Luiz Fernando de Souza Dias

**ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO OTIMIZADA
DE EQUIPAMENTOS PARA DETECÇÃO
DE CONTAMINAÇÃO EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Prof^ª Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

**São Carlos
2006**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP**

D541e	<p>Dias, Luiz Fernando de Souza</p> <p>Estudo da localização otimizada de equipamentos para detecção de contaminação em redes de distribuição de água / Luiz Fernando de Souza Dias. -- São Carlos, 2006.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2006.</p> <p>Área: Hidráulica e Saneamento.</p> <p>Orientador: Profa. Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis.</p> <p>1. Qualidade da água - monitoramento. 2. Qualidade da água - detecção de contaminantes. 3. Redes de distribuição de água. 4. Algoritmos genéticos multiobjetivo. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIZ FERNANDO DE SOUZA DIAS**

Dissertação defendida e julgada em 06-04-2006 perante a Comissão Julgadora:

Profª. Associada **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **EDUARDO CLETO PIRES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Dr. **PETER BATISTA CHEUNG**
(Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/ FUFMS)

APPROVED

Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, pela sua capacidade de auxiliar, ajudar e apoiar, além de sua dedicação a este trabalho.

Aos meus pais, José Carlos e Elizabeth, pelo seus esforços, amor e educação.

Ao meu filho, Luiz Gustavo, pelo amor, carinho, lazer e descontração.

À minha companheira e amiga, Vânia, pelo carinho, compreensão e ajuda nos momentos que mais precisei.

Ao Dr. Peter Batista Cheung, pela ajuda na implementação do código computacional e dicas apresentadas.

Aos colegas do Laboratório de Simulação Numérica, pela colaboração e companheirismo.

Aos professores, colegas e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, pelo aprendizado, conhecimento e colaboração.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

E a todas as outras pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

DIAS, L. F. S. (2006). *Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos para Detecção de Contaminação em Rede de Distribuição de Água*. São Carlos, 2006. 144p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

A qualidade da água de abastecimento é de vital importância à saúde da população dos núcleos urbanos do mundo todo. Por essa razão, muitas pesquisas enfocam esse tema. Além disso, os ataques terroristas recentes ocorridos nos Estados Unidos e Europa, vêm fomentando a antiga preocupação relativa a possíveis injeções de contaminantes em redes de distribuição de água para abastecimento, evidenciando a importância da efetiva vigilância de tais sistemas.

O presente trabalho investiga a rede de monitoramento ótima para detecção de injeções intencionais de poluentes e/ou contaminantes em concentrações e/ou quantidades suficientes para que se propaguem nas direções do fluxo da água no interior das redes, do ponto de vista de objetivos múltiplos.

A metodologia aqui apresentada representa uma extensão de propostas anteriores e é demonstrada ilustrativamente, através de redes já utilizadas na literatura. Com base no conceito da rede auxiliar proposto por Kessler et al. (1998), propõe-se o emprego de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo para considerar os níveis de serviço em termos do volume consumido, do tempo e da extensão da rede atingida antes da detecção. São criadas matrizes de poluição para os níveis de serviço considerados e, então, o algoritmo genético multiobjetivo SPEA é aplicado para identificar as soluções não-dominadas, em conformidade com o conceito de otimalidade de Pareto. Os resultados demonstram o potencial do método proposto em identificar tais soluções.

Palavras-chave: monitoramento, qualidade da água, detecção de contaminantes, redes de distribuição de água, algoritmos genéticos multiobjetivo.

ABSTRACT

DIAS, L. F. S. (2006). *Study of Optimized Localization of Equipments for Contamination Detection in Water Distribution Networks*. São Carlos, 2006. 144p. Dissertação (Mestrado) –São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2006.

The water supply quality is very important to the healthy of urban nucleus populations around the world. This is the reason why many researches focus on such theme. Besides this, recent terrorist attacks occurred in USA and Europe, have incited the old apprehension related to possible deliberate intrusions of contaminants into the water supply networks, making evident the importance of the effective vigilance of such systems.

This work investigates the optimal monitoring network for detection of deliberate intrusions of pollutes and/or contaminants at concentrations e/or quantities enough for propagation inside the networks, on the point of view of multiple objectives.

The method here proposed represents an extension to earlier proposals and is demonstrated with the support of networks from literature. Based on the concept of auxiliary network proposed by Kessler et al. (1998), a multiobjective genetic algorithm is used in order to consider the levels of service in terms of the consumed volume, time period and length of the network reached before detection. Pollution matrixes are built for the levels of service considered and the multiobjective genetic algorithm SPEA applied in the identification of the non-dominated solutions, according to the Pareto optimality concept. The results demonstrate the potential of the method in the identification of such solutions.

Keywords: monitoring, water quality, detection of contaminants, water distribution network, multiobjective genetic algorithms.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 5.1 – Rede Net1</i>	32
<i>Figura 5.2 – Grafo exemplo</i>	37
<i>Figura 5.3 – Rede auxiliar para Tempo de viagem da Rede Net1</i>	43
<i>Figura 5.4 – Rede auxiliar para Extensão de viagem da Rede Net1</i>	43
<i>Figura 5.5 – Solução 1 da Rede Net1 para 1 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	61
<i>Figura 5.6 – Solução 1 da Rede Net1 para 2 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	61
<i>Figura 5.7 – Solução 2 da Rede Net1 para 2 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	62
<i>Figura 5.8 – Solução 1 da Rede Net1 para 3 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	62
<i>Figura 6.1 – Rede esquemática da Anytown</i>	66
<i>Figura 6.4 – Solução 1 da Rede Anytown para 1 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	80
<i>Figura 6.5 – Solução 1 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	80
<i>Figura 6.6 – Solução 2 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	81
<i>Figura 6.7 – Solução 3 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	81
<i>Figura 6.8 – Solução 1 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	82
<i>Figura 6.9 – Solução 2 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	82
<i>Figura 6.10 – Solução 3 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	83
<i>Figura 6.11 – Solução 1 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	83
<i>Figura 6.12 – Solução 2 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	84
<i>Figura 6.13 – Solução 3 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	84
<i>Figura 6.14 – Solução 4 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.</i>	85
<i>Figura 7.1 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Net1 não considerando detecções repetidas.</i>	87
<i>Figura 7.2 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Net1 considerando detecções repetidas.</i>	88
<i>Figura 7.3 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown não considerando detecções repetidas (VC=468,10m³).</i>	91
<i>Figura 7.4 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown considerando detecções repetidas (VC=468,10m³).</i>	92
<i>Figura 7.5 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown não considerando detecções repetidas (VC=1245,15m³).</i>	93
<i>Figura 7.6 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown considerando detecções repetidas (VC=1245,15m³).</i>	94

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1 – Principais doenças associadas com a água.</i>	<i>1</i>
<i>Tabela 1.2 – Efeitos de algumas substâncias químicas nos seres humanos.</i>	<i>3</i>
<i>Tabela 2.1 – Padrão de Potabilidade para algumas substâncias químicas que apresentam risco à saúde.</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2.2 – Número mínimo de amostragens, em mananciais superficiais, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do plano de amostragem e da população abastecida.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.3 – Frequência mínima de amostragem para o controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do plano de amostragem e da população abastecida em mananciais superficiais.</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 5.1 – Característica do Tanque da rede Net1.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5.2 – Características de demanda padrão para 24 horas da rede Net1.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5.3 – Maximização com 3 objetivos</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 5.4 – Resultados da Rede Net1 não considerando detecções repetidas.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.5 – Resultados da Rede Net1 considerando detecções repetidas</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 6.1 – Características dos tubos da Rede Anytown</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.2 – Características dos nós da Rede Anytown</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6.3 – Características dos Tanques da Rede Anytown</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6.4 – Características da bomba da Rede Anytown</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6.5 – Padrão diário de demanda para a Rede Anytown</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6.6 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas: Nível VC = 468,10 m³.</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 6.7 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas: Nível VC = 468,10 m³.</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 6.8 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas: Nível VC = 1245,15 m³.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 6.9 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas: Nível VC = 1245,15 m³.</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 7.1 – Resultados da Rede Net1 não considerando detecções repetidas.</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 7.2 – Resultados da Rede Net1 considerando detecções repetidas.</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 7.3 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas: Nível VC = 468,10 m³.</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 7.4 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas: Nível VC = 468,10 m³.</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 7.5 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas: Nível VC = 1245,15 m³.</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 7.6 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas: Nível VC = 1245,15 m³.</i>	<i>93</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AG	Algoritmo Genético
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
ID	Identificação
LOS	Level Of Service
MOGA	MultiObjective Genetic Algorithm
MOMGA	MultiObjective Messy Genetic Algorithm
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGA-II	elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
PAES	Pareto-Archived Evolution Strategy
PL	Programação Linear
PLEDECORDA	Programa de Localização de Equipamentos para DEtecção de COntaminação em Rede de Distribuição de Água
RDA	Rede de Distribuição de Água
RPM	Randomized Pollution Matrix
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

RESUMO	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>ii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>iii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>iv</i>
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	<i>v</i>
1. INTRODUÇÃO	<i>1</i>
1.1. Justificativa	<i>7</i>
1.2. Objetivo	<i>8</i>
2. REVISÃO DA LITERATURA	<i>9</i>
3. MATERIAIS	<i>23</i>
3.1. Microcomputador	<i>23</i>
3.2. Softwares e ferramentas	<i>23</i>
3.2.1. Builder C++ (Borland)	<i>23</i>
3.2.2. MOMHLIB++ (Jaskiewicz, 1999) - Algoritmos Genéticos Multiobjetivo	<i>23</i>
3.2.3. Simulador EPANET	<i>24</i>
4. O MÉTODO	<i>28</i>
5. METODOLOGIA APLICADA: Rede Net1	<i>30</i>
5.1. Simulação Hidráulica	<i>30</i>
5.1.1. Caracterização das Redes	<i>31</i>
5.1.2. Modelagem da Rede	<i>33</i>
5.2. Inicialização do PLEDECORDA_EPA	<i>33</i>
5.2.1. Parâmetros de Entrada – Níveis de Serviço	<i>34</i>
5.3. Construção da Rede Auxiliar	<i>34</i>
5.4. Determinação dos Caminhos Mais Curtos	<i>35</i>
5.4.1. Algoritmo de Floyd (1962)	<i>35</i>
5.5. Determinação das Matrizes de Poluição	<i>44</i>
5.5.1. Identificação dos objetivos	<i>44</i>
5.5.1.1. Construção da Matriz Poluição para Volume Consumido	<i>46</i>
5.5.1.2. Construção da Matriz Poluição para Tempo de Detecção	<i>47</i>
5.5.1.3. Construção da Matriz Poluição para Extensão da Contaminação	<i>48</i>
5.6. Inicialização do Programa PLEDECORDA_MOM	<i>49</i>

5.7. Determinação dos Nós de Monitoramento	50
5.7.1. O Problema a ser tratado	50
5.7.1.1. O princípio dos Algoritmos Genéticos (AGs)	51
5.7.1.2. Os AGs Multiobjetivo	52
5.7.1.3. SPEA	54
5.7.2. Implementação dos AGs multiobjetivo sobre as Matrizes de Poluição	57
5.7.2.1. Funções de Aptidão	57
5.7.2.2. Representação das soluções	59
6. ESTUDO DE CASO: Rede Anytown	66
6.1. Simulação Hidráulica	66
6.2. Inicialização do PLEDECORDA_EPA	69
6.2.1. Parâmetros de Entrada – Níveis de Serviço	69
6.3. Construção das Redes Auxiliares e dos Caminhos Mais Curtos	69
6.4. Determinação das Matrizes de Poluição	72
6.5. Inicialização do Programa PLEDECORDA_MOM	75
6.6. Determinação dos Nós de Monitoramento	75
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	86
7.1. Rede Net1	86
7.2. Rede Anytown	89
8. CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	98
Anexo I – REDE.INP (Rede Net1): Dados de Entrada	103
Anexo II – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Net1): Saídas das Matrizes de Poluição	107
Anexo III – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Net1): Saídas dos Nós escolhidos	113
Anexo IV – REDE.INP (Rede Anytown): Dados de Entrada	115
Anexo V – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Anytown): Saídas das Matrizes de Poluição: Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 468,10m³	119
Anexo VI – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Net1): Saídas dos Nós escolhidos: Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 468,10m³	130
Anexo VII – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Anytown): Saídas das Matrizes de Poluição: Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 1245,15m³	132
Anexo VIII – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Anytown): Saídas dos Nós escolhidos: Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 1245,15m³	143

1. INTRODUÇÃO

Na condição de solvente universal, a água pode arrastar consigo uma variedade de substâncias e microrganismos patogênicos e assim, representar sérios riscos à saúde da população abastecida por ela.

Segundo GALAL-GORCHEV (1996), nos países em desenvolvimento, onde se enquadra o Brasil, estima-se que 80% das doenças e mais de um terço das mortes estão associadas à utilização e consumo de águas contaminadas. Neste contexto, VON SPERLING (1996) apresenta os principais microorganismos causadores de doenças relacionadas com a água. As doenças, bem como os seus agentes causais e os respectivos sintomas estão relacionados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais doenças associadas com a água.

Doença	Agente Causal	Sintomas
Ingestão de água contaminada		
Disenteria bacilar	Bactéria <i>Shigella dysenteriae</i>	Forte diarreia.
Cólera	Bactéria <i>Vibrio cholerae</i>	Forte diarreia, desidratação, alta taxa de mortalidade.
Leptospirose	Bactéria <i>Leptospira</i>	Icterícia, febre.
Salmonelose	Bactéria <i>Salmonella</i>	Febre, náusea, diarreia.
Febre Tifóide	Bactéria <i>Salmonella typhi</i>	Febre alta, diarreia, ulceração do intestino delgado.
Disenteria amebiana	Protozoário <i>Entamoeba histolytica</i>	Diarreia prolongada com sangramento, abscessos no fígado e intestino fino.
Giardíase	Protozoário <i>Giardia lamblia</i>	Diarreia, náusea, indigestão, flatulência.
Hepatite infecciosa	Vírus da hepatite tipo A	Icterícia, febre.
Gastroenterite	Vírus: enterovírus, parvovírus, rotavírus.	Diarreia leve a forte.
Paralisia infantil	Vírus <i>Poliomielites virus</i>	Paralisia.
Contato com água contaminada		
Escabiose	Sarna <i>Sarcoptes scabiei</i>	Úlceras na pele
Tracoma	Clamídea <i>Chlamydia trachomatis</i>	Inflamação nos olhos, cegueira parcial ou total.

Fonte: VON SPERLING, 1996.

Há, porém, uma grande dificuldade na detecção de bactérias, protozoários e vírus em uma amostra de água. Isso se dá pelo fato de estarem presentes em pequenas concentrações. Para solucionar este problema, realiza-se a contagem de organismos denominados *organismos indicadores de contaminação fecal*, que mesmo não sendo patogênicos, fornecem indicações de possível contaminação fecal e do conseqüentemente potencial da água em transmitir doenças. Os principais representantes destes organismos são as bactérias do grupo *coliforme*. A Portaria 518/04 do Ministério da Saúde define que a presença do coliforme termotolerante *Escherichia coli*, de origem exclusivamente fecal, é o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos.

Outras doenças que podem afetar a população através da veiculação hídrica são as causadas pela presença de substâncias tóxicas ou nocivas e que muitas vezes não são percebidas pelo gosto, aparência ou cheiro, mas podem provocar males e até mesmo epidemias.

Verifica-se, portanto, a necessidade de se conhecer as substâncias presentes na água e as que podem vir a contaminá-la, além de suas concentrações limites e suas reações em organismos vivos. Também é de extrema importância que as autoridades competentes façam o monitoramento destes parâmetros, seguindo um plano pré-definido, evitando assim que casos de epidemias e acidentes ambientais possam colocar em risco a saúde da população.

A Tabela 1.2 relaciona alguns dos compostos químicos que devem ser analisados para a verificação da qualidade da água (VON SPERLING, 1996; DI BERNARDO, 1983).

Tabela 1.2 – Efeitos de algumas substâncias químicas nos seres humanos.

Substância Química	Problemas
Ferro e Manganês	Em pequenas concentrações causam cor na água e em elevadas concentrações causam sabor e odor.
Cloretos	Em determinadas concentrações imprimem sabor salgado a água.
Nitrogênio	Na forma de <i>nitrato</i> está associado a doenças como a metahemoglobina (síndrome do bebê azul). Na forma de <i>amônia</i> é tóxica aos peixes.
Metais Pesados	
Alumínio	Constipação intestinal, perda de energia, cólicas abdominais, hiperatividade infantil, perda de memória, dificuldade de aprendizado, osteoporose, raquitismo e convulsões. Doenças relacionadas: Alzheimer e Parkinson.
Arsênio	Transtornos gastrointestinais, espasmos músculo-viscerais, náuseas, diarreias, inflamações da boca e garganta, dores abdominais.
Cádmio	Metal cancerígeno, provoca elevação da pressão sanguínea e aumento do coração. Queda da imunidade. Aumento da próstata. Enfraquecimento ósseo. Dores nas articulações. Anemia. Enfizema pulmonar. Osteoporose. Perda de olfato. Perda do desempenho sexual.
Chumbo	Irritabilidade e agressividade, indisposição, dores de cabeça, convulsões, fadiga, sangramento gengival, dores abdominais, náuseas, fraqueza muscular, abnubilação mental, perda de memórias, insônia, pesadelos, acidente vascular cerebral inespecífico, alterações de inteligência, osteoporose, doenças renais, anemias, problemas de coagulação.
Mercúrio	Depressão, fadiga, tremores, síndrome do pânico, parestesias, descontrole motor, andar lateral, dificuldade de fala, perda de memória, perda do desempenho sexual, estomatite, dentes soltos, dor e paralisia de extremidades, dor de cabeça, anorexia em crianças, alucinações, vômitos, febre, dificuldades de mastigação, sudorese e perda do senso da dor.
Níquel	Metal cancerígeno, pode causar: dermatite de contato, gengivites, erupções na pele, estomatite, tonturas, dores articulares, osteoporose e fadiga crônica.
Bário	Hipertensão arterial, doenças cardiovasculares, fadiga e desânimo.
Compostos Orgânicos Voláteis	
Benzeno	Causa problemas cancerígenos e alterações do número de cromossomos.
Monoclorobenzeno	Solvente usado na produção de pesticida. Na água afeta fígado e rins.
Diclorobenzeno	Solvente usado na produção de pesticida e corante que afeta pulmão, fígado, rins e causa envenenamento do sangue.
Tetracloroeto de carbono	Usado na fabricação de clorofluormetano (extintores, solventes, etc) é um provável causador de câncer.
1,2 dicloroetano	Usado para fabricar detergentes e inseticidas. Causam problemas hepáticos e renais.
Agrotóxicos	
Organoclorados	Acumulam-se do Sistema Nervoso Central causando danos.
Organofosforados e carbamatos	Alteram o funcionamento de glândulas, músculos e cérebro.
Piretróides	Causam reações no Sistema Nervoso Central causando convulsões e paralisia.

Fonte: VON SPERLING, 1996; DI BERNARDO, 1983.

Conhecidos os efeitos benéficos da distribuição da água tratada e os problemas decorrentes da distribuição de água contaminada, a água distribuída deve ser desinfetada e apresentar um residual de desinfetante nos pontos de consumo, com o objetivo de destruir pequenas concentrações de microrganismos que venham a penetrar no sistema. Se a contaminação for elevada, o residual de desinfetante servirá indiretamente como indicador, pois sua ausência será facilmente identificada (DI BERNARDO, 1983). Assim, outro produto químico, de grande importância sanitária é o *cloro*, geralmente usado no processo da desinfecção da água. Existe, no entanto, uma crescente preocupação com os seus subprodutos, uma vez que reações do cloro com a matéria orgânica presente na água podem dar origem a produtos indesejáveis tais como os *trihalometanos* que são compostos cancerígenos.

Casos de contaminação não são inéditos no Brasil. Em 2000 (CALDERARO et al., 2001), dezesseis pacientes submetidos à hemodiálise em um hospital de Minas Gerais apresentaram reações hemolíticas compatíveis com sintomas de intoxicação por cloro e cloramina. Naquele período, fora efetuada a instalação de mais um reservatório no sistema existente, que passou a abastecer o anel de distribuição de água para as máquinas de hemodiálise. Durante a reforma, as instalações foram abastecidas por um reservatório antigo, cujo serviço de desinfecção era feito à base de cloro, por firma terceirizada. O procedimento não foi acompanhado pelos funcionários do centro de hemodiálise, que não se fizeram presentes durante o enxágüe do circuito e os testes de residual de cloro. Nas sessões seguintes, alguns pacientes

apresentaram sintomas compatíveis com intoxicação por cloro. Os sintomas foram dores torácicas, lombares e abdominais, diarreia, hemólise, coagulação no capilar, calor e rubor, alguns destes ocorrendo simultaneamente em alguns pacientes. Realizadas as análises, detectou-se uma concentração excepcionalmente elevada ($>2,75$ mg/l) de cloro total na água utilizada no processamento, que se constatou ser originária do reservatório antigo, que, depois da reforma, passou a abastecer o local. Uma pesquisa de FLUCK et al. (1999) indica que concentrações elevadas de cloro e cloraminas em águas de hemodiálise podem provocar graves reações em pacientes, com possíveis danos à saúde. Essa constatação realça a importância da efetiva vigilância dos sistemas nem sempre observada como o único instrumento com eficácia para evitar agravos à saúde dos pacientes.

Outro estudo sobre contaminação (CAVALCANTI, 2003), reporta que amostras de ostras comercializadas em Recife, Brasil, foram monitoradas em relação ao conteúdo de elementos traço (Hg, Zn, Fe, Cu e Mn) durante o período de um ano (março/2001 a fevereiro/2002). O mercúrio, um dos elementos que apresentam maior risco à saúde pública, foi o principal contaminante encontrado nas ostras. A avaliação dos níveis de mercúrio em frutos do mar é um importante fator para avaliar o risco de contaminação por mercúrio em pessoas não ocupacionalmente expostas. Chegou-se à conclusão de que há muitos anos não é feito um monitoramento dos níveis de mercúrio do canal de Santa Cruz, onde as ostras foram coletadas, pelos órgãos ambientais de Pernambuco.

Muitos trabalhos ignoram aspectos importantes relacionados à qualidade da água no que se refere à presença de substâncias e microorganismos indesejáveis ou em concentrações inadequadas. A má qualidade da água nas redes de distribuição é decorrente principalmente (KESSLER et al., 1998): (a) da redução (exemplo: cloro residual) ou aumento (exemplo: trihalometanos totais e bactérias) de substâncias não-conservativas durante a sua veiculação no interior desses sistemas e (b) da intrusão accidental ou intencional de poluentes ou contaminantes. Destaca-se aqui a preocupação com a notória vulnerabilidade das redes às ameaças físicas, químicas e biológicas, que vieram à tona a partir de incidentes terroristas nos EUA e Europa, e que vêm forçando ações no sentido de promover a segurança de infra-estruturas de abastecimento.

