



ROBERTO SUSE

**LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE ESTAÇÕES DE
MONITORAMENTO DE QUALIDADE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

**Campinas
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

ROBERTO SUSE

**LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE ESTAÇÕES DE
MONITORAMENTO DE QUALIDADE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Orientador: Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Saneamento e Ambiente.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA POR ROBERTO SUSE
E ORIENTADO PELO PROF. DR. EDEVAR LUVIZOTTO JUNIOR.**

ASSINATURA DO ORIENTADOR

Campinas
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Suse, Roberto, 1980-
Sa55L Localização ótima de estações de monitoramento de qualidade em redes de distribuição de água / Roberto Suse. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Edevar Luvizotto Junior.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Água - Qualidade. 2. Algoritmos genéticos. 3. Água - Amostragem. 4. Água - Distribuição - Simulação por computador. 5. Água - Abastecimento. I. Luvizotto Junior, Edevar, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Optimal location of quality monitoring stations in water distribution networks

Palavras-chave em inglês:

Water quality

Genetic algorithms

Water - Sampling

Water - Distribution - Computer simulation

Water - Supply

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Edevar Luvizotto Junior [Orientador]

José Anderson do Nascimento Batista

José Geraldo Pena de Andrade

Data de defesa: 31-03-2014

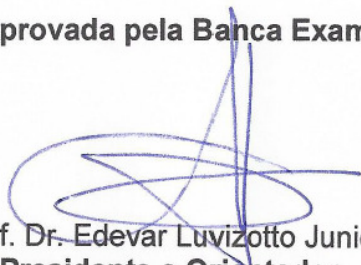
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**LOCALIZAÇÃO ÓTIMA DE ESTAÇÕES DE
MONITORAMENTO DE QUALIDADE EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

ROBERTO SUSE

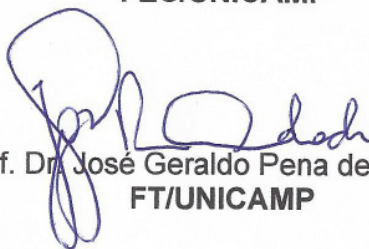
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior
Presidente e Orientador
FEC/UNICAMP**



**Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista
FEC/UNICAMP**



**Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
FT/UNICAMP**

Campinas, 31 de Março de 2014

RESUMO

A qualidade da água potável transportada em uma rede de distribuição deve ser monitorada para identificar condições que possam comprometer a saúde da população atendida. Este monitoramento deve servir como um mecanismo para detectar a ocorrência de problemas de contaminação da água em seus primeiros estágios. As estações devem ser localizadas de forma a garantir a representatividade espacial e temporal da rede monitorada, ou seja, a análise dos pontos monitorados deve permitir avaliar a qualidade da água de toda a rede de distribuição ao longo do tempo. Diversos pesquisadores mencionam a necessidade em utilizar a modelagem matemática associada aos programas computacionais que simulam o comportamento da água nas redes para identificar a quantidade e os melhores locais para as estações de monitoramento. Entretanto, a aplicação destas ferramentas, para descrever o comportamento hidráulico e qualitativo da água nas redes de distribuição, pode ser considerada útil se e somente se as vazões, o sentido do escoamento e a demanda de água na rede de distribuição forem avaliados. Por estas razões, o objetivo deste trabalho de mestrado foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional com o intuito de contribuir nas investigações relacionadas ao importante tema da qualidade da água transportada pelas redes de distribuição. A ferramenta computacional foi baseada no conceito de cobertura de demanda, contém rotinas de otimização decorrente do algoritmo genético e foi acoplada ao simulador hidráulico EPANET. Para a avaliação da ferramenta computacional, foram estudadas duas redes hipotéticas de distribuição de água. A primeira é composta por três reservatórios de nível fixo, quinze pontos de consumo e vinte e três tubulações. Foi verificada a relação entre a variação da demanda de água e critério de fração de água sobre o conjunto ótimo de estações de monitoramento sugerido pela ferramenta computacional. A segunda é composta por um reservatório de nível fixo, dezenove pontos de consumo e trinta e quatro tubulações. Foi avaliada a quantidade mínima de estações de monitoramento necessárias para fazer a cobertura de toda a rede de distribuição de água. Os resultados obtidos corroboram a viabilidade da proposição do conceito de cobertura de demanda. Evidencia-se que a localização adequada das estações de monitoramento deve ser obtida após análise da rede de distribuição de água ao longo de um dia típico de funcionamento.

Palavras-chaves: Qualidade de água, Algoritmos genéticos, Amostragem de água, Simulação por computador, Abastecimento de água.

ABSTRACT

The quality of drinking water transported in a water distribution system must be monitored to identify conditions that may compromise the health of the population supplied. This monitoring should be a mechanism to detect the occurrence of trouble of water contamination in early stages. The stations must be located in order to ensure spatial and temporal representation of water in the network, i.e., the analysis of the samples must allow assessment of water quality throughout the distribution network over time. Several researchers talk about the need of using mathematical models associated with computer programs (that simulate the behavior of water in the networks) to identify the quantity and the best places for monitoring stations. However, the application of these tools to describe both the hydraulic and water quality behavior in water distribution networks can be useful if the flow rates, the flow direction and water demand have been quantified. For these reasons, the aim of this master degree work was the development of a computational tool in order to contribute to the investigation about the important theme of water quality transported into the water distribution networks (WDN). The computational tool was based on the concept of coverage demand, it includes optimization routines that are deriving of genetic algorithms and it was linked up to the hydraulic simulator EPANET. For the evaluation of the computational tool, two hypothetical water distribution networks (HWDN) had studied. The first one consists for three tanks with fixed level consumption, fifteen junctions and twenty three pipes. It was checked the relationship out between the variation of water demand and water fraction criteria under the optimal set of monitoring stations suggested by the computational tool. The second one consists for one tank with fixed level consumption, nineteen junctions and thirty four pipes. It was evaluated the minimum amount of monitoring stations required to cover the entire HWDN. The results support the feasibility of the proposition of coverage demand concept. Evidently, the adequate location of monitoring stations must be getting after analysis of the WDN over a typical day of operation.

Key Words: Water quality, Genetic algorithms, Water Sampling, Computer simulation, Water supply.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. FATORES INTERVENIENTES	6
3.2 CONCEITO COBERTURA DE DEMANDA	11
3.3 ALGORITMO GENÉTICO.....	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 ROTINA PRINCIPAL.M	29
5. RESULTADOS	40
5.1 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS	40
5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CRITÉRIO DE FRAÇÃO DE ÁGUA.....	62
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
7. CONCLUSÕES.....	79
8. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
9. REFERÊNCIAS*	82
10. ANEXOS.....	84
ANEXO A – ROTINAS DESENVOLVIDAS	84
1. Rotina Principal.m (Faz a chamadas as demais rotinas)	84
2. Rotina M_FRAC_AGUA.m – Cálculo da matriz de fração de água	87
3. Rotina MAT_COBERTURA.m – Calcula matriz de cobertura de demanda.....	88
4. Rotina POP_INICIAL.m – Gera população inicial para algoritmo genético.....	88
5. F_BJETIVO.m – Avalia a aptidão de cada indivíduo de uma população	88
6. Rotina AG.m – rotina de otimização empregando algoritmo genético	89
ANEXO B - ARQUIVOS DE DADOS DAS REDES UTILIZADAS	91
1. Arquivo INP da rede Exemplo 1 – Exemplo1.inp.....	91
2. Arquivo DAT da rede Exemplo 1 – Exemplo1.dat.....	92

DEDICATÓRIA

Ao meu ao meu falecido pai, Yuzuru Suse, à minha mãe, Masa Suse e minha irmã, Silvia Suse. Acredito que a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil será um importante passo para realizar o desejo do meu pai de eu me tornar um excelente professor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Edevar Luvizzotto Junior pela ajuda, compreensão e orientação na elaboração, desenvolvimento e conclusão desta dissertação de mestrado.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FEC/UNICAMP (Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas) pela bolsa de estudos concedida para a realização deste trabalho.

E aos meus familiares e amigos pelo apoio, compreensão e incentivos que me motivaram a concluir o curso de Mestrado na UNICAMP.

Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de um simples sistema de distribuição de água	12
Figura 2: Exemplo de rede de distribuição de água.....	16
Figura 3 - Resultado de simulação utilizando o programa EPANET – Rede da figura 1	29
Figura 4. Desenho da rede gerado	35
Figura 5 – Solução gerada pela rotina.....	39
Figura 6: Rede hipotética de distribuição de água – Estudo de caso 1.....	40
Figura 7: Simulação hidráulica para as demandas originais.	42
Figura 8 – Resultado para o cenário 0.....	43
Figura 9 – Segunda solução encontrada para o cenário 0	44
Figura 10 – Ilustração dos nós cobertos para cada uma das soluções	45
Figura 11. Solução hidráulica - cenário 1	46
Figura 12 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 1.....	46
Figura 13 - Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 2	47
Figura 14 – Cenário 1 - critério de fração de água igual a 0.50 – solução 1	48
Figura 15 - Cenário 1 - critério de fração de água igual a 0.50 – solução 2	49
Figura 16 - Cenário 1 - critério de fração de água igual a 0.50 – solução 3	49
Figura 17– Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.60.....	51
Figura 18 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.70.....	52
Figura 19 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 - 5 estações de monitoramento..	53
Figura 20 - Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 - 6 estações de monitoramento ..	53
Figura 21 - Solução hidráulica - cenário 2	54
Figura 22 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.40.....	55
Figura 23– Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.50.....	55
Figura 24 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.60.....	56
Figura 25 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.70.....	56
Figura 26. Solução hidráulica - cenário 3	57
Figura 27– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.40.....	57
Figura 28– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.50.....	58
Figura 29– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.60.....	58

Figura 30– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.70.....	59
Figura 31. Simulação hidráulica – cenário 4.....	59
Figura 32 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.40.....	60
Figura 33 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.50.....	60
Figura 34 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.60.....	61
Figura 35– Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.70.....	61
Figura 36 – Rede hipotética analisada – indicando vazão nos tubos e demandas nos nós (m ³ /d) e, nós cobertos por 4 estações de monitoramento: Fonte Kumar et. al. 1997.....	62
Figura 37 - Resultado de Simulação hidráulica (vazão nas tubulações em L/s)	63
Figura 38 – Solução 4 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	64
Figura 39 - Localização de 4 estações – critério de fração de água igual a 0.50	65
Figura 40– Localização de 4 estações – critério de fração de água igual a 0.70.....	66
Figura 41 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	67
Figura 42 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.50.....	67
Figura 43 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.70.....	68
Figura 44 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	69
Figura 45 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.50.....	70
Figura 46 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.70.....	70
Figura 47– Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	71
Figura 48 - Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.50	72
Figura 49 - Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.70	73
Figura 50 - Localização de 10 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	74
Figura 51 – Evolução da porcentagem de cobertura em função do numero de estações.....	78

Lista de quadros e listagem

Quadro 1: Rotina geral de um AG.	26
Listagem 1 - "Publish" com a execução da rotina principal.....	39
Listagem 2 – Dados de entrada para rotina Principal	42
Listagem 3 – Evolução de ajuste das populações ao longo das gerações – Melhores indivíduos.	45

