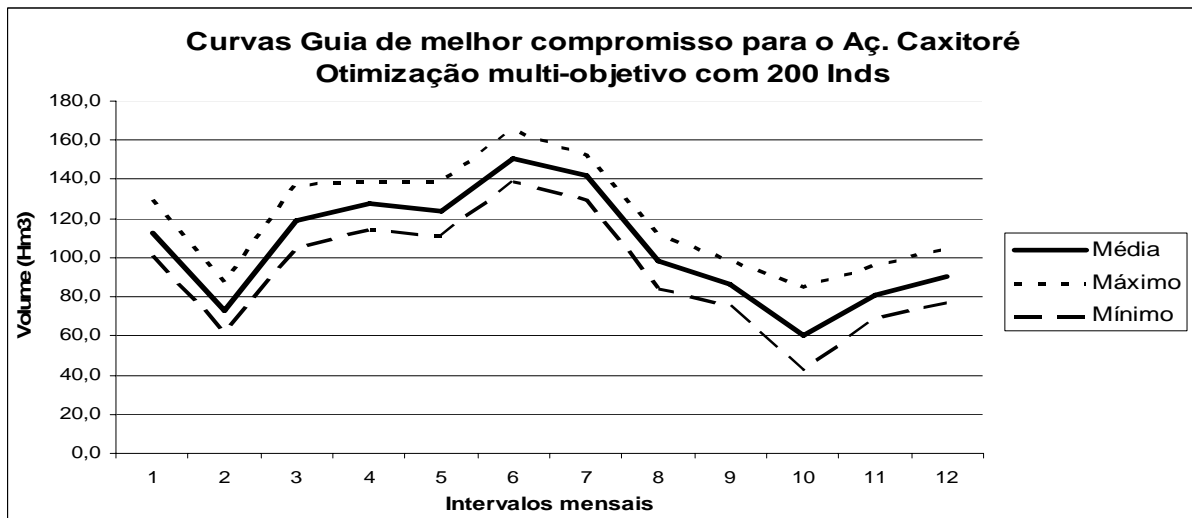


Figura 4.38: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.



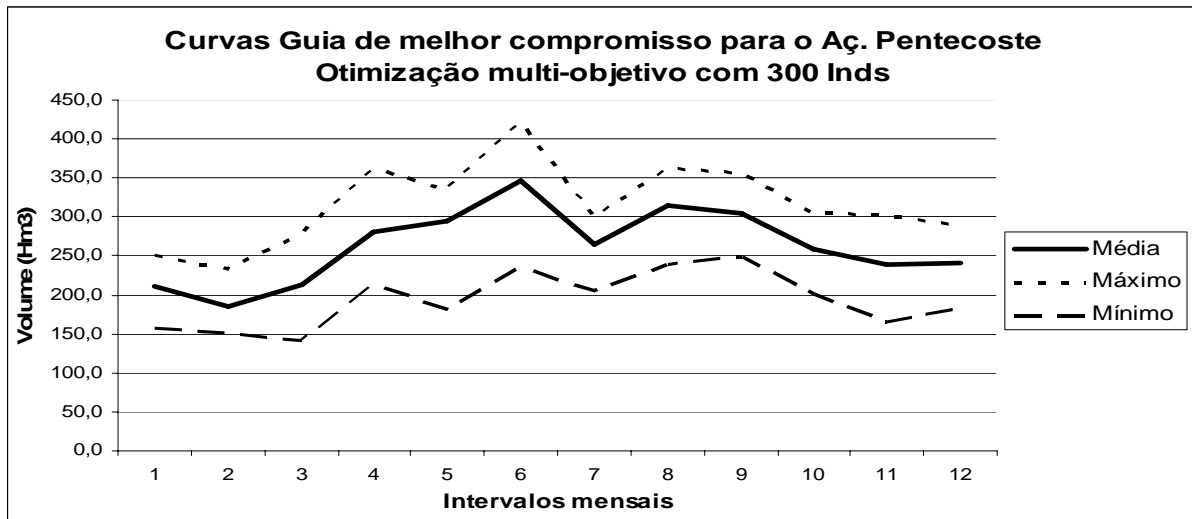


Figura 4.39: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

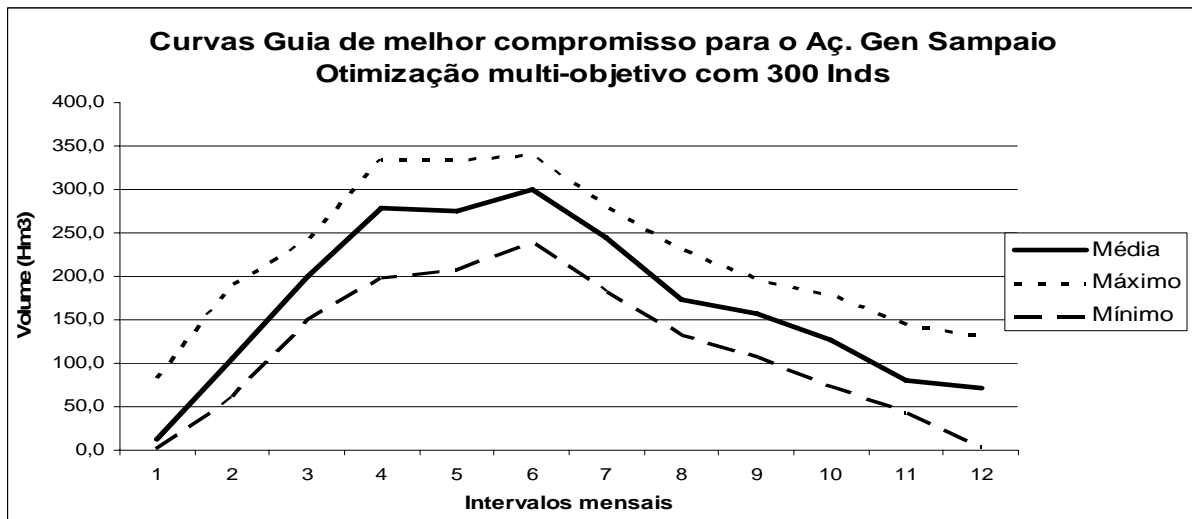


Figura 4.40: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. General Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

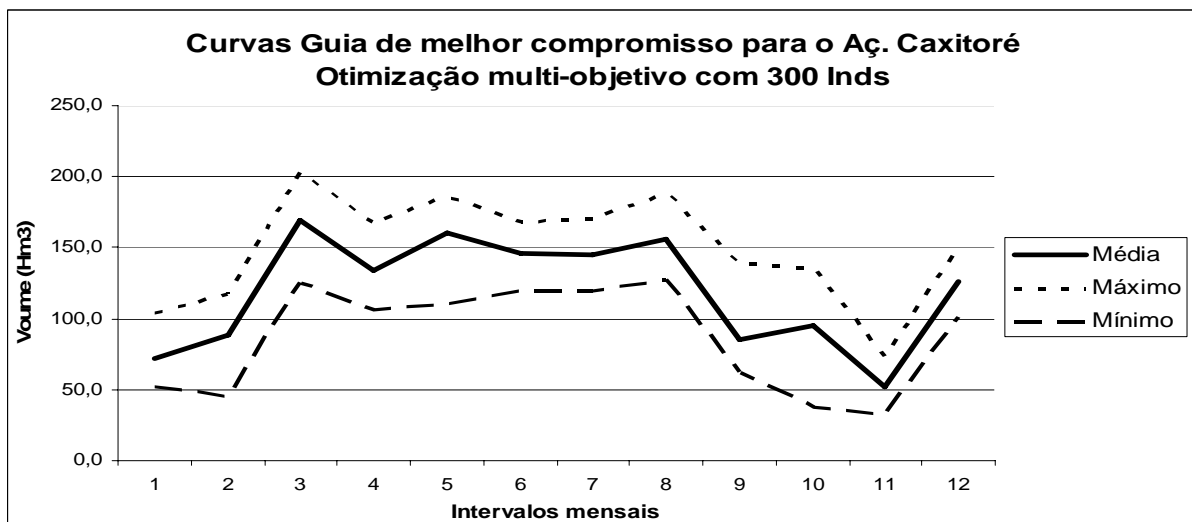


Figura 4.41: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

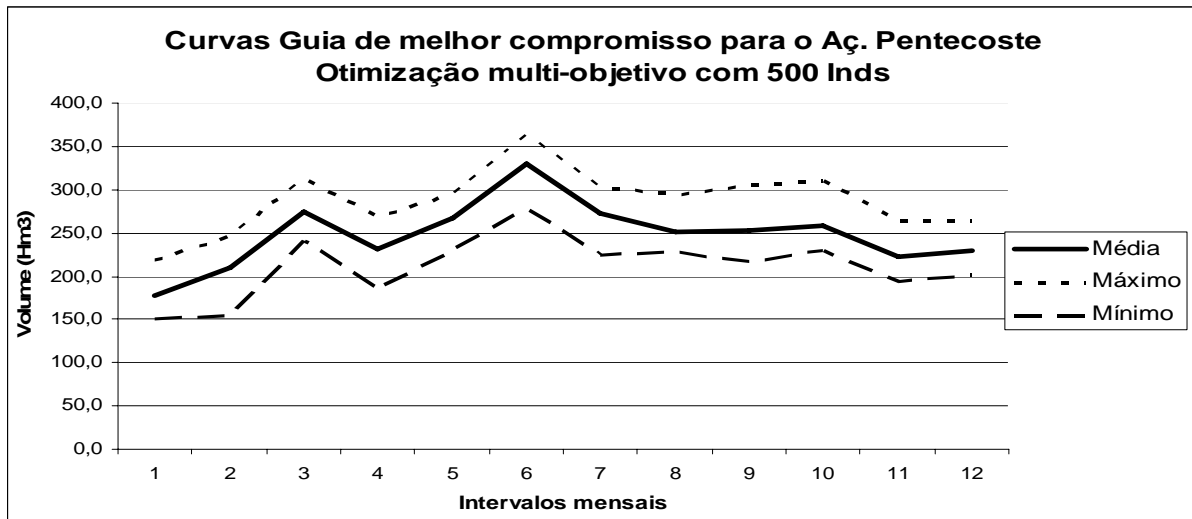


Figura 4.42: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Pentecoste, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.

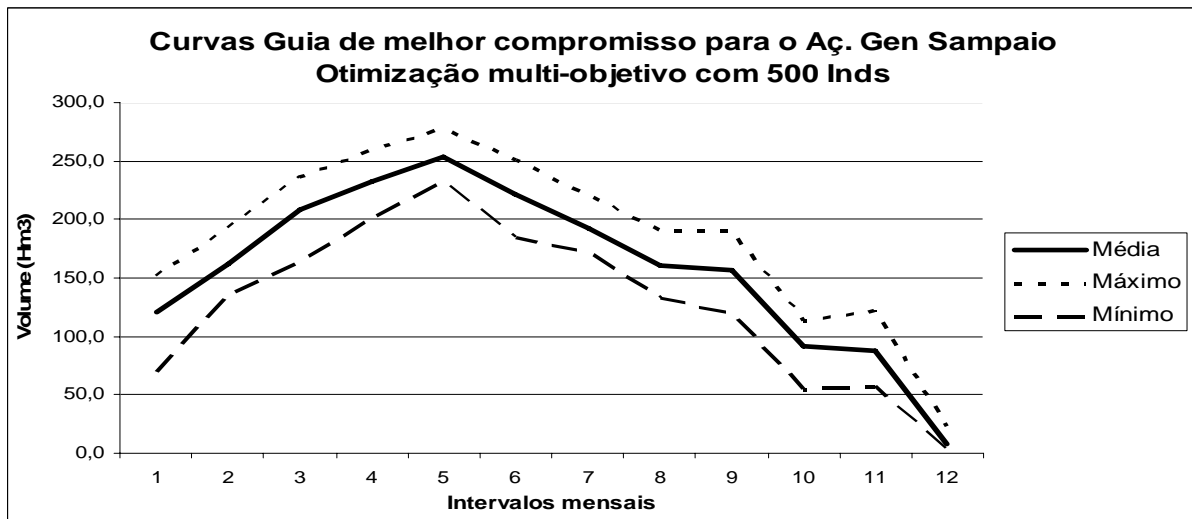


Figura 4.43: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. General Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.

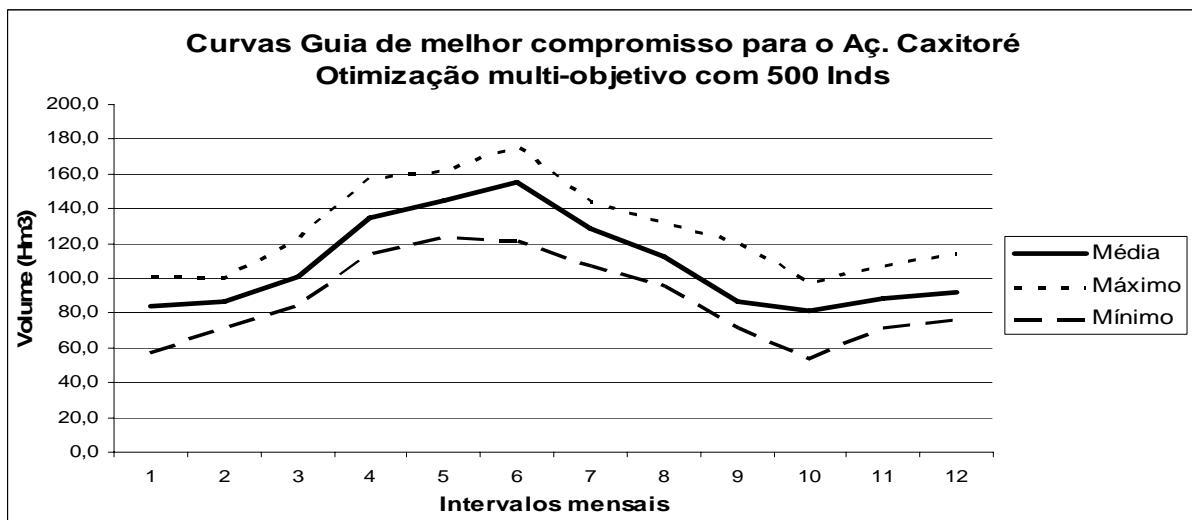


Figura 4.44: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (sem considerar o déficit), para o aç. Caxitoré, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.

O que se percebe analisando as figuras acima, referentes a cada um dos reservatórios: Pentecoste (figuras 4.33, 4.36, 4.39 e 4.42), General Sampaio (figuras 4.34, 4.37, 4.40 e 4.43) e Caxitoré (figuras 4.35, 4.38, 4.41 e 4.44) é que, ao contrário da variabilidade nos valores dos parâmetros da regra padrão modificada, já discutida anteriormente, para a regra da curva guia (sem a consideração dos déficits), a variabilidade entre os valores médios, máximos e mínimos não é muito alta, mesmo quando se aumenta o tamanho da população de 100 para 500 indivíduos. Esse resultado nos indica que, dependendo da regra operacional utilizada para o processo de otimização multi-objetivo, se torna possível a utilização dos resultados para a obtenção de uma fronteira de validade para cada parâmetro mensal da regra operacional. Além disso, ao se analisar o conjunto das figuras relativas a cada um dos reservatórios, verifica-se, através da linha média, que a forma geral da regra operacional não mudou consideravelmente quando se aumentou o tamanho da população.

Há que se levar em conta ainda, que, no caso da otimização multi-objetivo da curva guia, sem se considerar o déficit hídrico, se obteve uma convergência no processo para todos os tamanhos de população utilizados, conforme discutiremos mais detalhadamente no item 6.6.3 abaixo.

#### **4.6.2.2 Valor mínimo de cada aptidão, no conjunto de Pareto para a Curva Guia, sem a consideração do déficit hídrico**

O mesmo procedimento descrito no item 4.6.1.2 acima, relativo à regra padrão modificada, também foi feito para o conjunto de soluções ótimas, segundo Pareto, relativas à regra da curva guia (sem a consideração dos déficits hídricos). Ou seja, todas as soluções foram armazenadas em uma planilha eletrônica e classificadas, em ordem crescente, segundo cada uma das três aptidões, separadamente.

A diferença, nesse caso, é que se obteve convergência (índice de Pareto igual a 1) para todas as populações de indivíduos. Assim foi obtida a tabela 4.29 que compara os processos de otimização. Nessa tabela destaca-se que os melhores indivíduos obtidos no processo de otimização multi-objetivo foram: o indivíduo 24 da população de 300 indivíduos, segundo a FO1; o indivíduo 51 também da população de 300 indivíduos, segundo a FO2; e o indivíduo 3 da população de 200 indivíduos, segundo a FO3.

Ainda, de acordo com a tabela 4.29, o que se pode notar é que, em relação aos valores obtidos para as aptidões nos algoritmos mono e multi-objetivo, esses se apresentam coerentes. Ou seja, na otimização mono-objetivo é que se obtêm os melhores (menores) valores para cada uma das aptidões, uma vez que estas estão sendo otimizadas separadamente.

**Tabela 4.29: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo, para a regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico).**

Otimizador	População	Ordem Aptidão	Individuo	F.O. 1	F.O. 2	F.O. 3
AGMulti	100Inds	FO1	39	7,1389	-34,0290	6,8941
		FO2	23	8,1420	-34,6528	7,7273
		FO3	63	7,3457	-34,1874	6,4557
	200Inds	FO1	100	6,7191	-32,8483	6,7985
		FO2	25	7,9136	-35,1502	6,1912
		FO3	3	7,1049	-33,9790	<b>5,6895</b>
	300Inds	FO1	24	<b>6,4012</b>	-33,7693	6,6758
		FO2	51	6,8920	<b>-35,3698</b>	7,4339
		FO3	11	8,2840	-33,4578	6,6123
	500 Inds	FO1	69	7,2685	-34,0745	8,0382
		FO2	233	7,8148	-34,1646	8,0601
		FO3	299	7,6204	-34,0646	6,1978
AGMono	292 Inds	FO1	melhor	<b>4,2438</b>	-37,7466	6,3872
		FO2		6,2160	<b>-42,1461</b>	7,6835
		FO3		5,8086	-38,3925	<b>3,7486</b>

Novamente o resultado do algoritmo multi-objetivo não se mostrou coerente com o resultado esperado de estarem os valores das aptidões numa região de melhor compromisso do espaço de soluções, que deveria apresentar a seguinte característica: os valores das aptidões devem ser tais que uma vez que uma delas apresente uma piora no seu valor (em relação ao seu melhor valor obtido mono objetivamente), as demais devem apresentar uma melhora (em relação aos seus valores obtidos quando estão fora do processo de otimização mono-objetivo).

Com relação à tabela 4.29, podemos destacar o seguinte exemplo:

- O melhor valor obtido mono objetivamente para a FO1 foi 4,2438; sendo obtidos nessa mesma otimização os valores -37,7466 e 6,3872 para as funções objetivo 2 e 3 respectivamente (estas estando fora do processo de otimização mono-objetivo da aptidão 1). Ora, o indivíduo 24 da população de 300 indivíduos foi o de melhor aptidão 1 do conjunto de todas as populações utilizadas para o processo multi-objetivo. Esse indivíduo teve os seguintes valores de suas aptidões: 6,4012; -33,7693 e 6,6758. Como todos esses valores são maiores (piores, uma vez que o objetivo é minimizar as aptidões), devemos concluir que, no processo multi-objetivo, não houve o chamado “trade off” entre as aptidões. Em outras palavras, esperava-se que, se a solução do processo multi-objetivo está numa região de melhor compromisso entre as aptidões, havendo a piora de uma das aptidões, necessariamente deveria haver uma melhora nos valores das demais aptidões, e isso não se verificou.

Nas tabelas seguintes se encontram os valores dos parâmetros da regra da curva guia, sem consideração dos déficits, para cada um dos reservatórios, que, pertencendo à solução dita não-dominada do ótimo de Pareto, representam aqueles indivíduos (conjunto de parâmetros) que minimizam, separadamente, cada uma das aptidões (funções objetivo).

**Tabela 4.30: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório General Sampaio, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia (com verificação de déficit) para o reservatório General Sampaio											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	24	300 Inds	206,61	186,53	218,23	281,02	273,1	316,73	280,66	287,18	278,64	246,72	239,36	237,76
2	51	300 Inds	168,45	216,71	195,67	289,03	270,98	281,93	268,14	248,69	279,19	240,4	257,78	226,86
3	3	200 Inds	181,01	164,4	181,91	276,63	273,53	255	276,66	273,96	256,66	225,57	190,19	230,52

**Tabela 4.31: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório Pentecoste, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

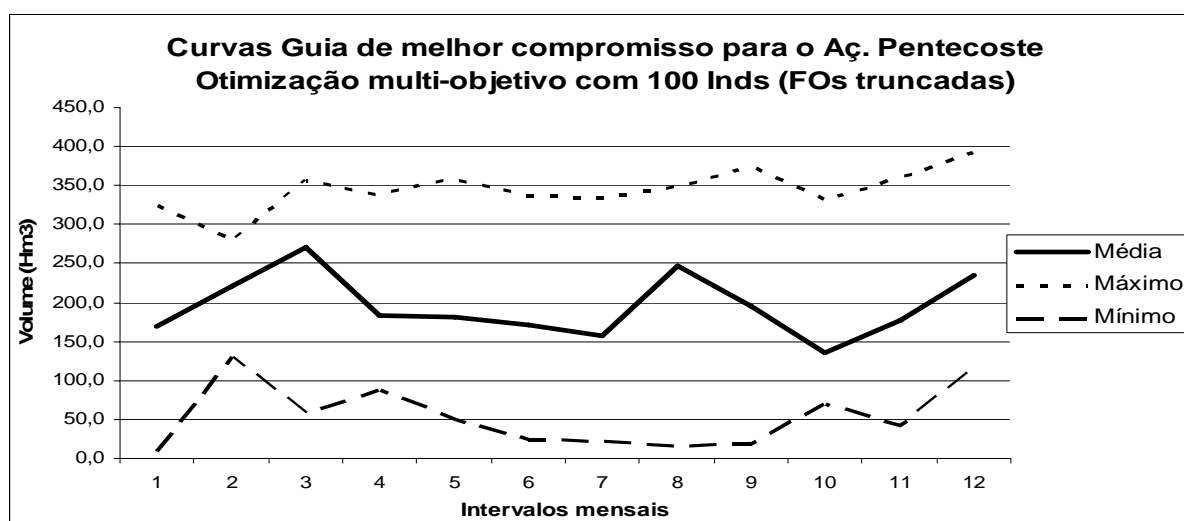
Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia (com verificação de déficit) para o reservatório Pentecoste											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	24	300 Inds	50,77	113,01	184,94	258,16	260,09	261,62	228,74	192	156,95	137,65	103,84	82,48
2	51	300 Inds	82,77	188,95	171,33	240,34	262,31	282,07	194,3	193,9	164,99	178,55	97,6	95,83
3	3	200 Inds	159,28	166,91	222,96	265,54	226,6	216,86	205,97	123,43	139,89	86,7	106,12	23,19

**Tabela 4.32: Valor dos parâmetros mensais da regra da curva guia (sem consideração do déficit hídrico), para o reservatório Caxitoré, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia (com verificação de déficit) para o reservatório Caxitoré											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	24	300 Inds	77,35	86,8	160,9	124,94	150,1	134,11	136,44	151,1	85,2	97,15	70,89	124,17
2	51	300 Inds	79,9	59,56	141,39	133,01	111,07	148,86	142,87	154,7	75,36	117,44	36,78	121,72
3	3	200 Inds	119,48	78,16	113,93	119,48	125,37	154,34	147,83	111,16	90,45	85,17	96,26	81,42

#### 4.6.2.3 Variabilidade dos parâmetros da regra da curva guia, com consideração do déficit hídrico

Novamente, como nos casos anteriores, se verificou qual foi o grau de variabilidade dos parâmetros para cada um dos tamanhos populacionais utilizados na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com a consideração do déficit. Essa variabilidade pode ser visualizada nas figuras a seguir referentes a cada um dos três reservatórios do sistema e para cada um dos tamanhos de população adotados.



**Figura 4.45: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.**

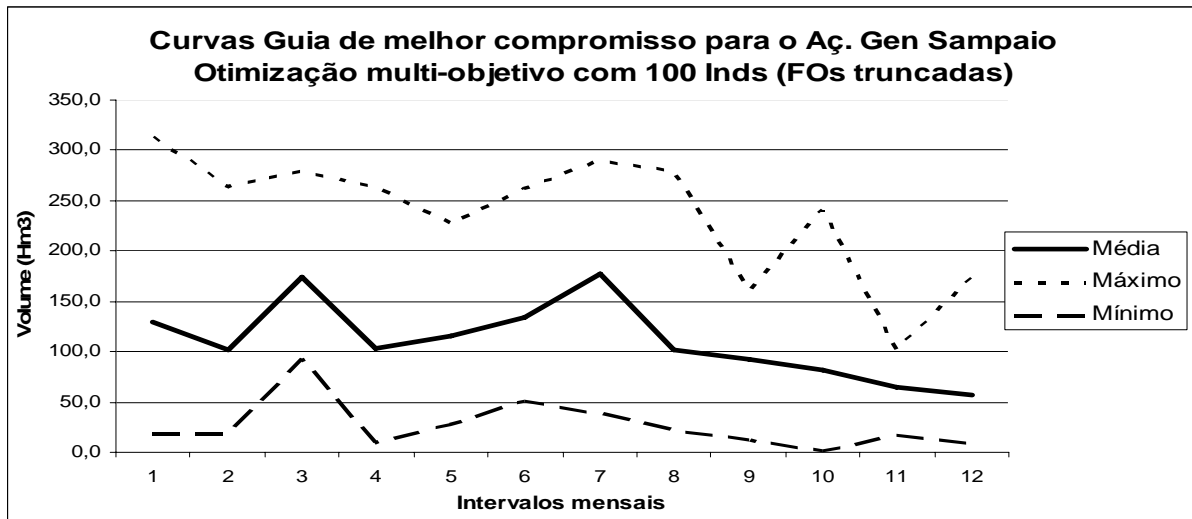


Figura 4.46: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Gen Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.

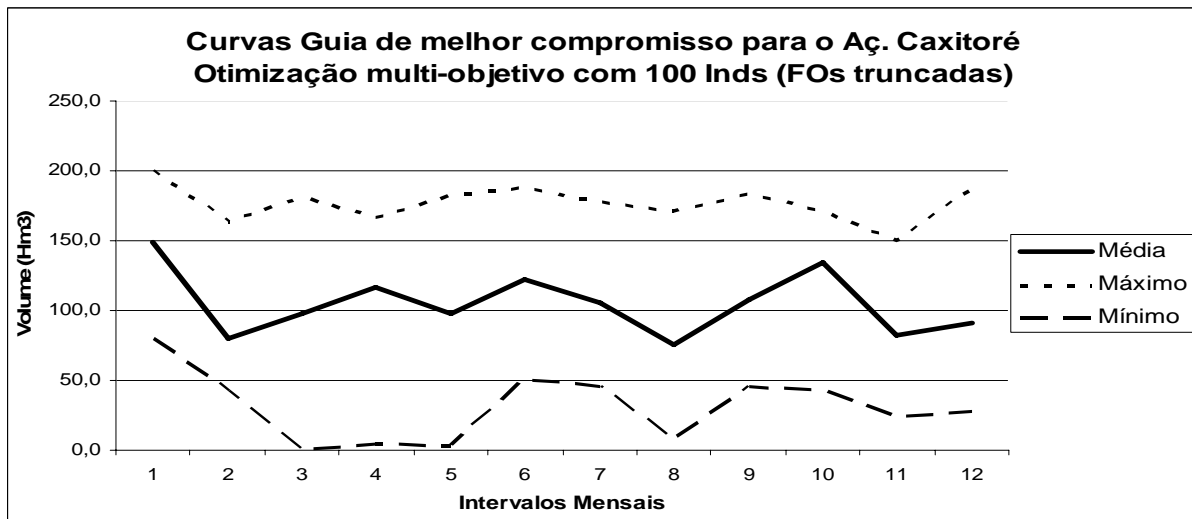


Figura 4.47: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 100 indivíduos.