Visando a proteção da população abastecida, as redes de abastecimento devem ser dotadas de equipamentos de monitoramento contínuo de qualidade da água. Idealmente, todo nó do sistema deveria ser monitorado para promover a máxima proteção da saúde pública. Porém, por razões de economia, admite-se que o monitoramento possa ser realizado com um número reduzido de equipamentos, localizados em pontos estratégicos da rede, de forma a poder auxiliar na detecção de contaminantes, na identificação das suas fontes e na conseqüente redução do risco à população. No caso específico da intrusão externa de poluentes, os equipamentos de monitoramento devem ser projetados para emitir um sinal de alarme quando os poluentes forem detectados.

1.1. Justificativa

A determinação do número de equipamentos de monitoramento, bem como a sua localização nas redes de maneira a captar o máximo de informação, constitui uma tarefa complexa, uma vez que as intrusões de contaminantes ou poluentes podem ocorrer em qualquer ponto do sistema e a qualquer momento.

Não existe um procedimento formal ou guias que sirvam de suporte ao estabelecimento da rede de monitoramento de qualidade da água em Sistemas de Distribuição de Água no caso de uma intrusão intencional. Essa lacuna deve-se, principalmente, às incertezas quanto: (a) à avaliação quantitativa da eficiência da localização dos equipamentos de monitoramento e (b) aos problemas clássicos de redes de distribuição de água, como por exemplo, as variações horárias, diárias e sazonais de consumos, além dos aspectos políticos institucionais.

Além disso, modelos explícitos de decaimento ou diluição de substâncias no interior das redes podem ser necessários para o estudo da localização destes equipamentos de forma a simular o deslocamento destas substâncias, tornando o estudo complexo e muitas vezes limitado. O comportamento de substâncias conservativas e substâncias não-conservativas como o cloro no interior das redes de distribuição de água para abastecimento pode ser simulado através de modelos dinâmicos de qualidade da água tais como o EPANET (ROSSMAN, 2000). Observa-se que substâncias como sais e

nitratos podem rapidamente atingir concentrações aceitáveis através de diluição, antes que possam ser detectados.

1.2. Objetivo

O presente trabalho de pesquisa visa estudar o monitoramento das redes de distribuição para detecção de injeção intencional de contaminantes em concentrações e/ou quantidades suficientes para que se propaguem nas direções do fluxo da água no interior das redes. Diferentemente das propostas da maioria dos trabalhos já existentes na literatura, este trabalho visa à detecção da intrusão intencional de contaminantes, do ponto de vista de objetivos múltiplos a serem identificados e investigados.

Mais especificamente, o estudo tem o propósito de estabelecer o número e a localização otimizados de equipamentos a serem instalados em rede de distribuição de água para detecção de contaminação por intrusões intencionais, cuja fundamentação é apresentada nos capítulos seguintes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é o órgão responsável pela regulamentação que estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano no Brasil, através da Portaria n.º 518. A ANVISA tomou por base as leis da Agência de Proteção do Meio-Ambiente dos Estados Unidos (U.S. EPA), para elaborar diretrizes em que a Rede de Distribuição de Água (RDA) deve ter a qualidade da sua água monitorada para que se tenha a certeza de que a água distribuída é realmente segura para o consumo da população. A Portaria n.º 518 é de uso obrigatório em todo território nacional e algumas de suas exigências são:

- Promover e acompanhar a vigilância da qualidade da água (Art. 5º);
- Cabe aos responsáveis pela operação do sistema de abastecimento de água, exercer o controle da qualidade da água (Art. 8º);
- Enquadrar-se dentro do padrão microbiológico de potabilidade (Art. 11º), que especifica parâmetros para:
 - Água para consumo humano;
 - Água na saída do tratamento;
 - Água tratada no sistema de distribuição.
- Após a desinfecção, a água deve conter um teor mínimo de cloro residual livre de 0,5 mg/L, sendo obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição (Art. 13º);
- Enquadrar-se dentro do padrão de aceitação de consumo e não ultrapassar o teor máximo de cloro residual livre de 2,0 mg/L (Art. 16º).

É certo que existem vários parâmetros de qualidade da água, que devem ser analisados e quantificados. O padrão de potabilidade envolve parâmetros químicos, físicos, biológicos e de radioatividade para a água que servirá ao consumo humano.

O padrão microbiológico é adotado para indicar possíveis contaminações por coliformes. A amostragem deve ser feita em pontos distintos: na água da fonte, na saída do tratamento e no sistema de distribuição (reservatórios e rede). No caso dos parâmetros químicos, são analisadas substâncias que possam apresentar riscos à saúde. A Tabela 2.1 mostra os valores máximos permitidos nas análises de qualidade da água.

Tabela 2.1 – Padrão de Potabilidade para algumas substâncias químicas que apresentam risco à saúde.

Parâmetro	Unidade	VMP ⁽¹⁾	Parâmetro	Unidade	VMP ⁽¹⁾
Inorgânicas			Orgânicas		
Antimônio	mg/L	0,005	Acrilamina	µg/L	0,5
Arsênio	mg/L	0,01	Benzeno	µg/L	5
Bário	mg/L	0,7	Benzo[a]pireno	µg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005	Cloreto de Vinila	µg/L	5
Cianeto	mg/L	0,07	1,2 dicloetano	µg/L	10
Chumbo	mg/L	0,01	1,1 dicloeteno	µg/L	30
Cobre	mg/L	2	Diclorometano	µg/L	20
Cromo	mg/L	0,05	Estireno	µg/L	20
Fluoreto	mg/L	1,5	Tetracloroeto de carbono	µg/L	2
Mercúrio	mg/L	0,001	Tetracloroeteno	µg/L	40
Nitrato	mg/L	10	Triclorobenzeno	µg/L	20
Nitrito	mg/L	1	Tricloroeteno	µg/L	70
Selênio	mg/L	0,01			
Agrotóxicos			Desinfetantes e secundários		
Alaclor	µg/L	20	Bromato	mg/L	0,025
Aldrin	µg/L	0,03	Clorito	mg/L	0,2
Atrazina	µg/L	2	Cloro Livre	mg/L	5
Bentazona	µg/L	300	Monocloroamina	mg/L	3
Clordano	µg/L	0,2	2,4,6 triclorofenol	mg/L	0,2
Hexaclorobenzeno	µg/L	1	Trihalometanos total	mg/L	0,1
Metolacoloro	µg/L	10			
Pentacolorofenol	µg/L	9	Cianotoxinas		
Permetrina	µg/L	20	Microcistinas	µg/L	1

⁽¹⁾ Valor máximo permitido. Fonte: Portaria 518/MS

Os parâmetros físicos e de radioatividade complementam os apresentados, garantindo um fornecimento de água potável dentro dos níveis de aceitação e com a qualidade necessária. Para efetuar as análises destes parâmetros, os responsáveis pelo controle da qualidade da água do sistema de abastecimento, devem elaborar e aprovar, junto à autoridade pública, um plano de amostragem, garantindo que seja realizado um mínimo de análises estipulado pela Portaria 518/MS. As Tabelas 2.2 e 2.3 descrevem o número e a frequência de amostragem necessárias para mananciais superficiais, em função do ponto de amostragem e do número da população a ser abastecida.

Tabela 2.2 – Número mínimo de amostragens, em mananciais superficiais, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do plano de amostragem e da população abastecida.

Parâmetro	Saída do tratamento (nº de amostras por unidade de tratamento)	Sistema de distribuição (reservatórios e rede)		
		População Abastecida		
		< 50.000 hab.	50.000 a 250.000 hab.	> 250.000 hab.
Cor / pH /Turbidez	1	10	1 p/ cada 5.000 hab	40 +1 p/ cada 25.000 hab
Cloro residual livre	1	⁽¹⁾		
Fluoreto	1	5	1 p/ cada 10.000 hab	20 + 1 p/ cada 50.000 hab
Cianotoxinas	1	⁽²⁾		
Trihalometanos	1	1	4	4
Demais parâmetros	1	1	1	1

⁽¹⁾ – Em todas as amostras para análises microbiológicas deve ser efetuada, no momento da coleta, medição de cloro residual livre ou de outro composto residual ativo, caso o agente desinfetante não seja o cloro.

⁽²⁾ – Sempre que o número de cianobactérias na água do manancial, no ponto de captação, exceder 20.000 células/ml durante o monitoramento, será exigida análise semanal de cianotoxinas na água de saída do tratamento e nas entradas (hidrômetros) das clínicas de hemodiálise e indústria de injetáveis, sendo que esta análise pode ser dispensada quando não houver comprovação de toxicidade na água bruta por meio da realização semanal de bioensaios em camundongos.

Tabela 2.3 – Frequência mínima de amostragem para o controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, para fins de análises físicas, químicas e de radioatividade, em função do plano de amostragem e da população abastecida em mananciais superficiais.

Parâmetro	Saída do tratamento (frequência por unidade de tratamento)	Sistema de distribuição (reservatórios e rede)		
		População Abastecida		
		< 50.000 hab.	50.000 a 250.000 hab.	> 250.000 hab.
Cor / pH /Turbidez	a cada 2 horas	mensal	mensal	mensal
Cloro residual livre	a cada 2 horas	⁽¹⁾		
Cianotoxinas	semanal	⁽²⁾		
Trihalometanos	trimestral	trimestral	trimestral	trimestral
Demais parâmetros	semestral	semestral	semestral	semestral
Coliformes totais⁽³⁾	-	-até 5.000: 10. -de 5.000 a 20.000 hab: 1 p/ cada 5000 hab. - de 20.000 a 250.000 hab: 30 + 1 p/ cada 2.000 hab.		105 + 1 p/ cada 5.000 hab, com o máximo de 1.000

⁽¹⁾ – Em todas as amostras para análises microbiológicas deve ser efetuada, no momento da coleta, medição de cloro residual livre ou de outro composto residual ativo, caso o agente desinfetante não seja o cloro.

⁽²⁾ – Sempre que o número de cianobactérias na água do manancial, no ponto de captação, exceder 20.000 células/ml durante o monitoramento, será exigida análise semanal de cianotoxinas na água de saída do tratamento e nas entradas (hidrômetros) das clínicas de hemodiálise e indústria de injetáveis, sendo que esta análise pode ser dispensada quando não houver comprovação de toxicidade na água bruta por meio da realização semanal de bioensaios em camundongos.

⁽³⁾ – Amostras mensais.

A Portaria 518/MS define também, quais são os pontos ideais de coleta das amostras no sistema de distribuição (reservatório e rede). Segundo ela, devem ser analisados critérios de abrangência espacial e pontos estratégicos, como os:

- próximos a grande circulação de pessoas: terminais rodoviários, terminais ferroviários, etc;
- edifícios que abriguem grupos populacionais de risco: hospitais, creches, asilos, etc;
- localizações em trechos vulneráveis do sistema de distribuição: pontas de rede, pontos de queda de pressão, locais afetados por manobras, sujeitos à intermitência de abastecimento, etc;

- locais com sistemáticas notificações de agravos à saúde tendo como possíveis causas agentes de veiculação hídrica.

Segundo o Decreto Presidencial 5440/05 do Senado Federal, é assegurado à população o direito de conhecer os resultados das análises que comprovam o padrão de qualidade da água consumida. Este decreto também estabelece que o consumidor deve receber do prestador de serviço de distribuição de água um relatório anual contendo, dentre outras, as seguintes informações:

- resumo dos resultados das análises da qualidade da água distribuída, discriminados mensalmente, mencionando, para cada parâmetro analisado, o valor máximo permitido, o número de amostras realizadas, o número de amostras anômalas detectadas, o número de amostras em conformidade com o plano de amostragem estabelecido em norma do Ministério da Saúde e as medidas adotadas face às anomalias verificadas,
- particularidades próprias da água do manancial ou do sistema de abastecimento, como presença de algas com potencial tóxico, ocorrência de flúor natural, ocorrência sistemática de agrotóxicos no manancial, e as ações corretivas e preventivas que estão sendo adotadas para a sua regularização.

Com vistas ao atendimento dos padrões de qualidade que a água deve obedecer, alguns trabalhos, citados ao decorrer do capítulo, têm sido desenvolvidos com o objetivo de identificação da rede de monitoramento da qualidade da água em redes. Esses trabalhos, geralmente, visam à qualidade da água em termos do cloro residual ou intrusão de contaminantes.

LEE e DEININGER (1992) enfocaram a localização de estações de monitoramento com base na premissa de que se a qualidade da água em um nó amostrado for boa, então ela será aceitável em um nó imediatamente à montante. Para isso, os referidos autores adotaram o termo *covered node* no intuito de expressar que a qualidade da água em um nó particular pode ser inferida através da amostragem de alguns nós à jusante. Através do estudo das vazões do sistema para um padrão de demanda, usando simuladores hidráulicos como o *Kentucky Pipe Model* ou WADISO (GESSLER e WALSKI 1985), construíram a matriz de fração de água, partindo do princípio de que, quando se amostra uma demanda d de um nó de demanda total D , a fração d/D da qualidade é conhecida. Adotando-se um critério de valor, como por exemplo 75%, que significa que os valores da fração d/D abaixo deste critério, receberam o valor “0” e os valores da fração d/D acima deste critério receberam o valor “1” na matriz de cobertura. Essa matriz foi utilizada para formular um problema de Programação Inteira (PI) e, assim, localizar estações de monitoramento de maneira a atingir a cobertura máxima.

KUMAR et al. (1997) apontaram que o método anterior tem alto custo computacional sendo de difícil controle no caso de sistemas de grande dimensão em termos do número de nós, tubos, etc. Sugeriram, portanto, modificações na forma de montar a matriz fração de água, visando reduzir o esforço computacional empenhado na resolução do problema. Os dois métodos mencionados anteriormente são mais adequados para o caso da deterioração interna gradual da qualidade da água, por exemplo, da redução do cloro

residual, uma vez que não levam em consideração o volume de água de má qualidade consumida e o tempo para que ocorra a detecção. Partem da premissa de que se o nó amostrado tem água de boa qualidade, o nó de montante também o terá.

KESSLER et al. (1998) propuseram um método para determinar a localização de estações de monitoramento com objetivo de captar intrusões acidentais de contaminação dentro de um determinado *nível de serviço*, definido como o volume máximo de água contaminada consumida até sua detecção. O método envolve a avaliação de uma rede auxiliar, baseada na teoria dos grafos e descrita nos capítulos posteriores, que representa as direções de fluxo de água possíveis no interior da rede para um ciclo diário de demanda típico, associado a um algoritmo de caminhos mais curtos (FLOYD, 1962) para identificar domínios de poluição. Um algoritmo de conjunto de cobertura é aplicado também para determinar a localização das estações de monitoramento de maneira ótima (CHRISTOFIDES, 1975).

KESSLER et al. (1998) assumiram que: (a) qualquer nó da rede é uma fonte possível de poluição e em qualquer momento, (b) toda água que passa através de um nó poluente é considerada contaminada independentemente da concentração do poluente, (c) a velocidade de transporte do poluente corresponde à velocidade média através da seção transversal do tubo, (d) a intrusão do poluente ocorre de modo contínuo, (e) o sistema de detecção prevê a medida monitorada em tempo real e (f) a probabilidade de cada nó constituir fonte de poluição é a mesma, apesar de cada nó ser considerado como tal a cada

vez. Dentre as hipóteses mencionadas, verifica-se que a probabilidade de cada nó constituir fonte de poluição pode não ser a mesma, pois sempre haverá nós mais propícios devido a alguns fatores como, por exemplo, a sua localização.

O método foi validado em duas redes da literatura e recebeu críticas de KUMAR et al. (1999) com relação a dois aspectos: (a) a analogia conceitual com estudos anteriores, de LEE e DEININGER (1992) e KUMAR et al. (1997) e (b) a sugestão de um critério alternativo ao nível de serviço em termos do volume consumido para tempo, que OTSFELD e KESSLER (1999) rebateram com convicção, pois defendem que seu estudo é para monitoramento da rede em caso de uma intrusão de contaminação em qualquer ponto da rede e não para verificar a deterioração da qualidade ao longo da rede, como nos estudos anteriores. Já em relação ao nível de serviço, o volume consumido dá noção da magnitude do dano causado mais diretamente.

Observa-se, entretanto, que certa razão pode ser atribuída a KUMAR et al. (1999). Autores como WATSON et al. (2004) defendem que múltiplos objetivos devem ser considerados no projeto da rede de sensores e que sua localização otimizada deve ser considerada de forma a minimizar os custos e maximizar o nível de proteção. Eles consideram os seguintes objetivos:

- (1) minimização da população exposta: número de pessoas expostas ao contaminante antes da detecção pelos sensores;
- (2) minimização do tempo para detecção: tempo entre a intrusão intencional e detecção do contaminante pelos sensores;
- (3) minimização do volume consumido: quantia de água contaminada consumida pela população antes da detecção pelo sensor;

(4) minimização da extensão da contaminação: comprimento de tubulação contaminado pela intrusão e;

(5) minimização do número de detecções falhas: a proporção de intrusões não detectadas pelos sensores.

Para cada um desses objetivos apresentados, WATSON et al. (2004) formularam um problema de otimização de programação linear inteira mista e examinaram a posição dos sensores para duas redes de distribuição reais. Além disso, analisaram as relações de melhor compromisso entre diversos desses objetivos, concluindo que algoritmos robustos para o problema da localização dos sensores devem considerar simultaneamente objetivos múltiplos.

Problemas de segurança em redes de abastecimento de água podem ser formulados de diversas maneiras, dependendo do objetivo a ser perseguido. Um deles é minimizar o risco de contaminações usando sensores para detecção oportuna. BERRY et al. (2003) propôs um modelo de localização otimizada de sensores visando minimizar custos e maximizar benefícios, usando a teoria de otimização. A formulação linear proposta por BERRY et al. (2003) para o problema define a rede de água como um grafo $G = (V; E)$ onde E é o conjunto de arestas representativo das tubulações, e V é o conjunto de vértices ou nós de conexão dos tubos (por exemplo: reservatórios, tanques, pontos de consumo, etc.). Uma intrusão intencional é representada por uma única injeção de um grande volume de contaminante em um único ponto da rede. O simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000) é usado para determinar a propagação

do agente contaminador, o sentido de fluxo e outras variáveis de estado. A formulação de PL proposta por BERRY et al. (2003) é explicitada como:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^n \alpha_{ip} C_{ipj} \delta_{jp} \quad (1)$$

onde :

$$C_{ipj} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad p = 1, \dots, P \quad (2)$$

$$s_{ij} = s_{ji} \quad i = 1, \dots, n-1, \quad i < j \quad (3)$$

$$C_{ipj} \geq C_{ipk} - s_{kj} \quad (k, j) \in E; \text{ s.t. } f_{kjp} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in E, 1 < j} s_{ij} \leq S_{\max} \quad s_{ij} \in (0,1); (i, j) \in E \quad (5)$$

onde: - n é o número de nós da rede;

- α_{ip} a probabilidade de intrusão no nó v_i , durante um padrão de consumo p do total de padrões P ;

- δ_{jp} representa a densidade de população abastecida pelo nó j sob o padrão de consumo p ;

- C_{ipj} é o indicador de contaminação, sendo igual a 1 se o nó v_j é contaminado pela intrusão do nó v_i , caso contrário é igual a 0;

- A variável de decisão s_{ij} indica a existência ou não (1 ou 0) de sensor no tubo de conexão dos nós i e j ;

- f_{kjp} é o parâmetro binário que representa o risco de contaminação.

Observa-se que para o problema formulado, os sensores são localizados nos tubos de conexão e o consumo ocorre nos nós, desta forma evita-se que a contaminação se propague para outro nó, porém não se evita que o consumo do nó fonte de contaminação seja descoberto.

OSTFELD e SALOMONS (2004) desenvolveram uma revisão estado da arte sobre o assunto, tecendo a seguinte crítica a trabalhos como os de LEE e DEININGER (1992), KUMAR et al. (1997), AL-ZAHRANI e MOIED (2001), HARMANT et al. (1999) , WOO et al. (2001) e TRYBY e UBER (2001): usam o princípio de que se a qualidade de jusante é aceitável, então a

água abastecida antes de atingir aquele nó é aceitável. Com isso, a solução ótima tende a indicar pontos de jusante e imediatamente antes de mistura de fluxos. Essa idéia básica é aceitável para substâncias não-conservativas na rede, como o cloro, porém, os pontos de monitoramento podem ficar distantes o suficiente para perder ou retardar a detecção de intrusões até que muitos consumidores tenham sido afetados.

OSTFELD e SALOMONS (2004) realçam duas falhas nos trabalhos de KESSLER e OSTFELD (1998), KESSLER et al. (1998), e OSTFELD e KESSLER (2001) relativas a não levar em consideração variações da qualidade da água com o tempo e seu comportamento na rede de distribuição. Com o objetivo de monitorar a intrusão intencional de contaminantes, propõem um modelo para o qual introduzem a seguinte terminologia:

- *Evento de poluição*: injeção intencional de um contaminante em um ou mais nós de um sistema de distribuição em dadas ocasiões de determinadas durações e concentrações;
- *Nível de serviço*: o máximo volume de água poluída exposta ao público a uma concentração superior ao nível mínimo estabelecido;
- *Domínio do evento de poluição*: conjunto de todos os nós contaminados por um dado evento de poluição e a um nível de serviço, ou seja, conjunto dos nós cuja concentração seja superior ao nível mínimo estabelecido e cujo volume acumulativo corresponda ao volume do nível de serviço;
- *Domínio de detecção de um nó*: série de todos os eventos de poluição detectados pela estação de monitoramento localizada em um determinado nó;

- *Redundância*: número relativo aos eventos de poluição detectados por mais que uma estação de monitoramento.

Assumem que qualquer nó pode se tornar uma fonte de poluição em qualquer momento, espalhando o poluente à jusante por advecção e que o sistema de detecção é capaz de prover informação em tempo real.

O método proposto por OSTFELD e SALOMONS (2004) expande o conceito da matriz de poluição de KESSLER et al. (1998) por admitir cenários aleatórios de injeção múltipla de contaminantes, através da matriz de poluição aleatória. O método compreende duas etapas. Primeiramente, cria-se uma matriz de poluição aleatória. Para tanto, cenários de injeção múltipla de contaminante são construídos aleatoriamente e simulados hidraulicamente para um ciclo diário de demanda com o objetivo de identificar quais nós detectam a contaminação introduzida segundo cada cenário. Dessa maneira, constrói-se a matriz de nós i e cenários j de contaminação cujos elementos A_{ij} assumem o valor 0 ou 1 à medida que o nó i é capaz ou não de detectar a contaminação preconizada pelo cenário j , dentro de determinado nível de serviço, neste caso, o máximo volume de água poluída exposta à população. A segunda fase do método consiste em determinar a melhor combinação de N (valor fixo) nós de monitoramento de maneira a detectar o maior número de cenários possível. Os Algoritmos Genéticos são utilizados como uma alternativa ao algoritmo de CHRISTOFIDES (1975), para identificar a melhor combinação de N linhas da matriz aleatória.

As **mesmas redes** empregadas por KESSLER et al. (1998) foram analisadas para demonstração do método, que, segundo os autores, requer **equipamentos de detecção on-line mais adequados** que os existentes no mercado.

