



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS RODRIGUES PINTO

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO OS CUSTOS DE MANUTENÇÃO E DE IMPLANTAÇÃO

FORTALEZA

2014

MARCOS RODRIGUES PINTO

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO OS CUSTOS DE MANUTENÇÃO E DE IMPLANTAÇÃO

Tese apresentada ao curso de Doutorado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- P729d Pinto, Marcos Rodrigues.
Dimensionamento econômico de redes de distribuição de água considerando os custos de manutenção e de implantação / Marcos Rodrigues Pinto. – 2015.
133 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Recursos Hídricos.
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.
1. Recursos hídricos. 2. Saneamento básico. 3. Algoritmos. 4. Hidráulica computacional. I.
Título.

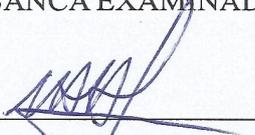
MARCOS RODRIGUES PINTO

DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO OS CUSTOS DE MANUTENÇÃO E DE IMPLANTAÇÃO

Tese apresentada ao curso de Doutorado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. Área de concentração: Recursos Hídricos.

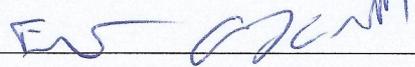
Aprovada em 04 / fevereiro / 2015.

BANCA EXAMINADORA

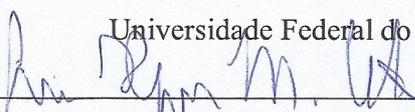


PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro (orientador)
Universidade Federal do Ceará

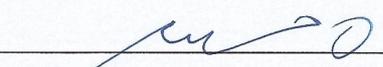
Prof. Dr. John Kennedy de Araújo
Universidade Federal do Ceará



Prof. Dr. Francisco Osny Enéas da Silva
Universidade Federal do Ceará



Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa
Universidade Vale do Acaraú – CE



Prof. DSc. Mariano da Franca
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – CE



Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará

A minha mãe, Raimunda Rodrigues Pinto.

O que dá certeza às matemáticas consiste muito menos nos procedimentos de cálculo que são usados nelas do que na evidência perfeita das ideias que lhes são empregadas e na ordem em que são encadeadas. (René Descartes, “Discurso do Método” - A filosofia e o seu método).

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Fortaleza – Fundação Edson Queiroz – que financiou parcialmente esta pesquisa durante doze meses.

Ao PhD Marco Aurélio Holanda de Castro, orientador deste trabalho.

Aos Dr. John Kennedy de Araújo, Dr. Francisco Osny Enéas da Silva, Dr. Luís Henrique Magalhães Costa, D.Sc. Mariano da Franca, Dr. Emerson Mariano da Silva, membros da banca examinadora.

Aos professores do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento Ambiental.

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica Computacional do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental e demais colegas do curso.

Ao corpo de servidores técnico-administrativos e aos trabalhadores terceirizados do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

A Universidade Federal do Ceará.

À Edelyne Nunes Diniz de Oliveira, pelo incentivo e companheirismo incondicional durante quase uma década.

RESUMO

Apresenta-se uma abordagem para o problema de otimização de projetos de redes de distribuição de água (RDA), considerando-se o custo de implantação (CI) e o custo de manutenção (CM) simultaneamente, aplicando-se um algoritmo multi-população e multi-objetivo. Uma RDA pode ser vista como um grafo cujas arestas são os condutos e os vértices são os nós. Escolher os diâmetros que tornam a rede mais econômica atendendo a restrições técnicas é um problema combinatório para o qual métodos diretos podem se tornar inviáveis ao se considerar números crescentes de trechos. O problema de otimização abordado consiste em minimizar simultaneamente CI e CM de uma RDA, considerando para isso o custo dos condutos de acordo com seus diâmetros e comprimentos. Para proceder a otimização foi desenvolvido o algoritmo evolucionário (AE) híbrido *Multi-Island Niched-Pareto Genetic Algorithm* (MINPGA), resultado da junção adaptada de um algoritmo multi-população, o MIIGA, a outro algoritmo multi-objetivo baseado em Nicho de Pareto, o NPGA. Como simulador hidráulico foi utilizado o *Environment Protection Agency Network Engine Tool* (EPANET). O esquema *Optimization of Network By Evolutionary Algorithm* (ONEBEAR) foi desenvolvido e aplicado a três redes de tamanhos e traçados distintos, sendo uma delas com 666 trechos. Um programa computacional foi escrito para implementar o ONEBEAR, conectando o EPANET ao MINPGA, possibilitando assim otimização pretendida. Mostrou-se, além da importância de se considerar o custo de manutenção ao longo da vida útil de uma RDA, a viabilidade de abordar o problema de otimização multi-objetivo por meio de um AE multi-população. O esquema mostrou robustez e flexibilidade, resolvendo o problema de otimização tanto para redes ramificadas quanto para redes malhadas e com uma rede com 666 trechos. A frente de Pareto gerada para cada problema mostrou as soluções dominantes consideradas viáveis. A viabilidade das redes foi verificada quanto ao atendimento ao requisito técnico de pressão mínima por nó, calculada pelo EPANET. As redes de menor CI e de menor CM que atendem a pressão mínima são escolhidas pelo MINPGA como soluções.

Palavras-chave: Saneamento Básico. Hidráulica Computacional. Otimização Evolucionária.

ABSTRACT

We present an evolutive approach to optimization problem of a Water Distribution Network (WDN) design, considering the implantation cost (IC) and the maintenance cost (MC) simultaneously, using a multi-population and multi-objective algorithm. We could consider a WDN as a graph which edges are the pipes and vertices are the nodes. The choice of diameters that gives the most cheaper network within technical restrictions is a combinatory problem which could be infeasible to larger numbers of pipes. The optimization problem approached consists of simultaneously minimize IC and MC of a WDN, considering the cost of pipes by diameter and by length. To execute the optimization we develop the evolutionary algorithm (EA) Multi-Island Niche Pareto Genetic Algorithm (MINPGA) which is based on two algorithms: a multi-population algorithm, the MIIGA, and a multi-objective algorithm, the NPGA. As hydraulic engine we utilize the Environment Protection Agency's Network Engine Tool (EPANET). We develop the design Optimization of Network By Evolutionary Algorithm (ONEBEAR) and we applied him to three networks of different layout and size. We write a computer code to implement ONEBEAR, linking EPANET to MINPGA, so allowing the optimization. We showed, in addition, the relevance of consider the keeping cost throughout lifespan of a WDN, the viability of multi-objective approach by a multi-population EA. The scheme ONEBEAR is robust and flexible, since it solved optimization problem with branched or mesh network, and one with 666 pipes. The Pareto front is formed by dominant feasible solutions. The ONEBEAR verifies via EPANET the feasibility of a network with respect to minimal pressure in each node. The MINPGA takes as solution the network with minimal IC and MC that respects the minimal pressure imposed.

Key-words: Sanitation. Computational Hydraulics. Evolutionary Optimization.

Sumário

1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1.1. Gerais.....	20
1.1.2. Específicos.....	20
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1.1. Domínios Numéricos de Busca.....	27
2.1.2. Mutação Bit-Flip.....	29
2.1.3. Crossover Uniforme e n-ponto.....	30
2.1.4. Vetores Reais.....	30
2.1.5. Crossover Aritmético.....	31
2.1.6. Mutação Gaussiana e Uniforme.....	33
2.1.7. Domínios de Função de Busca.....	34
2.1.8. Inicialização da População.....	35
2.1.9. Operadores de Seleção.....	37
2.1.10. Torneio.....	37
2.1.11. Seleção Proporcional.....	38
2.1.12. Seleção via Ranking.....	38
2.1.13. Seleção Contínua.....	39
2.1.14. Seleção Manual.....	39
2.2. O Problema Multiobjetivo.....	39
2.3. Algoritmos MultiPopulação.....	42
2.4. Otimização de Redes de Distribuição de Água.....	45
2.4.1. Otimização Multiobjetivo de uma RDA.....	46
3 – METODOLOGIA.....	49
3.1. Funcionamento do Algoritmo MINPGA.....	49
3.2. Oriented Object Toolkit for EPANET – OOTEN.....	54
3.3. Codificação dos Diâmetros da Rede.....	54
3.4. Funções-Objetivo.....	57
3.5. Optimization of a NEtwork By Evolutionay Algorithm – ONEBEAR.....	59
4 – RESULTADOS.....	61
4.1. Rede Belém.....	61
4.2. Rede Açailândia.....	71
4.3. Rede Hanoi.....	78
5 – DISCUSSÃO.....	83
5.1. ONEBEAR.....	83
5.2. OOTEN e EPANET.....	83
5.3. MINPGA.....	84
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
6.1. Conclusões.....	87
6.2. Recomendações.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO 1 – Testes com Funções Analíticas.....	98
ANEXO 2 – Rede Açailândia.....	106
ANEXO 3 – Licenças dos Softwares.....	115
APÊNDICE A – EPANET.....	116
A.1. Environment Protection Agency's Network Engine Tool – EPANET.....	116
A.1.1. Característica Geral e Capacidade de Modelagem Hidráulica.....	116
A.1.2. Modelo de uma RDA.....	117
A.1.2.1. Nós.....	118

A.1.2.2. Reservatórios de Nivel Fixo (RNF).....	119
A.1.2.3. Reservatórios de Nivel Variado (RNV).....	119
A.1.2.4. Dispositivos Emissores do Tipo Orificio.....	120
A.1.2.5. Tubulações.....	121
APÊNDICE B – Exemplos de Algoritmos Multiobjetivo.....	124
B.1. Honey Bee Mating Optimization (HBMO).....	124
B.1.1. O Comportamento na Colmeia e o HBMO.....	124
B.1.2. O Funcionamento do HBMO.....	125
B.2. Particle Swarm Optimization (PSO).....	128
B.2.2. Funcionamento do PSO.....	129
APÊNDICE C – Exemplos de Algoritmos Multipopulação.....	131
C.1. Multi-population Cooperative Particle Swarm Optimizer (MCPSO).....	131
C.2. Multiple Hive Honey-Bee Mating Optimization (MHBMO).....	132

Lista de Quadros

Quadro 1- Pseudocódigo de um algoritmo evolucionário.....	27
Quadro 2- Pseudocódigo: função de decodificação Gray.....	29
Quadro 3- Seleção via ranking de 20 indivíduos.....	38
Quadro 4- pseudocódigo para a frente de Pareto.....	40
Quadro 5- Algoritmo MINPGA.....	50
Quadro 6- Codificação de Diâmetros.....	55
Quadro 7- Definição da Operação Soma (+) no Anel.....	56
Quadro 8- Definição da Operação Produto (X) no Anel.....	56
Quadro 9- Taxas de Quebra.....	59
Quadro 10- Parâmetros da rede Belém.....	62
Quadro 11 - Características do reservatório na rede Belém.....	62
Quadro 12 - Coordenadas dos nós na rede Belém.....	63
Quadro 13- Comprimentos dos trechos da rede Belém.....	65
Quadro 14 - Relatório do UFC4 para a rede Belém.....	66
Quadro 15- Três redes subótimas obtidas pelo processo de otimização ONEBEAR.....	70
Quadro 16- Custos das Redes 1, 2 e 3.....	70
Quadro 17 - Reservatório na rede Açailândia.....	71
Quadro 18- Custos de cinco redes sub-ótimas.....	78
Quadro 19 - Preços de por metro de comprimento conforme diâmetro (mm).....	79
Quadro 20 - Comprimento por trecho e demanda por nó da rede Hanoi.....	80
Quadro 21 - Resultados para a rede Hanoi.....	82
Quadro 22- Funções analíticas para testes.....	98
Quadro 23- Valores adotados para os parâmetros do MINPGA.....	99
Quadro 24 - Parâmetros da rede Açailândia.....	106
Quadro 25- Comprimento de cada trecho na rede Açailândia.....	109
Quadro 26- Trechos e diâmetros para a rede Açailândia.....	112
Quadro 27- Fórmulas para calcular a perda de carga contínua em escoamento sob pressão..	122
Quadro 28- Coeficientes das fórmulas de perda de carga em tubulações novas.....	123
Quadro 29- Características do HBMO.....	127
Quadro 30- Parâmetros do PSO.....	130
Quadro 31- Pseudocódigo do algoritmo MCPSO	132
Quadro 32- Pseudocódigo do algoritmo MHBMO.....	133

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação de fronteira entre AE e AG.....	18
Figura 2 - Diagrama com passos para objetivos específicos.....	21
Figura 3- Crossover 1-ponto.....	30
Figura 4- Crossover aritmético com um peso.....	32
Figura 5- Fecho convexo de três pais com um peso por pai.....	32
Figura 6- Distribuição Gaussiana para $N(0,1)$	33
Figura 7- α como função decrescente do número de gerações.....	34
Figura 8- Operares de mutação para codificação de função.....	35
Figura 9- Tipos de inicialização de população.....	36
Figura 10- Dominância de Pareto.....	41
Figura 11- Exemplo de esquema para um algoritmo multipopulação.....	44
Figura 12 - Sintuações possíveis e indesejáveis com raio fixo.....	51
Figura 13 - Troca de soluções entre entre ilhas.....	52
Figura 14 - Esquema do MINPGA.....	53
Figura 15 - Associação de preços e de taxas de quebra aos diâmetros.....	59
Figura 16 - Esquema ONEBEAR.....	60
Figura 17- Traçado da Rede Belém.....	64
Figura 18 - Convergência UFC4 quanto ao CM.....	67
Figura 19 - Parâmetros utilizados no UFC4.....	68
Figura 20- Soluções para CI (R\$) versus CM (R\$) para a Rede Belém.....	69
Figura 21- Traçado da Rede Açailândia (primeira parte).....	72
Figura 22 - Convergência no UFC4 para Açailândia.....	76
Figura 23- Resultado da Otimização de CI (R\$) versus CM (R\$) para a Rede Açailândia.....	77
Figura 24 - Rede Hanoi.....	81
Figura 25- Frente de Pareto para FO1 x FO2.....	99
Figura 26- Formação da frente de Pareto com FO1xFO3.....	100
Figura 27- Frente de Pareto com FO2xFO4.....	100
Figura 28- Formação da frente de Pareto FO1 versus FO4.....	101
Figura 29- Rede simples com 11 trechos.....	102
Figura 30- As soluções mais próximas dos eixos CM e CI compondo a frente de Pareto.....	103
Figura 31- Obejtivos não conflitantes, custo vertical maior que o horizontal.....	104
Figura 32- ilustração de modelo de um SDA no EPANET.....	118

ABREVIATURAS

AE – Algoritmo Evolucionário.

AG – Algoritmo Genético.

CI – Custo de Implantação.

c.q.d. - como se queria demonstrar.

CM – Custo de Manutenção.

EPANET – *Environment Protection Agency Network Engine Tool*.

LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento.

LENHSNET – programa de dimensionamento otimizado de RDA do LENHS.

MINPGA – *Multi-Island Niche Pareto Genetic Algorithm*.

ONEBEAR – *Optimization of a Network By Evolutionary Algorithm*.

OOTEN – *Oriented-Object Toolkit for EPANET*.

PG – Programação Genética.

POO – Programação Orientada a Objeto.

RDA – Rede de Distribuição de Água.

UFC4 – Sistema de dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água.

LISTA DE SÍMBOLOS

\exists → Existe um, ou existe algum.

\in → Relação de pertinência.

\preceq → Dominância fraca.

$<$ → Dominância forte.

\forall → Para todo, ou para todos.

\leq → Menor ou igual.

\neq → Diferente.

f_i → Função objetivo.

FO → Função-Objetivo

I → Conjunto de índices.

P → Problema.

S → Solução.

1 – INTRODUÇÃO

Ao longo da história do Brasil, os problemas de saneamento básico sempre estiveram presentes, conforme pode ser observado em registros históricos ou mesmo literários, como no trecho seguinte:

A rua do Ouvidor contou diversas lojas de perfumarias, e por conseqüência devia ser a rua mais cheirosa, mais perfumada entre todas as da cidade do Rio de Janeiro.

(...)

Naquele tempo, porém, isto é, nos tempos do *Desmarais*, e ainda depois, a rua do Ouvidor era de noite, e principalmente das oito horas em diante, horrivelmente malcheirosa.

Época dos *tigres*.

Então o mais fétido e nauseabundo despejo das casas se fazia em *barris* não tampados que escravos e negros africanos do ganho levavam ao mar, e a *rua do Ouvidor*, de fácil e reta comunicação com a praia, era uma das mais freqüentadas pelos condutores dos repugnantes barris, das oito horas da noite até às dez. (MACEDO, 1820-1882, p. 139)

Usando as palavras de Abreu (2003, p. 1):

A literatura oitocentista, representada aqui pela obra de Macedo, oferece possibilidades de compreensão da dialética das transformações e das permanências históricas que ocorrem na cidade. Do ponto de vista metodológico não se trata de ver a literatura como “documento histórico” que possibilita dar conta do “real”, mas sim de como a estrutura interna da obra permite uma análise da estrutura histórica do Brasil do século XIX.

Atualmente, existem ainda no Brasil ruas em piores condições de saneamento que a rua do Ouvidor, descrita por Joaquim Manoel de Macedo, no século XIX.

Segundo Ferreira (2005), no ano de 1992, as precárias condições ambientais, o abastecimento de água insuficiente, e os sistemas de esgotos inadequados, foram os principais obstáculos ao controle da “epidemia de cólera” ocorrida no Nordeste, em particular, no Ceará.

As condições sanitárias no Ceará foram melhoradas a partir da segunda metade da década de 1990 e durante os anos 2000, com projetos implementados pela CAGECE, como o PROURB, o PRÓ-SANEAMENTO I, o PRÓ-SANEAMENTO II, o PRODETUR I, o PROJETO ALVORADA I, e o SANEAR II (FERREIRA, 2005).

Contudo, considerando o Índice de Desenvolvimento Social, IDS, 2010, o Ceará ocupa a 23ª posição, estando entre os estados com Médio-Baixo Desenvolvimento Social ($5 \geq \text{IDS} < 7,5$) (ALBUQUERQUE, 2011). Entre outros componentes, o IDS inclui a habitação, representada pelos subcomponentes disponibilidades domiciliares de água, energia elétrica, geladeira e televisão (idem).

No componente saúde do IDS, encontra-se o subcomponente mortalidade infantil (idem), a qual diminuiu no Ceará após as ações de saneamento da CAGECE (FERREIRA, 2005). Isso indica que o componente saúde tem ligação direta com o componente habitação do IDS. Sabendo que a meta do Brasil para 2025 é reduzir o índice de mortalidade infantil de 23/1000, em 2009, para 10/1000, índice máximo recomendado pela Organização Mundial de Saúde

(ALBUQUERQUE, 2010), pode-se concluir que as ações de saneamento básico passam a ter enorme relevância para a atingimento dessa meta.

O saneamento básico é definido como uma gama de medidas relacionadas principalmente a disponibilidade de água para consumo humano e ao esgotamento sanitário adequado, com o objetivo de resguardar o meio ambiente da poluição, assegurando a saúde e o bem-estar da sociedade (FERREIRA, 2005). Quanto a água para consumo humano, destacam-se três partes principais: captação, tratamento, e distribuição. A falha em qualquer dessas partes compromete seriamente as demais. Isto é, a simples captação não garante o suprimento ao consumo humano; por sua vez, o tratamento por si só de nada vale se não contar com uma rede capaz de distribuir a água tratada.

É importante lembrar que artigo 6º da Constituição Federal inclui a saúde como um direito social. Já a Lei nº 8.080/1990, em seu artigo 3º diz que “Os níveis de saúde expressam a organização social e econômica do País, tendo a saúde como determinantes e condicionantes, entre outros, a alimentação, a moradia, o **saneamento básico**, o meio ambiente, o trabalho, a renda, a educação, a atividade física, o transporte, o lazer e o acesso aos bens e serviços essenciais. (Redação dada pela Lei nº 12.864, de 2013)” (grifo do autor). Além disso, o inciso XX do artigo 21, atribui à União “instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, **saneamento básico** e transportes urbanos” (grifo do autor). E ainda, o inciso IX do artigo 23 atribui competência comum à União, aos Estados e Municípios “promover programas de construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais e de **saneamento básico** ” (grifo do autor).

Adicionalmente, um dos princípios a serem obedecidos pela Administração Pública, direta ou indireta, é o princípio da eficiência (CF, art. 37). Eficiência da Administração Pública é a necessidade de minimizar custos e maximizar a qualidade dos serviços, tendo o cidadão-cliente como beneficiário (PDRAE, 1995). Para isso a Administração Pública não pode ocupar-se apenas do curto prazo. Ela deve voltar-se para situações futuras, de médio e longo prazo, afim de melhorar as chances de que sua ação presente mostre resultados eficazes ao longo do tempo.

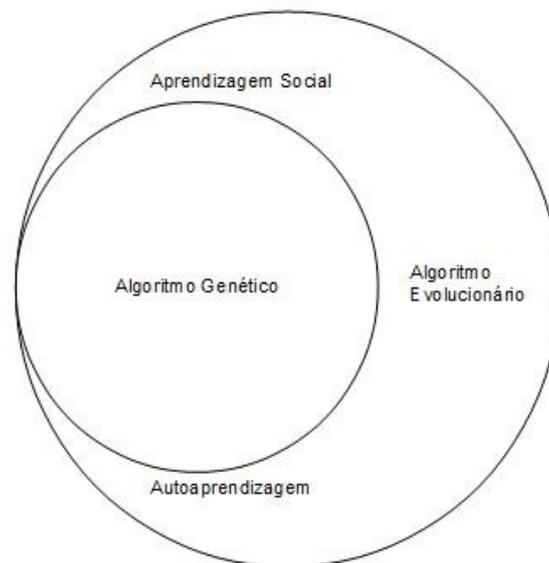
Considerando-se o que foi exposto, propõe-se uma metodologia de dimensionamento do projeto de Redes de Distribuição de Água, capaz de considerar não somente a minimização do custo de implantação (impacto a curto prazo), mas de considerar também o custo mínimo de manutenção (impacto a médio/longo prazo) da mesma rede ao longo de sua vida útil. A manutenção ora considerada diz respeito somente ao custo de substituições de condutos, bem como a implantação se refere ao custo dos condutos de acordo com os seus diâmetros.

Até a finalização deste trabalho, no Brasil, não havia abordagens de dimensionamento que levem em conta o custo de manutenção da rede ao longo de sua vida útil. As diversas

metodologias empregadas anteriormente tiveram como foco o custo de implantação. No setor público, isso é reflexo do contexto legal-institucional que dava ênfase ao preço em detrimento da qualidade, bem como atuava tão somente visando a efeitos de curto prazo em associação a uma postura reativa.

A metodologia empregada para atingir o objetivo do dimensionamento ótimo de redes de água consistirá em um algoritmo genético essencialmente multiobjetivo e multipopulação. Os algoritmos evolucionários são baseados no comportamento social dos seres vivos e na sua luta pela sobrevivência. Além da interação social, os algoritmos evolucionários promovem a interação genética dos indivíduos de cada grupo ou população. Os algoritmos genéticos são baseados na teoria da evolução dos seres vivos e promovem especialmente a interação genética dos indivíduos de cada população. Sendo assim, podem-se considerar os algoritmos genéticos como uma subclasse dos algoritmos evolucionários. Portanto, neste texto, a expressão algoritmo evolucionário inclui a expressão algoritmo genético. Uma representação gráfica é dada na figura 1.

Figura 1 - Representação de fronteira entre AE e AG



Fonte: autor.

Uma vez que o dimensionamento de redes se traduz em um problema combinatório, é importante frisar que o aumento da capacidade computacional por si não é capaz de resolver o problema do custo computacional de algoritmos do tipo força bruta. Se um problema combinatório com 666 termos combinados 9 a 9 fosse resolvido com um algoritmo força bruta, à velocidade de um nanossegundo por combinação, esse algoritmo levaria cerca de 22 séculos para terminar.

Como forma de mitigar o inconveniente do custo computacional associado aos

algoritmos evolucionários é empregada uma abordagem multipopulação, com a troca de informações entre indivíduos de populações diferentes distribuídas ao longo do espaço busca.

Um dos problemas enfrentados pelo algoritmo multiobjetivo é a decisão sobre soluções conflitantes. O emprego de nicho de Pareto¹ com raio fixo aparece como solução eficaz neste caso, com o inconveniente de permitir a inclusão mútua de soluções conflitantes dentro do raio de nicho, bem como a inclusão de uma mesma terceira solução por duas soluções em conflito. Para afastar essa possibilidade, criou-se o nicho de raio flexível, baseado na distância espacial entre as soluções envolvidas no conflito de dominância.

O fato de o algoritmo utilizado ser baseado em nicho de Pareto implica imediatamente no fato de não haver uma versão uniobjetivo do algoritmo para fazer uma comparação com outras abordagens de objetivo simples quanto aos resultados da otimização. Isso é bastante fácil de entender porque com apenas um objetivo não há que se falar em frente de Pareto, conseqüentemente, também não haverá nicho de Pareto.

No entanto, conforme pode ser observado na literatura especializada (HOLLAND, 1975; HORN et al., 1884; MICHALEWICZ et al., 1994; KENNEDY e EBERHART, 1995; MICHALEWICZ et al., 1997; COELLO, 1999; URSEM, 2003, e.g.), os algoritmos são validados aplicando-se funções analíticas cujos extremos sejam conhecidos. A comparação com resultados de outros algoritmos não tem como finalidade validar o algoritmo, mas apenas indicar se a aplicação de determinado algoritmo ao caso análogo representa alguma vantagem ou mitiga eventuais inconvenientes do outro.

O fato de incluir-se o custo de manutenção da rede conduz a diversos fatores além do campo da hidroinformática. Assim, este trabalho situa-se no campo da multi-disciplinaridade e da inter-disciplinaridade, mantendo, contudo, o foco na hidroinformática.

Portanto, pretende-se apresentar a nova abordagem de dimensionamento de redes utilizando-se de cenário hipotético e de dados retirados da literatura especializada.

Tendo em vista que em geral são os governos os responsáveis pelas ações de saneamento básico, e que a visão imediatista e a atitude reativa da administração pública tem sido gradativamente substituída por uma visão de médio e longo prazo, acompanhada por uma atitude próativa, inclusive na saúde pública, na qual cada vez mais se torna evidente que a prevenção de doenças é mais vantajosa do que o tratamento destas, o desenvolvimento de abordagens de dimensionamento de redes considerando os custos de manutenção ao longo do tempo útil do projeto representa uma contribuição de grande relevância, diretamente para a eficiência de projetos de saneamento, e indiretamente para a melhoria no nível de desenvolvimento social no Brasil.

1 Região do espaço de busca com soluções aninhadas de modo que não se tem clareza sobre a vencedora.

1.1. Objetivos

1.1.1. Gerais

Mostrar a importância de se considerar o custo de manutenção de projetos de redes de distribuição de água (RDA), e o impacto dessa consideração no custo de implantação.

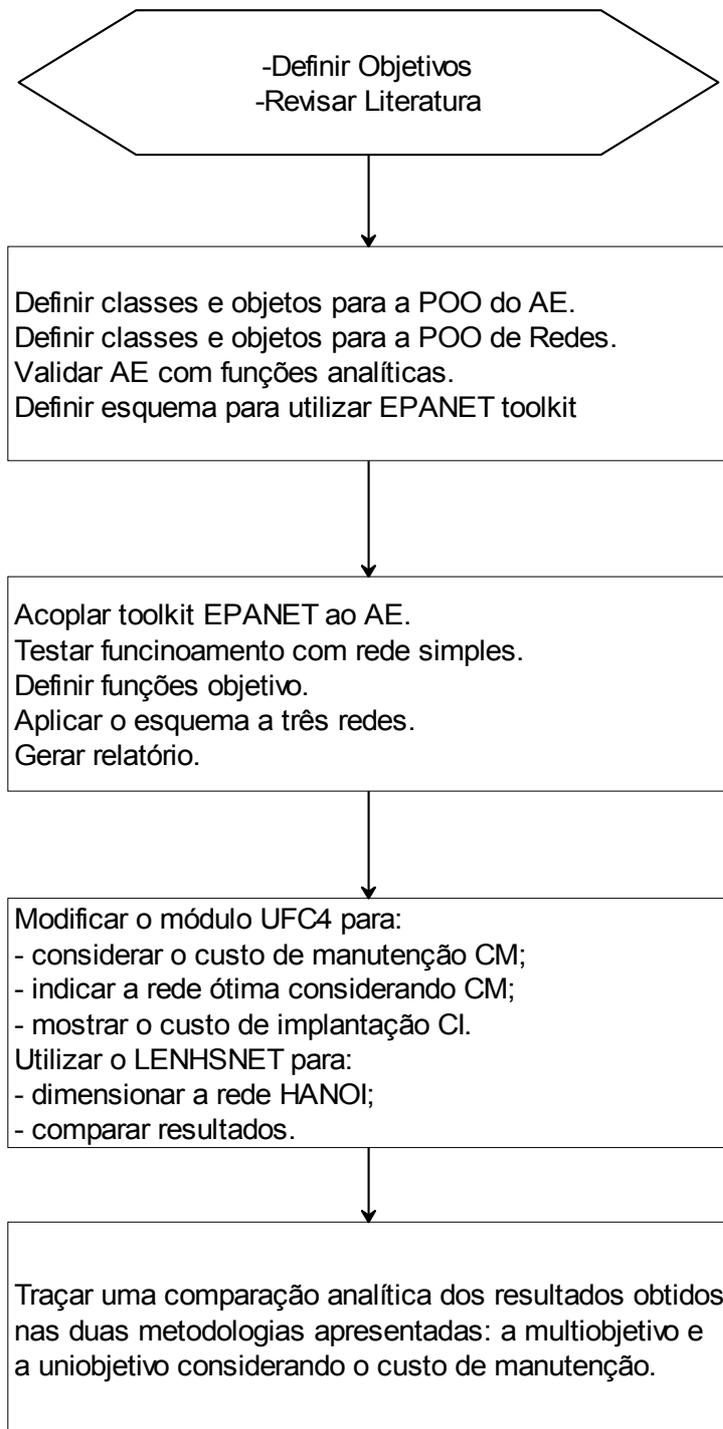
Otimizar projetos de RDA considerando dois objetivos conflitantes: minimizar o custo de implantação do projeto, considerando preço dos condutos a serem utilizados, de acordo com seu diâmetro; e minimizar o custo de manutenção ao longo da vida útil da rede, considerando a quebra e substituição dos condutos utilizados na implantação.

1.1.2. Específicos

1. Desenhar e implementar um algoritmo genético (AG) multiobjetivo e multipopulação para otimizar o projeto de RDA;
2. Desenhar e implementar um esquema capaz de juntar o AG às funções do EPANET por meio da biblioteca OOTEN;
3. Testar o programa criado no item anterior utilizando redes preexistentes e considerando os parâmetros presentes nelas;
4. Descrever e analisar os resultados da otimização, tirar conclusões sobre a metodologia aplicada e recomendar ações futuras a partir do trabalho apresentado.

A figura 2 mostra um diagrama com os passos para os objetivos específicos.

Figura 2 - Diagrama com passos para objetivos específicos



Fonte: autor.

Esta obra está organizada em seis capítulos, as referências bibliográficas, três anexos e três apêndices.

Capítulo 1 – Introdução – a introdução, justificando a elaboração da obra e indicando seus objetivos.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica – na qual se encontram as definições e os conceitos utilizados para a solução do problema de otimização apresentado, além de mostrar parte do que estava disponível na literatura durante o desenvolvimento da obra. Os principais algoritmos são apresentados e comentados, oferecendo-se assim uma visão global do que fundamenta o algoritmo empregado.

Capítulo 3 – Metodologia – o capítulo sobre a metodologia explica o que foi utilizado e de que forma cada elemento foi inserido no processo de otimização. É descrita a forma de acoplação da biblioteca utilizada para ativar o simulador hidráulico ao algoritmo evolucionário. A codificação das redes em anel, conceito oriundo da álgebra, também é mostrada, juntamente com a definição das operações sobre tal anel. Adicionalmente, as funções-objetivo são apresentadas e descritas nesse capítulo.

Capítulo 4 – Resultados – são listados, nesse capítulo, os resultados da otimização efetuada para três redes de distribuição de água: Rede Belém; Rede Açailândia; e Rede Hanoi. As características mais explícitas ao processo são listadas e comentadas brevemente. Um gráfico com a frente de Pareto obtida é mostrado para as redes Belém e Açailândia, bem como uma comparação é feita entre os resultados obtidos pelo ONEBEAR e os resultados oriundos do UFC4 ou do LENHSNET, conforme as possibilidades desses dois últimos.

Capítulo 5 – Discussão – sobre as principais ferramentas que foram empregadas no desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações – apresentam-se as conclusões gerais a respeito dos resultados obtidos. Recomendam-se algumas ações para a aplicação da metodologia e indica-se uma forma pela qual essas ações podem ser efetivadas.

Anexo 1 – mostra as funções analíticas utilizadas para validar o algoritmo, os parâmetros empregados e os resultados, com a respectiva frente de Pareto gerada para cada par de funções analíticas. Os testes com funções analíticas são usados largamente na literatura especializada com forma de validação de algoritmos.

Anexo 2 – apresenta uma tabelas relativas a rede Açailândia.

Anexo 3 – licenças dos softwares utilizados.

Apêndice A – apresenta alguns conceitos empregados no EPANET.

Apêndice B – exemplos de algoritmos multiobjetivo e conceitos associados.

Apêndice C – exemplos de algoritmos multipopulação.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As restrições apresentadas por alguns problemas impedem ou limitam demasiadamente a aplicação de alguns dos mais conhecidos métodos (MICHALEWICZ et al., 1997). Isso porque tais problemas em geral, são não lineares, naturalmente multiobjetivo, e apresentam componentes dinâmicas em vez de estáticas. Assim, técnicas que abordem problemas lineares, objetivo único e componentes estáticas apresentam dificuldade de adaptação ou mesmo resultam em resultados aquém dos desejados.

Atualmente, diversos pesquisadores têm procurado combinar métodos meta-heurísticos – nos quais a solução ótima é sacrificada por um conjunto de soluções boas em um tempo computacional limitado (HERTZ; WIDMER, 2003 apud RIBAS et al., 2013) – com outras técnicas de otimização a fim de lidar com problemas do mundo real e em larga escala (RIBAS et al. 2013). Há ainda a prática de utilizar-se funções de ajuste afim de poupar recursos da máquina (GUTMANN, 2001; REGIS, SHOEMAKER, 2005; TOLSON, SHOEMAKER, 2007; MUGHUTGAM, SHOEMAKER, 2007). Uma alternativa para a geração de funções de ajuste é o LABFIT (SILVA; SILVA, 2003).

É possível citar o caso de uma otimização de rede de distribuição de água que considera somente o custo de implantação do projeto, e.g., utilizando os diâmetros dos condutos como parâmetro para minimizar o custo. De fato, há uma economia considerável quando se compara a implantação direta sem otimizar a rede no sentido do custo mínimo e a implantação da rede otimizada. No entanto, a desconsideração de outros fatores pode levar a um custo total durante a vida útil da rede mais elevado do que seria necessário se esses fatores fossem elencados no projeto da rede. Um desses fatores é o custo de manutenção da rede (NEELAKANTAN et al., 2008).