Lista de tabelas

Tabela 1: Número mínimo de amostras mensais	2
Tabela 2 - Matriz de fração de água.....	13
Tabela 3 - Matriz cobertura	15
Tabela 4 - Combinação das estações 5 e 6.....	15
Tabela 5: Matriz de fração de água do exemplo de rede de distribuição de água.	17
Tabela 5: Matriz de fração de água do exemplo de rede de distribuição de água (continuação)..	18
Tabela 6: Matriz de cobertura de demanda do exemplo de rede de distribuição de água.....	19
Tabela 6: Matriz de cobertura de demanda do exemplo de rede de distribuição de água (continuação).	19
Tabela 7: Matriz de cobertura modificada para a segunda estação de monitoramento.	20
Tabela 8: Obtenção de Q para as estações (Est.) selecionadas.....	24
Tabela 9 – Nós cobertos pelas estações encontradas	43
Tabela 10 – Nós cobertos pelas estações encontradas – Segunda Solução.....	44
Tabela 11 - – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 1.....	47
Tabela 12 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 2.....	47
Tabela 13 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 1.....	48
Tabela 14 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 2.....	49
Tabela 15 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 3.....	50
Tabela 16 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.60	51
Tabela 17 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.70	52
Tabela 18 – Nós cobertos – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – 6 estações de monitoramento.....	54
Tabela 19 – Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.60.....	65
Tabela 20 – Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.50.....	65
Tabela 21 - Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.70	66
Tabela 22 – Síntese dos resultados para 4 estações de monitoramento	66
Tabela 23 - Nós cobertos – 5 estações – critério de fração de água igual a 0.60	67
Tabela 24 - Nós cobertos – 5 estações – critério fração de água igual a 0.50.....	68
Tabela 25 - Nós cobertos – 5 estações – critério de fração de água igual a 0.70	68

Tabela 26 - Síntese dos resultados para 5 estações de monitoramento.....	69
Tabela 27 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.60	69
Tabela 28 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.50	70
Tabela 29 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.70	71
Tabela 30 - Síntese dos resultados para 6 estações de monitoramento.....	71
Tabela 31 - Nós cobertos – 7 estações – critério fração de água igual a 0.60.....	72
Tabela 32 - Nós cobertos – 7 estações – critério de fração de água igual a 0.50	72
Tabela 33 - Nós cobertos – 7 estações – critério de fração de água igual a 0.70	73
Tabela 34 - Síntese dos resultados para 7 estações de monitoramento.....	73
Tabela 35 – Estações alocadas x Percentual da vazão total coberta.....	74
Tabela 36 - Nós cobertos – 10 estações – critério de fração de água igual a 0.60	75

Lista de siglas/ abreviaturas

AG's - algoritmos genéticos

DLL - Dynamic Link Library

FEC/UNICAMP - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas

HWDN – Hypothetical water distribution networks

NSF - número de soluções factíveis

UV - ultravioleta

WDN – Water distribution networks

Lista de Símbolos

C = concentração de cloro residual [mg/l]

C_i = concentração do cloro residual na tubulação i [mg/l]

C_w = concentração do cloro na parede da tubulação [mg/l.m³]

C_1 e C_2 = constantes lineares

D = vazão da água nas tubulações [m³/s]

d_i = demanda de água no ponto i [l/s] ou [m³/dia]

F_s = função de ajuste escalar

F_r = função de ajuste ou função objetivo

k_b = constante de decaimento do cloro na massa de água [1/s]

k_f = coeficiente de transferência de massa [m/s]

K_i = constante de decaimento global do cloro na tubulação i

k_1 = constante de decaimento de cloro no tanque de armazenamento 1 [1/s]

k_2 = constante de decaimento de cloro no tanque de armazenamento 2 [1/s]

k_3 = constante de decaimento de cloro no tanque de armazenamento 3 [1/s]

Q = demanda coberta [l/s]

r_h = raio hidráulico da tubulação [m]

r_{hi} = raio hidráulico da tubulação i

T_1 = concentração do composto traçador fictício no tanque de armazenamento 1 [mg/L]

T_2 = concentração do composto traçador fictício no tanque de armazenamento 2 [mg/L]

T_3 = concentração do composto traçador fictício no tanque de armazenamento 3 [mg/L]

u = velocidade da água na tubulação [m/s]

u_i = velocidade da água na tubulação i [m/s]

x = distância ao longo da tubulação [m]

x_i = distância ao longo da tubulação i [m]

Z = demanda total da rede [l/s]

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial para a sobrevivência humana. É matéria-prima para a produção de alimentos e está presente em diversos processos industriais. Assim é importante que haja quantidade e qualidade adequada para o atendimento das necessidades dos diversos consumos. O sistema de distribuição de água, composto por tubulações, bombas, válvulas, tanques de armazenamento entre outros dispositivos e acessórios, é a infraestrutura responsável por transportar água com qualidade e pressões adequadas aos consumidores finais.

A qualidade da água é importante para assegurar que a população servida não seja exposta a doenças de veiculação hídrica e, para que, não ocorra interferência nos processos industriais ou na produção de alimentos. Embora a água seja injetada no sistema de distribuição com qualidade adequada, para garantir o atendimento dos padrões de potabilidade, estabelecido pela portaria N° 2914 do Ministério da Saúde, ocorre a deterioração de sua qualidade nas redes de distribuição. Isto se deve a diversos fatores, tais como: à contaminação em pontos expostos por vazamentos que abrem caminho para o aporte de patógenos; ao decaimento do desinfetante residual nos reservatórios e ao longo das tubulações; ao recrescimento bacteriano nas tubulações; entre outros.

Geralmente utiliza-se cloro no processo de desinfecção existentes nas estações de tratamento de água (ETA) para inativar microrganismos presentes na água (Rossman et al., 1994; Di Bernardo e Dantas, 2005). E os operadores das estações de tratamento regulam a dosagem do cloro objetivando garantir um residual de cloro no sistema de distribuição com o intuito de assegurar a potabilidade da água nas redes de distribuição. Entretanto, como há ocorrências de reações entre o cloro residual e as substâncias presentes na água e nas paredes das tubulações, ocorrem diminuições das concentrações de cloro residual. Baixos valores de cloro residual, abaixo de valores normativos, são indicativos de prováveis problemas de qualidade. Por esta razão, o desinfetante residual, como o cloro, pode ser considerado um parâmetro para avaliar a qualidade de água nas redes de distribuição.

O monitoramento do cloro em toda a rede é oneroso e inviável, pois conforme observa Mays (2000) mesmo uma rede de médio porte pode conter milhares de quilômetros de

tubulações. Na prática, o monitoramento da qualidade da água é feito em poucos pontos para atender às portarias referentes à potabilidade da água. Entretanto estes pontos nem sempre incluem os mais críticos, pelo desconhecimento da dinâmica do sistema.

Segundo a Portaria Nº 2914 do Ministério da Saúde do Brasil, a representatividade dos pontos de coleta no sistema de distribuição de água é entendida como aqueles próximos a grande circulação de pessoas; edifícios que alberguem grupos populacionais de risco, tais como hospitais, creches e asilos; aqueles localizados em trechos vulneráveis do sistema de distribuição como pontas de rede, pontos de queda de pressão, locais afetados por manobras, sujeitos à intermitência de abastecimento, reservatórios, entre outros, e locais com sistemáticas notificações de agravos à saúde tendo como possíveis causas os agentes de veiculação hídrica. O número mínimo de amostras coletadas no sistema de distribuição (reservatórios e rede) para análises microbiológicas, medição de turbidez e de cloro residual livre ou de outro composto residual ativo está indicado no anexo XIII da Portaria Nº 2914 do Ministério da Saúde e, reproduzido na Tabela 1.

Tabela 1: Número mínimo de amostras mensais.

Fonte: Brasil. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2914 (2011).

Parâmetro	Saída do tratamento (Número de amostras por unidade de tratamento)	Sistema de distribuição (reservatórios e rede)			
		População abastecida			
		<5.000 hab.	5.000 a 20.000 hab.	20.000 a 250.000 hab.	> 250.000 hab.
Coliformes totais	Duas amostras semanais ⁽¹⁾	100	1 para cada 500	30 + (1 para cada 2.000 hab.)	105 + (1 para cada 5.000 hab.) Máximo de 1.000
Escherichia coli					

Nota:

(1) Recomenda-se a coleta de, no mínimo, quatro amostras semanais.

O número mínimo de mensais para o controle da qualidade da água no sistema de distribuição é em função da população abastecida. De acordo com a Tabela 1, para uma população de vinte mil habitantes, o número mínimo de amostras de água que a empresa responsável pelo abastecimento de água é igual a quarenta. Já para uma população de dois milhões de habitantes, o número mínimo de amostra é igual a quinhentos e cinco. O artigo 41º,

inciso 1º da Portaria Nº 2914 do Ministério da Saúde menciona os pontos estratégicos para a realização da coleta das amostras de água. Mas estes pontos não garantem que as amostras de água coletada possuem representatividade sobre a qualidade de água em toda a rede de distribuição.

Por esta razão, a modelagem matemática associada ao uso de programas computacionais tem sido empregada, cada vez mais na atualidade, para simular os processos de transporte que descrevem o comportamento hidráulico e da qualidade de água, com a finalidade de indicar locais ideais para realizar o monitoramento de parâmetros hidráulicos e de qualidade de água nas redes de distribuição. A modelagem auxilia na tomada de decisões sobre estratégias operacionais de monitoramento e a modelação da qualidade, tendo como base de calibração os pontos de monitoramento de qualidade, permite inferir sobre a qualidade de toda a rede de monitoramento e, não somente nos pontos avaliados.

Com o propósito de elaboração de um modelo de localização de estações de monitoramento, Lee e Deininger (1992) introduziram o conceito cobertura de demanda. Ao localizar uma estação de monitoramento em um dado ponto de consumo da rede de distribuição, pode-se avaliar a qualidade de água e a demanda coberta pela estação de monitoramento. Este conceito foi utilizado para avaliar se uma dada estação de monitoramento de qualidade de água possui elevada representatividade em uma rede de distribuição. Os autores afirmam que; a despeito do tamanho da rede de distribuição, sempre haverá trajetórias específicas do escoamento desde a fonte até uma estação de monitoramento. E estabelecem como hipótese a possibilidade de inferir sobre a qualidade de água de toda a rede de distribuição considerando os sentidos de escoamento (que são influenciados pelas demandas dos pontos de consumo).

Al-Zahrani e Moied (2003) desenvolveram um modelo matemático englobando a construção da matriz de fração de água, construção da matriz de cobertura de demanda e aplicação de procedimentos baseados em algoritmos genéticos para identificar ótimos conjuntos de estações de monitoramento. A matriz de fração de água refere-se à razão di/D de cada ponto de consumo de uma rede de distribuição. Assim, para uma rede com n pontos de consumo determina-se uma matriz de fração de água de dimensão $(n \times n)$ a partir da demanda total de entrada D , das vazões nas tubulações para atender a demanda em cada ponto de consumo i , onde n é o número total de pontos de consumo de uma rede de distribuição de água. Após a

determinação da matriz de fração de água, utiliza-se o critério de fração de água para o qual seja razoável afirmar que a qualidade de água de um dado ponto de consumo pode ser inferida. Por exemplo, Kumar et al. (1997) utilizaram um critério de fração de água igual a 0.60 e substituição binária para a determinação da matriz de cobertura de demanda, isto é, valores de fração de água menor que 0.6 são substituídos pelo valor 0 e valores de fração de água maior que 0.6 são substituído pelo valor 1. Desta forma, obtém-se uma matriz binária de dimensão ($n \times n$) que representa a matriz de cobertura de demanda de uma rede de distribuição de água. Já que é necessário realizar a coleta de amostras de água de forma uniforme ao longo do período exigido (Portaria Nº 2914 do Ministério da Saúde, 2011) os autores aplicaram um modelo baseado no conceito de cobertura de demanda linkado a procedimentos baseados em Algoritmos Genéticos nos estudos de caso de Lee e Deininger (1992) e de Kumar et al. (1997).