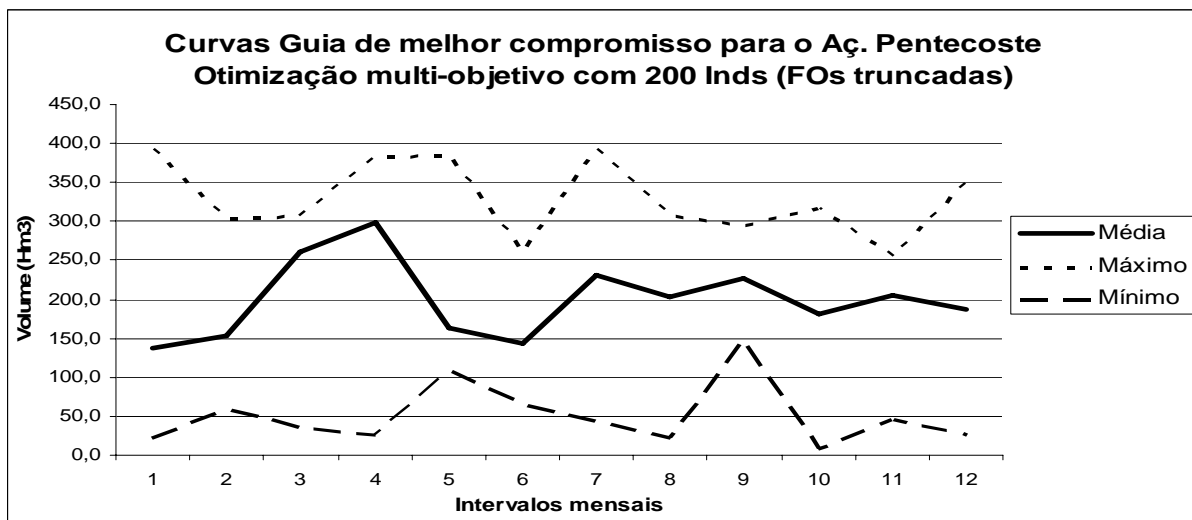


Figura 4.48: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.

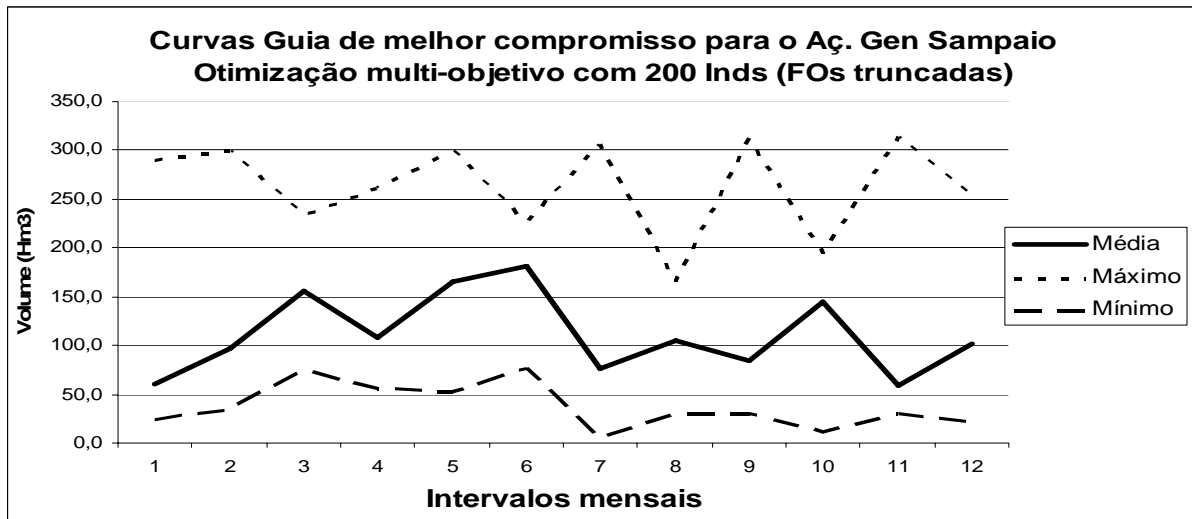


Figura 4.49: Variabilidade dos valores dos parâmetros da regra da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Gen Sampaio, no resultado da otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.

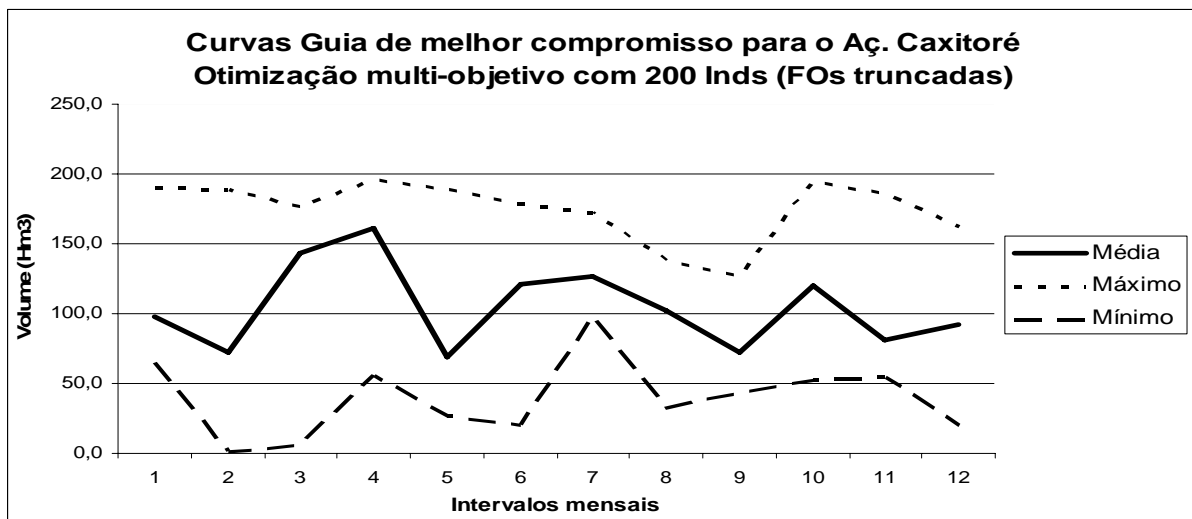


Figura 4.50: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 200 indivíduos.

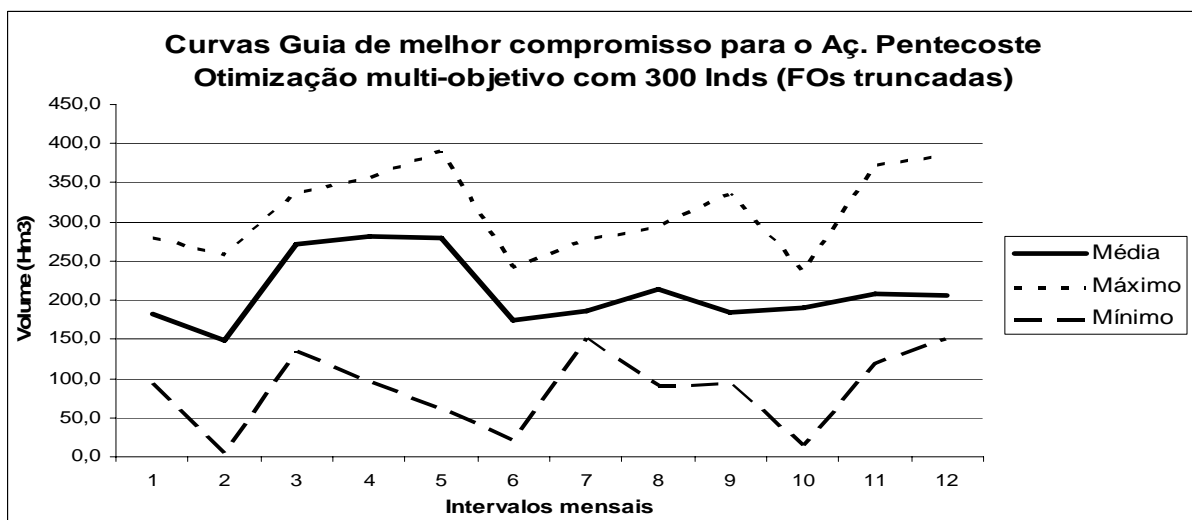


Figura 4.51: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

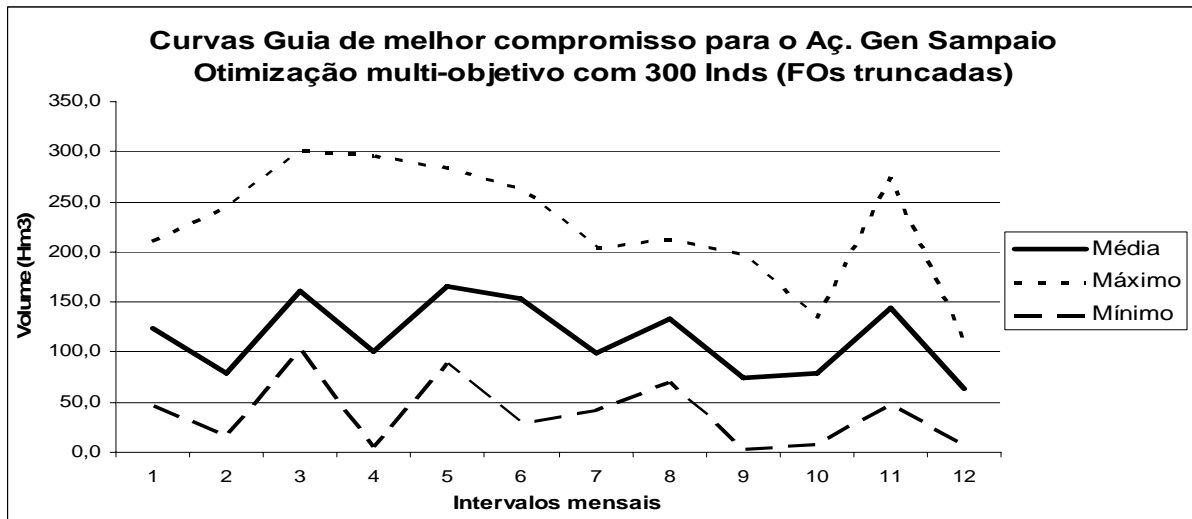


Figura 4.52: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. General Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

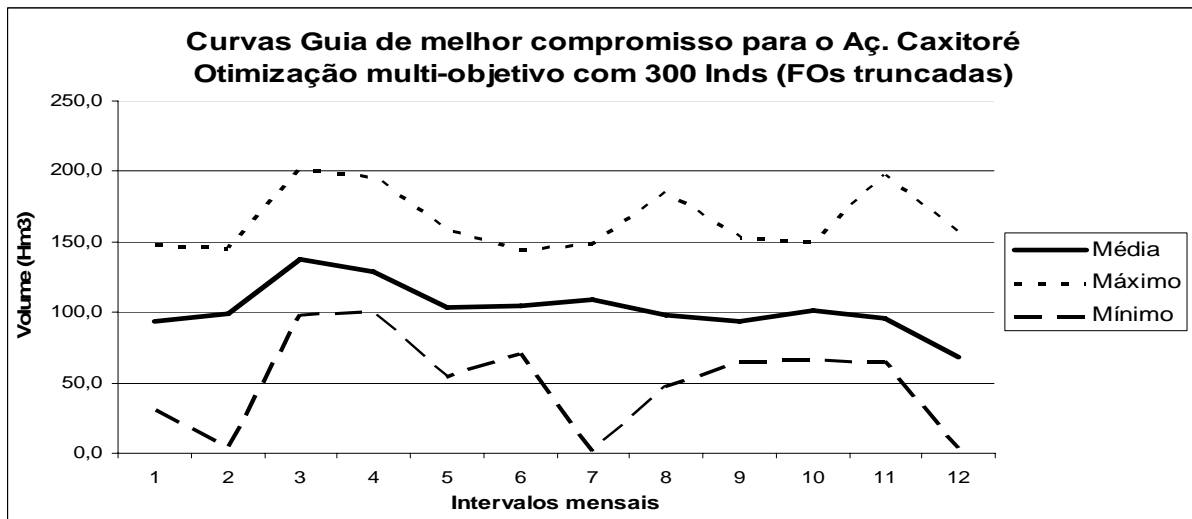


Figura 4.53: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 300 indivíduos.

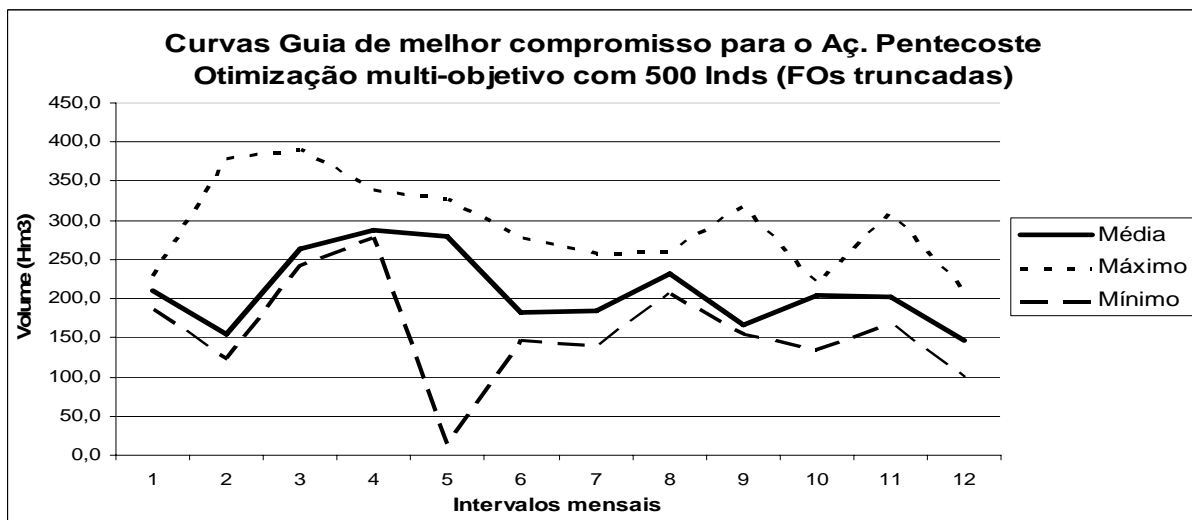


Figura 4.54: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Pentecoste, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.



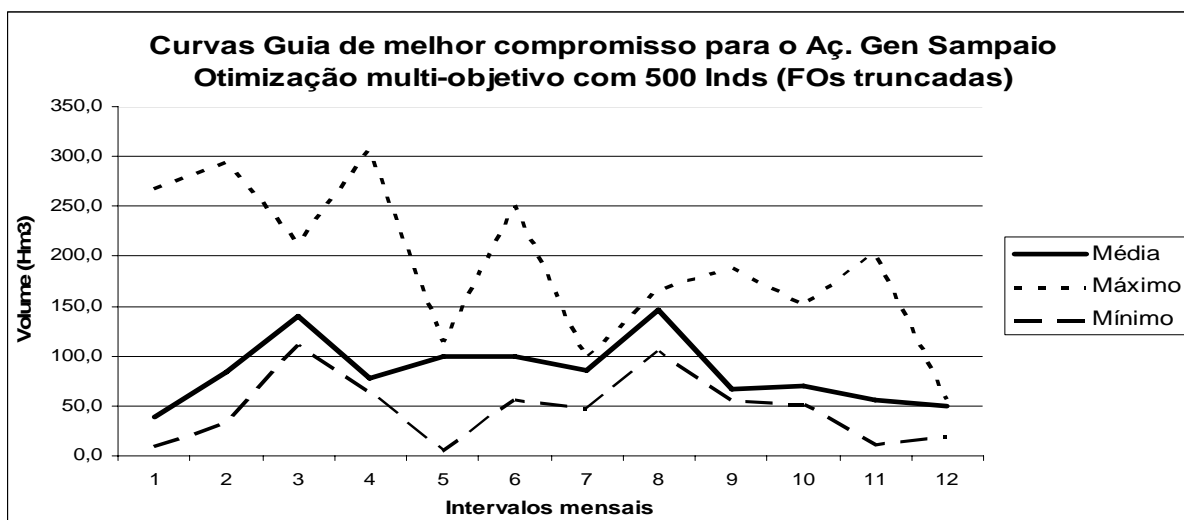


Figura 4.55: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. General Sampaio, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.

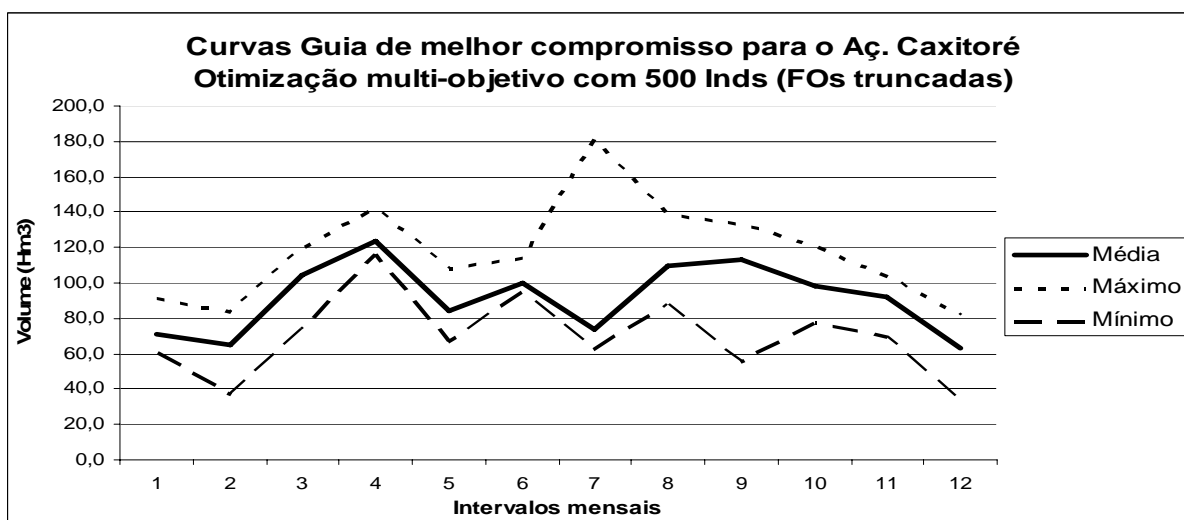


Figura 4.56: Variabilidade dos valores dos parâmetros da curva guia (com consideração do déficit e FO truncadas), para o aç. Caxitoré, na otimização multi-objetivo para população de 500 indivíduos.

Analisando as figuras acima, referentes a cada um dos reservatórios: Pentecoste (figuras 4.45, 4.48, 4.51 e 4.54), General Sampaio (figuras 4.46, 4.49, 4.52 e 4.55) e Caxitoré (figuras 4.47, 4.50, 4.53 e 4.56), percebe-se que, em relação aos parâmetros da regra da curva guia sem a consideração dos déficits hídricos, já discutida anteriormente, a introdução, na regra operacional, da consideração dos déficits provocou um aumento na variabilidade entre os seus valores médios, máximos e mínimos. Esse resultado reforça a idéia de que, dependendo da regra operacional utilizada para o processo de otimização multi-objetivo, pode se tornar impossível a utilização dos resultados para a obtenção de uma fronteira de validade para cada parâmetro mensal da regra operacional. Além disso, ao se analisar o conjunto das figuras relativas a cada um dos reservatórios, verifica-se, através das linhas média, mínima e máxima, que a variabilidade acima e abaixo dos valores médios, para cada parâmetro mensal, pode ser de magnitude bem distinta.

Há que se levar em conta ainda que, no caso da otimização multi-objetivo da curva guia, com a consideração do déficit hídrico, só se obteve convergência no processo com o truncamento dos valores das aptidões, conforme discutiremos mais detalhadamente nos itens a seguir.

#### 4.6.2.4 Valores mínimos de cada aptidão, no conjunto de Pareto para a Curva Guia, com a consideração do déficit hídrico.

Para a regra da curva guia (com a consideração dos déficits hídricos), o conjunto de soluções ótimas, segundo Pareto, também foi armazenado em uma planilha eletrônica e as soluções (indivíduos) foram classificadas, em ordem crescente, segundo cada uma das três aptidões, separadamente.

Quando se modificou a regra da curva guia, introduzindo-se a consideração dos déficits, não se obteve a convergência (índice de Pareto igual a 1) desejada. Assim para se testar outro artifício para facilitar essa convergência, se optou por truncar os valores das três aptidões utilizadas. Em outras palavras, os valores de cada uma das aptidões só foi considerado até a quarta casa decimal para o processo de otimização. Esse procedimento levou o algoritmo multi-objetivo a obter convergência para todas as populações de indivíduos. Assim foi obtida a seguinte tabela comparativa dos processos de otimização:

**Tabela 4.33: Tabela comparativa entre os valores das aptidões obtidos pelos algoritmos genéticos mono e multi-objetivo, para a regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico).**

Otimizador	População	Ordem Aptidão	Indivíduo	F.O. 1	F.O. 2	F.O. 3
AGMulti	100 Inds FOs truncadas	FO1	50	<b>3,2377</b>	-42,6893	4,4279
		FO2	77	4,0802	<b>-43,7132</b>	7,3054
		FO3	16	3,8488	-39,7898	<b>4,2071</b>
	200 Inds FOs truncadas	FO1	22	3,6327	-39,9999	5,0754
		FO2	194	4,7500	<b>-43,1150</b>	6,5942
		FO3	64	3,7932	-37,4896	<b>4,3481</b>
	300 Inds FOs truncadas	FO1	291	3,8488	-38,1051	4,8206
		FO2	259	4,4846	<b>-41,2486</b>	5,7753
		FO3	223	3,9568	-37,4469	<b>4,5255</b>
	500 Inds FOs truncadas	FO1	51	3,6574	-36,7835	4,2518
		FO2	474	5,0648	<b>-40,9438</b>	6,3979
		FO3	34	3,8395	-37,9203	<b>4,2355</b>
AGMono	292 Inds	FO1	melhor	<b>2,2685</b>	-43,2536	4,4345
		FO2		3,1235	<b>-45,0802</b>	6,5200
		FO3		3,0432	-41,8248	<b>3,7355</b>

Na tabela 4.33, destaca-se que os melhores indivíduos obtidos no processo de otimização multi-objetivo foram: o indivíduo 50, segundo a FO1; o indivíduo 77, segundo a FO2 e o indivíduo 16, segundo a FO3, todos eles da população de 100 indivíduos.

Ainda, de acordo com a mesma tabela, nota-se que o resultado da otimização multi objetivo da regra da curva guia, com a consideração dos déficits, mostra a mesma coerência, em relação aos valores da otimização mono objetivo. Porém também apresenta a mesma incoerência em relação ao fato esperado de estarem os valores das aptidões numa região de melhor compromisso do espaço de soluções, o que já foi explicado no item 4.6.2.2 acima.

Nas tabelas seguintes se encontram os valores dos parâmetros da regra da curva guia, com consideração dos déficits, para cada um dos reservatórios, que, pertencendo à solução dita não dominada do ótimo de Pareto, representam aqueles indivíduos (conjunto de parâmetros), que minimizam, separadamente, cada uma das aptidões (funções objetivo).

**Tabela 4.34: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório General Sampaio, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia para o reservatório General Sampaio											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	50	100 Inds FOs truncadas	109,21	197,27	324,61	116,19	213,62	254,11	54	270,85	120,55	86,97	96,61	188,98
2	77		8,57	159,19	320,98	331,96	168,01	195,39	132,13	75,62	373,54	84,74	73,4	347,14
3	16		169,48	220,95	268,79	181,73	183,19	173,35	156,26	249,21	195	138,87	174,12	230,92

**Tabela 4.35: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório Pentecoste, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia para o reservatório Pentecoste											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	50	100 Inds FOs truncadas	115,22	117,72	92,83	73,75	72,77	87,34	177,65	120,29	79,09	36,08	87,46	8,86
2	77		132,65	64,56	224,73	11,8	218,08	74,18	51,22	278,8	72,82	1,28	52,43	172,3
3	16		128,85	100,66	172,37	105,01	114	134,21	176,51	101,2	91,19	81,93	64,46	57,46

**Tabela 4.36: Valores dos parâmetros mensais da regra da curva guia (com consideração do déficit hídrico), para o reservatório Caxitoré, referentes aos melhores valores das aptidões obtidos através da otimização multi-objetivo.**

Aptidão	Indivíduo	População	Parâmetros mensais da curva guia para o reservatório Caxitoré											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	50	100 Inds FOs truncadas	162,05	45,08	84,35	146,78	101,83	105,68	74,87	96,06	95	152,27	103,17	79,77
2	77		142,32	89,4	107,85	4,65	2,85	174,1	129,05	170,95	183,26	127,75	24,38	186,65
3	16		148,21	80,19	97,45	118,58	98,51	121,14	105,38	75,05	106,37	135,21	83,33	89,3

### 4.6.3 A questão da convergência do Algoritmo Genético Multi-Objetivo

Conforme já comentado, no caso do algoritmo genético mono objetivo, se efetuou a verificação de convergência para a solução ótima, adotando-se os critérios de calcular a cada geração os valores da média e do desvio padrão dos valores das aptidões da população. Já no caso da otimização multi-objetivo, esses critérios não seriam suficientes para a verificação de convergência.

O algoritmo genético multi objetivo trabalha simultaneamente com mais de uma aptidão, e a sua convergência se dá quando o índice de Pareto atinge o valor 1, o que significa que todos os indivíduos da população adotada estão numa situação de não dominância entre si. Ou seja, a princípio, o objetivo do algoritmo não é encontrar soluções intermediárias, onde parte da população é não-dominada. Dessa forma, não se programou nenhum critério para adotar uma convergência intermediária, como foi feito no algoritmo mono objetivo.

Conforme já apresentado no capítulo da metodologia, o algoritmo genético multi objetivo avalia a relação de dominância entre cada indivíduo da população, dividindo-os em grupos de dominância entre si: os indivíduos separados no grupo 1 são não-dominados em relação aos demais indivíduos; os do grupo 2 são dominados em relação ao grupo 1 e não-dominados em relação aos demais indivíduos e assim sucessivamente. A cada geração o algoritmo separa a população em quantos grupos forem necessários. O chamado índice máximo de Pareto de cada geração é o número de grupos nos quais foi separada a população. A criação de nova geração se dá substituindo cada um dos indivíduos colocados no grupo de maior índice de Pareto por outro que deve ser não-dominado por pelo menos um dos demais indivíduos utilizados pelo algoritmo para a geração de um novo indivíduo. Após a substituição dos indivíduos do grupo dominado, a população é reunida e novamente classificada em grupos.

Assim, foram programados dois métodos que obtêm duas informações da população em cada geração: um armazena qual o índice de Pareto máximo e o outro armazena quantos indivíduos foram agrupados no conjunto que tem o maior índice de dominância. Esses métodos foram utilizados então para analisar, depois que o processo de otimização for interrompido, o desenvolvimento do processo de otimização multi objetivo e a variação dos mesmos são discutidos a seguir para cada uma das regras operacionais nos itens abaixo.

#### **4.6.3.1 Regra Padrão Modificada**

A convergência da otimização multi-objetivo só foi obtida com as populações de 100 e 200 indivíduos. Para a de 100 indivíduos, ela se deu em aproximadamente 1h e 22min, na 189ª geração da população. Já para a população de 200 indivíduos, a convergência para o ótimo de Pareto se deu em 14 h e na 2483ª geração. (figuras 4.57 a 4.60).

Já era esperado que o algoritmo genético multi objetivo demorasse em atingir a convergência (índice de Pareto unitário) pelas suas próprias características e por outros detalhes como a quantidade de parâmetros a serem otimizados.

Os próprios autores do algoritmo MOCOM-UA esclarecem que a fraqueza desse algoritmo está em não obter o conjunto de soluções espalhado em toda a fronteira de Pareto e

sim, em apresentar uma tendência de formar “ninhos” (denominados de *cluster*) onde as soluções se encontram numa região de compromisso entre as aptidões (SOROOSHIAN et. alli., 2003). Dessa forma, era de se esperar que o algoritmo, ao formar esses ninhos, tornasse a convergência muito difícil, ou mesmo impraticável.