Os algoritmos evolucionários apresentam-se como uma alternativa para lidar com problemas contínuos, inteiro-misto, combinatório, além da possibilidade de combinação com diversos outros métodos de busca. O conhecimento do domínio pode ser incorporado nos operadores evolucionários e na geração da população de forma muito direta. Além disso, em problemas de otimização, os algoritmos evolucionários são capazes de lidar com a combinação das propriedades de múltiplos objetivos, de não-linearidade, e de dinamicidade dos componentes. Se por um lado, não é possível garantir que não haja convergência prematura do algoritmo para um ótimo local, por outro a diversidade da população aumenta a robustez do método, uma vez que dá condições para que a pesquisa seja feita em várias áreas do espaço de busca em questão.

Outra característica de interesse é a capacidade do algoritmo evolucionário de mostrar uma curva de soluções para problemas com múltiplos objetivos, em lugar de uma única solução por

execução.

Soluções viáveis e soluções inviáveis podem ser combinadas pelo algoritmo evolucionário. Com isso, é melhorada a pesquisa na fronteira em problemas de restrição.

Em problemas dinâmicos, a população representa uma grande vantagem ao algoritmo evolucionário, uma vez que, certamente, ela deve conter uma solução satisfatória sempre que o problema mude. Isso confere à abordagem uma flexibilidade ainda maior.

No entanto, os algoritmos evolucionários apresentam algumas limitações, dentre as quais encontra-se o elevado custo computacional. Isso ocorre principalmente porque cada uma das soluções tentadas precisa de uma avaliação por determinada função. Desse modo, deve-se destacar que algoritmos evolucionários não devem ser aplicados em quaisquer problemas de forma indiscriminada. É possível ainda combinar uma técnica menos complexa com um algoritmo evolucionário, empregando a outra técnica, por exemplo, na geração da população inicial.

É importante notar, no entanto, que algumas avaliações sobre AE não podem ser consideradas válidas devido a características específicas dos AE. Em problemas NP-difícil (os que requerem um número de operações que cresce exponencialmente), por exemplo, as soluções geradas pelo AE são sub-ótimas. Portanto, diferentes algoritmos devem gerar soluções de qualidades distintas e, devido a processos intrínsecos do AE, o mesmo algoritmo pode gerar soluções iguais em tempos diferentes. Logo, o tempo para atingir uma solução não deve ser usado como parâmetro para avaliar o desempenho de um AE (CARRANO et al., 2011).

O primeiro passo o processo de otimização por algoritmos evolucionários é a escolha do algoritmo em si, depois é preciso escolher a representação, então, os valores dos parâmetros, e, por fim, as probabilidades de cruzamento e de mutação (MICHALEWICZ et al., 1997).

Assim, optou-se por um algoritmo genético para resolver o problema não linear e com objetivo duplo de dimensionar uma rede de distribuição de água. Em processos como o de otimização de um projeto de rede de distribuição, aparecem naturalmente objetivos conflitantes, a saber, como a minimização do custo de implementação da rede e a minimização do custo de manutenção ao longo do ciclo de vida dessa rede. Isso porque, em geral, ao se minimizar o custo de implementação, a combinação de condutos com diâmetros menores para a composição da rede é geralmente a que fornece o custo mínimo; enquanto os condutos com diâmetros maiores acabam por tornar o custo de manutenção menor, uma vez que são menos susceptíveis a quebra. Desse modo, abordagens multiobjetivo são preferidas, ainda que pese o fato de não se preterir as abordagens uniobjetivo nesse processo. Ademais, o custo computacional poderá ser ainda menor, haja vista utilizar-se algoritmos multipopulação, visando ao aumento da diversidade e diminuição das chances de uma convergência prematura dos algoritmos.

2.1. Algoritmos Evolucionários

Baseada na teoria da evolução de Charles Darwin (DARWIN, 1859), os algoritmos genéticos constituem-se em técnicas de otimização estocástica que tentam modelar um problema simulando o processo de evolução natural, a preservação de uma característica individual e a luta pela sobrevivência (SIVANANDAM; DEEPA, 2007). A pesquisa feita por esses algoritmos é multidirecional sem, contudo, ser randômica. Somente a população inicial pode ser gerada randomicamente, embora haja combinações com outras técnicas de forma a tornar a geração da população inicial um processo não randômico. O tipo de pesquisa é paralela e probabilística no espaço de busca usando operadores evolucionários de domínio independente, a fim de gerar uma nova população de soluções viáveis, candidatas à solução ótima. As diversas soluções são diferenciadas por meio de uma função de avaliação (*fitness*), a qual fornece a regra de um comportamento. Os algoritmos evolucionários (AE) representam uma classe maior de algoritmos a qual inclui a classe conhecida como AG, pois naqueles apresenta-se o comportamento social (autoaprendizagem, aprendizagem por interação social) além dos elementos presentes nestes.

De forma sucinta, pode-se dizer que AE é uma técnica de otimização estocástica e iterativa cuja base se assenta no comportamento social de grupos e nas suas interações entre si e com o meio. Tais algoritmos têm ganhado crescente importância desde as décadas de 1960 e 1970 (FOGEL et al., 1966; HOLLAND, 1975), não só no meio científico mas também na indústria, por sua capacidade de encontrar aproximações de soluções para problemas da classe NP-difícil e ainda, obter soluções numéricas para problemas cuja solução analítica não seja conhecida ou tenha-se a prova de sua inexistência. O problema do Caixeiro Viajante (NP-difícil), e.g, pode ser resolvido com AE para melhorar os processos de logística de uma indústria. Além disso, os algoritmos de otimização são empregados na minimização do custo de produção, e no melhoramento da qualidade dos produtos.

Basicamente, são três as operações para a simulação da evolução: a seleção, o cruzando e a mutação. No cruzamento e na mutação, criam-se novos indivíduos; na seleção, descartam-se os indivíduos de qualidade inferior por meio da função de avaliação.

A fase de inicialização está sempre presente nesses algoritmos – como a geração de uma nova colmeia no HBMO – seguida de uma fase de interação entre os indivíduos da população – comportamento social – implicando em sua evolução. Normalmente é gerada a população inicial de forma randômica e seus indivíduos entrarão no processo visando a evolução, agora de acordo com uma função de aptidão. Segue-se a fase iterativa. Esta prossegue até que seja atingido o critério de parada. É criada a geração i a partir de uma população na geração $i-1$. A *seleção* decide quais

indivíduos irão compor a população da geração seguinte, que são aqueles dotados de melhor adaptabilidade. Estes passarão, então, pelas operações de *recombinação* e de *mutação*, dando origem aos novos indivíduos. Cada nova população passará pela avaliação. O critério de parada é verificado a cada rodada e, caso não seja atingido, o processo é repetido. No Quadro 1, dispõe-se o pseudocódigo usual de um algoritmo evolucionário.

Quadro 1- Pseudocódigo de um algoritmo evolucionário

```

AE_Simples( ) {
inteiro k = 0;
inicialize a população P(0);
avale a população P(0);
enquanto não atingida a CondiçãoDeParada repita
    incremente k em uma unidade;
    selecione uma subpopulação P'(t) de P(t - 1);
    crie uma população P(t) de P'(t);
    avale a população P(t);}

```

Fonte: autor.

Durante a execução de um AE, pode ocorrer a estagnação no aperfeiçoamento dos indivíduos. Caso essa estagnação coincida com um ótimo global, nada tem-se a fazer. No entanto, a coincidência pode ser com um ótimo local, o que compromete o resultado de qualquer algoritmo de busca.

A causa dessa estagnação é o fato de os indivíduos, após tantas recombinações, tornarem-se extremamente parecidos entre si, fazendo com que a etapa de recombinação já não contribua de forma significativa para o aperfeiçoamento da população.

Então, a procura em novos lugares do espaço de busca passa a depender somente da mutação, a qual consiste em uma operação randômica (URSEM, 2003).

Uma opção para vencer essa dificuldade é a abordagem multipopulação com a distribuição de tantas populações iniciais em quantos subespaços de buscas forem consideradas convenientes.

2.1.1. Domínios Numéricos de Busca

Uma codificação da estrutura de dados e uma função de decodificação é o que se conhece como uma representação. A estrutura é o meio pelo qual se armazena a solução atual,

define-se o espaço de busca genótipo, e o tamanho deste, isto é, o número de possíveis soluções. A decodificação é uma aplicação do espaço de busca genótipo para o espaço de busca fenótipo. As principais codificações são a cadeia binária e o vetor real.

Uma questão de peso para problemas numéricos é a precisão da codificação. Tal precisão pode ser melhorada simplesmente ao se aumentar o número de bits da representação binária. Entretanto, é necessário lembrar-se de que o espaço de busca com representação binária cresce exponencialmente e o um bit de representação aumentado provoca a duplicação do tamanho do espaço de busca. Ilustra-se essa situação com um espaço de busca de 8 bits, o qual tem tamanho de $2^8 = 1.024$; para dobrar-se a precisão da representação, precisa-se de 9 bits, o que resulta em um espaço de tamanho $2^9 = 2.048$.

Ao se tomar a estrutura de dados vetor de bits com comprimento fixo C , 2^C é o número de soluções viáveis, o que representa o tamanho do espaço. Nos problemas numéricos, a codificação exige que se especifique uma função de decodificação que seja capaz de levar a representação binária de um gene a uma representação em ponto flutuante. Converte-se o número binário em decimal pela função de decodificação e, então, aplica-se ao intervalo do espaço de busca real. Se L bits codificam o gene x , então o valor associado em ponto flutuante de x , x' é dado por meio da equação 1:

$$x' = x_{\min} + \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^L - 1} \left(\sum_{i=0}^{L-1} x[i] 2^{L-1-i} \right) \quad (1)$$

sendo x' o valor em ponto flutuante, x_{\min} o valor mínimo de x , e x_{\max} o valor máximo de x , e $x[i]$ o i -ésimo bit na codificação. Como ilustração, tome-se o número 123, com $x_{\min} = -1$ e $x_{\max} = 1$, e uma codificação de 8 bits.

Então $01111011_2 = 123_{10}$ é dado como

$$x' = (-1) + \frac{1 - (-1)}{2^8 - 1} (0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0)$$

$$x' \approx 0,03529$$

Suponha-se um caso em que dado espaço de busca tem no número inteiro 56 uma solução melhor que a solução inteira 55. Mesmo sendo estes inteiros consecutivos na base decimal, suas representações na codificação binária padrão implicam em uma mudança de quatro bits para o

AE – de 00110111 para 00111000. Para resolver este problema, utiliza-se uma codificação especial chamada codificação *Gray*. Nela, há uma correspondência entre os valores de parâmetros similares em ponto flutuante e os números adjacentes na representação binária. E ainda, números inteiros consecutivos são representados por números binários que diferem por apenas um bit. A codificação Gray em pseudocódigo está no Quadro 2.

Quadro 2- Pseudocódigo: função de decodificação Gray

```

Função GrayDecodifica( bit-cadeia x ) : inteiro
uns = 0;
intvalor = 0;
para ( i = 0; i < |x|; i++ ) faça {
    se ( x[i] == 1 )
        uns++;
        intvalor += ( uns mod 2 ) * 2|x|-1-i;
    }
retorne intvalor;

```

Fonte: autor.

Note-se que a complexidade computacional do algoritmo – o número de operações necessárias para realizar a tarefa (PAPADIMITRIOU, 1994) – dado no Quadro 2 é $O(C)$, C sendo o comprimento do número binário. Portanto, se o comprimento for 8 bits, tem-se $O(8)$ como complexidade do algoritmo.

2.1.2. Mutação Bit-Flip

Há apenas dois estados em um bit, 0 ou 1, assim como diversos fenômenos: vivo ou morto, grávida ou não grávida, aceso ou apagado. A palavra *bit-flip* significa literalmente “virar” o bit, como virar uma moeda. Trata-se de uma mutação *bit-flip* que consiste numa iteração sobre todos os genes. Se um número aleatório uniforme u entre 0 e 1 for menor que dado limiar de uma probabilidade p_m , então o bit no gene $g[i]$ será virado. Ainda que a complexidade seja $O(C)$, a distância entre dois bits modificados é dada por uma distribuição geométrica. Isto quer dizer que, se p_m for a probabilidade de mutação de um bit, então $T \sim \text{ge}(p_m)$ é uma variável estocástica

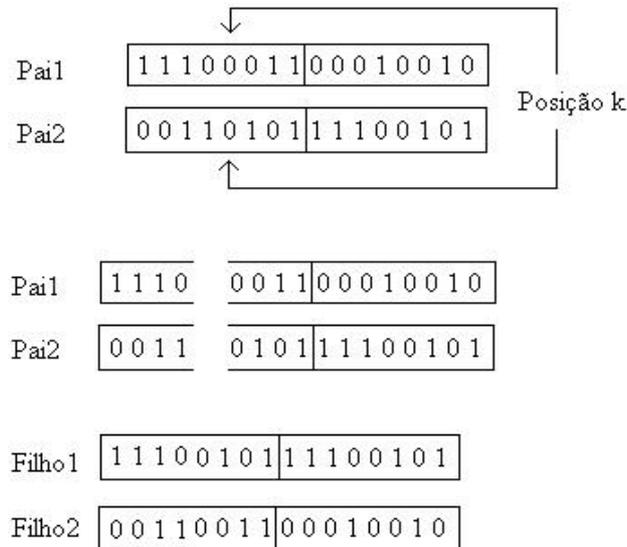
descrevendo a distância entre os bits que sofreram mudança. A determinação do número de bits a serem saltados é feita empregando-se a equação 2.

$$t = 1 + \left\lceil \frac{\ln u}{\ln(1 - p_m)} \right\rceil \quad (2)$$

2.1.3. Crossover Uniforme e n-ponto

O *crossover* (cruzamento ou recombinação) uniforme consiste em uma recombinação aleatória de cada bit[i] dos pais para formar o genoma do filho. Neste caso, se o Pai 1 tem genoma **10011100** e o Pai 2 tem genoma *01010101*, o genoma do filho pode ser, e.g., **0** **0** **0** *1* *0* **1** *0* **0**, sendo o bit em negrito oriundo do Pai 1, enquanto o bit itálico é oriundo do Pai 2. No *crossover* n-ponto, aplica-se a operação de *crossover* sobre n pontos. Sem perda de generalidade, pode-se ilustrar esta operação com n = 1: o *crossover* 1-ponto. Assim, os genomas dos pais, de tamanho n, cada, são cortados em uma posição aleatória k; o filho1 tem seus genes de g[1] até g[k-1] recebidos do pai1, e seus genes de g[k] até g[n] oriundos do pai2; o filho2 tem seus genes de g[1] até g[k-1] oriundos do pai2, e seus genes de g[k] até g[n], do pai1. A Figura 3 representa esta operação.

Figura 3- Crossover 1-ponto



Fonte: autor.

2.1.4. Vetores Reais

A representação dos genes diretamente por um número real é uma prática frequente. Pode-se projetar operadores de *crossover* e de mutação com base em operações aritméticas e distribuições estocásticas. Uma das vantagens desse tipo de codificação do espaço de busca é que nenhuma decodificação se faz necessária, porque o espaço de busca é um subconjunto do domínio objetivo.

Alguns inconvenientes podem surgir na representação binária aplicada a problemas de otimização multidimensionais e de alta precisão numérica. No exemplo apresentado por Michalewicz et al. (1994), para 100 variáveis com domínio na cadeia $[-500, 500]$ com precisão de seis casas decimais, a largura do vetor da solução binária é de 300, que por sua vez gera um espaço de busca com o tamanho próximo de 10^{1000} . Por isso, para esse tipo de problema os algoritmos baseados na representação de cadeia binária apresentam baixo desempenho (MICHALEWICZ et al., 1994).

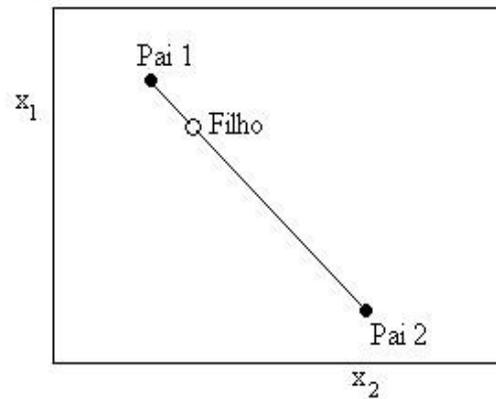
2.1.5. Crossover Aritmético

No crossover aritmético o genoma de um filho é gerado a partir de uma média ponderada de cada um dos genes nos genomas de dois pais. A equação 3 apresenta o genoma de um filho F gerado a partir de uma média ponderada dos genomas dos pais $P1$ e $P2$.

$$F = wP1 + (1 - w)P2, \quad (3)$$

na qual w segue a distribuição $U(0,1)$, a distribuição uniforme que situa o genoma do filho numericamente entre os genomas dos pais. Um peso específico w_i também é possível para cada gene p_j do vetor P_j . Assim, cada f_i de F será obtido por $w_i.p1_i + (1-w_i).p2_i$. A Figura 4 ilustra o *crossover* aritmético ponderado.

Figura 4- Crossover aritmético com um peso



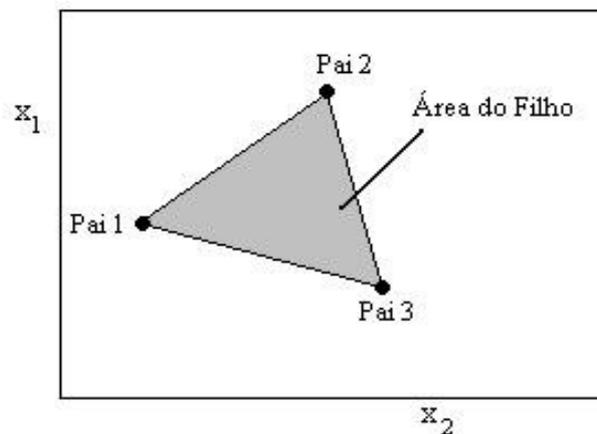
Fonte: autor.

A equação 4 representa outra variação do crossover aritmético, quando há mais que dois pais. O peso associado ao seus genomas definem as contribuições de cada pai para a formação do genoma do filho.

$$F = \sum_{j=1}^{k>2} w_j P_j, \text{ com } \sum_{j=1}^k w_j = 1 \quad (4)$$

Cada w_j está distribuído uniformemente no intervalo fechado $[0,1]$. Dessa maneira, o filho é criado no fecho convexo delimitado pelos k pais. A Figura 5 oferece exemplo de uma área delimitada pelo fecho convexo de três pais e seus respectivos pesos.

Figura 5- Fecho convexo de três pais com um peso por pai



Fonte: autor.

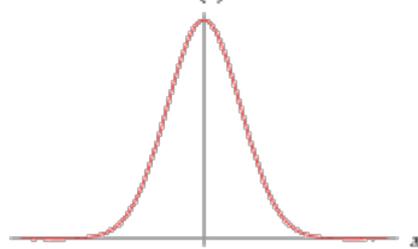
2.1.6. Mutação Gaussiana e Uniforme

Na mutação Gaussiana um vetor V gerado aleatoriamente é adicionado aos vetores solução X . Cada coordenada v_i segue a distribuição Gaussiana $N(0, \alpha)$, aos vetores X , conforme a equação 5.

$$x' = x + V \quad (5)$$

A Figura 6 representa o caso especial em que $\alpha = 1$.

Figura 6- Distribuição Gaussiana para $N(0,1)$



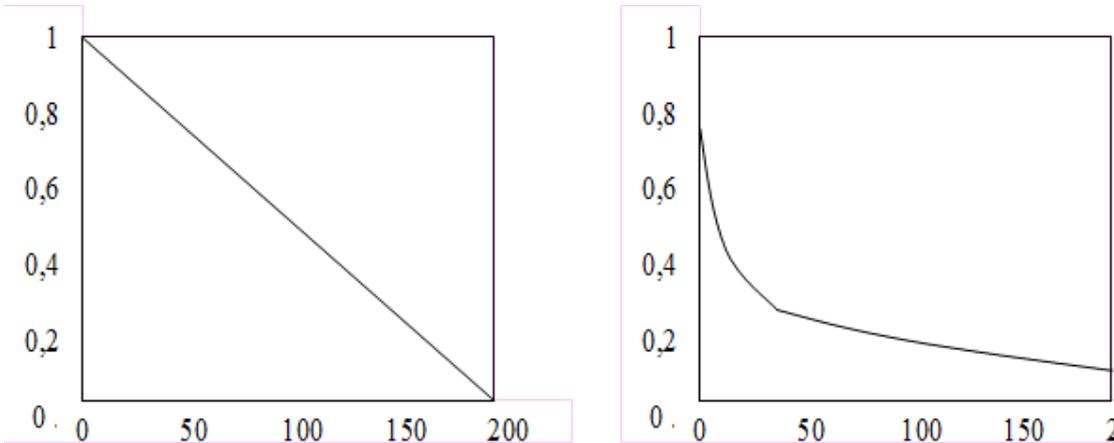
Fonte: autor.

Pode haver dificuldade de refinamento de soluções pelo algoritmo com parâmetros α de valor muito elevado; enquanto valores muito baixos podem conduzir a terminação em um mínimo (ou máximo) local. Isto sugere que o desempenho do algoritmo está fortemente conectado ao valor do parâmetro α . Por isso, técnicas de controle desse parâmetro devem ser utilizadas, como a autoadaptação.

É admissível a hipótese de que o algoritmo convirja para um mínimo (ou máximo) local ou global. Desde que essa convergência ocorre com o aumento do número de gerações, pode-se usar tal número para controlar o valor do parâmetro α , isto é, α seria obtido por uma função do número de gerações. Na equação 6, tem-se um caso de controle do parâmetro α em função do tempo, conforme Haddad et al., (2006) na abordagem uniobjetivo HBMO (*Honey Bee Mating Optimization*).

$$\alpha(t) = \frac{[M - m(t)]}{M} \quad (6)$$

Em 6, M representa o tamanho do repositório de informações (espermateca); $m(t)$, o número de soluções aleatórias (zangões) selecionadas para cruzamento; e t , o tempo. Outros dois exemplos de controle de α são dispostos na Figura 7.

Figura 7- α como função decrescente do número de gerações

$$\text{a) } \alpha(t) = 1 - 0,005t$$

$$\text{b) } \alpha(t) = \frac{1}{1 + \sqrt{t}}$$

Fonte: autor.

2.1.7. Domínios de Função de Busca

Em Programação Genética (PG), a árvore sintática é uma estrutura na qual são armazenados os indivíduos candidatos à solução (KOZA, 1992) – programas. A evolução de expressões matemáticas como objetivo de um AE nos problemas com domínio de função segue esta técnica (URSEM, 2003).

Os nós (locais não terminais) e as folhas (locais terminais) constituem a árvore sintática. O número de sub-árvores em um nó pode ser variável. Assim, um nó SE pode ter três subárvores, a saber, a CONDIÇÃO, o ENTÃO e SE NÃO. As folhas, desde que são locais terminais, não têm subárvores. Para ser avaliada, a árvore é percorrida recursivamente. A varredura, neste caso, é feita pós-ordem, isto é, para que um nó seja visitado é preciso que sua subárvore seja visitada antes.

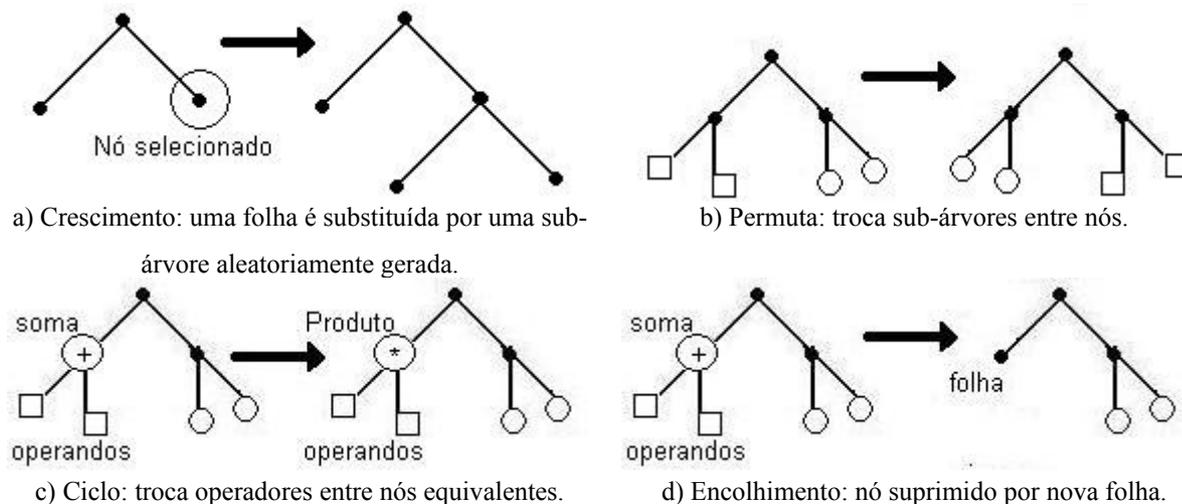
O espaço de busca pode ser limitado por uma profundidade máxima para as árvores. A necessidade disso é porque, se um conjunto muito pequeno leva a funções de baixo desempenho, por um lado, conjuntos muito grandes podem tornar a pesquisa muito difícil, por outro, desde que o espaço de busca cresce com os operadores disponíveis. A escolha de nós e folhas deve ser, então, muito criteriosa. Ainda assim, é preciso que o algoritmo esteja apto a lidar com problemas técnicos como um tipo de retorno diferente do esperado ou uma expressão aritmética inválida.

O cruzamento (crossover) em uma árvore sintática pode ser executado escolhendo-se,

de dois pais, subárvores com valor de retorno igual e, daí, simplesmente recombina-se estas subárvores entre eles. Esse tipo de cruzamento é conhecido como cruzamento de subárvore.

Na Figura 8, pode-se observar os operadores de (a) crescimento (uma folha é substituída por um subárvore aleatoriamente gerada), (b) permuta (troca subárvores de um nó), (c) ciclo (o operador em um nó é substituído por outro com o mesmo número de subárvores) e (d) encolhimento (um nó é escolhido aleatoriamente e substituído por uma folha gerada aleatoriamente).

Figura 8- Operares de mutação para codificação de função.

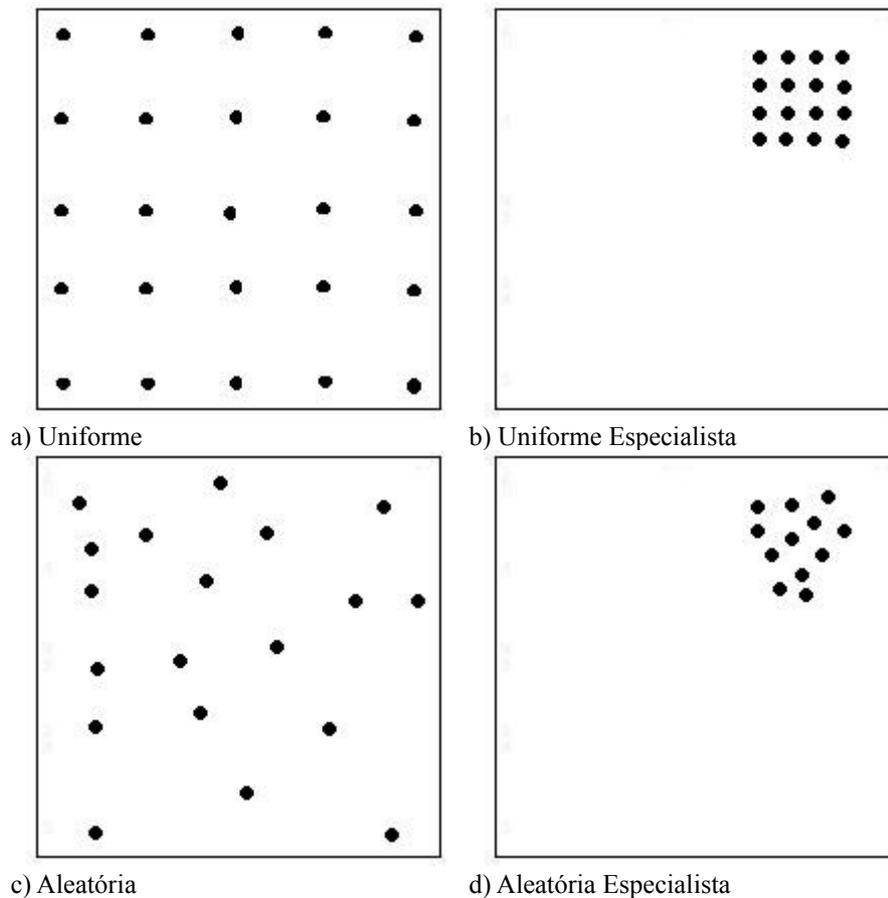


Fonte: autor.

2.1.8. Inicialização da População

Inicializar a população consiste em gerar os primeiros indivíduos representando soluções para o problema. Há uma variedade de técnicas para a inicialização da população em um AE, tendo cada uma suas vantagens e limitações. Abaixo, seguem-se algumas técnicas de inicialização de população. Na Figura 9, ilustram-se os casos de inicialização (a) *uniforme*, (b) *uniforme especialista*, (c) *aleatória* e (d) *aleatória especialista*. Como se vê nestas Figuras, a inicialização uniforme distribui uniformemente as soluções iniciais por todo o espaço de busca, sendo utilizada quando não se conhece nada inicialmente sobre o problema em foco; a inicialização uniforme especialista pode ser preferida quando já se tem uma estimativa preliminar da posição da solução ótima no espaço de busca, baseada geralmente na própria experiência ou quando se sabe de antemão os locais menos prováveis de ocorrer um ótimo. As inicializações aleatórias são as mais frequentes dentre as técnicas de inicialização de população conhecidas.

Figura 9- Tipos de inicialização de população



Fonte: autor.

- Aleatória – o algoritmo gera soluções iniciais sem nenhum critério preestabelecido. Nessa inicialização, idealmente, a população deve possuir uma boa diversidade, isto é, as soluções geradas precisam estar bem distribuídas no espaço de busca.
- Aleatória Uniforme – o algoritmo considera uma grade em que deve gerar as soluções iniciais. A principal vantagem é uma distribuição bem uniforme sobre o espaço de busca, evitando concentrações e vazios no espaço.
- Determinística – diametralmente oposta à inicialização aleatória, o AE segue critérios fixos para gerar sua população inicial. Além disso, os pontos iniciais podem ser sub-ótimos.
- Especialista – baseada no conhecimento prévio de soluções que seriam mais próximas da ótima. Inclusive, a melhor solução encontrada atualmente pode ser incorporada na população inicial. Pode também se basear no conhecimento da função-objetivo, ou considerando-se o que seria razoável como solução ótima para determinada função.
- Mista – pode incorporar na população inicial soluções criadas por outras técnicas, além de soluções próprias geradas aleatória, determinística, ou especialista.

2.1.9. Operadores de Seleção

A seleção consiste na seleção de indivíduos dentre uma população que serão descartados ou mantidos para a próxima geração. Esta escolha pode ser tanto estocástica (como no caso dos AEs que substituem toda a população), quanto determinística (a qual substitui apenas uma fração da população). A abordagem estocástica é conhecida como *geracional*, enquanto a abordagem determinística é chamada de *uniforme*. A etapa da seleção, em um AE, é que determina as mudanças na população de uma interação para a próxima e que deve conduzir a soluções melhores. O ato de manter o melhor indivíduo da população corrente é chamado de *elitismo*, e *k-elitismo* se k indivíduos são salvos como uma elite da população. Outra diferença entre os algoritmos *geracionais* e os algoritmos *uniformes* é que as soluções são clonadas, nos primeiros; enquanto são escolhidas deterministicamente de um conjunto de soluções candidatas, nos últimos.

A taxa de sobrevivência de qualquer indivíduo é controlada pela pressão de seleção, que consiste no percentual da população a ser substituído a cada geração. Uma pressão de seleção de 50%, por exemplo, significa que em duas gerações a população inicial seria totalmente renovada. É esperado que o algoritmo convirja para uma pequena área do espaço de busca, provocando assim uma prematura estagnação, quando a pressão é muito “alta”. Por outro lado, pressões muito “baixas” têm o inconveniente de tornar a convergência extremamente lenta. Assim, um equilíbrio nessa pressão é desejável.

2.1.10. Torneio

A partir da população corrente, n indivíduos são selecionados para serem comparados entre si de acordo com sua adaptabilidade. Indivíduos com melhor adaptabilidade são considerados vencedores, sendo o prêmio uma vaga na próxima geração da população. Em geral o número n é tal que $2 \leq n \leq 5$ (URSEM, 2003). Para um $n > 5$, tem-se uma pressão de seleção muito “alta”, o que acarretaria em uma convergência prematura.

No torneio, quanto mais indivíduos são postos em competição, maior será a pressão de seleção. Por seu turno, a introdução de vencedores estocásticos em um torneio com dois indivíduos pode baixar a pressão de seleção. Neste caso, o indivíduo com melhor adaptação vence com uma probabilidade maior que 50%.

2.1.11. Seleção Proporcional

É o tipo de seleção na qual a probabilidade de sobrevivência do indivíduo depende não somente de sua adaptabilidade, mas também da adaptabilidade de cada um dos demais indivíduos na população. Essa probabilidade é dada pelo quociente entre a adaptabilidade de um indivíduo e o somatório da adaptabilidade de todos os indivíduos da população (veja equação 7).

$$P_{\text{sobrevivência}}(I) = \frac{\text{Adaptabilidade}(I)}{\sum_{j=1}^n \text{Adaptabilidade}(I_j)} \quad (7)$$

Essa configuração implica em cada indivíduo ocupar uma posição no intervalo [0,1]. Assim, para um número aleatório n entre 0 e 1, se n pertencer a região ocupada pelo indivíduo I , então I será escolhido. Claramente esse processo resulta em que os indivíduos com maior adaptabilidade sejam copiados para a próxima geração com uma probabilidade bem maior do que aqueles menos adaptados. O inconveniente com essa seleção é a pressão de seleção sofrer influência da adaptabilidade do indivíduo, em vez de sofrê-la de um parâmetro como o número de torneios, por exemplo. Logo, o número de torneios terá menor influência sobre a convergência do algoritmo.

2.1.12. Seleção via Ranking

A ordem dos indivíduos é feita de acordo com sua adaptabilidade e então, associados a uma probabilidade fixa $p_{\text{sobrevivência}}$ que obedecerá a um esquema de ordenação do tipo $p_{i+1} = p_i - \Delta$, com $i = 1, 2, \dots, n$, sendo n o tamanho da população e Δ uma constante. O Quadro 3 mostra exemplo com $n = 20$, $\Delta = 0,004$ e $p_1 = 0,1$.

Quadro 3- Seleção via ranking de 20 indivíduos

Posição	$P_{\text{sobrevivência}}$	Posição	$P_{\text{sobrevivência}}$	Posição	$P_{\text{sobrevivência}}$	Posição	$P_{\text{sobrevivência}}$
1	0,100	6	0,080	11	0,060	16	0,040
2	0,096	7	0,076	12	0,056	17	0,036
3	0,092	8	0,072	13	0,052	18	0,032
4	0,088	9	0,068	14	0,048	19	0,028
5	0,084	10	0,064	15	0,044	20	0,024

Fonte: autor.