Os autores destacam que o monitoramento de contaminantes e poluentes em tempo real quando combinado com a simulação hidráulica da rede pode desempenhar um papel importante no rastreamento e compreensão da extensão da contaminação em um sistema de distribuição de água. Ressaltam a principal limitação à aplicação do modelo proposto: a hipótese de leitura em tempo real do equipamento de monitoramento, pois atualmente existem no mercado monitores on-line para turbidez, cloro residual, pH, dentre outros, que só servem como indicadores indiretos de níveis de contaminação. Os autores sugerem ainda pesquisas futuras para enfrentar os seguintes tópicos: consideração de injeções de contaminação ao longo da tubulação (não necessariamente através de um sistema de nós); uso de diferentes medidas de nível de serviço; uso de técnicas mais sofisticadas para reduzir o esforço computacional das avaliações. Como conclusão, reforçam a importância do estudo, devido à onda de ataques terroristas, sendo a injeção de contaminantes uma grande ameaça para a sociedade.

Duas críticas podem ser feitas em relação ao método proposto por OSTFELD e SALOMONS (2004). O primeiro diz respeito à técnica de amostragem dos cenários aleatórios de poluição, cuja eficiência deve ser melhor

investigada, e a segunda diz respeito à necessidade do conhecimento prévio da concentração dos poluentes *a priori* desconhecida.

DAVIDSON et al. (2005) desenvolveram uma nova abordagem para análise de redes de distribuição de água durante um evento de contaminação, pois modelos computacionais anteriores que prevêm o grau de extensão da contaminação são modelos considerados “demand-driven”. A nova abordagem requer um *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) acoplado ao modelo. O SCADA recebe dados de vazão e pressão em vários pontos da rede e níveis de água do reservatório em tempo real, que são utilizados para criar matrizes de conectividade que consideram a projeção do pior caso de propagação em potencial da contaminação obtida pela combinação de efeitos para vários possíveis cenários de operação. As matrizes de conectividade são capazes de representar a rede em todas possíveis situações de operação, sendo uma matriz $N \times N$ binária, com N o número de nós da rede, o valor “1” representa a existência de possibilidade de ocorrer o fluxo entre os nós e o valor “0”, não. Os autores descrevem dois métodos para criar estas matrizes, um baseado no modo de operação da rede através de dados e o outro em caminhos do fluxo, ou seja, através de simulação. O interessante é que os resultados produzidos pelos dois métodos são iguais, dando confiabilidade ao estudo. A necessidade de estimar demandas e potenciais chances de erro da projeção da extensão da contaminação é eliminada do procedimento, que produz uma projeção da extensão de contaminação mais conservativa que modelos hidráulicos convencionais, e por essa razão mais segura.

3. MATERIAIS

O trabalho de pesquisa aqui desenvolvido é de natureza computacional e como tal empregou os recursos disponíveis no Laboratório de Simulação Numérica (LABSIN) do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) listados a seguir.

3.1. Microcomputador

As simulações foram realizadas em computadores com a seguinte configuração mínima: processador de 900 MHz e 256 Mbytes de memória RAM.

3.2. Softwares e ferramentas

3.2.1. Builder C++ (Borland)

O C++ Builder da Borland é um ambiente visual, orientado a objetos que tem por finalidade desenvolver aplicações para o Windows. Usando o C++ Builder, pode-se utilizar diversas bibliotecas de domínio público disponíveis para realizar a simulação hidráulica (EPANET) e otimização via AGs (MOMHLIB++).

3.2.2. MOMHLIB++ (Jaszkiewicz, 1999) - Algoritmos

Genéticos Multiobjetivo

Biblioteca de domínio público na linguagem C++ possui implementados os Algoritmos Genéticos Multiobjetivo SPEA, NSGA e NSGAI. Apresenta a vantagem de permitir que o usuário implemente os

operadores genéticos básicos (mutação e recombinação) mais adequados ao problema em mãos.

3.2.3. Simulador EPANET

EPANET (ROSSMAN, 2000) é um programa de computador, de domínio público, que permite executar simulações hidráulicas e de parâmetros de qualidade de água em sistemas de transporte e de distribuição de água, capaz de calibrar modelos e visualizar os resultados em vários formatos. Desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA)* e amplamente testado e utilizado nas avaliações de redes de distribuição do mundo todo. Através de sua biblioteca dinâmica de funções, o EPANET permite personalizar mecanismos computacionais fazendo uso do simulador para as necessidades específicas de cada problema a ser tratado. As funções implementadas na biblioteca dinâmica são escritas em três linguagens: C/C++, Delphi Pascal e Visual Basic ou ainda em qualquer linguagem em que as funções possam ser chamadas a partir de um arquivo em formato DLL.

O simulador hidráulico EPANET permite:

- calcular perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- considerar perdas de carga unitária em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc.;
- modelar bombas de velocidade constante ou variável;
- calcular a energia de bombeamento e o respectivo custo;
- modelar os principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;

- modelar reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- considerar múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- modelar relações entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (por exemplo aspersores de rega, ou consumos dependentes da pressão);
- possibilitar basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (por exemplo; altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

Para modelação da qualidade da água, o EPANET tem a capacidade de:

- avaliar o transporte de um constituinte não-reativo (por exemplo, um traçador) através da rede ao longo do tempo;
- avaliar o transporte, mistura e transformação de um constituinte reativo, à medida que este sofre decaimento (por exemplo, cloro) ou retomada do crescimento (por exemplo, um subproduto da desinfecção) com o tempo;
- identificar o tempo de percurso da água através da rede;
- calcular a percentagem de vazão que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (por exemplo, cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- modelar reações de decaimento do cloro no centro e na parede da tubulação;
- utilizar cinéticas de ordem n para modelar reações no centro das tubulações e reservatórios;
- utilizar cinéticas de ordem 0 ou 1 para modelar reações na parede das tubulações;

- definir limites para a transferência de massa na modelação de reações na parede das tubulações;
- permitir que as reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração-limite;
- aplicar coeficientes de reação globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubulação da rede;
- possibilidade de relacionar o coeficiente de reação na parede com a rugosidade da tubulação;
- definir variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- modelar reservatórios de armazenamento de nível variável como reatores de mistura completa, de escoamento em êmbolo ou ainda de mistura com dois compartimentos.

Assim, com o auxílio do EPANET podem-se efetuar os seguintes tipos de análise:

- mistura de água a partir de diversas origens;
- determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- decaimento de cloro residual;
- determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção;
- rastreio da propagação de contaminantes ao longo da rede.

A ferramenta tem como principais funções:

- rodar uma simulação completa, ou seja, simular comportamento hidráulico ou de qualidade da água de uma rede para determinadas características e parâmetros;
- obter informações dos nós da rede (por exemplo, identificação, tipo, valores de demanda, posição geográfica, qualidade, entre outros);

- obter informações das tubulações da rede (por exemplo, identificação, tipo, valores de diâmetro, comprimento, vazão, perda de carga, velocidade, entre outros);
- obter outras informações da rede como padrões de tempo, números de nós e tubos, entre outros.

4. O MÉTODO

O método aqui proposto compreende:

1º Passo - Simulação Hidráulica: o comportamento da rede é simulado hidraulicamente para intervalos de tempo horários de 24 horas representativo do ciclo de demandas típico de um dia.

2º Passo - Construção da rede auxiliar: com base nos resultados das simulações de comportamento da rede para cada intervalo de tempo é construída uma rede auxiliar conforme proposta de KESSLER et al. (1998), em que os tempos de percurso médios são associados a cada trecho (tubo) da rede.

3º Passo - Determinação dos caminhos mais curtos: a rede auxiliar é usada para determinação dos caminhos mais curtos que definem os tempos de propagação de um nó fonte de poluição para os outros nós, usando o algoritmo de Floyd.

4º Passo - Determinação das matrizes de poluição: as matrizes de poluição são construídas considerando o nível de serviço em termos do volume consumido até a detecção, do tempo transcorrido até a detecção e do máximo espalhamento linear da contaminação até a detecção. Observa-se que tais objetivos foram estabelecidos com base na revisão da literatura, que os colocou em evidência, conforme o item 5.5.1 desta.

5º Passo - Determinação dos nós de monitoramento: essa etapa do trabalho representa uma inovação à metodologia proposta por KESSLER et

al. (1998). Determinam-se os conjuntos de nós de monitoramento que representam as melhores relações de compromisso entre os objetivos definidos para a resolução do problema usando AGs multiobjetivo.

5. METODOLOGIA APLICADA: Rede Net1

Para facilitar a compreensão do método, utilizou-se inicialmente uma rede, denominada *Net1*, encontrada no manual do usuário do EPANET e utilizada por KESSLER et al. (1998) e OSTFELD e SALOMONS (2004). A rede Net1 consiste em: um reservatório de nível constante de 800ft, uma estação elevatória (bomba) e um tanque (nível d'água variável).

5.1. Simulação Hidráulica

As equações da continuidade e da conservação da energia caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico das redes de distribuição de água para abastecimento em regime permanente de funcionamento.

Considerando uma rede com N nós e NF nós com carga hidráulica fixa, a relação perda de carga x vazão em uma tubulação entre os nós i e j pode ser representada pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = r.Q_{ij}^n + m.Q_{ij}^2 \quad (6)$$

onde H é a carga hidráulica no nó, h a perda de carga total, r o termo de perda de carga que depende da formulação utilizada, Q a vazão na tubulação, n o expoente da formulação perda de carga x vazão e m o coeficiente de perda de carga localizada.

A conservação de massa nos nós é especificada pela expressão:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad (7)$$

em que C é o consumo no nó i e J_i são todos os nós conectados ao nó i . Assim, conhecendo a carga hidráulica nos NF nós, obtém-se os valores de pressão e vazão na rede que satisfaçam as equações (6) e (7).

Tais equações constituem basicamente o sistema a ser resolvido pelo simulador hidráulico EPANET para obtenção dos valores de pressão e vazão na rede, através do método gradiente.

5.1.1. Caracterização das Redes

O sistema de distribuição de água previsto para estudo deverá ter suas características definidas para dar suporte às avaliações propostas. Algumas destas características são listadas a seguir.

- posição, cota e demanda de cada nó;
- diâmetro e comprimento de cada tubulação;
- padrão de demanda característica;
- posição, cota e dimensões (se necessário) de cada tanque (reservatório de nível variável) e/ou reservatório;
- posição e característica das bombas.

No caso da rede *Net1*, sua topologia, característica do tanque e o padrão de demanda são definidos a seguir.

Figura 5.1 – Rede Net1

Tabela 5.1 – Característica do Tanque da rede Net1.

Número do Tanque (Reservatório)	Cota (ft)	Nível Inicial (ft)	Nível Mínimo (ft)	Nível Máximo (ft)	Diâmetro (ft)
2	850	120	100	150	50.5

Tabela 5.2 – Características de demanda padrão para 24 horas da rede Net1.

Hora do dia	Multiplicador da demanda média
24-02	1.0
02-04	1.2
04-06	1.4
06-08	1.6
08-10	1.4
10-12	1.2
12-14	1.0
14-16	0.8
16-18	0.6
18-20	0.4
20-22	0.6
22-24	0.8

5.1.2. Modelagem da Rede

Definida a rede e suas características, esta deve ser modelada no programa EPANET, para isto deve seguir as seguintes etapas.

- desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição;
- editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
- descrever as condições de operacionalidade do sistema;
- exportar dados através do menu principal para um arquivo *input* de formato .INP (Ver Anexo I o arquivo *input* para a rede *Net1*).

5.2. Inicialização do PLEDECORDA_EPA

Com o suporte do software Builder e da ferramenta do EPANET (ROSSMAN, 2000) para linguagem C++, o programa denominado PLEDECORDA_EPA (Programa de Localização de Equipamentos para DETecção de CONtaminação em Rede de Distribuição de Água - Parte 1 - Criação das matrizes de Poluição) importa os dados do arquivo de entrada, que deve ser denominado REDE.INP, ver em Anexo I o arquivo de entrada da Rede Net1. Como resultado, o programa exporta o arquivo PLEDECORDA_EPA.TXT, que contém as velocidades médias dos trechos da rede, as matrizes de Custo (Caminhos mais Curtos) e Roteamento e as três matrizes poluição, uma para cada nível de serviço. Ver Anexo II o arquivo PLEDECORDA_EPA.TXT para a Rede Net1.

5.2.1. Parâmetros de Entrada – Níveis de Serviço

Além do arquivo REDE.INP, o PLEDECORDA_EPA solicita inicialmente os valores limites para os três níveis de serviço a seguir, justificados posteriormente:

- (1) *Volume Consumido (VC)*: adotar o valor de 1 a 10% do volume consumido em um dia pela população. Para a Rede Net1 adotou-se $VC = 283.17\text{m}^3$ (10,000ft³);
- (2) *Tempo de Detecção (TD)*: adotar o valor de 1 a 6 horas. Para a Rede Net1 adotou-se $TD = 6$ horas;
- (3) *Extensão da Contaminação (EC)*: adotar o valor de 1 a 20% do comprimento da rede. Para a Rede Net1 adotou-se $EC = 15\%$.

Os valores de referência citados para cada nível de serviço foram estipulados através dos resultados do programa PLEDECORDA_EPA e das bibliografias revisadas no capítulo 2.

5.3. Construção da Rede Auxiliar

A rede auxiliar é construída conforme proposto por KESSLER et al. (1998), auxiliada pela simulação hidráulica para a obtenção das velocidades em todas as tubulações para certo padrão de demandas, ou seja, um ciclo de demanda típico (24 horas, em geral). A partir desses dados são construídas duas redes auxiliares, uma para tempo de viagem e outra para extensão de viagem, que consistem de uma série de nós conectados por arcos. Os nós correspondem aos mesmos nós da rede original e para cada trecho ij : (a) um único arco é introduzido ligando os nós i e j se existir tubulação entre esses nós e o fluxo

ocorre apenas em um sentido e (b) dois arcos paralelos são introduzidos se existir tubulação entre o nó i e o nó j e o fluxo ocorre em ambos sentidos. Para a rede auxiliar representativa do tempo de viagem (ver figura 5.3), atribui-se a cada arco um valor denominado “tempo médio de viagem” (L/V) que é o comprimento do tubo (L) dividido pela velocidade média (V) do fluxo em cada sentido para o período de simulação (no caso, 24 horas); e para a rede auxiliar representativa da extensão da viagem (ver figura 5.4), atribui-se a cada arco o respectivo comprimento do tubo, considerados porém apenas nos sentidos em que a água flui. Portanto, cada arco contém as informações que possibilitam a determinação do domínio de cada nó.

5.4. Determinação dos Caminhos Mais Curtos

Assumindo que as partículas de contaminante são conservativas, comportando-se como traçadores e movendo-se com velocidade igual ao fluxo, o tempo de propagação do poluente, do nó i ao nó j , corresponde ao tempo mínimo de viagem entre estes nós.

Portanto, deve-se utilizar um algoritmo para definição dos caminhos mais curtos. Existem vários algoritmos e problemas considerados “clássicos” na Teoria dos Grafos. Um desses problemas é o de encontrar um caminho mínimo entre dois vértices. Existem vários algoritmos que resolvem esse problema. Um deles é o **algoritmo de Floyd**.

5.4.1. Algoritmo de Floyd (1962)

Inicialmente, esse algoritmo determina uma Matriz de Custo (Matriz C) representativa do grafo, ou seja, verifica o custo entre cada par de

vértices. Se existir uma aresta ligando o par de vértices i e j , assume-se que o elemento c_{ij} da matriz representa o custo da aresta. Se não existir uma aresta entre o par de vértices, o elemento assume um valor alto (∞). Entende-se que vértices são os nós da rede, arestas são os tubos e o valor ∞ adotado nos estudos é de 888.

Em seguida, o algoritmo verifica se existe um caminho de menor custo entre cada par de vértices, ao passar por um vértice intermediário. Suponha um grafo com 5 vértices. De um modo geral, após montar a matriz de custo, 5 iterações são necessárias:

- 1ª. Iteração: verificar a existência de caminhos menores passando pelo vértice 1;
- 2ª. Iteração: verificar a existência de caminhos menores passando pelo vértice 2;
- 3ª. Iteração: verificar a existência de caminhos menores passando pelo vértice 3;
- 4ª. Iteração: verificar a existência de caminhos menores passando pelo vértice 4;
- 5ª. Iteração: verificar a existência de caminhos menores passando pelo vértice 5.

O algoritmo:

Parte 1 – Inicializar as matrizes de Custo (Matriz C) e de Roteamento (Matriz R).

$$C^0_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se } i = j \\ \infty, & \text{se não existe aresta entre os vértices } i \text{ e } j \\ \text{custo da aresta entre os vértices } i \text{ e } j \end{cases}$$

$$R^0_{ij} = \begin{cases} j, & \text{se } c_{ij} < \infty \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

Parte 2 – Verificar, para cada posição da matriz, se existe um caminho mais curto. Considerando que n é o número de vértices, a construção de tais matrizes pode ser feita de acordo com o “pseudo” código:

Para $k:=1$ *a* n *faça*
Para $i:=1$ *a* n *faça*
Para $j:=1$ *a* n *faça*
 Se $(C^{k-1}_{ik} + C^{k-1}_{kj} < C^{k-1}_{ij})$ *então*
 $C^k_{ij} := C^{k-1}_{ik} + C^{k-1}_{kj};$
 $R^k_{ij} := R^{k-1}_{ik};$

Por exemplo, considerando o grafo abaixo, aplica-se o algoritmo de Floyd para encontrar a matriz de custo mínimo.

Figura 5.2 – Grafo exemplo

O primeiro passo, construir as matrizes de custo e roteamento:

Matriz C^0						Matriz R^0					
	v1	v2	v3	v4	v5		v1	v2	v3	v4	v5
v1	0	5	∞	3	∞	v1	1	2	0	4	0
v2	∞	0	3	∞	∞	v2	0	2	3	0	0
v3	∞	∞	0	∞	5	v3	0	0	3	0	5
v4	1	1	∞	0	1	v4	1	2	0	4	5
v5	∞	1	∞	1	0	v5	0	2	0	4	5

A seguir, várias iterações são realizadas para verificar se existe um caminho mais curto entre cada pares de vértices. No início têm-se:

K=1, i=1, j=1	se $C^0_{11} + C^0_{11} < C^0_{11}$? $0 + 0 < 0$? Não!
K=1, i=1, j=2	se $C^0_{11} + C^0_{12} < C^0_{12}$? $0 + 5 < 5$? Não!
K=1, i=1, j=3	se $C^0_{11} + C^0_{13} < C^0_{13}$? $0 + \infty < \infty$? Não!
K=1, i=1, j=4	se $C^0_{11} + C^0_{14} < C^0_{14}$? $0 + 3 < 3$? Não!
K=1, i=1, j=5	se $C^0_{11} + C^0_{15} < C^0_{15}$? $0 + \infty < \infty$? Não!

Basicamente, o que se investigou foi se para **ir do vértice 1 para qualquer outro**, o caminho ficou mais curto **ao passar pelo vértice 1 (k=1)**.

Após j atingir n , que é igual a 5 (número de vértices), a execução sai do laço de j e i é incrementado para 2. Têm-se:

K=1, i=2, j=1	se $C^0_{21} + C^0_{11} < C^0_{21}$? $\infty + 0 < \infty$? Não!
K=1, i=2, j=2	se $C^0_{21} + C^0_{12} < C^0_{22}$? $\infty + 5 < 0$? Não!
K=1, i=2, j=3	se $C^0_{21} + C^0_{13} < C^0_{23}$? $\infty + \infty < 3$? Não!
K=1, i=2, j=4	se $C^0_{21} + C^0_{14} < C^0_{24}$? $\infty + 3 < \infty$? Não!
K=1, i=2, j=5	se $C^0_{21} + C^0_{15} < C^0_{25}$? $\infty + \infty < \infty$? Não!

Demonstrou-se também que para ir do vértice v2 a qualquer outro vértice, o caminho não é encurtado ao passar pelo vértice 1. Em outras palavras, verificou-se que utilizar o vértice 1 como intermediário não encurta o caminho do vértice v2 a qualquer outro.

Continuando então, i é incrementado para 3:

$K=1, i=3, j=1$	se $C^{031} + C^{011} < C^{031}$? $\infty + 0 < \infty$? Não!
$K=1, i=3, j=2$	se $C^{031} + C^{012} < C^{032}$? $\infty + 5 < \infty$? Não!
$K=1, i=3, j=3$	se $C^{031} + C^{013} < C^{033}$? $\infty + \infty < 0$? Não!
$K=1, i=3, j=4$	se $C^{031} + C^{014} < C^{034}$? $\infty + 3 < \infty$? Não!
$K=1, i=3, j=5$	se $C^{031} + C^{015} < C^{035}$? $\infty + \infty < 5$? Não!

Continuando, i é incrementado para 4:

$K=1, i=4, j=1$	se $C^{041} + C^{011} < C^{041}$? $1 + 0 < 1$? Não!
$K=1, i=4, j=2$	se $C^{041} + C^{012} < C^{042}$? $1 + 5 < 1$? Não!
$K=1, i=4, j=3$	se $C^{041} + C^{013} < C^{043}$? $1 + \infty < \infty$? Não!
$K=1, i=4, j=4$	se $C^{041} + C^{014} < C^{044}$? $1 + 3 < 0$? Não!
$K=1, i=4, j=5$	se $C^{041} + C^{015} < C^{045}$? $1 + \infty < 1$? Não!

Continuando, i é incrementado para 5:

$K=1, i=5, j=1$	se $C^{051} + C^{011} < C^{051}$? $\infty + 0 < \infty$? Não!
$K=1, i=5, j=2$	se $C^{051} + C^{012} < C^{052}$? $\infty + 5 < 1$? Não!
$K=1, i=5, j=3$	se $C^{051} + C^{013} < C^{053}$? $\infty + \infty < \infty$? Não!
$K=1, i=5, j=4$	se $C^{051} + C^{014} < C^{054}$? $\infty + 3 < 1$? Não!
$K=1, i=5, j=5$	se $C^{051} + C^{015} < C^{055}$? $\infty + \infty < 0$? Não!

Após i atingir o valor n , ou seja, $i=5$, o laço do i chega ao fim e a variável k é incrementada e assume o valor 2. Investiga-se agora se no percurso entre cada par de vértices o uso do vértice v_2 como intermediário torna o caminho mais curto.

$K=2, i=1, j=1$	se $C^{012} + C^{021} < C^{011}$? $5 + \infty < 0$? Não!
$K=2, i=1, j=2$	se $C^{012} + C^{022} < C^{012}$? $5 + 0 < 5$? Não!
$K=2, i=1, j=3$	se $C^{012} + C^{023} < C^{013}$? $5 + 3 < \infty$? Sim!!!
$K=2, i=1, j=4$	se $C^{012} + C^{024} < C^{014}$? $5 + \infty < 3$? Não!
$K=2, i=1, j=5$	se $C^{012} + C^{025} < C^{015}$? $5 + \infty < \infty$? Não!

Quando um caminho mais curto é identificado, gera-se a matriz C^1 , sobrescrevendo-se os valores anteriores. Sendo assim, as matrizes de custo e roteamento atualizadas são:

Matriz C^1					
	v1	v2	v3	v4	v5
v1	0	5	8	3	∞
v2	∞	0	3	∞	∞
v3	∞	∞	0	∞	5
v4	1	1	∞	0	1
v5	∞	1	∞	1	0

Matriz R^1					
	v1	v2	v3	v4	v5
v1	1	2	2	4	0
v2	0	2	3	0	0
v3	0	0	3	0	5
v4	1	2	0	4	5
v5	0	2	0	4	5

Repara-se que a matriz de roteamento agora indica que, para ir do vértice v1 para o vértice v3, é preciso primeiro passar pelo vértice v2.