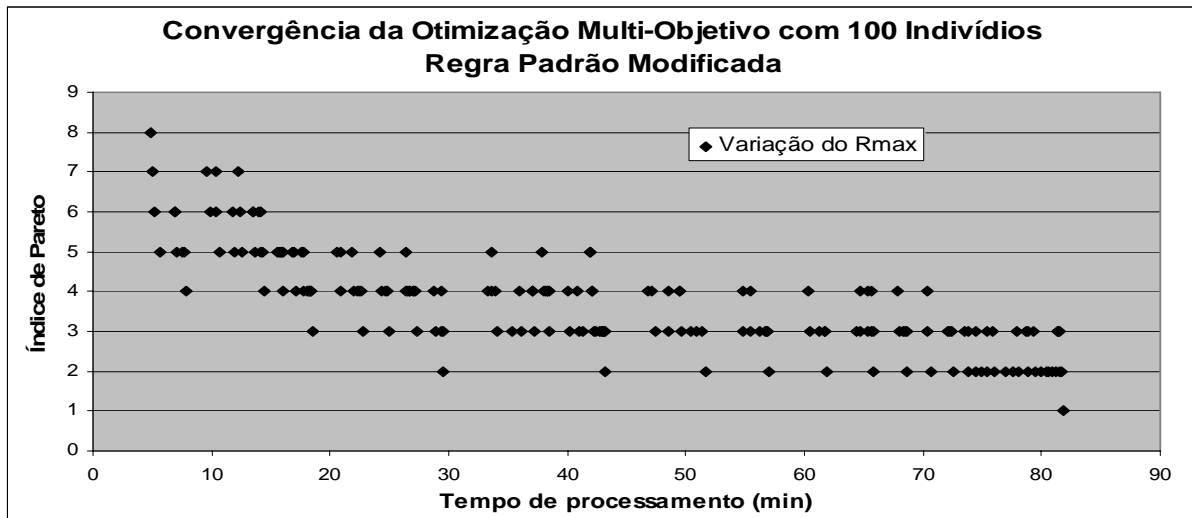


Figura 4.57: Variação do Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

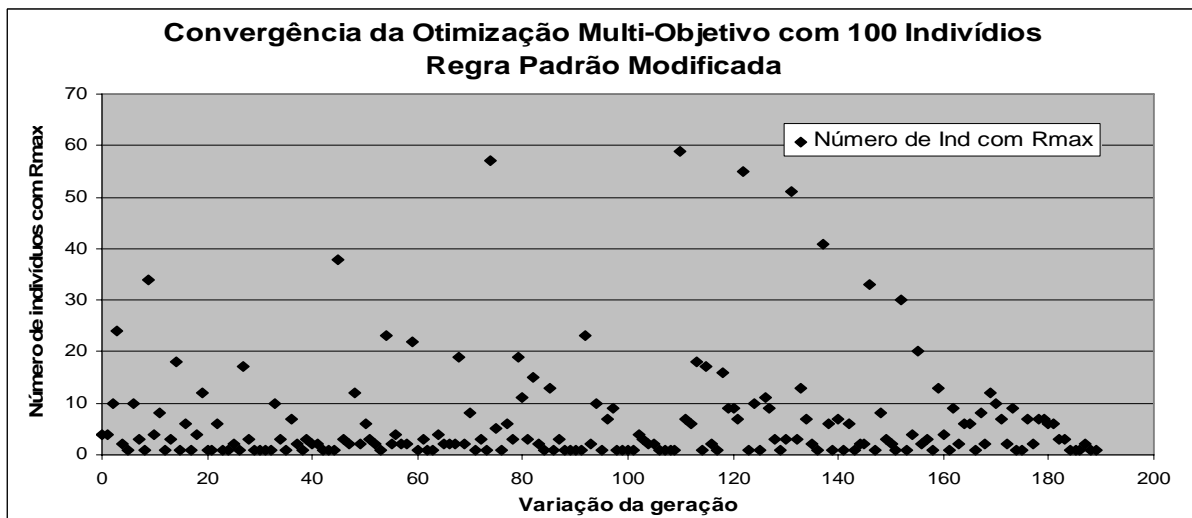


Figura 4.58: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

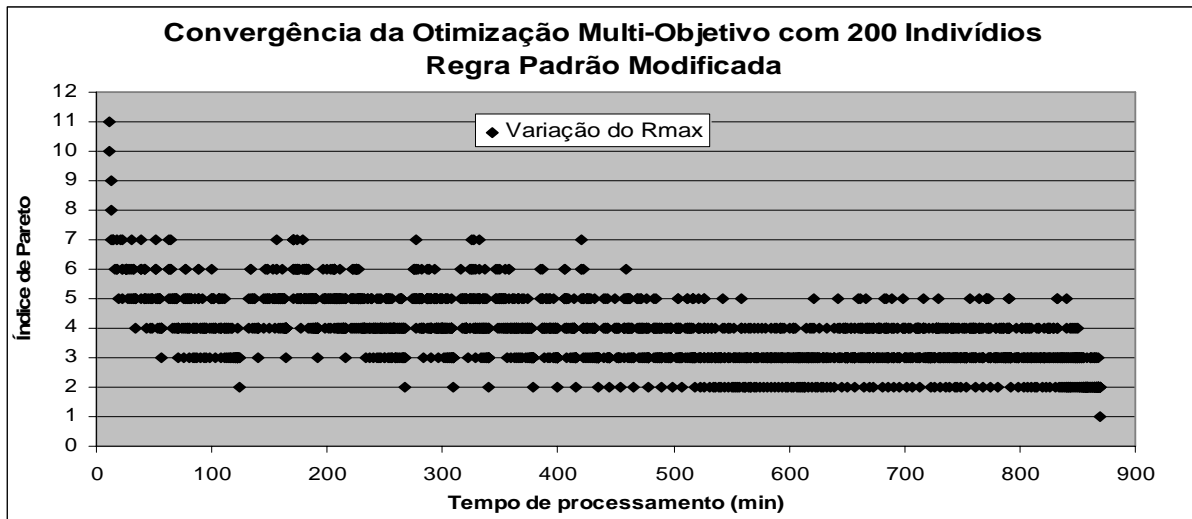


Figura 4.59: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

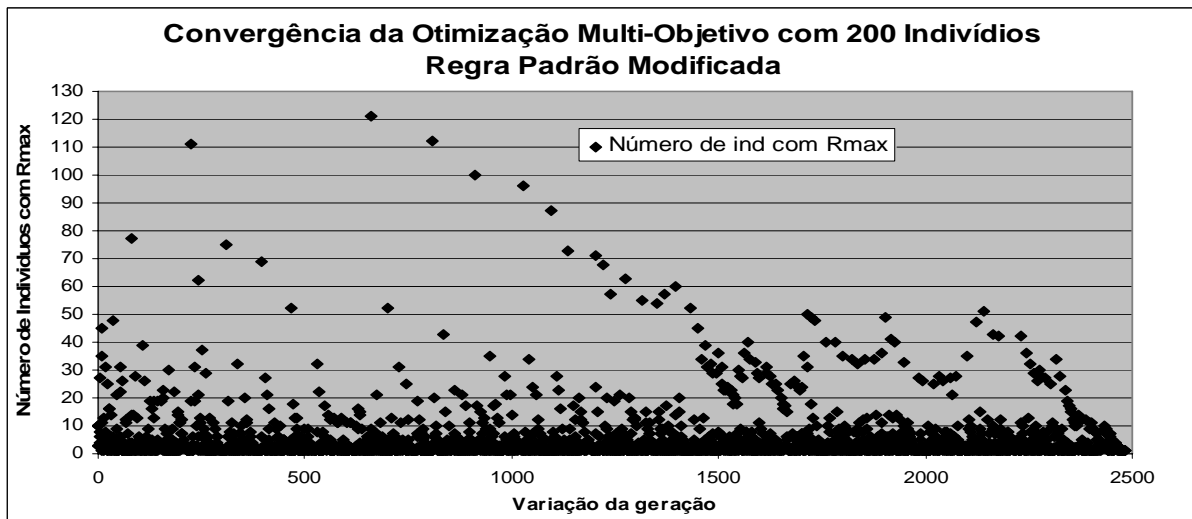


Figura 4.60: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

Analisando as figuras acima, o que se percebe é que a diminuição do valor de Rmax de cada geração não ocorre de forma contínua. Ou seja, quando um novo indivíduo não-dominado é criado num simplex, o mesmo pode fazer com que a população aumente a quantidade de grupos de indivíduos não-dominados entre si.

O mesmo ocorre com a variação da quantidade de indivíduos que estão no grupo de maior índice de Pareto, após o ranqueamento da população. Em outras palavras, antes de convergir para um só grupo de indivíduos não-dominados a população “explode” várias vezes em grupos de não-dominância e com números variados de indivíduos no grupo de maior índice de Pareto.

As figuras a seguir (figuras 4.61 a 4.64) representam a variação do Rmax e do número de indivíduos com Rmax em cada geração, para as populações de 300 e 500 indivíduos.

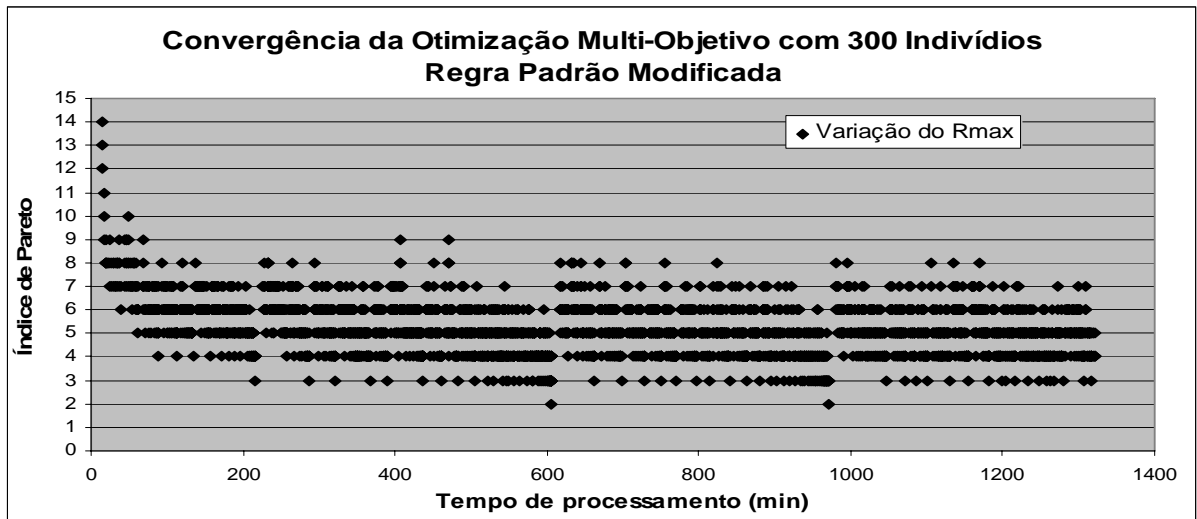


Figura 4.61: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

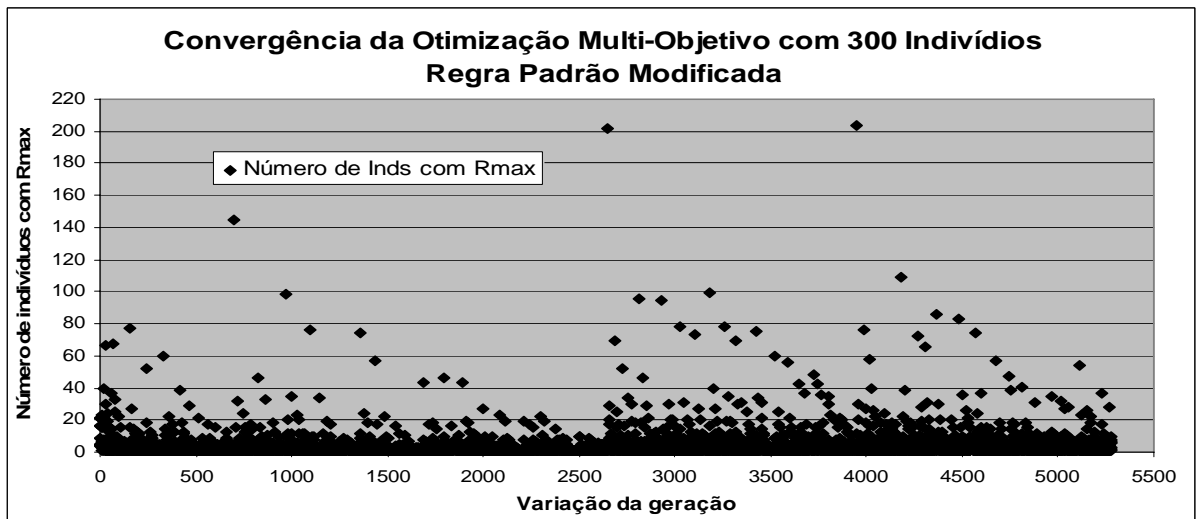


Figura 4.62: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

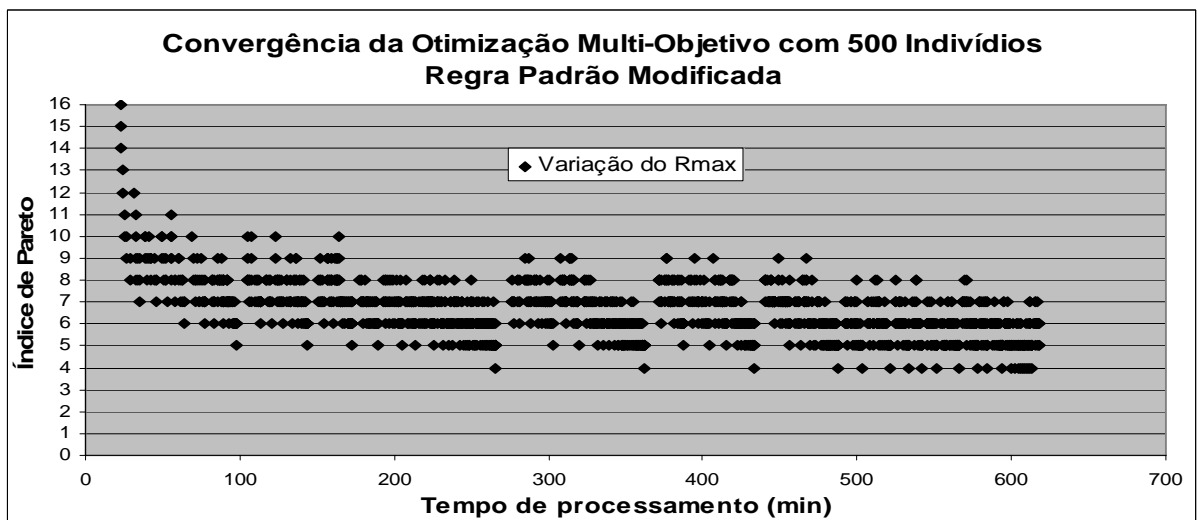


Figura 4.63: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

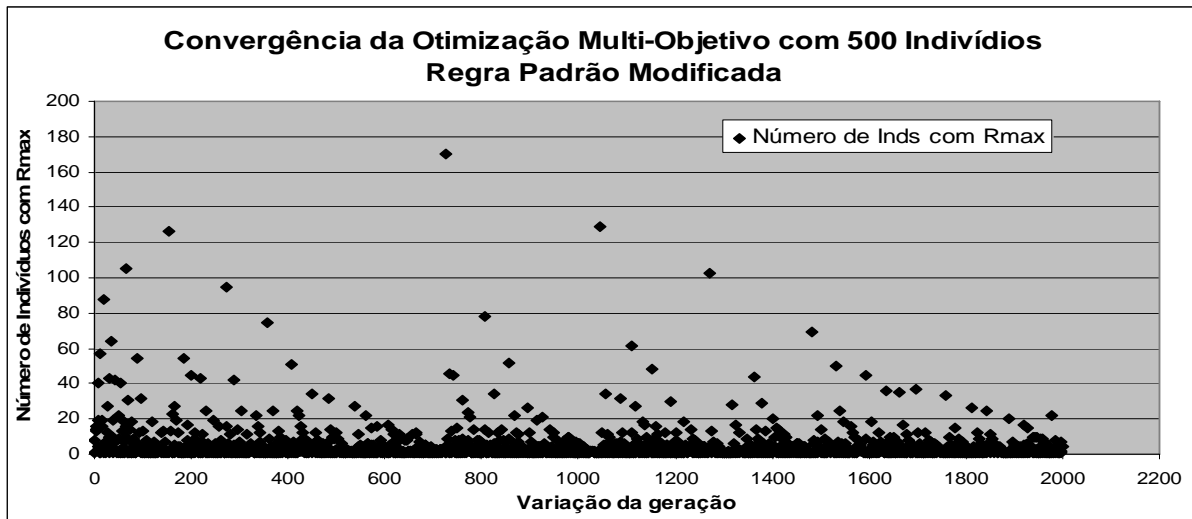


Figura 4.64: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada.

Para a população de 300 indivíduos, se esperou aproximadamente por 22 horas de execução da otimização sem haver convergência, e para a população de 500 indivíduos se esperou aproximadamente 10 horas.

A possibilidade de deixar o computador executando a otimização por mais de um dia levou à necessidade de implementação de um comando em Pascal Script que salvasse a população a cada geração. Assim, na eventualidade de uma falta de energia, nem todo o trabalho estaria perdido.

Uma outra possibilidade testada foi a utilização de um truncamento nos valores de aptidão utilizados. O truncamento foi efetuado na terceira casa decimal e, pelo que se pode notar, nas figuras a seguir a convergência para o ótimo de Pareto continuou impraticável, apenas a diminuição inicial do índice foi mais rápida.

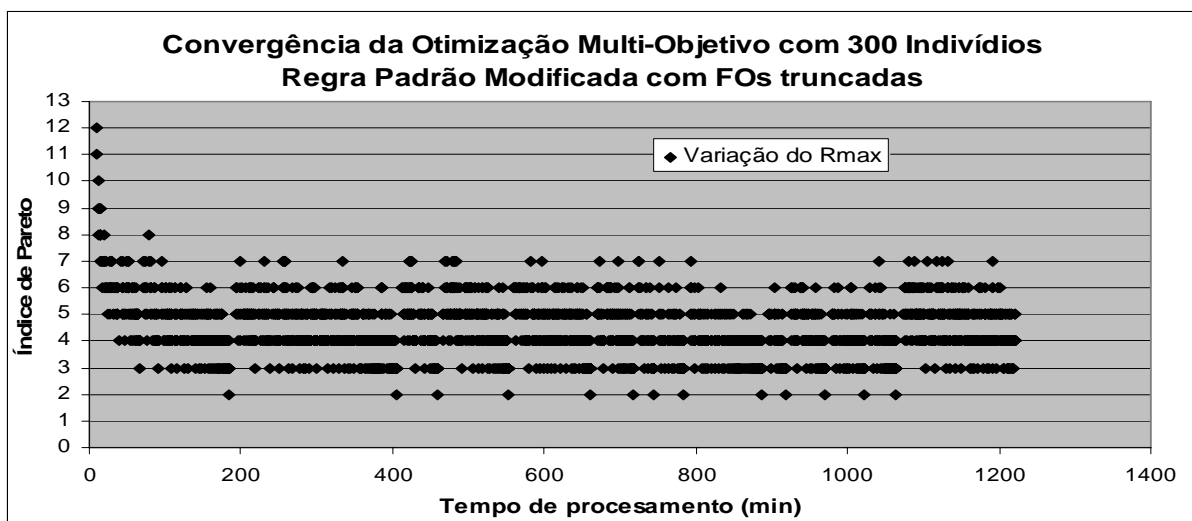


Figura 4.65: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões.



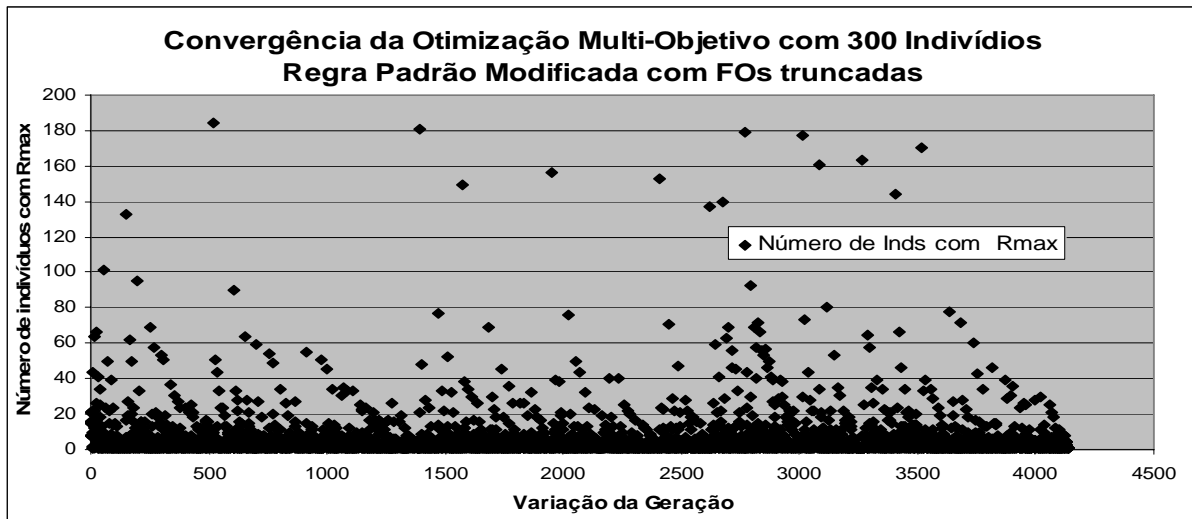


Figura 4.66: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões.

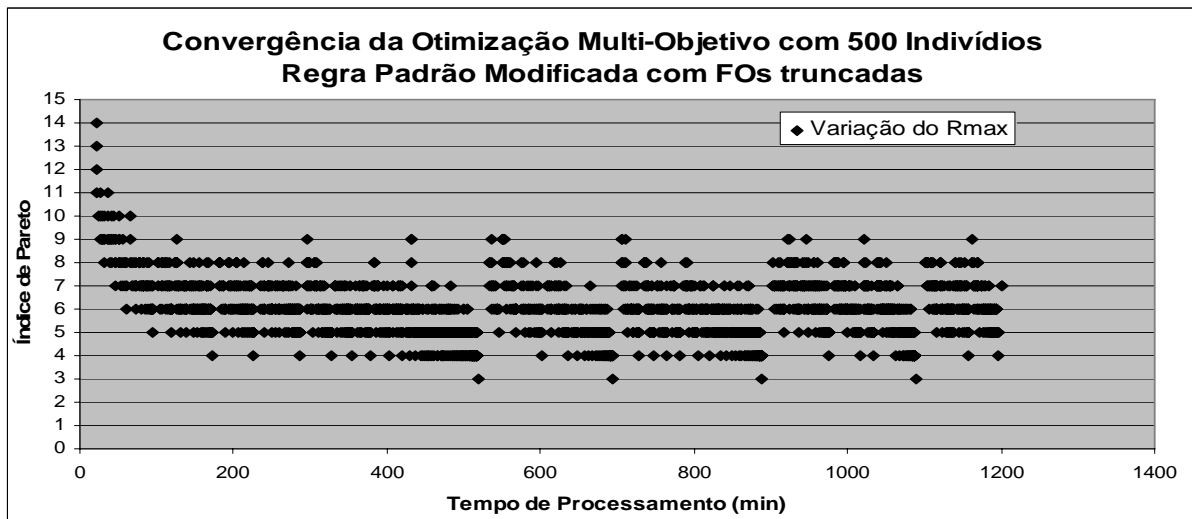


Figura 4.67: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões.

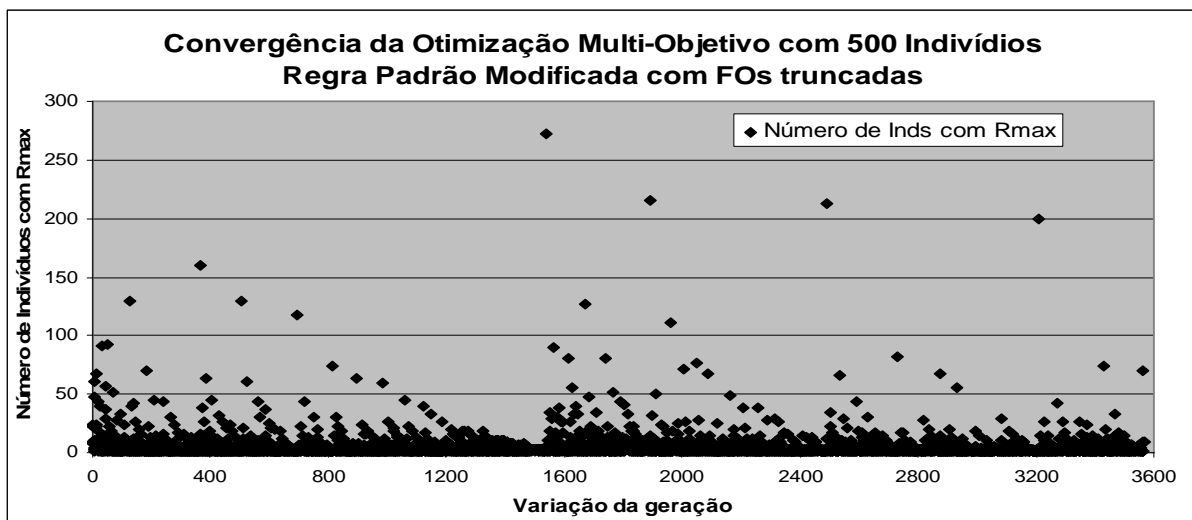


Figura 4.68: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra padrão modificada, com truncamento do valor das aptidões.

### 4.6.3.2 Curva Guia, sem verificação de déficit hídrico

Com relação à convergência da otimização multi objetivo para a curva guia, sem a verificação de déficit, essa foi obtida para as 4 populações utilizadas. Para a população de 100 indivíduos, ela foi obtida com 46 minutos e na 151ª geração; para 200 indivíduos em 1h e 28min e na 236ª geração; para 300 indivíduos em 3h e 41min, na 331ª geração; e para a população de 500 indivíduos em 7h e na 529ª geração.

As figuras de 4.69 a 4.76 representam a variação do Rmax e do número de indivíduos com Rmax em cada geração, durante o processo de convergência da otimização.