2.1.13. Seleção Contínua

Neste tipo de seleção, somente uma pequena fração da população é submetida a uma atualização a cada passo iterativo. Essa atualização se dá com a criação de k soluções potenciais a partir de uma população de tamanho n , seguida pela ordenação dos $(n + k)$ indivíduos e, finalmente, com a eliminação dos k indivíduos menos adaptados. Note que, no torneio, no ranking, e na proporção, somente os membros de uma elite eram escolhidos deterministicamente, enquanto que na seleção contínua isso ocorre para todos os sobreviventes.

2.1.14. Seleção Manual

Nos casos em que seleções por meios matemáticos não sejam possíveis, é usada a seleção manual. O AE apresenta uma lista de soluções das quais se deve selecionar a que se julgar mais conveniente. A partir daí, geram-se outras soluções e o processo se repete.

2.2. O Problema multiobjetivo

Diversas aplicações dos algoritmos evolucionários mostram-se problemas com objetivos conflitantes por sua própria natureza. Exemplo disso é o problema de minimizar o custo de implantação considerando conjuntamente o custo de manutenção de uma rede de distribuição de água; outro exemplo é o da remediação de águas subterrâneas com os objetivos de minimizar o custo operacional e minimizar a pluma contaminante, simultaneamente. Embora se tenha usado em muitos casos abordagens uniobjetivo (e.g. GUAN e ARAL, 1999) as abordagens multiobjetivo têm se mostrado superiores na tarefa de encontrar soluções ótimas para esse tipo de problema (e.g. MANTOGLOU e KOURAKOS, 2007; PARK e ARAL, 2004; ERICKSON et al. 2002). No caso de AE, a aplicação da abordagem multipopulação deve contribuir para a diversidade das soluções, impactando as chances de convergência para um ótimo global.

Utilizada com bastante frequência nas abordagens multiobjetivo dos AEs, a frente de Pareto é formada por meio de um torneio em que são definidas soluções dominadas e soluções não-dominadas. Uma solução domina outra se lhe é superior em pelo menos um objetivo e não lhe é inferior em qualquer outro. O Quadro 4 dispõe um pseudocódigo para a formação da frente de Pareto no caso uma população com n indivíduos. O *Ranking* de cada indivíduo inicialmente é zero. Cada vez que uma solução for dominada por outra, aquela terá seu *Ranking* incrementado. A frente de Pareto será formada pelas soluções que permanecerem com *Ranking* igual a zero.

Quadro 4- pseudocódigo para a frente de Pareto

```

FrenteDePareto() {
para cada  $I_m$  e cada  $I_j$ 
  se  $I_m$  domina  $I_j$  então  $I_j$ .Ranking++
}

```

Fonte: autor.

O conceito de nicho de Pareto pode ser introduzido com relativa facilidade na função que retorna a frente de Pareto. Tal conceito sugere que seja estabelecido um *raio de nicho* para resolver situações conflitantes entre os indivíduos. A partir da avaliação desse raio, prevaleceria o indivíduo com menos indivíduos dentro do seu *raio de nicho* (ERICKSON et al., 2002).

Não se deve confundir o conceito de frente de Pareto com o de curva de possibilidades de produção. A primeira mostra soluções dominantes que não são dominadas por quaisquer outras soluções dentre todas as soluções testadas. A segunda é uma linha na qual todos os pontos revelam as diferentes possibilidades de dois produtos serem fabricados de forma combinada em determinado período com a quantidade de fatores que a firma possui (CARVALHO, 2004).

As definições 1, 2 e 3 são os conceitos mais importantes da Frente de Pareto.

Sejam f_1, f_2, \dots, f_n , as funções-objetivo representando matematicamente os n objetivos de um problema P e $I = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de índices.

Definição 1 – Dominância é uma relação entre soluções (indivíduos) de um conjunto de soluções (população) na qual uma solução é dita dominante e a outra, dominada. A dominância é representada em símbolos como (BARROS, 2007): dominância forte $s \prec S$, dominância fraca $s \preceq S$.

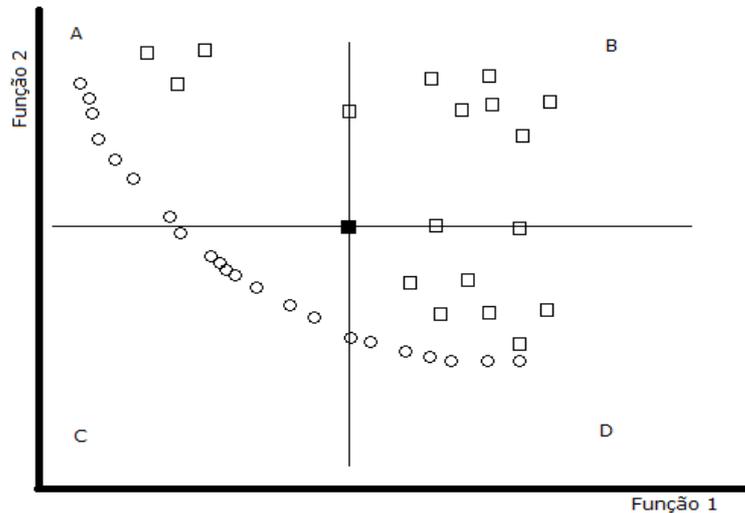
Definição 2 – Dominância Forte é aquela na qual a solução dominante é superior a solução dominada em pelo menos um dos objetivos e não lhe é inferior em qualquer outro objetivo. Matematicamente, se s é a solução dominada e S é a solução dominante e P é um problema de minimização, então $\exists i \in I$ tal que $f_i(S) < f_i(s)$ e, $\forall j \neq i$ em I , $f_j(S) \leq f_j(s)$.

Definição 3 – Na *Dominância Fraca*, a *solução dominante* é superior ou igual à *solução dominada* em qualquer dos objetivos do problema. Em símbolos matemáticos, $\forall i \in I$ $f_i(S) \leq f_i(s)$.

Uma ilustração do conceito de dominância de Pareto é dada pela Figura 10. As soluções representadas por círculos vazados compõem a frente de Pareto; as soluções representadas por quadrados vazados constituem as soluções dominadas. O conceito de dominância fraca e dominância forte é ilustrado pelo quadrado preenchido: as soluções presentes no subespaço B são ditas fortemente dominadas pela solução representada por esse quadrado; as constantes dos subespaços A e D são chamadas soluções não-comparáveis; as soluções inseridas no subespaço C

são dominantes dessa solução; e as soluções que recaem sobre as fronteiras dos subespaços A e B e dos subespaços B e D são ditas soluções fracamente dominadas em relação a solução associada ao quadrado preenchido.

Figura 10- Dominância de Pareto



Fonte: autor.

A versão multiobjetivo do HBMO, MOHBMO (BARROS, 2007; BARROS et al., 2010) utiliza o conceito de frente de Pareto para escolher as rainhas, isto é, as soluções não-dominadas. Após a inicialização da população e a definição das rainhas, o processo iterativo se inicia e seguem-se os passos do HBMO original.

O *Niched Pareto Genetic Algorithm* (NPGA) (HORN et al., 1994) usa, em adição, o conceito de *nicho de Pareto*, que consiste na utilização de um raio de nicho para solucionar situações nas quais ocorre “empate” entre as soluções quanto ao *ranking* de Pareto. A solução que tiver menos soluções em uma vizinhança delimitada pelo raio de nicho, ou seja, cuja superioridade seja menos contestada, vence a outra.

A versão multiobjetivo do PSO (KENNEDY e EBERHART, 1995) é conhecida como *Multiple Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO). Na abordagem feita por Coello e Lechuga (2002), esses autores introduziram a ideia de um repositório global. Nele qualquer partícula depositaria suas experiências de voo ao final de cada ciclo de voo. Considerando um sistema com bases geográficas, seriam executadas as atualizações no repositório. Esse sistema seria definido em termos dos valores da função-objetivo de cada solução. Coello (1999) faz uma descrição de técnicas multiobjetivo.

2.3. Algoritmos MultiPopulação

Os algoritmos evolucionários são capazes de achar soluções aproximadas satisfatórias em um tempo computacional aceitável. Contudo, sua aplicação a problemas de grande complexidade e porte resulta em um consumo de tempo computacional considerado excessivo para se chegar a uma solução que possa ser considerada satisfatória (LIMA, 2005). Introduzindo o conceito de migração entre os indivíduos de distintas populações, as abordagens multipopulação podem atenuar estes efeitos (NIU et al., 2006; LIU et al., 2006).

As abordagens multipopulação dos algoritmos evolucionários introduzem o conceito de migração entre as populações geradas no algoritmo. A passagem de um indivíduo de uma população para outra contribui para a diversidade da população e assim, aumentam as chances de se encontrar uma solução satisfatória em um tempo computacional consideravelmente inferior ao tempo levado por uma abordagem unipopulação (MERA et al., 2004).

Na natureza a migração dos indivíduos geralmente ocorre de um habitat para outro por diversos motivos, como busca de alimentos, temperatura melhor para a espécie, perseguição de predadores etc. Eventualmente, nesta migração, pode ocorrer o cruzamento entre bandos de diferentes formações, melhorando, do ponto de vista adaptativo, determinada espécie. O cruzamento entre bandos diferentes pode contribuir fortemente para o que se chama diversidade genética da espécie.

Os algoritmos baseados em multipopulação inicializam um número predefinido de populações, às vezes chamadas de subpopulações, as quais irão explorar o espaço de busca independentemente ou não. Cada população pode evoluir independentemente ou co-evoluir com as demais populações, o que em geral é feito considerando-se as populações vizinhas. Em uma abordagem unipopulação, apenas o melhor indivíduo (elitismo) ou os k-melhores indivíduos (k-elitismo) são preservados para uma comparação com indivíduo(s) da população gerada na iteração seguinte, eliminando-se os demais indivíduos da população. Essa característica é essencial para a convergência do algoritmo, no entanto, prejudica a diversidade genética da população.

Para preservar a diversidade genética nos AE são aplicadas três diferentes técnicas (OLAGUE e PUENTE, 2006):

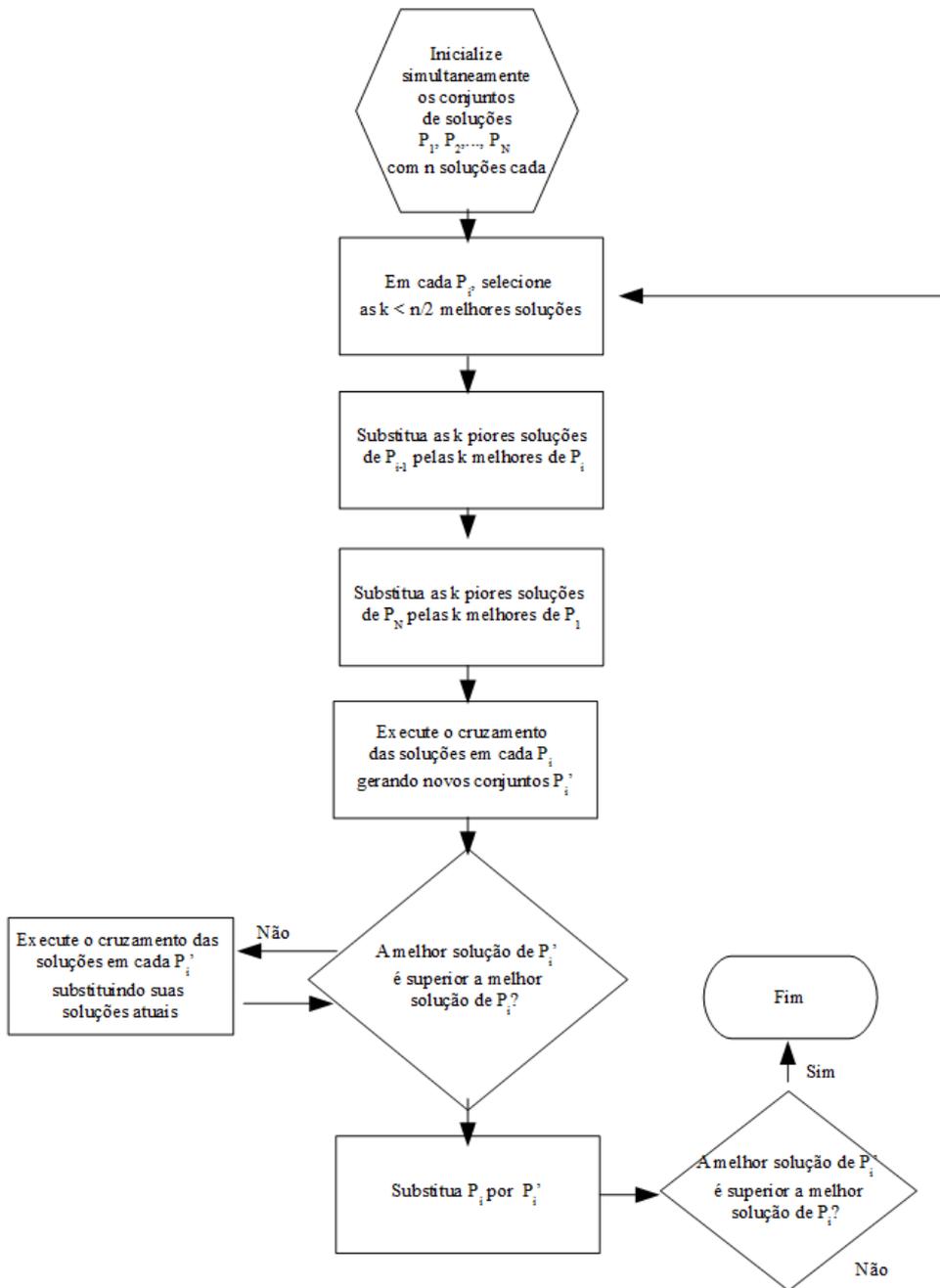
- a) modificação heurística dos operadores genéticos afim de promover a diversidade;
- b) função-aptidão de penalização; e
- c) incorporação de uma estrutura algorítmica de nível mais alto para gerar e gerenciar subpopulações.

Em uma abordagem multipopulação, a diversidade é favorecida pela geração das populações que irão, posteriormente, intercambiar informações entre os indivíduos dessas populações.

No exemplo de um algoritmo multipopulação representado pela Figura 11, N conjuntos de soluções, com n soluções cada, são inicializados simultaneamente. A etapa seguinte consiste na seleção, em cada conjunto de soluções P_i , das k melhores soluções, sendo esse k um número menor do que a metade do número de soluções de cada conjunto. As k piores soluções do conjunto P_{i-1} , são trocados pelas k melhores soluções de P_i , onde i simplesmente rotula a população e não faz referência ao número de iterações. O último conjunto recebe as k melhores soluções do primeiro conjunto.

O passo do *crossover* é executado em cada conjunto, o que irá gerar novos N conjuntos de soluções. A etapa seguinte consiste na comparação da melhor solução do novo conjunto de soluções com a melhor solução do conjunto que o precedeu. Caso o novo conjunto tenha seu melhor representante inferior ao melhor do conjunto precedente, um novo cruzamento é efetuado em cada um de seus elementos, substituindo suas atuais soluções, e é feita uma nova comparação. Caso o melhor representante do novo conjunto seja superior ao melhor do precedente, este será substituído por aquele e procede-se então o teste do critério de parada. Se o critério de parada não for encontrado, o algoritmo se repetirá a partir da etapa de seleção das k melhores soluções de cada conjunto de soluções.

Figura 11- Exemplo de esquema para um algoritmo multipopulação



Fonte: autor

Como híbrido, o MINPGA considera um número predefinido de ilhas de injeção (SINHA e MINSKER, 2007) de NPGA. Cada ilha irá executar um NPGA e ao final de cada execução, os k piores indivíduos da ilha i serão substituídos pelos $k/2$ melhores da ilha $i-1$ e os $k/2$ melhores da ilha $i+1$, seguindo uma topologia em círculo. O conceito de migração insere o MINPGA na classe dos AEs. O NPGA é essencialmente multiobjetivo e o MIIGA, essencialmente multipopulação. O MINPGA herda do NPGA o conceito de nicho de Pareto, o qual é utilizado para resolver possíveis empates entre soluções candidatas à frente de Pareto.

2.4. Otimização de Redes de Distribuição de Água

Uma rede de distribuição de água (RDA) pode ser vista como um grafo direcionado no qual trechos e nós são representados por arestas e vértices, respectivamente (DIAS e GOMES, 2007). Tecnicamente, é um conjunto de condutos, junções e outros equipamentos específicos para viabilizar o transporte de água entre uma fonte (em geral um reservatório) e os pontos de consumo (em geral as residências, comércio e indústrias).

Há diversas preocupações ligadas a uma RDA, desde o seu projeto e durante toda a sua vida útil. O atendimento da demanda (ALENCAR-NETO & CASTRO, 2004; SHERALI e SMITH, 1997), a minimização das perdas por vazamento (GONZÁLEZ-GÓMEZ et al., 2012), a ruptura de condutos (NEELAKANTAN et al., 2008), o aumento de sua rugosidade (MOHAMED e ABOZEID, 2011), a qualidade da água distribuída (BOIX et al., 2011; FERNANDES, 2004), e vulnerabilidade (PINTO et al., 2011) são alguns dos itens que requisitam atenção especial de projetistas e gestores.

A rugosidade, por exemplo, cresce dramaticamente com a idade da RDA e o diâmetro interno dos condutos pode se reduzir significativamente devido a corrosão, deposição e acumulação de resíduos, resultando na diminuição drástica das capacidades hidráulicas do cano afetado (MOHAMED & ABOZEID, 2011).

A análise de RDA consiste em prever o funcionamento do sistema – vazões e perdas de carga nos trechos, pressões e cargas hidráulicas nos nós – quando ocorrem alterações como incrustações, aumento da rugosidade devido ao envelhecimento dos condutos, vazamentos e quebras (FORMIGA e CHAUDHRY, 2008). A demanda representa outro fator de incerteza nos projetos de RDA (LUO et al., 2006).

2.4.1. Otimização Multiobjetivo de uma RDA

A implementação de uma RDA é reconhecidamente bastante onerosa, sendo então necessário o emprego de técnicas de otimização visando ao custo mínimo de implantação da mesma (SHERALI e SMITH, 1997; ALENCAR-NETO e CASTRO, 2004; CASTRO e COSTA, 2004; GOMES e DIAS, 2007; MAIA-JUNIOR, 2013).

Contudo, no projeto de uma RDA surgem naturalmente mais de um objetivo, em geral, conflitantes, como é o caso, e.g., da minimização do custo de implantação *versus* o custo de manutenção da rede (NEELAKANTAN et al., 2008), da maximização da eficiência (RAAD et al., 2010).

A multiobjetividade envolvendo o projeto de uma RDA consiste em encontrar uma linha de troca aceitável entre os diversos objetivos conflitantes (RAAD et al., 2010), especialmente os que visam minimizar custo e maximizar outras características como a confiabilidade hidráulica.

A confiabilidade de um sistema de distribuição de água, i.e., a característica de fornecer o serviço para o qual foi planejada (CARRIÓN et al., 2010), depende de mecanismos de degradação e da integridade dos condutos, a qual pode ser influenciada por processos termo-hidráulicos – além de dependerem da confiabilidade dos equipamentos instalados e da fonte de suprimento (RIMKEVICIUS et al., 2012).

Dessa forma, implementar uma rede de custo mínimo desconsiderando a sua confiabilidade pode resultar em custos maiores durante a vida útil da mesma, contabilizados os custos de reparo propriamente ditos e o custo do inconveniente suportado devido à eventual falha no fornecimento (SHERALI e SMITH, 1997).

Uma das dificuldades no processo de otimização de uma RDA é a disponibilidade de um número limitado de diâmetros de condutos no mercado. A combinação de condutos de diversos diâmetros para compor a rede deve atender a restrições hidráulicas para que a mesma seja funcional. Condutos com diâmetros maiores tendem a ser mais caros, sendo portanto preteridos na implantação. No entanto, condutos de diâmetros menores tendem a quebrar com mais frequência e sofrer mais facilmente com o processo de aumento da rugosidade ao longo da vida útil da rede (SHAMIR, 1979).

Para mais clareza sobre o conflito entre a escolha de diâmetros para a implantação de custo mínimo e a minimização do custo de manutenção considerando substituição de condutos, seguem-se três proposições.

Proposição 1: Se uma rede com n trechos deve ser dimensionada de forma a se obter o menor custo de implantação CI , e se a função preço p do conduto é uma função crescente com os diâmetros d dos condutos, na ausência de critérios hidráulicos, obter-se-á n trechos do menor diâmetro disponível.

Prova: Indução sobre n .

Para $n=1$ o resultado é óbvio. Suponha-se que o resultado se verifique para $n=k$. Tese: o resultado vale para $n=k+1$. De fato,

$$CI = \sum_{n=1}^{k+1} p^d L_i^d = \sum_{n=1}^k p^d L_i^d + p^d L_{k+1}^d$$

Como o comprimento L independe de d , CI será mínimo somente se p^d for o menor dos preços. Logo, a proposição vale para $n=k+1$, c.q.d.

Proposição 2: Se no dimensionamento de uma rede com n trechos a taxa de ruptura t for considerada como único critério de minimização de custo de manutenção CM , e se a função taxa de ruptura for decrescente com os diâmetros d dos condutos, então, os n trechos terão o mesmo diâmetro, a saber, o maior disponível.

Prova: Indução sobre n .

Para $n=1$ é imediato. Suponha-se que o resultado vale para $n=k$.

Tese: vale para $n=k+1$. De fato,

$$CM = \sum_{i=1}^{k+1} t^d p^d L_i^d = \sum_{i=1}^k t^d p^d L_i^d + t^d p^d L_{k+1}^d$$

Desde que L_{k+1} não pode ser modificado para interferir no custo, CM será mínimo somente se d for o diâmetro de menor t , o que prova a proposição.

Proposição 3: Se em uma RDA o preço p de um conduto for uma função crescente com o diâmetro d , e se a taxa de ruptura t do conduto for uma função decrescente com o diâmetro d , então os objetivos de minimizar o custo de implantação CI e de minimizar o custo de manutenção CM são conflitantes.

Prova: Suponha que obter CI mínimo não esteja em conflito com obter CM mínimo. Então, os menores diâmetros resultarão também no menor CM , o que contradiz a hipótese no enunciado. Logo, são conflitantes os objetivos de obter o mínimo CI e de obter o mínimo CM .

A Proposição 3 sugere que o projeto de uma RDA deve buscar balancear o custo de implantação com o custo de manutenção da rede, afim de não perder toda a economia feita na implantação com uma manutenção mais frequente e mais cara.

Neelakantan et al. (2008) consideraram o custo mínimo de implantação e custo de manutenção comparando os resultados obtidos por um AG sem a troca de condutos com os resultados obtidos ao considerar essa troca. Embora tenha aparência, a abordagem de Neelakantan et al. (2008) não é biobjetivo. O seu algoritmo realiza a otimização com uma função-objetivo apenas, fazendo adaptações na mesma para considerar o custo de manutenção e obter outras soluções. Por fim, esses autores apresentam os dois resultados de objetivo simples.

Boix et al. (2011) utilizaram três objetivos para o seu problema de otimização de uma RDA: o caudal de água doce na entrada da rede, a taxa de fluxo de água de entrada de unidades de regeneração, e o número de interligações de rede por meio de uma estratégia lexicográfica, na qual um procedimento de programação não-linear mista (MINLP) é usado em cada passo.

3 – METODOLOGIA

O dimensionamento econômico de uma RDA foi obtido considerando-se o custo de implantação simultaneamente ao custo de manutenção ao longo da sua vida útil. Para a função custo de implantação e para a função custo de manutenção, o fator de variação recai sobre os diâmetros dos condutos. Isto implica que os demais fatores são considerados constantes. O algoritmo MINPGA foi utilizado em conjunto com a biblioteca OOTEN. Foi empregada uma codificação de diâmetros reais para inteiros consecutivos em um anel comutativo². Os quadros apresentam dados numéricos com casas decimais separadas por ponto (padrão estadunidense) em vez de vírgula (padrão nacional) em razão da configuração do EPANET. Os valores em reais seguem o padrão brasileiro de separação por vírgula.

3.1. Funcionamento do Algoritmo MINPGA

Resumidamente, pode-se observar os seguintes passos no MINPGA: a inicialização aleatória de cada população individualmente e com o mesmo número de indivíduos, cada; a ordenação de Pareto aplicada a cada população, a partir de uma avaliação da função-objetivo; o nicho de Pareto sendo aplicado no caso de não haver clareza de vencedor no torneio realizado; o *crossover* e a mutação executados sobre a população, apenas quando a nova população estiver completa; e por fim uma comparação entre as melhores soluções de cada uma das populações finais. A solução escolhida será a melhor solução dentre todas as populações.

O Quadro 5 mostra o MINPGA, que deve finalizar quando encontrar um critério de parada. O critério de parada tanto pode ser o número de iterações máximo estabelecido quanto a diferença mínima entre as soluções atuais e as anteriores, por exemplo.

² Conjunto com pelo menos dois elementos, munidos das operações soma e multiplicação para as quais vale a comutatividade.

Quadro 5- Algoritmo MINPGA

<p>Início</p> <p>Inicialize as populações (P) das K ilhas (I)</p> <p>Enquanto Condição de Parada não Encontrada Faça</p> <p>Faça a ordenação de Pareto em cada P;</p> <p>Faça um torneio para selecionar k indivíduos</p> <p>Se houver vencedor claro</p> <p>coloque-o na nova população P'</p> <p>Se não</p> <p>coloque em P' o que tiver menos indivíduos dentro do nicho de Pareto</p> <p>Se a nova população P' de uma ilha não for preenchida</p> <p>gere aleatoriamente os indivíduos que faltam;</p> <p>Faça sobre a nova população:</p> <p>Execute o <i>crossover</i>;</p> <p>Execute a mutação;</p> <p>Para $1 \leq i \leq K$ Faça</p> <p>Substitua as n piores soluções de P_{i+1} pelos n melhores de P_i</p> <p>Escolha a melhor solução dentre todas as I</p> <p>Fim</p>
--

Fonte: autor.

O MINPGA é essencialmente multiobjetivo, o que inviabiliza o procedimento de testes com problemas uniobjetivo. Além disso, não há parâmetros de comparação entre a abordagem de objetivo único e a abordagem de objetivos múltiplos, exceto que, em geral as abordagens de objetivos múltiplos traduzem melhor a natureza do problema.

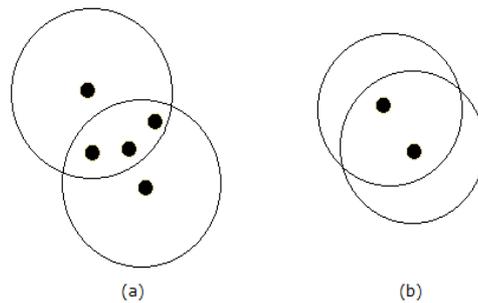
O que se pode observar na literatura especializada (NEELAKANTAN et al., 2008; RAAD et al., 2010; BOIX et al., 2011; RIBAS et al., 2013) é a apresentação da abordagem uniobjetivo como ilustração, não se podendo considerar uma comparação entre as abordagens.

Assim, modificou-se a abordagem de Maia-Junior (2012) para incluir em sua função-objetivo os custos de manutenção considerando a ruptura de condutos ao longo de 20 anos e comparar com os resultados obtidos na abordagem proposta neste trabalho.

O MINPGA utiliza a técnica de nichos de Pareto em conjunto com a técnica de múltiplas ilhas. Os nichos de Pareto são avaliados a fim de se resolver situações de conflito entre duas soluções para decidir qual delas será considerada melhor. Essa técnica consiste na contagem de soluções dentro dos raios centrados nas soluções conflitantes e de tamanho igual à metade da distância linear entre as duas soluções em questão. Da maneira como se definiu o raio, i.e., variável em vez de fixo, torna impossível a situação atípica de se ter as soluções conflitantes incluindo-se

mutuamente em seus nichos. Outra situação atípica evitada é a de que uma mesma solução faça parte de ambos os nichos das soluções em impasse. Dadas duas soluções, S e S' , com *fitness* (f_1, f_2) e (f'_1, f'_2) , respectivamente, calcula-se o raio de nicho como a metade da distância entre os pontos no plano $f_1 \times f_2$. A solução que tiver o menor número de soluções dentro do seu nicho é considerada vencedora. A Figura 12 ilustra as situações indesejáveis: (a) inclusão simultânea de soluções pelas que estão em conflito; (b) inclusão uma pela outra das soluções cuja vencedora não é clara.

Figura 12 - Situações possíveis e indesejáveis com raio fixo

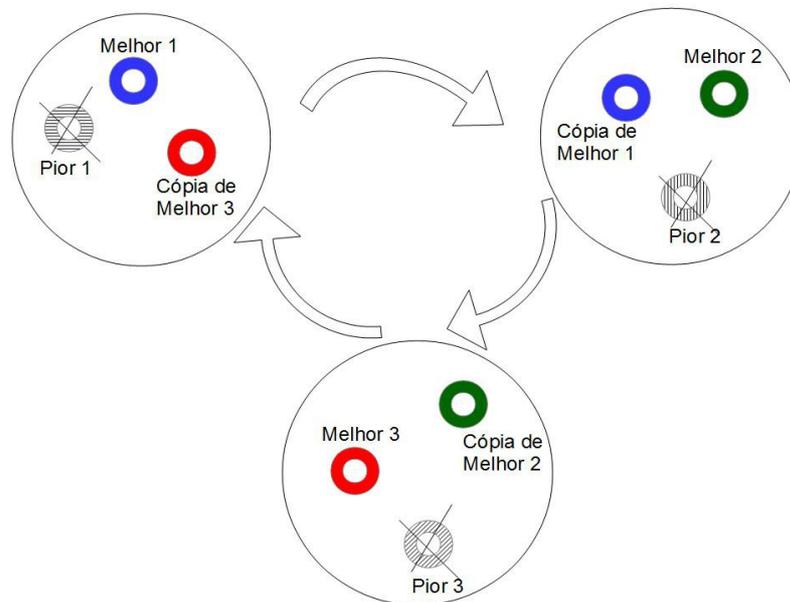


Fonte: autor.

O MINPGA inicializa três ilhas, cada uma com uma população inicial gerada de forma randômica. O *fitness* (adaptabilidade) dos indivíduos é calculado de acordo com duas funções-objetivo, que servirão de base para a ordenação dos mesmos. Cada indivíduo nessas populações estão sujeitos às operações de cruzamento e de mutação. Tanto o cruzamento como a mutação são do tipo aritmético. As ilhas utilizadas melhoram a distribuição espacial da população inicial, além da diversidade.

Cada uma das ilhas executa operações de ordenamento, cruzamento, mutação. Uma das ilhas é considerada como principal e as outras duas como auxiliares. Há uma troca circular de indivíduos entre as ilhas (migração). Após o ordenamento em cada ilha, a ilha 1 recebe uma cópia do indivíduo melhor colocado da ilha 3, que por sua vez recebe o indivíduo melhor colocado da ilha 2, a qual recebe da ilha 1 uma cópia do indivíduo melhor classificado naquela. Cada ilha, simultaneamente ao recebimento de um indivíduo de outra ilha, elimina o indivíduo pior classificado. O processo se repete até que as populações tenham trocado o número completo de seus indivíduos menos dois (devido a operação de cruzamento, que necessita de pelo menos dois elementos). A Figura 13 ilustra a troca de indivíduos entre as três ilhas.

Figura 13 - Troca de soluções entre entre ilhas



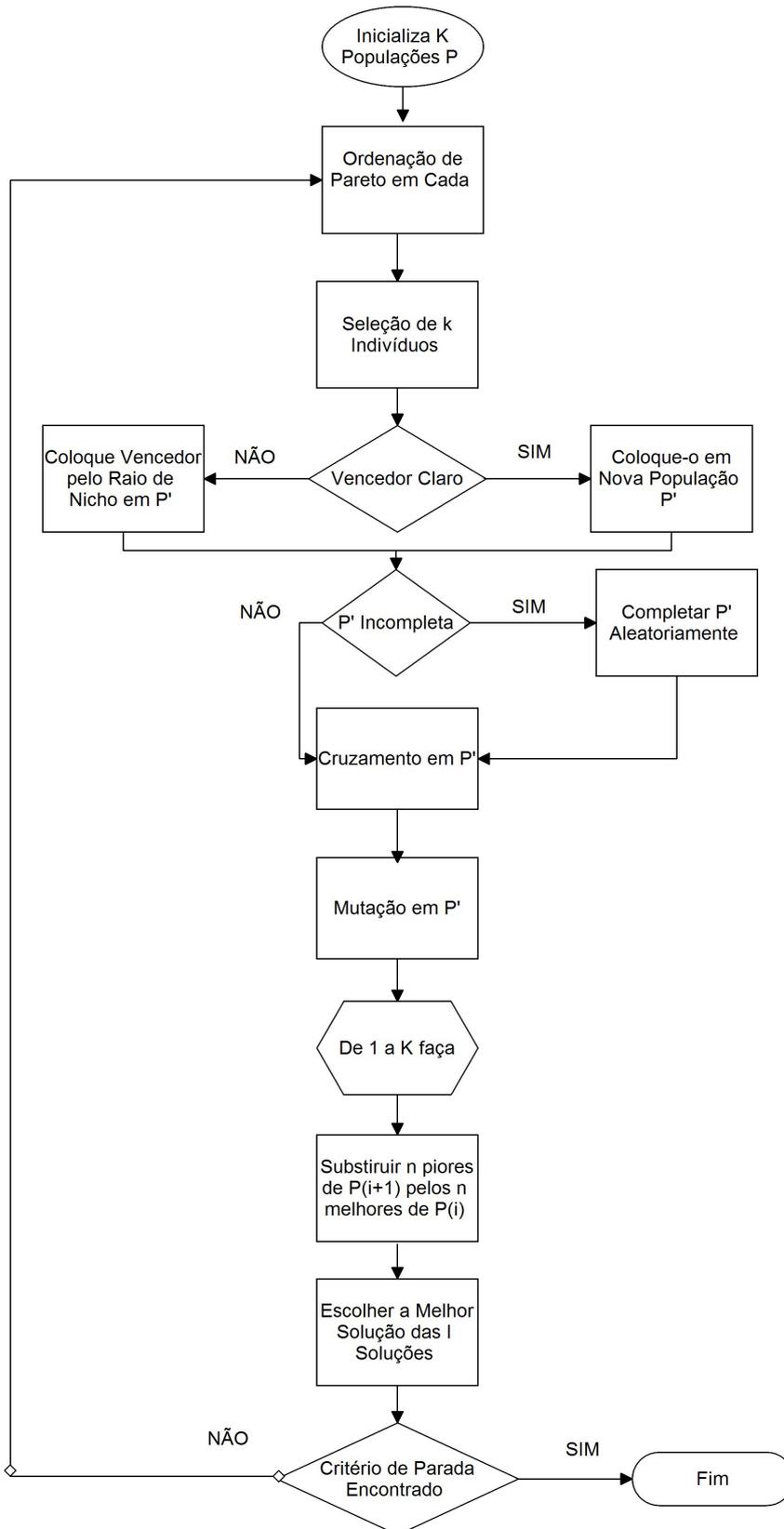
Fonte: autor.