Repetindo então o procedimento para $k=2$, $k=3$, $k=4$ e $k=5$, no final ter-se-á as duas matrizes:

Matriz C^5 (custo mínimo)					
	v1	v2	v3	v4	v5
v1	0	4	7	3	4
v2	10	0	3	9	8
v3	7	6	0	6	5
v4	1	1	4	0	1
v5	2	1	4	1	0

Matriz R^5 (roteamento)					
	v1	v2	v3	v4	v5
v1	1	4	4	4	4
v2	3	2	3	3	3
v3	5	5	3	5	5
v4	1	2	2	4	5
v5	4	2	2	4	5

Assim, a Matriz C^5 indica qual será o custo mínimo para ir de um vértice a outro, enquanto a Matriz R^5 mostra qual é o caminho que deverá ser percorrido para ir de um vértice a outro com o custo mínimo. Por exemplo:

- Para ir do vértice v1 para o vértice v2, o custo é de valor 4 conforme elemento c_{12} da Matriz C^5 . O caminho mais curto é identificado pelos elementos da Matriz R^5 da seguinte forma: o valor 4 do elemento r_{12} indica que o vértice v1 representado pela linha 1 deve passar pela linha 4 que representa o vértice v4, então deve-se agora considerar o elemento r_{42} , já que necessita-se agora ir do vértice v4 para o vértice v2, o valor 2 significa que deve-se passar pela linha 2 da matriz que

representa o vértice v_2 , sendo este o vértice de destino. Portanto o roteamento do caminho mais curto é $v_1-v_4-v_2$.

- Para ir do vértice v_1 para o vértice v_3 , o custo é de valor 7 conforme elemento c_{13} da Matriz C^5 . O caminho mais curto é identificado da seguinte forma: o valor 4 do elemento r_{13} indica que o vértice v_1 representado pela linha 1 deve passar pela linha 4 que representa o vértice v_4 , então deve-se considerar o elemento r_{43} , já que necessita-se agora ir do vértice v_4 para o vértice v_3 , o valor 2 significa que deve-se passar pela linha 2 da matriz que representa o vértice v_2 , então deve-se considerar o elemento r_{23} , o valor 3 significa que deve-se passar pela linha 3 da matriz que representa o vértice v_3 , sendo este o vértice de destino. Portanto o roteamento do caminho mais curto é $v_1-v_4-v_2-v_3$.

O algoritmo de Floyd foi implementado para identificar as matrizes de Custo e Roteamento. Tais matrizes obtidas pela rede *Net1* são mostradas a seguir como exemplo. Com base nessas matrizes são construídas as redes auxiliares para Tempo de viagem e para Extensão de viagem. A rede auxiliar para Tempo de viagem é utilizada na construção da matrizes poluição de níveis de serviço em termos do volume máximo consumido de água contaminada e tempo máximo para detecção. A rede auxiliar para Extensão de viagem é utilizada na construção da matriz poluição de nível de serviço em termos da extensão máxima da contaminação.

Matriz Custo de Tempo de viagem (h) (Caminhos Mais Curtos):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	2.13	3.15	5.44	3.14	4.94	9.46	4.86	6.90	888	3.30
11	888	0	1.02	3.31	1.01	2.81	7.33	2.73	4.77	888	1.16
12	888	6.78	0	2.29	7.79	1.79	6.31	9.51	3.75	888	0.14
13	888	888	888	0	888	888	4.02	888	888	888	888
21	888	888	888	888	0	3.98	9.55	1.71	5.50	888	888
22	888	888	888	888	17.63	0	5.56	19.34	1.96	888	888
23	888	888	888	888	888	888	0	888	888	888	888
31	888	888	888	888	888	888	888	0	3.79	888	888
32	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888
9	0	2.13	3.15	5.44	3.14	4.94	9.46	4.86	6.90	0	3.30
2	888	6.92	0.14	2.42	7.93	1.93	6.45	9.65	3.89	888	0

Matriz Custo de Extensão de viagem Final (ft) (Caminhos Mais Curtos):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	10530	15810	21090	15810	21090	26370	21090	26370	63530	16010
11	63530	0	5280	10560	5280	10560	15840	10560	15840	63530	5480
12	63530	5280	0	5280	10560	5280	10560	15840	10560	63530	200
13	63530	63530	63530	0	63530	63530	5280	63530	63530	63530	63530
21	63530	63530	63530	63530	0	5280	10560	5280	10560	63530	63530
22	63530	63530	63530	63530	5280	0	5280	10560	5280	63530	63530
23	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530	63530	63530
31	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	5280	63530	63530
32	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530
9	0	10530	15810	21090	15810	21090	26370	21090	26370	0	16010
2	63530	5480	200	5480	10760	5480	10760	16040	10760	63530	0

Matriz Roteamento Final:

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
11	0	2	3	3	5	3	3	5	3	0	3
12	0	2	3	4	2	6	4	2	6	0	11
13	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	5	6	6	8	8	0	0
22	0	0	0	0	5	6	7	5	9	0	0
23	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	11

Figura 5.3 – Rede auxiliar para Tempo de viagem da Rede Net1

Figura 5.4 – Rede auxiliar para Extensão de viagem da Rede Net1

5.5. Determinação das Matrizes de Poluição

As Matrizes de Poluição são construídas para representar os domínios de detecção e cobertura de cada nó da rede. É uma matriz $N \times N$ binária, sendo N é o número de nós, onde os elementos de valor “1” representam os nós contaminados e “0” os nós não contaminados. A linha i indica todos os nós contaminados devido à intrusão no nó i . A coluna j indica todos os nós poluição que podem contaminar o nó j .

Para a construção das Matrizes de Poluição foram identificados os objetivos a serem investigados

5.5.1. Identificação dos objetivos

Conforme mencionado anteriormente, a literatura apresenta cinco alternativas (possíveis objetivos) para o problema, detalhados a seguir.

(1) *População Exposta (PE)*:

A População Exposta é a população com potencial para ser contaminada, ou seja, do momento do início da contaminação até sua detecção, quantas pessoas poderiam ser contaminadas. Deve-se minimizar a PE, porém para poder utilizar este objetivo deve-se conhecer, além da rede de distribuição de água, as regiões que esta abastece e vinculá-las à própria rede. Isto fica claro quando se compara um nó x de demanda d que representa uma indústria a um nó y de demanda também d , que abastece porém uma escola ou um condomínio residencial. A população exposta no caso do nó y é maior que a do nó x .

(2) *Tempo para Detecção (TD):*

O Tempo para Detecção é o tempo entre a intrusão intencional e a detecção do contaminante pelos equipamentos de monitoramento. Deve-se minimizar TD, porém sua estimativa fica limitada ao tipo de contaminante, se este reage ou se comporta como um traçador.

(3) *Volume Consumido (VC):*

O Volume Consumido é a quantidade de água contaminada consumida pela população antes da detecção pelos sensores. A minimização de VC é considerada de maior relevância, uma vez que considera de modo direto o foco do trabalho, que é a segurança da população.

(4) *Extensão da Contaminação (EC):*

A Extensão da Contaminação, EC, é o comprimento total de tubulação contaminada pela intrusão, deve também ser minimizada.

(5) *Número de Detecções Falhas (NDF):*

O Número de Detecções Falhas, *NDF*, é a proporção de intrusão que são indetectáveis pelos sensores. Para considerar a minimização de *NDF* deve-se definir o contaminante e a probabilidade de detecção dos sensores, *a priori* desconhecidos. Pode-se considerar a hipótese que o sensor detecta a proporção mínima que prejudique a saúde da população.

Dentre os objetivos citados, verifica-se que o Volume Consumido é o mais utilizado na literatura observada na revisão, com justificativa óbvia já

descrita. Porém, tendo em vista que o principal alvo é a segurança da população (VC e TD) e economia (EC), a investigação de objetivos múltiplos faz-se necessária. Dentre os objetivos descritos, três serão investigados, sendo eles: o Volume Consumido, o Tempo de Detecção e a Extensão da Contaminação. Os outros objetivos listados acima não serão utilizados devido à necessidade de especificação de maiores detalhes da rede, da população (densidade), do contaminante (concentração) e do equipamento, *a priori* desconhecidos.

5.5.1.1. Construção da Matriz Poluição para Volume Consumido

A Matriz Poluição para Volume Consumido é estabelecida através dos seguintes passos:

- atribuir “0” inicialmente para todos os elementos da linha i da matriz;
- classificar todos os nós alcançáveis pela intrusão do nó i , da rede auxiliar, de acordo com o roteamento do caminho mais curto, em ordem crescente;
- iniciar a partir do primeiro nó classificado. Calcular o volume de água contaminada que é consumida antes da chegada da poluição vinda do nó i ao nó classificado j . Se o volume exceder o máximo permitido (Nível de serviço 1: Volume Consumido) deve-se parar. Caso contrário, atribuir “1” ao elemento da linha i e coluna j da matriz e repetir o procedimento para o próximo nó classificado. Observa-se a seguir a Matriz Poluição para Volume Consumido de água contaminada para a rede *Net1*.

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 283.17m3):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
11	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0

5.5.1.2. Construção da Matriz Poluição para Tempo de Detecção

A Matriz Poluição para Tempo de Detecção é estabelecida através dos seguintes passos:

- atribuir “0” inicialmente para todos os nós da linha i da matriz;
- iniciar da primeira linha i e coluna j até a última linha i e coluna j . Avaliar cada elemento c_{ij} da Matriz Custo para Tempo de viagem e o nível de serviço 2. Se o elemento c_{ij} da Matriz Custo for menor que tempo máximo permitido (Nível de serviço 2: Tempo de Detecção) deve-se atribuir “1” ao elemento da linha i e coluna j da Matriz Custo para a Matriz Poluição e assim por diante, analogamente à matriz poluição para VC. Observa-se a seguir a Matriz Poluição para Tempo de Detecção para a rede *Net1*.

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
11	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
22	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1

5.5.1.3. Construção da Matriz Poluição para Extensão da Contaminação

A Matriz Poluição para Extensão da Contaminação é estabelecida através dos seguintes passos:

- atribuir “0” inicialmente para todos os nós da linha i da matriz;
- iniciar da primeira linha i e coluna j até a última linha i e coluna j . Avaliar cada elemento c_{ij} da Matriz Custo para Extensão de viagem e o nível de serviço 3. Se o elemento c_{ij} da Matriz Custo for menor que a extensão máxima permitida (Nível de serviço 3: Extensão da Contaminação) deve-se atribuir “1” da respectiva linha i e a coluna j da Matriz Custo para a Matriz Poluição e assim por diante, analogamente à matriz poluição para VC. Observa-se a seguir a Matriz Poluição para Extensão da Contaminação para a rede *Net1*.

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
12	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
22	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1

5.6. Inicialização do Programa PLEDECORDA_MOM

O programa denominado PLEDECORDA_MOM (Programa de Localização de Equipamentos para Detecção de Contaminação em Rede de Distribuição de Água - Parte 2 - Otimização com Algoritmos Genéticos Multiobjetivo - SPEA) foi produzido no software Builder e com auxílio da biblioteca de domínio público MOMHLib++ (Jaszkiewicz, 1999) que tem implementado, dentre outros, o Algoritmo Genético Multiobjetivo SPEA, utilizado nas análises de otimização deste trabalho. O Programa importa de um arquivo .INP, o número de nós da rede e as matrizes poluição, além do número de equipamentos de monitoramento a adotar, além do indicativo relativo a considerar-se ou não o monitoramento por diversos equipamentos de detecção. Como resultado, o programa exporta o arquivo PLEDECORDA_MOM.TXT, com as Frentes de Pareto ou conjunto de soluções não-dominadas identificadas. Ver anexo III o arquivo PLEDECORDA_MOM.TXT para a Rede Net1.

5.7. Determinação dos Nós de Monitoramento

5.7.1. O Problema a ser tratado

Um problema de otimização multiobjetivo considerando p objetivos, n variáveis de decisão e m restrições gerais, geralmente pode ser expresso por:

$$\text{Maximizar } F = [f_k (x_1, x_2, \dots, x_n)], \quad k=1, 2, \dots, p \quad (8)$$

$$\text{sujeito à } g_i (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$X_j \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

sendo f_k as funções objetivo que compõe o conjunto multiobjetivo F , g_i as restrições do problema e $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ representa o vetor de n variáveis de decisão x_j .

Em um problema multiobjetivo, geralmente busca-se um conjunto de soluções consideradas melhores, pois não existe uma única solução ótima que satisfaça todos os objetivos da mesma forma. Este conjunto de soluções é denominado não-inferior, não-dominado, de compromisso ou Pareto ótimas. Tais soluções são superiores às demais soluções viáveis no espaço de busca.

Conceito de Pareto ótimo:

Maximizando os n componentes de um vetor função objetivo F e de um vetor variáveis de decisão X pertencente à em um universo U :

$$F(X) = (f_1(X), \dots, f_p(X)) \quad (11)$$

Um vetor decisão $X_u \in U$ é considerado Pareto ótimo se e somente se nenhum $X_v \in U$ para qual $v = F(X_v) = (v_1, v_2, \dots, v_p)$ domina $u = F(X_u) = (u_1, u_2, \dots, u_p)$, isto é, não existe $X_v \in U$ tal que $\forall i \in \{1, \dots, p\}, v_i \leq u_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, p\} \mid v_i < u_i$. O conjunto de todos os vetores decisão é denominado **Pareto ótimo**, o conjunto de vetores objetivos correspondentes é denominado não dominado.

Para exemplificar o conceito acima, COHON (1978) apresenta um problema de maximização com 3 objetivos (f_1 , f_2 e f_3).

Tabela 5.3 – Maximização com 3 objetivos

Alternativa	f_1	f_2	f_3	Solução
A	5	8	7	não inferior
B	4	9	3	não inferior
C	4	4	4	inferior
D	3	10	6	não inferior
E	2	9	8	não inferior

Ao comparar as alternativas A, B, C, D e E, segundo f_1 , f_2 e f_3 , permite-se concluir que A, B, D e E são não inferiores, enquanto C é inferior. Verifica-se que A tem melhores valores para f_1 e f_3 e pior valor de f_2 que B, portanto ambas são não inferiores, e A possui valores para f_1 , f_2 e f_3 melhores que C, enquanto B possui valores melhores para f_2 e f_3 que C, portanto A domina C.

5.7.1.1. O princípio dos Algoritmos Genéticos (AGs)

Os algoritmos Genéticos são técnicas de busca estocásticas que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural, compreendendo os processos de seleção e genética das populações, em analogia como o

processo biológico de sobrevivência e adaptação dos indivíduos mais capazes, devidamente tratadas em livros texto como GOLDBERG (1989). São atualmente enfocados na tentativa de dar tratamento a problemas de otimização complexos dos mais diversos. Os AGs diferem dos métodos de otimização clássicos, pois partem de um conjunto de soluções alternativas aleatórias denominada população, onde cada indivíduo (cromossomo) representa uma solução para o problema, que reúne um conjunto de atributos na forma de códigos. Tais atributos permitem que os indivíduos sejam avaliados e ordenados de acordo com o valor correspondente da **Função de Aptidão**, segundo o qual são reproduzidos ou não. A partir daí, uma nova população é criada. Cromossomos, denominados descendentes, são formados pela união de dois cromossomos pais da geração atual, através do operador recombinação (*crossover*), e, em seguida modificados através do operador mutação (*mutation*).

5.7.1.2. Os AGs Multiobjetivo

Os algoritmos genéticos são ferramentas naturais no tratamento multiobjetivo, por tratarem-se de métodos populacionais (DEB, 2001). Assim, as técnicas evolucionárias para otimização multiobjetivo mostram-se ferramentas adequadas para dar tratamento ao problema.

Dentre as técnicas evolucionárias de otimização multiobjetivo, destacam-se aquelas baseadas no conceito de soluções não dominadas de Pareto, por tratarem os problemas de maneira mais abrangente, considerando os diversos objetivos simultaneamente. A literatura indica uma grande diversidade

de métodos evolucionários multiobjetivo, classificados em não-elitistas e elitistas, como os AGs Multiobjetivo de 2ª geração (SPEA, NSGA, NSGA-II, MOMGA, PAES, entre outros).

ZIZTLER e THIELE (1998) introduziram o elitismo através da manutenção de uma população externa. Esta população armazena um número fixo de soluções não-dominadas encontradas no início da simulação. A cada geração, as novas soluções não-dominadas são comparadas à população externa existente e as soluções não-dominadas resultantes são preservadas. Este algoritmo é chamado *Strength Pareto Evolutionary* (SPEA), que além de preservar as melhores soluções, também as utiliza nas operações genéticas com as populações correntes, direcionando a população a se encaminhar em direção às boas regiões do espaço de busca. O trabalho de CHEUNG (2004) realizou um estudo comparativo de métodos de algoritmos genéticos multiobjetivo para análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento. CHEUNG (2004) fez uma análise comparativa entre *MultiObjective Genetic Algorithm* (MOGA), *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA), *elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) e o SPEA e concluiu que o algoritmo SPEA obteve melhor desempenho. Outro trabalho, CHEUNG et al. (2003), para tomada de decisão também para reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento, também fez um estudo comparativo de dois métodos, MOGA e SPEA, e concluiu que o algoritmo SPEA superou o algoritmo MOGA em relação às Frentes de Pareto produzidas e o tempo de processamento.

Sendo assim, entre as versões mais atuais dos métodos evolucionários multiobjetivo, o algoritmo SPEA se destaca como um procedimento elitista de bom desempenho e será, portanto, utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Para tanto, pretende-se utilizar a MOMHLib++, que está implementado o algoritmo SPEA, na linguagem C++.

5.7.1.3. SPEA

No SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*), as melhores soluções (soluções não-dominadas) de cada iteração, denominadas elite, são armazenadas em um conjunto externo (temporário). Em cada iteração do algoritmo, as soluções externas são comparadas com as soluções pertencentes ao conjunto corrente de forma que as melhores soluções são preservadas.

Os dados de entrada para este algoritmo são:

- Dimensão da população (POP);
- Probabilidade de recombinação (Pr);
- Probabilidade de mutação (Pm);
- Dimensão da população externa (POPe);
- Número máximo de gerações (GER).

Os dados de entrada utilizados pelo SPEA no programa PLEDECORDA_MOM são:

- Dimensão da população (POP): 50;
- Probabilidade de recombinação (Pr): 80%;
- Probabilidade de mutação (Pm): 10%;
- Dimensão da população externa (POPe): 80;

- Número máximo de gerações (GER): 20000;
- operador utilizado para recombinação: Blend Crossover (BLX- α);
- operador utilizado para mutação: Mutação Uniforme.

As etapas do procedimento podem ser descritas:

- *Etapa 1:* Geração da população inicial aleatória P_t considerando os parâmetros de entrada POP;
- *Etapa 2:* Criação da população externa P_{te} vazia de dimensão POPE;
- *Etapa 3:* Avaliação das funções objetivo;
- *Etapa 4:* Atualização da POPE:
 - Identificação das soluções não dominadas da população P_t ;
 - Cópias das soluções não dominadas encontradas em P_t para P_{te} ;
 - Remoção das soluções não dominadas de P_t ;
 - Adequação do conjunto externo, conforme dimensão da população externa POPE, através de um algoritmo de *cluster*.
- *Etapa 5:* Nessa etapa o algoritmo verificará seu critério de convergência. Em geral, adota-se o número máximo de iterações para essa verificação. Se tal critério for satisfeito o algoritmo segue para a etapa 11 e o processo é finalizado, caso contrário, o algoritmo segue para a etapa 6.
- *Etapa 6:* Avaliação SPEA
 - O módulo de avaliação tem objetivo de atribuir valores de aptidão as soluções como forma de preparar para ao operador seleção. No SPEA, esse procedimento é realizado sob duas etapas. Primeiro todos vetores solução i pertencentes à população externa (P_t) são classificados e recebem um valor de aptidão S_i denominado na literatura internacional como *strength*. Esse valor de aptidão, para um dado vetor de solução

- i , é proporcional ao número de soluções dominadas pela solução i na população corrente.
- Posteriormente, calculam-se os valores de aptidão (F_j) de todas as soluções j pertencentes à população corrente (Pte). Esse valor de aptidão é calculado como sendo a soma de todos os valores de aptidão S_i das soluções externas i que dominam vetores j da população corrente.
- *Etapa 7: Seleção:*
- Nessa etapa o SPEA difere dos métodos MOGA e NSGA, pois, a técnica de seleção utilizada no SPEA é a seleção por torneio. Após todas as soluções, pertencentes aos conjuntos externo e corrente, terem recebido seus respectivos valores de aptidão (F), os conjuntos P_t e P_{te} são unidos para aplicação do operador de seleção.
 - A seleção por torneio no SPEA é desenvolvida da seguinte forma: cria-se um conjunto temporário (P_{temp}) de dimensão n ; seleciona-se aleatoriamente duas soluções (i e j) pertencentes ao conjunto unificado ($P_t \cup P_{te}$); se $(F_j) < (F_i)$ então i é incluso em P_{temp} caso contrário j é incluso em P_{temp} .
- *Etapa 8: Recombinação:* Nessa etapa o SPEA se assemelha aos AEs simples. A recombinação é denominada operador de variação. Esse operador é aplicado como na estrutura geral dos AGs convencionais simples.
- *Etapa 9: Mutação:* O operador de mutação também faz parte do processo de variação e é responsável pela introdução de diversidade na população, que muitas vezes é perdida ao longo das iterações, em outras palavras pode-se dizer que esse operador é responsável pela introdução de material genético na população.
- *Etapa 10: Nova População:* Uma nova população é formada devido à aplicação dos operadores de recombinação e mutação. Assim é necessário que uma nova avaliação seja realizada para cada vetor

solução pertencente a essa nova população, portanto volta-se a etapa 3.

- *Etapa 11:* Nessa etapa o algoritmo apresenta as soluções ótimas Pareto (Pte).