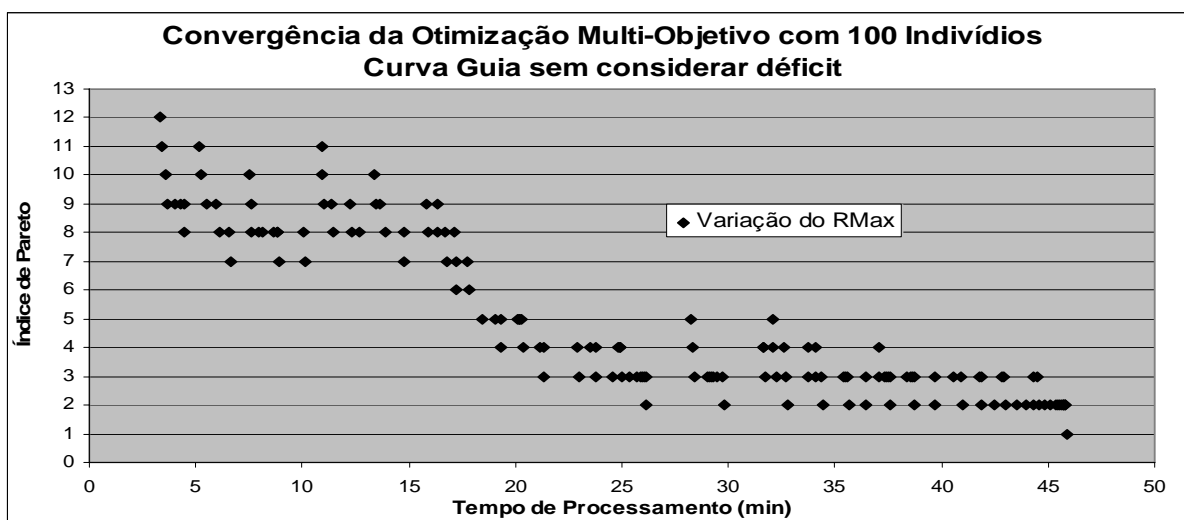


Figura 4.69: Variação do Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

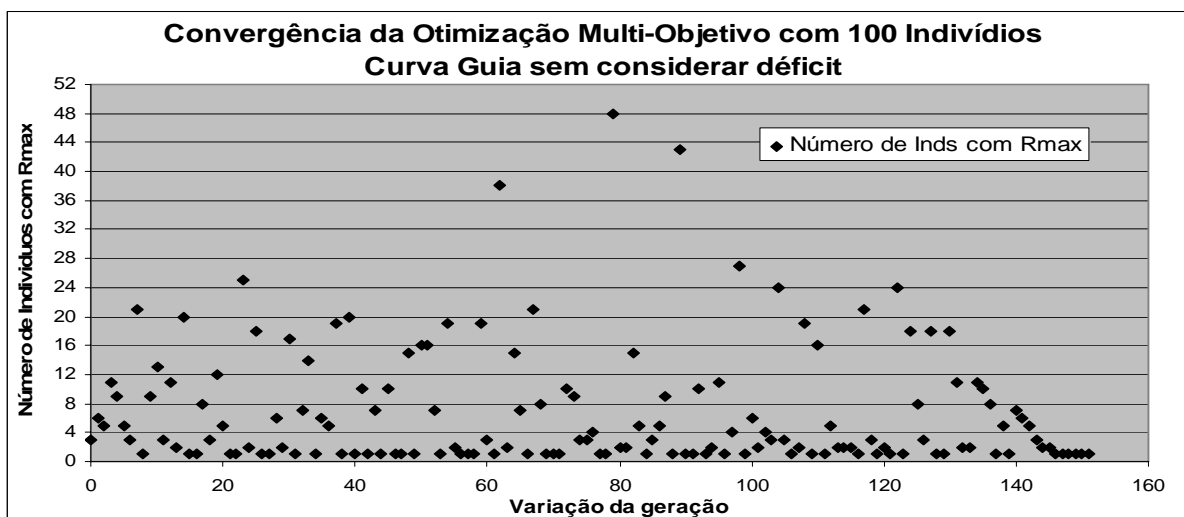


Figura 4.70: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

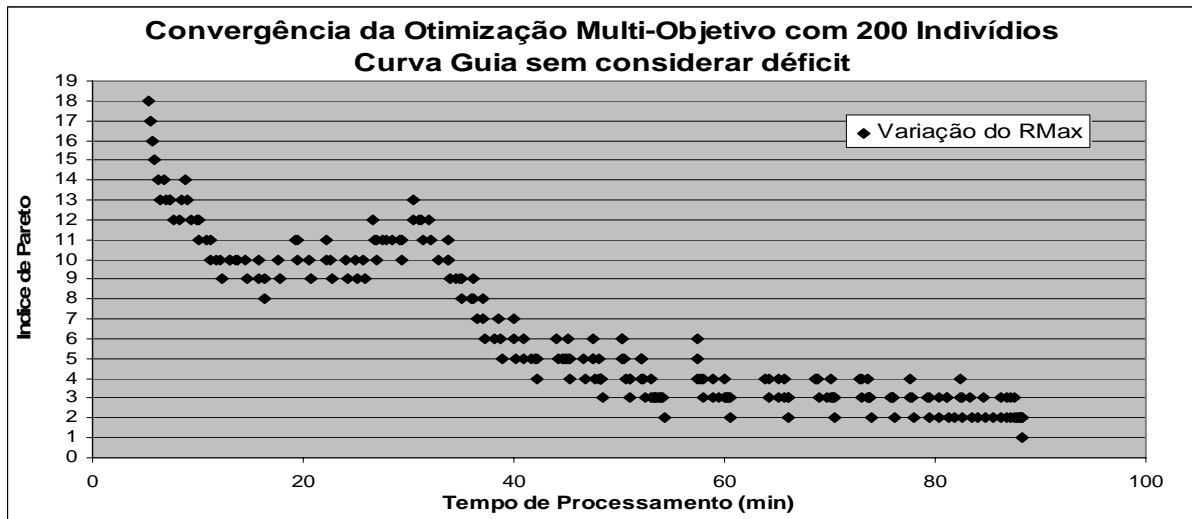


Figura 4.71: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

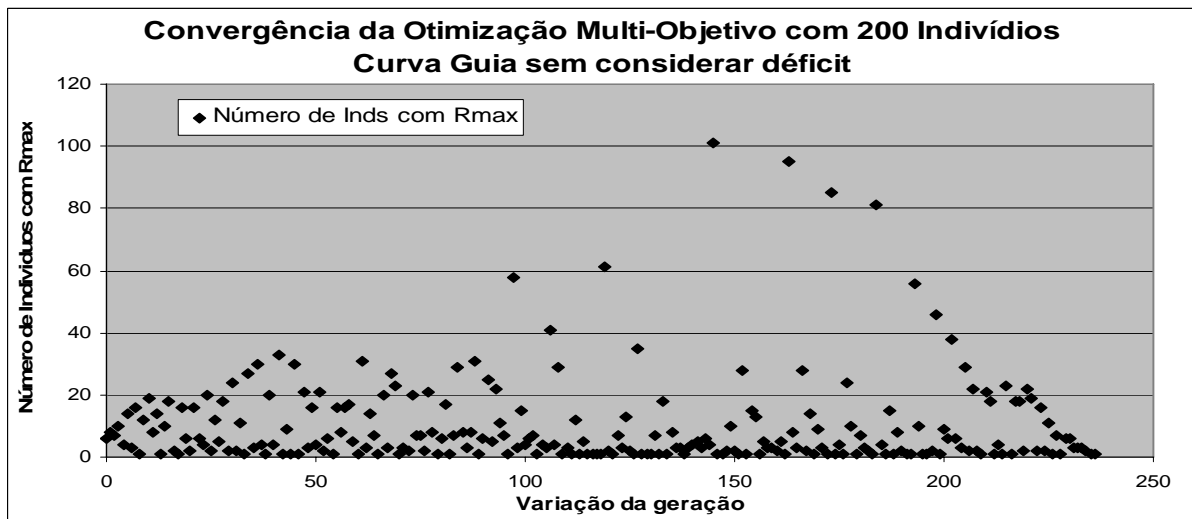


Figura 4.72: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

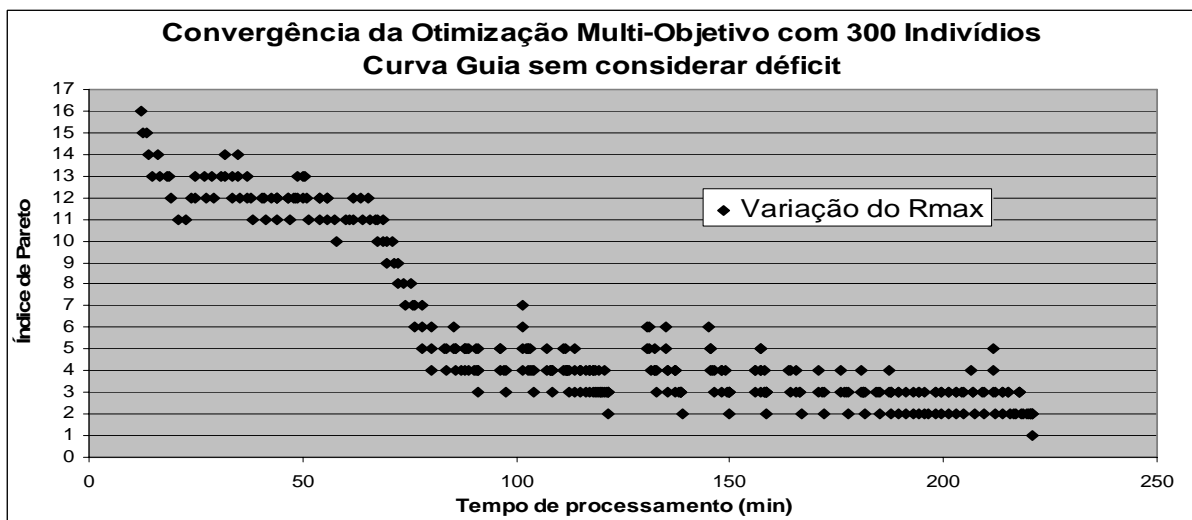


Figura 4.73: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

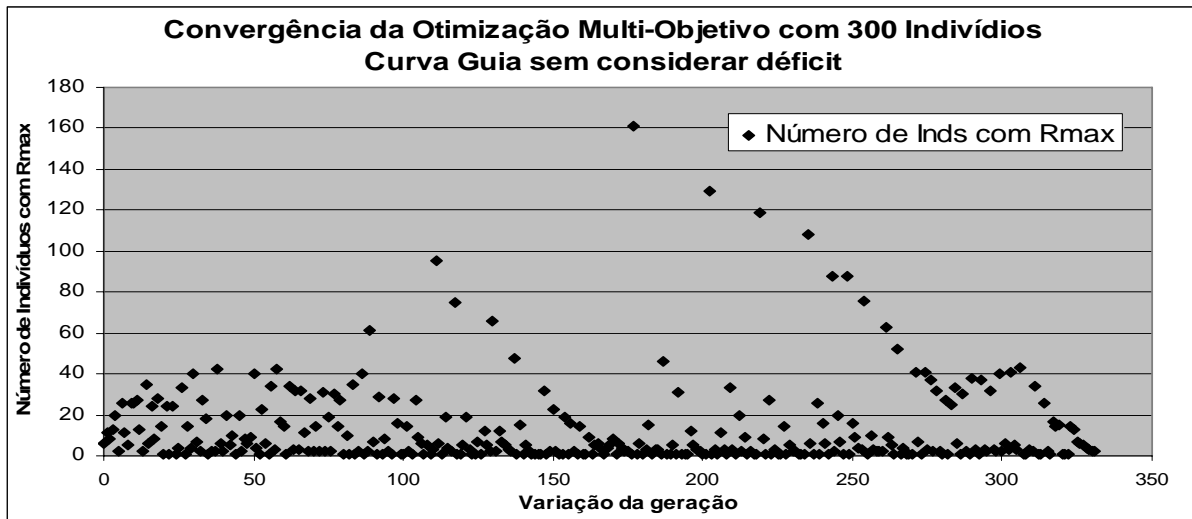


Figura 4.74: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.



Figura 4.75: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

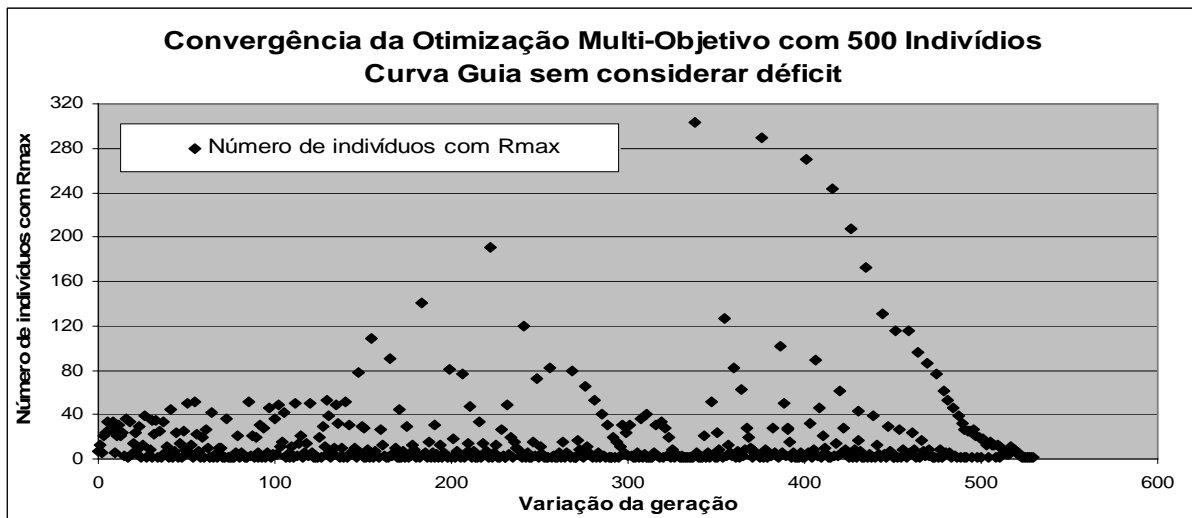


Figura 4.76: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, sem consideração dos déficits hídricos.

### 4.6.3.3 Curva Guia com verificação de déficit hídrico

Quando se alterou a regra da curva guia, para incluir a consideração do déficit hídrico, se verificou que a convergência passou a ser muito demorada. Por outro lado, como já havia um indicativo de que a utilização de valores truncados para as aptidões poderia acelerar a convergência, se adotou essa simplificação, obtendo-se, assim, a convergência para todas as populações utilizadas.

Nesse caso, para a população de 100 indivíduos, ela foi obtida com 5h e 25 minutos e na 1622ª geração; para 200 indivíduos em 13h e 52min e na 3762ª geração; para 300 indivíduos em 12h e 14min, na 2056ª geração; e para a população de 500 indivíduos em 32h e 25 min e na 6522ª geração. As figuras de 4.77 a 4.84 representam a variação do  $R_{\max}$  e do número de indivíduos com  $R_{\max}$  em cada geração, durante o processo de convergência da otimização.

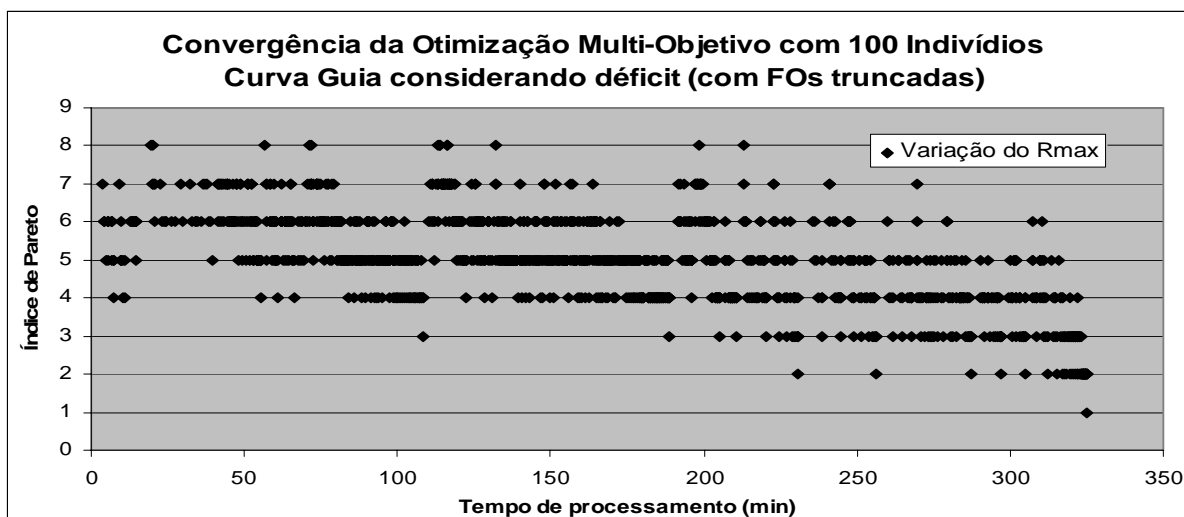


Figura 4.77: Variação do  $R_{\max}$  na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento no valor das aptidões.

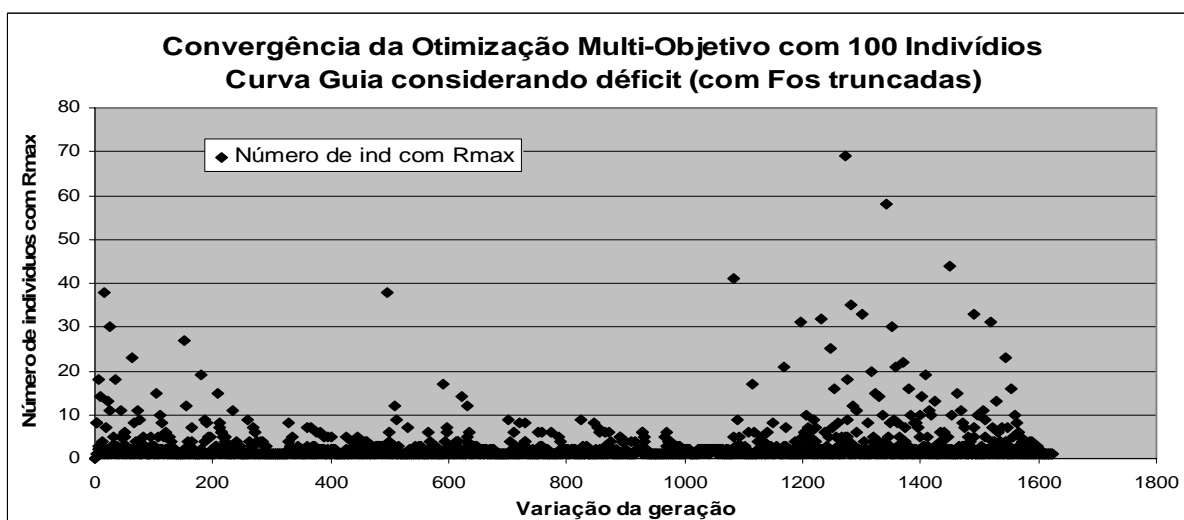


Figura 4.78: Variação do número de indivíduos com  $R_{\max}$  na população de 100 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

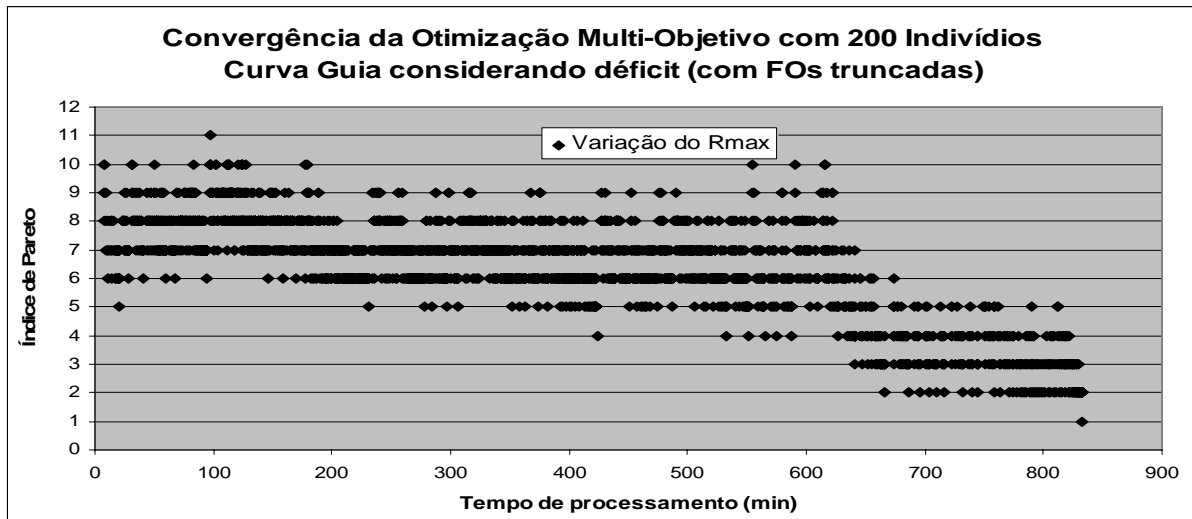


Figura 4.79: Variação do Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

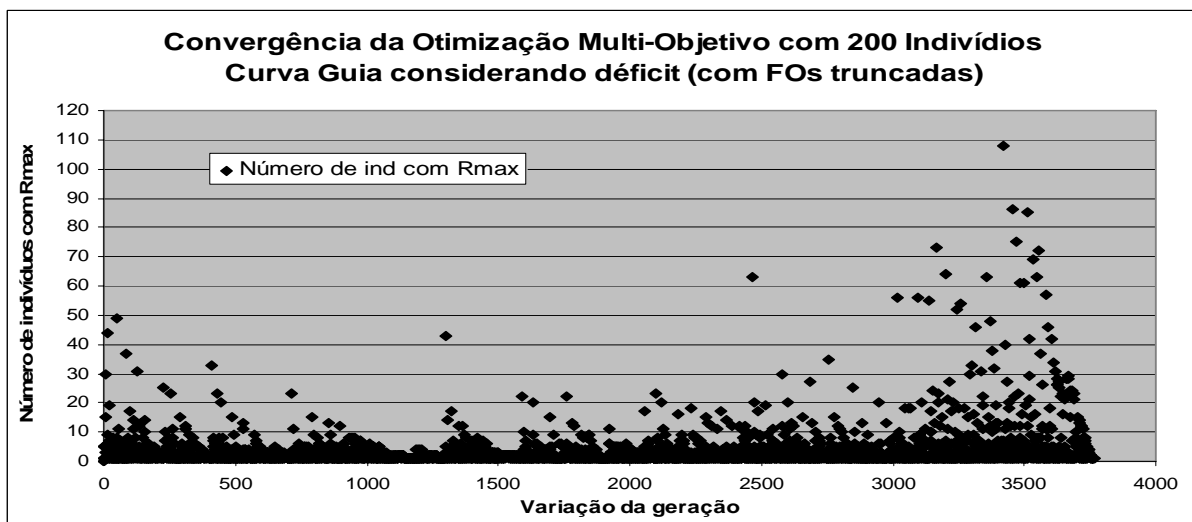


Figura 4.80: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 200 indivíduos, na otimização multi-objetivo da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

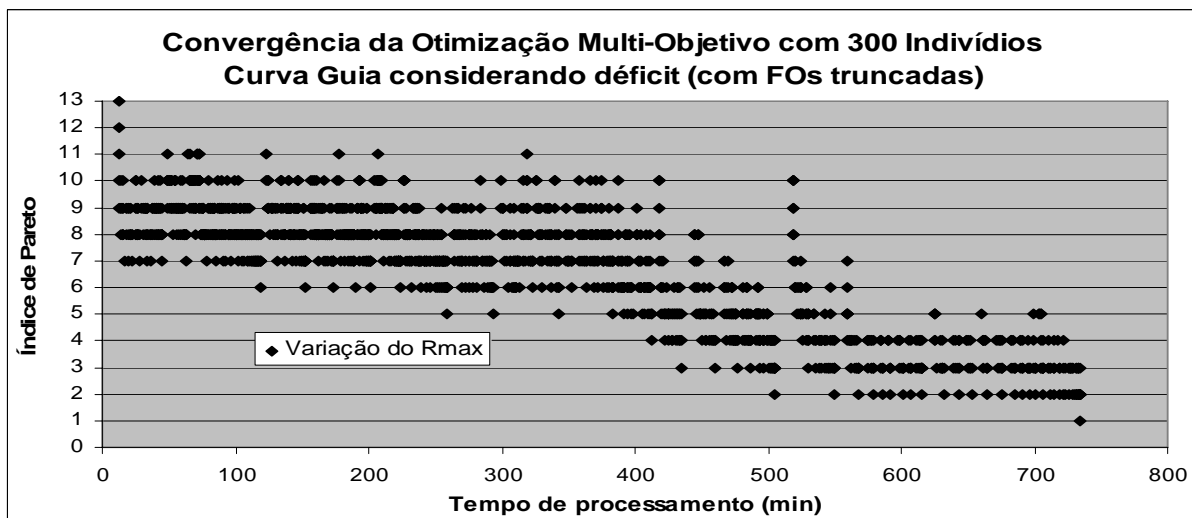


Figura 4.81: Variação do Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

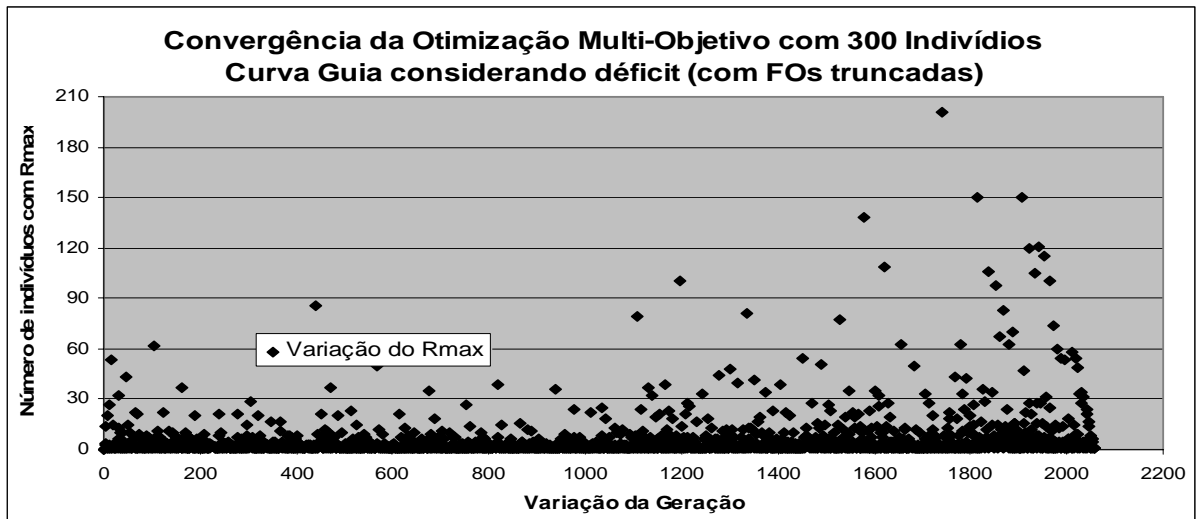


Figura 4.82: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 300 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

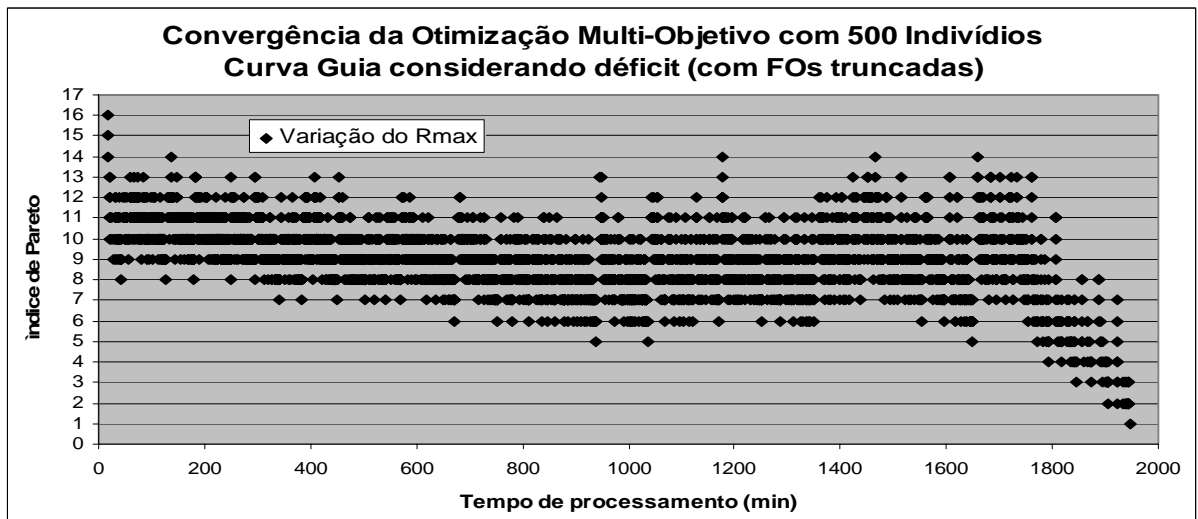


Figura 4.83: Variação do Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

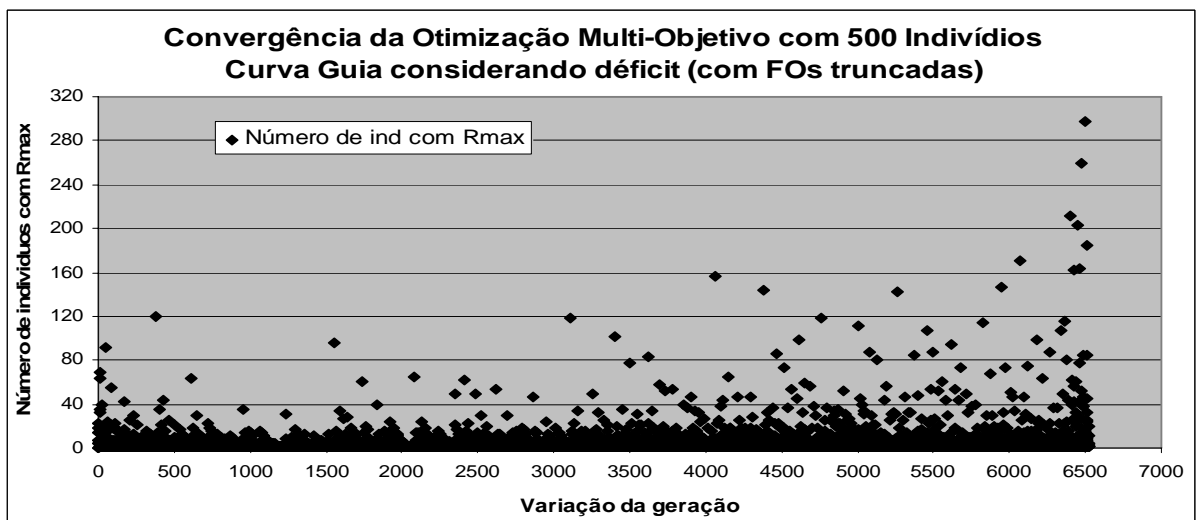


Figura 4.84: Variação do número de indivíduos com Rmax na população de 500 indivíduos, na otimização multi-objetivo da regra da curva guia, com consideração dos déficits hídricos e truncamento das aptidões.

## 4.7 A aplicação dos modelos de Programação Linear

A aplicação dos modelos de PL se deu conforme explicado na metodologia. Nos sub-ítemns abaixo estão descritos os resultados das linearizações necessárias, o resultado de uma tentativa mal sucedida de se obter um melhor ajuste das curvas área versus volume e finalmente o resultado do atendimento às demandas no modelo de programação linear.

### 4.7.1 Linearização da relação área versus volume

Como os modelos de PL necessitam de que todas as equações sejam lineares, um dos pontos sensíveis na montagem dos mesmos corresponde a não-linearidade entre armazenamento, evaporação e precipitação. Assim, através de regressão simples, aplicada aos dados de cota-área-volume de cada um dos reservatórios, se obteve e se utilizou uma relação linear entre Área do espelho d'água e Volume armazenado.

Os dados utilizados encontram-se nos anexos, e os resultados das regressões estão descritos na tabela 4.37, assim como a regressão linear pode ser visualizada nas figuras 4.85 a 4.87. Verificou-se, de acordo com esses resultados, que o coeficiente de correlação  $R^2$ , para os três reservatórios, apresentou valores acima de 0,96, o que justifica a adoção da relação linear.