O cruzamento ocorre entre dois indivíduos, um fixado e outro selecionado aleatoriamente. Um diâmetro em uma dada posição é escolhido e cruzado com outro diâmetro na posição correspondente do outro indivíduo. Um novo indivíduo é gerado, mas somente é preservado se tiver *fitness* melhor do que os dois geradores.

Na mutação, escolhe-se uma posição aleatoriamente e muda-se o diâmetro de forma randômica (a mutação tem de ser uma mudança drástica). Cada novo indivíduo é avaliado e preservado somente quando tem *fitness* superior ao indivíduo que sofreu a mutação.

O ordenamento dos indivíduos é feito considerando-se o conceito de dominância de pareto, atribuindo-se posição 0 (zero) aos que não são dominados por qualquer solução. A medida em que o torneio se desenvolve, a posição do indivíduo vai ganhando uma unidade cada vez que ele é confrontado com outro que o domina, forte ou fracamente. Assim, todos competem com todos para que o ordenamento seja completo. Os indivíduos com posição zero, i.e., não dominados por qualquer solução, formarão a frente de Pareto. A avaliação pelo nicho de Pareto somente é utilizada no caso de duas soluções estarem em conflito. A Figura 14 mostra um fluxograma com todas as etapas realizadas pelo MINPGA.

Figura 14 - Esquema do MINPGA



Fonte: autor.

3.2. Oriented Object Toolkit for EPANET – OOTEN

A solução hidráulica das redes encontradas foi efetuada por meio da biblioteca para C++ do EPANET, OOTEN. Para isso, foi instalado o arquivo epanet2.dll e seu respectivo arquivo de cabeçalhos (.h). As funções utilizadas foram ENopen, ENsetlinkvalue, ENgetlinkvalue, ENSolve, e ENgetnodevalue.

A biblioteca OOTEN é baseada na *toolkit* para programadores do EPANET, e incorpora todas as funcionalidades dessa *toolkit* de forma orientada a objeto. Há ainda outras funcionalidades não presentes naquela *toolkit*. EPANET é escrito em ANSI-compatible C e OOTEN em ANSI C++. A OOTEN foi desenvolvida usando Borland C++ Builder, versão 6.0, mas pode ser compilada em qualquer compilador ANSI C e C++ compatíveis. Nenhum componente visual, tais como janelas, estão referenciados no fonte do OOTEN. Como o código-fonte do EPANET, o do OOTEN também é de domínio público.

As funções da OOTEN são: abrir o arquivo INP; capturar o número de condutos na rede em estudo; capturar os comprimentos dos condutos; alterar os diâmetros da rede original; resolver hidráulicamente a rede; capturar as pressões nos nós para verificar a restrição hidráulica de que, exceto ao de um reservatório, a nenhum nó é permitido ter pressão menor que 10 mca.

ENopen abre o arquivo inp para utilização das funções de manipulação de parâmetros (get e set). ENsetlinkvalue permite mudar o valor dos diâmetros dos condutos (*links*) da rede. ENgetlinkvalue é utilizada para retornar o comprimento ou o diâmetro dos condutos. ENSolve resolve hidráulicamente a rede. ENgetnodevalue retorna o valor de parâmetros relacionados aos nós, neste caso, o valor da pressão em cada nó.

Para detalhes sobre a instalação e a utilização da biblioteca OOTEN, consulte o endereço eletrônico <<http://epanet.de/developer/ooten.html#ooten>>.

3.3. Codificação dos Diâmetros da Rede

O diâmetro de um conduto é uma grandeza contínua. No entanto, os diâmetros comercializados têm medidas padronizadas que os colocam na condição de grandeza discreta. Por esse motivo, foi criada uma associação entre o conjunto dos nove diâmetros comercializados e o anel algébrico \mathbb{Z}_9 , com as operações soma e multiplicação.

Em álgebra, diz-se que um anel é formado por um conjunto e duas operações, soma e multiplicação, as quais apresentam as propriedades: comutatividade da soma; associatividade da soma; presença de elemento neutro para a adição; presença do elemento simétrico aditivo;

associatividade do produto; distributividade do produto à direita e à esquerda de uma soma (LEQUAIN e GARCIA, 2005). Refere-se aqui ao anel como anel algébrico, sempre que necessário, para não confundir com o conceito de anel parte de uma rede.

Utilizando o anel algébrico em vez do conjunto de diâmetros reais, evita-se o inconveniente de os diâmetros não serem consecutivos, i.e., de haver infinitos números reais entre um diâmetro e outro. No anel, os elementos são consecutivos, possibilitando que dois princípios sejam seguidos:

- (i) a operação de cruzamento entre indivíduos de uma mesma espécie deve sempre gerar indivíduos da mesma espécie;
- (ii) a operação de mutação não deve gerar indivíduos de espécie diferente da do indivíduo que sofreu a mutação.

Os dois princípios supra enunciados fazem sentido do ponto de vista da teoria sobre AE, uma vez que a mudança sofrida pelos indivíduos diz respeito à combinação de seus genes e não a uma mudança no gene em si. Isto é, a combinação genética muda, o gene não.

Os diâmetros (internos) comerciais são associados aos elementos do anel \mathbb{Z}_9 , de acordo com o Quadro 6:

Quadro 6- Codificação de Diâmetros

Diâmetro Interno (mm)	54.6	77.2	100	156.4	202.2	252	299.8	394.6	498.4
Elemento de \mathbb{Z}_9	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Fonte: autor.

A vantagem de se utilizar o anel em vez dos diâmetros reais pode ser ilustrada: a soma do segundo com o nono diâmetro real é um número para o qual não há diâmetro previsto, i.e., 575.6 mm; enquanto a soma dos respectivos elementos do anel algébrico, 1 e 8, resulta em 0, i.e., o primeiro elemento do anel, ou um diâmetro previsto. Essa característica garante que os princípios (i) e (ii), enunciados anteriormente, estarão sendo seguidos. Importa citar o teorema dos esquemas, que determina a probabilidade de instâncias de dado problema gerar outra instância do mesmo problema. Cada esquema é uma instância possuindo valores fixos em dadas posições. Um indivíduo pertence a um esquema se, e somente se, tem os mesmos valores representativos daquele esquema nas respectivas posições. Considere-se, e.g., um esquema E dado por $\{[2][*][*][*][1][2][*]\}$. O indivíduo s dado por $\{[2][1][8][8][1][2][5]\}$ pertence ao esquema E, mas o indivíduo s' dado por

$\{[1][3][1][7][1][2][0]\}$ não pertence a E. O símbolo * significa indiferença, i.e., pode-se ter qualquer valor nas posições marcadas com esse símbolo.

A operação soma no anel \mathbb{Z}_9 é dada no Quadro 7. A operação produto pode ser vista no quadro Quadro 8.

Quadro 7- Definição da Operação Soma (+) no Anel

(+)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	6	7	8	0
2	2	3	4	5	6	7	8	0	1
3	3	4	5	6	7	8	0	1	2
4	4	5	6	7	8	0	1	2	3
5	5	6	7	8	0	1	2	3	4
6	6	7	8	0	1	2	3	4	5
7	7	8	0	1	2	3	4	5	6
8	8	0	1	2	3	4	5	6	7

Fonte: autor.

Quadro 8- Definição da Operação Produto (X) no Anel

(×)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
2	0	2	4	6	7	1	3	5	7
3	0	3	6	0	3	6	0	3	6
4	0	4	8	3	7	2	6	1	5
5	0	5	1	6	2	7	3	8	4
6	0	6	3	0	6	3	0	6	3
7	0	7	5	3	1	8	6	4	2
8	0	8	7	6	5	4	3	2	1

Fonte: autor.

Observe-se que o resultado da operação produto definida no Quadro 8 aplicada a dois elementos quaisquer do anel algébrico, sempre é um elemento do anel algébrico. Assim como na operação soma, a operação produto é feita entre os elementos da primeira coluna e os elementos da primeira linha. Para detalhes sobre a teoria dos anéis veja Garcia e Laquain (2005).

3.4. Funções-Objetivo

Para a implantação de um projeto de RDA, o processo de otimização que vise ao custo mínimo resultará na escolha de uma rede que tenha os condutos de menor diâmetro (menor preço).

Porém, os condutos de menor diâmetro são geralmente mais susceptíveis a quebra do que os de maior diâmetro (maior preço), impactando no custo de manutenção ao longo da vida útil da rede. Assim, foi assumida a hipótese de que condutos de diâmetros maiores suportam maior variação de pressão.

Com base nessa hipótese, minimizar o custo de implantação e minimizar o custo de manutenção de uma RDA são objetivos conflitantes. É necessário, então, definir uma função-objetivo para cada custo, para que o AE avalie cada solução e efetue o torneio entre as mesmas.

O custo de implantação é calculado aplicando-se a fórmula seguinte:

$$CI = \sum_{i=1}^n C_{di} L_i \quad (8)$$

Na fórmula 8:

- CI → Custo de Implantação do projeto de RDA (R\$);
- n → Número de trechos presentes na RDA;
- C_{di} → Custo associado ao diâmetro no trecho i (R\$/m);
- L_i → Comprimento do i -ésimo trecho (m).

O custo de manutenção (CM) é calculado por meio da seguinte fórmula (NEELAKANTAN et al., 2008):

$$CM = \sum_{j=1}^r \left(\frac{1}{(1+i)^j} \sum_{k=1}^j p_r \cdot \exp(A \cdot j) I_{(k)} \cdot I_{(k)} \right) \quad (9)$$

Os elementos da fórmula 9 tem as seguintes definições:

- CM → Custo de Manutenção do projeto de RDA (R\$);
- r → Número de anos de vida útil da rede considerada;
- t → Número de trechos presentes na rede;
- p_r → Taxa de quebra por período (quebra/ano-km);

- $I_{(k)}$ → Custo de implantação por medida de comprimento do trecho k com diâmetro $d_{(k)}$ (R\$/m);
- $l_{(k)}$ → Comprimento do k-ésimo trecho (m).
- i → Taxa de desconto por ano.
- A → Coeficiente de crescimento da taxa de quebra por ano.

O termo $p_r \cdot \exp(A \cdot j)$ (SHAMIR e HOWARD, 1979, p. 252) descreve a taxa de quebra em função do tempo. A conversão do custo para o valor presente é dado pelo termo $1/(1+i)^j$. Para escolher a taxa de desconto, $i=4\%$, considerou-se a tendência decrescente entre os anos de 1980 e 2011 do IPCA (IBGE) em conjunto com o cenário macroeconômico do plano plurianual 2012-2015 (CONGRESSO, 2011). Adicionalmente, considerou-se que, sob condições normais, preços como os dos condutos estão associados mais a inflação causada por elevações de custo do que por pressões de demanda agregada (LUQUE e VASCONCELOS, 2004).

O processo inflacionário, em especial o de elevadas taxas, particularmente taxas que oscilam, tem sua previsibilidade dificultada por parte dos agentes econômicos e provoca grandes distorções na estrutura produtiva (Idem). Portanto, a taxa utilizada para atualização do preço pode ser estimada de acordo com o cenário macroeconômico.

A inflação de custos, i.e., a provocada por aumentos de custos, diminui a oferta agregada. Ela ocorre quando os custos de insumos importantes para a produção aumentam e são repassados aos preços dos produtos (ibidem).

Mota (2007, p. 70) apresenta uma fórmula a qual chama de fator de atualização ou fator de valor presente, que realiza a conversão para o presente dos custos anuais realizados durante o alcance do projeto. No entanto, não fica claro se a fórmula é empírica, se foi desenvolvida por aquele autor, ou se é de alguma fonte não indicada na obra. Assim, optou-se por aplicar o fator de atualização de preços presente em Neelacantan et al. (2008).

Desde que a taxa de quebra anual por quilômetro para condutos de uma RDA constitui-se um estudo à parte e que não é objetivo do presente trabalho, as taxas de quebra utilizadas na função-objetivo CM foram adaptadas da literatura. O coeficiente de crescimento da taxa de quebra é oriundo de Neelacantan et al. (2008), a saber, $A=0,01$. Os números de quebras por ano por quilômetro no início do processo atribuídas a cada conduto de acordo com seu diâmetro e o respectivo preço por unidade comprimento estão dispostas no Quadro 9:

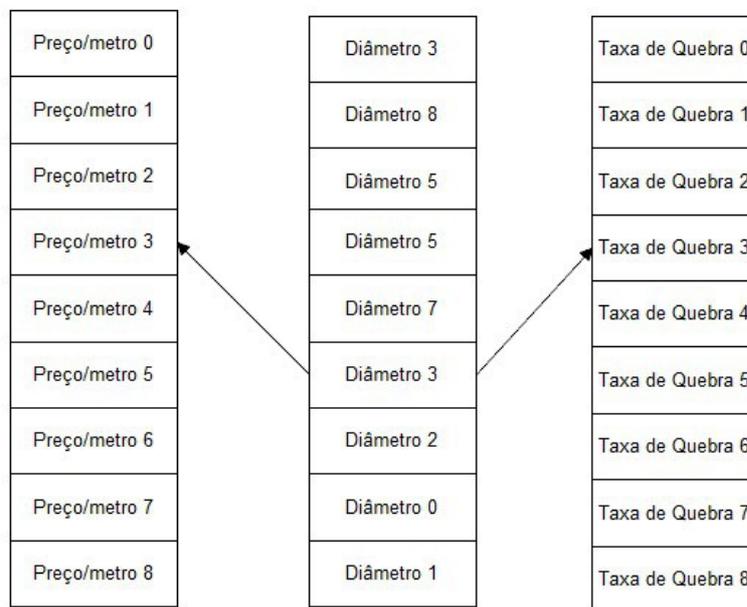
Quadro 9- Taxas de Quebra

Diâmetro Interno (mm)	54.6	77.2	100.0	156.4	202.2	252.0	299.8	394.6	498.4
Taxa de Quebra (quebra/ano-km)	0.25	0.22	0.19	0.16	0.13	0.10	0.07	0.04	0.01
Preço (R\$/m)	17.4	22.49	29.86	50.69	77.74	112.38	152.87	271.33	429.39

Fonte: adaptada de Neelacantan et al. (2008)

A Figura 15 ilustra a associação entre diâmetros, preços e taxas de quebra.

Figura 15 - Associação de preços e de taxas de quebra aos diâmetros



Fonte: autor.

3.5. Optimization of a Network By Evolutionary Algorithm – ONEBEAR

O mecanismo de otimização se inicia com a abertura do arquivo contendo informações sobre a rede, como o número de trechos e o comprimento destes. Em seguida o ciclo do AE se inicia, gerando as populações aleatórias e não especialista com diâmetros codificados nas três ilhas consideradas. As redes então sofrem as operações usuais de um AE, gerando novas populações e repetindo o ciclo até que o critério de parada seja atingido. A frente de Pareto será formada com a população da ilha principal, sendo que as redes que compõem a frente devem ainda obedecer a restrição hidráulica sobre a pressão mínima em cada nó.

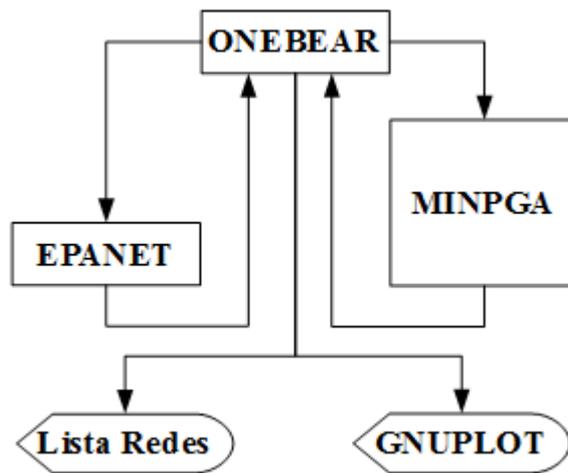
Inicialmente, pensou-se em impor tal restrição desde o início do ciclo do AE, o que

aumentaria consideravelmente o tempo computacional. Posteriormente, optou-se por fazer a verificação apenas com as redes que comporiam a frente de Pareto, evitando o inconveniente anterior. Isto foi possível porque, em problemas biobjetivo, cada função atua implicitamente como uma função de penalização, presente no caso dos problemas uniobjetivo. Isto é, em problemas uniobjetivo, quando certa restrição não é atendida, uma função de penalização é acionada para tornar inviável aquela solução. No caso dos objetivos conflitantes, CI e CM, cada um atua implicitamente como função de penalização do outro, gerando certo equilíbrio nas soluções obtidas, o que de fato é esperado pelo conceito de frente de Pareto.

Para verificar as pressões em cada nó são chamadas funções do EPANET. Elas configuram a rede original e resolvem-na hidraulicamente, mostrando por fim as pressões nos nós. As pressões são avaliadas em cada nó e as redes que não atenderem à condição de pressão mínima são descartadas.

O esquema ONEBEAR é ilustrado com a Figura 16.

Figura 16-Esquema ONEBEAR



Fonte: autor.

4 – RESULTADOS

Dado que qualquer solução pertencente à frente de Pareto representa uma solução sub-ótima, e portanto adequada ao problema de otimização apresentado, apresentar-se-á a frente de Pareto obtida para as redes Açailândia e Belém, escolhendo-se apenas uma ou algumas delas para listar seus respectivos diâmetros. Dos resultados com a rede Hanoi, será mostrado apenas uma solução para comparar com a solução dada na abordagem uniobjetivo do LENHSNET. A listagem de completa de todas as redes sub-ótimas encontradas, com seus diâmetros e trechos é feita em arquivo gerado pelo programa que implementa o esquema de otimização ONEBEAR.

A presente abordagem do problema de dimensionamento de redes difere de abordagens anteriores que trataram o problema com objetivo simples de minimizar o custo de implantação (MAIA-JUNIOR, 2012), ou comparar resultados de objetivo simples considerando e não considerando o custo de manutenção (NEELAKANTAN et al., 2008), ou tratando o problema como objetivos múltiplos, mas sem considerar o custo de manutenção como aqui foi formulado (RAAD et al., 2010; BOIX et al., 2011; RIBAS et al., 2013).

As redes Belém e Açailândia são oriundas de arquivos no formato INP geradas pelo módulo UFC4 do sistema UFC, com base em redes reais. O arquivo INP relativo a rede Hanoi está disponível no site do LENHS.

4.1. Rede Belém

A rede apelidada de Belém é composta por 18 trechos e 18 nós, incluindo 1 reservatório. O Quadro 10 mostra parâmetros da rede, como o preço de acordo com o diâmetro interno e a demanda em cada nó.

Quadro 10- Parâmetros da rede Belém

[DIAMETROS COMERCIAIS] 50/75/100/150/200/250/300/400/500/ (PREÇO DOS TUBOS P/ M) 5.25/9.91/19.94/30.57/51.53/76.95/108.45/182.33/285.27/		
[JUNÇÕES]		
Núm	Elev (m)	Demanda (L/s)
2	7.53	2.49
3	8.66	0
4	7.56	1.42
5	7.52	1.22
6	7.53	0.35
7	7.68	2.89
8	7.24	8.57
9	8.63	2.03
10	7.63	3.30
11	7.99	0.00
12	8.06	1.57
13	7.5	4.47
14	7.53	5.14
15	7.45	4.57
16	7.29	1.50
17	7.69	1.79
18	7.37	1.60

Fonte: autor.

O Quadro 11 mostra as características básicas do reservatório.

Quadro 11 - Características do reservatório na rede Belém

[RESERVATÓRIO]		
Núm	Carga (m)	Tipo
1	30.45	Reserv. Circular (22.7, 32, 30, 9, 7.75)

Fonte: autor.

As coordenadas dos nós podem ser vistas no Quadro 12.

Quadro 12 - Coordenadas dos nós na rede Belém

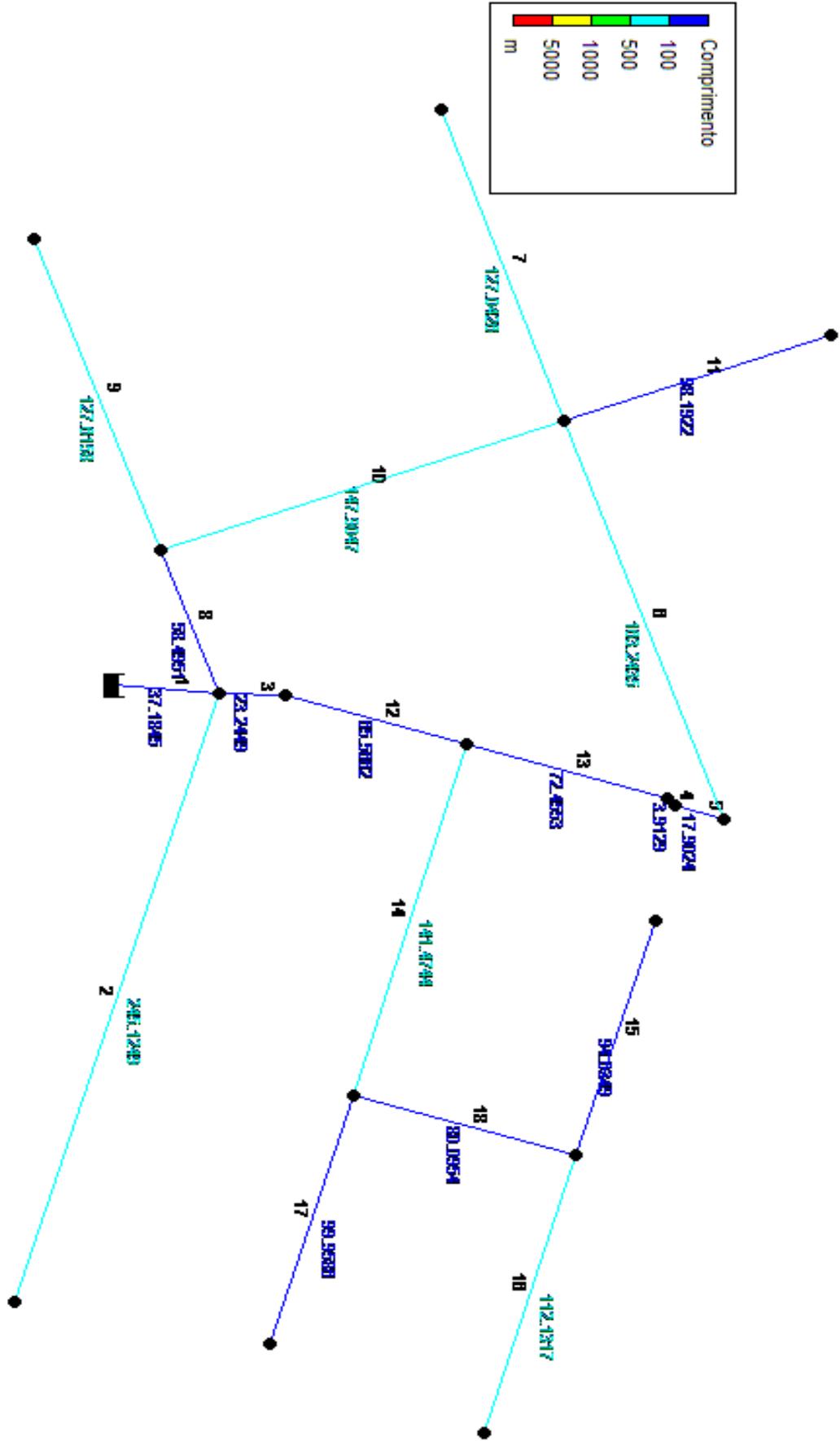
Nó	Coordenada x	Coordenada y
2	404.62	197.65
3	639.45	127.34
4	405.79	220.87
5	445.04	353.19
6	448.30	355.36
7	453.50	372.49
8	299.86	317.34
9	180.03	275.13
10	349.52	178.02
11	229.68	134.15
12	266.97	409.86
13	424.16	283.81
14	560.04	244.40
15	582.55	321.27
16	492.70	349.00
17	690.14	289.69
18	655.70	215.41
1	401.85	160.57

Fonte: autor.

Os tubos são de PVC e a rugosidade absoluta associada é de 0,0015 mm. A utilização de outros materiais, mais caros e mais duráveis, implica elementarmente em aumento de custo de implantação e em diminuição do custo de manutenção, nos termos aqui considerados. De maneira que uma simulação com outros materiais para os condutos requisitaria outras taxas de quebra, não sendo portanto necessária qualquer mudança profunda na metodologia ora apresentada.

O traçado da rede Belém pode ser visto na Figura 17.

Figura 17- Traçado da Rede Belém



Fonte: autor.

Os comprimentos de cada trecho são dados em metros e estão dispostos no Quadro 13.

Quadro 13- Comprimentos dos trechos da rede Belém

Trecho	1	2	3	4	5	6
Comprimento (m)	37.18	245.12	23.24	3.91	17.90	163.24
Trecho	7	8	9	10	11	12
Comprimento (m)	127.04	58.50	127.62	147.90	98.19	65.57
Trecho	13	14	15	16	17	18
Comprimento (m)	72.46	141.47	94.03	112.13	99.96	80.10

Fonte: autor.

Embora não haja até o momento uma abordagem biobjetivo de fato que possibilite traçar um paralelo com a metodologia apresentada neste trabalho, é possível adaptar uma abordagem uniobjetivo para que a mesma considere o custo de manutenção. Isto significa que a escolha da rede ótima não irá considerar simultaneamente o custo de implantação, como na abordagem alvo deste trabalho, mas que buscará a rede ótima a partir de uma modificação na sua única função-objetivo, na linha do que foi feito por Neelacantan et al. (2008).

Assim, o módulo UFC4 do sistema UFC foi modificado para que sua função-objetivo considerasse o custo de manutenção nos mesmos termos aplicados ao ONEBEAR. Dez simulações foram feitas de modo a avaliar sob quais parâmetros obter-se-ia a rede mais econômica considerando-se o custo de manutenção. A combinação que resultou no menor custo foi a apresentada aqui.

O módulo do sistema UFC para dimensionamento econômico de redes utiliza uma AG simples para proceder a otimização. Desse modo, poder-se-ia esperar a imposição de penalidades caso alguma rede selecionada não atendesse a restrição hidráulica sobre pressões mínimas. No entanto, o UFC4 utiliza um controle interno sobre as redes quando é feito o torneio. Esse controle consiste em contar o número de nós em que a restrição é atendida. Ao comparar duas redes, a rede que tiver o maior número de nós atendendo à restrição é considerada vencedora. Tal procedimento se aproxima muito do critério de múltiplos objetivos, pois o total de nós atendendo a condição sobre a pressão pode ser vista como uma função-objetivo, a qual é utilizada para comparar a adaptabilidade da rede.

O relatório gerado pelo UFC4 está no Quadro 14. Nele se pode ver informações como pressões nos nós, perdas de carga, diâmetros para cada trecho e seus respectivos comprimentos, e o custo total, considerando-se a manutenção ao longo de 20 anos. O relatório original mostra o número de segundos para realizar a simulação. Essa informação foi omitida

porque, conforme provado por Carrano et al. (2011), o tempo para atingir uma solução não deve ser usado como parâmetro para avaliar o desempenho de um AE ou um AG.

Quadro 14 - Relatório do UFC4 para a rede Belém

Universidade Federal do Ceará				
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental				
UFC4-Otimização de Redes por Algoritmo Genético				
C:\UFC\Exemplos\Belém - PA\Rede_Belém_Água.inp				

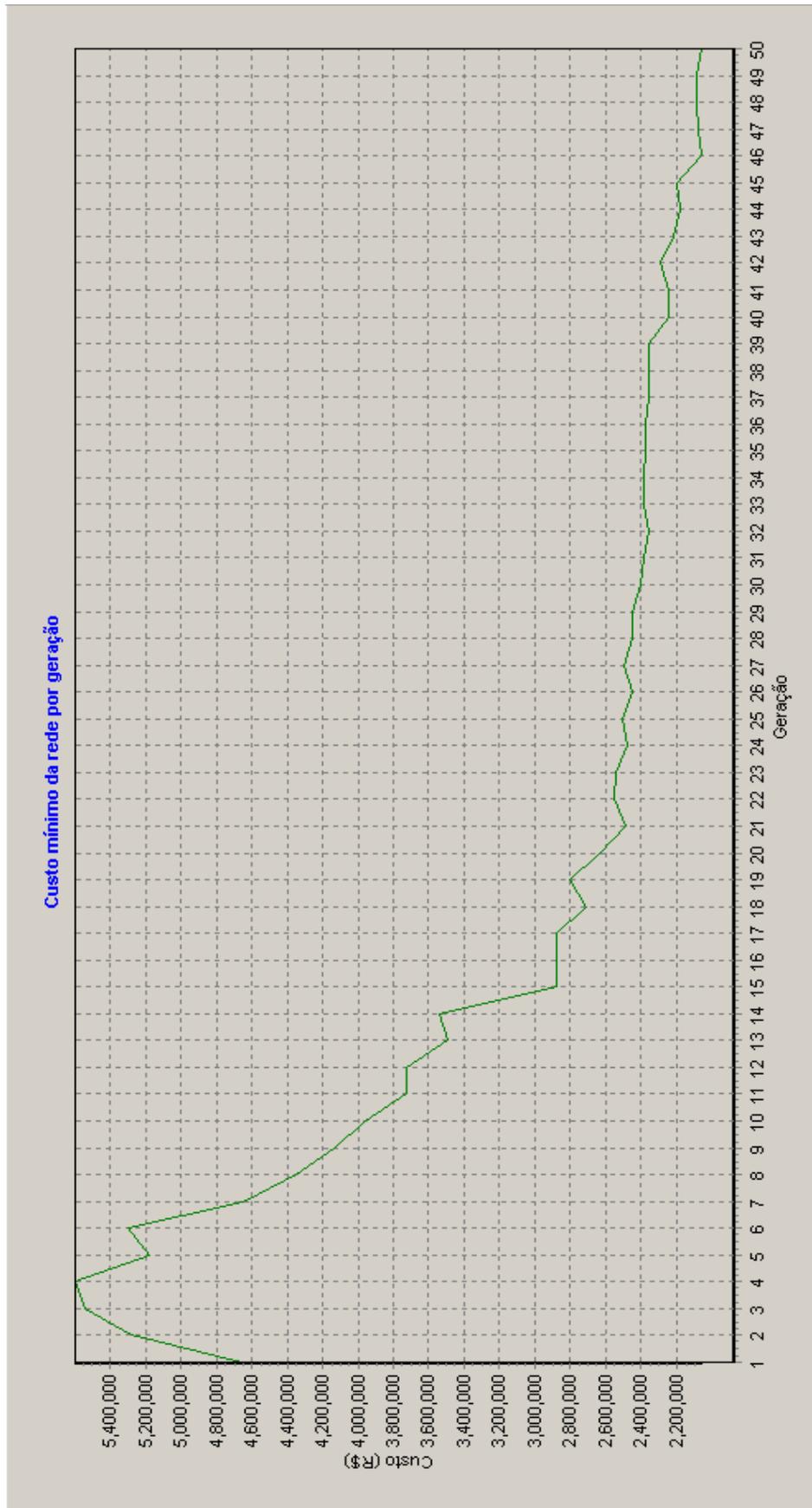
Trecho	L	D	PC	v
1	37.18	156.4	23.00	2.23
2	245.12	54.6	31.06	1.31
3	23.24	77.2	154.39	4.01
4	3.91	77.2	2.21	0.38
5	17.90	100	0.48	0.19
6	163.24	77.2	0.53	0.17
7	127.04	77.2	1.85	0.34
8	58.50	156.4	3.89	0.84
9	127.62	54.6	9.72	0.68
10	147.90	77.2	52.03	2.20
11	98.19	77.2	1.18	0.26
12	65.57	100.0	39.57	2.25
13	72.46	54.6	24.98	1.16
14	141.47	100.0	18.05	1.46
15	94.03	77.2	1.09	0.25
16	112.13	54.6	7.73	0.60
17	99.96	54.6	6.32	0.53
18	80.10	77.2	20.57	1.32
Nó	cota	PE	P	
1	7.53	32.22	22.06	
2	8.66	31.09	13.32	
3	7.56	32.19	18.45	
4	7.52	32.23	14.08	
5	7.53	32.22	14.06	
6	7.68	32.07	13.90	
7	7.24	32.51	14.43	
8	8.63	31.12	12.81	
9	7.63	32.12	21.74	
10	7.99	31.76	20.14	
11	8.06	31.69	13.50	
12	7.50	32.25	15.91	
13	7.53	32.22	13.33	
14	7.45	32.30	11.76	
15	7.29	32.46	11.82	
16	7.69	32.06	10.65	
17	7.37	32.38	12.86	
18	30.45	9.30	0.00	
Custo:2056577.15				

Legenda:				
L=comprimento em metros;				
D=diâmetro em mm;				
PC=perda de carga em m/km;				
P=pressão no nó em mca;				
PE=pressão estática mca;				
v=velocidade em m/s				

Fonte: autor.

A convergência ao longo de 50 gerações pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Convergência UFC4 quanto ao CM



Fonte: autor.

De acordo com o gráfico na Figura 17, a primeira geração foi melhor que as seis seguintes, melhorando consideravelmente entre a sétima e a décima primeira gerações. Da décima quarta para a décima quinta gerações houve um ganho considerável, mantendo-se a tendência para um mínimo a partir desse ponto, sendo mais sutil o ganho no entanto. O algoritmo se estabiliza após 45 gerações, obtendo uma solução viável mais econômica dentre as que foram testadas.

Testes com um número maior de gerações foram executados, porém os resultados não foram melhores do que os apresentados com 50 gerações.

Os parâmetros utilizados, conforme Figura 19, que exibe tela do sistema UFC4, foram população inicial de diâmetros, 100; seleção por torneio; taxa de cruzamento, 95%; e taxa de mutação, 0.5%.

Figura 19 - Parâmetros utilizados no UFC4

Opções	
População de Diâmetros Inicial	100
Tipo de Seleção	Torneio
Taxa de Crossover(%)	95
Taxa de Mutação(%)	0.5
Número de Gerações	50

Fonte: autor.