5.7.2. Implementação dos AGs multiobjetivo sobre as Matrizes de Poluição

5.7.2.1. Funções de Aptidão

As funções de aptidão do problema foram avaliadas com base nas matrizes poluição de níveis de serviço em termos do volume máximo consumido de água contaminada (MP1), tempo máximo para detecção (MP2), extensão máxima da contaminação (MP3) e no número de pontos de monitoramento. Pretende-se, portanto, maximizar o número de fontes detectadas pelos nós solução dentro dos limites máximos para o volume consumido, o tempo de detecção e o comprimento da contaminação pré-estabelecidos para a definição das respectivas matrizes de poluição. As Funções F1, F2 e F3 a serem maximizadas foram expressas como:

$$\text{Maximizar} \quad F1 = \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \sum_{i=1}^{nnode} (mp1_{i,xj}) - DEC1 \quad (12)$$

em que :

$$DEC1 = DEC2 * \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \left[\sum_{li=1}^{nnode} (mp1_{li,xj}) - 1 \right] \quad (13)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp1_{li,xj}) \geq 1 \rightarrow DEC2 = 0,99 \quad (14)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp1_{li,xj}) = 0 \rightarrow DEC2 = 0 \quad (15)$$

$$(mp1_{li,xj}, mp1_{i,xj}) \in (0,1)$$

$$\text{Maximizar} \quad F_2 = \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \sum_{i=1}^{nnode} (mp_{2_{i,xj}}) - DEC_1 \quad (16)$$

em que :

$$DEC_1 = DEC_2 * \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \left[\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{2_{li,xj}}) - 1 \right] \quad (17)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{2_{li,xj}}) \geq 1 \rightarrow DEC_2 = 0,99 \quad (18)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{2_{li,xj}}) = 0 \rightarrow DEC_2 = 0 \quad (19)$$

$$(mp_{2_{li,xj}}, mp_{2_{i,xj}}) \in (0,1)$$

$$\text{Maximizar} \quad F_3 = \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \sum_{i=1}^{nnode} (mp_{3_{i,xj}}) - DEC_1 \quad (20)$$

em que :

$$DEC_1 = DEC_2 * \sum_{j=1}^{n \text{ var}} \left[\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{3_{li,xj}}) - 1 \right] \quad (21)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{3_{li,xj}}) \geq 1 \rightarrow DEC_2 = 0,99 \quad (22)$$

$$\sum_{li=1}^{nnode} (mp_{3_{li,xj}}) = 0 \rightarrow DEC_2 = 0 \quad (23)$$

$$(mp_{3_{li,xj}}, mp_{3_{i,xj}}) \in (0,1)$$

Nas funções F1, F2 e F3 acima, $nnode$ é o número de nós da rede, $nvar$ é o número de variáveis de decisão (número de equipamentos de monitoramento), xj é uma variável de decisão do vetor decisão X , i e li são incrementos da linha da matriz poluição, $mp1_{i,xj}$ e $mp1_{li,xj}$ são elementos da matriz $MP1$, $mp2_{i,xj}$ e $mp2_{li,xj}$ são elementos da matriz $MP2$, $mp3_{i,xj}$ e $mp3_{li,xj}$ são elementos da matriz $MP3$, $DEC2$ é o valor do decréscimo por nó já monitorado.

As funções F1, F2 e F3 acima explicitadas são compostas de 2 termos. O primeiro (soma) corresponde ao número de total de detecções, pelos

diversos equipamentos de monitoramento. O segundo termo faz com que as detecções repetidas sejam subtraídas do cômputo geral e, em seu lugar, se tenha o valor $(0,99) \times n^o$ de nós que detectam poluição emitida por determinada fonte já detectada por outro equipamento. Essa é a maneira utilizada neste trabalho para considerar as detecções repetidas e assim reforçar a confiabilidade do sistema de monitoramento estabelecido, admitindo que os equipamentos possam falhar.

Dessa forma, por exemplo, se dois nós são capazes de detectar a poluição de certa fonte, o primeiro termo da função retornará o valor $1+1=2$ e o segundo $0,99 \times 1=0,99$, então F assumirá o valor $2-0,99=1,01$. Assim a fração inteira 1 do número 1,01 indica que a fonte de poluição foi detectada e a parte fracionária 0,01 representa que mais 1 equipamento foi capaz de detectar a poluição emitida por essa fonte.

Caso o critério confiabilidade seja excluído das análises, basta substituir o valor 0,99 das equações (14), (18) e (22) por 1,00.

5.7.2.2. Representação das soluções

Os AGs multiobjetivo serão aplicados utilizando as matrizes definindo-se um número máximo de pontos de monitoramento ($nvar$) fixo para estabelecer o comprimento da cadeia representativa das soluções (string). Essa cadeia conterá, portanto, os nós de monitoramento (números inteiros de 1 a n = número de nós da rede) relativos a cada solução do problema. Para o caso da

Rede Net1, as duas tabelas abaixo apresentam soluções geradas pelo programa PLEDECORDA_MOM.

Tabela 5.4 – Resultados da Rede Net1 não considerando detecções repetidas.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	7	7	4	22

Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	9	9	6	23 e 22
2	6	10	6	13 e 32

Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	11	11	8	23, 32 e 22

Tabela 5.5 – Resultados da Rede Net1 considerando detecções repetidas

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	7	7	4	22

Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	6.02	10.03	6	13 e 32
2	9.03	9.05	6.01	32 e 22

Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	11.03	11.06	8.02	22, 23 e 32

Figura 5.5 – Solução 1 da Rede Net1 para 1 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 5.6 – Solução 1 da Rede Net1 para 2 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 5.7 – Solução 2 da Rede Net1 para 2 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 5.8 – Solução 1 da Rede Net1 para 3 equipamento considerando detecções repetidas.

Para melhor entendimento, examina-se a solução 1 da tabela 5.5 com três equipamentos para monitoramento ($nvar=3$) e com acréscimo de nó já monitorado, correspondente ao vetor (22, 23 e 32). A partir das matrizes de poluição já determinadas, podem-se avaliar as três funções de aptidão do problema no ponto representado pela referida solução, da seguinte forma:

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 283.17m3):

Nós:		Nós poluídos/contaminados											Detecção repetida
		10	11	12	13	21	22	23	31	32	10	11	
Nós fontes de poluição/contaminação	10	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	
	11	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	
	12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
	13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
	21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
	22	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	9	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	
	2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
Soma							7	2		5			3

Fontes detectadas pelo nó 22: (10, 11, 12, 21, 22, 9, 2).

Fontes detectadas pelo nó 23: (13, 23).

Fontes detectadas pelo nó 32: (12, 22, 31, 32, 2).

F1= n°. de fontes detectadas pela solução (22, 23, 32): $14[=7+2+5]-3.(0,99) = \mathbf{11,03}$. Observa-se que o valor 11 significa o número total de nós fonte que são detectados e o número de nós da rede é 11, portanto todos os nós são monitorados dentro do especificado nível de serviço. O acréscimo 0,03 significa que há 3 repetições de nós já monitorados (nós 12, 22 e 2), como observado nas linhas da matriz.

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós:		Nós poluídos/contaminados											Detecção repetida
		10	11	12	13	21	22	23	31	32	10	11	
Nós fontes de poluição/contaminação	10	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	
	11	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
	12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
	13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
	21	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
	22	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2
	23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	9	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	
	2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
Soma							7	3		7			6

Fontes detectadas pelo nó 22: (10, 11, 21, 22, 9, 2).

Fontes detectadas pelo nó 23: (13, 22, 23).

Fontes detectadas pelo nó 32: (11, 12, 21, 22, 31, 32, 2).

$F2 = n^{\circ}$ de fontes detectadas pela solução (22, 23, 32): $17 [= 7 + 3 + 7] - 6 \cdot (0,99) = \mathbf{11,06}$. Observa-se que o valor 11 significa o número total de nós fonte que são detectados e o número de nós da rede é 11, portanto todos os nós são monitorados dentro do especificado nível de serviço. O acréscimo 0,06 significa que há 6 repetições de nós já monitorados (nós 11, 12, 21, 22(2x) e 2), como observado nas linhas da matriz.

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós:		Nós poluídos/contaminados										Detecção repetida
		10	11	12	13	21	22	23	31	32	10	
Nós fontes de poluição/contaminação	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	11	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	
	12	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	
	13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
	21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	
	22	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	2
	23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	2	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
Soma							4	3		3		2

Fontes detectadas pelo nó 22: (12, 21, 22, 2).

Fontes detectadas pelo nó 23: (13, 22, 23).

Fontes detectadas pelo nó 32: (22, 31, 32).

$F3 = n^{\circ}$ de fontes detectadas pela solução (22, 23, 32): $10[=4+3+3]-2 \cdot (0,99) = 8,02$. Observa-se que o valor 8 significa o número total de nós fonte que são detectados e o número de nós da rede é 11, portanto nem todos os nós são monitorados dentro do especificado nível de serviço, deve-se então aumentar o nível de serviço para extensão da contaminação ou aumentar o número de equipamentos de monitoramento. O acréscimo 0,02 significa que há 2 repetições de nós já monitorados (nó 22(2x)), como observado nas linhas da matriz.

6. ESTUDO DE CASO: Rede Anytown

6.1. Simulação Hidráulica

Para o segundo estudo de caso realizado, utilizou-se a Rede Anytown (WALSKI et al. 1987), utilizada também em outros trabalhos, como o de KESSLER et al. (1998), cuja representação esquemática é apresentada na figura 6.1. O sistema de distribuição é formado por 34 tubos, 19 nós, sendo destes nós, 2 tanques (reservatórios de nível variado) e 1 poço, o nível do poço é constante em 10 ft. As características dos tubos, dos nós e da bomba são mostradas nas tabelas a seguir.

Figura 6.1 – Rede esquemática da Anytown

Tabela 6.1 – Características dos tubos da Rede Anytown

Número do tubo	Comprimento (ft)	Diâmetro (in.)	Coefficiente de rugosidade – C Hazen-Willians
2	12000	16	120
4	12000	12	120
6	12000	12	120
8	9000	12	120
10	6000	12	120
12	6000	10	120
14	6000	12	120
16	6000	10	120
18	6000	12	120
20	6000	10	120
22	6000	10	120
24	6000	10	120
26	6000	12	120
28	6000	10	120
30	6000	10	120
32	6000	10	120
34	9000	10	120
36	6000	10	120
38	6000	10	120
40	6000	10	120
42	6000	8	120
44	6000	8	120
46	6000	8	120
48	6000	8	120
50	6000	10	120
52	6000	8	120
56	6000	8	120
58	6000	10	120
60	6000	8	120
62	6000	8	120
64	12000	8	120
66	12000	8	120
78	100	12	120
80	100	12	120

Tabela 6.2 – Características dos nós da Rede Anytown

Número do nó	Cota (ft)	Demanda média (gal./min)
20	20	500
30	50	200
40	50	200
50	50	200
60	50	500
70	50	500
80	50	500
90	50	1000
100	50	500
110	50	500
120	120	200
130	120	200
140	80	200
150	120	200
160	120	800
170	120	200

Tabela 6.3 – Características dos Tanques da Rede Anytown

Número do Tanque (Reservatório)	Cota (ft)	Nível Inicial (ft)	Nível Mínimo (ft)	Nível Máximo (ft)	Diâmetro (ft)
65	215	35	10	35	53.8
165	215	35	10	35	53.8

Tabela 6.4 – Características da bomba da Rede Anytown

Vazão (gal./min)	Altura Manométrica (ft)
0	358
12000	270
24000	190
33000	0

Tabela 6.5 – Padrão diário de demanda para a Rede Anytown

Hora do dia	Multiplicador da demanda média
06 - 09	1.2
09 - 12	1.3
12 - 15	1.2
15 - 18	1.1
18 - 21	1.0
21 - 24	0.9
24 - 03	0.7
03 - 06	0.6

6.2. Inicialização do PLEDECORDA_EPA

O arquivo REDE.INP da Rede Anytown para o programa pode ser visto no Anexo IV e o arquivo de saída, PLEDECORDA_EPA.TXT, para a Rede Anytown, nos Anexos V e VII.

6.2.1. Parâmetros de Entrada – Níveis de Serviço

- (1) *Volume Consumido (VC)*: adotaram-se 02 valores para $VC = 468,10\text{m}^3$ ($16,530\text{ft}^3$) e $1.245,15\text{m}^3$ ($43,972\text{ft}^3$);
- (2) *Tempo de Detecção (TD)*: adotou-se $TD = 6$ horas;
- (3) Extensão da Contaminação (EC): adotou-se $EC = 15\%$.

6.3. Construção das Redes Auxiliares e dos Caminhos Mais Curtos

A aplicação do Algoritmo de Floyd permitiu que fossem identificadas as matrizes de Custo e Roteamento mostradas a seguir, que auxiliaram na construção das redes auxiliares.

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Custo de Tempo de viagem Final (h) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	8 8 8	1.47	1.60
30	8 8 8	0	0.94	1.52	0.83	8 8 8	2.05	2.22	84.14	8 8 8	8 8 8	8.64	4.14	7.23	6.40	7.91	8 8 8	0.87	6.43
40	8 8 8	8 8 8	0	1.75	8 8 8	8 8 8	3.13	17.71	85.22	8 8 8	8 8 8	9.71	5.22	8.31	7.48	8.99	8 8 8	8 8 8	7.50
50	8 8 8	8 8 8	8 8 8	0	8 8 8	8 8 8	1.38	15.95	83.46	8 8 8	8 8 8	7.96	3.46	6.55	5.72	7.23	8 8 8	8 8 8	5.75
60	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	0	8 8 8	1.22	1.38	83.30	8 8 8	8 8 8	7.80	3.30	6.39	5.56	7.07	8 8 8	0.04	5.59
70	8 8 8	7.28	8.22	8.79	0.73	0	1.94	0.67	0.63	8 8 8	8 8 8	4.25	4.03	2.62	2.01	7.80	8 8 8	0.76	2.04
80	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	0	14.57	82.09	8 8 8	8 8 8	6.58	2.09	5.17	4.35	5.86	8 8 8	8 8 8	4.37
90	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	20.75	0	85.16	8 8 8	8 8 8	9.66	8.37	5.67	7.42	12.14	8 8 8	8 8 8	7.45
100	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	23.39	2.65	0	8 8 8	8 8 8	3.62	4.69	1.99	1.39	7.41	8 8 8	8 8 8	1.41
110	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	24.76	4.02	1.37	0	0.88	3.02	6.06	3.37	0.79	6.81	8 8 8	8 8 8	0.82
120	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	122.0	101.3	103.3	8 8 8	0	2.71	37.78	49.49	25.54	6.49	8 8 8	8 8 8	25.57
130	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	119.33	98.59	100.58	8 8 8	8 8 8	0	35.07	46.79	22.84	3.78	8 8 8	8 8 8	22.86
140	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	98.76	78.01	8 0	8 8 8	8 8 8	4.50	0	26.21	2.26	3.77	8 8 8	8 8 8	2.29
150	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	72.55	51.80	79.49	8 8 8	8 8 8	3.99	2.69	0	1.75	6.46	8 8 8	8 8 8	1.78
160	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	96.50	75.75	77.74	8 8 8	8 8 8	2.24	12.24	23.95	0	6.02	8 8 8	8 8 8	0.03
170	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	152.9	132.2	134.1	8 8 8	8 8 8	33.57	68.64	80.36	56.41	0	8 8 8	8 8 8	56.43
10	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	0	1.47	1.60
65	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	0.04	8 8 8	1.26	1.42	83.35	8 8 8	8 8 8	7.84	3.34	6.43	5.61	7.11	8 8 8	0	5.63
165	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	8 8 8	96.52	75.77	77.76	8 8 8	8 8 8	2.26	12.26	23.97	0.02	6.04	8 8 8	8 8 8	0

Matriz Custo de Extensão de viagem Final (ft) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	228200	18100	18100
30	228200	0	6000	9000	6000	228200	12000	12000	18000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	6100	24100
40	228200	228200	0	6000	228200	228200	12000	18000	24000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	228200	24100
50	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	12000	18000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	228200	18100
60	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	6000	12000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	100	18100
70	228200	9000	15000	18000	6000	0	12000	6000	6000	228200	228200	18000	18000	12000	12000	24000	228200	6100	12100
80	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	12000	228200	228200	18000	6000	6000	12000	18000	228200	228200	12100
90	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	18000	12000	6000	12000	24000	228200	228200	12100
100	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	6000	0	228200	228200	12000	12000	6000	6000	18000	228200	228200	6100
110	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	12000	6000	0	6000	12000	12000	12000	6000	18000	228200	228200	6100
120	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	0	6000	18000	18000	12000	12000	228200	228200	12100
130	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	0	12000	12000	6000	6000	228200	228200	6100
140	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	12000	0	12000	6000	12000	228200	228200	6100
150	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	6000	12000	228200	228200	12000	6000	0	6000	18000	228200	228200	6100
160	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	12000	6000	228200	228200	6000	6000	6000	0	12000	228200	228200	100
170	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	228200	6000	18000	18000	12000	0	228200	228200	12100
10	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	0	18100	18100
65	228200	228200	228200	228200	100	228200	6100	6100	12100	228200	228200	24100	12100	12100	18100	24100	228200	0	18200
165	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12100	12100	6100	228200	228200	6100	6100	6100	100	12100	228200	228200	0

Matriz Roteamento Final:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	2	2	6	6	6	6	6	10	10	10	6	6	10	10	0	6	10
30	0	2	3	4	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	5	5
40	0	0	3	4	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	0	0	4
50	0	0	0	4	0	0	7	7	7	0	0	7	7	7	7	7	0	0	7
60	0	0	0	0	5	0	7	8	7	0	0	7	7	7	7	7	0	18	7
70	0	2	2	2	5	6	5	8	9	0	0	9	5	9	9	5	0	5	9
80	0	0	0	0	0	0	7	8	13	0	0	13	13	14	13	13	0	0	13
90	0	0	0	0	0	0	7	8	14	0	0	14	14	14	14	14	0	0	14
100	0	0	0	0	0	0	8	8	9	0	0	15	14	14	15	15	0	0	15
110	0	0	0	0	0	0	9	9	9	10	11	15	9	9	15	15	0	0	15
120	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	11	12	12	12	12	12	0	0	12
130	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	12	15	15	15	16	0	0	15
140	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	13	15	15	16	0	0	15
150	0	0	0	0	0	0	8	8	15	0	0	15	13	14	15	13	0	0	15
160	0	0	0	0	0	0	14	14	9	0	0	12	13	14	15	12	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	12	12	12	16	0	0	12
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	1	1
65	0	0	0	0	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	18	5
165	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	0	0	19

Figura 6.2 – Rede auxiliar para Tempo de viagem da Rede Anytown

Figura 6.3 – Rede auxiliar para Extensão de viagem da Rede Anytown

6.4. Determinação das Matrizes de Poluição

As Matrizes de Poluição construídas são apresentadas a seguir.

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 468.10m3):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
70	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 1245.15m3):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
70	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
70	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
40	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
50	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
70	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
100	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
130	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
140	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1

6.5. Inicialização do Programa PLEDECORDA_MOM

O programa denominado PLEDECORDA_MOM importou de um arquivo .INP, o número de nós da rede e as matrizes poluição e solicitou mais dois dados, o número de equipamentos, considerado de 1 a 4 unidades, e a consideração ou não de acréscimo por nó já monitorado. Como resultado, o programa exportou o arquivo PLEDECORDA_MOM.TXT, com a Frente de Pareto ou conjunto de soluções não-dominadas identificado, conforme os anexos VI e VIII (arquivo PLEDECORDA_MOM.TXT para a Rede Anytown).

6.6. Determinação dos Nós de Monitoramento

No caso da Rede Anytown., as tabelas 6.6 e 6.7 apresentam as soluções geradas pelo programa PLEDECORDA_MOM para $VC=468,10\text{m}^3$, e as tabelas 6.8 e 6.9 apresentam as soluções geradas pelo programa PLEDECORDA_MOM para $VC=1245,15\text{m}^3$.

**Tabela 6.6 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas: Nível
VC = 468,10 m³.**

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	6	13	19	160
2	7	9	19	90
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	13	15	19	160 e 90
2	10	17	19	130 e 80
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	18	19	140, 90 e 130
2	16	17	19	90, 160 e 170
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16	19	19	130, 170, 90 e 80
2	19	18	19	90, 160, 170 e 80

**Tabela 6.7 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas:
Nível VC = 468,10 m³.**

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	7	9	19	90
2	6	13	19	160
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	13	15.07	19.19	90, 160
2	8	17.06	19.19	130, 140
3	10	17.03	19.19	80, 130
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	18.14	19.38	130, 90, 140
2	16.03	16.15	19.38	160, 80, 90
3	16.01	17.09	19.38	160, 90, 170
4	15.02	17.16	19.38	160, 90, 130
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16.05	19.14	19.57	130, 80, 90, 170
2	17.04	18.27	19.57	130, 90, 140, 160
3	18.05	18.24	19.57	130, 80, 90, 160
4	16.03	19.17	19.57	130, 90, 140, 170
5	19,04	18.17	19.57	160, 80, 90, 170

**Tabela 6.8 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas:
Nível VC = 1245,15 m³.**

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	12	13	19	160
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	17	19	80, 130
2	16	15	19	90, 160
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19	17	19	90, 160, 170
2	18	18	19	80, 130, 90
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19	19	19	170, 130, 80, 90

**Tabela 6.9 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas:
Nível VC = 1245,15 m³.**

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	12	13	19	160
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16.04	15.07	19.19	160, 90
2	13.02	17.06	19.19	140, 130
3	15	17.03	19.19	130, 80
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	18.05	18.14	19.38	130, 140, 90
2	18.01	17.16	19.38	130, 160, 90
3	19.06	17.09	19.38	170, 160, 90
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19.13	18.2	19.57	160, 140, 170, 90
2	19.09	19.17	19.57	140, 130, 170, 90
3	19.14	18.19	19.57	160, 130, 170, 90
4	19.17	17.22	19.57	160, 165, 170, 90

Para visualização dos resultados na rede, são apresentadas as figuras a seguir, referentes à tabela 6.9.

Figura 6.4 – Solução 1 da Rede Anytown para 1 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.5 – Solução 1 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.6 – Solução 2 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.7 – Solução 3 da Rede Anytown para 2 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.8 – Solução 1 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.9 – Solução 2 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.10 – Solução 3 da Rede Anytown para 3 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.11 – Solução 1 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.12 – Solução 2 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.13 – Solução 3 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.

Figura 6.14 – Solução 4 da Rede Anytown para 4 equipamento considerando detecções repetidas.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Rede Net1

Os resultados das simulações para a rede *Net1*, não considerando as detecções repetidas pelas diversas unidades de monitoramento, apresentam-se resumidos na Tabela 7.1 e Figura 7.1. Já os resultados das simulações para a rede *Net1*, considerando as detecções repetidas pelas diversas unidades de monitoramento, apresentam-se resumidos na Tabela 7.2 e Figura 7.2. Tais resultados indicam, para ambas situações:

- (1) as mesmas soluções para 1, 2 e 3 unidades foram produzidas, embora os AGs Multiobjetivo tivessem sido rodados a partir de diversas soluções iniciais aleatórias, ou seja, independentemente da população inicial, sempre foram alcançados os mesmos resultados;
- (2) a mesma solução de 3 unidades de monitoramento obtida por KESSLER et al. (1998), que considera apenas um único objetivo (volume consumido de água contaminada - VC), foi produzida através do método proposto, já que o objetivo VC é considerado F1;
- (3) três unidades de monitoramento **são suficientes** para a detecção de intrusão intencional de contaminantes e/ou poluentes em todos os 11 nós da rede, antes que **os níveis de serviço 1 e 2** sejam ultrapassados, ou seja, o volume consumido de água contaminada pela população e o tempo máximo permitido para a detecção ultrapassam o volume de 283,17m³ e o tempo de 6 horas respectivamente, até a emissão do sinal de alarme;

(4) três unidades de monitoramento **não foram suficientes** para a detecção de intrusão intencional de contaminantes e/ou poluentes em todos os nós antes que o **nível de serviço 3** fosse superado, ou seja, a Extensão da Contaminação poderá superar o limite de 15% do comprimento total da rede previsto.

Tabela 7.1 – Resultados da Rede Net1 não considerando detecções repetidas.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	7*	7*	4*	22
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	9*	9	6*	23 e 22
2	6	10*	6	13 e 32
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	11*	11*	8*	23, 32 e 22 **
Obs.: * valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos **solução apontada por KESSLER et al. (1998)

Figura 7.1 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Net1 não considerando detecções repetidas.