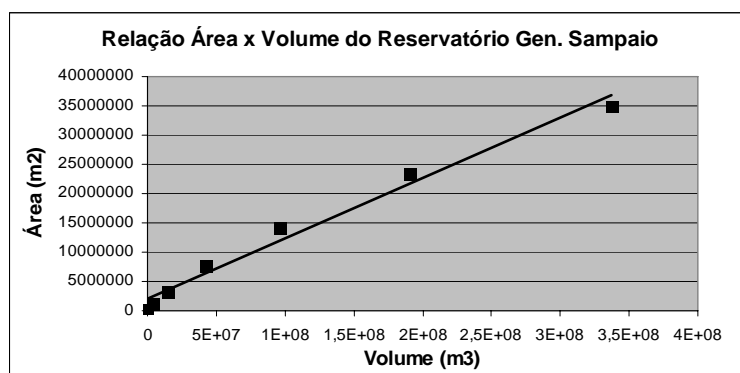


Figura 4.85: Regressão linear da função área versus volume do reservatório General Sampaio.

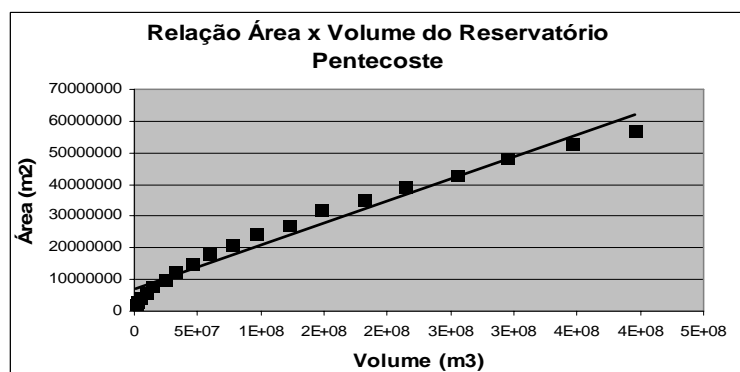


Figura 4.86: Regressão linear da função área versus volume do reservatório Pentecoste.



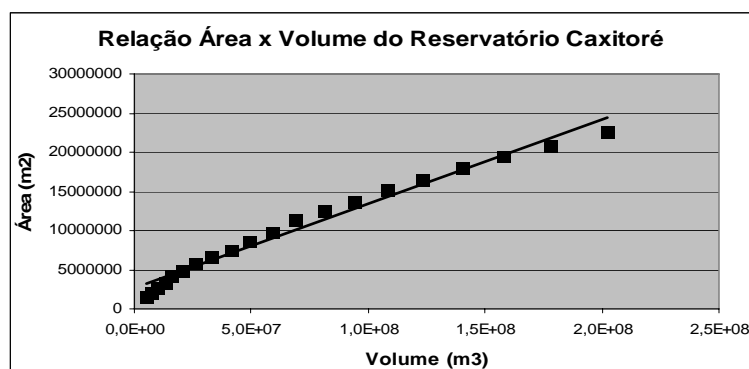


Figura 4.87: Regressão linear da função área versus volume do reservatório Caxitoré

Tabela 4.37: Valores dos coeficientes angular e linear das funções área versus volume para os três reservatórios.

Reservatório	Valor inicial		Valor final		Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R <sup>2</sup>
	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )			
Gen Sampaio	435000	303000	336709000	34937000	0,10295	2042552,98	0,98255
Pentecoste	714000	1900000	395638000	57000000	0,13916	7085406,94	0,96829
Caxitoré	5000000	1500000	202000000	22500000	0,10733	2684977,74	0,97903

#### 4.7.2 Uma abordagem infrutífera de melhorar a linearização da função área versus volume

Uma tentativa infrutífera de melhorar a resposta do modelo de PL foi a adoção de uma segmentação em três trechos para cada reservatório, resultando, assim, nos valores descritos nas tabelas 4.38 a 4.40.

Tabela 4.38: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Gen Sampaio.

Trecho	Valor inicial		Valor final		Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R <sup>2</sup>
	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )			
1	435000	303000	14918000	3281000	0,20422	244024,128	0,99947
2	14918000	3281000	96654000	14130000	0,1308	1645771,03	0,99412
3	96654000	14130000	336709000	34937000	0,08596	6304416,12	0,99558

Tabela 4.39: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Pentecoste.

Trecho	Valor inicial		Valor final		Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R <sup>2</sup>
	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )			
1	714000	1900000	32241000	12500000	0,32628	2335526,18	0,98349
2	32241000	12500000	148115000	31800000	0,16346	7859465,23	0,99287
3	148115000	31800000	395638000	57000000	0,10305	16850145,9	0,99721

Tabela 4.40: Dados da segmentação da relação área versus volume para o Caxitoré.

Trecho	Valor inicial		Valor final		Coeficiente Angular	Coeficiente Linear	R <sup>2</sup>
	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )			
1	5000000	1500000	20000000	4900000	0,23012	426967,471	0,99242
2	20000000	4900000	81000000	12600000	0,12755	2360699,17	0,99927
3	81000000	12600000	202000000	22500000	0,08223	6220475,32	0,99517

A tentativa de utilização desses resultados se desenvolveu da seguinte forma:

- 1) Após executar o modelo de programação linear utilizando a relação área versus volume de acordo com os valores dos coeficientes definidos na tabela 4.37, se verificava em que trecho, da função segmentada (definida segundo as tabelas 4.38 a 4.40), os valores de armazenamento dos reservatórios, em cada intervalo mensal, se encontravam;
- 2) Se montava outro modelo de PL usando, dessa vez, em cada intervalo mensal, a relação área versus volume definida pelos trechos equivalentes, nos quais se encontrava os valores de armazenamento obtidas anteriormente;
- 3) Esse procedimento foi repetido na tentativa de verificar se o modelo convergia para que os resultados das variáveis relativas aos armazenamentos realmente se encontravam nos trechos da segmentação adotados para a montagem do modelo de PL.

Com a segmentação de cada função área versus volume em três trechos, se obteve, conforme se pode verificar nas tabelas 4.38 a 4.40, valores de  $R^2$  maiores que a linearização em trecho único, porém o procedimento acima descrito não funcionou. Ou seja, não houve convergência para que os armazenamentos mensais obtidos na execução do modelo de PL estivessem realmente nos trechos utilizados na montagem dos modelos.

Isso ocorreu porque não foi colocada nenhuma condição limitando os armazenamentos mensais aos valores limites de cada trecho utilizado. Assim, em cada execução, o modelo “procurava” e obtinha o melhor resultado das variáveis que atendessem ao disposto na função objetivo. Dessa forma, o modelo obtinha valores das variáveis dos armazenamentos dos reservatórios sempre fora do trecho pré-definido para a relação área versus volume.

Outra possibilidade seria a utilização do esquema de linearização proposto por Pilar (1998), com a garantia das condições de adjacências. Porém isso implicaria aumento considerável de variáveis e restrições, pois deveria ser montado o esquema para cada reservatório em cada intervalo mensal. Como nessa aplicação estão sendo utilizados 3 reservatórios com 324 intervalos mensais e o esquema implica introdução de 19 novas variáveis para cada linearização (feita em três trechos) em cada intervalo de tempo, esse procedimento levaria à necessidade de inclusão de 18468 novas variáveis ao modelo. Dessa forma, a tentativa de segmentação em três trechos para a montagem e resolução do modelo de PL foi abandonada, considerando ainda que os coeficientes de correlação das funções área versus volume de cada reservatório, sem segmentação já estavam altos.

### 4.7.3 O resultado do atendimento às demandas no modelo de PL

O modelo de programação linear para a operação e atendimento às demandas do sistema da bacia do rio Curu gerado pela rotina de Pascal Script detalhada no capítulo da metodologia apresentou 34344 restrições e foi executado através do software LINDO. A execução encontrou a solução ótima após 15552 interações, com um valor de  $5,168 \times 10^{13}$  para a função objetivo.

Uma primeira análise na resposta do modelo, quanto aos valores das variáveis relativas ao atendimento às demandas, comprova que o modelo atingiu o objetivo esperado de operar o sistema de reservatórios e atender às demandas de acordo com as prioridades estabelecidas, representadas pelos pesos na função objetivo. Ou seja, sacrifica-se em alguns intervalos o atendimento à demanda terciária, de maneira a atender prioritariamente às demandas secundária e primária. Assim sendo, a resposta obtida apresenta falhas apenas no atendimento à demanda terciária e atende integralmente às demandas primária e secundária.

As falhas apresentadas no atendimento à demanda terciária nos PCs foram, na sua maioria, de 100% das demandas de referência (previstas para atendimento), como pode ser verificado através dos gráficos das figuras 4.88 a 4.103. Porém, em alguns casos, como pode ser percebido através dos gráficos nas figuras 4.92, 4.98, 4.102 e 4.103, referentes aos PCs 5, 11, 15 e 16, as falhas não foram de 100%, o que reforça a conclusão de que o modelo convergiu normalmente atendendo às demandas da melhor maneira possível, utilizando a totalidade da disponibilidade hídrica e respeitando as prioridades definidas através dos pesos adotados na função objetivo.

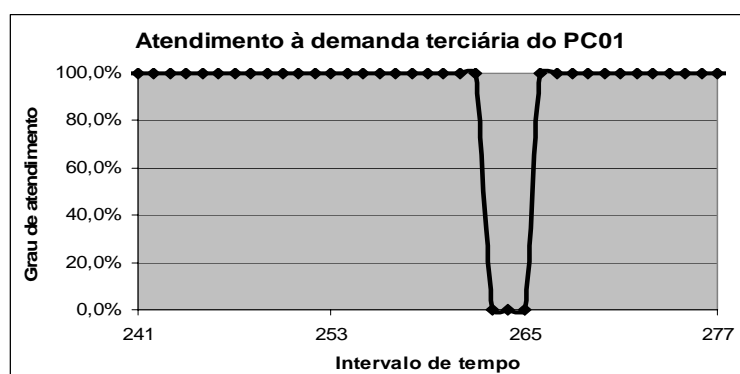
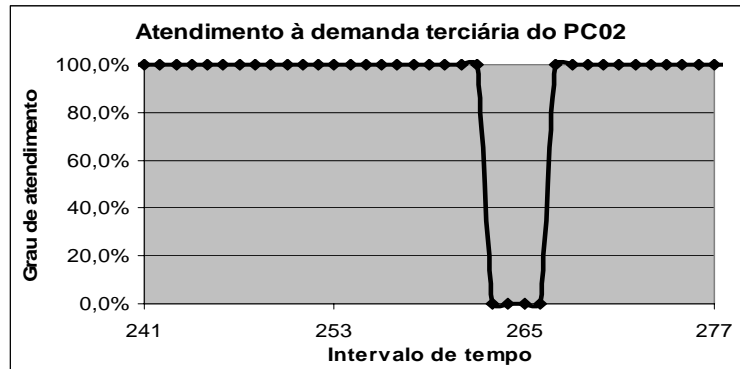
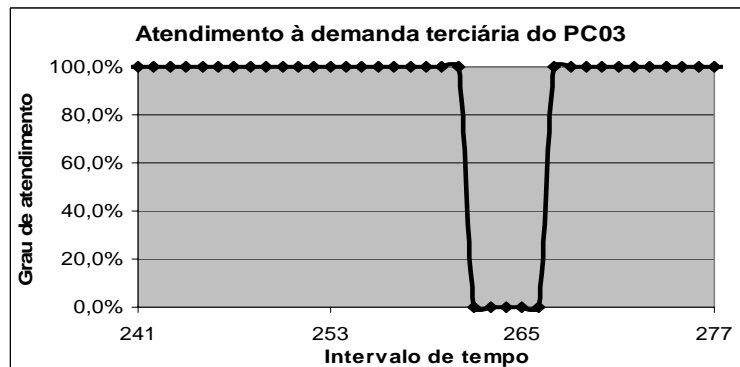


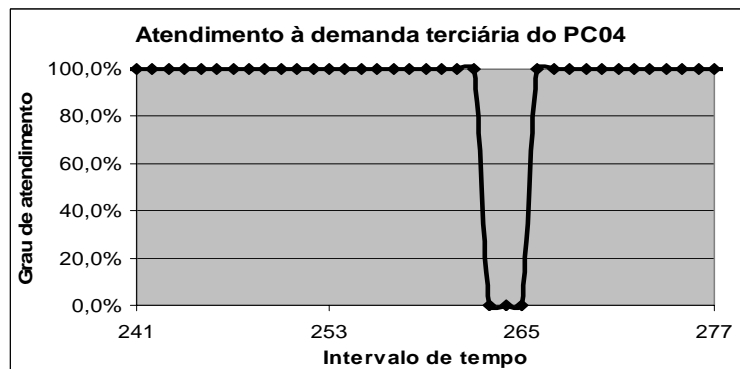
Figura 4.88: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC01.



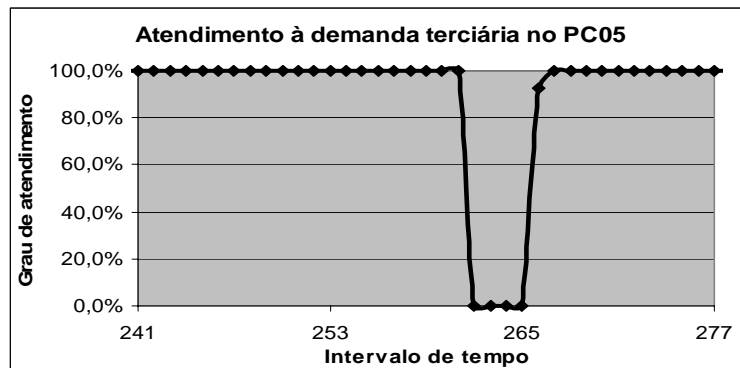
**Figura 4.89:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC02.



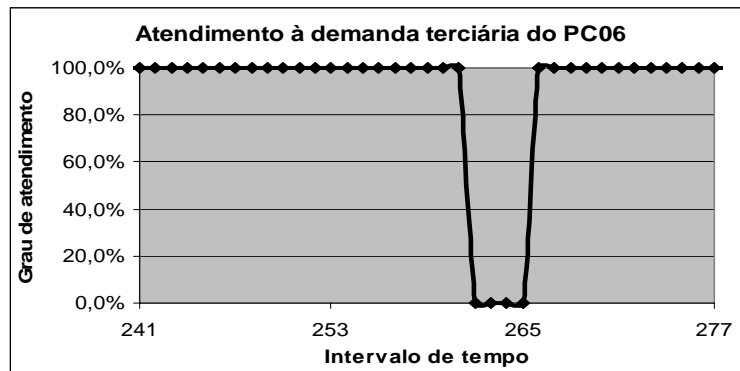
**Figura 4.90:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC03.



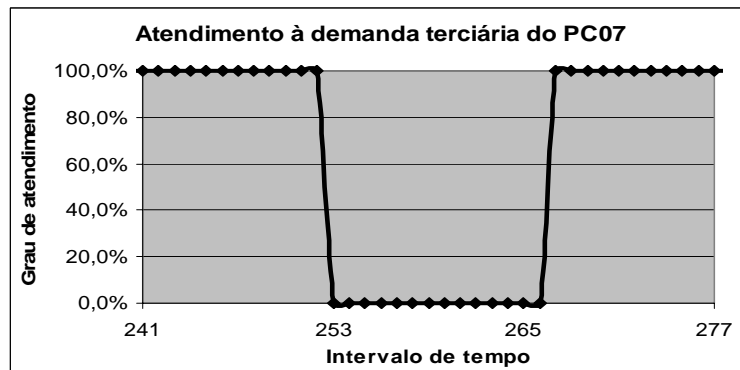
**Figura 4.91:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC04.



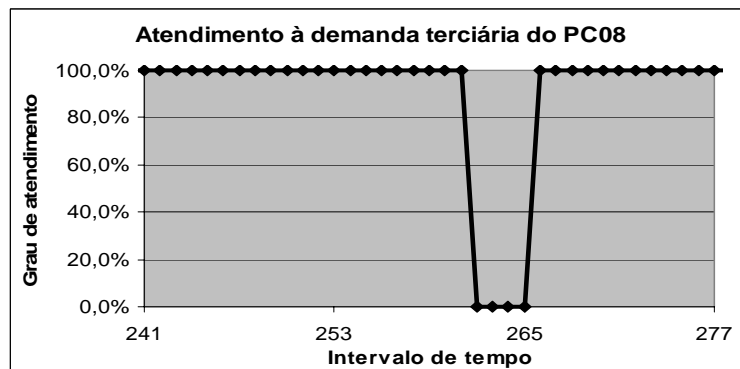
**Figura 4.92:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC05.



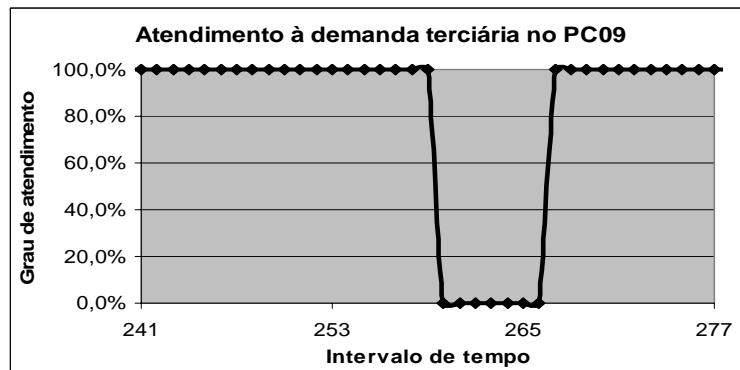
**Figura 4.93:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC06.



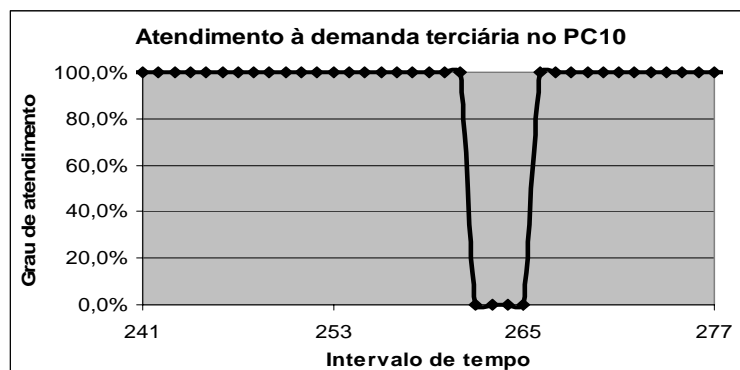
**Figura 4.94:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC07.



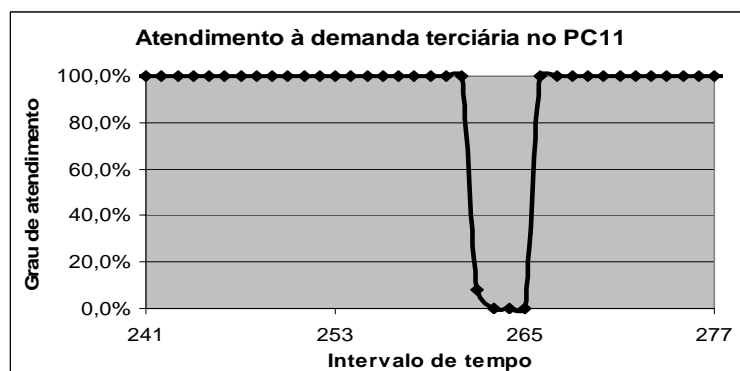
**Figura 4.95:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC08.



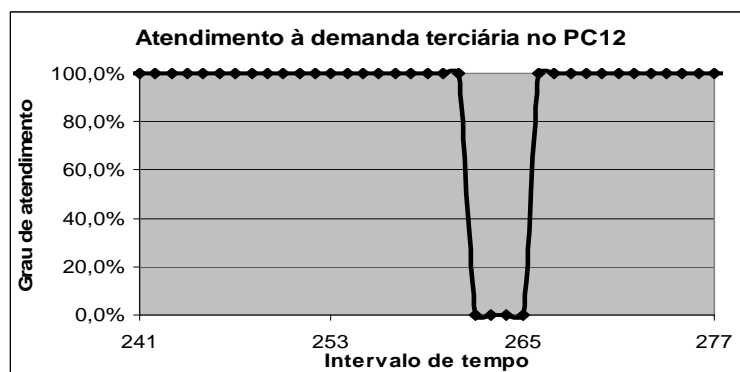
**Figura 4.96:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC09.



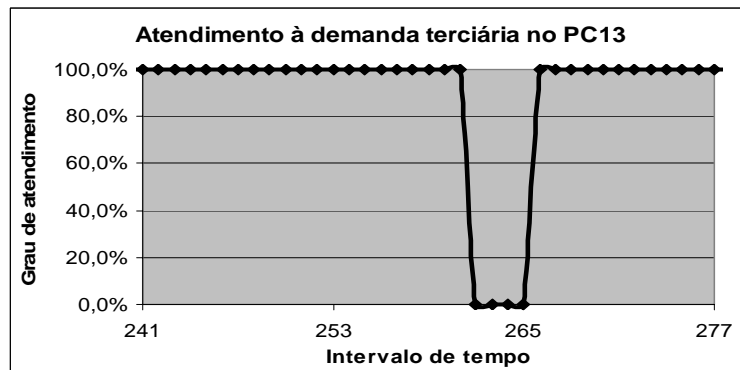
**Figura 4.97:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC10.



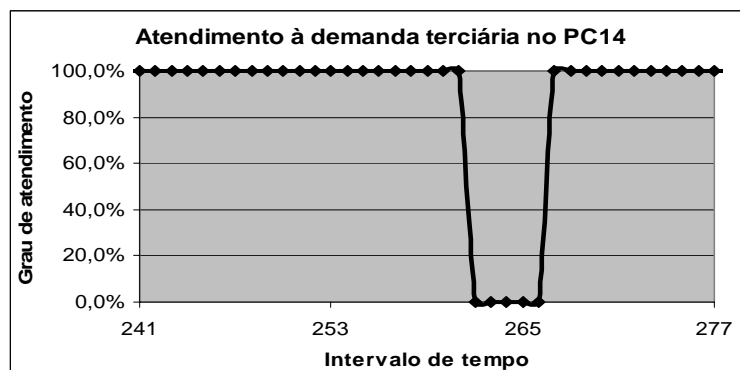
**Figura 4.98:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC11.



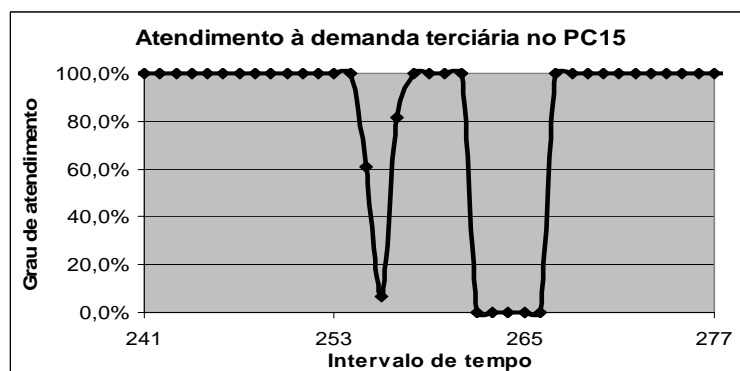
**Figura 4.99:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC12.



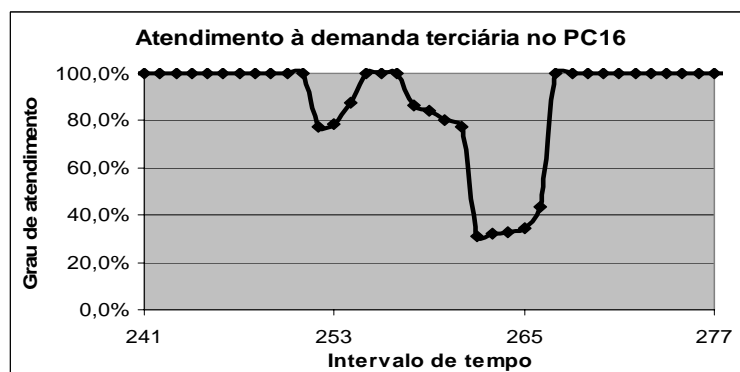
**Figura 4.100:** Falhas no atendimento à demanda terciária do PC13.



**Figura 4.101: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC14.**

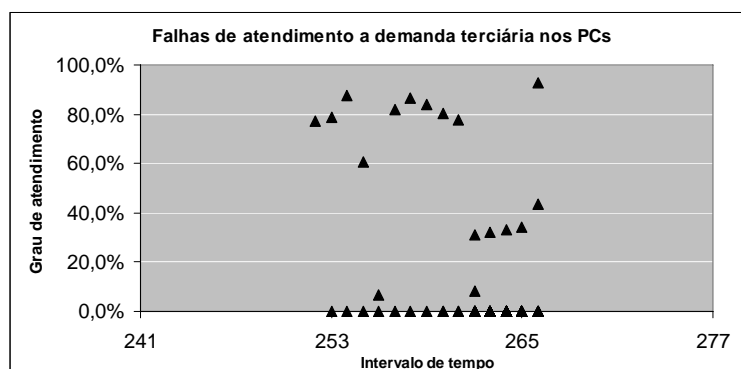


**Figura 4.102: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC15.**



**Figura 4.103: Falhas no atendimento à demanda terciária do PC16.**

Outra observação a ser feita é representada pela figura 4.104, na qual se verifica, pelo gráfico apresentado, onde estão as falhas no atendimento à demanda terciária em todos os PCs, demonstrando sua concentração nos intervalos de tempo de 252 a 266, equivalentes ao período de dezembro de 1982 a janeiro de 1984.



**Figura 4.104:** Intervalos de tempo onde se concentram as falhas no atendimento às demandas terciárias.

O resultado do modelo de programação linear, apesar de se apresentar “perfeito”, ou seja, atende ao máximo possível as demandas, respeitando as suas hierarquias, não configura algo representativo da realidade. Em outras palavras, os valores da série das descargas efetuadas pelos reservatórios, ou os valores de seus armazenamentos temporais não configuram uma regra operacional que possa ser utilizada pelos operadores do sistema.

Afinal, obedecendo à máxima: “em hidrologia tudo o que se conhece é o passado e tudo que importa é o futuro”, a única certeza absoluta que temos é que a série histórica de dados de entrada, referentes à pluviometria e fluviometria, utilizados para a construção do modelo, não mais se repetirá. O que se espera é que o comportamento estatístico das séries utilizadas, como dados de entrada, se mantenha.

Dessa forma, o próximo passo a ser tomado é a utilização dos valores de algumas variáveis, como as descargas efetuadas e os armazenamentos dos reservatórios, para, através de medidas de tendência central e correlações, obter regras operacionais a serem aplicadas futuramente no sistema. O resultado desses procedimentos é detalhado nos itens a seguir.

## 4.8 Extração das regras operacionais dos resultados do modelo de PL

A tentativa de extração das regras operacionais se procedeu em duas vertentes, cada uma delas de acordo com as regras operacionais a serem utilizadas: uma referente à curva guia (volumes médios a serem atingidos em cada mês e em cada reservatório) e a outra relativa à Regra Padrão Modificada (Grau de Racionamento da Descarga de cada reservatório depende da disponibilidade do reservatório, ou do sistema). Essa tentativa se deu então através do cálculo de média e de regressões simples e múltiplas, realizadas através de um software denominado *STATISTICA versão 7.0*.



#### 4.8.1 Valores das curvas guias obtidas através do cálculo de médias

Conforme já comentado, através da utilização do software *STATISTICA*, foram calculadas as seguintes medidas de tendência dos 27 volumes mensais de cada reservatório: Média, Mediana, Moda, Média Harmônica e Média Geométrica. Os resultados estão nas tabelas 4.41 a 4.43.

**Tabela 4.41: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Gen Sampaio (m3):**

Mês	Média	Média Geométrica	Média Harmônica	Mediana	Moda	Frequência da Moda
Jan	55766378	24170590	14448795	10390154	8500000	9
Fev	51663959	21012763	12657841	8500000	8500000	16
Mar	64683060	27817023	14811713	8500000	8500000	14
Abr	83480474	37044111	17708693	31824720	8500000	11
Mai	108287825	67541477	36536826	85297992	8500000	2
Jun	111137322	78961661	54447201	95576216	Múltiplas	-
Jul	105078282	74102031	52206077	80168656	Múltiplas	-
Ago	95686945	63973261	43581341	73180920	Múltiplas	-
Set	88083774	55602081	35838384	61928388	Múltiplas	-
Out	77280551	46658746	30192344	49189920	Múltiplas	-
Nov	66542884	37138468	24049510	34772020	Múltiplas	-
Dez	54339585	25775501	16569648	14819763	8500000	4

**Tabela 4.42: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Pentecoste (m3):**

Mês	Média	Média Geométrica	Média Harmônica	Mediana	Moda	Frequência da Moda
Jan	87893108	50882731	34030189	39996436	18500000	8
Fev	84100304	47027989	31526163	35758064	18500000	11
Mar	85632608	48214635	32154540	39299632	18500000	12
Abr	106711913	66828399	42822890	56983568	18500000	7
Mai	154854422	118922439	89540567	140504624	Múltiplas	-
Jun	153174478	118132445	90543577	126773648	Múltiplas	-
Jul	145317401	110146389	83857498	106203144	Múltiplas	-
Ago	133367752	97834734	73607983	82720048	Múltiplas	-
Set	122120138	87916515	66108349	77768792	Múltiplas	-
Out	110806658	75544142	55509904	65413724	Múltiplas	-
Nov	101710228	65278652	45893268	60333552	Múltiplas	-
Dez	92376570	54908090	36951430	42715376	18500000	4

**Tabela 4.43: Resultados das medidas de tendência para o Reservatório Caxitoré (m3):**

Mês	Média	Média Geométrica	Média Harmônica	Mediana	Moda	Frequência da Moda
Jan	53722164	32016591	18125950	38365524	7500000	5
Fev	49365788	27229657	15347820	30872072	7500000	11
Mar	47824748	25563275	14491374	27851710	7500000	12
Abr	62167920	34558990	17817670	45621976	7500000	9
Mai	102458381	82252934	54721226	90276704	Múltiplas	-
Jun	103759565	87100361	69173146	90294096	Múltiplas	-
Jul	96158500	78473533	60788056	71493432	Múltiplas	-
Ago	87131475	68320067	49963402	68935512	Múltiplas	-
Set	76503624	58530031	42117106	66380636	Múltiplas	-
Out	67930961	50240062	36044460	44345392	Múltiplas	-
Nov	59277322	40806034	27511145	39959028	Múltiplas	-
Dez	53534596	32467983	19435955	37893804	7500000	2

A utilização da moda foi descartada, visto que, conforme os resultados das tabelas, nos meses em que ela ocorreu, a mesma corresponde ao limite mínimo de armazenamento de cada reservatório.