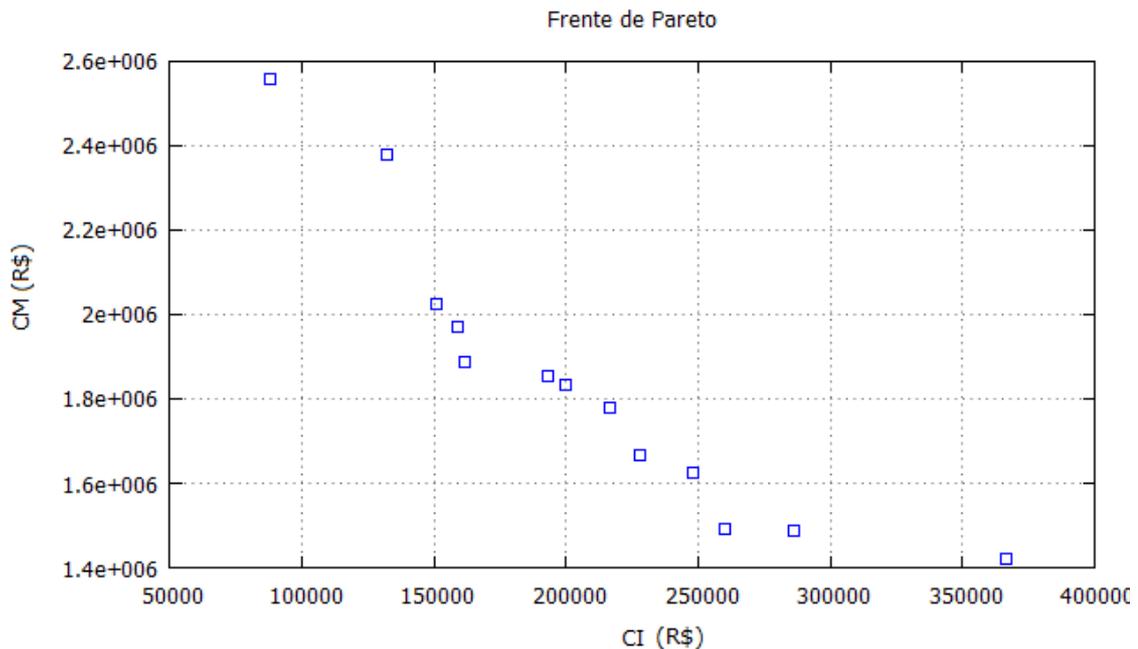
Com os parâmetros escolhidos, a rede mais econômica ao se considerar CM nos mesmos termos aplicados ao ONEBEAR, a rede mais econômica encontrada pelo UFC4 custaria R\$ 2.056.577,15.

A mesma rede foi submetida à abordagem biobjetivo. Com esta abordagem, conseguiu-se obter uma rede com CM menor que R\$ 1,5 milhão, menor portanto que a solução sub-ótima apresentada pela abordagem uniobjetivo testada no UFC4.

A Figura 20 mostra as soluções com *ranking* zero, i.e., as soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução. Em outras palavras, a partir das soluções dominantes compondo a frente de Pareto, não é possível melhorar um objetivo sem piorar o outro. A frente de Pareto mostra um leve adensamento de soluções intermediárias, com extremos isolados. Note que, conforme esperado, há geralmente um intervalo entre as soluções. Isto ocorre ou porque a solução vizinha perdeu em uma disputa na qual estava em conflito com a solução que aparece, e portanto seu *ranking* foi incrementado, ou porque possuía *ranking* zero

mas não atendia a restrição hidráulica, a qual foi feita *a posteriori*, conforme dito.

Figura 20- Soluções para CI (R\$) versus CM (R\$) para a Rede Belém



Fonte: autor.

No Quadro 15, dispõem-se os diâmetros de cada trecho das redes 1, 2 e 3. Todos os nós associados apresentaram pressão maior que 10 mca. Comparando-se essas redes com a rede encontrada pelo UFC4, nota-se que nessa última, nenhum diâmetro é maior que o de 156,4 mm, enquanto as primeiras apresentam diâmetros de até 498,4 mm. Isso ocorre muito provavelmente pelo fato de, no UFC4 a restrição hidráulica ser feita *a priori*, enquanto no ONEBEAR, *a posteriori*. Adicionalmente, esse controle no UFC4 ocorre semelhantemente a uma função-objetivo implícita. No ONEBEAR o segundo objetivo funciona como uma função de penalização implícita. Frise-se, no entanto, que nenhuma das duas ferramentas se utiliza de funções de penalização. Para abordagens de objetivo único, a forma de controle sobre a pressão mínima por nó, representa uma inovação, tornando desnecessária a presença de uma função de penalidade.

O custo maior apresentado pelo UFC4 se traduz pelo fato de predominarem na rede encontrada por ele os diâmetros menores, que, por hipótese, tem taxas de quebra maiores, necessitando mais substituições ao longo de 20 anos. Nas redes dadas pelo ONEBEAR predominam os diâmetros maiores, por hipótese, com baixas taxas de quebra, precisando de menos substituições ao longo da vida útil da rede. Obviamente, o custo de implantação é menor na rede dada pelo UFC4, o que é consequência de sua ênfase em custo mínimo de implantação.

Quadro 15- Três redes subótimas obtidas pelo processo de otimização ONEBEAR

Rede 1		Rede 2		Rede 3	
Trecho	DI (mm)	Trecho	DI (mm)	Trecho	DI (mm)
1	394.6	1	100.0	1	156.4
2	252.0	2	156.4	2	498.4
3	77.2	3	156.4	3	100.0
4	100.0	4	100.0	4	202.2
5	100.0	5	252.0	5	54.6
6	394.6	6	394.6	6	394.6
7	394.6	7	100.0	7	394.6
8	202.2	8	252.0	8	299.8
9	100.0	9	202.2	9	202.2
10	498.4	10	77.2	10	299.8
11	252.0	11	202.2	11	77.2
12	100.0	12	498.4	12	100.0
13	299.8	13	202.2	13	299.8
14	299.8	14	299.8	14	498.4
15	252.0	15	394.6	15	252.0
16	100.0	16	394.6	16	156.4
17	100.0	17	252.0	17	252.0
18	498.4	18	77.2	18	498.4

Legenda: DI – Diâmetro Interno (mm).

Fonte: autor.

Os custos para as três redes listadas no Quadro 15, estão dispostos no Quadro 16.

Quadro 16- Custos das Redes 1, 2 e 3

Rede	CI (R\$)	CM (R\$)
1	88.019,25	2.556.607,03
2	286.429,63	1.486.982,52
3	133.555,82	2.107.521,05

Fonte: autor.

Conforme pode ser observado no Quadro 16, a rede 1 é a rede de menor CI, sendo a rede 2 a de maior CI. Em contrapartida, a rede 1 representa o maior CM; enquanto a rede 2, o menor CM. A rede 3 mostra valores intermediários entre os maiores e menores CI e CM. Note-se que a solução obtida pelo UFC4 com CI inferior a todos os CI obtidos pelo ONEBEAR, a saber, R\$ 39.593,32, posto no contexto biobjetivo, domina as soluções rede 1 e rede 3, mas não domina a solução rede 2. Outro ponto a ser enfatizado é que o mecanismo de controle sobre as pressões no UFC4 é diferente do mecanismo de controle no ONEBEAR. No UFC4 as redes com a maior quantidade nós com pressões igual ou superior à mínima são consideradas vencedoras nos torneios. Mas esse mecanismo não garante que todos os nós das redes vencedoras atendem à restrição de pressão mínima. Por seu turno, o ONEBEAR ordena as redes e descarta as redes em que pelo menos um nó não apresente pressão igual ou superior à mínima admitida.

4.2. Rede Açailândia

A rede Açailândia possui 666 trechos, 432 nós e 4 reservatórios. Trata-se de uma rede malhada. A rede foi submetida ao UFC4 e ao ONEBEAR sob as mesmas condições para a função-objetivo do custo de manutenção. Tentou-se ainda proceder ao dimensionamento utilizando o LENHSNET, mas essa tentativa resultou em erro de alocação de memória.

Todos os dados necessários ao toolkit do EPANET para a solução hidráulica das redes são alimentadas por um arquivo INP, o qual é aberto tanto pelo UFC4 quanto pelo ONEBEAR em seus processos de otimização.

O arquivo INP contém dados como demanda por nó, elevatória, comprimento por trecho, diâmetros de condutos (os quais serão modificados durante o processo de otimização), informações sobre reservatórios (veja Quadro 17). Os comprimentos por trecho são utilizados em ambas as funções-objetivo, CI e CM, pois constituem parte do cálculo desses custos. O diâmetro de cada conduto também é imprescindível para as funções-objetivo, uma vez que as mesmas utilizam preços e taxas de quebra distintos para cada diâmetro.

O mecanismo de alimentação das funções-objetivo faz uma verificação do diâmetro em dado trecho e fornece o preço a ele associado para o cálculo do CI. Para o cálculo de CM, tanto o preço quanto a taxa de quebra devem ser fornecidos pelo mecanismo de alimentação da função-objetivo. Assim, o mecanismo funciona associando diâmetros a seus respectivos preços e a suas respectivas taxas de quebra.

Os dados dos reservatórios estão listados no Quadro 17.

Quadro 17 - Reservatório na rede Açailândia

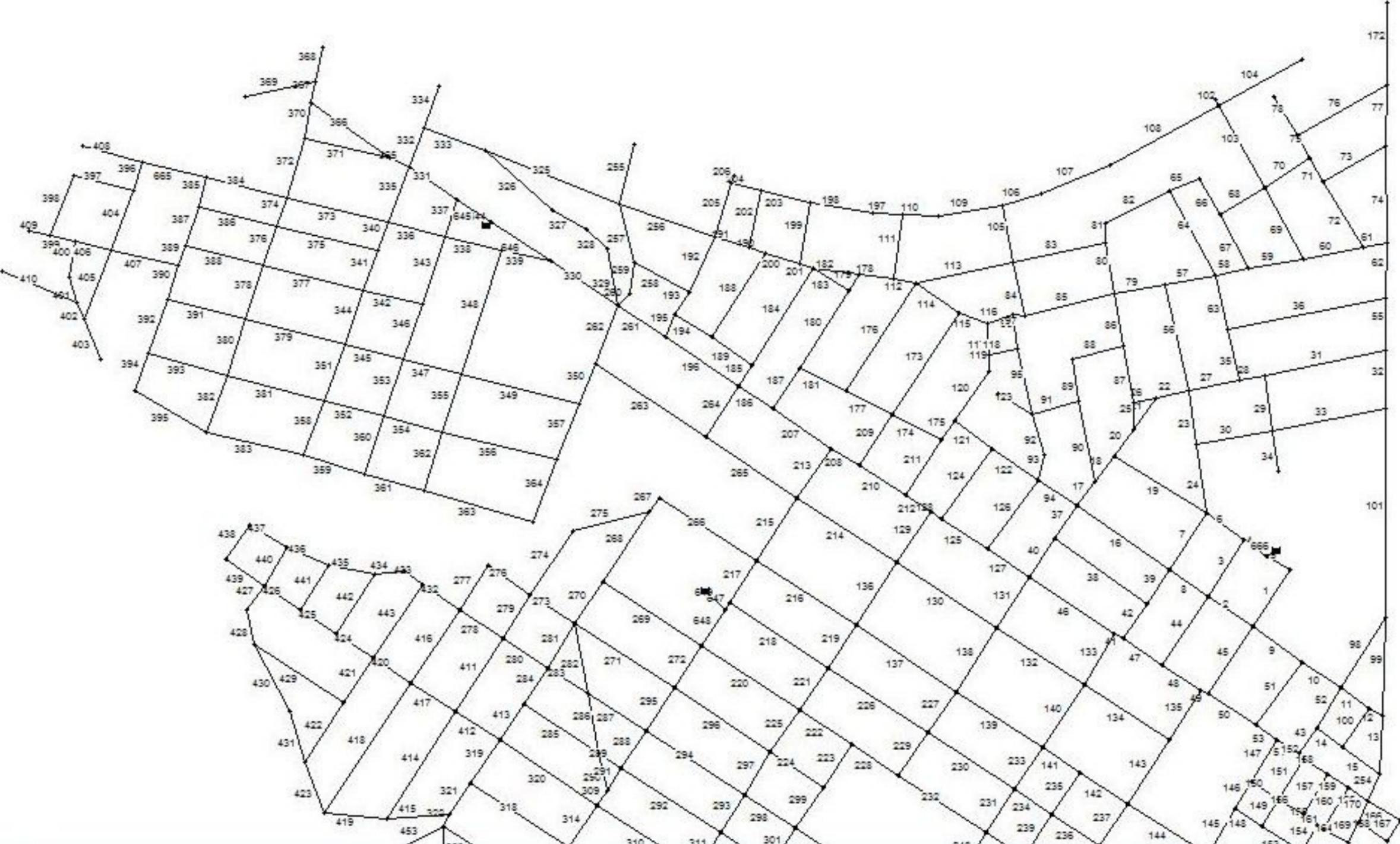
Nó	Carga (m)	Tipo
433	262.10	Reserv.Circular(15,21,21.5,6,247.1)
421	261.24	Reserv.Circular(2,10.5,11,7,259.24)
422	260.90	Reserv.Circular(12,18.5,19,7,248.9)
425	238.10	Reserv.Circular(10,18.5,19,7,228.1)

Fonte: autor.

O traçado da rede Açailândia pode ser visto na Figura 21. Os comprimentos da rede são utilizados nas duas funções-objetivo, pois o preço de cada conduto é dado por metro de acordo com o seu diâmetro. O anexo 2 mostra os dados relativos a rede Açailândia.

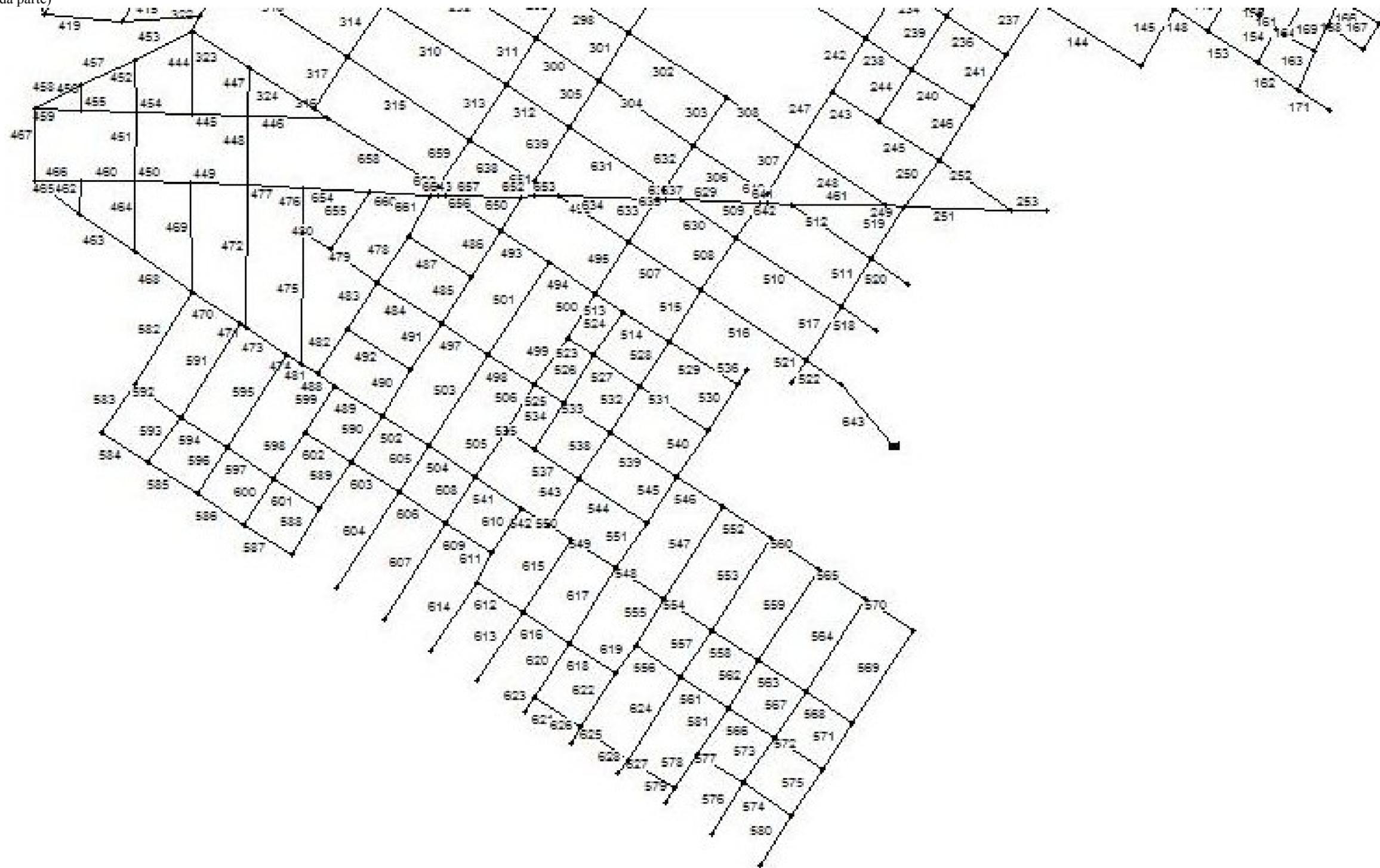
O dimensionamento foi proposto ao ONEBEAR, ao UFC4 e ao LENHSNET. Este último, após cerca de 30 minutos, retornou uma mensagem de erro de violação de acesso a endereço no módulo EPANET2.DLL. Não foi investigada a causa do erro. No entanto, como o LENHSNET utiliza um método iterativo, há a possibilidade de o erro relaciona-se com o elevado número de trechos da rede ou ao seu complexo traçado.

Figura 21- Traçado da Rede Açailândia (primeira parte)



Fonte: autor.

(segunda parte)



Fonte: autor.

A rede ótima encontrada pelo UFC4 considerando o custo de manutenção terá o custo ao longo de 20 anos no valor de R\$ 166.826.992,71. Os parâmetros adotados para a otimização via AG simples foram: população inicial de 50 indivíduos; seleção via torneio; probabilidade de cruzamento de 95%; e probabilidade de mutação de 0,5%.

A convergência no UFC4 para a rede Açailândia pode ser vista na Figura 22. Pode-se observar uma convergência quase vertical nas primeiras vinte gerações e depois disso, uma diminuição no ritmo dessa convergência. A forma aproximada de uma parábola indica o bom desempenho do AG aplicado à rede Açailândia. Uma relativa estabilidade ocorre nas vinte últimas gerações, indicando que dificilmente será possível melhorar a solução encontrada respeitando a restrição hidráulica imposta.

O algoritmo inicia sua busca com redes de CM acima de R\$ 300 milhões, baixando esse custo para cerca de R\$ 240 milhões até a vigésima geração. Vinte gerações adiante, o AG somente conseguiu reduzir o custo em cerca de menos R\$ 30 milhões, indicando uma diminuição na sua velocidade de convergência – aproximadamente metade da velocidade nas vinte primeiras.

Aqui a velocidade de convergência não está em função do tempo, mas em função do número de gerações. Isto é, está-se considerando a redução no valor de CM de acordo com o avanço do número de gerações.

Observadas as vinte gerações seguintes, i.e., da quadragésima a sexagésima, nota-se que a velocidade de convergência permanece aproximadamente constante. De fato, na sexagésima geração o CM obtido está bem próximo do valor de R\$ 190 milhões.

Entre a sexagésima e a octagésima gerações, a velocidade de convergência considerada é reduzida aproximadamente à metade. O valor de CM na octagésima geração está um pouco acima de R\$ 175 milhões, o que representa uma diminuição do CM de cerca de R\$ 15 milhões, enquanto nas vinte precedentes essa redução estava em torno de R\$ 30 milhões.

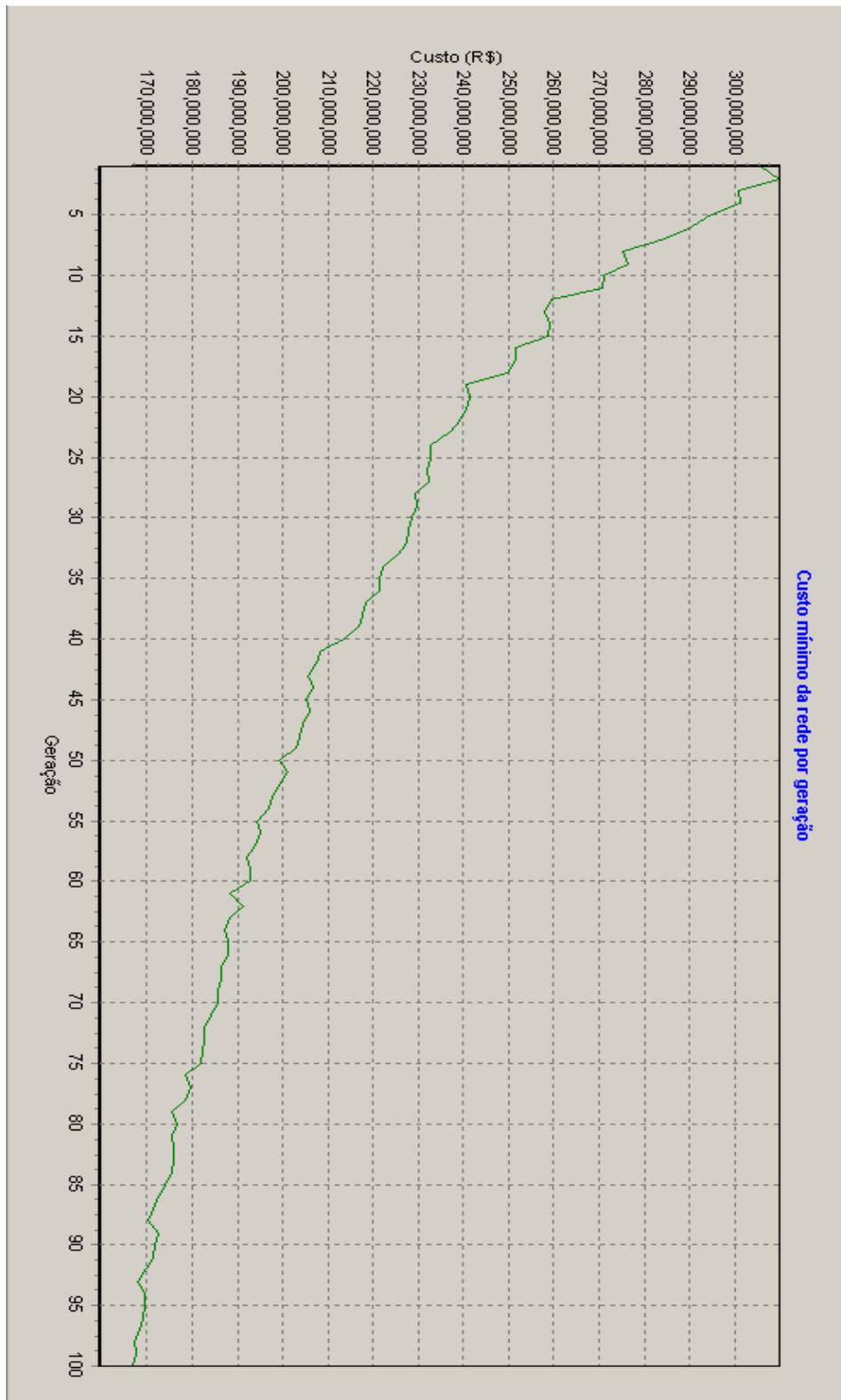
A velocidade de convergência praticamente se anula nas vinte últimas gerações, mostrando que a solução encontrada deve ser a solução mais próxima da solução ótima procurada.

A relativa estabilidade nas vinte últimas gerações indica que o algoritmo poderia ter parado seu processo de busca da rede ótima antes de atingir a centésima geração. Esse fato revela que o AG empregado no UFC4 não utiliza outro critério de parada além de o número de gerações. Essa característica tem a vantagem de insistir na busca por um possível mínimo

global, diminuindo por tanto as chances de convergência para um mínimo local. Por outro lado, o AG pode retroceder para soluções piores, como se pode ver pelas ondulações do gráfico de convergência.

No MINPGA, esse problema é resolvido simplesmente descartando soluções oriundas de cruzamento ou de mutação que não tenham um *fitness* melhor que as preexistentes.

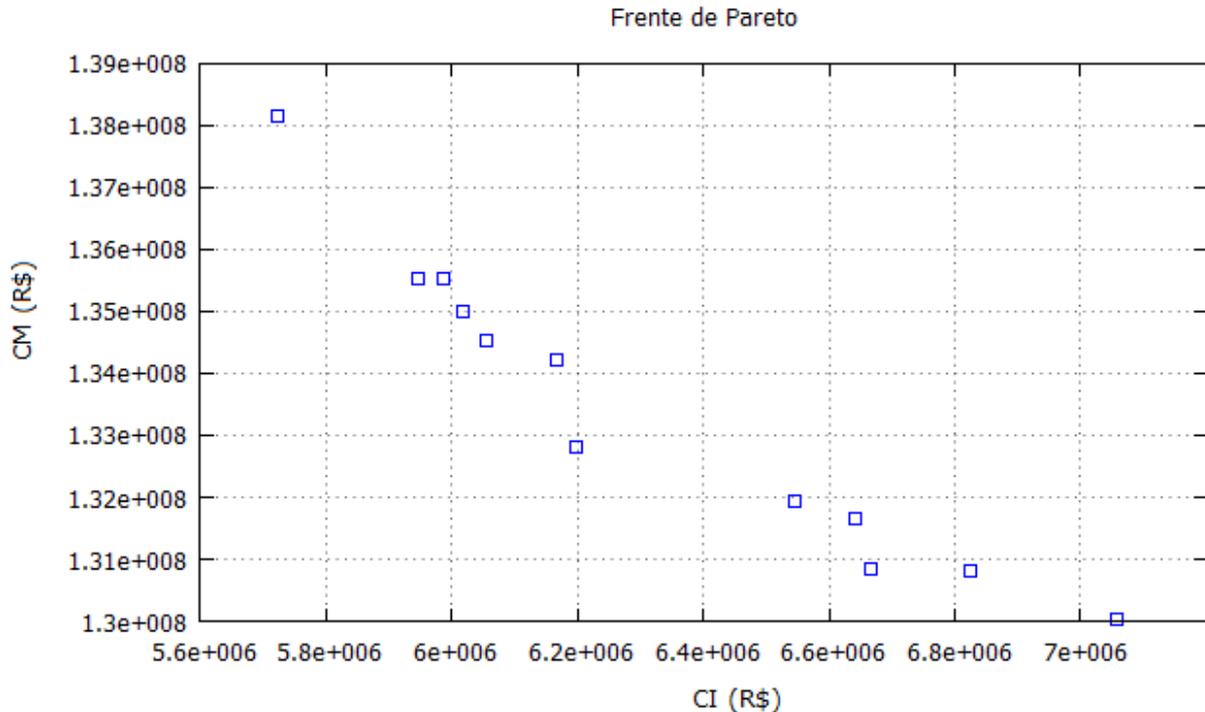
Figura 22 - Convergência no UFC4 para Açailândia



Fonte: autor.

A Figura 23 mostra os resultados do processo de otimização para a rede Açailândia.

Figura 23- Resultado da Otimização de CI (R\$) versus CM (R\$) para a Rede Açailândia



Fonte: autor.

De acordo com a Figura 23, com os parâmetros dados e considerando concomitantemente o custo de manutenção da rede ao longo de vinte anos, tem-se que a rede de menor custo de implantação custaria em torno de R\$ 5,7 milhões. Por outro lado, a rede com maior custo de implantação, nas mesmas condições, custaria cerca de R\$ 7,3 milhões.

Ao analisar os custos de manutenção, que se baseia em taxas de quebra previamente definidas, observa-se que esse custo representa um valor que excederia o custo de implantação da rede completa em cada um dos vinte anos considerados. Contudo, deve-se lembrar de que foram empregadas taxas de quebra oriundas da literatura internacional, e não de casos reais, o que não invalida os resultados obtidos com base nas hipóteses assumidas. Considere-se ainda que essa comparação somente faz sentido ao considerar-se preços estáveis ao longo de vinte anos e tratando como nulo o custo de desinstalar toda a rede.

É importante lembrar ainda que outros custos, como o do inconveniente da suspensão do fornecimento, o do escavamento, o do possível desvio no trânsito, etc, não foram incluídos na metodologia apresentada. Contudo, isso pode ser feito por meio de ajustes nas funções-objetivo.

Retornando aos resultados para a rede Açailândia, será listada apenas uma das soluções encontradas pelo processo de otimização ONEBEAR, tendo em vista que o número de trechos é demasiadamente grande em relação a outras redes geralmente submetidas ao processo.

Os custos associados à rede listada em ANEXO 2 aparecem na primeira linha do Quadro 18. As demais linhas são custos associados a outras quatro soluções dominantes que obedecem à restrição hidráulica dada.

Quadro 18- Custos de cinco redes sub-ótimas.

Rede	CI (R\$)	CM (R\$)
1	5.984.989,62	135.517.445,49
2	6.665.092,64	130.856.237,12
3	6.641.357,98	131.657.370,22
4	6.055.569,03	134.514.530,00
5	6.130.792,17	134.478.362,22

Fonte: autor.

As cinco redes listadas têm CM menor do que o encontrado pelo UFC4, resultado que se atribui à ênfase dada ao CI por parte deste. A partir das redes obtidas pelo ONEBEAR, o tomador de decisão poderia recorrer a outro critério para fazer a melhor escolha. A eficiência energética, o menor custo de impantação, o menor de custo de manutenção são critérios que podem ser observados.

4.3. Rede Hanoi

A rede Hanoi é composta por 32 nós, 34 trechos e 3 voltas. Há um reservatório de carga fixa de 100 m no nó 1. O dimensionamento foi efetuado considerando-se nove possibilidades de diâmetros, em vez de seis, como encontrado em geral na literatura. Esse tipo de adaptação não é novidade na literatura (veja por exemplo: SHERALI e SMITH, 1997, p. 124). Os nove diâmetros são os seis comumente vistos na literatura adicionados de mais três extraídos de manuais de fabricantes. A pressão mínima a ser respeitada neste exemplo é de 30 m e a elevação é zero em todos os nós. O material considerado foi o ferro fundido, cujos preços em reais (R\$) por metro (m) de comprimento de acordo com o diâmetro e as respectivas taxas de quebra estão no Quadro 19.

Quadro 19 - Preços de por metro de comprimento conforme diâmetro (mm)

Diâmetro Interno (mm)	304.8	406.4	508	609.6	762	1016	1095.6	1217	1292.6
Custo (R\$/m)	261.03	355.32	430.71	892.1	1269.67	2225.68	2681.69	3179.76	3719.89
TaxaQuebra (quebra/ano-km)	0.1	0.07	0.04	0.01	0.007	0.004	0.001	0.0007	0

Fonte: autor.

As taxas de quebra de acordo com diâmetro são hipotéticas, mas seguem a tendência decrescente com o diâmetro dos condutos. Os preços têm por base os fornecidos por fabricantes. A taxa de juros aplicada foi de 4% como nos casos anteriores.

O módulo UFC4 não reconheceu a rede Hanoi para dimensioná-la. Utilizou-se então o LENHSNET acoplado ao EPANET 2.0 BRASIL para dimensionar essa rede sob as mesmas condições do ONEBEAR. Ao contrário do que foi feito no módulo UFC4, o LENHSNET não foi modificado para considerar o custo de manutenção. Assim, tomou-se o resultado do dimensionamento visando ao custo mínimo de implantação do projeto e calculou-se o custo de manutenção ao longo de vinte anos. Os os comprimentos de cada trecho e demanda por nó estão no Quadro 20.

Quadro 20 - Comprimento por trecho e demanda por nó - Hanoi

Trecho	Comprimento (m)	Nó	Demanda por nó	
			m ³ /h	L/s
1	100	2	890	247.22
2	1350	3	850	236.11
3	900	4	130	36.11
4	1150	5	725	201.39
5	1450	6	1005	279.17
6	450	7	1350	375.00
7	850	8	550	152.78
8	850	9	525	145.83
9	800	10	525	145.83
10	950	11	500	138.89
11	1200	12	560	155.56
12	3500	13	940	261.11
13	800	14	615	170.83
14	500	15	280	77.78
15	550	16	310	86.11
16	2730	17	865	240.28
17	1750	18	1345	373.61
18	800	19	60	16.67
19	400	20	1275	354.17
20	2200	21	930	258.33
21	1500	22	485	134.72
22	500	23	1045	290.28
23	2650	24	820	227.78
24	1230	25	170	47.22
25	1300	26	900	250.00
26	850	27	370	102.78
27	300	28	290	80.56
28	750	29	360	100.00
29	1500	30	360	100.00
30	2000	31	105	29.17
31	1600	32	805	223.61
32	150			
33	860			
34	950			

Fonte: autor.

O traçado da rede Hanoi está disposto na Figura 24.

Os resultados do dimensionamento efetuado pelo LENHSNET e pelo ONEBEAR estão dispostos no Quadro 21.

Quadro 21 - Resultados para a rede Hanoi

	CI	CM	Total
ONEBEAR	R\$41.462.264,60	R\$486.452.282,98	R\$ 527.914.547,58
LENHSNET	R\$37.817.989,30	R\$750.753.790,99	R\$ 788.571.780,29

Fonte: autor.

A função-objetivo do LENHSNET não foi adaptada para considerar o custo de manutenção, portanto, seu dimensionamento teve como meta obter o custo mínimo de implantação de projeto. Com os diâmetros obtidos para compor a rede ótima, foram feitos os cálculos para determinar o custo de manutenção sob as mesmas condições dadas ao ONEBEAR, como taxa de juros e taxa de quebra por ano.

Isso o conduziu a encontrar um CI menor em cerca de 9% do que o encontrado com a rede fornecida pelo ONEBEAR. Esse resultado confirma a expectativa de que, a menos de restrições hidráulicas, o algoritmo tende a encontrar as redes com diâmetros mais estreitos, preterindo os diâmetros mais largos. Em outras palavras, o algoritmo encontrará a rede com os menores diâmetros que satisfaça às restrições hidráulicas presentes.

Por outro lado, ao considerar-se uma vida útil de vinte anos, o CM da rede dada pelo LENHSNET custa 54,33% mais que o CM da rede obtida pelo ONEBEAR.

Isso se dá porque, ao considerar o CM simultaneamente ao CI, o algoritmo MINPGA busca o equilíbrio entre taxas de quebra mais baixas e preços menores de condutos. De acordo com a hipótese assumida – as taxas de quebra diminuem à medida que os diâmetros aumentam – a vantagem buscada pelo algoritmo está no longo prazo, dada uma taxa de juros e o número de anos. Ao desconsiderar o CM, o dimensionamento feito pelo LENHSNET, ou por outro algoritmo, tenderia a obter redes contendo os diâmetros com as maiores taxas de quebra e portanto apresentando desvantagem econômica a longo prazo.

Outra diferença entre resultados obtidos com a abordagem de objetivo único em relação à de objetivo múltiplo é que na primeira, mesmo considerando os custos de manutenção em sua função-objetivo, o algoritmo tende a encontrar os diâmetros satisfazendo restrições hidráulicas, como a pressão mínima, de forma que o custo total seja o menor possível sem buscar um equilíbrio entre os custos de implantação e de manutenção. Essa característica pode levar a soluções que priorizem um dos custos em detrimento do outro.

5 – DISCUSSÃO

Apresenta-se neste capítulo uma discussão dividida por seções sobre cada um dos itens empregados no desenvolvimento deste trabalho.

5.1. ONEBEAR

O esquema de otimização apresentado, ONEBEAR, que acoplou o simulador hidráulico EPANET ao AE multiobjetivo e multipopulação MINPGA, atingiu seus objetivos de otimizar projetos de RDA visando ao custo mínimo de implantação e ao custo mínimo de manutenção ao longo de vinte anos de vida útil da rede.