Yoshikawa (2011) realizou a simulação do decaimento de cloro de múltiplas origens. A autora utilizou os programas computacionais EPANET 2.0 e EPANET - MSX para simular a mesma rede hipotética estudada por Al-Zharani e Moied (2003). A autora realizou a simulação desta em um período de 48 horas (período extensivo) identificando pontos críticos para qualidade e levanta algumas indagações acerca da modelação estática apresentada pelos autores.

Com base no exposto, constatando que o conceito de cobertura de demanda permite avaliar adequadamente a distribuição espacial desta, conduz-se a presente proposta de pesquisa a investigação de um modelo de otimização baseado no conceito de cobertura de demanda. O trabalho diferencia-se dos desenvolvimentos anteriores, ao avaliar a influência de diferentes demandas na matriz de cobertura de demanda, bem como, avaliar a influência do critério de fração de água sobre a localização as estações de monitoramento de qualidade.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta computacional que seleciona a localização ótima de estações de monitoramento em redes de distribuição de água. Têm-se como base os seguintes objetivos específicos:

- Discutir os critérios para a escolha do conjunto ótimo de estações de monitoramento;
- Avaliar a influência da variação da demanda de água sobre o conjunto ótimo de estações de monitoramento;
- Avaliar a influência do critério de fração de água sobre o conjunto ótimo de estações de monitoramento;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FATORES INTERVENIENTES

Através da infraestrutura do sistema de abastecimento de água, as empresas de saneamento possuem a missão de disponibilizar água em quantidade e qualidade suficiente para atender as necessidades dos consumidores. Segundo Azevedo Neto e Alvarez (1991), esta infraestrutura compreende as seguintes unidades: captação, estações de bombeamento, estações de tratamento de água, reservatórios de armazenamento e redes de distribuição.

Na captação há obras cuja função é efetuar a adução e subadução de água dos mananciais superficiais ou subterrâneos. Por causa da diferença de cota entre o ponto de captação e as estações de tratamento, pode ser necessária a utilização de estações de bombeamento para transportar a água bruta, do ponto de captação até a estação de tratamento. Para produzir água potável com características físicas, químicas e biológicas adequadas são utilizadas estações de tratamento. Estas são compostas por diversas unidades; tais como caixa de areia, floculador, decantador, filtros e desinfecção, que objetivam tornar a água adequada ao consumo. A água tratada é injetada no sistema de distribuição que é constituído por reservatórios de armazenamento, redes de distribuição e, comumente, estações elevatórias bombeamento. O sistema de distribuição de água faz o transporte da água potável ao consumidor final (residências, comércios, indústrias, etc.).

Azevedo Neto e Alvarez (1991) mencionam que o consumo de água varia continuamente em função do tempo, das condições climáticas, hábitos das populações, etc., assim, há meses em que o consumo de água é maior que a média e, em outros, menor. Por sua vez, no dia do mês de maior consumo, há picos de vazão que ultrapassam a vazão utilizada para projeto de dimensionamento das redes. Por esta razão são construídos reservatórios de armazenamento, cuja função é atender as solicitações de demanda durante todo o tempo, com pressão adequada em qualquer ponto da rede. De acordo com a localização e configuração, os reservatórios são classificados como: semienterrado à montante, elevado à montante ou semienterrado à jusante e elevado à jusante. A altura e o volume do reservatório estão

intimamente relacionados à topografia da região e a demanda da hora de maior consumo do dia de maior consumo de água do ano.

Já a rede de distribuição de água é constituída por tubulações, dispositivos de proteção, acessórios, válvulas, registros e dispositivos de descarga em pontos conveniente, para que não ocorram interrupções prejudiciais para o abastecimento. A configuração da rede pode ser representada por:

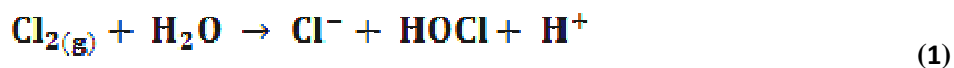
1. Trechos, que correspondem aos percursos da rede de distribuição.
2. Nós, pontos de conexão entre os trechos aos quais se atribuem as demanda locais.
3. Traçado, que define a situação topológica da rede.
4. Ponto de alimentação da rede, que define o local em que se fornece água para a rede de distribuição.

Em relação ao tratamento, mesmo com ausência de lançamento de efluentes domésticos ou industriais, a água de um rio ou de um lago possui microrganismos e matéria orgânica dissolvida e/ou suspensa. Portanto, naturalmente, a água bruta não é adequada para o consumo. Por esta razão, justifica-se a existência das estações de tratamento de água, cuja função é tornar potável (própria para o consumo humano) a água captada dos mananciais superficiais.

O processo de desinfecção é a etapa do tratamento de água cuja função é inativar os microrganismos patogênicos e organismos indicadores presentes na água e prevenir o crescimento microbiológico nas redes de distribuição de água (LIBÂNIO, 2005).

A desinfecção de águas destinadas ao consumo humano pode ser realizada pela aplicação de agentes químicos e físicos. Os agentes químicos como cloro e seus compostos, dióxido de cloro e ozônio oxidam os constituintes da parede celular dos microrganismos com posterior difusão para o interior da célula. Os agentes físicos como a radiação UV, a radiação gama e radiação solar interferem na biossíntese e reprodução celular dos microrganismos (LIBÂNIO, 2005).

Ao considerar a utilização de cloro no processo de desinfecção, ocorrem as seguintes reações químicas:

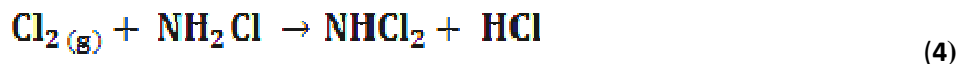




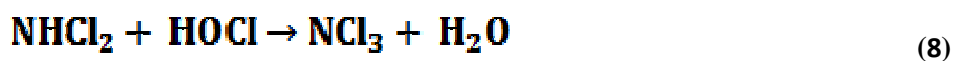
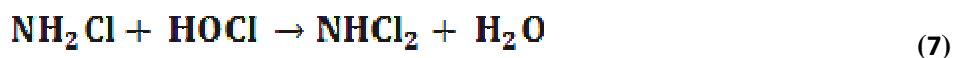
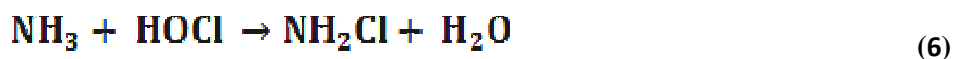
As espécies químicas OCl^- (íon hipoclorito) e HOCl (ácido hipocloroso) são responsáveis por efetuar a ruptura da parede celular e interferir na atividade metabólica dos microrganismos e, o somatório da concentração dessas espécies compõe o cloro residual livre, que é necessário para manter a qualidade de água nos sistemas de abastecimento.

Para evitar a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, ou seja, manter a segurança da potabilidade da água, a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde (2011) recomenda a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/l de cloro residual livre no sistema de distribuição.

Porém, Libânio (2005) menciona que o cloro não é desinfetante seletivo, isto é, diversas substâncias como amônia, sulfatos e matéria orgânica, podem inibir a ação do cloro contra os microrganismos. Por exemplo, Trimboli (2006) descreve que o cloro reage com a amônia de acordo com as seguintes reações químicas:



O ácido hipocloroso também pode reagir com a amônia e outros compostos amoniacais resultando na formação das cloroaminas. As reações do ácido hipocloroso com a amônia ocorrem de acordo com as equações 6, 7 e 8.



A monocloroamina (NH_2Cl), a dicloroamina (NHCl_2) e o tricloreto de nitrogênio (NCl_3) formam o cloro residual combinado, que é menos ativo em relação ao cloro residual livre. Então, a demanda total de cloro necessária para assegurar a potabilidade da água nos sistemas de distribuição é o somatório da concentração de cloro para inativar os microrganismos, da concentração de cloro residual livre e da concentração do cloro residual combinado.

Quando se considera o desinfetante cloro como o produto químico responsável por assegurar a qualidade de água nos sistemas de distribuição, Rossman et al. (1994) citam que ocorrem reações químicas entre o cloro e os materiais presentes na massa de água e nas paredes das tubulações. Também podem ocorrer transformações físicas e biológicas decorrentes da existência de tubulações com elevado grau de incrustações, da existência de conexões em cruz onde pode ocorrer a mistura da massa líquida advinda de diversos reservatórios, do rompimento de tubulações, da intrusão de microrganismos patogênicos, de erros de operação no sistema de distribuição de água, entre outros. Estes fatores estão diretamente relacionados à deterioração da qualidade de água dos sistemas de distribuição existentes.

Esta deterioração está diretamente relacionada ao decaimento do cloro residual nas redes de distribuição. Por exemplo, Rossman et al. (1994) mencionaram que a Equação 9 descreve a variação espacial e temporal da concentração do cloro ao longo da rede de distribuição de água.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u * \frac{\partial C}{\partial x} - k_b * C - \frac{k_f}{r_h} * (C - c_w) \quad (9)$$

sendo C = concentração de cloro na massa de água; t = tempo; u = velocidade da água na tubulação; x = distância ao longo da tubulação; k_b = constante de decaimento na massa de água; k_f = coeficiente de transferência de massa; r_h = raio hidráulico da tubulação e c_w = concentração de cloro na parede da tubulação.

Para uma tubulação, os autores mencionaram que a Equação 10 descreve a variação da concentração de cloro.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i * \frac{\partial C_i}{\partial x_i} - K_i * C_i \quad (10)$$

onde K_i = constante de decaimento global que ocorre na tubulação i , segundo a Equação 11

$$K_i = k_b + \frac{k_w * k_f}{r_{hi} * (k_w + k_f)} \quad (11)$$

sendo k_w = constante de decaimento que ocorre na parede da tubulação

Já para descrever o decaimento de múltiplas espécies nos reservatórios de uma rede de distribuição de água, Yoshikawa (2011) empregou a Equação 12 no programa computacional EPANET - MSX.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - (k_1 * T_1 + k_2 * (1 - T_1 - T_3) + k_3 * (1 - T_1 - T_2)) \quad (12)$$

sendo C = concentração de cloro; t = tempo; k = constante de decaimento de cloro; T = concentração de um composto traçador fictício.

Kumar et al. (1997) mencionaram a necessidade em monitorar a qualidade de água em vários locais do sistema de abastecimento de água, pois se observa a deterioração da qualidade da água durante o transporte de água da estação de tratamento até o consumidor final. Qian et al. (2007) mencionaram que o monitoramento (online ou off-line), da qualidade de água nas redes de distribuição, auxilia na completa compreensão da rede de distribuição sob condição normal de operação e indica a seguridade da qualidade da água nos sistemas de distribuição.

No Brasil, para garantir a qualidade de água desde a estação de tratamento até o consumidor final, as empresas de abastecimento de água devem realizar o monitoramento da qualidade de água em todo o sistema de abastecimento, de acordo com os Art. 40º, 41º e anexos relacionados ao plano de amostragem que fazem parte da Portaria Nº 2914 do Ministério da Saúde.