Esses resultados então foram testados por simulação, para comparar com os resultados obtidos anteriormente com a otimização feita por AG, onde as regras operacionais são pré-definidas e seus parâmetros são ajustados iterativamente posteriormente.

Com isso foram testados, via simulação através do PROPARMOO, 4 (quatro) conjuntos de regras operacionais compostas de acordo com os valores das médias, medianas, médias geométricas e médias harmônicas dos armazenamentos. Cada conjunto desses tem 12 valores mensais para cada um dos 3 reservatórios, ou seja, 36 parâmetros obtidos pela média, mediana, média harmônica e média geométrica, dos 27 valores dos armazenamentos obtidos pela resolução do modelo de PL, de cada mês do ano.

#### **4.8.2 Simulação das curvas guias obtidas através do cálculo de médias**

Uma vez que se percebeu que a utilização pura e simples de uma medida de armazenamento, como meta, poderia levar o reservatório a liberar água muito acima do necessário num determinado mês, assumindo assim um comportamento “perdulário”, se resolveu agregar à regra uma verificação do déficit hídrico a ser atendido em cada mês. Dessa forma, o conjunto de 4 regras operacionais se transformou em 8. Metade das mesmas faz o teste de déficit antes de liberar a água do reservatório e a outra metade libera a água apenas considerando a meta de armazenamento mensal do reservatório.

Os valores das funções objetivo, que avaliam o desempenho do sistema, foram então calculados durante o processo de simulação, e os seus valores encontram-se na tabela 4.44. Segundo essa tabela, verifica-se, através dos valores das funções objetivo adotadas, que entre as curvas-guia obtidas através do cálculo de média, aquela que se configurou na melhor regra operacional foi a curva-guia (volume-meta), obtida com os valores das médias harmônicas mensais das descargas dos reservatórios (obtidas no modelo de PL), com a consideração dos déficits mensais a serem atendidos. Em outras palavras, foi essa regra operacional que obteve a menor probabilidade de falhas, a maior (em módulo) elasticidade e a menor vulnerabilidade. Já quando se simulou as curvas-guia sem a consideração dos déficits mensais, a menor probabilidade de falhas foi obtida pela mediana dos armazenamentos mensais, a maior elasticidade foi obtida pela média dos armazenamentos e a menor elasticidade foi obtida pela média geométrica. Salienta-se, como era de se esperar, que a consideração dos déficits na

aplicação das curvas-guia levou a melhores resultados, utilizando qualquer das medidas de tendência.

**Tabela 4.44: Valores das funções objetivo para a simulação das regras dos volumes meta.**

Regra operacional do volume meta		FO1	FO2	FO3
Considerando os déficits a serem atendidos	Media	2,416667	-38,3493	2,976441
	Mediana	2,324074	-36,4691	3,420863
	Média Geométrica	2,274691	-41,6556	2,998128
	Média Harmônica	2,259259	-42,6404	2,948229
Sem considerar os déficits a serem atendidos	Media	6,040123	-33,8348	7,326567
	Mediana	5,861111	-32,9638	6,641896
	Média Geométrica	6,17284	-28,7751	6,595442
	Média Harmônica	7,080247	-27,4254	8,551612

### 4.8.3 Tentativa de obtenção da Regra Padrão Modificada através dos resultados das descargas do modelo de PL

Conforme já comentado anteriormente, parte da resposta do modelo de PL são os valores das descargas dos reservatórios, que, de acordo com as vazões afluentes utilizadas, melhor atendem às demandas, de acordo com as suas prioridades. Porém, essas descargas não configuram uma regra operacional.

A tentativa de obtenção da Regra Padrão de Decisão Modificada se deu via regressão, onde, para obter o racionamento que foi imputado a cada descarga no modelo de PL, se comparou, mês a mês, cada uma dessas descargas com a descarga operada por simulação da regra padrão, e aqui surgiram nitidamente alguns problemas.

O primeiro deles diz respeito à própria resposta do modelo de PL: conforme já comentado anteriormente no item 4.7.3, a operação dos reservatórios definida pelas descargas dos reservatórios e o atendimento às demandas apresentou falhas apenas para as demandas terciárias e apenas em alguns intervalos de tempo. Assim sendo, se considerarmos apenas a “operação dos reservatórios” encontrada pelo modelo de PL, chegar-se-á à inevitável conclusão de que houve racionamento apenas nos intervalos de tempo de 252 a 266, equivalentes ao período de dezembro de 1982 a janeiro de 1984.

O outro problema menos nítido está relacionado ao fato de que por simulação o cálculo da evaporação e precipitação de cada reservatório se dá através de um método do PROPAGARMOO e é mais “fiel” a função Área versus volume não-linear, uma vez que se executa uma interpolação entre dois pares ordenados (área,volume) e se repete até 10 vezes essa interpolação até haver uma convergência. Assim, comparar descargas obtidas por simulação com as obtidas por PL representa claramente um problema, pois esses sistemas

usam métodos diferentes para calcular evaporação e precipitação: o primeiro usa interpolação e o segundo linearização da função área versus volume.

Quando a comparação foi realizada, o que se verificou foi o seguinte: para um dado reservatório e para o conjunto de descargas do mesmo, organizadas em 12 conjuntos mensais (janeiro, fevereiro, ...) com 27 dados (número de anos de dados utilizados nos modelos), não foi observado um racionamento característico. Em alguns intervalos, a descarga encontrada pelo modelo de PL foi superior àquela definida pela simulação da regra padrão, para o mesmo intervalo. Quando foi possível calcular os racionamentos, (entre os 27 meses de janeiro, entre os 27 meses de fevereiro, ...), os valores não possuíam um valor médio característico. Ainda houve situações em que, pelo fato de a descarga ser nula em determinados momentos na resposta do modelo de PL, ocorreu divisão por zero quando da tentativa da obtenção do parâmetro Alfa, da Regra Padrão Modificada. Essas situações são retratadas em duas tabelas a seguir utilizadas como exemplo (tabelas 4.45 e 4.46).

**Tabela 4.45: Variabilidade nos valores do parâmetro Alfa, quando da existência de racionamento, para o reservatório Gen. Sampaio no mês de maio.**

Delta T	Disponibilidade (hm <sup>3</sup> )	Descarga PL (hm <sup>3</sup> )	Descarga RPad (hm <sup>3</sup> )	Houve Racionamento ?	Racionamento estimado	Alfa estimado
5	94,59	5,99	1,74	Não	-	-
17	34,05	0,02	0,02	Não	-	-
29	51,83	0,00	0,00	Não	-	-
41	66,68	0,00	0,00	Não	-	-
53	24,91	0,70	3,11	Sim	0,22	107,96
65	85,82	72,03	0,05	Não	-	-
77	192,29	15,62	0,00	Não	-	-
89	54,25	0,00	0,00	Não	-	-
101	19,05	0,00	1,67	Sim	0,00	3189698785,60
113	112,55	0,00	0,00	Não	-	-
125	78,07	0,51	2,82	Sim	0,18	427,60
137	158,40	153,09	0,00	Não	-	-
149	252,17	252,54	0,00	Não	-	-
161	92,30	0,02	0,02	Não	-	-
173	132,00	0,02	2,87	Sim	0,01	15892,35
185	309,47	0,00	0,00	Não	-	-
197	279,28	0,00	0,36	Sim	0,00	10167938454,48
209	156,17	3,89	2,05	Não	-	-
221	179,65	7,41	6,10	Não	-	-
233	316,06	0,10	4,40	Sim	0,02	13350,37
245	233,86	1,87	3,45	Sim	0,54	426,39
257	82,81	9,77	6,99	Não	-	-
269	217,81	213,46	0,00	Não	-	-
281	130,28	130,26	0,00	Não	-	-
293	85,42	4,17	0,00	Não	-	-
305	129,97	0,08	2,33	Sim	0,03	3913,44
317	216,26	209,25	0,00	Não	-	-

**Tabela 4.46: Impossibilidade de cálculo dos valores do parâmetro Alfa, quando da existência de racionamento, para o reservatório Pentecoste no mês de janeiro.**

Delta T	Disponibilidade (hm <sup>3</sup> )	Descarga PL (hm <sup>3</sup> )	Descarga RPad (hm <sup>3</sup> )	Houve Racionamento ?	Racionamento estimado	Alfa estimado
1	180,81	175,49	2,46	Não	-	-
13	1,40	0,00	2,62	Sim	0,00	Divisão por zero
25	5,16	4,17	2,16	Não	-	-
37	77,20	0,00	2,64	Sim	0,00	Divisão por zero
49	140,91	0,00	2,74	Sim	0,00	Divisão por zero
61	9,49	6,53	2,51	Não	-	-
73	68,99	6,53	2,73	Não	-	-
85	312,56	0,00	2,74	Sim	0,00	Divisão por zero
97	230,87	0,00	1,61	Sim	0,00	Divisão por zero
109	93,57	5,46	1,83	Não	-	-
121	47,21	0,00	1,08	Sim	0,00	Divisão por zero
133	2,49	0,00	0,83	Sim	0,00	Divisão por zero
145	7,03	6,16	0,00	Não	-	-
157	315,98	0,00	2,74	Sim	0,00	Divisão por zero
169	261,91	0,00	2,16	Sim	0,00	Divisão por zero
181	198,23	0,00	0,82	Sim	0,00	Divisão por zero
193	76,98	6,53	1,06	Não	-	-
205	46,48	0,00	1,05	Sim	0,00	Divisão por zero
217	12,38	0,00	1,00	Sim	0,00	Divisão por zero
229	4,81	0,00	0,64	Sim	0,00	Divisão por zero
241	38,49	0,00	1,52	Sim	0,00	Divisão por zero
253	24,22	0,00	1,29	Sim	0,00	Divisão por zero
265	1,97	0,00	2,75	Sim	0,00	Divisão por zero
277	2,13	0,84	0,28	Não	-	-
289	2,11	0,00	2,61	Sim	0,00	Divisão por zero
301	24,01	6,53	2,75	Não	-	-
313	3,78	0,00	2,60	Sim	0,00	Divisão por zero

De acordo com os problemas relatados, o objetivo de definir (doze) parâmetros mensais de racionamento para cada um dos três reservatórios estratégicos, através da resposta do modelo de PL, para as descargas operadas, se mostrou impossível.

#### **4.8.4 Utilização de Regressão Linear e Múltipla para obtenção de regra operacional através da resposta do modelo de PL**

Uma vez que não foi obtido êxito na tentativa de obter a regra padrão modificada através da resposta do modelo de PL, optou-se por tentar obter uma regra operacional que relacionasse a descarga a ser operada num determinado reservatório com a sua própria disponibilidade ou com a disponibilidade de todo o sistema. Para efetuar essas regressões se utilizou novamente o programa *STATISTICA versão 7.0*.

Conforme já descrito no capítulo da metodologia, uma regra que relacionasse a descarga de um reservatório com a sua disponibilidade de armazenamento e a disponibilidade dos demais reservatórios teria o seguinte formato, para os três reservatórios estratégicos:

$$Desc_{i,j} = CoefLinear_{i,j} + a_{i,j} \times Disp_{i,j} + \sum_{k=1}^2 b_{k,j} \times Disp_{k,j} \quad 4.1$$

Onde:

- $Desc_{i,j}$  • Descarga do reservatório  $i$  a ser operada no mês  $j$ ;
- $CoefLinear_{i,j}$  • Coeficiente linear da regressão (simples ou múltipla), para o reservatório  $i$  no mês  $j$ ;
- $a_{i,j}$  • Coeficiente multiplicador da disponibilidade do próprio reservatório  $i$  no mês  $j$ ;
- $Disp_{i,j}$  • Disponibilidade hídrica do próprio reservatório  $i$  no mês  $j$ ;
- $b_{k,j}$  • Coeficiente multiplicador das disponibilidades dos demais reservatórios  $k$  no mês  $j$ ;
- $Disp_{k,j}$  • Disponibilidade hídrica dos demais reservatórios  $k$  no mês  $j$ .

De acordo com a expressão apresentada, para obter a regra operacional que relacionasse as descargas mensais observadas de cada reservatório com a disponibilidade desse mesmo reservatório, foi efetuada uma regressão simples, onde se obtinha os valores de  $CoefLinear_{i,j}$  e  $a_{i,j}$  para cada um dos reservatórios em cada mês, levando em consideração apenas as próprias descarga e disponibilidade. A outra possibilidade testada foi a obtenção de uma regra operacional que relacionasse as descargas mensais observadas de cada reservatório com a disponibilidade de cada um dos três reservatórios estratégicos, ou seja, de acordo com a sua própria disponibilidade e a dos demais reservatórios, através de regressão múltipla.

Outra possibilidade testada tanto para a regressão simples como para a múltipla foi a ausência de interceptação do eixo das ordenadas, ou seja, a obtenção dos coeficientes  $a_{i,j}$  e  $b_{k,j}$  com  $CoefLinear_{i,j}$  obrigatoriamente nulo.

Na aplicação das regras obtidas, foi ainda introduzida, como já comentado no item 4.5.2, a definição da descarga a ser operada com consideração do déficit a ser atendido, de maneira a evitar uma descarga acima da necessária, o que causaria desperdício de água. Assim a descarga nunca seria maior que o déficit a ser atendido. Uma vez que a descarga calculada fosse menor que a necessária para atender ao déficit, haveria necessariamente um racionamento.

Para utilizar essa informação de nível de racionamento nas descargas, definiram-se duas possibilidades. Na primeira se confirmava as demandas a serem atendidas e se deixava ao método *raciona* interno do PROPAGARMOO promover a distribuição da disponibilidade em cada PC de acordo com as prioridades das demandas. A outra possibilidade foi implementada

através da distribuição do racionamento por toda a bacia, onde o racionamento era aplicado ao somatório das demandas de cada PC e esse novo valor era então distribuído de acordo com a prioridade das demandas.

Um dos problemas observados na aplicação dessa parte da metodologia foi que as regressões obtidas pelo programa STATISTICA demonstram que a regressão é tão ruim em determinados meses, que a média das descargas seria uma grandeza mais característica dos dados. Outra questão observada foi que em determinados meses as descargas dos reservatórios apresentavam valores repetidos, com muitos valores nulos entre os mesmos, o que pode ser verificado, por exemplo, nas quatro tabelas a seguir.

**Tabela 4.47: Valores das descargas (m<sup>3</sup>) observadas do mês de setembro para cada um dos reservatórios.**

Ano	Descarga General Sampaio	Descarga Pentecoste	Descarga Caxitoré
1	19348684	0	0
2	1471685,8	17876998	0
3	1471685,8	17876998	0
4	1471685,8	17876998	0
5	1471685,8	17876998	0
6	1471685,8	17876998	0
7	1471685,8	0	17876998
8	1471685,8	0	17876998
9	1471685,8	17876998	0
10	1471685,8	0	17876998
11	1471685,8	0	17876998
12	1471685,8	0	17876998
13	1471685,8	0	17876998
14	1471685,8	0	17876998
15	1471685,8	0	17876998
16	1471685,8	17876998	0
17	1471685,8	0	17876998
18	19348684	0	0
19	19348684	0	0
20	1471685,8	9525257	8351741,5
21	19348684	0	0
22	9896234	0	0
23	1471685,8	0	17876998
24	19348684	0	0
25	1471685,8	17876998	0
26	12698132	0	6650552,5
27	1471685,8	0	17876998

**Tabela 4.48: Valores das descargas observadas (m<sup>3</sup>) do mês de outubro para cada um dos reservatórios.**

Ano	Descarga General Sampaio	Descarga Pentecoste	Descarga Caxitoré
1	1588237,6	19577764	0
2	1588237,6	0	19577764
3	1588237,6	0	19577764
4	1588237,6	19577764	0
5	1588237,6	19577764	0
6	1588237,6	0	0
7	21166002	0	0
8	21166002	0	19577764
9	1588237,6	19577764	0
10	1588237,6	0	0
11	21166002	0	19577764
12	1588237,6	0	19577764
13	1588237,6	0	0
14	21166002	0	0
15	21166002	19577764	0
16	1588237,6	0	2346780,8
17	18819222	0	0
18	21166002	0	0
19	21166002	0	19577764
20	1588237,6	0	0
21	21166002	0	0
22	223807,1	0	19577764
23	1588237,6	0	17683392
24	3482609,8	19577764	0
25	1588237,6	0	0
26	21166002	19577764	0
27	1588237,6	19577764	0

**Tabela 4.49: Valores das descargas observadas (m<sup>3</sup>) do mês de novembro para cada um dos reservatórios.**

Ano	Descarga General Sampaio	Descarga Pentecoste	Descarga Caxitoré
1	13192641	11817777	0
2	8186372	5371203,5	0
3	14632945	0	0
4	20004148	11389638	0
5	8056027	0	558483,6
6	1531561	0	18472588
7	20004148	0	0
8	1531561	18472588	18472588
9	1531561	0	0
10	1531561	0	18472588
11	1531561	0	18472588
12	1531561	0	18472588
13	1531561	0	18472588
14	20004148	0	0
15	18885700	18472588	0
16	1531561	0	0
17	20004148	0	0
18	20004148	0	0
19	20004148	0	0
20	1531561	0	18472588
21	20004148	0	0
22	216587,5	18472588	0
23	1531561	0	0
24	1531561	18472588	18472588
25	1531561	0	0
26	20004148	0	0
27	1531561	11817777	18472588



**Tabela 4.50: Valores das descargas observadas do mês de dezembro para cada um dos reservatórios.**

Ano	Descarga General Sampaio	Descarga Pentecoste	Descarga Caxitoré
1	20059556	0	0
2	15587922	0	4471634
3	1551811,4	0	18507744
4	20059556	0	0
5	1551811,4	18507744	0
6	1551811,4	0	18507744
7	19770288	0	0
8	1551811,4	18507744	0
9	1551811,4	18507744	0
10	20059556	0	0
11	19745960	0	313595
12	1551811,4	0	18507744
13	1551811,4	0	18507744
14	19756896	0	0
15	20059556	0	0
16	1551811,4	18507744	0
17	20059556	0	0
18	20059556	0	0
19	20059556	0	0
20	19658332	0	0
21	19993132	0	0
22	223807,1	0	0
23	1551811,4	2872656,3	15635088
24	1551811,4	18483638	0
25	1551811,4	18507744	0
26	20059556	0	0
27	1551811,4	18507744	0

A presença dessas descargas dos reservatórios nos meses de setembro a dezembro com valores repetidos idênticos (alguns nulos) se deu devido a duas possibilidades: ou essa característica tem a ver com o algoritmo de resolução de PL do LINDO, ou nesses meses as descargas procuraram atender estritamente às demandas (ou déficits) da bacia, que são sempre as mesmas, nos 27 anos de dados, num mês qualquer, independentemente das disponibilidades de cada reservatório.

Uma vez que a presença desses valores “excêntricos” foi notada apenas nos meses de setembro a dezembro, optou-se por continuar a aplicação de regressões simples e múltiplas, ignorando a presença dos mesmos e assim foram obtidos os coeficientes das regressões descritos nas tabelas a seguir. Para melhor se entender o significado das mesmas, é importante verificar que o valor da descarga a ser operada em cada reservatório é obtido das seguintes relações:

$$Desc_{Sam,i} = CoefA_{Sam,i} + CoefB_{Sam,i} \times Disp_{Sam} + CoefC_{Sam,i} \times Disp_{Pen} + CoefD_{Sam,i} \times Disp_{Cax} \quad 4.2$$

$$Desc_{Pen,i} = CoefA_{Pen,i} + CoefB_{Pen,i} \times Disp_{Sam} + CoefC_{Pen,i} \times Disp_{Pen} + CoefD_{Pen,i} \times Disp_{Cax} \quad 4.3$$

$$Desc_{Cax,i} = CoefA_{Cax,i} + CoefB_{Cax,i} \times Disp_{Sam} + CoefC_{Cax,i} \times Disp_{Pen} + CoefD_{Cax,i} \times Disp_{Cax} \quad 4.4$$

Onde:

$Desc_{Sam,i}$ ,  $Desc_{Pen,i}$  e  $Desc_{Cax,i}$  são as descargas a serem operadas pelos reservatórios General Sampaio, Pentecoste e Caxitoré, respectivamente, no mês  $i$ .

$Disp_{Sam}$ ,  $Disp_{Pen}$ , e  $Disp_{Cax}$  são as disponibilidades hídricas mensais dos reservatórios General Sampaio, Pentecoste e Caxitoré, respectivamente.

$CoefA_{Sam,i}$ ,  $CoefA_{Pen,i}$  e  $CoefA_{Cax,i}$  são os termos independentes, para cada mês  $i$ , das regressões (simples ou múltipla) que determinam os valores das descargas mensais a serem operadas nos reservatórios General Sampaio, Pentecoste e Caxitoré, respectivamente. Seu valor é necessariamente nulo quando se admitiu uma regressão sem interceptação no eixo da variável dependente (A descarga de cada reservatório).

$CoefB_{Sam,i}$  é o coeficiente multiplicador, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal do reservatório General Sampaio para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do próprio reservatório. Seu valor é sempre não-nulo.

$CoefC_{Sam,i}$  e  $CoefD_{Sam,i}$  são os coeficientes multiplicadores, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal dos reservatórios Pentecoste e Caxitoré, respectivamente, para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do reservatório General Sampaio. Seus valores são necessariamente nulos ao se tratar da regressão simples.

$CoefC_{Pen,i}$  é o coeficiente multiplicador, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal do reservatório Pentecoste para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do próprio reservatório. Seu valor é sempre não-nulo.

$CoefB_{Pen,i}$  e  $CoefD_{Pen,i}$  são os coeficientes multiplicadores, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal dos reservatórios General Sampaio e Caxitoré, respectivamente, para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do reservatório Pentecoste. Seus valores são necessariamente nulos ao se tratar da regressão simples.

$CoefD_{Cax,i}$  é o coeficiente multiplicador, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal do reservatório Caxitoré para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do próprio reservatório. Seu valor é sempre não-nulo.

$CoefB_{Cax,i}$  e  $CoefC_{Cax,i}$  são os coeficientes multiplicadores, para o mês  $i$ , da disponibilidade hídrica mensal dos reservatórios General Sampaio e Pentecoste, respectivamente, para a regressão (simples ou múltipla) que determina o valor da descarga do reservatório Caxitoré. Seus valores são necessariamente nulos ao se tratar da regressão simples.

O resultado das regressões, obtidas através do programa STATISTICA, está relacionado nas tabelas 4.51 a 4.56, nas quais os valores destacados significam que o software os considerou mais significativos.

**Tabela 4.51: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório General Sampaio.**

	Com interceptação no eixo das coordenadas				Sem interceptação no eixo das coordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	3998049,64	0,003184	0	0	0	0,027038	0	0
Fev	9356458,14	0,098467	0	0	0	0,157416	0	0
Mar	-35930844,03	0,860613	0	0	0	0,735948	0	0
Abr	-78446492,32	1,018875	0	0	0	0,742086	0	0
Mai	-1977947,71	0,299582	0	0	0	0,289269	0	0
Jun	4322932,63	0,004219	0	0	0	0,027997	0	0
Jul	5538050,80	0,003678	0	0	0	0,034668	0	0
Ago	7809843,95	-0,003845	0	0	0	0,040683	0	0
Set	5089611,81	0,004822	0	0	0	0,034232	0	0
Out	6858713,35	0,024041	0	0	0	0,064355	0	0
Nov	7887888,36	0,01623	0	0	0	0,063731	0	0
Dez	9016855,78	0,032101	0	0	0	0,086205	0	0

**Tabela 4.52: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório Pentecoste.**

	Com interceptação no eixo das coordenadas				Sem interceptação no eixo das coordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	3276492,10	0	0,059222	0	0	0	0,075388	0
Fev	5827138,68	0	-0,016438	0	0	0	0,012846	0
Mar	-35867314,33	0	0,737232	0	0	0	0,621917	0
Abr	-91444229,24	0	1,015935	0	0	0	0,807719	0
Mai	-26377280,20	0	0,305074	0	0	0	0,210157	0
Jun	2240824,42	0	0,001434	0	0	0	0,01136	0
Jul	5405667,07	0	-0,007358	0	0	0	0,017026	0
Ago	6964437,91	0	-0,008034	0	0	0	0,024014	0
Set	4883093,41	0	0,006674	0	0	0	0,029649	0
Out	7289070,43	0	-0,014363	0	0	0	0,021014	0
Nov	4713376,19	0	-0,007215	0	0	0	0,0157	0
Dez	4888856,53	0	0,000179	0	0	0	0,02403	0

**Tabela 4.53: Valores dos coeficientes para a regressão simples para determinação da descarga do reservatório Caxitoré.**

	Com interceptação no eixo das coordenadas				Sem interceptação no eixo das coordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	1455142,79	0	0	0,006256	0	0	0	0,021363
Fev	6486138,62	0	0	0,014527	0	0	0	0,08476
Mar	-18066709,08	0	0	0,688086	0	0	0	0,538623
Abr	-62909074,66	0	0	1,062451	0	0	0	0,730334
Mai	-4974351,68	0	0	0,135925	0	0	0	0,099382
Jun	3968806,56	0	0	-0,015433	0	0	0	0,015138
Jul	6163979,53	0	0	0,001789	0	0	0	0,049579
Ago	4238609,80	0	0	0,022792	0	0	0	0,057136
Set	2949581,56	0	0	0,061399	0	0	0	0,086805
Out	4899775,19	0	0	0,013301	0	0	0	0,059713
Nov	4541146,36	0	0	0,02709	0	0	0	0,072151
Dez	4479795,53	0	0	-0,018958	0	0	0	0,027666

**Tabela 4.54: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório General Sampaio.**

	Com intercepção no eixo das ordenadas				Sem intercepção no eixo das ordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	4943209,19	0,005387	-0,009293	-0,006148	0	0,013788	0,002987	0,020922
Fev	17444788,05	0,208717	0,028585	-0,331853	0	0,260948	0,077066	-0,248695
Mar	-36165359,22	0,8353	0,293153	-0,434243	0	0,822546	0,265841	-0,670451
Abr	-87379532,11	0,799267	0,25283	-0,02691	0	0,614536	0,271223	-0,28506
Mai	-9415094,75	0,414319	0,251529	-0,465685	0	0,391863	0,245091	-0,498232
Jun	6406776,42	0,015933	0,005916	-0,041705	0	0,025062	0,013963	-0,012096
Jul	4907885,58	0,016491	0,025929	-0,043556	0	0,024217	0,032966	-0,022344
Ago	8768943,45	0,007522	0,008389	-0,035185	0	0,024083	0,023255	-0,000242
Set	9425638,62	0,015294	-0,022434	-0,033555	0	0,032992	-0,005499	0,007798
Out	6098480,63	0,041339	0,02887	-0,052286	0	0,05136	0,040305	-0,020431
Nov	7409864,52	0,031214	0,020802	-0,040918	0	0,045093	0,036353	-0,002312
Dez	8564352,07	0,021353	-0,004645	0,028285	0	0,0391	0,016105	0,07134

**Tabela 4.55: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório Pentecoste.**

	Com intercepção no eixo das ordenadas				Sem intercepção no eixo das ordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	-1373486,66	0,158406	0,085141	-0,115514	0	0,156072	0,081729	-0,123036
Fev	7526830,65	-0,03771	-0,02528	0,02281	0	-0,015175	-0,004363	0,058694
Mar	-59442686,01	0,66429	0,53304	-0,62998	0	0,64333	0,48815	-1,01822
Abr	-155869333,17	0,40599	0,84598	0,17244	0	0,076465	0,878787	-0,288053
Mai	-30829656,54	0,31398	0,39653	-0,51621	0	0,24045	0,375448	-0,622788
Jun	1470800,69	0,01502	0,00406	-0,01225	0	0,017111	0,005912	-0,005448
Jul	4730713,26	0,01234	-0,00516	-0,00936	0	0,019789	0,001629	0,011087
Ago	6328995,41	0,00903	-0,00682	-0,00442	0	0,02098	0,00391	0,0208
Set	5437415,21	0,01793	0,01743	-0,0421	0	0,02814	0,02719	-0,01825
Out	7107126,61	-0,00252	-0,01618	0,00827	0	0,009162	-0,002855	0,045394
Nov	4934396,24	0,02127	0,00185	-0,04171	0	0,030514	0,012202	-0,015999
Dez	5137703,85	0,01753	0,00874	-0,03827	0	0,028181	0,021185	-0,012442

**Tabela 4.56: Valores dos coeficientes para a regressão múltipla para determinação da descarga do reservatório Caxitoré.**

	Com intercepção no eixo das ordenadas				Sem intercepção no eixo das ordenadas			
	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D	Coef A	Coef B	Coef C	Coef D
Jan	1178400,43	-0,01337	0,00796	0,01291	0	-0,011369	0,010889	0,019362
Fev	9770992,61	-0,09966	-0,04402	0,12874	0	-0,070407	-0,016869	0,17532
Mar	-21774392,13	0,14564	0,03126	0,40329	0	0,137965	0,01482	0,261077
Abr	-75451492,51	0,08256	0,10457	0,85636	0	-0,076952	0,120457	0,633446
Mai	-7651751,00	0,00932	0,08721	0,01609	0	-0,008935	0,081974	-0,010363
Jun	4812428,26	-0,01163	-0,01135	0,00466	0	-0,00477	-0,00531	0,026898
Jul	7694502,17	-0,02285	-0,02135	0,04041	0	-0,010733	-0,010313	0,073668
Ago	4692023,42	-0,01602	-0,00088	0,03641	0	-0,007161	0,007075	0,055106
Set	3339549,73	-0,03151	0,0069	0,08105	0	-0,025242	0,012901	0,095702
Out	5632133,20	-0,03437	-0,00825	0,05473	0	-0,025119	0,002307	0,084145
Nov	5694968,70	-0,04883	-0,01934	0,09312	0	-0,038159	-0,007392	0,122789
Dez	4668315,68	-0,03554	-0,00029	0,01777	0	-0,025866	0,011017	0,041242

#### 4.8.5 Simulação das regras operacionais obtida pelo processo de regressão simples e composta

Uma vez tendo sido obtido os valores dos coeficientes das correlações entre as descargas dos reservatórios e as suas disponibilidades, estes se configuram nos parâmetros da regra operacional que indica os valores de descargas que devem ser operadas mensalmente nos reservatórios. Estas, então, foram testadas via simulação, através do PROPARMOO.