Também é possível verificar que o ONEBEAR é flexível, pois pode ser aplicado a redes ramificadas, redes malhadas ou redes mistas. Isso é possível porque o MINPGA trabalha com apenas as informações sobre o fitness gerado por cada combinação de diâmetros, recusando as redes inviáveis apenas na formação da frende Pareto. A flexibilidade do MINPGA é uma característica marcante dos algoritmos evolucionários em geral, e pode ser confirmada pelos testes com as funções-objetivos analíticas. Esses testes são válidos pois os algoritmos evolucionários não são capazes de analisar a natureza física do problema, mas somente a natureza numérica.

Quanto a efetividade, pode-se dizer que o esquema alcançou as metas pretendidas de acoplar o EPANET e o MINPGA de forma a possibilitar o processo de otimização.

Quanto a eficácia, por meio do ONEBEAR é possível escolher a rede mais econômica quanto aos dois objetivos pretendidos e que atende à restrição hidráulica sobre a pressão mínima em cada nó.

Quanto a eficiência, o esquema resolveu os problemas propostos em tempo computacional e com uso de memória aceitáveis em se tratando de AE.

5.2. OOTEN e EPANET

O simulador hidráulico EPANET vem sendo largamente utilizado nos problemas hidráulicos e de qualidade da água. Constitui-se em uma ferramenta de alta estabilidade e confiabilidade.

A biblioteca OOTEN está disponível no formato estático (LIB) e no formato dinâmico (DLL). Ela possibilitou o uso das funções do EPANET dentro do esquema de

otimização, mostrou-se estável e confiável, não tendo sido verificado em nenhuma etapa do desenvolvimento qualquer erro oriundo dessa biblioteca.

As funções do EPANET foram determinantes para o sucesso do ONEBEAR, tendo sido utilizadas para abrir o arquivo com os parâmetros da rede, extrair determinados parâmetros, configurar os diâmetros e resolver hidraulicamente a rede.

A viabilidade da rede em termos da pressão mínima, por exemplo, foi obtida com uma dessas funções.

O fato de a biblioteca ser construída sob a técnica de orientação a objeto flexibiliza sua aplicação, torna o código altamente reutilizável, e facilita a modificação do código-fonte.

5.3. *MINPGA*

Como algoritmo híbrido, o MINPGA conserva algumas características dos algoritmos nos quais ele se baseia, o MIIGA e o NPGA.

A inicialização de três populações aumenta a diversidade e melhora as chances de convergência prematura do algoritmo. Além do mais, as trocas de indivíduos entre as populações (migração) oferece uma oportunidade de aumento de diversidade para cada uma das populações envolvidas no processo. O indivíduo pior adaptado de cada população cede lugar ao indivíduo mais adaptado da população vizinha. Esse elitismo composto contribui para uma convergência mais rápida, que pode ser observada mais claramente por meio de testes com funções analíticas.

O nicho de Pareto foi utilizado para resolver aquelas situações em que duas redes ficam empatadas quanto a dominância, isto é, quando não se sabe quando qual das duas soluções é a dominante. Usar o raio de nicho flexível mostrou-se importante devido ao fato de contornar previamente duas possibilidades indesejáveis: os raios de nicho das duas soluções em conflito incluem uma mesma solução; os raios de nicho das duas soluções incluem uma a outra. Nas duas situações, o impasse seria mantido. Com o raio flexível, baseado na distância espacial entre as duas soluções, evita-se tanto um quanto o outro caso. Essa característica melhora a formação da frente de Pareto.

Os testes feitos com funções matemáticas (anexo 1) mostraram ainda que o MINPGA é um algoritmo acurado e preciso. Acurado no sentido de que as soluções encontradas em dada geração se mostraram cada vez mais próximas das soluções obtidas na

geração subsequente. Preciso significando que foi verificada uma pequena magnitude da diferença entre a solução sub-ótima dada pelo algoritmo e a solução ótima analítica do problema-teste, tendo em alguns casos convergido para a solução ótima.

Além disso, verificou-se que o algoritmo é robusto, ao ser aplicado a uma rede de 666 trechos.

Isso mostra que a aplicação do MINPGA é adequada ao problema e oferece boas soluções em um tempo razoável.

5.4. UFC4 Modificado

A mudança no módulo UFC4 foi necessária para traçar um paralelo com os resultados apresentados pelo ONEBEAR. Essa mudança consistiu em alterações em sua função-objetivo, de forma que a mesma passasse a considerar o custo de manutenção ao longo de vinte anos, utilizando as mesmas taxas de quebra utilizadas pelo ONEBEAR e com a mesma taxa de desconto.

Essa alteração proporcionou ao UFC4 a capacidade de avaliar a rede considerando o custo de manutenção, embora a estrutura do mesmo enfatize a minimização do custo de implantação.

A ênfase dada pelo UFC4 ao custo de implantação mostrou-se nos resultados obtidos por ele tanto na rede Belém quanto na rede Açailândia, as quais tiveram custos de manutenção superiores a resultados do ONEBEAR. Esse fato pode ser observado facilmente pela predominância de condutos de menores diâmetros nas redes encontradas pelo UFC4.

O módulo UFC4 não reconheceu a rede Hanoi e portanto não conseguiu proceder ao seu dimensionamento.

5.5. LENHSNET E EPANET 2.0 BRASIL

O LENHSNET utiliza um algoritmo iterativo para o dimensionamento de redes. Não foi feita qualquer modificação nessa ferramenta no intuito de considerar custos de manutenção.

A aplicação do LENHSNET à rede Açailândia resultou em erro de acesso à endereços de memória, muito provavelmente devido ao elevado número de trechos presentes nessa rede.

Também foi empregada essa ferramenta à rede Hanoi com nove diâmetros possíveis. O dimensionamento foi realizado com êxito e o cálculo do custo de manutenção, nos termos aplicados ao ONEBEAR, foi feito a partir de diâmetros de cada trecho da rede obtida. A comparação entre custos de implantação e de manutenção obtidas pelo LENHSNET e pelo ONEBEAR mostrou que, ao considerar apenas o custo de implantação no dimensionamento, o algoritmo obtém soluções que resultam em elevados custos de manutenção ao longo da vida útil da rede.

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

A metodologia apresentada mostrou-se capaz de dimensionar economicamente uma RDA considerando o custo de manutenção nos termos dados, abrindo uma nova dimensão no problema de otimização de redes de água. O esquema de otimização que dá corpo à metodologia utilizou-se do algoritmo MINPGA e da biblioteca de funções do EPANET para proceder ao dimensionamento.

Com a apresentação de estudos de caso verificou-se a aplicabilidade da metodologia, bem como a flexibilidade dos algoritmos genéticos. As redes empregadas nos estudos de caso, construídas a partir de redes reais dentro do sistema UFC, contribuem para mostrar a plasticidade e a robustez dessa metodologia.

A modificação efetuada no módulo UFC4, dos sistema UFC, mostrou-se eficaz ao dimensionar economicamente as redes submetidas de maneira a considerar o custo de manutenção em sua função-objetivo. O paralelo traçado entre a abordagem de objetivo múltiplo e a de objetivo único modificada para incluir o custo de manutenção ilustrou a robustez do esquema de otimização apresentado.

A metodologia apresentada também foi aplicada a rede Hanoi com nove diâmetros possíveis e os resultados foram comparados aos resultados obtidos pelo dimensionamento efetuado pelo LENHSNET. Essa ferramenta, no entanto, não foi adaptada como o UFC4 para considerar o custo de manutenção nos termos dados no presente trabalho. A comparação mostrou que quando considerado somente o custo de implantação do projeto, há uma considerável perda a longo prazo no que tange à manutenção da rede obtida, com as taxas de quebra e preço por unidade de comprimento de acordo com o diâmetro utilizados.

Assim, apresentou-se uma nova abordagem do problema de dimensionamento econômico ótimo de redes de distribuição de água, utilizando-se do algoritmo genético MINPGA e das funções do EPANET, levando em consideração o custo de manutenção, no que diz respeito à quebra e substituição de condutos.

6.2. Recomendações

Uma vez que foram considerados somente os custos com os condutos da rede, as funções-objetivo podem ser redefinidas a fim de melhorar o modelo que representa os custos implantação e de manutenção. Outros parâmetros podem ser inseridos a fim de se representar, por exemplo, os custos de escavamento, custos de inconveniente suportados pela comunidade afetada por uma eventual intervenção, custos de interdição de trecho. Além disso, podem ser considerados outros materiais para os condutos, os quais terão outras taxas de ruptura a eles associadas.

As taxas de quebra atribuídas aos condutos de acordo com seu diâmetro foram adaptadas da literatura especializada. Sugere-se portanto, um trabalho de pesquisa em conjunto com agências de água e esgoto, como a CAGECE, no caso do Ceará. Caso não haja a colaboração por parte de uma agência, o acesso a dados de custo com a compra de condutos pode ser obtido com base na Lei da Transparência, e a solicitação desses dados prescinde de explicações sobre a finalidade do pedido. Com posse desses dados, poder-se-ia estimar a taxa de quebra com base no número de compras de condutos de acordo com seu diâmetro. Tomando-se os dados referentes a certa quantidade de anos, poder-se-a estimar a taxa de quebra para anos à frente.

O valor presente e o valor futuro para custos associados aos condutos podem também ser estimados a partir dos mesmos dados supra citados. Além disso, pode-se estabelecer uma taxa de desconto, que seria inserida na função custo de manutenção, observando o cenário macroeconômico nacional na data em que o dimensionamento for efetuado.

Ressalta-se, no entanto, que a pesquisa sugerida acima está ligada mais diretamente à área de economia para engenharia, fugindo do escopo da hidráulica ou da hidroinformática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.L.N. Dialética das memórias: uma análise da obra Memórias da Rua do Ouvidor de Joaquim Manoel de Macedo. In: VIII Semana de Letras – Letras, Leitura e Letramento. Universidade Federal de Ouro Preto/Instituto de Ciências Humanas e Sociais. Disponível em: <<http://www.ichs.ufop.br/semanadeletras/viii/arquivos/indiceanais.htm>>, acessado em 5 de novembro de 2014. ISBN: 85-288-0049-0. Ouro Preto, 18-21 de novembro de 2003.
- AFSHAR, A., HADDAD, O.B., MARIÑO, M.A., ADAMS, B.J. *Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation*. Journal of The Franklin Institute. Vol. 344, n. 5, p. 452-462, 2007.
- AFSHAR, A., HADDAD, O.B., MARIÑO, M.A., ADAMS, B.J. *Honey-Bee Mating Optimization (HBMO) algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization*. Water Resources Management, vol. 20, p. 661–680. DOI: 10.1007/s11269-005-9001-3, 2006.
- ALBUQUERQUE, R. C. de. O Desenvolvimento Social do Brasil. Rio de Janeiro: José Olympio, 2011, 210p.
- ALENCAR-NETO, M.F., CASTRO, M.A.H. “Projeto de Redes de Distribuição de Água por Algoritmo Genético”, in: IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa (Brasil), 8 a 10 de novembro de 2004.
- BARROS, 2007. *Uso de Algoritmos Evolucionários na Calibração de Modelos Hidrológicos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará.
- BARROS, F.V.; MARTINS, E.S.P.R.; NASCIMENTO, L.S.V.; Jr., REIS, D.S. *Use of Multi-objective Evolutionary Algorithms in Water Resources Engineering*. Capítulo III. Springer, 2010.

- BOIX, M., MONTRASTUC, L., PIBOUULEAU L., AZZARO-PANTEL, C., DOMENECH, S. *A multiobjective optimization framework for multicontaminant industrial water network design*. Journal of Environmental Management, vol. 92, pp. 1802-1808, doi:10.1016/j.jenvman.2011.02.016, 2011.
- BRASIL, PDRAE (1995) Plano Diretor da Reforma do Aparelho do Estado. Presidência da República, Câmara da Reforma do Estado, Brasília, 1995.
- BRASIL, Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.
- CARRANO, E.G., WANNER, E.F., TAKAHASHI, R.H.C. *A Multicriteria Statistical Based Comparison Methodology for Evaluating Evolutionary Algorithms*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 15, no. 6, p. 848-870, dezembro, 2011.
- CARRIÓN, A., SOLANO, H., GAMIZ, M.L., DEBÓN, A. *Avaluation of the Reliability of a Water Supply Network from Right-Censored and Left-Truncated Break Data*. Water Resour Manage, vol. 24, 2010, pp 2917-2935.
- CARVALHO, L.C.P de. *Teoria da Firma: a produção e a firma*, In: Manual de Economia – Diva Benevides Pinho e Marco Antônio S. de Vasconcelos (org.). 5 ed., São Paulo: Saraiva, 2004, cap. 7, p. 160-190.
- CASTRO, M. A. H de. COSTA, C. T. “Otimização de Redes de Distribuição de Água Usando a Metodologia de Morgan e o EPANET”, in: IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa (Brasil), 8 a 10 de novembro de 2004.
- COELLO, C. A. (1999). *A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques*. Knowledge and Information Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 269--308, August 1999.

COELLO, C. A. C. & LECHUGA, M. S. *MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization*. 2002. The College of Information Sciences and Technology. Disponível on-line em: < <http://citeseerx.ist.psu.edu> >. Acessado em: 9 ago 2008.

COELLO, Carlos A. Coello, PULIDO, Gregorio Toscano & LECHUGA, Maximino Salazar. *Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 8, n° 3, JUNE 2004.

DARWIN, C. R., 1859. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life*. Disponível online em: <<http://etext.virginia.edu/toc/modeng/public/DarOrig.html>>. Acessado em 29 de maio de 2009. Electronic Text Center, University of Virginia Library.

DIAS, C.H. e GOMES, F.A.M. Otimização de redes de distribuição de água com estações de bombeamento. TEMA - Tendências em Matemática Aplicada e Computacional, 8(3):391-400, 2007.

ERICKSON, Mark, MAYER, Alex & HORN, Jeffrey (2002). *Multi-objective optimal design of groundwater remediation systems: application of the Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA)*. Advances in Water Resources. Vol. 25, 2002, pp 51–65.

FERNANDES, C.V.S. “|Modelagem da Qualidade da Água em Redes de Distribuição de Água: a influência dos transientes hidráulicos”, in: IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa (Brasil), 8 a 10 de novembro de 2004.

FERREIRA, C. M. M. Saneamento e mortalidade infantil: o impacto dos investimentos da CAGECE no Ceará. In: Políticas Públicas e Desenvolvimento Regional no Brasil – CARVALHO, J. R. & HERMANNNS, K. (Org.). Fundação Konrad Adenauer, 2005, 320 p.

- FOGEL, L., OWENS, A., WALSH, M. *Artificial intelligence through simulated evolution*. Wiley, 1966.
- FORMIGA, K.T.M., F.H. Modelo de Análise Hidráulica de Redes de Distribuição de Água Considerando Demanda Dirigida pela Pressão e Vazamentos. Eng. Sanit. Ambient., Vol. 13, n. 2, 2008, pp 153-162.
- GARCIA, Arnaldo; LEQUAIN, Yves. Elementos de álgebra. 3. ed. Rio de Janeiro: IMPA, 2005. 326 p. (Série: Projeto Euclides).
- GONZÁLEZ-GÓMEZ, F., MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R., GARCÍA-VALIÑAS, M.A., GARCÍA-RUBIO, M.A. *Explanatory factors of urban water leakage rates in Southern Spain*. Utilities Policy, vol. 22, pp. 22-30, 2012.
- GUAN, J. & ARAL M. M. (1999). *Optimal remediation with well locations and pumping rates selected as continuous decision variables*. Journal of Hydrology, vol. 221, 1999, pp 20–42
- HADDAD, O.B.; AFSHAR, A.; MARIÑO, M.A. *Honey Bee Mating Optimization: a new heuristic approach for water resources optimization*. Water Resources Management (2006) 20: 661–680. Springer. 2006.
- HADDAD, O.B.; AFSHAR, A.; MARIÑO, M.A. *Design-Operation of Multi-Hydropower Reservoir: HBMO Approach*. Water Resour Manage (2008). Springer. 2008.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor.

HORN, J., NAFPLIOTIS, N., GOLDBERG, D.E. *A Niche Pareto Genetic Algorithm For Multiobjective Optimization*. Em: Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation (ICEC '94), Piscataway, NJ: IEEE Service Center; 1994. P. 82-7.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Série Histórica dos Acumulados no Ano IPCA e INPC– 1980 a 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000008675705122012573509687986.pdf>>. Acesso em: 20 de outubro de 2014.

KENNEDY, J., & EBERHART, R. C. (1995). *Particle swarm optimization*. In *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks IV* (pp. 1942–1948). Piscataway: IEEE.

KOZA, J.R. (1992). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA:MIT Press.

LIMA, A. M. M.. *Recarga de Reatores Nucleares Utilizando Redes Conectivas de Colônias Artificiais*. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LIU, L.; ZECHMAN, E.M.; BRILL, E.D.; MAHINTHAKUMAR, G., JR. *Adaptive Contamination Source Identification in Water Distribution Systems Using an Evolutionary Algorithm-based Dynamic Optimization Procedure*. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, 2006.

LUO, B., MAQSOOD, I., HUANG, G.H. Planning Water Resources Systems with Interval Stochastic Dynamic Programming. *Water Resour. Manage.*, DOI: 10.1007/s11269-006-9069-4, 2006.

LUQUE, C.A., VASCONCELOS, M. A. S. de. Considerações sobre o problema da inflação. In: *Manual de Economia – Diva Benevides Pinho e Marco Antônio S. de Vasconcelos* (org.). 5 ed., São Paulo: Saraiva, 2004, cap. 17, p. 319-336.

- MACEDO, Joaquim Manoel de, 1820-1882. *Memórias da Rua do Ouvidor*. Brasília: Senado Federal, Conselho Editorial, 2005, 220 p., Edições do Senado Federal, v. 41.
- MAIA-JUNIOR, J.V.F. *Comparação de métodos de dimensionamento em redes de distribuição de água*. 2012, 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- MANTOGLOU, Aristotelis & KOURAKOS, George (2007). *Optimal Groundwater Remediation Under Uncertainty Using Multi-objective Optimization*. *Water Resources Management*, 2007. vol. 21, pp 835–847.
- MERA, N. S., ELLIOT, L., INGHAM, D. B. *A Multi-population genetic algorithm approach for solving ill-posed problems*. *Computational Mechanics* 33 (2004), pp. 254-262. Springer Verlag 2004 (DOI: 10.1007/S00466-003-0526-0).
- MICHALEWICZ, Z., LOGAN, T.D., and SWAMINATHAN, S. (1994), *Evolutionary Operators for Continuous Convex Parameter Spaces*. *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming*, A.V. Sebald and L.J. Fogel (editors), World Scientific Publishing, River Edge, NJ, 1994, pp.84-97.
- MICHALEWICZ, Z., HINTERDING, R., and MICHALEWICZ, M., [*Evolutionary Algorithms*](#), Chapter 2 in *Fuzzy Evolutionary Computation*, W. Pedrycz (editor), Kluwer Academic, 1997.
- MOHAMED, H.I., ABOZEID, G. *Dynamic Simulation of Pressure Head and Chlorine Concentration in the City of Asyut Water Supply Network in Abnormal Operating Conditions*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, DOI: 10.1007/s13369-010-0027-3, vol. 36, pp. 173-184, 2011.
- NIU, B. ZHU, Y-L., HE, X-X. *A Multi-population Cooperative Particle Swarm Optimizer for Neural Network Training*. J. Wang et al. (Eds.): ISBN 2006, LNCS 3971, pp. 570 – 576.

- OLAGUE, G. & PUENTE, C. *Parisian Evolution with Honeybees for Three-dimensional Reconstruction*. GECCO '06: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation. ACM. Julho, 2006. Disponível on-line em: < <http://portal.acm.org> >. Acessado em: 13 ago. 2008.
- PAPADIMITRIOU, C.H. *Computational Complexity*. Addison-Wesley, 1994, 523 p.
- PARK C. H. & ARAL M.M (2004). *Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers*. Journal of Hydrology, Vol. 290, pp 80–99.
- PINTO, J., VARUM, H., DUARTE, A. Risco de Cenários de Dano Vulneráveis de Redes de Abastecimento de Água. Territorium, ISBN: 0872- 8941, vol. 18, pp. 271-278, 2011.
- POLI, R. KENNEDY, J. BLACKWELL, T. (2007). *Particle Swarm Optimization: an overview*. Swarm Intell (2007), 1: 33-57. Springer Science + Business Media, LCC 2007.
- RAAD, D., SINSKE, A., VUUREN, J. *Multiobjective Optimization for Water Distribution System Design Using a Hyperheuristic*. Journal of Water Resources Planning and Management, DOI: : 10.1061/#ASCEWR.1943-5452.0000061, vol. 136, pp. 592-596, 2010.
- RAMOS, J.M. & CARVALHO, N.C. Estudo Morfológico e Biológico das Fases de Desenvolvimento de Apis Mellifera. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal - ISSN 1678-3867. Publicação Científica da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal de Garça/FAEF, ano VI, número, 10, agosto de 2007.
- REGIS, R. G. & SHOEMAKER, C. A. (2005). *Constrained Global Optimization of Expensive Black Box Functions Using Radial Basis Functions*. Journal of Global Optimization 31: 153–171.
- ROGERS, L. L. & DOWLA, F. U. (1994). *Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling*, Water Resour. Res., 30(2), 457–481.

- RECHENBERG, I. (1973). *Evolutions Strategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution*. Frommann-Holzboog, Stuttgart.
- REGIS, G. R., SHOEMAKER, C. A. *Constrained Global Optimization of Expensive Black Box Functions Using Radial Basis Functions*. Journal of Global Optimization (2005), vol. 31, pp 153-171, 2005.
- RIBAS, P. C., YAMAMOTO, L., POLLI, H. L., ARRUDA, L. V. R., NEVES-Junio, F. *A micro-genetic algorithm for multi-objective objective scheduling of a real world pipeline network*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 26, pp 302-313, 2013.
- RIMKEVICIUS S., KALIATKA A., VALINCIUS M., DUNDULIS G., JANULIONIS R., GRYBENAS A., ZUTAUTAITE I. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems. Applied Energy, vol. 94, 2012, pp 22-33.
- CONGRESSO NACIONAL, Comissão Mista de Planos Orçamentos Públicos e Fiscalização. Projeto de Lei do Plano Plurianual para 2012/2015. Brasília, DF, 14/12/2011.
- SHAMIR, U., HOWARD, C.D.D. An analytic approach to scheduling pipe replacement. Journal American Water Works Association, ed. 74, vol. 03, pp 248-258, 1979.
- SHERALI, H.D., SMITH, E.P. *A Global Optimization Approach to a Water Distribution Network Design Problem*. Journal of Global Optimization, vol. 11, pp. 107–132, 1997.
- SILVA, Wilton P. e SILVA, Cleide M. D. P. S, LAB Fit Ajuste de Curvas (Regressão não-Linear e Tratamento de Dados) V 7.2.14 c (2003), online, disponível em: <http://www.angelfire.com/rnb/labfit/index_p.htm>.
- SINHA, Eva & MINSKER, Barbara S. (2007). *Multiscale Island Injection Genetic Algorithm for Ground Water Remediation*. [Advances in Water Resources Vol. 30, publication 9](#), September 2007, pp 1933-1942.

SIVANANDAM, S. N., DEEPA, S. N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer.

NEELAKANTAN, SURIBABU, C.R. & LINGIREDDY, S. *Optimisation procedure for pipe-sizing with break-repair and replacement economics*. Water SA Vol. 34 No. 2 April 2008.

TOLSON, B. A., SHOEMAKER, C. A. *Dinamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration*. Water Resources Research, vol. 43, doi: 10.1029/2005WR004723, 2007.

URSEM, Rasmus K. *Models for Evolutionary Algorithms and Their Applications in System Identificantion and Control Optimization*. Tese PhD. Faculty of Science of the University of Aarhus. Abril de 2003.

ANEXO 1 – Testes com Funções Analíticas

O MINPGA foi submetido a testes com funções analíticas para verificação de sua acurácia, precisão, flexibilidade e robustez. Essas funções também serviram para efetuar a análise de sensibilidade do algoritmo e estabelecer os parâmetros que melhor se ajustariam ao mesmo. O Quadro 22 lista as funções com os respectivos comentários.

Quadro 22- Funções analíticas para testes

Função de Teste	Comentário
$f_1 : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ $f_1(x_1, x_2) \propto x_1$	Usada somente em conjunto com outras funções para o caso multiobjetivo.
$f_2 : [0,1] \times [0,1] \rightarrow \mathfrak{R}$ $f_2(x_1, g) \propto 1 - \left(\frac{x_1}{g}\right)^2$ $g(x_{m+1}, \dots, x_N) = g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \left(\frac{\sum_{i=m+1}^N x_i - \sum_{i=m+1}^N x_i^{\min}}{\sum_{i=m+1}^N x_i^{\max} - \sum_{i=m+1}^N x_i^{\min}} \right)^\gamma$ <p>Se $g_{\min} = 1$ e $g_{\max} = 2$, $\gamma = 1/4$, $m = 1$ e $N = 2$, então</p> $g(x_1, x_2) = 1 + \left[\frac{x_1 + x_2}{2} \right]^{0,25} \Rightarrow f_2(x_1, g) = 1 - \left(\frac{x_1}{1 + \left[\frac{x_1 + x_2}{2} \right]^{0,25}} \right)^2$	g_{\min} e g_{\max} , são o mínimo e o máximo valor possível para a funções g , nesta ordem; γ é o responsável pelos valores de tendência de g ; m e N definem a dimensão do domínio de g .
$f_3 : [0,1] \times [0,1] \rightarrow \mathfrak{R}$ $f_3(x_1, x_2) \propto (1 + 10x_2) \cdot \left[1 - \left(\frac{x_1}{1 + 10x_2} \right)^\alpha - \frac{x_1}{1 + 10x_2} \sin 2\pi q x_1 \right]$ $q = 4$ $\alpha = 2$	Mínimo de -0,15 no ponto (0,83, 0,02).
$f_4 : [0,1, 1] \times [0,1] \rightarrow \mathfrak{R}$ $f_4(x_1, x_2) \propto \frac{2 - \exp\left[-\left(\frac{x_2 - 0,2}{0,004}\right)^2\right] - 0,8 \exp\left[-\left(\frac{x_2 - 0,6}{0,4}\right)^2\right]}{x_1}$	Mínimo encontrado no ponto (1, 0,2) com valor igual a 0,71.
$f_5 : [-10,20] \times [-10,20] \rightarrow \mathfrak{R}$ $f_5(x_1, x_2) \propto -20 \frac{\sin\left(0,1 + \sqrt{(x_1 - 4)^2 + (x_2 - 4)^2}\right)}{0,1 + \sqrt{(x_1 - 4)^2 + (x_2 - 4)^2}}$	Mínimo global no ponto (4, 4) com valor de -19,97.

Os parâmetros para MINPGA que obtiveram melhor resultados nos testes com duas funções objetivo estão listados no Quadro 23.

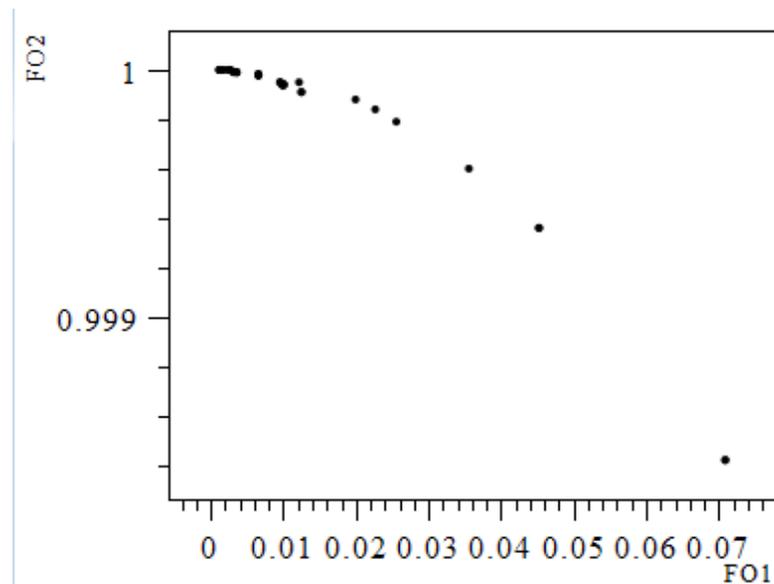
Quadro 23- Valores adotados para os parâmetros do MINPGA

Número de Populações	3	Raio de nicho	*
Número de soluções iniciais por população	80	Tamanho do torneio de seleção	2
Probabilidade de cruzamento	0.9	Probabilidade de mutação	0.001
Tipo de cruzamento e mutação	aritmético	Inicialização da população	Aleatória
Trocas entre as ilhas por geração	1	Peso da solução	via Aptidão

* variando com a posição das soluções conflitantes

Testes utilizando as funções-objetivos 1 e 2 geraram como resultado a frente de Pareto apresentada na Figura 25.

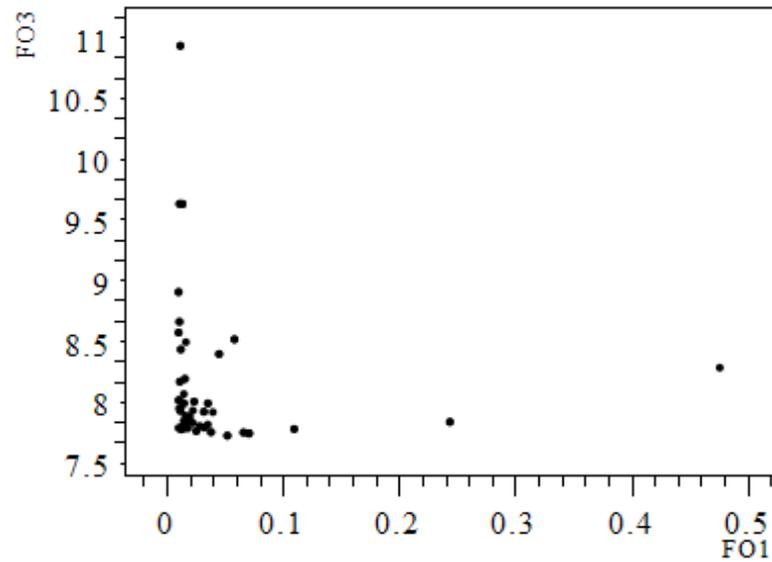
Figura 25- Frente de Pareto para FO1 x FO2



Fonte: autor.

A Figura 26 mostra a tendência das soluções para o caso FO1 versus FO3.

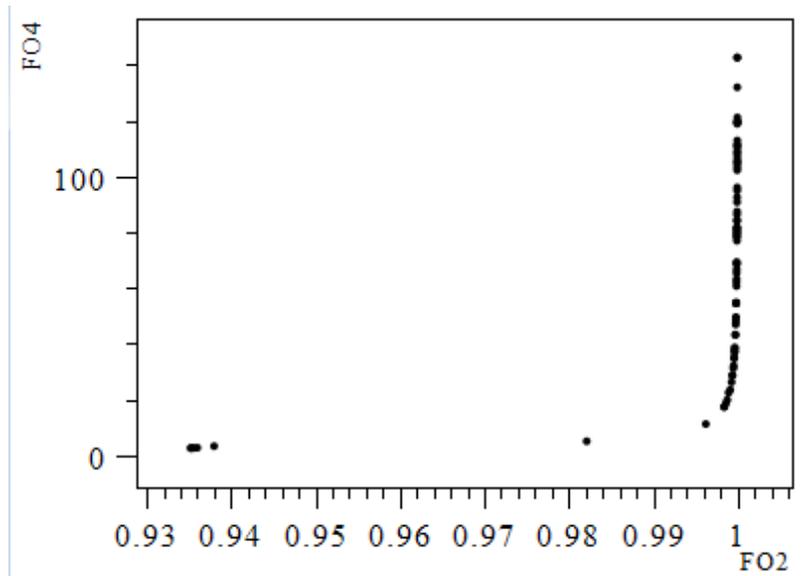
Figura 26- Formação da frente de Pareto com FO1xFO3



Fonte: autor.

Na Figura 27, tem-se a frente de Pareto obtida ao confrontar-se as funções-objetivo 2 e 4.

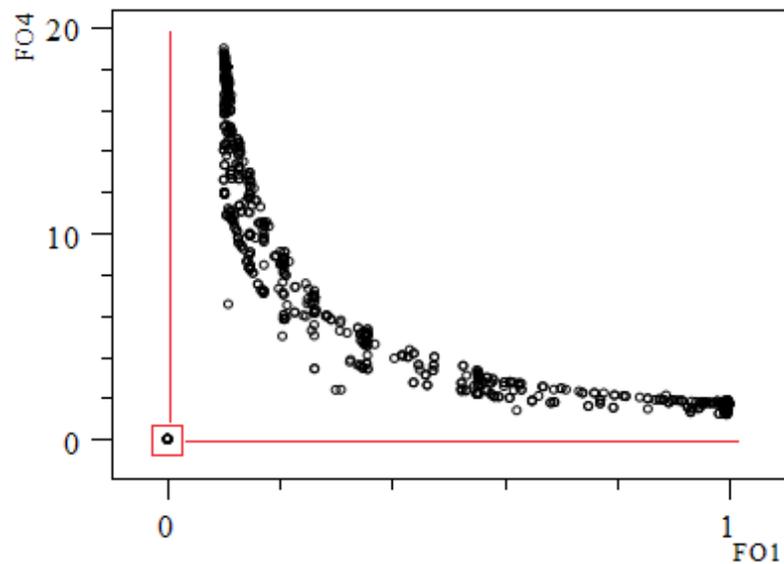
Figura 27- Frente de Pareto com FO2xFO4.



Fonte: autor.

A Figura 28 mostra a formação da frente de Pareto para as funções-objetivo 1 e 4. A solução em destaque domina todas as outras, sendo portanto a melhor solução para o problema de minimização biobjetivo ao considerar-se as funções-objetivos citadas. O espaço visível entre as soluções dominadas significa que a solução destacada foi encontrada em uma geração anterior às últimas gerações, que foram descartadas.

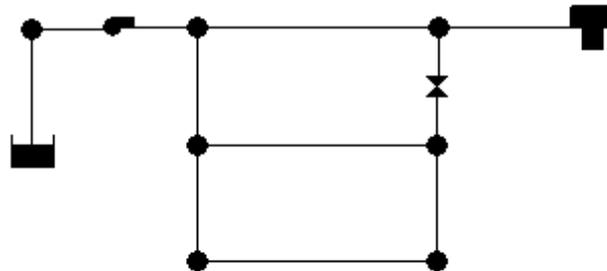
Figura 28- Formação da frente de Pareto FO1 versus FO4



Fonte: autor.

Também foi procedido um teste inicial com uma rede simples para observar a adaptação do MINPGA ao problema proposto. O traçado da rede testada pode ser visto na Figura 29, que mostra o esquema do modelo de uma rede simples para a qual foram feitas as combinações diferentes de diâmetros para os condutos.