O'Halloran et al. (2009), Ediriweera e Marshall (2010) mencionaram que indústrias de abastecimento de água têm desenvolvido sensores e sistemas de monitoramento online para realizar o monitoramento de sistemas de abastecimento de água. Com a capacidade de coletar informações em tempo real, os autores mencionaram que o desenvolvimento, aplicação e gerenciamento de sensores de monitoramento requerem elevado grau de aptidão, eficiência e habilidade para garantir a credibilidade do monitoramento dos sistemas de abastecimento de água. Assim torna-se possível efetuar o monitoramento de parâmetros hidráulicos e de qualidade de água de forma contínua e em tempo real.

Mas O'Halloran et al. (2009) afirmaram que geralmente os operadores destes sistemas de monitoramento não incluem informações e/ou indicadores que podem servir de apoio para tomadas de decisão sobre a operabilidade de sistemas de abastecimento de água. Por exemplo, poderiam ser incluídos modelos hidráulicos que auxiliam na compreensão da dinâmica dos

sistemas de abastecimento de água e a relação entre as regiões do sistema que apresentam variações de parâmetros relacionados à qualidade de água.

Além disso, os autores mencionaram que o custo associado à manutenção dos equipamentos é altamente limitante para que a aplicação dos sistemas de monitoramento online seja difundida mundialmente.

Qian et al. (2007) mencionaram que para a realização eficaz e eficiente do monitoramento da qualidade de água nos sistemas de distribuição, é essencial determinar o número ótimo e a localização de estações de monitoramento da qualidade da água.

Então se observa a importância no desenvolvimento de modelos que visam à identificação de pontos considerados críticos para a realização do monitoramento de sistemas de distribuição de água.

3.2 CONCEITO COBERTURA DE DEMANDA

Há diversos modelos matemáticos com capacidade para realizar análises e simulações de sistemas de distribuição de água. Lee e Deininger (1992) mencionaram o termo "cobertura" para transmitir a noção de que locando uma estação de monitoramento em um ponto de consumo, é possível saber a qualidade de água e a demanda coberta por esta estação. Assim, tem-se a necessidade em conhecer a trajetória do fluxo de água, a vazão em cada trecho e a demanda dos pontos de consumo (chamados de nó). Desta forma pode-se determinar a representatividade (em termos de porcentagem de cobertura) que um determinado nó possui sobre toda a rede de distribuição de água.

Os autores citam que a partir da análise da qualidade de água de um nó amostrado, é possível inferir a qualidade de água dos nós a montante. "Se a qualidade de água do nó amostrado é boa, então se pode afirmar que a qualidade de água dos nós a montante é boa". Então é extremamente importante que qualquer fração de água consumida em uma rede de distribuição seja "coberta" pelas estações de monitoramento. Por esta razão, para adquirir uma completa compreensão do modelo matemático "cobertura de demanda" é necessário seguir os seguintes procedimentos:

1. Definição da topologia do sistema a ser analisado;

2. Determinação da matriz de fração de água;

3. Determinação da matriz de cobertura;

Os autores utilizaram o sistema hipotético de distribuição de água ilustrado na Figura 1 para explicar o conceito cobertura de demanda. Identifica-se a vazão de água em cada tubulação do sistema e o sentido do escoamento definido pelas setas. As demandas associadas a cada nó i estão representadas por di .

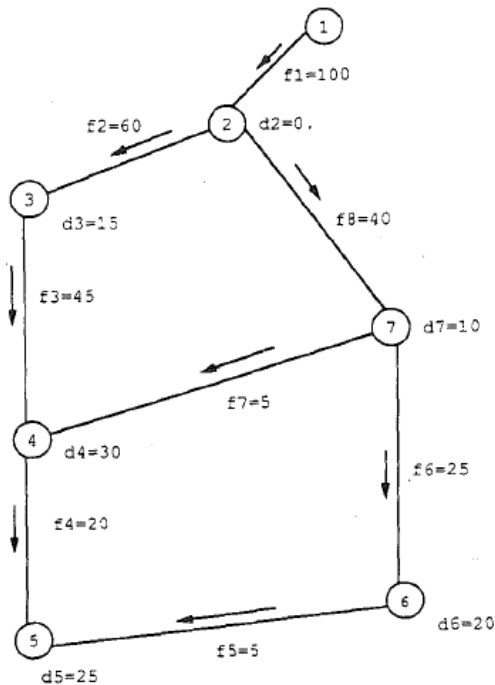


Figura 1 - Exemplo de um simples sistema de distribuição de água
(Fonte: Lee e Deininger 1992)

Ao considerar o nó 5 como estação de monitoramento, a porção ou fração de água (W) que parte do nó 4 e chega ao nó 5 representa 80% da demanda, pois $W(5,4) = (20/25 \cdot 100)$; a fração de água que parte do nó 6 representa 20% da demanda, pois $W(5,6) = (5/25 \cdot 100)$; A fração de água que parte do nó 3 e chega ao nó 5 é igual a 72% pois $W(5,3) = 0,8 \cdot (45/(45 + 5))$; a fração de água $W(5,7) = 0,8 \cdot (5/(45+5)) + 0,2 = 0,28$; a fração de água $W(5,2) = W(5,3) + W(5,7) = 1$; e $W(5,1) = W(5,2) = 1$.

Quando o nó 6 é considerado como estação de monitoramento, $W(6,7) = W(6,2) = W(6,1) = 1$; e $W(6,3) = W(6,4) = W(6,5) = 0$. Observa-se que a fração de água que parte dos nós 1, 3, 4 e 5 não chegam ao nó 6.

Para o nó 4, $W(4,3) = 45/(45 + 5) = 0,9$; $W(4,7) = 5/(45 + 5) = 0,1$; $W(4,2) = W(4,3) + W(4,7) = 1$; $W(4,4) = 1$; e $W(4,5) = W(4,6) = 0$.

Para o nó 3, $W(3,3) = W(3,2) = W(3,1) = 1$. Para o nó 7, $W(7,7) = W(7,2) = W(7,1)$. Para o nó 2, $W(2,2) = W(2,1) = 1$. E para o nó 1, $W(1,1) = 1$.

Quando a vazão que parte de um nó não faz parte do caminho de escoamento para o nó considerado estação de monitoramento, a fração de água (W) é igual à zero. Para o exemplo da Figura 1, e considerando o nó 3 como estação de monitoramento, observa-se que as vazões de água que partem dos nós 4, 6 e 7 não são cobertos. Assim, $W(3,4) = W(3,6) = W(3,7) = 0$.

E, $W(i,i) = 1$, isto é, $W(1,1) = W(2,2) = W(3,3) = W(4,4) = W(5,5) = W(6,6) = W(7,7)$.

Então, após a determinação de W para todos os pontos de consumo, é possível obter a matriz de fração de água que é representada pela Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de fração de água
Fonte - Lee e Deininger (1992)

Nó de amostragem	Fração de água através do nó						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	0,9	1	0	0	0,1
5	1	1	0,72	0,8	1	0,2	0,28
6	1	1	0	0	0	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1

A partir da Tabela 2, observa-se que frações de água de todos os outros nós da rede de distribuição passam pelo nó 5. Lee e Deininger (1992) mencionaram o termo **cobertura** para descrever a possibilidade de inferir sobre a qualidade de água de um nó baseado na análise da qualidade de água de outro nó. Ao considerar o nó 5 como estação de monitoramento de qualidade, 72% da água que parte do nó 3, 80% da água que parte do nó 4, 20% da água que parte do nó 6 e 28% da água que parte do nó 7 podem ser inferidas. Nota-se que 100% da água que chega ao nó considerado estação de monitoramento de qualidade podem ser inferidos. Ou

seja, 100% da demanda de água do nó 5 pode ser inferida ao considerá-lo estação de monitoramento de qualidade da rede de distribuição de água. Além disso, os autores mencionaram o termo **qualquer fração** para descrever que até a menor quantidade de água que parte de um nó pode ser inferido ao realizar a análise da amostra de água de outro nó considerado estação de monitoramento de qualidade. Por exemplo, ao considerar o nó 4 como estação de monitoramento, 10% da água que parte do nó 7 pode ser inferida.

A partir da matriz de fração de água, podem-se obter diversas matrizes que resumem quais são os nós de uma rede de distribuição e qual a porcentagem da quantidade de água que parte destes nós que podem ser inferidos pelas estações de monitoramento de qualidade. Estas matrizes foram denominadas de matrizes de cobertura e baseiam-se na decisão sobre qual é a fração de água aceitável para afirmar que um nó pode ser inferido. As matrizes de cobertura são matrizes binárias derivadas da matriz de fração de água através do critério de fração de água adotado pelo usuário. Quando a fração de água de um nó é maior que o critério de fração de água adotado, substitui a fração de água do nó pelo valor 1. Quando a fração de água do nó é menor que o critério de fração de água adotado, substitui a fração de água do nó pelo valor 0. Por exemplo, ao considerar o nó 5 uma estação de monitoramento e o critério de fração de água igual a 0.75, é possível somente inferir, de modo aceitável, sobre a qualidade de água do nó 4, e dos nós 5, 2 e 1. A linha da matriz de cobertura referente ao nó 5, considerado estação de monitoramento, torna-se 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0. Ao adotar o critério de qualquer fração de água, é possível inferir sobre a qualidade de água de toda a rede de distribuição (Figura 1) ao realizar análises de amostras de água do nó 5. A linha da matriz de cobertura referente ao nó 5 torna-se 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1.

Para a obtenção da matriz de cobertura da rede de distribuição de água (Figura 1), Lee e Deninger (1992) utilizaram o critério de fração de água igual a 0.50. Os autores obtiveram a matriz de cobertura ilustrada pela Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz cobertura
Fonte - Lee e Deininger (1992)

	Nós com cobertura sob o critério de fração de água igual a 0.5						
Nó de amostragem	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	1	1
7	1	1	0	0	0	0	1

Neste exemplo ilustrativo fica simples concluir que os nós 5 e 6 (coluna Nó de amostragem) se monitorados simultaneamente permite inferir sobre a qualidade da água de toda a rede, segundo o critério de fração de água estabelecido, pois o “conjunto união” fornecido por estes nós cobre todos os demais nós da rede, como ilustra a Tabela 4.

Tabela 4 - Combinação das estações 5 e 6

	Nós com cobertura sob o critério de fração de água igual a 0.5						
Nó de amostragem	1	2	3	4	5	6	7
5	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	0	0	0	1	1
5 ∪ 6	1	1	1	1	1	1	1

A escolha das estações de monitoramento nos nós 5 e 6 no caso deste exemplo fica bastante evidente, entretanto para redes com topologias mais complexas de dimensões maiores, a localização adequada das estações de monitoramento não é trivial. A combinação de soluções a serem avaliadas aumenta exponencialmente com o número de nós, sendo possível deduzir que, admitindo que se qualquer nó da rede de distribuição é candidato a ser estação de amostragem, o numero de soluções factíveis (NSF), para uma rede composta por N nós e sendo S o número de nós que farão parte do conjunto de estações de monitoramento é dado por:

$$NSF = N^S \quad (13)$$

Para o exemplo apresentado resulta tomando duas estações de monitoramento ($S=2$) e sendo o numero total de nós igual a 7 ($N=7$) em $NSF = 7^2=49$ combinações possíveis a serem avaliadas, dentre as quais a combinação ideal (nó 5 e 6) pode ser facilmente identificada. Por

outro lado, para uma rede composta, por exemplo, por 100 nós e visando a alocação de 4 estações, o número de soluções possíveis para o conjunto de estações é igual a 100^4 , ou seja, 100 milhões de soluções a serem avaliadas, para a definição do conjunto mais adequado de estações a serem empregadas no monitoramento da qualidade da água.