Tabela 7.2 – Resultados da Rede Net1 considerando detecções repetidas.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	7	7	4	22
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	6.02	10.03	6	13 e 32
2	9.03	9.05	6.01	32 e 22
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	11.03	11.06	8.02	22, 23 e 32 **
Obs.: * valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos **solução apontada por KESSLER et al. (1998)

Figura 7.2 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Net1 considerando detecções repetidas.

7.2. Rede Anytown

Os resultados das simulações para a Rede Anytown, não considerando as detecções repetidas pelas diversas unidades de monitoramento, apresentam-se resumidos na Tabela 7.3 e Figura 7.3 para o nível de serviço 1 de $468,10\text{m}^3$, e na Tabela 7.5 e Figura 7.5 para o nível de serviço 1 de $1245,15\text{m}^3$. Já os resultados das simulações para a Rede Anytown considerando acréscimo por detecções repetidas pelas diversas unidades de monitoramento apresentam-se resumidos na Tabela 7.4 e Figura 7.4 para o nível de serviço 1 de $468,10\text{m}^3$, e na Tabela 7.6 e Figura 7.6 para o nível de serviço 1 de $1245,15\text{m}^3$. Tais resultados indicam:

- (1) as mesmas soluções de 1, 2, 3 e 4 unidades foram produzidas, embora os AGs Multiobjetivo tivessem sido rodados a partir de diversas soluções iniciais aleatórias, ou seja, independentemente da população inicial, sempre foram alcançados os mesmos resultados;
- (2) a mesma solução de 4 unidades de monitoramento obtida por KESSLER et al. (1998), que considera apenas um único objetivo (volume consumido de água contaminada - VC), foi produzida através do método proposto, já que o objetivo VC é considerado F1;
- (3) para o nível $\text{VC} = 1245,15\text{m}^3$, três unidades de monitoramento **são suficientes** para a detecção de intrusão intencional de contaminantes e/ou poluentes em todos os 19 nós da rede, antes que o **nível de serviço 1** seja ultrapassado. Para KESSLER et al (1998) o nível de serviço 1 só é atingido com 4 unidades de monitoramento;

- (4) Uma unidade de monitoramento já foi suficiente para a detecção de intrusão intencional de contaminantes e/ou poluentes em todos os nós antes que o nível de serviço 3 fosse superado.
- (5) A solução que contém o ponto 165 (Tanque) na Tabela 7.6 foi produzida devido à proximidade entre esse nó e o nó 160, tendo os dois em comum a detecção praticamente dos mesmos nós fontes de poluição. Sendo assim, estes pontos aumentam o número de detecções repetidas.

**Tabela 7.3 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas:
Nível VC = 468,10 m³.**

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	6	13*	19*	160
2	7*	9	19	90
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	13*	15	19*	160 e 90
2	10	17*	19	130 e 80
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	18*	19*	140, 90 e 130
2	16*	17	19	90, 160 e 170
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16	19*	19*	130, 170, 90 e 80
2	19*	18	19	90, 160, 170 e 80 **
Obs.: * valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos **solução apontada por KESSLER et al. (1998)

Figura 7.3 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown não considerando detecções repetidas ($VC=468,10m^3$).

Tabela 7.4 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas:
Nível $VC = 468,10 m^3$.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	7*	9	19*	90
2	6	13*	19	160
Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	13*	15.07	19.19*	90, 160
2	8	17.06*	19.19	130, 140
3	10	17.03	19.19	80, 130
Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	18.14*	19.38*	130, 90, 140
2	16.03*	16.15	19.38	160, 80, 90
3	16.01	17.09	19.38	160, 90, 170
4	15.02	17.16	19.38	160, 90, 130

Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16.05	19.14	19.57*	130, 80, 90, 170
2	17.04	18.27	19.57	130, 90, 140, 160
3	18.05	18.24	19.57	130, 80, 90, 160
4	16.03	19.17*	19.57	130, 90, 140, 170
5	19,04*	18.17	19.57	160, 80, 90, 170 **

Obs.: * valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos
**solução apontada por KESSLER et al. (1998)

Figura 7.4 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown considerando detecções repetidas ($VC=468,10m^3$).

Tabela 7.5 – Resultados da Rede Anytown não considerando detecções repetidas:
Nível $VC = 1245,15 m^3$.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nó de monitoramento
1	12*	13*	19*	160

Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	15	17*	19*	80, 130
2	16*	15	19	90, 160

Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19*	17	19*	90, 160, 170
2	18	18*	19	80, 130, 90

Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19*	19*	19*	170, 130, 80, 90

Obs.: * valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos

Figura 7.5 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown não considerando detecções repetidas (VC=1245,15m³).

Tabela 7.6 – Resultados da Rede Anytown considerando detecções repetidas:
Nível VC = 1245,15 m³.

Nº de equipamentos para monitoramento: 01un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	12*	13*	19*	160

Nº de equipamentos para monitoramento: 02un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	16.04*	15.07	19.19*	160, 90
2	13.02	17.06*	19.19	140, 130
3	15	17.03	19.19	130, 80

Nº de equipamentos para monitoramento: 03un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	18.05	18.14*	19.38*	130, 140, 90
2	18.01	17.16	19.38	130, 160, 90
3	19.06*	17.09	19.38	170,160,90
Nº de equipamentos para monitoramento: 04un.				
Solução	no espaço de objetivos			no espaço de decisão
Nº.	F1	F2	F3	Nós de monitoramento
1	19.13	18.2	19.57*	160, 140, 170, 90 **
2	19.09	19.17*	19.57	140, 130, 170, 90
3	19.14	18.19	19.57	160, 130, 170, 90
4	19.17*	17.22	19.57	160, 165, 170, 90
Obs.: *valores máximos de F1, F2 e F3 utilizados nos gráficos **solução apontada por KESSLER et al. (1998)

Figura 7.6 – Gráfico Valores máximos de F1, F2 e F3 x Número de Equipamentos para Rede Anytown considerando detecções repetidas ($VC=1245,15m^3$).

Observe que os resultados considerando detecções repetidas são superiores aos resultados sem a consideração, pois mostram mais informações (número de nós já monitorados) que podem ser decisivas ao escolher as estações de monitoramento.

8. CONCLUSÕES

Analisando o funcionamento de redes de distribuição de água para abastecimento, é possível verificar que estes sistemas são vulneráveis a intrusões intencionais de contaminantes, pela facilidade de acesso aos pontos da rede, que pode acarretar sérios danos à saúde pública. Daí a necessidade de se implantar uma rede de monitoramento da qualidade da água em tais sistemas.

Dentre as dificuldades envolvidas no monitoramento da qualidade da água em redes de distribuição, como o comportamento hidráulico, falta de dados e levantamento da rede, dentre outros, destaca-se o estabelecimento da rede de monitoramento e, nesse sentido, a literatura apresenta diversas propostas. O presente estudo propõe um método, cuja aplicação é aqui demonstrada ilustrativamente pela rede *Net1* e pela Rede Anytown, que são muito difundidas na literatura.

O desenvolvimento do estudo implicou na codificação e implementação de dois programas computacionais, PLEDECORDA_EPA e PLEDECORDA_MOM, os quais podem ser utilizados para localização dos equipamentos para detecção de contaminação em uma rede qualquer. Ambos os programas obtiveram tempos de processamento curtos para as redes estudadas.

O primeiro programa, PLEDECORDA_EPA, é capaz de gerar as matrizes Custo e Roteamento, utilizadas para montar as redes auxiliares que facilitam o entendimento do problema, e as matrizes poluição para os três níveis de serviço.

O segundo programa, PLEDECORDA_MOM, é capaz de gerar as Frentes de Pareto (soluções) do problema, que através da investigação das três funções objetivo aplicada às matrizes poluição, disponibiliza diversas opções para se estabelecer a rede de monitoramento dentro dos níveis de serviço sugeridos.

Os resultados mostram que é possível produzir resultados que considerem objetivos múltiplos e, ao mesmo tempo, privilegiem as soluções que possibilitam detecções de mesmas fontes por diversos equipamentos de monitoramento, ampliando a confiabilidade do sistema em casos de eventuais falhas dos equipamentos de monitoramento, ou ainda, é possível que a detecção distancie dos limites do níveis de serviço, ou seja, a detecção para o nível de serviço para Tempo de Detecção de limite de 6 horas, há maiores chances de ocorrer mais rapidamente, em 4 horas, por exemplo. Além disso, com a consideração de detecções repetidas, é possível verificar os objetivos que seus determinados níveis de serviço podem ser diminuídos e assim, aumentar a capacidade da rede de monitoramento.

Verifica-se também, que alguns resultados podem ou às vezes devem ser descartados por certos fatores como: a proximidade entre nós, que acarreta o aumento de detecções repetidas e assim, uma provável solução não-dominada, e pontos na rede de difícil acesso ou de difícil instalação de um equipamento de monitoramento, como por exemplo, uma avenida de grande movimento. Como sugestão, pode ser aplicado o método proposto a um sistema

com mapeamento dos consumidores, podendo assim, considerar probabilidades de cada nó.

Os níveis de serviço adotados podem ainda ser melhor investigados e variados, conforme a necessidade para cada rede e concessionária, bem como a adição de novos níveis de serviço. Ao invés da rede auxiliar representativa das 24 horas diárias, matrizes de poluição podem ser construídas para os padrões de demanda de cada intervalo horário. Outra sugestão é empregar técnicas de amostragem para criar possíveis combinações de padrões de injeção de contaminantes, etc.

Deve-se ainda ressaltar as limitações para este estudo: as partículas são consideradas conservativas e se propagam na velocidade da água no tubo, não é possível testar intrusão de contaminantes em uma rede real e equipamentos de monitoramento em tempo real para contaminantes são inexistentes, entretanto, com a necessidade, o desenvolvimento de protótipos já é uma realidade.

Para aperfeiçoamento do trabalho, o mapeamento da vulnerabilidade dos sistemas quanto a intrusão de contaminantes em relação a variáveis como acesso aos pontos da rede, tempo de vida dos materiais que compõe a rede e regiões com maiores vazamentos, dá suporte para associar probabilidades de intrusão aos pontos e conseqüentemente, além de considerar a intrusão intencional de forma mais eficiente, considerar a intrusão acidental de contaminantes.

REFERÊNCIAS

- AL-ZAHRANI, M. A., e MOIED, K. “Locating optimum water quality monitoring stations in water distribution system.” *Bridging the gap: Meeting the world’s water and environmental resources challenges, State of the Practice—Proc., World Water and Environmental Resources Congress*, CD-ROM, ASCE, Reston, Va., 2001.
- BERRY, J., FLEISCHER, L., HART, W., e PHILLIPS, C. “Sensor Placement in Municipal Water Networks.” *Proc. World Water and Environmental Resources Congress*, Philadelphia, PA., 2003.
- CALDERARO, R. V. V., e HELLER, L. “Surto de reações hemolíticas associado a residuais de cloro e cloraminas na água de hemodiálise” Em: *Rev. Saúde Pública*, v. 35, n. 5, São Paulo, 2001.
- CAVALCANTI, A. D. “Monitoramento da contaminação por elementos traço em ostras comercializadas em Recife, Pernambuco, Brasil” Em: *Cad. Saúde Pública*, v.19, n. 5, Rio de Janeiro, 2003.
- CHEUNG, P. B. “Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento via Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.” Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 268p, 2004.
- CHEUNG, P. B., REIS, L. F. R., FORMIGA, K. T., CHAUDHRY, F. H., TICONA, W. G. C. “Multiobjective Evolutionary Algorithms Applied to the Rehabilitation of a Water Distribution System: A Comparative Study.” In: *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. 1 ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, v.2532, p. 662-676, 2003.
- CHRISTOFIDES, N. *Graph theory: An algorithmic approach*. Academic Press, Inc., San Diego, Calif., 1975.

- COHON, J. L. Multiobjective Programming and Planning. San Diego, Academic, USA, 1978.
- DAVIDSON, J., BOUCHART, F., CAVILL, S. e JOWITT, P. “Real-Time Connectivity Modeling of Water Distribution Networks to Predict Contamination Spread” *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 19, n. 4, p. 377-386, 2005.
- DEB, K. Multi-Objective Using Evolutionary Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- DECRETO 5440 de 04 de maio de 2005 – Senado Federal, Subsecretaria de Informações.
- DI BERNARDO, L. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. ABES, v.1, Rio de Janeiro, 1983
- FLOYD, R. W. “Algorithm 97: Shortest path.” *Communications of ACM*, 5, 345, 1962.
- FLUCK, S., MCKANE, W., CAIRNS, T., FAIRCHILD, V., LAWRENCE A., e LEE J. Chloramine-induced haemolysis presenting as erythropoietin resistance. *Nephrol Dial Transplant* 1999;14:1687-91.
- GALAL-GORCHEV, H. “Desinfección del agua potable y subproductos de inter’s para la salud.” In: La calidad del agua potable en America Latina: Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riegos de los subproductos de la desinfección química, Craun, G.F. e Castro, R., eds., p. 89-100. ILSI Press: Washigton, EUA, 1996.
- GESSLER, J., e WALSKI, T. M. “WADISO – Water distribution system optimization.” *TREL-11*, WES, Corps. of Engineers, Vicksburg, Miss., 1985.
- GOLDBERG, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1989.

- HARMANT, P., NACE, A., KIENE, L., e FOTOOHI, F. “Optimal supervision of drinking water distribution network.” *Proc., 26th Annual Water Resources Planning and Management Conf. '99—Preparing for the 21st Century*, Cap. 8F180, CD-ROM, ASCE, Reston, Va., 1999.
- JASZKIEWICZ, A. Multiobjective Methods Metaheuristic Library for C++. <http://www.widss.cs.put.poznan.pl/~jaszkiewicz/MOMHLIB/>.
- KESSLER, A., e OSTFELD, A. “Detecting accidental contaminations in municipal water networks: Application.” *Water Resources and the Urban Environment, Proc., 25th Annual Conf. on Water Resources Planning and Management*, ASCE, New York, p. 272–278, 1998.
- KESSLER, A., OSTFELD, A., e SINAI, G. “Detecting accidental contaminations in municipal water networks.” *Journal of Water Res. Planning and Management*, v. 124, p. 192–198, 1998.
- KUMAR, A., KANSAL, M.L., e ARORA, G. Discussion of “Detecting accidental contaminations in municipal water networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.124, n. 4, p. 308–310, 1999.
- KUMAR, A., KANSAL, M. L., e ARORA, G. “Identification of monitoring stations in water distribution system.” *Journal of Environmental Engineering*, v. 123, n. 8, p. 746–752, 1997.
- LEE, B. H., e DEININGER, R. A. “Optimal locations of monitoring stations in water distribution system.” *Journal of Environmental Engineering*, v. 118, n. 1, p. 4–16, 1992.
- OSTFELD, A., e KESSLER, A. Closure of Discussion of “Detecting accidental contaminations in municipal water networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.124, n. 4, p. 308–310, 1999.

- OSTFELD, A., e KESSLER, A. “Protecting urban water distribution systems against accidental hazards intrusions”. *Proc., IWA 2nd Conf.*, CD-ROM, IWA, 2001.
- OSTFELD, A., e SALOMONS, E. “Optimal Layout of Early Warning Detection Stations for Water Distribution Systems Security” *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, n. 5, p. 377-385, 2004.
- PORTARIA nº. 518 de 25 de março de 2004 – Ministério da Saúde. Regulamenta a Norma de qualidade.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2 users manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.
- TRYBY, M. E., e UBER, J. G. “Representative water quality sampling in water distribution systems.” *Bridging the gap: Meeting the world’s water and environmental resources challenges, State of the Practice—Proc., World Water and Environmental Resources Congress*, CD-ROM, ASCE, Reston, Va., 2001.
- VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos*. – 2ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.
- WALSKI, T. M., BRILL, E. D., GESSLER, J., GOULTER, I. C., JEPPSON, R. M., LANSEY, K., HAN-LIN LEE, LIEBMAN, J. C., Mays, L., MORGAN, D. R., e ORMSBEE, L. “Battle of the network models: Epilogue.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 113, n. 2, p. 191-203, 1987.
- WATSON, J. P., GREENBERG, H. J., HART, W. E. “A Multiple-Objective Analysis of Sensor Placement Optimization in Water Networks.” *Proc. World Water and Environmental Resources Congress*, Salt Lake City, Utah, USA, 2004.

- WOO, H.-M., YOON, J.-H., e CHOI, D.-Y. “Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems.” *Bridging the gap: Meeting the world’s water and environmental resources challenges, State of the Practice—Proc., World Water and Environmental Resources Congress*, CD-ROM, ASCE, Reston, Va., 2001.
- ZITZLER, E., THIELE, L. “Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.
- ZITZLER, E., THIELE, L. “An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach.” Technical Report, 43, Zürich. Switzerland: Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology, 1998.

Anexo I – REDE.INP (Rede Net1): Dados de Entrada

[TITLE]

EPANET Example Network 1

A simple example of modeling chlorine decay. Both bulk and wall reactions are included.

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
10	710	0	;
11	710	150	;
12	700	150	;
13	695	100	;
21	700	150	;
22	695	200	;
23	690	150	;
31	700	100	;
32	710	100	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
9	800	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
2	850	120	100	150	50.5	0	;

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
10	10	11	10530	18	100	0	Open ;
11	11	12	5280	14	100	0	Open ;
12	12	13	5280	10	100	0	Open ;
21	21	22	5280	10	100	0	Open ;
22	22	23	5280	12	100	0	Open ;
31	31	32	5280	6	100	0	Open ;
110	2	12	200	18	100	0	Open ;
111	11	21	5280	10	100	0	Open ;
112	12	22	5280	12	100	0	Open ;
113	13	23	5280	8	100	0	Open ;
121	21	31	5280	8	100	0	Open ;
122	22	32	5280	6	100	0	Open ;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
9	9	10	HEAD 1;

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers					
;Demand Pattern						
1	1.0	1.2	1.4	1.6	1.4	1.2
1	1.0	0.8	0.6	0.4	0.6	0.8

[CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
;PUMP: Pump Curve for Pump 9		
1	1500	250

[CONTROLS]

LINK 9 OPEN IF NODE 2 BELOW 110
LINK 9 CLOSED IF NODE 2 ABOVE 140

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	75
Global Price	0.0
Demand Charge	0.0

[EMITTERS]

;Junction	Coefficient
-----------	-------------

[QUALITY]

;Node	InitQual
10	0.5
11	0.5
12	0.5
13	0.5
21	0.5
22	0.5
23	0.5
31	0.5
32	0.5
9	1.0
2	1.0

[SOURCES]

;Node	Type	Quality	Pattern
-------	------	---------	---------

[REACTIONS]

;Type	Pipe/Tank	Coefficient
-------	-----------	-------------

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Tank	1
Order Wall	1
Global Bulk	-.5
Global Wall	-1
Limiting Potential	0.0
Roughness Correlation	0.0

[MIXING]

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

```

;Tank          Model

[TIMES]
Duration          240:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep  0:05
Pattern Timestep   2:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00
Start ClockTime    0:00
Statistic          None

[REPORT]
Status            Yes
Summary           No
Page              0

[OPTIONS]
Units             GPM
Headloss          H-W
Specific Gravity   1.0
Viscosity         1.0
Trials            40
Accuracy          0.001
Unbalanced        Continue 10
Pattern           1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent  0.5
Quality           Chlorine mg/L
Diffusivity       1.0
Tolerance         0.01

[COORDINATES]
;Node          X-Coord    Y-Coord
10             20.00      70.00
11             30.00      70.00
12             50.00      70.00
13             70.00      70.00
21             30.00      40.00
22             50.00      40.00
23             70.00      40.00
31             30.00      10.00
32             50.00      10.00
9              10.00      70.00
2              50.00      90.00

[VERTICES]
;Link          X-Coord    Y-Coord

[LABELS]
;X-Coord      Y-Coord    Label & Anchor Node
6.12          67.96      "Source"
13.03         68.08      "Pump"
43.85         91.21      "Tank"

[BACKDROP]

```

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

DIMENSIONS		7.00	6.00	73.00	94.00
UNITS	None				
FILE					
OFFSET	0.00	0.00			

[END]

Anexo II – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Net1):

Saídas das Matrizes de Poluição

PLEDECORDA - Programa de Localização de Equipamentos para DEtecção de COntaminação em Rede de Distribuição de Água

Programador: Luiz Fernando de Souza Dias.

Orientadora: Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

Data Inicial do Programa: 15/03/2005

Data e hora do início da execução: 02/16/06 17:12:44

Número de tubos da rede: 12

Número de nós da rede: 11

Número de reservatórios e tanques da rede: 2

Duração do período da Simulação (h): 240

Comprimento total da rede (ft): 63530

Valor do Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 283.17m³.

Valor do Nível de Serviço 2 - Tempo de Detecção: 6h.

Valor do Nível de Serviço 3 - Extensão da Contaminação: 15% do comp. da rede.