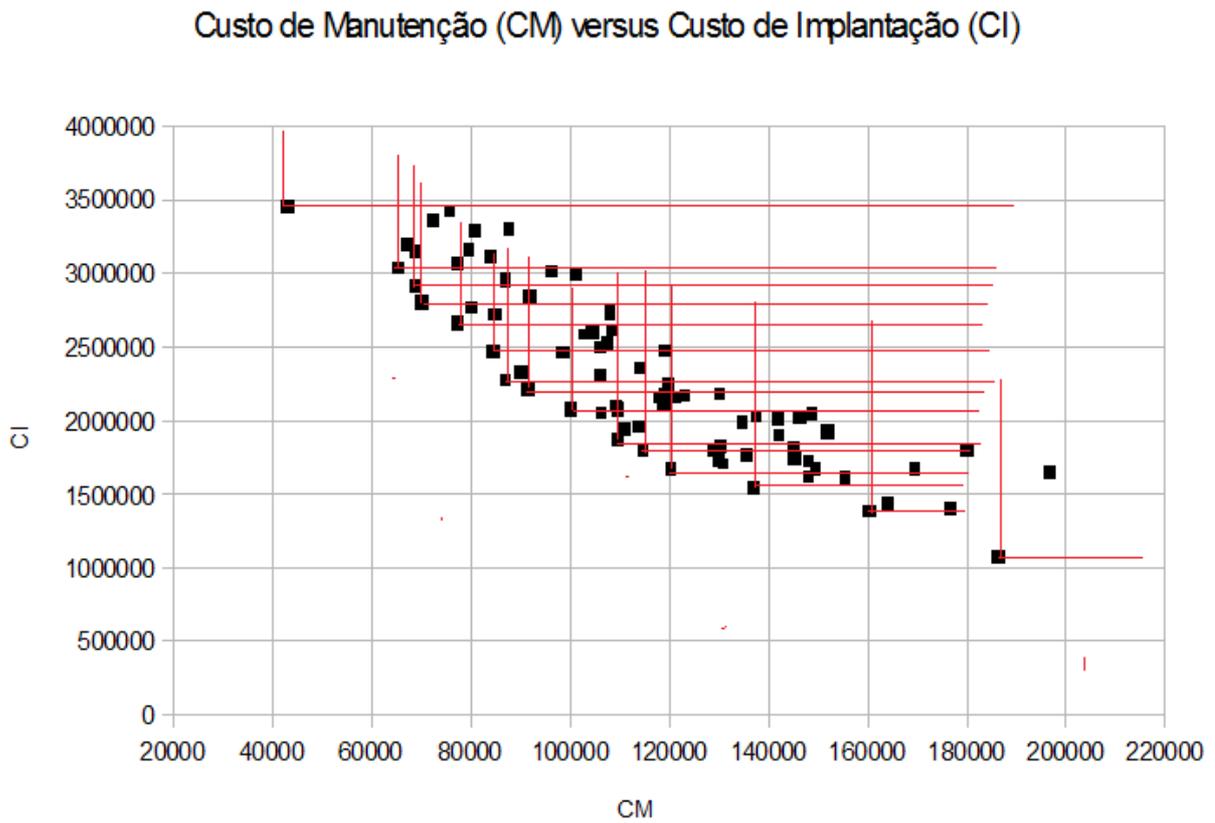
Figura 29- Rede simples com 11 trechos



Fonte: autor.

Os resultado para três ilhas cada uma com população inicial de 80 redes: a otimização visa formar uma frente de Pareto na qual as escolhas mais equilibradas estão disponíveis. A Figura 30 mostra essa frente destacada em vermelho a região dominada por soluções dominantes.

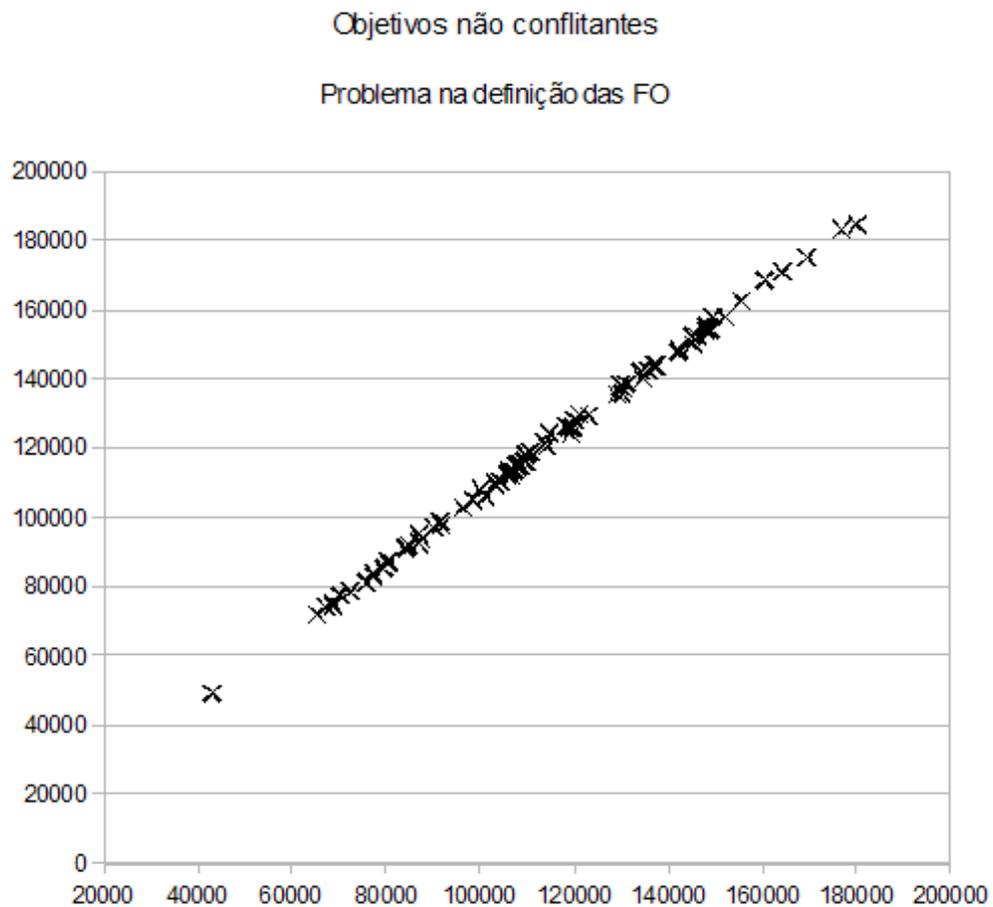
Figura 30- As soluções mais próximas dos eixos CM e CI compondo a frente de Pareto



Fonte: autor.

Confirmação da confiabilidade do algoritmo: na Figura 31 têm-se dois objetivos não conflitantes. Nesse caso, a frente formada se aproxima de uma reta afim, deslocada para cima se o objetivo vertical for mais dispendioso que o horizontal, deslocada para baixo caso contrário, e próxima da identidade se se tratar de custos idênticos.

Figura 31- Obejtivos não conflitantes, custo vertical maior que o horizontal



Um relatório gerado pela execução de exemplo de utilização do OOTEN (oriented object toolkit for EPANET) pode ser vista adiante.

(...)

Node Results at 0:00:00 hrs:

Node	Demand gpm	Head ft	Pressure psi	AGE hrs	
10	0.00	1004.35	127.54	0.50	
11	150.00	985.23	119.26	0.50	
12	150.00	970.07	117.02	0.50	
13	100.00	968.87	118.67	0.50	
21	150.00	971.55	117.66	0.50	
22	200.00	969.08	118.76	0.50	
23	150.00	968.65	120.74	0.50	
31	100.00	967.39	115.86	0.50	
32	100.00	965.69	110.79	0.50	
9	-1866.18	800.00	0.00	1.00	Reservoir
2	766.18	970.00	52.00	1.00	Tank

Node Results at 1:00:00 hrs:

Node	Demand gpm	Head ft	Pressure psi	AGE hrs	
10	0.00	1006.77	128.59	0.50	
11	150.00	987.98	120.45	0.50	
12	150.00	973.14	118.35	0.50	
13	100.00	971.92	119.99	0.50	
21	150.00	974.50	118.94	0.50	
22	200.00	972.11	120.07	0.50	
23	150.00	971.69	122.05	0.50	
31	100.00	970.36	117.15	0.50	
32	100.00	968.69	112.09	0.50	
9	-1848.58	800.00	0.00	1.00	Reservoir
2	748.58	973.07	53.33	1.00	Tank

(...)

A *toolkit* OOTEN é baseado na *toolkit* para programadores do EPANET, e incorpora todas as funcionalidades dessa *toolkit* de forma orientada a objeto. Há ainda outras funcionalidades não presentes naquela *toolkit*.

EPANET é escrito em ANSI-compatible C e OOTEN em ANSI C++. A OOTEN foi desenvolvida usando Borland C++ Builder, versão 6.0, mas pode ser compilada em qualquer compilador ANSI C e C++ compatíveis. Nenhum componente visual, tais como janelas, estão referenciados no fonte do OOTEN.

(<http://epanet.de/developer/ooten.html#ooten>)

ANEXO 2 – Rede Açailândia

Quadro 24 - Parâmetros da rede Açailândia

Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)	Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)	Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)
1	244.19	0.09	56	208.75	0.16	111	233.08	0.09
2	237.05	0.25	57	219.16	0.04	112	233.09	0.08
3	233.97	0.24	58	231.57	0.24	113	233.82	0.10
4	242.35	0.14	59	226.02	0.14	114	233.67	0.08
5	246.32	0.07	60	224.68	0.07	115	232.21	0.11
6	231.18	0.28	61	0.00	0.30	116	231.93	0.06
7	231.84	0.26	62	229.24	0.15	117	232.40	0.06
8	230.56	0.18	63	233.49	0.16	118	232.94	0.08
9	225.46	0.20	64	231.24	0.09	119	233.10	0.03
10	224.52	0.09	65	232.11	0.17	120	205.56	0.00
11	223.79	0.17	66	230.47	0.19	121	224.68	0.28
12	232.95	0.13	67	231.33	0.07	122	226.69	0.14
13	232.84	0.11	68	231.13	0.21	123	219.87	0.22
14	232.66	0.12	69	228.86	0.13	124	219.61	0.10
15	231.15	0.22	70	228.31	0.07	125	219.39	0.15
16	231.87	0.14	71	0.00	0.38	126	217.30	0.18
17	233.38	0.17	72	219.61	0.31	127	218.97	0.21
18	233.10	0.10	73	219.20	0.01	128	216.52	0.18
19	233.63	0.09	74	213.37	0.09	129	215.53	0.21
20	230.66	0.24	75	221.00	0.16	130	216.04	0.15
21	227.77	0.19	76	220.99	0.11	131	221.03	0.15
22	233.10	0.10	77	221.15	0.19	132	219.34	0.19
23	228.01	0.13	78	220.96	0.10	133	222.01	0.11
24	228.22	0.20	79	220.66	0.13	134	223.61	0.25
25	224.17	0.28	80	220.87	0.12	135	223.41	0.15
26	233.10	0.23	81	221.83	0.29	136	223.98	0.09
27	230.09	0.37	82	224.69	0.20	137	223.46	0.16
28	227.86	0.04	83	227.13	0.09	138	219.10	0.09
29	232.57	0.26	84	227.50	0.08	139	221.50	0.17
30	227.62	0.26	85	227.81	0.07	140	219.50	0.11
31	228.05	0.19	86	227.48	0.13	141	221.41	0.13
32	233.55	0.19	87	230.19	0.18	142	221.81	0.09
33	224.09	0.25	88	228.96	0.04	143	221.55	0.01
34	227.81	0.17	89	222.00	0.15	144	0.00	0.16
35	227.94	0.10	90	0.00	0.18	145	0.00	0.14
36	233.35	0.06	91	222.00	0.10	146	222.00	0.15
37	228.29	0.17	92	217.15	0.36	147	215.29	0.35
38	228.59	0.14	93	220.57	0.35	148	218.28	0.35
39	228.49	0.11	94	0.00	0.33	149	223.67	0.17
40	230.45	0.16	95	225.42	0.23	150	208.10	0.33
41	232.37	0.10	96	210.03	0.35	151	217.29	0.32
42	233.76	0.21	97	215.08	0.34	152	208.69	0.27
43	233.86	0.23	98	215.40	0.26	153	211.35	0.16
44	232.95	0.14	99	216.57	0.15	154	211.88	0.16
45	228.39	0.19	100	219.01	0.27	155	206.96	0.27
46	0.00	0.16	101	225.00	0.14	156	212.28	0.31
47	221.00	0.17	102	227.03	0.11	157	215.76	0.20
48	225.21	0.19	103	228.64	0.11	158	212.10	0.24
49	225.42	0.07	104	228.30	0.11	159	215.90	0.24
50	228.72	0.15	105	230.16	0.14	160	213.24	0.20
51	224.98	0.27	106	233.53	0.08	161	216.84	0.15
52	218.97	0.10	107	230.46	0.11	162	215.86	0.20
53	219.40	0.17	108	232.43	0.05	163	218.77	0.15
54	211.52	0.22	109	231.56	0.09	164	219.60	0.14
55	219.09	0.17	110	233.94	0.10	165	218.49	0.15

(continua)

(Quadro 24: Continuação)

Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)	Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)	Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)
166	221.18	0.22	221	245.95	0.17	276	-0.90	0.33
167	226.31	0.24	222	236.21	0.15	277	0.00	0.26
168	222.00	0.17	223	228.61	0.04	278	-0.90	0.22
169	0.00	0.19	224	241.50	0.24	279	-0.90	0.22
170	225.60	0.18	225	245.96	0.22	280	197.59	0.17
171	227.72	0.03	226	248.10	0.23	281	201.63	0.15
172	225.65	0.06	227	238.90	0.17	282	201.12	0.14
173	237.22	0.35	228	235.55	0.25	283	199.12	0.16
174	237.34	0.15	229	237.47	0.18	284	198.03	0.06
175	235.35	0.05	230	229.08	0.27	285	198.84	0.21
176	235.94	0.27	231	229.97	0.23	286	200.80	0.12
177	227.70	0.23	232	229.42	0.36	287	198.47	0.15
178	211.79	0.29	233	219.89	0.22	288	195.67	0.05
179	203.20	0.13	234	219.11	0.27	289	190.00	0.14
180	203.99	0.17	235	220.03	0.24	290	-0.90	0.14
181	206.97	0.24	236	219.16	0.29	291	194.35	0.13
182	196.99	0.33	237	210.30	0.24	292	190.81	0.08
183	208.14	0.32	238	211.34	0.21	293	195.53	0.09
184	195.70	0.22	239	211.10	0.18	294	204.43	0.15
185	195.76	0.15	240	210.25	0.23	295	205.52	0.20
186	190.07	0.10	241	198.03	0.17	296	211.20	0.25
187	195.24	0.23	242	243.19	0.20	297	215.59	0.17
188	204.01	0.23	243	224.89	0.15	298	210.17	0.19
189	201.99	0.19	244	221.75	0.12	299	200.83	0.18
190	199.10	0.24	245	220.84	0.03	300	196.44	0.14
191	204.67	0.17	246	224.81	0.07	301	195.19	0.10
192	199.53	0.21	247	232.01	0.18	302	192.05	0.11
193	202.77	0.27	248	231.51	0.27	303	0.00	0.13
194	200.76	0.21	249	227.33	0.25	304	202.49	0.10
195	200.24	0.08	250	224.56	0.27	305	216.79	0.17
196	205.04	0.26	251	220.30	0.29	306	204.47	0.12
197	207.28	0.26	252	212.78	0.29	307	210.94	0.16
198	210.19	0.24	253	208.85	0.23	308	0.00	0.13
199	206.23	0.24	254	223.88	0.17	309	215.24	0.27
200	214.16	0.20	255	220.36	0.15	310	213.90	0.14
201	208.82	0.24	256	215.09	0.14	311	214.48	0.16
202	205.86	0.24	257	213.93	0.12	312	209.92	0.14
203	214.96	0.12	258	212.30	0.17	313	207.36	0.13
204	200.76	0.29	259	209.06	0.17	314	215.30	0.16
205	203.09	0.27	260	207.13	0.12	315	209.44	0.13
206	204.96	0.27	261	217.46	0.15	316	208.46	0.14
207	203.52	0.33	262	214.73	0.15	317	212.11	0.19
208	204.93	0.18	263	207.52	0.12	318	215.35	0.12
209	204.86	0.12	264	203.17	0.11	319	203.56	0.07
210	203.31	0.20	265	205.88	0.10	320	207.18	0.14
211	203.47	0.26	266	204.29	0.06	321	208.28	0.19
212	199.65	0.11	267	203.87	0.12	322	208.38	0.14
213	199.05	0.18	268	204.12	0.13	323	207.08	0.17
214	202.59	0.15	269	205.16	0.04	324	199.58	0.10
215	239.22	0.29	270	208.72	0.23	325	200.08	0.17
216	247.85	0.12	271	208.23	0.06	326	205.21	0.14
217	247.79	0.07	272	201.13	0.02	327	209.86	0.17
218	244.49	0.08	273	198.15	0.08	328	213.68	0.16
219	244.27	0.19	274	0.00	0.31	329	213.08	0.22
220	248.90	0.13	275	196.87	0.25	330	208.73	0.16

(continua)

(Quadro 24: Continuação)

Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)	Nó	Elevação (m)	Demanda (L/s)
331	208.48	0.26	386	193.44	0.17
332	208.99	0.16	387	0.00	0.09
333	215.40	0.11	388	0.00	0.13
334	198.80	0.21	389	198.10	0.13
335	199.70	0.17	390	0.00	0.13
336	203.27	0.11	391	204.48	0.09
337	217.28	0.26	392	204.21	0.13
338	214.41	0.23	393	194.67	0.17
339	214.42	0.10	394	189.74	0.22
340	224.20	0.22	395	190.83	0.22
341	224.15	0.20	396	193.82	0.17
342	215.93	0.11	397	193.60	0.13
343	219.10	0.19	398	199.09	0.22
344	227.84	0.20	399	0.00	0.09
345	229.92	0.03	400	199.74	0.22
346	231.01	0.03	401	0.00	0.09
347	233.24	0.02	402	202.20	0.11
348	233.56	0.16	403	205.07	0.13
349	219.52	0.15	404	205.66	0.22
350	210.21	0.15	405	0.00	0.06
351	224.65	0.19	406	0.00	0.06
352	232.80	0.12	407	207.87	0.21
353	239.62	0.15	408	213.16	0.12
354	214.73	0.19	409	212.91	0.11
355	204.88	0.11	410	218.49	0.15
356	231.74	0.01	411	0.00	0.01
357	209.42	0.19	412	0.00	0.18
358	226.94	0.19	413	0.00	0.01
359	204.40	0.11	414	0.00	0.01
360	205.99	0.09	415	211.07	0.13
361	216.78	0.15	416	210.41	0.14
362	238.73	0.17	417	210.91	0.12
363	221.06	0.22	418	210.92	0.03
364	214.76	0.20	419	207.40	0.12
365	208.51	0.13	420	215.06	0.03
366	237.08	0.17	423	248.90	0.12
367	220.39	0.22	424	224.05	0.10
368	212.50	0.11	426	207.57	0.10
369	214.82	0.21	427	208.03	0.04
370	221.57	0.22	428	207.52	0.15
371	235.92	0.17	429	205.80	0.12
372	218.87	0.17	430	205.72	0.15
373	226.23	0.22	431	205.99	0.09
374	237.15	0.17	432	205.91	0.02
375	224.21	0.17			
376	235.33	0.17			
377	246.56	0.13			
378	230.39	0.13			
379	230.01	0.18			
380	234.32	0.14			
381	0.00	0.05			
382	225.86	0.12			
383	231.69	0.09			
384	0.00	0.01			
385	239.85	0.05			

Fonte: autor.

Quadro 25- Comprimento de cada trecho na rede Açailândia

T	C	T	C	T	C	T	C	T	C
1	93.88	46	139.42	91	65.96	136	101.35	181	69.81
2	73.32	47	64.59	92	57.46	137	163.70	182	63.29
3	91.72	48	64.07	93	36.12	138	103.10	183	58.19
4	38.36	49	10.84	94	62.82	139	140.97	184	155.94
5	36.77	50	77.92	95	91.34	140	103.49	185	35.22
6	63.40	51	107.54	96	48.03	141	61.84	186	57.14
7	92.47	52	63.61	97	15.77	142	79.33	187	65.75
8	64.38	53	34.41	98	113.60	143	104.98	188	136.55
9	82.55	54	35.93	99	133.90	144	128.99	189	66.66
10	64.78	55	71.94	100	63.38	145	73.35	190	24.59
11	46.98	56	150.11	101	286.15	146	43.95	191	48.49
12	21.75	57	71.88	102	9.03	147	66.29	192	84.70
13	79.31	58	45.81	103	128.07	148	43.54	193	36.44
14	44.88	59	75.81	104	130.65	149	44.42	194	59.23
15	62.30	60	83.16	105	79.26	150	43.64	195	33.02
16	154.76	61	32.44	106	56.90	151	65.03	196	119.44
17	40.70	62	75.18	107	101.90	152	10.33	197	42.30
18	43.40	63	76.04	108	169.15	153	64.78	198	85.83
19	148.68	64	131.57	109	87.23	154	42.98	199	84.59
20	45.88	65	44.78	110	48.98	155	23.70	200	48.45
21	52.63	66	57.79	111	89.99	156	39.53	201	19.62
22	46.21	67	83.59	112	31.20	157	65.74	202	78.47
23	73.77	68	72.06	113	135.26	158	38.38	203	70.08
24	95.29	69	111.20	114	72.90	159	34.46	204	41.85
25	37.67	70	73.48	115	39.77	160	66.63	205	76.58
26	31.49	71	37.27	116	37.67	161	10.23	206	9.54
27	71.08	72	106.05	117	44.43	162	53.81	207	96.33
28	35.37	73	98.44	118	41.08	163	45.60	208	44.17
29	75.74	74	133.80	119	21.33	164	39.09	209	83.84
30	106.24	75	35.10	120	83.88	165	32.07	210	75.39
31	168.17	76	141.03	121	63.59	166	52.11	211	91.34
32	79.38	77	82.98	122	77.18	167	32.44	212	41.75
33	156.80	78	62.11	123	53.59	168	47.22	213	82.23
34	54.71	79	70.50	124	118.22	169	31.91	214	162.38
35	72.05	80	70.79	125	75.22	170	33.32	215	101.73
36	219.08	81	27.95	126	116.61	171	42.06	216	162.59
37	54.88	82	97.94	127	69.22	172	111.80	217	68.48
38	154.65	83	129.07	128	18.29	173	165.87	218	162.07
39	57.00	84	75.64	129	82.99	174	75.78	219	70.80
40	63.14	85	126.64	130	163.11	175	30.37	220	162.18
41	13.12	86	71.61	131	82.57	176	175.83	221	69.08
42	57.16	87	78.52	132	142.79	177	72.15	222	86.61
43	43.70	88	72.62	133	81.50	178	47.57	223	70.44
44	112.40	89	57.58	134	139.89	179	27.19	224	87.50
45	110.01	90	112.20	135	80.50	180	126.11	225	71.71

Legenda: T – trecho; L – comprimento (m) (Continua)

(Quadro 25: Continuação)

T	L	T	L	T	L	T	L	T	L
226	162.65	271	162.05	316	18.74	361	84.54	406	51.39
227	68.10	272	69.27	317	68.37	362	84.25	407	94.48
228	75.44	273	71.57	318	159.88	363	155.38	408	84.65
229	70.39	274	106.74	319	71.81	364	92.21	409	29.62
230	141.48	275	107.63	320	160.98	365	29.21	410	109.89
231	70.46	276	71.15	321	50.43	366	132.02	411	118.68
232	143.18	277	70.48	322	19.51	367	28.31	412	71.50
233	69.11	278	71.45	323	73.26	368	48.06	413	59.57
234	61.65	279	69.50	324	84.81	369	98.45	414	175.76
235	68.52	280	72.76	325	197.39	370	50.35	415	86.78
236	78.83	281	70.29	326	122.53	371	119.81	416	121.53
237	69.62	282	96.89	327	53.54	372	84.72	417	72.23
238	61.57	283	65.12	328	40.60	373	144.17	418	214.36
239	71.18	284	59.59	329	78.97	374	40.80	419	86.26
240	78.69	285	124.30	330	111.87	375	142.46	420	63.26
241	68.96	286	84.21	331	79.29	376	57.16	421	73.06
242	69.36	287	94.41	332	56.32	377	141.10	422	99.46
243	60.10	288	61.67	333	89.72	378	77.74	423	74.79
244	67.61	289	35.74	334	61.85	379	139.41	424	59.10
245	80.50	290	51.89	335	81.66	380	80.32	425	60.73
246	69.45	291	36.40	336	79.34	381	137.34	426	58.84
247	70.58	292	162.44	337	53.83	382	83.23	427	40.56
248	119.07	293	62.03	338	79.83	383	136.14	428	47.89
249	20.81	294	161.08	339	67.77	384	112.75	429	145.95
250	61.82	295	69.82	340	41.65	385	41.44	430	104.16
251	117.35	296	158.77	341	58.04	386	110.74	431	72.49
252	96.72	297	67.72	342	82.39	387	56.51	432	61.80
253	39.18	298	83.48	343	96.94	388	110.71	433	30.79
254	39.90	299	68.31	344	77.42	389	28.04	434	41.46
255	82.53	300	84.53	345	83.78	390	49.78	435	63.58
256	139.32	301	62.41	346	80.14	391	111.09	436	61.79
257	82.08	302	128.80	347	82.31	392	78.89	437	60.64
258	86.30	303	62.35	348	177.37	393	111.98	438	57.68
259	44.37	304	126.01	349	166.07	394	53.68	439	63.43
260	23.55	305	60.57	350	57.77	395	113.64	440	60.99
261	78.49	306	97.19	351	82.25	396	41.00	441	72.72
262	85.39	307	61.29	352	85.17	397	84.39	442	97.11
263	181.95	308	93.61	353	82.24	398	88.25	443	120.53
264	82.30	309	23.35	354	82.76	399	34.54	444	91.86
265	150.44	310	161.90	355	83.79	400	50.14	445	61.00
266	159.13	311	60.23	356	162.27	401	35.82	446	88.83
267	22.68	312	83.85	357	82.70	402	23.73	447	54.31
268	115.36	313	72.54	358	79.67	403	60.56	448	73.99
269	159.69	314	70.41	359	86.96	404	86.44	449	63.15
270	69.77	315	162.90	360	83.08	405	100.64	450	60.97

Legenda: T – trecho; L – comprimento (m) (Continua)

(Quadro 25: Continuação)

T	L	T	L	T	L	T	L	T	L
451	75.04	496	92.23	541	61.52	586	62.46	631	125.97
452	57.16	497	61.12	542	35.47	587	62.55	632	59.19
453	70.83	498	61.51	543	59.90	588	60.45	633	57.07
454	62.18	499	61.79	544	88.46	589	61.89	634	108.47
455	60.70	500	58.83	545	61.21	590	60.20	635	10.58
456	28.15	501	121.08	546	61.09	591	121.59	636	8.54
457	66.40	502	61.21	547	121.28	592	62.03	637	17.98
458	56.57	503	120.17	548	63.70	593	61.71	638	85.67
459	50.46	504	62.42	549	58.75	594	62.08	639	70.43
460	60.15	505	61.46	550	28.46	595	121.50	640	11.24
461	104.62	506	60.34	551	60.27	596	60.64	641	9.31
462	38.02	507	96.60	552	63.08	597	61.53	642	26.09
463	73.39	508	69.63	553	121.20	598	61.52	643	87.61
464	78.41	509	46.97	554	62.29	599	59.44	644	9.40
465	60.88	510	139.19	555	60.55	600	60.98	645	56.75
466	49.79	511	61.83	556	60.96	601	60.59	646	95.91
467	80.31	512	106.81	557	61.98	602	61.42	647	11.18
468	77.49	513	36.32	558	61.23	603	62.26	648	59.35
469	120.29	514	61.75	559	120.85	604	126.65	649	38.16
470	63.11	515	66.27	560	61.82	605	60.77	650	43.14
471	8.48	516	138.61	561	61.89	606	60.46	651	16.22
472	157.58	517	70.49	562	62.40	607	126.66	652	15.47
473	53.72	518	46.28	563	62.91	608	60.12	653	26.19
474	19.24	519	69.74	564	122.84	609	62.19	654	73.21
475	144.09	520	48.25	565	61.98	610	58.96	655	75.97
476	49.77	521	29.18	566	61.47	611	36.26	656	73.83
477	61.21	522	47.68	567	61.37	612	60.55	657	83.85
478	61.63	523	34.51	568	61.55	613	91.61	658	143.29
479	62.60	524	58.34	569	123.52	614	91.61	659	62.93
480	36.23	525	37.54	570	62.58	615	96.33	660	68.82
481	21.24	526	60.63	571	59.68	616	62.53	661	51.42
482	58.84	527	62.70	572	62.65	617	98.44	662	8.68
483	60.58	528	58.66	573	59.07	618	61.25	663	8.76
484	84.40	529	89.09	574	64.31	619	37.10	664	6.86
485	61.43	530	61.20	575	61.54	620	70.87	665	90.29
486	59.96	531	89.29	576	67.18	621	61.79	666	14.32
487	82.43	532	61.94	577	59.86	622	71.14		
488	23.48	533	60.68	578	45.49	623	19.41		
489	61.52	534	60.68	579	19.49	624	107.43		
490	61.92	535	35.84	580	65.59	625	63.69		
491	60.01	536	18.16	581	61.05	626	20.42		
492	82.95	537	60.52	582	120.87	627	60.39		
493	62.40	538	60.60	583	63.53	628	19.52		
494	61.40	539	89.10	584	61.31	629	86.50		
495	67.25	540	60.05	585	63.23	630	73.51		

Fonte: autor.

Legenda: T – trecho; L – comprimento (m).

Quadro 26- Trechos e diâmetros para a rede Açailândia

T	D	T	D	T	D	T	D	T	D
1	252.0	46	100.0	91	299.8	136	54.6	181	252.0
2	202.2	47	77.2	92	252.0	137	54.6	182	156.4
3	394.6	48	498.4	93	299.8	138	54.6	183	202.2
4	202.2	49	394.6	94	54.6	139	498.4	184	202.2
5	498.4	50	299.8	95	54.6	140	202.2	185	394.6
6	299.8	51	100.0	96	394.6	141	156.4	186	100.0
7	77.2	52	252.0	97	100.0	142	156.4	187	252.0
8	54.6	53	156.4	98	498.4	143	498.4	188	54.6
9	252.0	54	498.4	99	156.4	144	77.2	189	156.4
10	156.4	55	77.2	100	252.0	145	77.2	190	54.6
11	100.0	56	202.2	101	100.0	146	77.2	191	252.0
12	156.4	57	252.0	102	299.8	147	252.0	192	394.6
13	54.6	58	202.2	103	77.2	148	498.4	193	498.4
14	394.6	59	100.0	104	100.0	149	77.2	194	394.6
15	156.4	60	299.8	105	54.6	150	77.2	195	156.4
16	77.2	61	100.0	106	156.4	151	252.0	196	299.8
17	156.4	62	100.0	107	498.4	152	252.0	197	202.2
18	77.2	63	202.2	108	202.2	153	299.8	198	77.2
19	100.0	64	156.4	109	77.2	154	156.4	199	100.0
20	77.2	65	299.8	110	394.6	155	77.2	200	394.6
21	202.2	66	299.8	111	77.2	156	394.6	201	156.4
22	394.6	67	54.6	112	77.2	157	77.2	202	100.0
23	156.4	68	156.4	113	498.4	158	77.2	203	77.2
24	299.8	69	498.4	114	202.2	159	77.2	204	54.6
25	394.6	70	394.6	115	156.4	160	299.8	205	77.2
26	54.6	71	100.0	116	498.4	161	54.6	206	156.4
27	394.6	72	77.2	117	54.6	162	498.4	207	299.8
28	394.6	73	77.2	118	394.6	163	252.0	208	299.8
29	498.4	74	202.2	119	77.2	164	202.2	209	54.6
30	77.2	75	156.4	120	252.0	165	252.0	210	394.6
31	202.2	76	54.6	121	100.0	166	498.4	211	156.4
32	202.2	77	156.4	122	299.8	167	498.4	212	100.0
33	498.4	78	100.0	123	202.2	168	299.8	213	299.8
34	498.4	79	100.0	124	252.0	169	394.6	214	394.6
35	252.0	80	202.2	125	100.0	170	77.2	215	54.6
36	394.6	81	299.8	126	498.4	171	202.2	216	54.6
37	100.0	82	299.8	127	252.0	172	202.2	217	54.6
38	202.2	83	77.2	128	394.6	173	202.2	218	252.0
39	54.6	84	100.0	129	394.6	174	202.2	219	156.4
40	394.6	85	77.2	130	54.6	175	202.2	220	202.2
41	252.0	86	100.0	131	156.4	176	54.6	221	100.0
42	498.4	87	394.6	132	54.6	177	299.8	222	156.4
43	54.6	88	77.2	133	299.8	178	498.4	223	299.8
44	77.2	89	100.0	134	252.0	179	394.6	224	202.2
45	299.8	90	252.0	135	77.2	180	299.8	225	100.0

Legenda: T – trecho; D – diâmetro interno (mm) (Continua)

(Quadro 26: Continuação)

T	D	T	D	T	D	T	D	T	D
226	156.4	271	77.2	316	54.6	361	252.0	406	77.2
227	498.4	272	54.6	317	299.8	362	394.6	407	100.0
228	252.0	273	252.0	318	252.0	363	252.0	408	54.6
229	252.0	274	54.6	319	299.8	364	77.2	409	100.0
230	394.6	275	299.8	320	202.2	365	77.2	410	394.6
231	202.2	276	498.4	321	54.6	366	156.4	411	100.0
232	498.4	277	299.8	322	394.6	367	156.4	412	299.8
233	100.0	278	299.8	323	202.2	368	299.8	413	394.6
234	77.2	279	54.6	324	156.4	369	54.6	414	394.6
235	54.6	280	77.2	325	498.4	370	156.4	415	299.8
236	252.0	281	394.6	326	202.2	371	156.4	416	252.0
237	252.0	282	299.8	327	77.2	372	156.4	417	100.0
238	299.8	283	54.6	328	252.0	373	156.4	418	498.4
239	77.2	284	54.6	329	100.0	374	299.8	419	100.0
240	252.0	285	100.0	330	202.2	375	299.8	420	252.0
241	156.4	286	100.0	331	202.2	376	77.2	421	299.8
242	202.2	287	77.2	332	100.0	377	498.4	422	54.6
243	299.8	288	498.4	333	77.2	378	394.6	423	156.4
244	156.4	289	498.4	334	299.8	379	394.6	424	498.4
245	299.8	290	299.8	335	498.4	380	156.4	425	202.2
246	77.2	291	498.4	336	77.2	381	252.0	426	54.6
247	54.6	292	202.2	337	394.6	382	100.0	427	77.2
248	77.2	293	156.4	338	498.4	383	202.2	428	202.2
249	202.2	294	394.6	339	252.0	384	498.4	429	156.4
250	394.6	295	77.2	340	394.6	385	77.2	430	299.8
251	202.2	296	394.6	341	54.6	386	202.2	431	156.4
252	156.4	297	299.8	342	100.0	387	299.8	432	202.2
253	77.2	298	77.2	343	394.6	388	54.6	433	394.6
254	252.0	299	202.2	344	252.0	389	202.2	434	54.6
255	394.6	300	252.0	345	54.6	390	299.8	435	394.6
256	299.8	301	498.4	346	100.0	391	498.4	436	252.0
257	202.2	302	394.6	347	299.8	392	299.8	437	252.0
258	498.4	303	299.8	348	100.0	393	54.6	438	498.4
259	100.0	304	77.2	349	77.2	394	252.0	439	299.8
260	202.2	305	394.6	350	498.4	395	156.4	440	77.2
261	394.6	306	498.4	351	100.0	396	54.6	441	252.0
262	54.6	307	202.2	352	156.4	397	77.2	442	54.6
263	77.2	308	299.8	353	252.0	398	156.4	443	100.0
264	202.2	309	54.6	354	252.0	399	156.4	444	498.4
265	156.4	310	54.6	355	202.2	400	77.2	445	498.4
266	202.2	311	202.2	356	252.0	401	77.2	446	100.0
267	54.6	312	299.8	357	54.6	402	54.6	447	498.4
268	54.6	313	54.6	358	394.6	403	54.6	448	54.6
269	156.4	314	252.0	359	54.6	404	299.8	449	252.0
270	202.2	315	498.4	360	77.2	405	498.4	450	156.4

Legenda: T – trecho; D – diâmetro interno (mm) (Continua)

(Quadro 26: Continuação)

T	D	T	D	T	D	T	D	T	D
451	100.0	496	299.8	541	202.2	586	299.8	631	299.8
452	100.0	497	252.0	542	54.6	587	394.6	632	77.2
453	202.2	498	394.6	543	498.4	588	252.0	633	100.0
454	100.0	499	498.4	544	54.6	589	299.8	634	252.0
455	394.6	500	100.0	545	100.0	590	202.2	635	299.8
456	156.4	501	156.4	546	77.2	591	299.8	636	498.4
457	394.6	502	100.0	547	299.8	592	202.2	637	252.0
458	100.0	503	54.6	548	100.0	593	394.6	638	299.8
459	54.6	504	77.2	549	202.2	594	100.0	639	100.0
460	498.4	505	299.8	550	77.2	595	299.8	640	54.6
461	299.8	506	299.8	551	77.2	596	498.4	641	156.4
462	299.8	507	252.0	552	77.2	597	54.6	642	77.2
463	100.0	508	394.6	553	77.2	598	252.0	643	394.6
464	299.8	509	77.2	554	299.8	599	156.4	644	299.8
465	299.8	510	77.2	555	156.4	600	394.6	645	252.0
466	252.0	511	498.4	556	77.2	601	77.2	646	498.4
467	77.2	512	100.0	557	202.2	602	299.8	647	54.6
468	202.2	513	394.6	558	100.0	603	100.0	648	156.4
469	252.0	514	156.4	559	100.0	604	252.0	649	77.2
470	252.0	515	202.2	560	202.2	605	202.2	650	202.2
471	252.0	516	252.0	561	394.6	606	299.8	651	54.6
472	202.2	517	299.8	562	299.8	607	77.2	652	77.2
473	252.0	518	156.4	563	77.2	608	202.2	653	54.6
474	100.0	519	156.4	564	394.6	609	54.6	654	77.2
475	54.6	520	156.4	565	202.2	610	394.6	655	202.2
476	498.4	521	77.2	566	299.8	611	498.4	656	202.2
477	252.0	522	100.0	567	498.4	612	299.8	657	394.6
478	498.4	523	54.6	568	299.8	613	77.2	658	77.2
479	54.6	524	299.8	569	394.6	614	100.0	659	100.0
480	498.4	525	202.2	570	77.2	615	100.0	660	156.4
481	498.4	526	252.0	571	100.0	616	54.6	661	54.6
482	394.6	527	299.8	572	299.8	617	54.6	662	498.4
483	299.8	528	394.6	573	252.0	618	394.6	663	498.4
484	202.2	529	54.6	574	252.0	619	202.2	664	54.6
485	252.0	530	498.4	575	156.4	620	77.2	665	498.4
486	156.4	531	77.2	576	299.8	621	394.6	666	498.4
487	100.0	532	54.6	577	299.8	622	202.2		
488	498.4	533	202.2	578	54.6	623	498.4		
489	156.4	534	156.4	579	498.4	624	54.6		
490	156.4	535	498.4	580	498.4	625	498.4		
491	394.6	536	202.2	581	77.2	626	77.2		
492	299.8	537	252.0	582	252.0	627	299.8		
493	394.6	538	394.6	583	394.6	628	498.4		
494	100.0	539	394.6	584	54.6	629	299.8		
495	394.6	540	299.8	585	299.8	630	252.0		

Fonte: autor.