Conforme descrito anteriormente, foram então compostas 4 regras operacionais para o conjunto dos três reservatórios estratégicos da bacia. Cada uma dessas regras é composta de 144 parâmetros (4 para cada mês, para cada reservatório) obtidos por correlação simples e múltipla, entre os valores de descarga e os armazenamentos (estes somados às afluições a cada reservatório), de cada mês do ano, obtidos pela resolução do modelo de PL.

Na simulação das regras operacionais, conforme já mencionado, efetua-se a verificação do déficit hídrico de toda a bacia a ser atendido em cada mês. A responsabilidade de atendimento desse déficit é distribuída entre os três reservatórios de acordo com os seus armazenamentos mensais. Para a descarga a ser efetuada, em cada reservatório, adota-se o menor valor entre a descarga calculada pela regra da regressão e a parcela do déficit a ser atendido por cada reservatório. Uma vez que a descarga, a ser operada, seja menor que a descarga necessária para satisfazer os déficits hídricos da bacia, o conjunto de 4 regras operacionais se transforma em 8 regras, de acordo com a maneira que se distribui o racionamento na descarga a ser operada. Metade destas confirma as demandas planejadas e aplica o método RACIONA, interno ao PROPAGARMOO, quando necessário. A outra metade calcula o racionamento efetuado na descarga operada por determinado reservatório e o aplica ao somatório das demandas em cada PC ao longo da bacia. Finalmente, atende às demandas, em cada PC, de acordo com suas prioridades.

Os valores das funções objetivo, que avaliam o desempenho do sistema, foram então calculados durante o processo de simulação e os seus valores encontram-se na tabela 4.58. Nela cabe salientar que a seqüência de 4 dígitos na segunda coluna tem o seguinte significado (tabela 4.57):

**Tabela 4.57: Significado dos dígitos referentes a cada regra operacional.**

Dígitos	Regra Operacional
0B00	A descarga em cada reservatório é obtida em função apenas da sua própria disponibilidade, e a função que a determina foi obtida por regressão simples e sem interceptação do eixo da variável dependente.
0BCD	A descarga em cada reservatório é obtida em função da sua própria disponibilidade e dos demais reservatórios, e a função que a determina foi obtida por regressão múltipla e sem interceptação do eixo da variável dependente.
AB00	A descarga em cada reservatório é obtida em função apenas da sua própria disponibilidade, e a função que a determina foi obtida por regressão simples e com interceptação do eixo da variável dependente.
ABCD	A descarga em cada reservatório é obtida em função da sua própria disponibilidade e dos demais reservatórios, e a função que a determina foi obtida por regressão múltipla e com interceptação do eixo da variável dependente.

**Tabela 4.58: Valores das funções objetivo para a simulação das regras obtidas por regressão onde a descarga de cada reservatório é função da disponibilidade própria ou do sistema.**

Regra Operacional obtida através de regressão onde $Desc = f(Disp)$		FO1	FO2	FO3
Sem distribuir previamente o racionamento efetuado	0B00	6,839506	-32,6633	2,975952
	0BCD	6,740741	-31,519	3,300057
	AB00	8,052469	-32,3073	3,733425
	ABCD	8,447531	-34,1375	4,188285
Distribuindo previamente o racionamento efetuado	0B00	2,287037	-40,8165	4,102582
	0BCD	2,459877	-41,668	3,596371
	AB00	2,432099	-39,339	3,903567
	ABCD	2,675926	-39,1141	4,83536

A tabela 4.58 apresenta o seguinte resultado: a melhor regra operacional, segundo a função objetivo 1 (Probabilidade de falhas), é aquela efetuada de acordo com a regra operacional 0B00, distribuindo previamente o racionamento efetuado em determinado reservatório; já segundo a função objetivo 2 (Elasticidade), a melhor operação do sistema foi obtida utilizando a regra operacional 0BCD, também distribuindo previamente o racionamento efetuado em determinado reservatório; já para a função objetivo 3 (Vulnerabilidade) a melhor operação foi efetuada segundo a regra 0B00, sem distribuir previamente o racionamento efetuado na descarga de determinado reservatório.

## 4.9 Uma comparação entre os melhores resultados obtidos

Uma vez que um dos objetivos intermediários do presente trabalho foi comparar o desempenho do sistema de reservatórios, operados por regras operacionais obtidas pelos processos de otimização mono-objetivo, ora por procura direta, ora pela extração de regras operacionais do resultado de um modelo de programação linear, reuniram-se os valores das funções objetivo na tabela 4.59.

Uma primeira interpretação dos valores contidos nessa tabela nos indica que:

- O método que obteve o melhor desempenho do sistema, segundo a FO1, que representa a minimização da probabilidade de falhas, foi a simulação da regra padrão (processo sem parâmetros a otimizar);
- O método que obteve o melhor desempenho do sistema, segundo a FO2, que representa a maximização da elasticidade, foi a otimização da regra da curva guia com verificação de déficit, através de algoritmo genético mono-objetivo;
- O método que obteve o melhor desempenho do sistema, segundo a aptidão 3, que representa a minimização da vulnerabilidade, foi a otimização da regra padrão modificada, através de algoritmo genético mono-objetivo.

**Tabela 4.59: Valores das funções objetivo obtidas de acordo com o processo de obtenção das regras operacionais.**

Processo	Algoritmo	Regra Operacional		Função Objetivo Utilizada	FO1	FO2	FO3			
Otimização por procura direta	AGMono	Curva Guia Com Deficit		FO1	2,2685	-43,2536	4,4345			
				FO2	3,1235	<b>-45,0802</b>	6,5200			
				FO3	3,0432	-41,8248	3,7355			
		Curva Guia Sem Deficit		FO1	4,2438	-37,7466	6,3872			
				FO2	6,2160	-42,1461	7,6835			
				FO3	5,8086	-38,3925	3,7486			
		Padrão Modificada		FO1	4,0895	-34,7402	2,5960			
				FO2	7,8056	-38,6407	3,5463			
				FO3	8,8302	-31,0971	<b>2,5246</b>			
Regressão	Programação Linear	Descarga função da Disponibilida de Com DR	0B00	Somatório das demandas atendidas com pesos por prioridade	6,8395	-32,6633	2,9760			
			0BCD		6,7407	-31,5190	3,3001			
			AB00		8,0525	-32,3073	3,7334			
			ABCD		8,4475	-34,1375	4,1883			
		Descarga função da Disponibilida de Sem DR	0B00		2,2870	-40,8165	4,1026			
			0BCD		2,4599	-41,6680	3,5964			
			AB00		2,4321	-39,3390	3,9036			
			ABCD		2,6759	-39,1141	4,8354			
		Curva Guia Com Deft	Media		2,4167	-38,3493	2,9764			
			Media Geo		2,2747	-41,6556	2,9981			
			Media Har		2,2593	-42,6404	2,9482			
			Mediana		2,3241	-36,4691	3,4209			
		Curva Guia Sem Deft	Media		6,0401	-33,8348	7,3266			
			Media Geo		6,1728	-28,7751	6,5954			
			Media Har		7,0802	-27,4254	8,5516			
			Mediana		5,8611	-32,9638	6,6419			
		Simulação	-		Padrão		-	<b>0,9506</b>	-25,8999	5,1049

Se não levássemos em conta o resultado da simulação da regra padrão, através da tabela 4.59, verificaríamos que a otimização por procura direta seria superada pela extração de regras operacionais do resultado do modelo de PL apenas no que se refere à minimização da aptidão 1. A mesma foi um pouco melhor (valores 2,2593 e 2,2685) quando se utilizou a regra da curva guia com verificação de déficits e médias harmônicas dos armazenamentos mensais. Porém podemos verificar que, com relação às outras aptidões, o desempenho da otimização por AG mono objetivo foi bem melhor, de acordo com os valores obtidos: -42,6404 e -45,0802 no caso da FO2, e 2,9482 e 2,5246 no caso da FO3.

#### **4.10 Análise, nos PCs, dos resultados da otimização por procura direta, para cada função objetivo otimizada**

De acordo com os melhores resultados da técnica de otimização por procura direta, utilizando o algoritmo genético mono-objetivo para a obtenção de regras operacionais dos reservatórios, se efetuou a comparação dos valores dos índices de desempenho em cada PC, de acordo com as seguintes alternativas:

- RP: Simulação da propagação das vazões no sistema, com a operação dos reservatórios segundo a regra padrão;
- RMod: Simulação da propagação das vazões no sistema, com a operação dos reservatórios segundo a regra padrão modificada, com parâmetros otimizados por AG;
- CGCDef: Simulação da propagação das vazões no sistema, com a operação dos reservatórios segundo a curva guia com verificação de déficit, com parâmetros otimizados por AG;
- CGSDef: Simulação da propagação das vazões no sistema, com a operação dos reservatórios segundo a curva guia sem verificação de déficit, com parâmetros otimizados por AG;

Analisam-se então quais dessas alternativas seria a melhor de acordo com o índice utilizado. Essa análise é comentada nos itens a seguir.

#### 4.10.1 FO01 – Somatório das confiabilidades

Analisando apenas o resultado relativo ao índice de confiabilidade do atendimento a demandas primária e secundária o que se verifica, de acordo com as figuras 4.105 e 4.106, é que a melhor alternativa para a maximização da confiabilidade é a alternativa CGCDef.

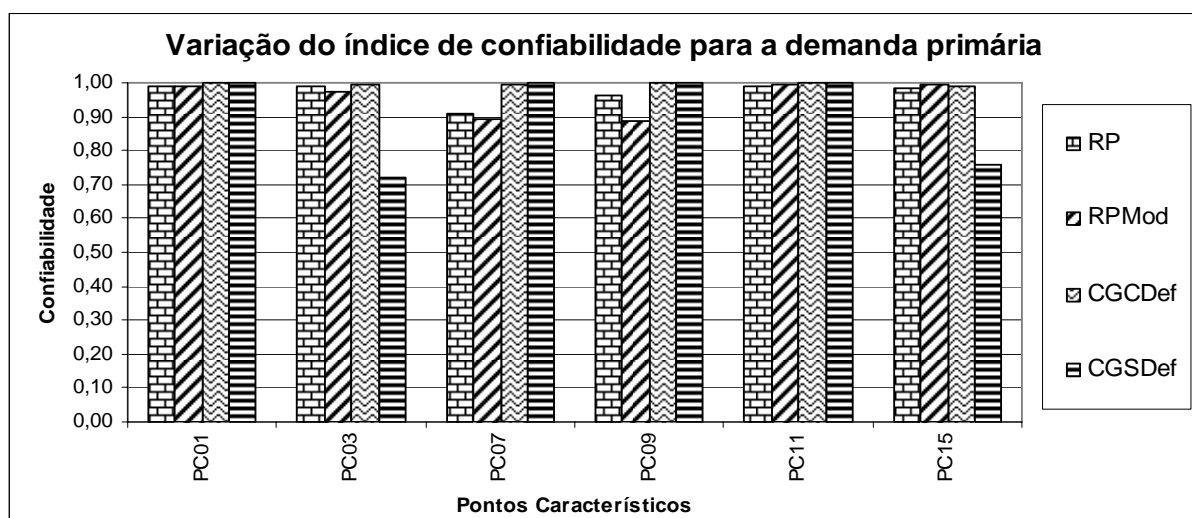


Figura 4.105: Variação do índice de confiabilidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.



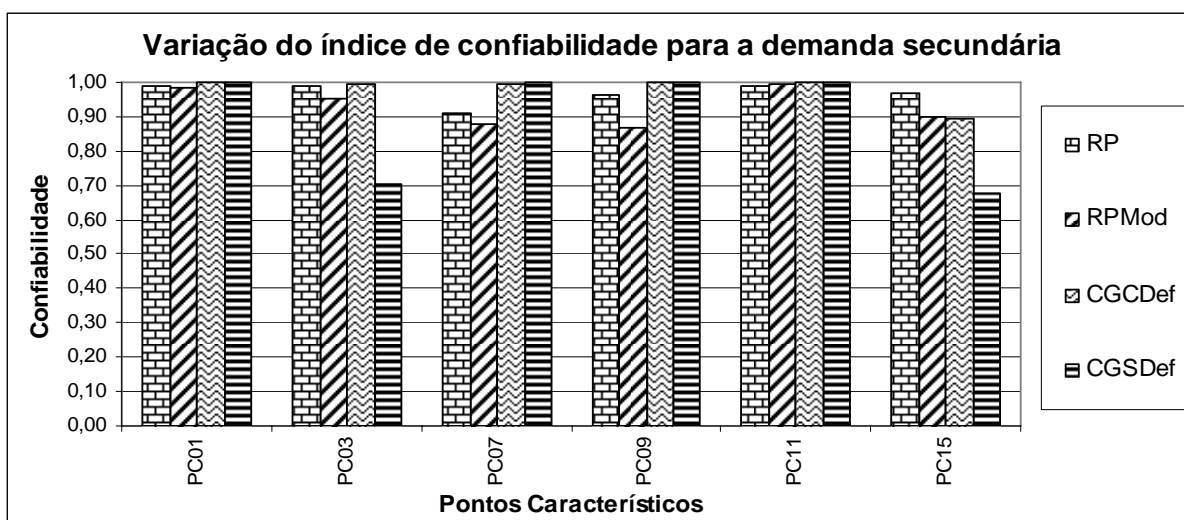


Figura 4.106: Variação do índice de confiabilidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

Já no caso dos índices de confiabilidade para a demanda terciária, destacados nas figuras 4.107 e 4.108, o que se percebe é que a aplicação da regra padrão seria a melhor solução.

Como, evidentemente, devemos priorizar o atendimento às demandas segundo a sua prioridade, verifica-se que, ao analisar o resultado da simulação das regras otimizadas, é a regra da Curva Guia com verificação de déficit que deve ser adotada na bacia, se o objetivo for aumentar a confiabilidade no atendimento às demandas.

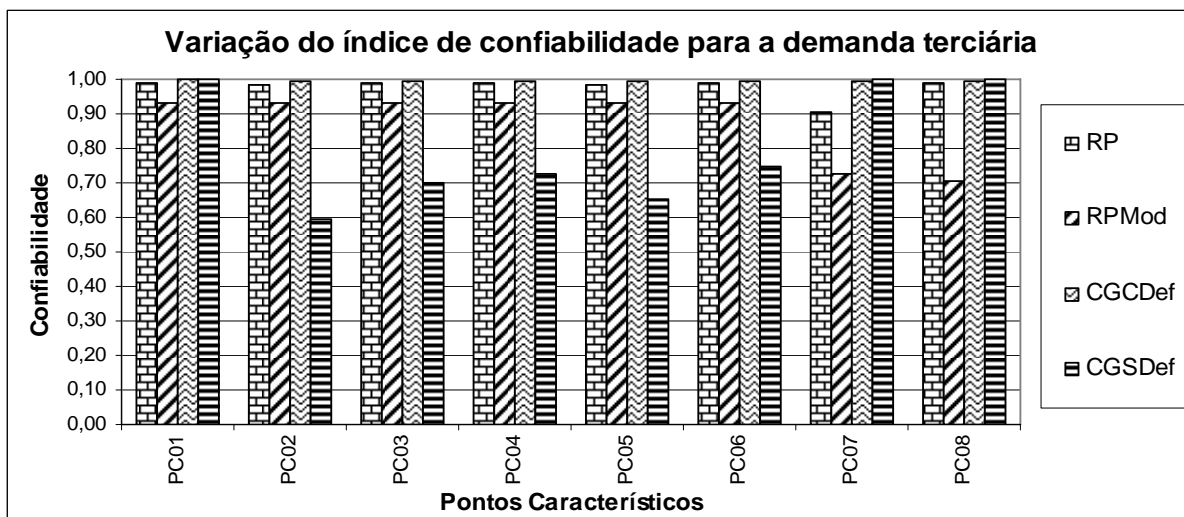


Figura 4.107: Variação do índice de confiabilidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

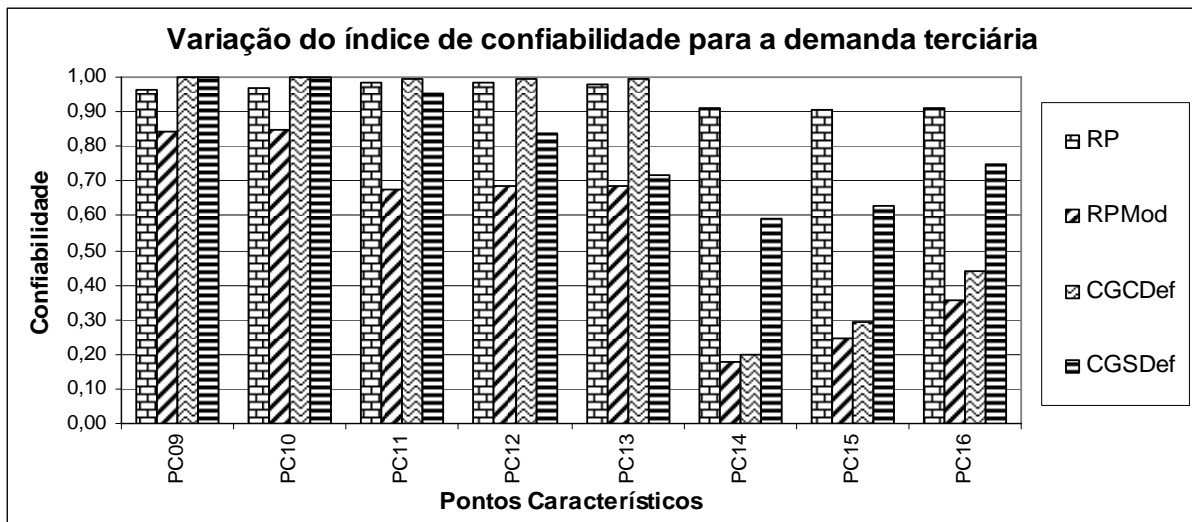


Figura 4.108: Variação do índice de confiabilidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

#### 4.10.2 FO02 – Somatório das elasticidades

No caso da análise do índice de elasticidade, quando essa é realizada de acordo com as prioridades de demanda, e em cada um dos PCs, o que se verifica é que a regra da Curva Guia com verificação de déficit, otimizada por AG mono-objetivo, foi a melhor para todas as prioridades, uma vez que essa opção é a que maximiza o índice de elasticidade para todas as prioridades de demanda. Essa avaliação é representada nas figuras 4.109 a 4.112.

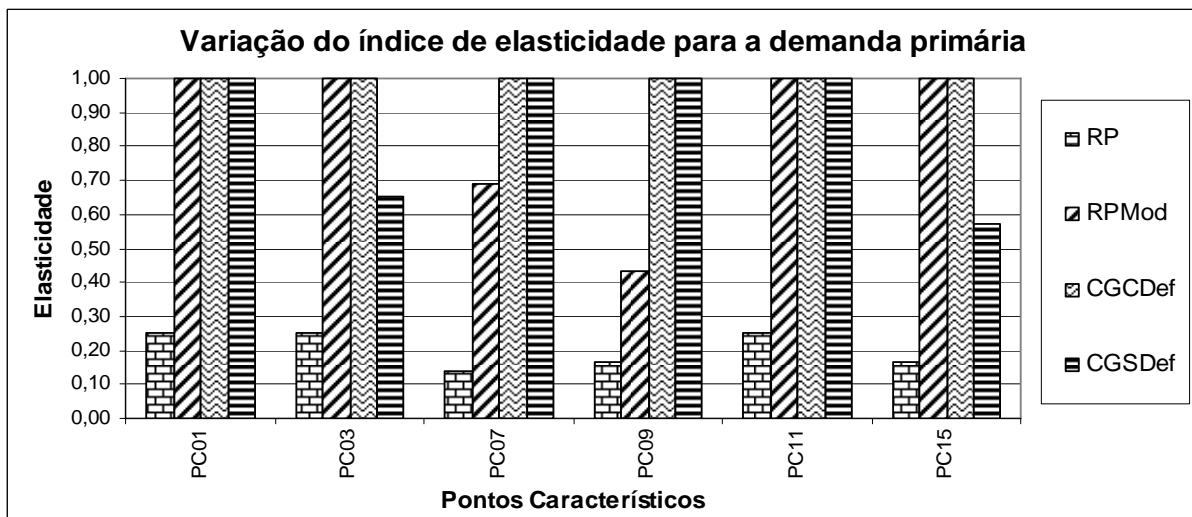


Figura 4.109: Variação do índice de elasticidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

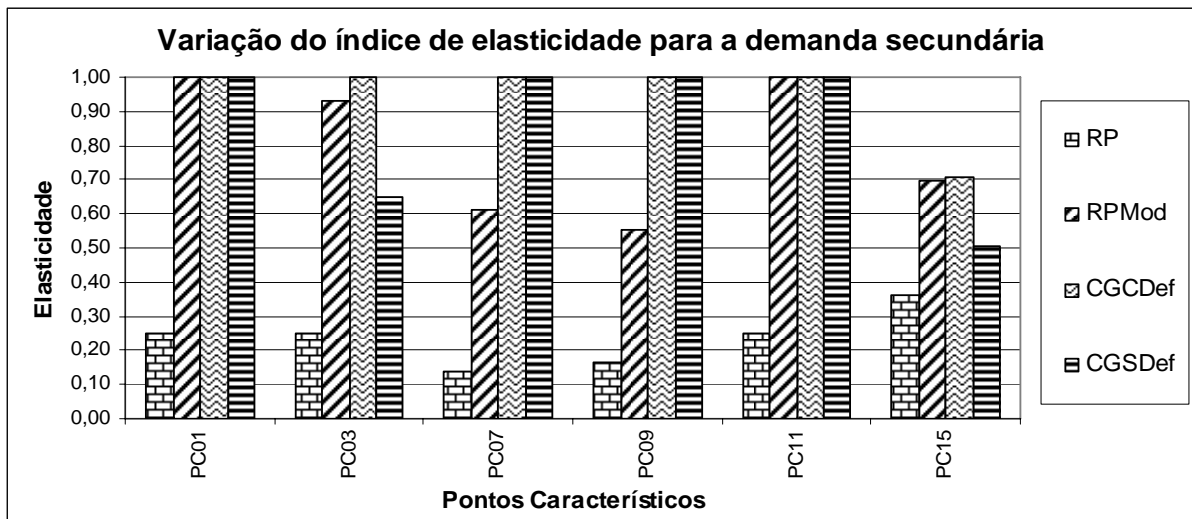


Figura 4.110: Variação do índice de elasticidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

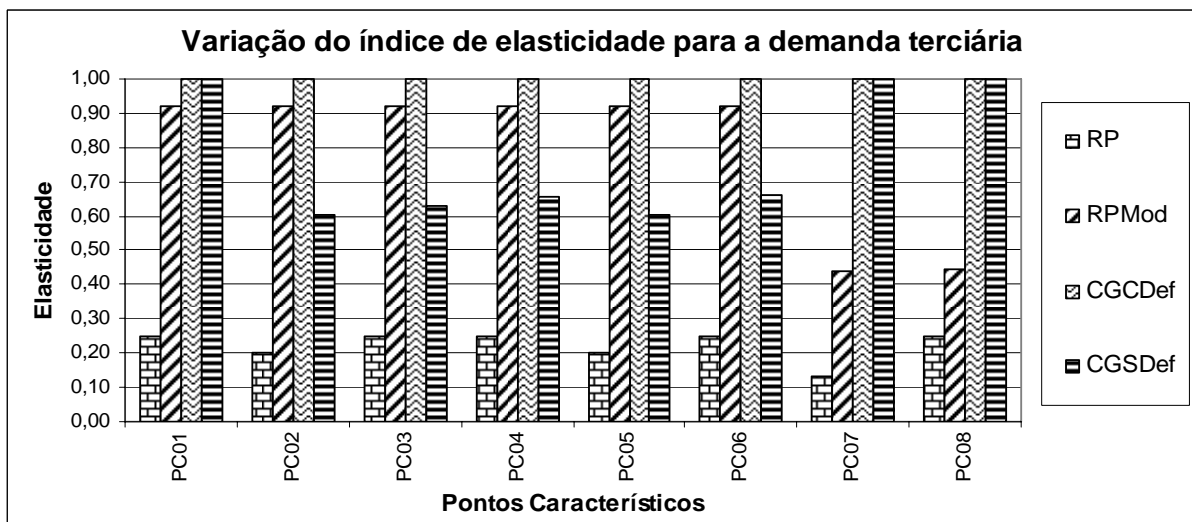


Figura 4.111: Variação do índice de elasticidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

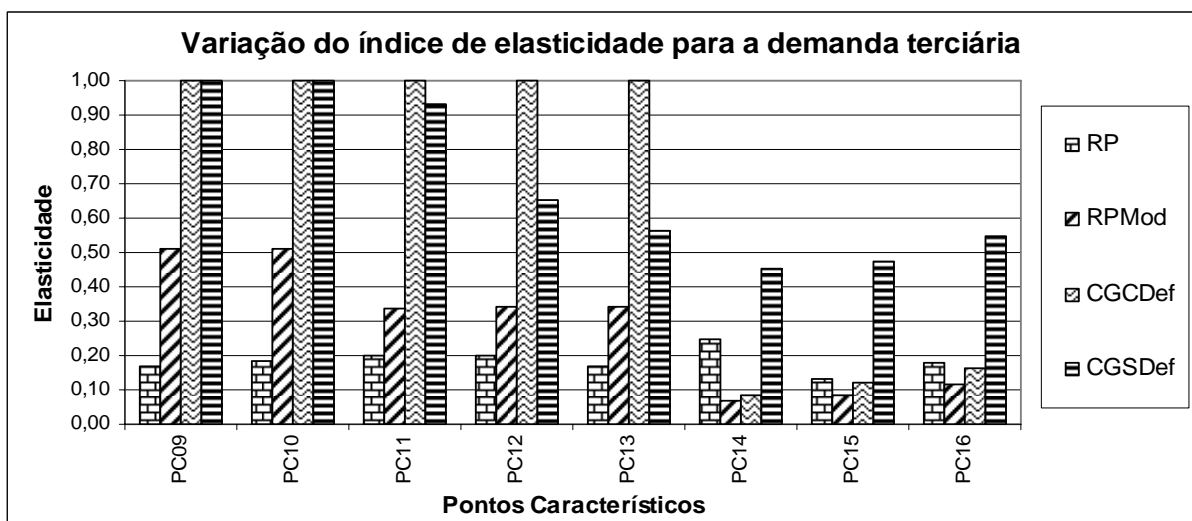


Figura 4.112: Variação do índice de elasticidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

### 4.10.3 FO03 – Somatório das vulnerabilidades

Finalmente, realizando a análise dos índices de vulnerabilidade de cada uma das prioridades de demanda e sabendo que o objetivo é a sua minimização, para as demandas primária e secundária, novamente a regra que deveria ser adotada é a regra da Curva Guia com verificação de déficit, otimizada por AG mono-objetivo. Esse resultado pode ser observado nas figuras 4.113 e 4.114.