Esta constatação deixa evidente a necessidade de procedimentos baseados em técnicas de otimização para a determinação do conjunto adequado de estações de monitoramento. Dentre as técnicas disponíveis a otimização baseada em algoritmo genético pareceu adequada devido a sua robustez. Meier e Barkdoll (2000) mencionam que o algoritmo genético pode ser considerado uma ferramenta com elevado potencial para otimizar a solução de problemas complexos que podem existir em redes de distribuição de água. Os autores dizem que não há garantia na obtenção da resposta ótima, mas, para a maioria dos problemas reais, pode se prover 95% de soluções melhores do que a utilização de métodos tradicionais. Além da robustez do método este já foi aplicado anteriormente por Al-Zharani e Moied (2003), para a mesma finalidade, o que facilitará a comprovação de resultados.

Ao aplicar o conceito de cobertura de demanda na rede hipotética de distribuição de água ilustrada pela Figura 2, Kumar et al. (1997) obtiveram a matriz de fração de água ilustrada pela Tabela 5.

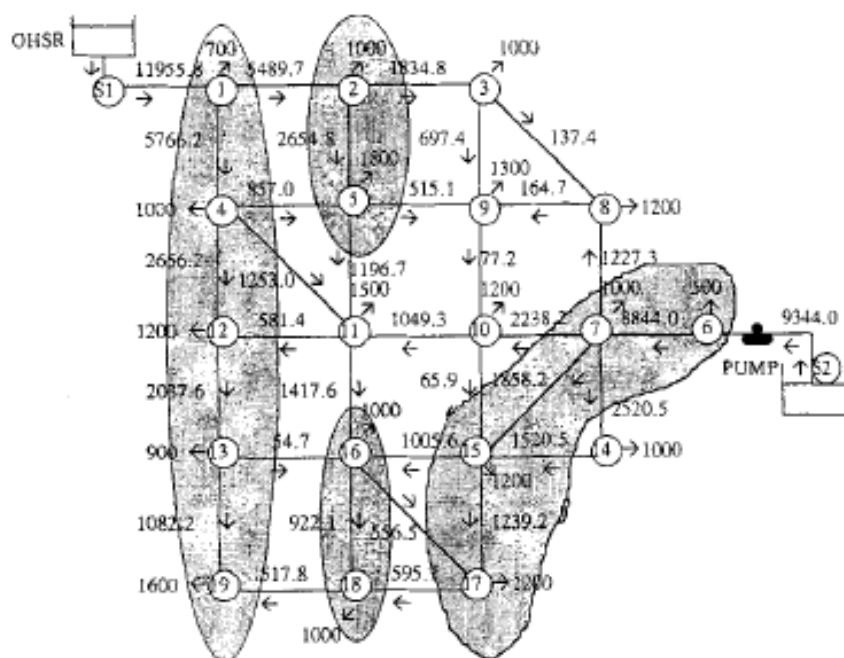


Figura 2: Exemplo de rede de distribuição de água
Fonte: KUMAR ET AL., 1997.

Tabela 5: Matriz de fração de água do exemplo de rede de distribuição de água.

Fonte: Kumar et al. (1997).

Nó de amostragem	Nó de contribuição (m³/d)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	1	1								
3	1	1	1							
4	1	0	0	1						
5	1	0.756	0	0.244	1					
6	0	0	0	0	0	1				
7	0	0	0	0	0	1	1			
8	0.101	0.101	0.101	0	0	0.899	0.899	1		
9	0.862	0.801	0.518	0.091	0.374	0.108	0.108	0.120	1	
10	0.029	0.026	0.017	0.003	0.012	0.971	0.971	0.004	0.033	1
11	0.709	0.267	0.005	0.422	0.346	0.291	0.291	0.001	0.010	0.300
12	0.948	0.048	0.001	0.900	0.062	0.052	0.052	0	0.002	0.054
13	0.948	0.048	0.011	0.900	0.062	0.052	0.052	0	0.002	0.054
14	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
15	0.001	0	0	0	0	0.998	0.998	0	0.001	0.019
16	0.427	0.154	0.003	0.273	0.199	0.573	0.573	0.001	0.006	0.181
17	0.133	0.049	0.001	0.085	0.062	0.867	0.867	0	0.003	0.069
18	0.312	0.113	0.002	0.199	0.145	0.688	0.688	0.001	0.005	0.137
19	0.742	0.069	0.002	0.672	0.089	0.258	0.258	0	0.003	0.081

Tabela 6: Matriz de fração de água do exemplo de rede de distribuição de água (continuação).
Fonte: Kumar et al. (1997).

Nó de amostragem	Nó de contribuição (m³/d)								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11	1								
12	0.180	1							
13	0.180	1	1						
14	0	0	0	1					
15	0	0	0	0.441	1				
16	0.576	0.022	0.022	0.179	0.406	1			
17	0.179	0.077	0.007	0.359	0.816	0.310	1		
18	0.420	0.016	0.016	0.250	0.567	0.730	0.392	1	
19	0.258	0.681	0.681	0.081	0.184	0.237	0.127	0.324	1

A partir da matriz de fração de água (Tabela 5) e considerando um critério de fração de água igual a 0.60, Kumar et al. (1997) obtiveram a matriz de cobertura (Tabela 6) da rede de distribuição de água (Figura 2).

Tabela 7: Matriz de cobertura de demanda do exemplo de rede de distribuição de água.

Fonte: Kumar et al. (1997).

Nó de amostragem	Nós contribuintes (m³/d)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1																
2	1	1															
3	1	1	1														
4	1	0	0	1													
5	1	1	0	0	1												
6	0	0	0	0	0	1											
7	0	0	0	0	0	1	1										
8	0	0	0	0	0	1	1	1									
9	1	1	0	0	0	0	0	0	1								
10	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1							
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1						
12	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1					
13	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1				
14	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1			
15	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1		
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
17	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
18	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Tabela 8: Matriz de cobertura de demanda do exemplo de rede de distribuição de água (continuação).

Fonte: Kumar et al. (1997).

Nó de amostragem	Nós contribuintes (m³/d)		Demanda coberta (m³/d)
	18	19	
1			700
2			1700
3			2700
4			1700
5			3500
6			500
7			1500
8			2700
9			3000
10			2700
11			2200
12			1900
13			2800
14			2500
15			2700
16			1000
17			3900
18	1		3500
19	0	1	5400

A localização da estação de monitoramento de qualidade, com base no conceito de cobertura de demanda, está diretamente relacionada à demanda coberta pela estação. Então, para

o exemplo de rede de distribuição de água (Figura 2), Kumar et al. (1997) observaram que o nó 19 teve a maior demanda coberta da rede (5400 m³/d), por esta razão, o nó 19 foi considerado a primeira estação de monitoramento de qualidade.

Nota-se que ao realizar o monitoramento da rede de distribuição de água (Figura 2) através de análises de amostras de água do nó 19 é possível inferir sobre a qualidade de água dos nós 1, 4, 12, 13 e 19. Então, para aumentar a quantidade de nós que podem ser inferidos, faz-se a necessidade em elevar o número de estações de monitoramento de qualidade. A partir da matriz de cobertura (Tabela 6), exclui-se a linha referente ao nó considerado estação de monitoramento de qualidade; exclui-se as colunas referentes aos nós que são inferidos pela primeira estação localizada; por fim verificam-se as demandas cobertas pelos nós considerados potencialmente estações de monitoramento de qualidade. Neste sentido, Kumar et al. (1997) obtiveram a matriz de cobertura (Tabela 7) para localizar a segunda estação de monitoramento de qualidade do exemplo de rede de distribuição de água (Figura 2).

Tabela 9: Matriz de cobertura modificada para a segunda estação de monitoramento.

Fonte: Kumar et al. (1997)

Nó de amostragem	Nós contribuintes (m ³ /d)														Demanda coberta (m ³ /d)
	2	3	5	6	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	
1															0
2	1														1.000
3	1	1													2.000
4	0	0													1.000
5	1	0	1												2.800
6	0	0	0	1											500
7	0	0	0	1	1										1.500
8	0	0	0	1	1	1									2.700
9	1	0	0	0	0	0	1								2.300
10	0	0	0	1	1	0	0	1							2.700
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1						1.500
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0						1.900
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0						2.100
14	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1					2.500
15	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1				2.700
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			1.000
17	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1		3.900
18	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	3.500

Foi observado na Tabela 7 que o nó 17 apresentava a maior demanda coberta de água (3900 m³/d). Então, Kumar et al. (1997) consideraram o nó 17 como segunda estação de monitoramento de qualidade do exemplo da rede de distribuição de água (Figura 2).

Os passos para a localização das estações de monitoramento de qualidade em redes de distribuição de água podem ser sumarizados da seguinte forma:

1. Para um dado padrão de demanda, realiza-se a análise hidráulica da rede, determinação da vazão e sentido de escoamento em cada tubulação;
2. Com base no sentido de escoamento, renumeração dos nós tal que o caminho do escoamento de água é do nó com identificação de menor número para o de maior número;
3. Inserção dos elementos da matriz de fração de água em ordem crescente de numeração e da seguinte maneira:
 - a) Escolha de um nó da rede de distribuição de água;
 - b) Determinação de todos os nós conectados ao nó escolhido;
 - c) Cálculo da fração de água para todos os nós a montante conectado ao nó escolhido;
4. Escolha de um critério de fração de água apropriado. Kumar et al. (1997) escolheram o critério de fração de água igual a 0.60.
5. Da matriz de fração de água obtém-se a matriz de cobertura da seguinte forma: se o valor da fração de água de um nó é maior que 0.60, então se assume que este nó é coberto e atribui-se o valor 1 para o nó. Se o valor da fração de água de qualquer nó a montante conectado ao nó escolhido for menor que 0.60 então se atribui o valor 0;
6. Seleção de cada demanda nodal como uma estação de monitoramento; inserção da demanda coberta para todos os nós selecionados cujo valor de fração de água atingiu ou superou o critério de fração de água utilizado;
7. Escolha da primeira estação de monitoramento sendo o nó com maior demanda coberta calculada no passo 6. Identificação dos nós cobertos pela estação de monitoramento;
8. Para a localização da seguinte estação de monitoramento, realiza-se a eliminação da demanda correspondente à estação de monitoramento no passo 7; elimina-se a coluna da matriz de cobertura referente aos nós inferidos pela estação de monitoramento já

localizada; em seguida computa-se a demanda coberta dos nós remanescentes e escolhe-se a próxima estação de monitoramento o nó com maior demanda coberta.

Kumar et al. (1997) localizaram os nós 19, 17, 5 e 18 como estações de monitoramento de qualidade do exemplo de rede de distribuição de água (Figura 2). Entretanto, este conjunto de estações de monitoramento não realiza a cobertura da demanda total da rede de distribuição ilustrada pela Figura 2. As frações de água que partem dos nós 14, 11, 10, 9, 8 e 3 não são inferidas pelo conjunto de estações de monitoramento de qualidade localizadas. Então, Kumar et al. (1997) mencionaram a necessidade em elevar o número de estações de monitoramento de qualidade para garantir que as frações de água que partem de potenciais regiões críticas sejam inferidas.