TUBO (1): 10 Nó inicial (1): 10 Nó final (2) : 11 Compr.(ft): 10530.00 Diam.(in): 18.00

* Soma+: 1191149.25

* Soma-: -0.35

* Contador: 241

TUBO (2): 11 Nó inicial (2): 11 Nó final (3) : 12 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 14.00

* Soma+: 1245481.50

* Soma-: -187693.89

* Contador: 241

TUBO (3): 12 Nó inicial (3): 12 Nó final (4) : 13 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 556701.19

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (4): 21 Nó inicial (5): 21 Nó final (6) : 22 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 319494.00

* Soma-: -72170.35

* Contador: 241

TUBO (5): 22 Nó inicial (6): 22 Nó final (7) : 23 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 228748.44

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (6): 31 Nó inicial (8): 31 Nó final (9) : 32 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 6.00

* Soma+: 336050.84
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (7): 110 Nó inicial (11): 2 Nó final (3) : 12 Compr.(ft): 200.00 Diam.(in): 18.00

* Soma+: 348520.41
* Soma-: -336325.91
* Contador: 241

TUBO (8): 111 Nó inicial (2): 11 Nó final (5) : 21 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1254400.38
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (9): 112 Nó inicial (3): 12 Nó final (6) : 22 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 711948.38
* Soma-: -549.29
* Contador: 241

TUBO (10): 113 Nó inicial (4): 13 Nó final (7) : 23 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 316405.84
* Soma-: -372.54
* Contador: 241

TUBO (11): 121 Nó inicial (5): 21 Nó final (8) : 31 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 742840.12
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (12): 122 Nó inicial (6): 22 Nó final (9) : 32 Compr.(ft): 5280.00 Diam.(in): 6.00

* Soma+: 648503.44
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO ADOTADO:

TUBO 10: 2.13
TUBO 11: 1.02
TUBO 12: 2.29
TUBO 21: 3.98
TUBO 22: 5.56
TUBO 31: 3.79
TUBO 110: 0.14
TUBO 111: 1.01
TUBO 112: 1.79
TUBO 113: 4.02
TUBO 121: 1.71
TUBO 122: 1.96

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO INVERSO:

TUBO 10: 0.00
TUBO 11: 6.78

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

TUBO 12: 0.00
TUBO 21: 17.63
TUBO 22: 0.00
TUBO 31: 0.00
TUBO 110: 0.14
TUBO 111: 0.00
TUBO 112: 0.00
TUBO 113: 0.00
TUBO 121: 0.00
TUBO 122: 0.00

Matriz Custo de Tempo de viagem Inicial (h):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	2.13	888	888	888	888	888	888	888	888	888
11	888	0	1.02	888	1.01	888	888	888	888	888	888
12	888	6.78	0	2.29	888	1.79	888	888	888	888	0.14
13	888	888	888	0	888	888	4.02	888	888	888	888
21	888	888	888	888	0	3.98	888	1.71	888	888	888
22	888	888	888	888	17.63	0	5.56	888	1.96	888	888
23	888	888	888	888	888	888	0	888	888	888	888
31	888	888	888	888	888	888	888	0	3.79	888	888
32	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888
9	0	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888
2	888	888	0.14	888	888	888	888	888	888	888	0

Matriz Roteamento Inicial 1:

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2	3	0	5	0	0	0	0	0	0
12	0	2	3	4	0	6	0	0	0	0	11
13	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	5	6	0	8	0	0	0
22	0	0	0	0	5	6	7	0	9	0	0
23	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	11

Matriz Custo de Tempo de viagem Final (h) (Caminhos Mais Curtos):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	2.13	3.15	5.44	3.14	4.94	9.46	4.86	6.90	888	3.30
11	888	0	1.02	3.31	1.01	2.81	7.33	2.73	4.77	888	1.16
12	888	6.78	0	2.29	7.79	1.79	6.31	9.51	3.75	888	0.14
13	888	888	888	0	888	888	4.02	888	888	888	888
21	888	888	888	888	0	3.98	9.55	1.71	5.50	888	888
22	888	888	888	888	17.63	0	5.56	19.34	1.96	888	888
23	888	888	888	888	888	888	0	888	888	888	888
31	888	888	888	888	888	888	888	0	3.79	888	888
32	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888
9	0	2.13	3.15	5.44	3.14	4.94	9.46	4.86	6.90	0	3.30
2	888	6.92	0.14	2.42	7.93	1.93	6.45	9.65	3.89	888	0

Matriz Roteamento Final 1:

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
11	0	2	3	3	5	3	3	5	3	0	3
12	0	2	3	4	2	6	4	2	6	0	11
13	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	5	6	6	8	8	0	0
22	0	0	0	0	5	6	7	5	9	0	0
23	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	11

Matriz Custo de Extensão de viagem Inicial (ft):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	10530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530
11	63530	0	5280	63530	5280	63530	63530	63530	63530	63530	63530
12	63530	5280	0	5280	63530	5280	63530	63530	63530	63530	200
13	63530	63530	63530	0	63530	63530	5280	63530	63530	63530	63530
21	63530	63530	63530	63530	0	5280	63530	5280	63530	63530	63530
22	63530	63530	63530	63530	5280	0	5280	63530	5280	63530	63530
23	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530	63530	63530
31	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	5280	63530	63530
32	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530
9	0	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530
2	63530	63530	200	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0

Matriz Roteamento Inicial 2:

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	2	3	0	5	0	0	0	0	0	0
12	0	2	3	4	0	6	0	0	0	0	11
13	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	5	6	0	8	0	0	0
22	0	0	0	0	5	6	7	0	9	0	0
23	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	11

Matriz Custo de Extensão de viagem Final (ft) (Caminhos Mais Curtos):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	10530	15810	21090	15810	21090	26370	21090	26370	63530	16010
11	63530	0	5280	10560	5280	10560	15840	10560	15840	63530	5480
12	63530	5280	0	5280	10560	5280	10560	15840	10560	63530	200
13	63530	63530	63530	0	63530	63530	5280	63530	63530	63530	63530
21	63530	63530	63530	63530	0	5280	10560	5280	10560	63530	63530
22	63530	63530	63530	63530	5280	0	5280	10560	5280	63530	63530
23	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530	63530	63530
31	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	5280	63530	63530
32	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	63530	0	63530	63530
9	0	10530	15810	21090	15810	21090	26370	21090	26370	0	16010
2	63530	5480	200	5480	10760	5480	10760	16040	10760	63530	0

Matriz Roteamento Final 2:

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2
11	0	2	3	3	5	3	3	5	3	0	3
12	0	2	3	4	2	6	4	2	6	0	11
13	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0
21	0	0	0	0	5	6	6	8	6	0	0
22	0	0	0	0	5	6	7	5	9	0	0
23	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1
2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	0	11

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 283.17m3):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
11	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
11	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
12	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
22	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
2	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós:	10	11	12	13	21	22	23	31	32	9	2
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
12	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1
13	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
22	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1

Programa finalizado com sucesso!
Tempo decorrido: 6.29 s.

Anexo III – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Net1):

Saídas dos Nós escolhidos

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	7	7	4	22 (5)

Número de Equipamentos: **2** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	6.02	10.03	6	13 (3) 32 (8)
2:	9.03	9.05	6.01	32 (8) 22 (5)

Número de Equipamentos: **3** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	11.03	11.06	8.02	22 (5) 23 (6) 32 (8)

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	7	7	4	22 (5)

Número de Equipamentos: **2** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	9	9	6	23 (6) 22 (5)
2:	6	10	6	13 (3) 32 (8)

Número de Equipamentos: **3** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	11	11	8	23 (6) 32 (8) 22 (5)

Anexo IV – REDE.INP (Rede Anytown): Dados de Entrada

[TITLE]

Rede ANYTOWN

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern	
20	20	500	1	;
30	50	200	1	;
40	50	200	1	;
50	50	200	1	;
60	50	500	1	;
70	50	500	1	;
80	50	500	1	;
90	50	1000	1	;
100	50	500	1	;
110	50	500	1	;
120	120	200	1	;
130	120	200	1	;
140	80	200	1	;
150	120	200	1	;
160	120	800	1	;
170	120	200	1	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
10	10	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve
65	215	35	10	35	53.8	0	;
165	215	35	10	35	53.8	0	;

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
2	20	70	12000	16	120	0	Open ;
4	20	30	12000	12	120	0	Open ;
6	20	110	12000	12	120	0	Open ;
8	30	70	9000	12	120	0	Open ;
10	70	100	6000	12	120	0	Open ;
12	70	90	6000	10	120	0	Open ;
14	70	60	6000	12	120	0	Open ;
16	60	90	6000	10	120	0	Open ;
18	60	80	6000	12	120	0	Open ;
20	80	90	6000	10	120	0	Open ;
22	150	90	6000	10	120	0	Open ;
24	100	90	6000	10	120	0	Open ;
26	150	100	6000	12	120	0	Open ;
28	80	150	6000	10	120	0	Open ;
30	30	60	6000	10	120	0	Open ;
32	30	40	6000	10	120	0	Open ;
34	30	50	9000	10	120	0	Open ;
36	40	50	6000	10	120	0	Open ;
38	50	80	6000	10	120	0	Open ;
40	140	80	6000	10	120	0	Open ;

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

42	140	150	6000	8	120	0	Open	;
44	150	160	6000	8	120	0	Open	;
46	160	100	6000	8	120	0	Open	;
48	110	100	6000	8	120	0	Open	;
50	110	160	6000	10	120	0	Open	;
52	120	110	6000	8	120	0	Open	;
56	130	120	6000	8	120	0	Open	;
58	130	160	6000	10	120	0	Open	;
60	170	130	6000	8	120	0	Open	;
62	140	160	6000	8	120	0	Open	;
64	140	170	12000	8	120	0	Open	;
66	50	140	12000	8	120	0	Open	;
78	65	60	100	12	120	0	Open	;
80	160	165	100	12	120	0	Open	;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
1	10	20	HEAD 1;

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

NODE 10	Well (Poço)
---------	-------------

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers					
;Daily water use pattern						
1	.7	.7	.7	.6	.6	.6
1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
1	1	1	1	.9	.9	.9

[CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
;PUMP: Característica da Bomba 1		
1	0	358
1	12000	270
1	24000	190
1	33000	0

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	75
Global Price	0
Demand Charge	0

```

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual

[SOURCES]
;Node              Type          Quality          Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank      Coefficient

[REACTIONS]
Order Bulk         1
Order Tank         1
Order Wall         1
Global Bulk        0
Global Wall        0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank              Model

[TIMES]
Duration           240:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep   0:05
Pattern Timestep   1:00
Pattern Start      0:00
Report Timestep    1:00
Report Start       0:00
Start ClockTime    0:00
Statistic          None

[REPORT]
Status             No
Summary            No
Page               0

[OPTIONS]
Units              GPM
Headloss           H-W
Specific Gravity 1
Viscosity          1
Trials             40
Accuracy           0.001
Unbalanced         Continue 10
Pattern            1
Demand Multiplier  1.0
Emitter Exponent   0.5
Quality            NONE mg/L
Diffusivity        1.0
Tolerance          0.01

```


[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
20	7700.00	3350.00
30	7700.00	6000.00
40	7700.00	7700.00
50	5200.00	7700.00
60	6500.00	6000.00
70	6500.00	4500.00
80	4700.00	6200.00
90	5500.00	5300.00
100	5000.00	4500.00
110	4800.00	3350.00
120	3000.00	3100.00
130	2000.00	4000.00
140	3000.00	6000.00
150	4000.00	5200.00
160	3000.00	4500.00
170	1300.00	5000.00
10	8720.83	3368.11
65	6000.00	6600.00
165	2500.00	4700.00

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
-------	---------	---------

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
----------	---------	---------------------

[BACKDROP]

DIMENSIONS	935.87	2613.65	9070.35	8738.70
UNITS	Meters			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]

Anexo V – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Anytown):

Saídas das Matrizes de Poluição:

Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 468,10m³

PLEDECORDA - Programa de Localização de Equipamentos para DETecção de CONTaminação em Rede de Distribuição de Água

Programador: Luiz Fernando de Souza Dias.

Orientadora: Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

Data Inicial do Programa: 15/03/2005

Data e hora do início da execução: 02/16/06 13:59:51

Número de tubos da rede: 34

Número de nós da rede: 19

Número de reservatórios e tanques da rede: 3

Duração do período da Simulação (h): 240

Comprimento total da rede (ft): 228200

TUBO (1): 2 Nó inicial (1): 20 Nó final (6) : 70 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 16.00

* Soma+: 4121963.25

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (2): 4 Nó inicial (1): 20 Nó final (2) : 30 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 3453652.50

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (3): 6 Nó inicial (1): 20 Nó final (10) : 110 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 3700607.75

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (4): 8 Nó inicial (2): 30 Nó final (6) : 70 Compr.(ft): 9000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -298116.16

* Contador: 241

TUBO (5): 10 Nó inicial (6): 70 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 2309610.25

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (6): 12 Nó inicial (6): 70 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 2158205.75

* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (7): 14 Nó inicial (6): 70 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 1992290.62
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (8): 16 Nó inicial (5): 60 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1047277.31
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (9): 18 Nó inicial (5): 60 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 1189309.25
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (10): 20 Nó inicial (7): 80 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 99212.45
* Soma-: -69697.99
* Contador: 241

TUBO (11): 22 Nó inicial (14): 150 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 27913.84
* Soma-: -254836.89
* Contador: 241

TUBO (12): 24 Nó inicial (9): 100 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 546463.06
* Soma-: -14553.72
* Contador: 241

TUBO (13): 26 Nó inicial (14): 150 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -725017.00
* Contador: 241

TUBO (14): 28 Nó inicial (7): 80 Nó final (14) : 150 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 279434.81
* Soma-: -8471.83
* Contador: 241

TUBO (15): 30 Nó inicial (2): 30 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1731744.62
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (16): 32 Nó inicial (2): 30 Nó final (3) : 40 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1532301.75

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (17): 34 Nó inicial (2): 30 Nó final (4) : 50 Compr.(ft): 9000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1430503.12

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (18): 36 Nó inicial (3): 40 Nó final (4) : 50 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 824305.81

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (19): 38 Nó inicial (4): 50 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1050752.50

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (20): 40 Nó inicial (13): 140 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -692889.38

* Contador: 241

TUBO (21): 42 Nó inicial (13): 140 Nó final (14) : 150 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -536864.81

* Contador: 241

TUBO (22): 44 Nó inicial (14): 150 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 826505.00

* Soma-: -60379.48

* Contador: 241

TUBO (23): 46 Nó inicial (15): 160 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 18600.40

* Soma-: -1042251.75

* Contador: 241

TUBO (24): 48 Nó inicial (10): 110 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 1055033.00

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (25): 50 Nó inicial (10): 110 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1833835.12

* Soma+: 0.00
* Contador: 241

TUBO (26): 52 Nó inicial (11): 120 Nó final (10) : 110 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -1640359.12
* Contador: 241

TUBO (27): 56 Nó inicial (12): 130 Nó final (11) : 120 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -534114.38
* Contador: 241

TUBO (28): 58 Nó inicial (12): 130 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 63318.39
* Soma-: -646605.50
* Contador: 241

TUBO (29): 60 Nó inicial (16): 170 Nó final (12) : 130 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 43074.71
* Soma-: -382330.75
* Contador: 241

TUBO (30): 62 Nó inicial (13): 140 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 639524.62
* Soma-: -118161.22
* Contador: 241

TUBO (31): 64 Nó inicial (13): 140 Nó final (16) : 170 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 766988.38
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (32): 66 Nó inicial (4): 50 Nó final (13) : 140 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 775092.19
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (33): 78 Nó inicial (18): 65 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 100.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 525809.12
* Soma-: -574953.56
* Contador: 217

TUBO (34): 80 Nó inicial (15): 160 Nó final (19) : 165 Compr.(ft): 100.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 697376.44
* Soma-: -768424.44
* Contador: 185

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO ADOTADO:

TUBO 2:	0.70
TUBO 4:	0.84
TUBO 6:	0.78
TUBO 8:	0.00
TUBO 10:	0.63
TUBO 12:	0.67
TUBO 14:	0.73
TUBO 16:	1.38
TUBO 18:	1.22
TUBO 20:	14.57
TUBO 22:	51.80
TUBO 24:	2.65
TUBO 26:	0.00
TUBO 28:	5.17
TUBO 30:	0.83
TUBO 32:	0.94
TUBO 34:	1.52
TUBO 36:	1.75
TUBO 38:	1.38
TUBO 40:	0.00
TUBO 42:	0.00
TUBO 44:	1.75
TUBO 46:	77.74
TUBO 48:	1.37
TUBO 50:	0.79
TUBO 52:	0.00
TUBO 56:	0.00
TUBO 58:	22.84
TUBO 60:	33.57
TUBO 62:	2.26
TUBO 64:	3.77
TUBO 66:	3.73
TUBO 78:	0.04
TUBO 80:	0.03

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO INVERSO:

TUBO 2:	0.00
TUBO 4:	0.00
TUBO 6:	0.00
TUBO 8:	7.28
TUBO 10:	0.00
TUBO 12:	0.00
TUBO 14:	0.00
TUBO 16:	0.00
TUBO 18:	0.00
TUBO 20:	20.75
TUBO 22:	5.67
TUBO 24:	99.36
TUBO 26:	1.99
TUBO 28:	170.68
TUBO 30:	0.00
TUBO 32:	0.00
TUBO 34:	0.00
TUBO 36:	0.00
TUBO 38:	0.00
TUBO 40:	2.09

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

TUBO 42: 2.69
TUBO 44: 23.95
TUBO 46: 1.39
TUBO 48: 0.00
TUBO 50: 0.00
TUBO 52: 0.88
TUBO 56: 2.71
TUBO 58: 2.24
TUBO 60: 3.78
TUBO 62: 12.24
TUBO 64: 0.00
TUBO 66: 0.00
TUBO 78: 0.04
TUBO 80: 0.02

Matriz Custo de Tempo de viagem Inicial (h):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	0.84	888	888	888	0.70	888	888	888	0.78	888	888	888	888	888	888	888	888	888
30	888	0	0.94	1.52	0.83	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
40	888	888	0	1.75	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
50	888	888	888	0	888	888	1.38	888	888	888	888	888	3.73	888	888	888	888	888	888
60	888	888	888	888	0	888	1.22	1.38	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0.04	888
70	888	7.28	888	888	0.73	0	888	0.67	0.63	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
80	888	888	888	888	888	888	0	14.57	888	888	888	888	2.09	5.17	888	888	888	888	888
90	888	888	888	888	888	888	20.75	0	99.36	888	888	888	888	5.67	888	888	888	888	888
100	888	888	888	888	888	888	888	2.65	0	888	888	888	888	1.99	1.39	888	888	888	888
110	888	888	888	888	888	888	888	888	1.37	0	0.88	888	888	888	0.79	888	888	888	888
120	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	2.71	888	888	888	888	888	888	888
130	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888	22.84	3.78	888	888	888
140	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	2.26	3.77	888	888	888
150	888	888	888	888	888	888	170.7	51.80	888	888	888	888	2.69	0	1.75	888	888	888	888
160	888	888	888	888	888	888	888	888	77.74	888	888	2.24	12.24	23.95	0	888	888	888	0.03
170	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	33.57	888	888	888	0	888	888	888
10	0	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888
65	888	888	888	888	0.04	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888
165	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0.02	888	888	888	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Inicial 1:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	0	0	0	6	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	2	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	5	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
70	0	2	0	0	5	6	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0	0	0	14	15	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	11	0	0	0	15	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	15	16	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	15	16	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	15	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	12	13	14	15	0	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	16	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0
65	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	19

Matriz Custo de Tempo de viagem Final (h) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	8.88	1.47	1.60
30	8.88	0	0.94	1.52	0.83	8.88	2.05	2.22	84.14	8.88	8.88	8.64	4.14	7.23	6.40	7.91	8.88	0.87	6.43
40	8.88	8.88	0	1.75	8.88	8.88	3.13	17.71	85.22	8.88	8.88	9.71	5.22	8.31	7.48	8.99	8.88	8.88	7.50
50	8.88	8.88	8.88	0	8.88	8.88	1.38	15.95	83.46	8.88	8.88	7.96	3.46	6.55	5.72	7.23	8.88	8.88	5.75
60	8.88	8.88	8.88	8.88	0	8.88	1.22	1.38	83.30	8.88	8.88	7.80	3.30	6.39	5.56	7.07	8.88	0.04	5.59
70	8.88	7.28	8.22	8.79	0.73	0	1.94	0.67	0.63	8.88	8.88	4.25	4.03	2.62	2.01	7.80	8.88	0.76	2.04
80	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	0	14.57	82.09	8.88	8.88	6.58	2.09	5.17	4.35	5.86	8.88	8.88	4.37
90	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	20.75	0	85.16	8.88	8.88	9.66	8.37	5.67	7.42	12.14	8.88	8.88	7.45
100	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	23.39	2.65	0	8.88	8.88	3.62	4.69	1.99	1.39	7.41	8.88	8.88	1.41
110	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	24.76	4.02	1.37	0	0.88	3.02	6.06	3.37	0.79	6.81	8.88	8.88	0.82
120	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	122.0	101.3	103.3	8.88	0	2.71	37.78	49.49	25.54	6.49	8.88	8.88	25.57
130	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	119.33	98.59	100.58	8.88	8.88	0	35.07	46.79	22.84	3.78	8.88	8.88	22.86
140	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	98.76	78.01	8	0	8.88	8.88	4.50	0	26.21	2.26	3.77	8.88	2.29
150	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	72.55	51.80	79.49	8.88	8.88	3.99	2.69	0	1.75	6.46	8.88	8.88	1.78
160	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	96.50	75.75	77.74	8.88	8.88	2.24	12.24	23.95	0	6.02	8.88	8.88	0.03
170	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	152.9	132.2	134.1	8.88	8.88	33.57	68.64	80.36	56.41	0	8.88	8.88	56.43
10	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	0	1.47	1.60
65	8.88	8.88	8.88	8.88	0.04	8.88	1.26	1.42	83.35	8.88	8.88	7.84	3.34	6.43	5.61	7.11	8.88	0	5.63
165	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	96.52	75.77	77.76	8.88	8.88	2.26	12.26	23.97	0.02	6.04	8.88	8.88	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Final:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	2	2	6	6	6	6	6	10	10	10	6	6	10	10	0	6	10
30	0	2	3	4	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	5	5
40	0	0	3	4	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	0	0	4
50	0	0	0	4	0	0	7	7	7	0	0	7	7	7	7	7	0	0	7
60	0	0	0	0	5	0	7	8	7	0	0	7	7	7	7	7	0	18	7
70	0	2	2	2	5	6	5	8	9	0	0	9	5	9	9	5	0	5	9
80	0	0	0	0	0	0	7	8	13	0	0	13	13	14	13	13	0	0	13
90	0	0	0	0	0	0	7	8	14	0	0	14	14	14	14	14	0	0	14
100	0	0	0	0	0	0	8	8	9	0	0	15	14	14	15	15	0	0	15
110	0	0	0	0	0	0	9	9	9	10	11	15	9	9	15	15	0	0	15
120	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	11	12	12	12	12	12	0	0	12
130	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	12	15	15	15	16	0	0	15
140	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	13	15	15	16	0	0	15
150	0	0	0	0	0	0	8	8	15	0	0	15	13	14	15	13	0	0	15
160	0	0	0	0	0	0	14	14	9	0	0	12	13	14	15	12	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	12	12	12	16	0	0	12
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	1	1
65	0	0	0	0	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	18	5
165	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	0	0	19

Matriz Custo de Extensão de viagem Inicial (ft):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	12000	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
30	228200	0	6000	9000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
40	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
50	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	228200	228200	228200
60	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	1000	228200
70	228200	9000	228200	228200	6000	0	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
80	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200
90	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200	228200
100	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200
110	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200
120	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
130	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200
140	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	12000	228200	228200	228200
150	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	228200
160	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	6000	6000	6000	0	228200	228200	228200	1000
170	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	0	228200	228200	228200
10	0	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	228200
65	228200	228200	228200	228200	1000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200
165	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	1000	228200	228200	228200	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Inicial 2:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	0	0	0	6	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	2	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	5	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
70	0	2	0	0	5	6	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0	0	0	14	15	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	11	0	0	0	15	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	15	16	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	15	16	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	15	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	12	13	14	15	0	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	16	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0
65	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	19

Matriz Custo de Extensão de viagem Final (ft) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	228200	18100	18100
30	228200	0	6000	9000	6000	228200	12000	12000	18000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	6100	24100
40	228200	228200	0	6000	228200	228200	12000	18000	24000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	228200	24100
50	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	12000	18000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	228200	18100
60	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	6000	12000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	100	18100
70	228200	9000	15000	18000	6000	0	12000	6000	6000	228200	228200	18000	18000	12000	12000	24000	228200	6100	12100
80	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	12000	228200	228200	18000	6000	6000	12000	18000	228200	228200	12100
90	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	18000	12000	6000	12000	24000	228200	228200	12100
100	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	6000	0	228200	228200	12000	12000	6000	6000	18000	228200	228200	6100
110	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	12000	6000	0	6000	12000	12000	12000	6000	18000	228200	228200	6100
120	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	0	6000	18000	18000	12000	12000	228200	228200	12100
130	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	0	12000	12000	6000	6000	228200	228200	6100
140	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	12000	0	12000	6000	12000	228200	228200	6100
150	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	6000	12000	228200	228200	12000	6000	0	6000	18000	228200	228200	6100
160	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	12000	6000	228200	228200	6000	6000	6000	0	12000	228200	228200	100
170	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	228200	6000	18000	18000	12000	0	228200	228200	12100
10	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	0	18100	18100
65	228200	228200	228200	228200	100	228200	6100	6100	12100	228200	228200	24100	12100	12100	18100	24100	228200	0	18200
165	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12100	12100	6100	228200	228200	6100	6100	6100	100	12100	228200	228200	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Final 2:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	2	2	2	6	2	6	6	10	10	10	10	6	10	10	0	2	10
30	0	2	3	4	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	5	5
40	0	0	3	4	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	0	0	4
50	0	0	0	4	0	0	7	7	7	0	0	13	13	7	13	13	0	0	13
60	0	0	0	0	5	0	7	8	8	0	0	8	7	7	8	7	0	18	8
70	0	2	2	2	5	6	5	8	9	0	0	9	5	8	9	9	0	5	9
80	0	0	0	0	0	0	7	8	8	0	0	13	13	14	13	13	0	0	13
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	9	7	14	9	7	0	0	9
100	0	0	0	0	0	0	8	8	9	0	0	15	14	14	15	15	0	0	15
110	0	0	0	0	0	0	9	9	9	10	11	11	15	9	15	11	0	0	15
120	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	11	12	12	12	12	12	0	0	12
130	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	12	15	15	15	16	0	0	15
140	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	13	15	15	16	0	0	15
150	0	0	0	0	0	0	7	8	8	0	0	15	13	14	15	13	0	0	15
160	0	0	0	0	0	0	14	9	9	0	0	12	13	14	15	12	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	12	12	12	16	0	0	12
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	1	1
65	0	0	0	0	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	18	5
165	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	0	0	19

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 468.10m3):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
70	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
70	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
40	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
50	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
70	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
100	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
130	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
140	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1

Programa finalizado com sucesso!
Tempo decorrido: 10.65 s.