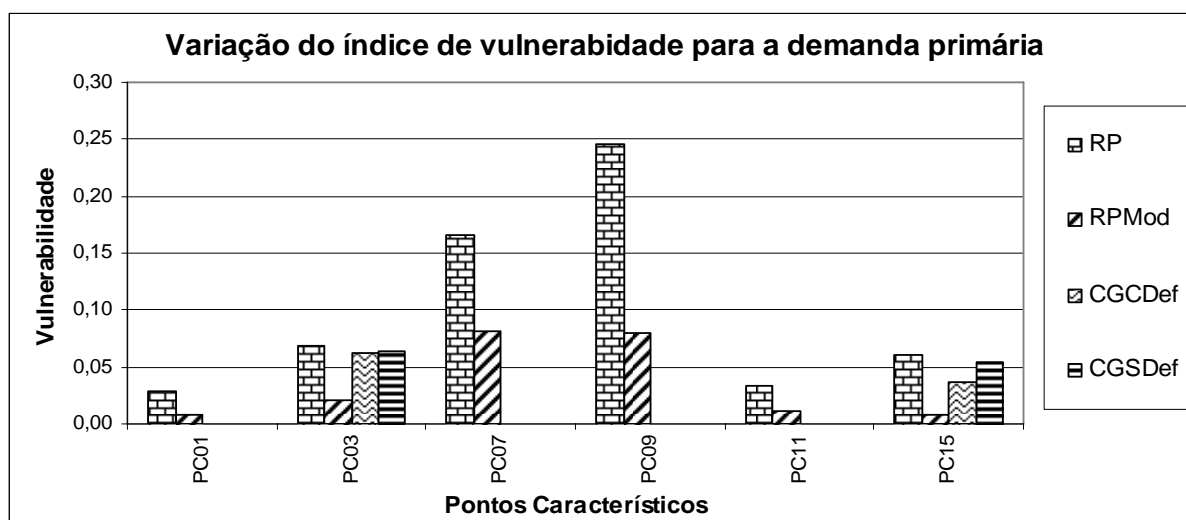


Figura 4.113: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda primária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

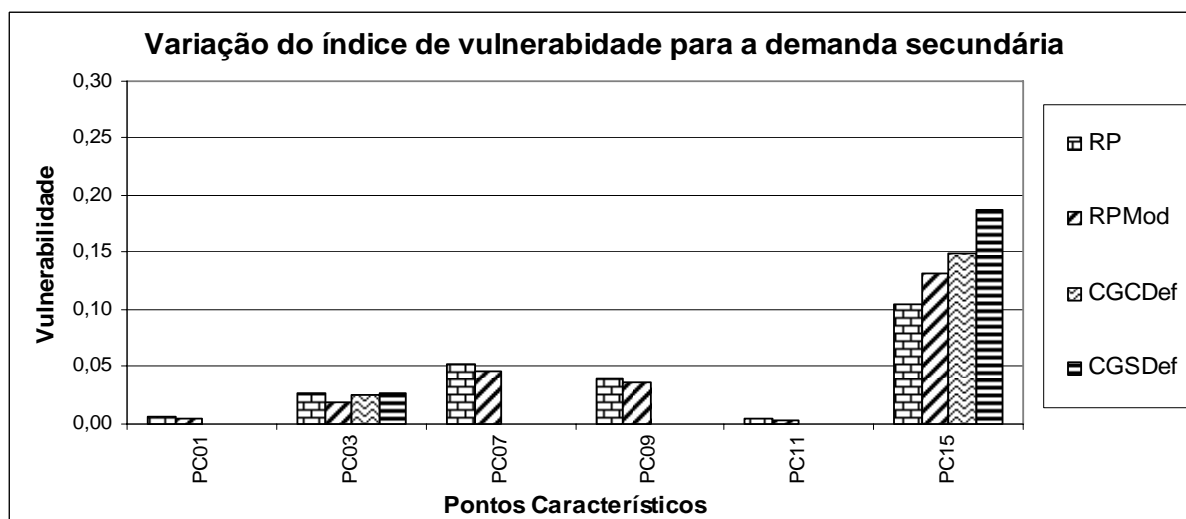


Figura 4.114: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda secundária, em cada PC, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

Já no caso da demanda terciária, é a regra padrão modificada, com parâmetros otimizados por AG que obtém os menores valores do índice de vulnerabilidade nos PCs, o que pode ser verificado nas figuras 4.115 a 4.116.

Como nessa análise em particular estão sendo consideradas principalmente as prioridades das demandas, é a regra da Curva Guia com verificação de déficit, otimizada por AG Mono-objetivo, que deveria ser adotada.

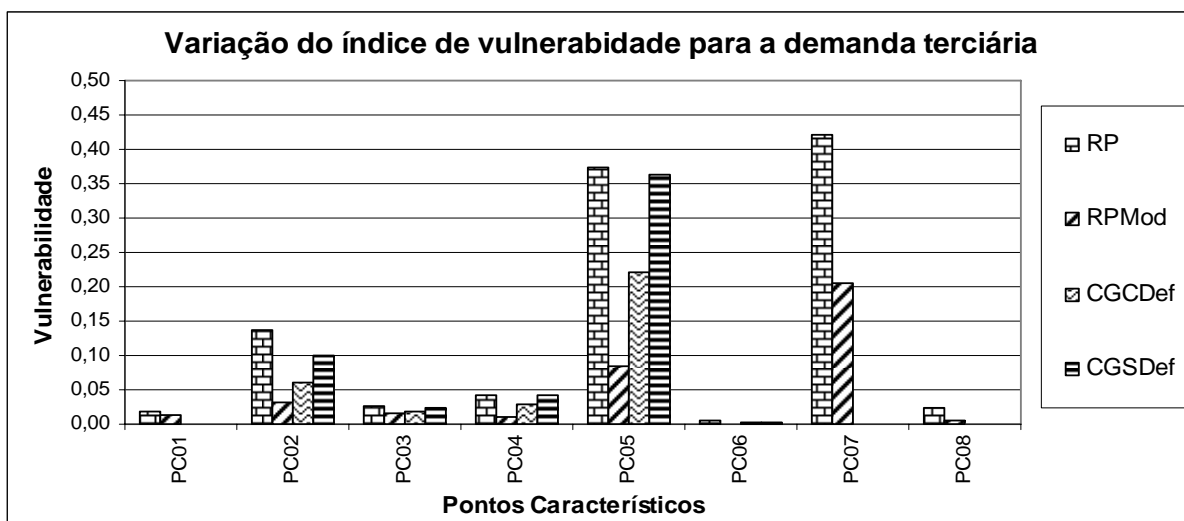


Figura 4.115: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda terciária, nos PCs 01 a 08, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

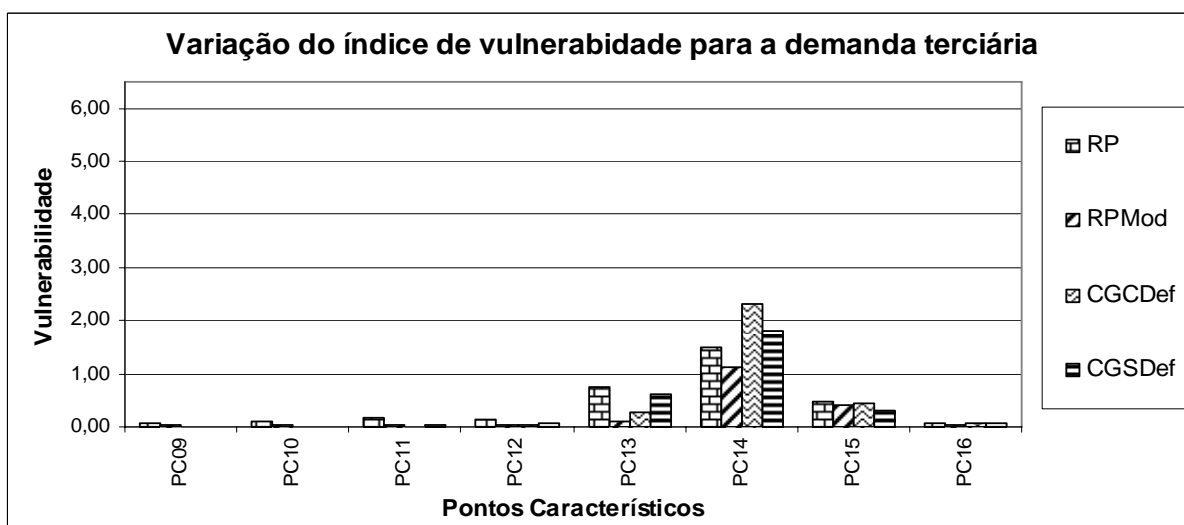


Figura 4.116: Variação do índice de vulnerabilidade para a demanda terciária, nos PCs 09 a 16, segundo cada alternativa de operação dos reservatórios.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste ponto do trabalho chega-se ao final com a pergunta a ser respondida: o trabalho apresentado atingiu os objetivos anteriormente enumerados?

No presente caso, o autor acredita que sim, pois se obteve desenvolvimento tecnológico no aprimoramento do PROPAGARMOO, melhorando ainda mais a sua aplicação como ferramenta a ser utilizada por gestores e por analistas nas tarefas relativas à gestão e ao planejamento de sistemas de recursos hídricos.

Nos itens a seguir serão esclarecidas todas as conclusões gerais e específicas que levam a corroborar os parágrafos precedentes.

### 5.1 Conclusões

A Modelagem Orientada a Objetos sem sombra de dúvidas se prestou apropriadamente à implementação dos algoritmos de otimização por procura direta – algoritmo genético mono objetivo e multi objetivo – e do editor de modelos de programação linear no modelo PROPAGARMOO. Este sendo constituinte do SAGBAH.

A aplicação das ferramentas implementadas na obtenção de regras ótimas de operação de um sistema de reservatórios, questão essa já incluída no denominado domínio da aplicação, mostrou o quanto um modelo de propagação de vazões, que utiliza a MOO, facilita o trabalho de um analista de recursos hídricos.

Salienta-se ainda que a utilização dessas ferramentas não se encerra no exemplo da aplicação, mas sim abre uma gama de outras possibilidades presentes na área de gestão e planejamento de recursos hídricos.

Nos parágrafos seguintes então serão listadas algumas conclusões intermediárias que emergiram de cada fase da aplicação deste trabalho.

Uma das primeiras conseqüências deste trabalho é que, ao implementar um editor de modelos de programação linear, no qual através de scripts na linguagem Pascal Script, se pode ler dados dos objetos definidos no projeto e em planilhas externas ao PROPAGARMOO, a montagem literal de função objetivo e restrições facilitou a compreensão e correção do modelo desejado. Num modelo literal de programação linear, as equações envolvidas são mais fáceis de se entender e se verificar se há algo incorreto.

Dessa forma, a inclusão do montador de arquivo no formato MPS passou a ter uma importância menor. Como já adiantamos no capítulo de aplicação, a única utilidade do

conversor de modelos literais para MPS, implementado no PROPAGARMOO, passou a se resumir na situação hipotética em que um analista de recursos hídricos conhecesse a sintaxe do software LINDO e preferisse utilizar outro software de resolução de PL. Salienta-se inclusive que o software LINDO é capaz de salvar um modelo literal de PL já compilado, no formato MPS.

A comparação entre o método de Rosenbrock e o AG SCE-UA demonstrou que esse último é superior na obtenção de regras operacionais ótimas para um sistema de reservatórios. Com relação ao Rosenbrock ficaram evidentes as suas fraquezas: o ótimo encontrado geralmente é local e não global, e a dificuldade do mesmo em lidar com um grande número de parâmetros.

Com respeito à utilização da técnica de propor uma regra operacional, parametrizá-la, otimizar os parâmetros através de algoritmos genéticos, esta se mostrou superior à extração de regras operacionais através do resultado de modelos de PL.

Embora o ótimo encontrado em um modelo de PL seja matematicamente global e não local, as simplificações necessárias para que restrições sejam lineares e os dados discretos de entrada e da saída do modelo podem não corresponder à realidade da aplicação. Assim, o resultado do modelo de PL atendeu ao objetivo representado pela função objetivo, ou seja, foram atendidas as demandas primárias e secundárias, em detrimento da demanda terciária, a única na qual houve falhas. Porém, ao tentar converter os valores das variáveis de decisão relativas às descargas e armazenamentos dos reservatórios em regras operacionais, não se obteve uma operação ótima em relação aos índices de desempenho utilizados e em comparação aos resultados obtidos por procura direta.

Salienta-se, contudo, que a PL foi superada pela otimização por procura direta no exemplo da aplicação deste trabalho, porém, quando se tratar de modelos com decisões binárias, essa ferramenta se mostrará poderosa. Sendo assim, o editor de modelos de PL implementado no PROPAGARMOO é muito útil, e provavelmente a melhor ferramenta a ser utilizada, se o objetivo da aplicação for o de definir qual a melhor configuração de reservatórios a serem construídos num sistema de recursos hídricos, ou ainda, qual a configuração de maior retorno econômico num sistema de irrigação sujeito a limitações de balanço hídrico ou de vazão ecológica, por exemplo.

Na montagem das funções objetivo, a não-inclusão de pesos para as prioridades de demanda se mostrou equivocada em relação a um dos objetivos propostos. Se o único objetivo fosse o de atender à ordem de prioridade das demandas, tanto espacialmente quanto temporalmente, os pesos deveriam ser adotados como o autor deste trabalho o fez na sua dissertação de mestrado (VIANNA JR., 1998). As regras operacionais otimizadas, com as

funções objetivo ponderadas por prioridade de demanda, levariam os reservatórios a serem operados de forma mais conservativa de maneira a atender às prioridades de demanda também temporalmente.

Essa conclusão está relacionada ao fato de que o planejamento das descargas dos reservatórios é controlado pela rotina de planejamento, implementada em Pascal Script, e é executada em cada intervalo discreto de simulação. O programador pode inserir comandos que efetuem uma consideração das prioridades em todos os PCs da bacia, mas será impraticável efetuar essa consideração em todos os intervalos de tempo de uma única vez. Em cada um dos PCs, a rotina interna *Raciona* do PROPAGARMOO efetua a consideração das prioridades.

Por outro lado, para avaliar o desempenho da operação de reservatórios num sistema de recursos hídricos, a não-adoção de pesos não prejudicou a confirmação de que índices de desempenho, como confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade, conduzem a regras operacionais distintas, mesmo quando não se adotam pesos para as prioridades de demanda.

Com respeito à utilização do algoritmo genético mono-objetivo SCE-UA, pode-se concluir que o mesmo foi eficiente na obtenção dos valores dos parâmetros das regras operacionais para os reservatórios. Com a vantagem de utilizarem o valor real dos parâmetros, e não a manipulação do seu correspondente binário, e de manipular simultaneamente várias soluções, cada uma delas com um número grande de parâmetros.

Com relação à demora de convergência do algoritmo genético mono-objetivo, criaram-se mecanismos e condutas que levaram à obtenção de resultados ótimos com uma convicção de se tratar de ótimos globais e não-locais.

A utilização de funções objetivo, ou aptidões, montadas a partir dos índices de confiabilidade, elasticidade e vulnerabilidade, demonstrou a relevância dos mesmos, uma vez que representam objetivos conflitantes, porém um não menos importante que os demais.

No caso da convergência do AG multi objetivo implementado MOCOM-UA, que se mostrou por vezes impraticável, mecanismos e condutas, para obtenção de resultados parciais numa região de compromisso entre as três aptidões utilizadas, foram adotados com relativo sucesso, como se pode verificar nos itens do capítulo de aplicação e resultados.

Infelizmente não foi possível encontrar uma faixa de validade para os valores de regras ótimas otimizadas através do AG multi objetivo. A única regra que se aproximou de satisfazer essa possibilidade foi a regra da curva guia sem a consideração dos déficits hídricos.

Embora essa regra possa ser utilizada, a mesma teve a sua aplicação alterada para a verificação do déficit hídrico anteriormente à descarga dos reservatórios. Essa alteração levou à obtenção de uma regra operacional mais racional, evitando descargas de água desnecessárias



no sistema. A facilidade com essa alteração foi efetuada a partir da alteração do script utilizado só comprova o desempenho do modelo PROPAGARMOO.

Pode-se concluir ainda, através da análise dos resultados em cada um dos PCs, que a regra da curva guia com a consideração dos déficits deveria ser escolhida, para a melhora dos índices de desempenho, levando em conta a prioridade estabelecida para as demandas

Embora se chegue ao final do trabalho enumerando várias conclusões, algumas dúvidas também devem ser apresentadas, entre as quais se poderiam citar:

- Como a adoção de pesos afeta a operação dos reservatórios e o resultado dos índices de desempenho do sistema?

- Qual deveria ser a quantidade de indivíduos a serem utilizados para a otimização mono e multi objetivo?

- O que pode ser feito para melhorar a convergência dos algoritmos? Quais são os fatores intervenientes nesse processo?

Outra pergunta que particularmente interessa ao autor do presente trabalho é: qual o grau de conhecimento, ou de domínio, em programação orientada a objetos que o analista de sistema de recursos hídricos deve ter, para que a implementação de instrumentos de otimização em um SAD através da MOO se processe de forma mais rápida e eficiente?

Este trabalho mostra, enfim, que as vantagens básicas da MOO a saber: a administração da complexidade, o aumento de produtividade e a localização de mudanças, estiveram presentes não só no momento da implementação das ferramentas de otimização, como também na utilização das mesmas no exemplo de aplicação utilizado.

Ainda, que existem várias alternativas de formatação da regra operacional de um sistema de múltiplos reservatórios que atende a múltiplos usos. Elas podem ser usadas com maior ou menor eficiência para a otimização de diversas alternativas de funções-objetivo. Nenhuma das regras, funções objetivo ou índices de desempenho podem ser escolhidos a priori como mais indicados. Cada situação determinará as escolhas mais adequadas, sendo essas decisões de caráter político. O que fica evidenciado é que a abordagem implicitamente estocástica desenvolvida neste trabalho, pode ser utilizada para gerar as análises que subsidiarão as escolhas dos decisores. Especialmente, a técnica de otimização de regras operacionais pré-formadas, com o uso da otimização iterativa da simulação do sistema, permite alcançar eficiência computacional na derivação do ótimo sem comprometer a

representação do sistema, na sua complexidade característica de sistemas com múltiplos reservatórios e usos.

E finalmente, e não mais importante, a utilização de um SAD aplicado a recursos hídricos que disponha de ferramentas de otimização, aplicáveis a situações distintas, no caso especial o PROPAGARMOO, se configura num extraordinário auxílio a analistas de recursos hídricos e gestores que precisem lidar com a complexidade que a área exige.

## 5.2 Recomendações

Uma vez que a realização do trabalho gerou algumas conclusões e também suscitou algumas perguntas, devem-se enumerar as seguintes recomendações:

- Utilizar série de vazões geradas deterministicamente e sem interferência dos anos mais secos observados e série de vazões geradas por modelos estocásticos para avaliar as mudanças nas regras operacionais otimizadas;

- Para a utilização da metodologia fora do meio acadêmico, a atualização permanente dos dados necessários não deve ser negligenciada, o comitê de bacia deve ser consultado a respeito dos índices de desenvolvimento, prioridades adotadas para as demandas e seus pesos relativos;

- A utilização dessa metodologia deve ser acompanhada da adoção de outros instrumentos de gestão como outorga, cobrança e controle eficiente sobre a utilização dos recursos hídricos eficientes;

- Implementar no mesmo PROPAGARMOO o algoritmo MOSCEM-UA (SOROOSHIAN et alli., 2003) e comparar seus resultados com os outros dois algoritmos, com o objetivo de verificação de soluções ótimas e de melhor compromisso entre as aptidões escolhidas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMISIAL, R.A.; BARRIOS, A.G. 1986. **Modelos de simulación de lá operación de un embalse de usos múltiples**. Mérida: CIDIAT. 334p.
- ANDREU, J. 1993. Redes de Flujo y Aplicaciones. In: **Conceptos y métodos para la planificación hidrológica**. Barcelona: CIMNE. Cap 17, p.203-225.
- ARSHAM, H. 2001. **Applied Management Science: Making Good Strategic Decision**. Disponível em: <http://ubmail.ubalt.edu/~harsham/opre640/opre640.htm>. Acesso em: 10 dez. 2001.
- AZEVEDO, L.G.T.; PORTO, R.L.L.; ZAHED FILHO, K. 1997. Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo. In: PORTO, R.L.L. (Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Cap. 4, p. 165-227.
- BARBOSA, P.S.F. 1997. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: PORTO, R.L.L. (Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Cap. 3, p. 97-163.
- BARTH, F.T. 1987. Fundamentos para a gestão dos recursos hídricos. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Cap. 1, p. 1-91.
- BAZARAA, M.S.; JARVIS, J.J.; SHERALI, H.D. 1977. **Linear Programming and Network Flows**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons. 684p.
- BORGES, R.C.M. ; SOUZA, H.S.P.V. 1996 **Modelagem Orientada à Objetos e Hiperdocumentos**. Porto Alegre: Instituto de Informática/UFRGS. fl. n. 3078.
- BRASIL. 1997. Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 jan. 1997.
- CARLSSON, C. 2002. DSS: directions for the next decade. **Decision Support Systems**. n. 929. Elsevier. Artigo não publicado. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em 31 jan. 2002.
- CHUNG, F.I.; ARCHER, M.C.; DEVRIES, J.J. 1989. Network flow algorithm applied to California Aqueduct Simulation. **Journal of Water Resource Planning and Management**, New York, vol. 115, n. 2, p. 131-147, Mar.

- COAD, P.; YOURDON, E. 1992. **Análise Baseada em Objetos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus. 225p.
- COAD, P.; YOURDON, E. 1993. **Projeto Baseado em Objetos**. Rio de Janeiro: Editora Campus. 195p.
- DINIZ, L. S. 1999. **Calibração de modelos hidrológicos**. In: Galvão, C. O.; Valença, M. J. S. 1999 *Sistemas inteligentes*. Porto Alegre: Editora da Universidade da UFRGS – ABRH.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1992 Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research** Vol. 28 No. 4. pp. 1015-1031.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1994 Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of Hydrology**, Vol 158 pp. 265-284.
- DUNN, S.M.; MACKAY, R.; ADAMS, R.; OGLETHORPE, D.R. 1996. The hydrological component of the NELUP decision support system: an appraisal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 177, n. 3/4, p 213-235, Apr.
- ENSSLIN, S. 1995 **A Estruturação no Processo Decisório de Problemas Multicritérios Complexos**. 117f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.
- GOLDBERG, D.E. 1989 **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Ed. Addison-Wesley, 412p.
- GRIGG, N.S. 1985. **Water Resources Planning**. New York: McGraw-Hill. 328p.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.R.; LOUCKS, D.P. 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resource Research**, Washington, v. 18, n. 1, p. 14-20, Feb.
- JOHNSON, L.E. 1986. Water Resource Management Decision Support Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 112, n. 3, p. 308-325, July.
- JONES, D.R.; BROWN, D. 2002. The division of labor between human and computer in the presence of decision support systems advice. **Decision Support Systems**: n. 953. Elsevier. Artigo não publicado. Disponível em <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 31 jan. 2002.
- LABADIE, J.W. 1987. **Otimização da Operação de Projetos Hidroagrícolas**. Brasília: Proni. 249p.

- LANNA, A.E.L. 1993. **Sistema de apoio ao gerenciamento de bacias hidrográficas – SAGBAH**: informe geral, manual do usuário. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.
- LANNA, A.E.L. 1997. Introdução. In: PORTO, R.L.L.(Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. cap. 1, p.15-41.
- LANNA, A.E.L. 1999. Hidroeconomia. In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Org.). **Águas Doces do Brasil**. São Paulo: Escrituras. Cap. 16, p. 533-564.
- LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R.; HAITY, D.A. 1981. **Water resource systems planning and analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 559p.
- LOUCKS, D.P. 1992 Water resources systems models: their role in planning. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 3, p. 214-223.
- LUND, J.R.; FERREIRA, I. 1996. Operating rule optimization for Missouri River reservoir system. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 122, n. 4, p. 287-295.
- MEYER, B. 1997 **Object-oriented software construction**. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1254p.
- MEYER, B. 1988 **Object-oriented software construction**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 534p.
- MOHAN, S.; RAIPURE, D.M. 1992. Multiobjective analyses of multireservoir system. . **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118. n. 4, p. 356-370, July.
- O'LAOGHAIRE, D.T.; HIMMELBLAU, D.M. 1974. **Optimal Expansion of a Water Resources System**. New York: Academic Press. 273p.
- OLIVEIRA, J.A. 1995. **Otimização da operação de um sistema de reservatórios para irrigação e abastecimento urbano**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PILAR, J.V. 1998. **Otimização de um sistema de Recursos Hídricos sem Regularização**. Caso analisado: bacia do Rio Paracatu. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- PORTO, R.L.L.; AZEVEDO, L.G.T. 1997. Sistema de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R.L.L.(Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. cap. 2, p. 43-95.
- PUCCINI, A. de L. 1977 **Introdução à Programação Linear**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 252p.
- REBOUÇAS, A. da C. 1999 Água Doce no Mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Org.). **Águas Doces do Brasil**. São Paulo: Escrituras. Cap. 1, p. 1-37.
- REINOSO, G. B. 1993. **Estudo Comparativo de Técnicas de Análise Orientada a Objetos**. Trabalho individual. Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Instituto de Informática/UFRGS. 93p.
- RUMBAUGH, J. et al. 1997. **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro: Campus. 654p.
- SANTANA, A.G. 1998. **Dimensionamento Ótimo de um Sistema de Recursos Hídricos de Grande Porte**. 137f. Dissertação ( Mestrado em engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SHEER, D.P.; ULRICH, T.J.; HOUCK, M.H. 1992. Managing lower Colorado River. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 3, p. 324-336, May.
- SIMONOVIC, S.P. 1992. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 3, p. 262-280. May.
- SMITH, D.N. 1991 **Concepts of Object-Oriented Programming**. New York: McGraw-Hill. 187p.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. 1995 Model calibration In: Singh, V. J. (editor) Computer models of watershed hydrology. **Water Resources Publications**, Highlands Ranch. 1130 p.
- SOROOSHIAN, S.,GUPTA, H.V. e YAPO, P.O. 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v 204, p. 83-97, Aug.
- SOROOSHIAN, S., et alli. 2003. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. . **Water Resource Research**, Washington, v. 39, n. 8, p. 1214-1223, Aug.
- SPRAGUE, R.H.Jr.; WATSON, H.J. 1991. **Sistemas de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: Campus, 498p.

- TAKAHASHI, T.; LIESENBERG, H.K.E.; XAVIER, D.T. 1990. **Programação Orientada a Objetos: Uma Visão Integrada do Paradigma de Objetos**. São Paulo: IME-USP, 355p.
- TAO, T.; LENOX, W.C. 1991. Reservoir operation by successive linear programming. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 117, n. 2, p. 274-281, Mar.
- TUCCI, C. E. M. 1998 **Modelos hidrológicos**. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 669 p.
- VALDES, J.B. et al. 1992. Aggregation-disaggregation approach to multireservoir operation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 118, n. 4, p. 423-444, July.
- VIANNA JUNIOR, W.P. 1998. **Operação Ótima do Sistema de Reservatórios da Bacia do Rio Curu - CE**. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VIEGAS FILHO, J. S. 1998. **Aplicação de Modelos de Redes de Fluxo aos Sistemas de Recursos Hídricos Através do Uso do Algoritmo de Otimização "Out-of-Kilter"**. 110f. Trabalho apresentado como parte dos requisitos para Exame de Qualificação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VIEGAS FILHO, J. S. 2000. **O Paradigma da Modelagem Orientada à Objetos Aplicado a Sistemas de Apoio à Decisão em Sistemas de Recursos Hídricos**. v.1. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VIEIRA NETO, J.F. 1991. **Dimensionamento ótimo do sistema de irrigação e barragens da bacia do rio Acaraú - Ceará**. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- WATANABE, M. et al. 2003. Modificação no Algoritmo Genético SCE-UA e sua aplicação a um Modelo Hidrossedimentológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 8, No. 1.
- WINBLAD, A.L.; EDWARDS, S.D.; KING, D.R. 1993. **Software Orientado ao Objeto**. São Paulo: Ed. Makron Books do Brasil. 314p.
- YEH, W. W-G. 1985. Reservoir management and operation models: a states-of-the-art review. **Water Resources Bulletin**. Washington, v. 21, n.12, p. 1797-1818.