3.3 ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos (AG's) são um entre diversos métodos de otimização inspirados na natureza. Conforme Lacerda e Carvalho (1999) os AG's foram propostos por John Halland em 1975 e popularizado pelo trabalho de David Goldberg de 1989. Seguem o princípio da evolução da de populações de seres vivos, baseados na seleção natural e sobrevivência dos indivíduos mais aptos, conforme os princípios da “Teoria da Evolução das Espécies”, proposta por Charles Darwin, em 1859.

Um algoritmo de otimização baseado em AG processa populações de indivíduos, representada por seus “cromossomos”, este entendido como uma estrutura de dados que representa uma possível solução do problema a ser otimizado e, que em geral representa um conjunto de parâmetros da função objetivo que se pretende maximizar ou minimizar. Esta pode assumir diversas formas, tais como; cadeias binárias, vetores de números reais ou inteiros, matrizes, listas arvores, etc. O conjunto de todas as configurações que os cromossomos podem assumir define o “espaço de busca” da solução.

No caso particular do problema estudado, o cromossomo é composto por um vetor de dimensão NE de números inteiros, onde cada inteiro representa o número de identificação do nó candidato à estação de monitoramento. Assim, por exemplo, para a rede exemplificada na

Figura 1, assumindo que se esteja buscando duas estações de monitoramento, uma população de 6 indivíduos poderia ser:

- 1 – [2,4]
- 2 – [1,5]
- 3 – [3,6]
- 4 – [3,5]
- 5 – [4,1]
- 6 – [2,3]

Conforme mencionado, um algoritmo de otimização baseado em AG processa populações de indivíduos. Inicialmente esta população é gerada de forma aleatória, os seis indivíduos apresentados foram gerados com a escolha de dois nós entre os seis possíveis, não sendo aceita a repetição de um mesmo nó para um indivíduo, nem indivíduos repetidos (mesmo que a posição dos nós seja diferente).

Em seguida realiza-se a avaliação da aptidão de cada indivíduo desta população por meio da função objetivo associada. Para o problema de alocação de estações de monitoramento, Al-Zahrani e Moied (2003) propuseram a função objetivo representada pela Equação (14).

$$F_s = F_r * C_1 + C_2 \quad (14)$$

onde F_r é a função de ajuste inicial representada pela equação (15), C_1 e C_2 são constantes lineares.

$$F_r = 100 - \left[\frac{Z - Q}{Z} * 100 \right] \quad (15)$$

onde Z é a demanda total que deve ser injetada na rede para atender as necessidades de consumo (ou o valor máximo esperado para Q) e Q é a demanda coberta pelo conjunto de nós representados pelo “indivíduo” (este conceito será melhor detalhado na sequência). Os coeficientes C_1 e C_2 são coeficientes para ampliação da escala. O fator de escala não será utilizado nesta pesquisa, ou seja, $C_1 = C_2 = 0$, e a função de aptidão ou de ajuste será igual à demanda coberta Q .

Supondo a rede exemplo da Figura 1 e os cinco nós selecionados anteriormente como candidatos à estação de monitoramento é possível obter a Tabela 8, com os respectivos valores de

Q. Nesta tabela as colunas (1) e (2) representam respectivamente os nós da rede de distribuição e suas respectivas demandas. As colunas (3) referem-se aos nós candidatos a estações de monitoramento com valores 0 e 1 obtidos da matriz de cobertura (Tabela 3). As colunas (4) representam o operador denominado por Al-Zahrani e Moied (2003) de “oring” que estabelece o valor 1 se o nó for coberto por pelo menos um dos nós de monitoramento e 0 se não for coberto por nenhum. O valor de cada célula desta coluna será multiplicado pelo valor da demanda do nó correspondente o que indica se a demanda é coberta ou não pelas estações o valor resultante é indicado na coluna (5) que foi chamada de q. O valor total de demanda coberta Q é obtido pela soma dos valores da coluna (5).

Tabela 10: Obtenção de Q para as estações (Est.) selecionadas

(1)	(2)	(3)				(4)	(5)	(3)				(4)	(5)	(3)				(4)	(5)
Nó	Dem. (l/s)	Est.		u	q	Est.		u	q	Est.		u	q	Est.		u	q		
		2	4			1	5			3	6								
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
2	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
3	15	0	1	1	15	0	1	1	15	1	0	1	15	0	0	0	0		
4	30	0	1	1	30	0	1	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	25	0	0	0	0	0	1	1	25	0	0	0	0	0	1	1	20		
6	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10	0	1	1	10		
7	10	Q →				45	Q →				70	Q →				45			

(1)	(2)	(3)				(4)	(5)	(3)				(4)	(5)	(3)				(4)	(5)
Nó	Dem. (l/s)	Est.		u	q	Est.		u	q	Est.		u	q	Est.		u	q		
		3	5			4	1			2	3								
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
2	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0		
3	15	1	1	1	15	1	0	1	15	0	1	1	15	0	0	0	0		
4	30	0	1	1	30	1	0	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	25	0	1	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
6	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
7	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Q →					70	Q →					45	Q →					15		

Considerando que a demanda total injetada na rede é 100 e, tomando $Z = 100$, resulta como valores de Fr, para cada conjunto de estações de monitoramento indicado os valores:

$$Fr_{[2,4]} = 45, Fr_{[1,5]} = 70, Fr_{[3,6]} = 45, Fr_{[3,5]} = 70, Fr_{[4,1]} = 45, Fr_{[2,3]} = 15,$$

O passo seguinte é a realização da evolução da população inicial com base na aptidão de seus indivíduos. Os indivíduos mais aptos terão maior probabilidade de serem selecionados para o cruzamento e assim seus genes serão preservados na geração seguinte. A seleção será feita neste trabalho na forma de torneio. Um grupo de indivíduos é selecionado de forma aleatória e o mais apto entre eles é selecionado. Repete-se o processo para obter o segundo elemento para o cruzamento (crossover). Deste cruzamento serão gerados dois filhos que substituíram seus ancestrais. Al-Zahrani e Moied (2003) adotaram o crossover baseado em um único ponto de corte. A Seleção do ponto de corte é realizada utilizando uma função que gera um número inteiro no intervalo de 1 a (S-1) onde S é o numero de estações de monitoramento.

Para o exemplo ilustrativo que se apresenta, este critério resulta na quebra do cromossomo na metade, Assim, por exemplo, considerando o operador de seleção por torneio e o crossover conforme indicado para um grupo de três indivíduos selecionados por vez:

SELEÇÃO

Grupo 1 (selecionado aleatoriamente)

[2,4] [3,6] [3 5] → seleção por torneio → [3 5]

Grupo 2 (selecionado aleatoriamente)

[3 6] [4 1] [2 3] → seleção por torneio → [4 1] (ou [3 6])

CROSSOVER (Reprodução)

[3 | 5] → filho obtido pela troca de genes dos pais → [3 1]

[4 | 1] → filho obtido pela troca de genes dos pais → [4 5]

No método de torneio adotado um pai pode ter a chance de ser selecionado mais de uma vez, pelo seu valor de aptidão elevado, pais menos aptos podem ser selecionados embora com menor chance. O mesmo processo ilustrado anteriormente é repetido até que toda a população original seja substituída por uma nova com o mesmo número de indivíduos. Como visto, quando os pais “cruzam” uma porção de cada pai é utilizada para produzir os filhos. A concatenação dos cromossomos ocorre em um determinado ponto e os novos cromossomos (filhos) são produzidos com estrutura diferente de seus pais mais herdando características deles.

Para o problema de localização de estações de monitoramento, um filho, que representa uma solução será dito “perfeito” se seus genes são diferentes, em outras palavras, um filho “com defeito” é uma solução que contem um determinado nó mais de uma vez. Durante a operação de crossover, somente filhos perfeitos são autorizados a passar para o passo seguinte (de mutação). No caso de um filho com defeito, este é substituído por um pai.

Após o cruzamento, uma operação denominada “mutação é aplicada”. Este procedimento evita a obtenção de soluções viciadas que se fecham em um mínimo ou máximo local pela perda de conteúdo genético ao longo das gerações. A taxa com que a mutação é aplicada deve ser baixa, com probabilidade p na faixa de 0.1 a 5% para codificação não binária (Al-Zahrani e Moied, 2003). Durante o processo de mutação um número real é gerado no intervalo de 0 a 1, para cada gene do cromossomo. Se o número aleatório é menor que 0.05, o valor correspondente do gene é alterado por um valor aleatório (no caso o numero de um nó da rede), mas este deve ser diferente dos genes do restante do cromossomo, para não gerar um defeito.

Uma vez obtida a nova população o processo se repete até que o critério de convergência seja atingido, ou seja, um numero de gerações máximo seja atingido, ou que a população não consiga ser melhorada após um certo número de gerações. Um algoritmo genético típico pode ser colocado na forma do pseudocódigo reproduzido no Quadro 1.

```
Seja  $S(t)$  a população de cromossomos na geração ( $t$ )  
  
 $t \leftarrow 0$   
Inicializar  $S(t)$  - “população inicial aleatória de indivíduos sãos”  
Avaliar  $S(t)$   
Enquanto o critério de parada não for satisfeito faça  
     $t \leftarrow t+1$   
    selecionar  $S(t)$  à partir de  $S(t-1)$   
    Aplicar crossover sobre  $S(t)$   
    Aplicar mutação sobre  $S(t)$   
    Avaliar  $S(t)$   
fim
```

Quadro 1: Rotina geral de um AG.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, destinada à localização ótima de estações de monitoramento de qualidade de água. Tais procedimentos se valem do conceito de cobertura de demanda e de um otimizador baseado nos conceitos de algoritmos genéticos. Foram utilizados como material os aplicativos, a saber:

- *EPANET versão 2.0* – aplicativo de domínio público desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA) – O aplicativo foi utilizado essencialmente para gerar os arquivos de entrada dados no formato INP, que foram utilizados nos exemplos dos estudos de casos.
- *EPANET Toolkit* – biblioteca de vínculo dinâmico (Dynamic Link Library – DLL) de domínio público, também desenvolvida pela U.S. EPA. Esta permite fazer chamadas às funções do aplicativo EPANET por aplicativos desenvolvidos por terceiros, em diversas linguagens de programação. Neste desenvolvimento foi empregada para simulação hidráulica a partir de um arquivo de dados fornecido no formato INP e obter as vazões nas tubulações e a matriz de fração de água a ser utilizada.
- *Matlab © versão 2013b* – aplicativo comercial desenvolvido pela MathWorks é uma linguagem de alto nível e ambiente iterativo para computação numérica, visualização e programação. A versão utilizada é licenciada para o Laboratório de Hidráulica Computacional da FEC Unicamp. Foi utilizado como ambiente de programação das rotinas desenvolvidas, chamadas a DLL do EPANET e para a visualização de resultados.

A ferramenta computacional desenvolvida foi dividida em sub-rotinas, na forma de funções, como “scripts”, na forma padrão do Matlab, em arquivos independentes com extensão M. As funções desenvolvidas estão apresentadas no ANEXO A e são identificadas pelos nomes que são utilizados para a sua chamada. São elas:

- 1) *Principal.M* – Rotina principal que faz chamadas as demais rotinas e apresenta a solução, localizando os nós de monitoramento no desenho da topologia.

- 2) *M_Frac_Agua.M* – função que obtém da matriz de fração de água da rede analisada a partir de um conjunto de dados de entrada.
- 3) *M_Cobertura.M* – função que obtém da matriz de cobertura da rede analisada a partir de um conjunto de dados de entrada.
- 4) *F_Objetivo.M* – Rotina que avalia a função objetivo e a associa a aptidão de cada indivíduo da população em cada geração.
- 5) *Pop_Inicial.M* – Rotina que gera a população inicial para o AG.
- 6) *AG.M* – Rotina que reúne todos os procedimentos envolvidos na otimização baseada em algoritmo genético; seleção, cruzamento (crossover) e mutação.