Anexo VI – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Net1):

Saídas dos Nós escolhidos:

Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 468,10m³

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1 un.**

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	7	9	19	90 (7)
2:	6	13	19	160 (14)

Número de Equipamentos: **2 un.**

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):	
1:	13	15.07	19.19	90 (7)	160 (14)
2:	8	17.06	19.19	130 (11)	140 (12)
3:	10	17.03	19.19	80 (6)	130 (11)

Número de Equipamentos: **3 un.**

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):		
1:	15	18.14	19.38	130 (11)	90 (7)	140 (12)
2:	16.03	16.15	19.38	160 (14)	80 (6)	90 (7)
3:	16.01	17.09	19.38	160 (14)	90 (7)	170 (15)
4:	15.02	17.16	19.38	160 (14)	90 (7)	130 (11)

Número de Equipamentos: **4 un.**

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):			
1:	16.05	19.14	19.57	130 (11)	80 (6)	90 (7)	170(15)

2:	17.04	18.27	19.57	130 (11)	90 (7)	140 (12)	160(14)
3:	18.05	18.24	19.57	130 (11)	80 (6)	90 (7)	160(14)
4:	16.03	19.17	19.57	130 (11)	90 (7)	140 (12)	170(15)
5:	19.04	18.17	19.57	160 (14)	80 (6)	90 (7)	170(15)

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	6	13	19	160 (14)
2:	7	9	19	90 (7)

Número de Equipamentos: **2** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	13	15	19	160 (14) 90 (7)
2:	10	17	19	130 (11) 80 (6)

Número de Equipamentos: **3** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	15	18	19	140 (12) 90 (7) 130 (11)
2:	16	17	19	90 (7) 170 (15) 160 (14)

Número de Equipamentos: **4** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	16	19	19	130 (11) 170 (15) 90 (7) 80 (6)
2:	19	18	19	90 (7) 160(14) 170 (15) 80 (6)

Anexo VII – PLEDECORDA_EPA.TXT (Rede Anytown):

Saídas das Matrizes de Poluição:

Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 1245,15m³

PLEDECORDA - Programa de Localização de Equipamentos para DETecção de
CONTaminação em Rede de Distribuição de Água

Programador: Luiz Fernando de Souza Dias.

Orientadora: Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

Data Inicial do Programa: 15/03/2005

Data e hora do início da execução: 02/16/06 14:11:36

Número de tubos da rede: 34

Número de nós da rede: 19

Número de reservatórios e tanques da rede: 3

Duração do período da Simulação (h): 240

Comprimento total da rede (ft): 228200

TUBO (1): 2 Nó inicial (1): 20 Nó final (6) : 70 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 16.00

* Soma+: 4121963.25

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (2): 4 Nó inicial (1): 20 Nó final (2) : 30 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 3453652.50

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (3): 6 Nó inicial (1): 20 Nó final (10) : 110 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 3700607.75

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (4): 8 Nó inicial (2): 30 Nó final (6) : 70 Compr.(ft): 9000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -298116.16

* Contador: 241

TUBO (5): 10 Nó inicial (6): 70 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 2309610.25

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (6): 12 Nó inicial (6): 70 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 2158205.75

* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (7): 14 Nó inicial (6): 70 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 1992290.62
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (8): 16 Nó inicial (5): 60 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1047277.31
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (9): 18 Nó inicial (5): 60 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 1189309.25
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (10): 20 Nó inicial (7): 80 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 99212.45
* Soma-: -69697.99
* Contador: 241

TUBO (11): 22 Nó inicial (14): 150 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 27913.84
* Soma-: -254836.89
* Contador: 241

TUBO (12): 24 Nó inicial (9): 100 Nó final (8) : 90 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 546463.06
* Soma-: -14553.72
* Contador: 241

TUBO (13): 26 Nó inicial (14): 150 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -725017.00
* Contador: 241

TUBO (14): 28 Nó inicial (7): 80 Nó final (14) : 150 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 279434.81
* Soma-: -8471.83
* Contador: 241

TUBO (15): 30 Nó inicial (2): 30 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1731744.62
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (16): 32 Nó inicial (2): 30 Nó final (3) : 40 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1532301.75

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (17): 34 Nó inicial (2): 30 Nó final (4) : 50 Compr.(ft): 9000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1430503.12

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (18): 36 Nó inicial (3): 40 Nó final (4) : 50 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 824305.81

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (19): 38 Nó inicial (4): 50 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1050752.50

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (20): 40 Nó inicial (13): 140 Nó final (7) : 80 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -692889.38

* Contador: 241

TUBO (21): 42 Nó inicial (13): 140 Nó final (14) : 150 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00

* Soma-: -536864.81

* Contador: 241

TUBO (22): 44 Nó inicial (14): 150 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 826505.00

* Soma-: -60379.48

* Contador: 241

TUBO (23): 46 Nó inicial (15): 160 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 18600.40

* Soma-: -1042251.75

* Contador: 241

TUBO (24): 48 Nó inicial (10): 110 Nó final (9) : 100 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 1055033.00

* Soma-: 0.00

* Contador: 241

TUBO (25): 50 Nó inicial (10): 110 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 1833835.12

* Soma+: 0.00
* Contador: 241

TUBO (26): 52 Nó inicial (11): 120 Nó final (10) : 110 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -1640359.12
* Contador: 241

TUBO (27): 56 Nó inicial (12): 130 Nó final (11) : 120 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 0.00
* Soma-: -534114.38
* Contador: 241

TUBO (28): 58 Nó inicial (12): 130 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 10.00

* Soma+: 63318.39
* Soma-: -646605.50
* Contador: 241

TUBO (29): 60 Nó inicial (16): 170 Nó final (12) : 130 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 43074.71
* Soma-: -382330.75
* Contador: 241

TUBO (30): 62 Nó inicial (13): 140 Nó final (15) : 160 Compr.(ft): 6000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 639524.62
* Soma-: -118161.22
* Contador: 241

TUBO (31): 64 Nó inicial (13): 140 Nó final (16) : 170 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 766988.38
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (32): 66 Nó inicial (4): 50 Nó final (13) : 140 Compr.(ft): 12000.00 Diam.(in): 8.00

* Soma+: 775092.19
* Soma-: 0.00
* Contador: 241

TUBO (33): 78 Nó inicial (18): 65 Nó final (5) : 60 Compr.(ft): 100.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 525809.12
* Soma-: -574953.56
* Contador: 217

TUBO (34): 80 Nó inicial (15): 160 Nó final (19) : 165 Compr.(ft): 100.00 Diam.(in): 12.00

* Soma+: 697376.44
* Soma-: -768424.44
* Contador: 185

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO ADOTADO:

TUBO 2:	0.70
TUBO 4:	0.84
TUBO 6:	0.78
TUBO 8:	0.00
TUBO 10:	0.63
TUBO 12:	0.67
TUBO 14:	0.73
TUBO 16:	1.38
TUBO 18:	1.22
TUBO 20:	14.57
TUBO 22:	51.80
TUBO 24:	2.65
TUBO 26:	0.00
TUBO 28:	5.17
TUBO 30:	0.83
TUBO 32:	0.94
TUBO 34:	1.52
TUBO 36:	1.75
TUBO 38:	1.38
TUBO 40:	0.00
TUBO 42:	0.00
TUBO 44:	1.75
TUBO 46:	77.74
TUBO 48:	1.37
TUBO 50:	0.79
TUBO 52:	0.00
TUBO 56:	0.00
TUBO 58:	22.84
TUBO 60:	33.57
TUBO 62:	2.26
TUBO 64:	3.77
TUBO 66:	3.73
TUBO 78:	0.04
TUBO 80:	0.03

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM - SENTIDO INVERSO:

TUBO 2:	0.00
TUBO 4:	0.00
TUBO 6:	0.00
TUBO 8:	7.28
TUBO 10:	0.00
TUBO 12:	0.00
TUBO 14:	0.00
TUBO 16:	0.00
TUBO 18:	0.00
TUBO 20:	20.75
TUBO 22:	5.67
TUBO 24:	99.36
TUBO 26:	1.99
TUBO 28:	170.68
TUBO 30:	0.00
TUBO 32:	0.00
TUBO 34:	0.00
TUBO 36:	0.00
TUBO 38:	0.00
TUBO 40:	2.09

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

TUBO 42: 2.69
TUBO 44: 23.95
TUBO 46: 1.39
TUBO 48: 0.00
TUBO 50: 0.00
TUBO 52: 0.88
TUBO 56: 2.71
TUBO 58: 2.24
TUBO 60: 3.78
TUBO 62: 12.24
TUBO 64: 0.00
TUBO 66: 0.00
TUBO 78: 0.04
TUBO 80: 0.02

Matriz Custo de Tempo de viagem Inicial (h):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	0.84	888	888	888	0.70	888	888	888	0.78	888	888	888	888	888	888	888	888	888
30	888	0	0.94	1.52	0.83	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
40	888	888	0	1.75	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
50	888	888	888	0	888	888	1.38	888	888	888	888	888	3.73	888	888	888	888	888	888
60	888	888	888	888	0	888	1.22	1.38	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0.04	888
70	888	7.28	888	888	0.73	0	888	0.67	0.63	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888
80	888	888	888	888	888	888	0	14.57	888	888	888	888	2.09	5.17	888	888	888	888	888
90	888	888	888	888	888	888	20.75	0	99.36	888	888	888	888	5.67	888	888	888	888	888
100	888	888	888	888	888	888	888	2.65	0	888	888	888	888	1.99	1.39	888	888	888	888
110	888	888	888	888	888	888	888	888	1.37	0	0.88	888	888	888	0.79	888	888	888	888
120	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	2.71	888	888	888	888	888	888	888
130	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888	22.84	3.78	888	888	888
140	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	2.26	3.77	888	888	888
150	888	888	888	888	888	888	170.68	51.80	888	888	888	888	2.69	0	1.75	888	888	888	888
160	888	888	888	888	888	888	888	888	77.74	888	888	2.24	12.24	23.95	0	888	888	888	0.03
170	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	33.57	888	888	888	0	888	888	888
10	0	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888	888
65	888	888	888	888	0.04	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0	888
165	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	0.02	888	888	888	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Inicial 1:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	0	0	0	6	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	2	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	5	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
70	0	2	0	0	5	6	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0	0	0	14	15	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	11	0	0	0	15	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	15	16	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	15	16	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	15	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	12	13	14	15	0	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	16	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0
65	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	19

Matriz Custo de Tempo de viagem Final (h) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	8.88	1.47	1.60
30	8.88	0	0.94	1.52	0.83	8.88	2.05	2.22	84.14	8.88	8.88	8.64	4.14	7.23	6.40	7.91	8.88	0.87	6.43
40	8.88	8.88	0	1.75	8.88	8.88	3.13	17.71	85.22	8.88	8.88	9.71	5.22	8.31	7.48	8.99	8.88	8.88	7.50
50	8.88	8.88	8.88	0	8.88	8.88	1.38	15.95	83.46	8.88	8.88	7.96	3.46	6.55	5.72	7.23	8.88	8.88	5.75
60	8.88	8.88	8.88	8.88	0	8.88	1.22	1.38	83.30	8.88	8.88	7.80	3.30	6.39	5.56	7.07	8.88	0.04	5.59
70	8.88	7.28	8.22	8.79	0.73	0	1.94	0.67	0.63	8.88	8.88	4.25	4.03	2.62	2.01	7.80	8.88	0.76	2.04
80	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	0	14.57	82.09	8.88	8.88	6.58	2.09	5.17	4.35	5.86	8.88	8.88	4.37
90	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	20.75	0	85.16	8.88	8.88	9.66	8.37	5.67	7.42	12.14	8.88	8.88	7.45
100	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	23.39	2.65	0	8.88	8.88	3.62	4.69	1.99	1.39	7.41	8.88	8.88	1.41
110	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	24.76	4.02	1.37	0	0.88	3.02	6.06	3.37	0.79	6.81	8.88	8.88	0.82
120	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	122.04	101.30	103.28	8.88	0	2.71	37.78	49.49	25.54	6.49	8.88	8.88	25.57
130	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	119.33	98.59	100.58	8.88	8.88	0	35.07	46.79	22.84	3.78	8.88	8.88	22.86
140	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	98.76	78.01	8.0	8.88	8.88	4.50	0	26.21	2.26	3.77	8.88	8.88	2.29
150	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	72.55	51.80	79.49	8.88	8.88	3.99	2.69	0	1.75	6.46	8.88	8.88	1.78
160	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	96.50	75.75	77.74	8.88	8.88	2.24	12.24	23.95	0	6.02	8.88	8.88	0.03
170	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	152.90	132.16	134.15	8.88	8.88	33.57	68.64	80.36	56.41	0	8.88	8.88	56.43
10	0	0.84	1.78	2.35	1.43	0.70	2.64	1.37	1.33	0.78	1.66	3.81	4.73	3.32	1.57	7.59	0	1.47	1.60
65	8.88	8.88	8.88	8.88	0.04	8.88	1.26	1.42	83.35	8.88	8.88	7.84	3.34	6.43	5.61	7.11	8.88	0	5.63
165	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	96.52	75.77	77.76	8.88	8.88	2.26	12.26	23.97	0.02	6.04	8.88	8.88	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Final:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	2	2	6	6	6	6	6	10	10	10	6	6	10	10	0	6	10
30	0	2	3	4	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	5	5
40	0	0	3	4	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	0	0	4
50	0	0	0	4	0	0	7	7	7	0	0	7	7	7	7	7	0	0	7
60	0	0	0	0	5	0	7	8	7	0	0	7	7	7	7	7	0	18	7
70	0	2	2	2	5	6	5	8	9	0	0	9	5	9	9	5	0	5	9
80	0	0	0	0	0	0	7	8	13	0	0	13	13	14	13	13	0	0	13
90	0	0	0	0	0	0	7	8	14	0	0	14	14	14	14	14	0	0	14
100	0	0	0	0	0	0	8	8	9	0	0	15	14	14	15	15	0	0	15
110	0	0	0	0	0	0	9	9	9	10	11	15	9	9	15	15	0	0	15
120	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	11	12	12	12	12	12	0	0	12
130	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	12	15	15	15	16	0	0	15
140	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	13	15	15	16	0	0	15
150	0	0	0	0	0	0	8	8	15	0	0	15	13	14	15	13	0	0	15
160	0	0	0	0	0	0	14	14	9	0	0	12	13	14	15	12	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	12	12	12	16	0	0	12
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	1	1
65	0	0	0	0	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	18	5
165	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	0	0	19

Matriz Custo de Extensão de viagem Inicial (ft):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	12000	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
30	228200	0	6000	9000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
40	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
50	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200	228200	12000	228200	228200	228200	228200	228200	228200
60	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	1000	228200
70	228200	9000	228200	228200	6000	0	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
80	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	228200
90	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200	228200
100	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200
110	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	228200
120	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200
130	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200
140	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	12000	228200	228200	228200
150	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	6000	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	228200	228200
160	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	6000	6000	6000	0	228200	228200	228200	1000
170	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	228200	228200	228200	0	228200	228200	228200
10	0	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200	228200
65	228200	228200	228200	228200	1000	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	228200
165	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	228200	1000	228200	228200	228200	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Inicial 2:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	0	0	0	6	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	2	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	4	0	0	7	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	5	0	7	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
70	0	2	0	0	5	6	0	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	8	9	0	0	0	0	14	15	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	11	0	0	0	15	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	15	16	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	15	16	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	7	8	0	0	0	0	13	14	15	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	12	13	14	15	0	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	16	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0
65	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	19

Matriz Custo de Extensão de viagem Final (ft) (Caminhos Mais Curtos):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	228200	18100	18100
30	228200	0	6000	9000	6000	228200	12000	12000	18000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	6100	24100
40	228200	228200	0	6000	228200	228200	12000	18000	24000	228200	228200	30000	18000	18000	24000	30000	228200	228200	24100
50	228200	228200	228200	0	228200	228200	6000	12000	18000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	228200	18100
60	228200	228200	228200	228200	0	228200	6000	6000	12000	228200	228200	24000	12000	12000	18000	24000	228200	1000	18100
70	228200	9000	15000	18000	6000	0	12000	6000	6000	228200	228200	18000	18000	12000	12000	24000	228200	6100	12100
80	228200	228200	228200	228200	228200	228200	0	6000	12000	228200	228200	18000	6000	6000	12000	18000	228200	228200	12100
90	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	0	6000	228200	228200	18000	12000	6000	12000	24000	228200	228200	12100
100	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	6000	0	228200	228200	12000	12000	6000	6000	18000	228200	228200	6100
110	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	12000	6000	0	6000	12000	12000	12000	6000	18000	228200	228200	6100
120	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	0	6000	18000	18000	12000	12000	228200	228200	12100
130	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	0	12000	12000	6000	6000	228200	228200	6100
140	228200	228200	228200	228200	228200	228200	18000	18000	12000	228200	228200	12000	0	12000	6000	12000	228200	228200	6100
150	228200	228200	228200	228200	228200	228200	6000	6000	12000	228200	228200	12000	6000	0	6000	18000	228200	228200	6100
160	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12000	12000	6000	228200	228200	6000	6000	6000	0	12000	228200	228200	1000
170	228200	228200	228200	228200	228200	228200	24000	24000	18000	228200	228200	6000	18000	18000	12000	0	228200	228200	12100
10	0	12000	18000	21000	18000	12000	24000	18000	18000	12000	18000	24000	24000	24000	18000	30000	0	18100	18100
65	228200	228200	228200	228200	1000	228200	6100	6100	12100	228200	228200	24100	12100	12100	18100	24100	228200	0	18200
165	228200	228200	228200	228200	228200	228200	12100	12100	6100	228200	228200	6100	6100	6100	1000	12100	228200	228200	0

*Estudo da Localização Otimizada de Equipamentos em Rede
de Distribuição de Água para Detecção de Contaminação*

Matriz Roteamento Final 2:

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	2	2	2	2	6	2	6	6	10	10	10	10	6	10	10	0	2	10
30	0	2	3	4	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	5	5
40	0	0	3	4	0	0	4	4	4	0	0	4	4	4	4	4	0	0	4
50	0	0	0	4	0	0	7	7	7	0	0	13	13	7	13	13	0	0	13
60	0	0	0	0	5	0	7	8	8	0	0	8	7	7	8	7	0	18	8
70	0	2	2	2	5	6	5	8	9	0	0	9	5	8	9	9	0	5	9
80	0	0	0	0	0	0	7	8	8	0	0	13	13	14	13	13	0	0	13
90	0	0	0	0	0	0	7	8	9	0	0	9	7	14	9	7	0	0	9
100	0	0	0	0	0	0	8	8	9	0	0	15	14	14	15	15	0	0	15
110	0	0	0	0	0	0	9	9	9	10	11	11	15	9	15	11	0	0	15
120	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	11	12	12	12	12	12	0	0	12
130	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	12	15	15	15	16	0	0	15
140	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	13	15	15	16	0	0	15
150	0	0	0	0	0	0	7	8	8	0	0	15	13	14	15	13	0	0	15
160	0	0	0	0	0	0	14	9	9	0	0	12	13	14	15	12	0	0	19
170	0	0	0	0	0	0	12	12	12	0	0	12	12	12	12	16	0	0	12
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	1	1
65	0	0	0	0	5	0	5	5	5	0	0	5	5	5	5	5	0	18	5
165	0	0	0	0	0	0	15	15	15	0	0	15	15	15	15	15	0	0	19

Matriz Poluição para Volume Consumido (nível de serviço: 1245.15m3):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
70	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Matriz Poluição para Tempo de Detecção (nível de serviço: 6.00h.)

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
70	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1

Matriz Poluição para Extensão da Contaminação (nível de serviço: 15.00%):

Nós	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	10	65	165
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
30	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
40	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
50	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
60	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
70	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
80	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
90	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
100	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
110	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
120	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
130	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
140	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
150	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
160	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
170	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
165	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1

Programa finalizado com sucesso!
Tempo decorrido: 13.12 s.

Anexo VIII – PLEDECORDA_MOM.TXT (Rede Anytown):

Saídas dos Nós escolhidos:

Nível de Serviço 1 - Volume Consumido: 1245,15m³

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento(X[i]):
1:	12	13	19	160 (14)

Número de Equipamentos: **2** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):	
1:	16.04	15.07	19.19	160 (14)	90 (7)
2:	13.02	17.06	19.19	140 (12)	130 (11)
3:	15	17.03	19.19	130 (11)	80 (6)

Número de Equipamentos: **3** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):		
1:	18.05	18.14	19.38	130 (11)	140 (12)	90 (7)
2:	18.1	17.16	19.38	130 (11)	160 (14)	90 (7)
3:	19.06	17.09	19.38	170 (15)	160 (14)	90 (7)

Número de Equipamentos: **4** un.

Considerado acréscimo de 0.01 por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):			
1:	19.13	18.2	19.57	160 (14)	140 (12)	170 (15)	90 (7)
2:	19.09	19.17	19.57	140 (12)	130 (11)	170 (15)	90 (7)

3:	19.14	18.19	19.57	160 (14)	130 (11)	170 (15)	90 (7)
4:	19.17	17.22	19.57	160 (14)	165 (18)	170 (15)	90 (7)

FRENTES PARETO GLOBAL

Número de Equipamentos: **1** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	12	13	19	160 (14)

Número de Equipamentos: **2** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	15	17	19	80 (6) 130 (11)
2:	16	15	19	90 (7) 160 (14)

Número de Equipamentos: **3** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	19	17	19	90 (7) 160 (14) 170 (15)
2:	18	18	19	80 (6) 130 (11) 90 (7)

Número de Equipamentos: **4** un.

Não considerado acréscimo por detecções repetidas.

	f1:	f2:	f3:	Nós de monitoramento (X[i]):
1:	19	19	19	170 (15) 130 (11) 80 (6) 90 (7)