Legenda: T – trecho; D – diâmetro interno (mm).

ANEXO 3 – LICENÇAS DOS SOFTWARES UTILIZADOS

SOFTWARE	ID
MICROSOFT WINDOWS 7 HOME BASIC	00346-OEM-8992752-50082
MICROSOFT VISUAL STUDIO – V C++ 2012	05695-004-0030004-02441
EPANET 2.0 BRASIL	FREEWARE
LENHSNET	LIVRE PARA FINS DE PESQUISA
APACHE OPEN OFFICE	OPENSOURCE
SISTEMA UFC	LIVRE PARA FINS DE PESQUISA

APÊNDICE A – EPANET

A.1. *Environment Protection Agency's Network Engine Tool* – EPANET

Segundo o manual do EPANET, o programa de computador de mesmo nome é voltado para a execução de simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em RDA pressurizadas. Valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede ao longo da simulação, subdividido em múltiplos intervalos, tudo isso pode ser obtido por meio do EPANET.

A.1.1. *Característica Gerais e Capacidade de Modelagem Hidráulica*

Ainda de acordo com seu manual, o EPANET foi criado como ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição de água (SDA). Algumas aplicações do programa são: estabelecimento de cenários de projeto, calibração de modelos hidráulicos, análise do decaimento do cloro residual e avaliação dos consumos. Seguem-se algumas formas de ajuda na análise de estratégias alternativas de gestão visando a melhor qualidade da água de um SDA:

1. alterações no uso de origens da água em um SDA com fontes múltiplas;
2. alteração de esquema de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento ou esvaziamento de reservatórios de nível variável (RNV);
3. aplicação de tratamento adicional, e.g., recloração;
4. reabilitação: seleção de tubulações para limpeza e substituição.

Há uma interface Windows para edição de dados da rede, execução de simulações hidráulicas e de qualidade da água, visualização de resultados, incluindo isolinhas.

As principais características do conjunto de ferramentas de cálculo para simulação hidráulica são:

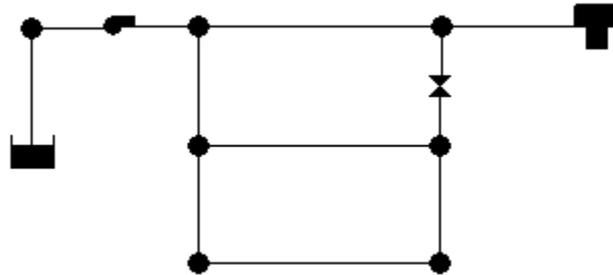
- Dimensão ilimitada do número de componentes de uma rede;
- Perda de carga calculada via Hazen-Williams, Darcy-Weibach ou Chezy-Manning;
- Perdas de cargas singulares em curvas, alargamentos e estreitamentos consideradas;
- Bombas de velocidade constante ou variável;
- Energia de bombeamento e seu custo calculáveis;
- Principais tipos de válvula modelados;
- RNV modelado de diversas formas, por meio de curvas de volume em função da altura de água;
- Categorias múltiplas de consumo nos nós, com padrões próprios de variação no tempo;
- Relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores modelada;
- Condições de operação do sistema em baseadas controles simples, dependentes de uma única condição, ou em controles com múltiplas condições.

A.1.2. Modelo de uma RDA

De acordo com o manual do EPANET, seu modelo de SDA é um conjunto de trechos ligados a nós. As tubulações, as bombas e as válvulas de controle são representadas pelos trechos. As nexões, os reservatórios de nível fixo (RNF) e os RNV são representados pelos nós.

A Figura 32 ilustra um SDA com uma rede simples.

Figura 32- ilustração de modelo de um SDA no EPANET



Fonte: EPANET

A.1.2.1. Nós

Os nós da rede são pontos nas extremidades de um trecho, em que há fluxo hídrico. Como principais dados de entrada para nós da rede, tem-se:

- Cota acima de dado nível de referência;
- Consumo base;
- Qualidade inicial da água.

São resultados obtidos para os nós em cada instante de simulação:

- Carga hidráulica total (nível de água nos reservatórios);
- Pressão (altura piezométrica);
- Qualidade da água.

As características seguintes também podem estar presentes nos nós:

- Consumo variável no tempo;
- Múltiplas categorias de consumo associadas;
- Consumos negativos, indicando que há entrada de água na rede;
- Constituir origens de qualidade de água, em que os parâmetros de qualidade entram na rede;
- Possuir dispositivos emissores do tipo orifício, que fazem com que a vazão efluente dependa da pressão.

A.1.2.2. Reservatórios de Nivel Fixo (RNF)

A carga hidráulica é constante e a capacidade de armazenamento de água nestes nós especiais é ilimitada, constituindo-se fontes ou sumidouros de água externos à rede. Podem ser utilizados para simular corpos hídricos, aquíferos ou ligações a outros sistemas, servindo ainda como pontos iniciais de qualidade de água.

Devido a sua capacidade ilimitada de armazenamento, o RNF tem suas propriedades totalmente independentes do funcionamento da rede, sendo considerado, portanto, um ponto fronteiro da rede. Dessa forma, o que ocorre na rede não interfere na carga hidráulica ou na qualidade da água. Isso significa que tais parâmetros não sofrem alteração durante a simulação. Não obstante, pode-se definir um RNF cuja carga hidráulica varie ao longo do tempo, utilizando-se de um padrão temporal; ou cujas características da qualidade da água sofram mudanças, por meio da propriedade Origem de Qualidade.

A.1.2.3. Reservatórios de Nível Variado (RNV)

Nos RNV, a capacidade de armazenamento é limitada e o volume de água armazenado pode variar durante a simulação. Eles são modelados para operar entre as alturas máxima e mínima de água, sendo interrompido o fluxo de água caso uma das duas medidas seja atingida. Também podem ser utilizados como pontos de origem de qualidade da água. Seguem-se os parâmetros que caracterizam os RNV:

- Cota de fundo (altura da água é zero);
- Diâmetro (se a forma do reservatório não for cilíndrica, tem-se a curva de volume);

- Altura de água mínima (altura de soleira);
- Altura máxima;
- Altura de água inicial para o cenário a ser simulado;
- Qualidade da água inicial.

A cota de fundo pode ser substituída pela cota do terreno. Em qualquer caso, as alturas indicadas acima devem ser tomadas considerando um desses dois parâmetros. Como principais resultados da simulação, tem-se:

- Carga hidráulica;
- Qualidade da água.

A.1..2.4. Dispositivos Emissores do Tipo Orifício

A modelagem do escoamento através de orifícios ou bocais com descarga direta para a atmosfera é feita por meio dos nós aos quais estão associados os dispositivos emissores. A seguinte lei governa a variação da vazão através desses dispositivos em função da pressão no nó:

$$q = C.p^y \quad (10)$$

Na equação 10, q é a vazão no nó; p é a pressão; C , o coeficiente de vazão; e y , o expoente do emissor.

O parâmetro y para orifícios e bocais vale 0,5. O valor do coeficiente de vazão em unidades de vazão para uma queda de pressão unitária é fornecido pelos fabricantes.

O uso de dispositivos emissores se dá na modelagem de sistemas com aspersores e em redes de irrigação. Caso seja possível estimar o coeficiente de vazão e o expoente de pressão para a perda na junta ou fissura, os emissores podem ser utilizados na simulação de perdas em tubulações. Também é possível modelar a vazão de combate a incêndio em um nó, caso no qual se utiliza um valor muito elevado como coeficiente de vazão e adiciona-se à cota do terreno a pressão mínima requerida (mca) para essa atividade. Para o EPANET, os dispositivos emissores são propriedades dos nós e não um componente independente.

A.1.2.5. Tubulações

Os trechos representam as tubulações no EPANET, que considera que o escoamento ocorra sob pressão em todas elas. O fluxo ocorre de pontos com carga hidráulica mais alta para os com carga hidráulica mais baixa.

Cada trecho possui os seguintes parâmetros:

- Nós inicial e final;
- Diâmetro (considerado uma variável no problema objeto deste trabalho);
- Comprimento (fixo no problema de otimização abordado neste trabalho);
- Coeficiente de rugosidade (ligado à perda de carga);
- Estado: aberto ou fechado ou contendo válvula de retenção.

O último parâmetro, de forma indireta, permite a presença de uma válvula de seccionamento ou uma válvula de retenção – permite que o escoamento na tubulação ocorra em apenas um sentido.

Para simulações de qualidade da água em tubulações é preciso fornecer dois coeficientes: o de reação no volume do escoamento e o de reação na tubulação. No entanto, não será abordada a qualidade da água no presente trabalho.

Após a simulação, obtém-se:

- Vazão;
- Velocidade;
- Perda de carga;
- Fator de resistência ou fator de Darcy-Weisbach;
- Valor médio da taxa de reação para o parâmetro de qualidade da água simulado;
- Concentração média do parâmetro de qualidade de água simulado.

A determinação da perda de carga hidráulica em consequência do trabalho realizado pelas forças de resistência é feita com das fórmulas: de Hazen-Williams, Darcy-

Wisbach, ou Chezy-Manning.

Tendo sido desenvolvida originalmente apenas para escoamento turbulento, Hazen-Williams é uma das mais utilizadas para o cálculo da perda de carga, embora seja aplicável somente para a água. Considerada mais confiável do ponto de vista de modelo, a fórmula de Darcy-Weisbach é aplicável a todos os regimes de escoamento e a todos os líquidos.

Para escoamentos em superfície livre a fórmula de Chezy-Manning é utilizada com mais frequência. Essas fórmulas têm base na seguinte expressão:

$$h_l = A \cdot q^B \quad (11)$$

Ela dá a perda de carga contínua entre o nó inicial e o nó final da tubulação (h_l). Em (11), q é a vazão; A é o termo de perda de carga, e B é o expoente da vazão.

O Quadro 27 mostra as expressões para o termo de perda de carga e os valores para o expoente da vazão, determinado empiricamente para cada fórmula.

Quadro 27- Fórmulas para calcular a perda de carga contínua em escoamento sob pressão.

Fórmula	Termo de Perda de Carga (A)	Expoente de Vazão (B)
Hazen-Williams	$10,674 \cdot C^{-1,852} \cdot d^{-4,871} \cdot L$	1,85
Darcy-Weisbach	$0,0827 \cdot f(\epsilon, d, a) \cdot d^{-5} \cdot L$	2
Chezy-Manning	$10,29 n^2 \cdot d^{-5,33} \cdot L$	2

Fonte: manual do EPANET Brasil 2.0

Legenda:

C = coeficiente da fórmula de Hazen-Williams;
 ϵ = rugosidade absoluta (ou de Darcy-Weisbach);
 f = fator de Darcy-Weisbach;
 n = coeficiente de rugosidade de Manning;
 d = diâmetro da tubulação;
 L = comprimento da tubulação;
 q = vazão.

Os intervalos de variação dos diferentes coeficientes, em função do tipo de material de tubulação estão dispostos no Quadro 28.

Quadro 28- Coeficientes das fórmulas de perda de carga em tubulações novas.

Material	C, Hazen-Williams (adimensional)	E, Darcy-Weisbach (mm)	n, Manning (adimensional)
Ferro fundido	130 - 140	0,25	0,0012-0,0015
Concreto	120 - 140	0,3 - 3	0,0012-0,0017
Ferro galvanizado	120	0,15	0,0015-0,00157
Plástico	140 - 150	0,0015	0,0011-0,0015
Aço	140 - 150	0,03	0,0015-0,0017
“Grés”	110	0,30	0,0013-0,0015

Fonte: manual do EPANET Brasil 2.0.

A despeito de estes valores mudarem consideravelmente de acordo com a idade da tubulação, esta é considerada como nova de acordo com os dados.

De acordo com o regime de escoamento, adotando a fórmula de Darcy-Weisbach, o EPANET se utiliza de diferentes métodos para o cálculo do fator de resistência: fórmula de Hagen-Poiseuille (para regime laminar – $Re < 2000$); fórmula de Swamee e Jain, como aproximação da fórmula de Colebrook-White (para escoamento turbulento – $Re > 4000$); e uma interpolação cúbica para escoamento turbulento de transição ($2000 < Re < 4000$), a partir do ábaco de Moody.

Dependendo de certas condições de operação ou de determinados períodos da simulação, as tubulações podem estar abertas ou fechadas. Essas condições podem ser dada altura do nível da água no reservatório, ou a pressão em determinado nó acima ou abaixo de dado valor.

Os demais componentes são de menor interesse para este trabalho e, portanto, indica-se a leitura direta dos mesmos no manual do EPANET Brasil 2.0, caso seja de interesse do leitor.

APÊNDICE B – Exemplos de Algoritmos Multiobjetivo

B.1. *Honey Bee Mating Optimization (HBMO)*

HBMO é um algoritmo baseado no comportamento social das abelhas, mais especificamente, no seu ritual de acasalamento. Uma das vantagens do HBMO sobre um AG é que, usualmente, um AG aplica um tipo específico de *cruzamento* e de *mutação* com probabilidade constante durante todo o processo de evolução, enquanto o HBMO emprega diferentes operadores com probabilidade adaptativa nos voos de acasalamento (HADDAD et al. 2008).

B.1.1. *O Comportamento na Colmeia e o HBMO*

As abelhas são conhecidas a mais de 40 mil anos. Vivem em colônia dentro de colmeias bem organizadas, que abrigam cerca de 60 mil indivíduos, cada um com uma função. A abelha rainha é a única fêmea com os órgãos sexuais plenamente desenvolvidos e sua única função é a postura de ovos (RAMOS e CARVALHO, 2007).

A função das abelhas operárias depende de sua idade e consiste em limpar a colmeia, cuidar das larvas, produzir cera, construir favos, armazenar alimentos e proteger a colmeia. A vida das operárias é bastante curta se comparado a vida da abelha rainha: entre um e quatro meses (RAMOS e CARVALHO, 2007).

As abelhas apresentam-se em três categorias: sociais, que vivem em enxames e são a minoria entre as espécies; solitárias, que fazem seus ninhos a partir de células onde depositam pólen e néctar, pondo aí seus ovos e fechando a célula, que é então abandonada; e parasitas, que roubam o ninho de outras para pôr seus ovos (RAMOS e CARVALHO, 2007).

O movimento feito pelas abelhas em seu voo é usado para estabelecer a comunicação entre elas. Um destes voos é o de acasalamento, durante o qual a rainha atrai os zangões para longe do ninho e copula com eles. A espermateca acumulará esperma para compor o banco genético da colônia (AFSHAR et al., 2007). Os ovos fecundados são produto de misturas aleatórias feitas na espermateca (AFSHAR, 2006 apud R. E. PAGE, The evolution of multiple mating behavior by honey bee queens (*Apis mellifera* L.), J. Genetic. 96 (1980), pp. 263-273).

Muitos zangões seguem a rainha durante o voo de acasalamento. A cópula de cada

zangão é única, enquanto que a rainha copula diversas vezes e a cada acasalamento ocorre a eventual morte do zangão (AFSHAR et al., 2006).

Pode-se considerar o voo-de-acasalamento como um conjunto de transições no estado do tempo quando a rainha se move entre os diferentes estados com certa velocidade e copula com o zangão encontrado em cada estado probabilisticamente (AFSHAR et al., 2006). A abelha rainha parte do ninho com energia suficiente para o acasalamento e retorna após o seu voo, com essa energia reduzida. Neste momento sua espermateca vai apresentar um nível entre cheia e vazia, dependendo do que ocorreu durante o voo-de-acasalamento (BARROS, 2007).

B.1.2. O Funcionamento do HBMO

Com base no processo natural de uma colmeia, o HBMO inicia sua primeira população de forma aleatória, com distribuição uniforme sobre espaço de busca. A aptidão (*fitness*) de cada indivíduo é obtida do valor de retorno da função-objetivo aplicada na solução tentada. Após o cálculo da aptidão do indivíduo, essa aptidão f é associada para futuras comparações com outros os indivíduos.

A melhor solução é escolhida de acordo com a aptidão será denominada a abelha-rainha (Q), e serão descartadas que as soluções vencidas. Tem início o processo iterativo do algoritmo, no qual são geradas aleatoriamente soluções chamadas de zangões (D) que apresentam um grau crescente de dependência da abelha-rainha (BARROS et al., 2007). O grau de dependência varia na escala de 0,00 até 1,00. A equação 8 (BARROS et al., 2007, p. 6) mostra D como função linear e crescente cujas variáveis são o genótipo de Q e de outra solução aleatória d , e o número da interação corrente i , enquanto que o número n de iterações é constante.

$$D = Q \times \left[\frac{(i-1)}{n} \right] + d \times \left[\frac{(n-(i-1))}{n} \right] \quad (12)$$

Outra forma possível para expressar a dependência de D em relação a Q é a função quadrática e crescente disposta na equação 9 (BARROS et al., 2007, p. 6).

$$D = Q \times \left[1 - \left(\frac{(n - (i - 1))}{n} \right)^2 \right] + d \times \left[\frac{(n - (i - 1))}{n} \right]^2 \quad (13)$$

As equações 12 e 13 são exemplos do que se chama autoadaptação, que consiste em um parâmetro de controle de convergência em função do número de iterações. Quanto maior o número de iterações, maior será a dependência dos zangões (D) em relação à abelha-rainha (Q). A diversidade do algoritmo é mantida pelo fator mínimo de aleatoriedade do zangão (BARROS et al., 2007).

Durante o voo de acasalamento a abelha-rainha cruza com determinado zangão seguindo a função de probabilidade dada pela equação 14 (ABBAS, 2001a apud BARROS et al., 2007).

$$P(Q, D) = e^{-\frac{\Delta(f)}{S(t)}} \quad (14)$$

$P(Q, D)$ é então a probabilidade de o esperma do zangão D ser adicionado à espermateca da abelha-rainha Q (HADDAD et al., 2006); $\Delta(f)$ é a diferença em valor absoluto entre a adaptabilidade (valor de adaptação ou *fitness*) do zangão e o da rainha, isto é, $|f(D) - f(Q)|$; $S(t)$ dá a velocidade da rainha no tempo t. Aparentemente esta função age como uma função de hibridação (*annealing*), onde a probabilidade de cópula é alta quando ou a rainha ainda está no começo do seu voo-de-acasalamento (quando sua velocidade é mais alta), ou a adaptabilidade do zangão é tão boa quanto a da rainha (HADDAD et al., 2006).

A velocidade $S(t)$ e a energia $E(t)$ da rainha sofrem uma redução a cada transição no espaço. Esta redução é determinada pelas equações 15 e 16 (BARROS et al., 2007).

$$S(t + 1) = \alpha \times S(t) \quad (15)$$

$$E(t + 1) = E(t) - \gamma \quad (16)$$

α é um fator pertencente ao intervalo fechado $[0, 1]$ e γ é a quantidade de energia reduzida a cada transição (HADDAD et al., 2006). Desde que $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$ implicaria em uma velocidade $S(t)$ constante, pode-se admitir que α pertence ao intervalo aberto $(0, 1)$.

O algoritmo HBMO apresenta então as seguintes etapas:

1. Geração da população inicial e a escolha da rainha (melhor solução).
2. Voo-de-acasalamento no qual a rainha escolhe probabilisticamente os zangões que irão fornecer material para sua espermoteca e, em seguida, o zangão que será selecionado para a procriação.
3. A criação de novos indivíduos a partir do cruzamento do genótipo da rainha com o genótipo do zangão selecionado.
4. A pesquisa local sobre os descendentes (soluções tentadas) é feita pelas operárias (heurísticas).
5. A etapa adaptativa para as operárias se baseia em quanto de melhora se obteve sobre os descendentes.
6. Eleição de uma nova rainha: substitui-se a abelha-rainha por um descendente melhor adaptado, isto é, com um *fitness* superior.

Pode-se concluir que o voo-de-acasalamento é o passo mais importante do HBMO, uma vez que durante este voo a abelha receberá as informações genéticas dos zangões para posterior reprodução. As novas soluções serão originadas deste passo.

O Quadro 29 sintetiza as características gerais do HBMO descrito por Haddad et al (2006).

Quadro 29- Características do HBMO

Característica	Tipo
Domínio do Espaço de Busca	Numérico
Inicialização da População	Aleatória
Seleção	Ranking
Representação	Vetores Reais
Crossover	Aritmético
Mutação	Gaussiana Uniforme

Fonte: autor.

O elitismo presente no HBMO ocorre na seleção da abelha-rainha (a melhor solução gerada) e na seleção do zangão para cruzamento (indivíduos com maior *fitness*). Apesar de a seleção ocorrer via ranking, A pressão de seleção é fortemente influenciada pelo número de iterações do algoritmo, conforme visto.

Note que a população inicial é gerada de forma aleatória (abordagem geracional

ou estocástica), enquanto que as gerações seguintes irão sofrer uma forte influência de uma função de probabilidade (abordagem determinística).

Depois da inicialização, segue-se a definição dos parâmetros do algoritmo (tamanho da população, por exemplo) e dos parâmetros do modelo. A etapa seguinte é a geração aleatória de um conjunto de soluções, as quais serão ordenadas e selecionadas em um número predefinido.

A etapa da hibridação simulada é destinada a selecionar o conjunto de soluções a comporem um reservatório de informações intercambiáveis entre as atuais soluções e as soluções selecionadas e corresponde no processo natural ao voo-de-acasalamento. O *crossover* ocorre logo em seguida e resulta em novas soluções.

O conjunto recém-criado é aperfeiçoado através de funções heurísticas e operadores de mutação de acordo com os seus valores de *fitness*. Os valores de *fitness* das funções heurísticas são então atualizados para a próxima iteração. Faz-se uma comparação entre a solução anterior e a nova solução afim de que esta substitua aquela, caso seja considerada melhor, o que corresponde do que seria a escolha de uma nova rainha no processo natural (uma abelha rainha pode sobreviver a diversas gerações em uma colmeia). O critério de parada é testado: se for satisfeito, o algoritmo pára; caso contrário, retorna-se ao passo da hibridação e repete-se todo o processo a partir dele.

B.2. Particle Swarm Optimization (PSO)

A inspiração do PSO (KENNEDY e EBERHART, 1995) vem dos movimentos coordenados de grupos de animais como, por exemplo, cardumes de peixes e bandos de pássaros. O PSO procura reproduzir as relações de cooperação entre os indivíduos dentro de um grupo (NIU et al., 2006).

Nesse algoritmo, as soluções potenciais são chamadas partículas e voam em um espaço de busca D dimensional com uma velocidade que é dinamicamente ajustada de acordo com a sua própria experiência e a experiência de seus vizinhos. Representa-se a i -ésima partícula como um vetor $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, com $x_{iD} \in [l_d, u_d]$, $d \in [1, D]$, l_d , a cota superior e u_d a cota inferior para a d -ésima dimensão. A velocidade máxima de uma partícula i é dada fixada em v_{max} e sua velocidade é representada pelo vetor D -dimensional $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. A posição $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$, chamada de *pbest*, registra a melhor posição anterior da i -ésima partícula. A melhor posição entre todas as partículas de uma população é chamada de *gbeste* e

representada por P_g . As equações 17 e 18 (NIU et al., 2006) atualizam a velocidade e a posição, respectivamente, da partícula i na iteração t .

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + R_1 c_1 (P_i - x_i(t)) + R_2 c_2 (P_g - x_i(t)) \quad (17)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}, \quad (18)$$

sendo w o peso de inércia; c_1 e c_2 acelerações constantes; e R_1, R_2 são vetores aleatórios com componentes uniformemente distribuídos no intervalo fechado $[1,0]$.

B.2.2. Funcionamento do PSO

Os passos do algoritmo PSO original são listados a seguir (POLI et al., 2007):

1. Inicialize uma matriz de partículas com posições aleatórias em um espaço de busca D-dimensional;
2. Faça enquanto uma condição de parada não for encontrada:
 - a. Para cada partícula, avalie o *fitness* de acordo com a função de avaliação nas D variáveis;
 - b. Compare as partículas pelo valor *fitness* com seu $pbest_i$. Se o valor atual for melhor que $pbest_i$, então ponha em $pbest_i$ o valor atual e a posição p_i igual a posição atual no espaço D-dimensional;
 - c. Identifique a partícula na vizinhança com o melhor sucesso até o momento, e associar seu índice à variável g .
 - d. Mude a velocidade e a posição da partícula de acordo com as equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{v}_i \leftarrow \vec{v}_i + \vec{U}(0, \phi_1) \otimes (\vec{p}_i - \vec{x}_i) + \vec{U}(0, \phi_2) \otimes (\vec{p}_g - \vec{x}_i) \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{x}_i \leftarrow \vec{x}_i + \vec{v}_i. \end{array} \right. \quad (20)$$

Nas equações 19 e 20 (NIU et al., 2006):

- $\vec{U}(0, \phi_i)$ representa um vetor de números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo fechado $[0, \phi_i]$ o qual é gerado aleatoriamente a cada iteração e para cada partícula.
- \otimes é a multiplicação por componente.
- Cada componente de \vec{v}_i é mantido no intervalo $[-V_{\max}, +V_{\min}]$

O Quadro 30 mostra os parâmetros utilizados pelo PSO e a sugestão para seus valores.

Quadro 30- Parâmetros do PSO

Parâmetro	Valores Usuais
Tamanho da População	20 – 50
ϕ_1 e ϕ_2 coeficientes de aceleração – determinam a magnitude das forças aleatórias na direção do melhor P_i individual e o melhor p_g da vizinhança	$\phi_1 + \phi_2 = 4,0$ ou $\phi_i \in [0, 2]$
$[-V_{\min}, +V_{\max}]$	*
ω - peso de inércia	0 – 1,5

* escolha cautelosa do usuário

Fonte: autor

APÊNDICE C – Exemplos de Algoritmos MultiPopulação

C.1. Multi-population Cooperative Particle Swarm Optimizer (MCPSO)

O MCPSO sugerido por (NIU et al., 2006) divide as populações inicializadas em dois grupos: Mestre, que se encarrega da exploração local; e vários grupos escravos, que se encarregam da exploração global. Há uma relação simbiótica entre o grupo mestre e os grupos escravos, a qual pode manter um balanço entre a exploração e a exploração. Este balanço é essencial para que o algoritmo cumpra sua tarefa de otimização. A comunicação entre os grupos é usada para atribuir avaliações de aptidão e manter a sincronização do algoritmo.

O grupo escravo se constitui das populações independentes e cada uma delas executa um PSO original ou uma de suas variações. Após a execução do PSO, cada população envia a sua melhor solução local para o grupo mestre, que seleciona o melhor de todas as recebidas e evolui de acordo com as equações 21 e 22.

$$v_i^M(t+1) = wv_i^M(t) + R_1c_1(p_i^M - x_i^M(t)) + \phi R_2c_2(p_g^M - x_i^M(t)) + (1 - \phi)R_3c_3(p_g^S - x_i^M(t)) \quad (21)$$

$$x_i^M(t+1) = x_i^M(t) + v_i^M(t), \quad (22)$$

designando M o grupo Mestre e S , o grupo escravo; p_g^M e p_g^S a melhor partícula anterior entre todas as partículas dos grupos Mestre e Escravo, nesta ordem; R_3 , um valor aleatório entre 0 e 1; c_3 a aceleração constante; os símbolos w , R_1 , R_2 , c_1 , c_2 continuam representando os mesmos parâmetros que no PSO. Em um problema de minimização, o fator de migração ϕ é dado pela equação 23.

$$\phi = \begin{cases} 0 & \text{se } Gbest^S < Gbest^M \\ 0,5 & \text{se } Gbest^S = Gbest^M \\ 1 & \text{se } Gbest^S > Gbest^M \end{cases}, \quad (23)$$

$Gbest^M$, $Gbest^S$ são os valores de aptidão determinados por p_g^M e p_g^S , nesta ordem.

Segue-se o Quadro 31 com o pseudocódigo do MCPSO.

Quadro 31- Pseudocódigo do algoritmo MCPSO

<p>Início</p> <p>Inicialize todas as populações</p> <p>Avalie a aptidão de cada partícula</p> <p>Repita</p> <p>Faça em paralelo</p> <p>Nó I, $1 \leq i \leq K$ /* K é o número de grupos escravos*/</p> <p>Fim do Faça em paralelo</p> <p>Espere o fim de todos os processos</p> <p>Selecione o indivíduo mais apto globalmente dentre todas as partículas</p> <p>Evolua o grupo Mestre /*com as equações 10 e 11*/</p> <p>Até encontrar uma condição de terminação</p> <p>Fim</p>

Fonte: Niu et al. (2006).

C.2. Multiple Hive Honey-Bee Mating Optimization (MHBMO)

As abordagens unipopulação têm usado mais comumente a técnica de função de penalização para manter a diversidade da população. Em vez disso, na versão MHBMO será inicializado um número fixo K de colmeias. Cada colmeia terá sua própria rainha. As colmeias irão realizar o HBMO independentemente na primeira fase.

Na segunda fase do algoritmo, os z melhores zangões de uma colmeia, substituirão os z piores zangões de outra colmeia vizinha. O número z pode ser definido entre um e a metade do número de zangões em cada colmeia. Note que o subscrito i, como índice das colmeias H, não faz referência ao número de iterações do algoritmo, uma vez que todas as populações são inicializadas simultaneamente.

Os zangões trocados entre as colmeias participarão do voo-de-acasalamento com, obviamente, a rainha da respectiva colmeia a qual passar a pertencer, colaborando para a manutenção da diversidade genética no algoritmo.

No final do algoritmo, a melhor rainha de todas as colmeias será escolhida como solução ótima do problema de otimização.

O pseudocódigo para o MHBMO está no Quadro 32.

Quadro 32- Pseudocódigo do algoritmo MHBMO

<p>Início</p> <p>Inicialize as K colmeias (H)</p> <p>Selecione a Rainha (Q) em cada colmeia</p> <p>Selecione probabilisticamente k zangões (D)</p> <p>Enquanto Condição de Parada não encontrada Faça</p> <p> Faça $1 \leq i \leq K$</p> <p> Substitua os $z < k$ piores D da colmeia H_{i+1} pelos z melhores D de H_i</p> <p> Substitua os $z < k$ piores D de H_1 pelos z melhores D de H_n</p> <p> Fim do Faça</p> <p>Efetue o cruzamento de Q com D em cada conjunto</p> <p>Gere novos conjuntos e selecione Q em cada H_i</p> <p>Selecione a rainha mais apta dentre todas as rainhas</p> <p>Fim</p>
--

Fonte: autor.