Além das rotinas desenvolvidas especificamente para esta pesquisa também foi utilizada uma função desenvolvida por terceiros. Esta função, denominada `readColData`, destina-se a ler dados de arquivos tabulados na forma de coluna em formato texto. A rotina foi obtida em <http://web.cecs.pdx.edu/~gerry/MATLAB/plotting/examples/readColData.m>, sítio da “Portland State University”. Também foi empregada a biblioteca denominada EPANET MATLAB Toolkit, desenvolvida por Demetrios Eliades, disponível no sítio <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25100-epanet-matlab-toolkit>. Este toolkit fornece rotinas que facilitam chamar o EPANET toolkit pelo MATLAB.

Os aspectos principais de cada uma das funções desenvolvidas serão apresentados e, no intuito de demonstrar e avaliar, as funcionalidades de cada uma delas, será empregado como exemplo a rede simples da Figura 1. Cabe ressaltar que os valores apresentados de vazões nas tubulações pelos autores Lee e Deininger (1992) foram fixados, ou seja, não foram fornecidos os dados das tubulações como; diâmetros, comprimentos e rugosidade, que resultam as vazões apresentadas. Isso provavelmente decorre do fato dos autores não terem empregado um simulador hidráulico para a solução do problema (estavam focados na introdução do conceito de cobertura de demanda). Como o desenvolvimento proposto por esta pesquisa objetivou acoplar o simulador hidráulico ao modelo de otimização, por necessidade de avaliar o modelo, foram empregados dados que permitiram obter valores de vazões nas tubulações os mais próximos possíveis dos apresentados na Figura 1. Para a simulação hidráulica também foi necessário fixar um ponto de carga conhecida. Isto foi obtido com a inclusão de um reservatório de nível constante no nó 1, de entrada. Foi adotado como nível de referência para o reservatório o valor 100 m. O resultado após

a adequação dos dados das tubulações, por tentativa e erro, está apresentado na Figura 3, obtida como cópia de tela do programa EPANET, após o processamento dos dados do arquivo ANEXO B, item 1.

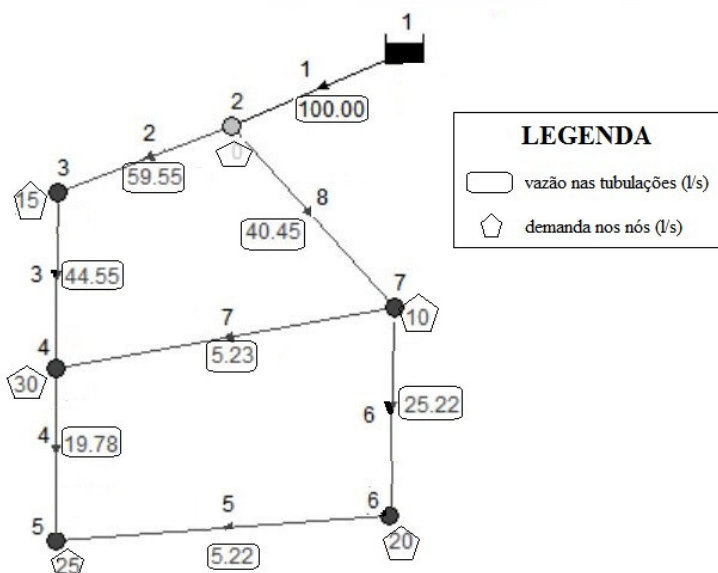


Figura 3 - Resultado de simulação utilizando o programa EPANET – Rede da figura 1

4.1 ROTINA PRINCIPAL.M

A rotina principal é a rotina que faz chamada a todas as demais rotinas desenvolvidas, a rotina de leitura de dados via coluna e a chamada ao EPANET Toolkit. Ela foi enumerada por blocos para o acompanhamento do processamento que será feito pela listagem de execução apresentada posteriormente. Os blocos mencionados são.

- 1) *Limpeza da tela e memória* – Esta parte da rotina limpa o espaço de trabalho para impressão dos resultados e gráficos e limpa a memória alocada para armazenar os resultados dos procedimentos de cálculo.
- 2) *Dados de entrada* – Nesta parte da rotina são fornecidos os dados para cada simulação. Esta parte deverá ser editada para cada condição simulada. A entrada de dados foi dividida nas seções:

- a) *Nome dos arquivos de dados* – Neste local devem ser fornecidos os nomes dos arquivos .inp com os dados da rede e .dat com as coordenadas dos nós.
 - b) *Critério de cobertura e número de estações a alocar* – nesta seção deve ser fornecida a porcentagem de cobertura adotada e o número de estações que se pretende alocar.
 - c) *Parâmetros para o Algoritmo Genético* – nesta seção são fornecidos o número de gerações, número de indivíduos na população e a probabilidade de mutação.
- 3) *Chamadas ao EPANET toolkit* – Esta parte da rotina faz a iteração com o simulador hidráulico de EPANET e foi dividida nas seções:
- a) *Abre o EPANET toolkit* – faz a inicialização do EPANET toolkit, via EPANET MATLAB toolkit.
 - b) *Obtém informações sobre a rede analisada* – Obtém o número de nós e de elementos da rede analisada.
 - c) *Obtém informações dos nós* – Obtém o índice dos nós.
 - d) *Obtém informações relacionadas aos tubos* – Obtém informações relacionadas às tubulações como a identificação dos nós de montante e jusante
 - e) *Le o arquivo de coordenadas* – Lê o arquivo .DAT com as coordenadas dos nós, obtido da seção [COORDINATES] de um arquivo com extensão INP exportado pelo EPANET.
 - f) *Define os limites para a janela de desenho da rede* – Define os limites da área de desenho a partir dos valores máximos e mínimos das coordenadas dos nós.
 - g) *Laço de desenho dos tubos e alocação da matriz de vazão* – traça linhas interligando os nós de montante e jusante dos tubos para o desenho da rede. No mesmo laço que varre os tubos aloca as vazões calculadas pelo modelo hidráulico em uma matriz de vazão.
 - h) *Fecha o EPANET toolkit* – Fecha o módulo de cálculo do EPANET, todas as informações necessárias foram armazenadas em variáveis que serão utilizadas pelo otimizador e pelos gráficos.

- 4) *Laço para desenho de texto de identificação dos nós* – Laço que redesenha os nós, escreve a numeração destes e coloca o título na janela de desenho da rede.
- 5) *Impressão na tela dos dados de entrada* – Esta rotina imprime na tela os valores dos dados de entrada atribuídos pelo usuário, apresentados no item entrada de dados.
- 6) *Procedimento de cálculo* – Procedimentos de calculo da rotina de otimização para a locação das estações de monitoramento. Está dividido nas seções.
 - a) *Vetor de demandas* – coloca o vetor de demandas, lido no arquivo de dados, na forma transposta apropriada.
 - b) *Obtém a matriz de fração de água* – Chama a rotina de obtenção da matriz de fração de água.
 - c) *Obtenção da matriz de cobertura* – Chama a rotina de obtenção da matriz de cobertura.
 - d) *Gera população Inicial* – Chama rotina que gera uma população inicial de indivíduos que será utilizada para iniciar a rotina de AG.
 - e) *Calcula a função objetivo da população inicial* – Chama a rotina que faz o Cálculo da função objetivo para cada um dos indivíduos da população inicial gerada.
 - f) *Prepara para entrar no laço do AG* – faz as inicializações antes de chamar o laço do AG.
 - g) *Laço de iteração do AG* – laço que faz a evolução do AG ao longo das gerações.
 - h) *Pega índice do melhor indivíduo* – O melhor indivíduo de todas as gerações é armazenado no laço anterior. Esta rotina identifica este indivíduo e, obtém os índices dos nós que definem as estações de monitoramento.
 - i) *Desenha a solução encontrada* – Com os nós de monitoramento identificados e conhecidas as suas coordenadas estes são desenhados sobre o desenho da rede com um diâmetro maior e em cor amarela para distingui-los dos demais nós.

- j) *Gera gráfico da evolução* – Traça um gráfico ao lado do desenho da rede com a evolução da função objetivo do melhor indivíduo ao longo das gerações e do ajuste médio da população. Apresenta a demanda coberta, a demanda total injetada ao sistema e a porcentagem de demanda coberta.
- k) *Gera lista de nós cobertos por cada estação* – Para cada estação de monitoramento encontrada é gerada uma lista com todos os nós que são cobertos por esta para o critério de fração de água adotado.

Empregando o comando “publish” do Matlab foi feito o acompanhamento passo a passo da rotina Principal, identificando cada um dos seus blocos e o resultado de cada seção. Foi utilizada a numeração pré-estabelecida de cada item, para acompanhamento do exemplo.

1) Limpeza de tela e de memória

```
clc; %Limpa tela
clear all; %Limpa variáveis
```

2) Dados de entrada

- A - Nome dos arquivos de dados

```
Redefile = 'Exemplo1.inp'; %Nome do arquivo de dados .inp do Epanet
Coordfile = 'Exemplo1.dat'; %Arquivo com coordenada dos nos extraído do inp
```

- B - Critério de fração de água e numero de estações a locar

```
criterio = 0.5; %criterio de fração de água
num_est = 2; %Numero de estações de monitoramento
```

- C - Parâmetros do AG

```
NGen = 30; %Numero de gerações
ind_pop = 6; %Numero de individuos na população
prob_mut = 0.05; %Probabilidade de mutação
```

3) Chamadas ao EPANET Toolkit

- A – Abre o toolkit do Epanet

```
epanetloadfile(Redefile); %Abre arquivo do Epanet
[Q] = getdata('EN_FLOW'); %Vetor da vazão
Per = 1; %Periodo Desejado
```

- B - Obtém informações da rede analisada

```
NoCont = getdata('EN_NODECOUNT'); %obtem numero de nós da rede
LinkCont = getdata('EN_LINKCOUNT'); %Obtem numero de elementos da rede
ND = NoCont; %Indica a dimensao da matriz no. nos x no. de nos
MQ = zeros(ND,ND); %Gera matriz de vazão nula
DM=getdata('EN_BASEDEMAND'); %Obtem vetor de demandas e armazena em DM
```

- C - Informações dos nós obtidas do arquivo de entrada INP do Epanet

```
for i=1:ND
Nix(i) = i; %Gera um vetor de indices dos nós
[errorcode, N] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeid',i,'');
Nid(i) = str2num(N); %Gera um vetor de identificação id dos nós
end
```

- D - Informações relacionadas aos tubos obtidas do arquivo INP

```
for i=1:LinkCont
[errorcode, N1,N2] = calllib('epanet2', 'ENgetlinknodes', i,0,0);
VN1i(i)= N1; VN2i(i) = N2; %Vetores com indice dos nós inicio e fim
[errorcode, Nu] = calllib('epanet2', 'ENgetlinkid',i,'');
VNu(i) = str2num(Nu); %Vetor com Numero do elemento
[errorcode, Na] = calllib('epanet2','ENgetnodeid',N1, '');
VN1(i) = str2num(Na); %Vetor com numero do nó inicio
[errorcode, Nb] = calllib('epanet2','ENgetnodeid',N2, '');
VN2(i) = str2num(Nb); %Vetor com numero do nó jusante
[errorcode, N1i] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeindex',num2str(VN1(i)),0);
[errorcode, N2i] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeindex',num2str(VN2(i)),0);
N11(i) = str2num(N1i); N22(i) = str2num(N2i);
end
```

- E - Le arquivo de coordenada dos nós da rede do arquivo DAT que contém a parte referente às coordenadas do arquivo Inp do Epanet

```
[labels,x,y] = readColData(Coordfile,3,1);
% Obtem os valores extremos das coordenadas lidas
[xmax,ind_xmax] = max(y(:,1));
[xmin,ind_xmin] = min(y(:,1));
[ymax,ind_ymax] = max(y(:,2));
[ymin,ind_ymin] = min(y(:,2));
```

- F - Definem coordenadas da janela para o desenho da rede

```
xmin = xmin-abs(xmax-xmin)*0.1;
xmax = xmax+abs(xmax-xmin)*0.1;
ymin = ymin-abs(ymax-ymin)*0.1;
ymax = ymax+abs(ymax-ymin)*0.1;
```

- G - Laço para desenho dos tubos e alocação da matriz de vazões

```
subplot(1, 2, 1);
axis([xmin xmax ymin ymax])
axis off
% Faz o Desenho da rede
hold on
for i=1:LinkCont
Naa = find(Nid==N11(i));
    k = 1;
    while (N11(i) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    x1p = y(k,1); y1p =y(k,2);
    Nbb = find(Nid==N22(i));
    k = 1;
    while (N22(i) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    x2p = y(k,1); y2p =y(k,2);
    line([x1p x2p], [y1p,y2p], 'Color',[.0 .0 .0]); %Desenha as tubulações
if Q(Per,i) > 0.0
    MQ(Nbb,Naa)= abs(Q(Per,i));
else
    MQ(Naa,Nbb)= abs(Q(Per,i));
end
end;
```

(desenho gerado omitido)

- H - Fecha o Epanet tool kit

```
epanetclose();
```

4) Laço para desenho e texto dos nós

```
subplot(1, 2, 1);
axis([xmin xmax ymin ymax])
axis off
% Faz o Desenho da rede
hold on
% Redesenha nos e coloca o titulo principal
plot(y(:,1),y(:,2),'o','Linewidth',1,...
      'MarkerEdgeColor','k',...
      'MarkerFaceColor','k',...
      'MarkerSize',4);
    delx = (xmax-xmin)*0.02;
    dely = (ymax-ymin)*0.04;
text(delx+y(:,1),dely+y(:,2),num2str(Nid(:)),...
      'align','left','fontSize',10);
```

```
'HorizontalAlignment','left')
title('*** LOCAÇÃO DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO ***')
```

*** LOCAÇÃO DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO ***

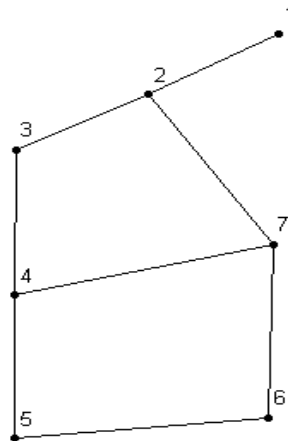


Figura 4. Desenho da rede gerado

5) Impressão na tela dos dados de entrada

```
fprintf('\n===== Relatório =====\n');
fprintf('= Arquivo:                %s \n', Redefile);
fprintf('= Numero total de nós:        %d          \n', ND);
fprintf('= Numero total de elementos:    %d          \n', LinkCont);
fprintf('= Numero de estações a alocar:  %d          \n', num_est);
fprintf('= Porcentagem de cobertura:     %d          \n', criterio*100);
fprintf('===== \n');
```

```
===== Relatório =====
= Arquivo:                Exemplo1.inp
= Numero total de nós:        7
= Numero total de elementos:    8
= Numero de estações a alocar:  2
= Porcentagem de cobertura:     50
=====
```

6) Início do Procedimento de cálculo

- A - Vetor das demandas

```
prt = DM    % Vetor auxiliar utilizado para impressão do vetor das demandas
% Obtem vetor de demandas nodais na forma apropriada
DEM = DM'; %vetor demandas em coluna;
```

0 15 30 10 25 20 0

- **B - Obtém a matriz de fração de água**

```
[f] = M_FRAC_AGUA (ND, MQ);           %Gera matriz da fração de água
clear prt;      %Limpa vetor auxiliar
prt = f        %Imprime matriz de fração de água
```

1.0000	1.0000	0.8949	1.0000	0.7082	1.0000	0
0	1.0000	0.8949	0	0.7082	0	0
0	0	1.0000	0	0.7913	0	0
0	0	0.1051	1.0000	0	1.0000	0
0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0.2087	1.0000	0
0	0	0	0	0	0	1.0000

- **C - Obtém a Matriz de cobertura**

```
[f] = MAT_COBERTURA (ND,f,criterio); %Gera matriz de cobertura global
clear prt;      %Limpa vetor auxiliar
prt = f        %Imprime matriz de cobertura
```

1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1

- **D - Gera População inicial**

```
[POP] = POP_INICIAL(ind_pop, num_est,ND);%Gera população inicial aleatória
%Limpa vetor auxiliar
for i=1:ind_pop
    clear prt
    prt = POP(i).cromossomo %Mostra indivíduos da população inicial
end
```

3	1
2	1
4	1
1	4
1	3
6	2

- **E - Calcula a função Objetivo para todos os indivíduos da população inicial**

```
[vajuste,POP] = F_OBJETIVO (ind_pop, f, POP, ND,num_est,DEM); %Calcula função objetivo da pop.
clear prt;      %Limpa vetor auxiliar
prt = vajuste   %Imprime valor da função objetivo da população inicial
```

45 15 10 10 45 45

- F - Prepara para entrar no Laço do AG

```
maxmax = 0;
new_gera = 0;           %zera contador de gerações
disp('Geração Melhor Ajuste    Media Geração    Melhor Indivíduo')
```

- G - Inicio do laço das gerações do AG

```
while new_gera < NGen
new_gera = new_gera+1;
gerac(new_gera) = new_gera;           %Armazena vetor para plotagem
[POP] = AG (num_est, ND, ind_pop, POP, probab_mut);           %gera nova população
[vajuste,POP] = F_OBJETIVO (ind_pop, f, POP, ND,num_est,DEM); %Avalia população
media(new_gera) = mean(vajuste);       %Media do vetor auxiliar das funções objetivos
[maxi,ind_max] = max(vajuste);          %Localiza o maximo e o indice da melhor
maximo(new_gera) = maxi;                %Valor do melhor indivíduo
if maxmax < maxi
    maxmax = maxi;
    Melhor_de_todos = POP(ind_max).cromossomo;
end
Melhor_individuo = POP(ind_max).cromossomo; %Cromossomo da melhor solução
fprintf('    %d    %15.4f %14.4f ',new_gera, POP(ind_max).ajuste, media(new_gera));
for i=1:num_est-1
    fprintf(' %d ',Nid(Melhor_individuo(i)));
end
fprintf(' %d \n',Nid(Melhor_individuo(num_est)));
end
% Fim do processamento das gerações
```

1	80.0000	60.8333	7	5
2	80.0000	80.0000	7	5
3	80.0000	61.6667	7	5
4	80.0000	68.3333	7	5
5	80.0000	50.8333	7	5
6	80.0000	70.0000	7	5
7	100.0000	83.3333	6	5
8	100.0000	90.0000	6	5
9	100.0000	91.6667	6	5
10	100.0000	90.8333	6	5
11	100.0000	88.3333	6	5
12	100.0000	80.8333	6	5
13	100.0000	90.0000	6	5
14	100.0000	83.3333	6	5
15	100.0000	85.0000	6	5
16	100.0000	83.3333	6	5
17	100.0000	85.0000	6	5
18	100.0000	88.3333	6	5
19	100.0000	90.8333	6	5
20	100.0000	87.5000	6	5

21	100.0000	100.0000	6	5
22	100.0000	95.0000	6	5
23	100.0000	74.1667	6	5
24	100.0000	83.3333	6	5
25	100.0000	83.3333	6	5
26	100.0000	83.3333	6	5
27	100.0000	88.3333	6	5
28	100.0000	88.3333	6	5
29	100.0000	100.0000	6	5
30	100.0000	88.3333	6	5

- H - Obtém Índice do melhor indivíduo para mostrá-lo no gráfico

```
for i=1:num_est
    k = 1;
    while (Nid(Melhor_de_todos(i)) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    xpl(i) = y(k,1); ypl(i) = y(k,2);
end
```

- I - Desenha solução encontrada

```
subplot(1, 2, 1);
hold on
plot(xpl,ypl,'o','Linewidth',1,...
      'MarkerEdgeColor','y',...
      'MarkerFaceColor','y',...
      'MarkerSize',12)
```

- J - Gera Gráfico de evolução

```
%plota grafico dos ajustes do melhor individuo e da média da população
subplot(1, 2, 2);
plot(gerac,maximo,gerac,media);
axis([1 NGen 0 maxmax*1.1])
title('Evolução da convergência');
lgd=legend('máximo','média');
set(lgd,'Location','Best');
xlabel('Numero de gerações');
ylabel('Função objetivo');
```

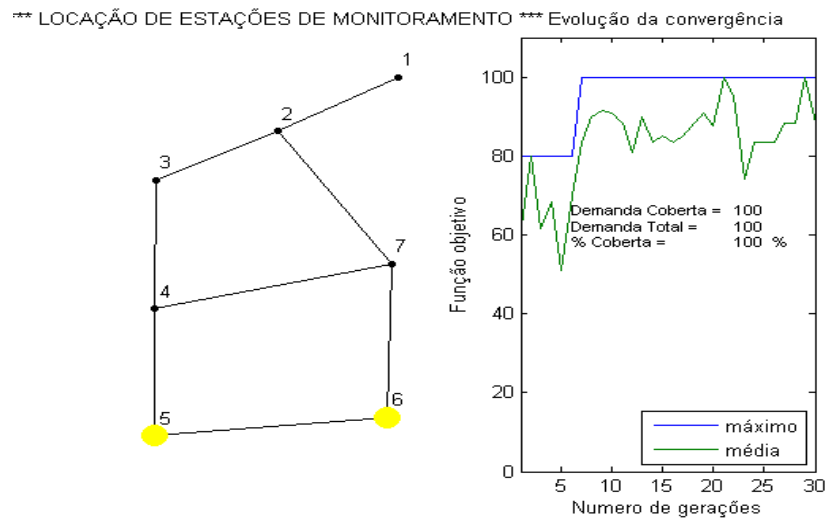



Figura 5 – Solução gerada pela rotina

- K - Gera lista de nós cobertos por cada estação

```
%Apresenta os nós cobertos por cada uma das estações encontradas
fprintf(' \n');
fprintf(' \n ');
fprintf('===== \n ');
fprintf('EST. NOS COBERTOS \n');
fprintf('===== \n ');
for i=1:num_est
    fprintf('%4d', Nid(Melhor_de_todos(i)));
    for L = 1:1:ND
        if f(L, Nid(Melhor_de_todos(i))) == 1
            fprintf('%4d', L)
            end
        end
        fprintf(' \n ');
    end
    fprintf('===== \n ');
```

```
=====
EST. NOS COBERTOS
=====
6 1 4 6
5 1 2 3 5
=====
```

Listagem 1 - "Publish" com a execução da rotina principal

5. RESULTADOS

Neste capítulo foram feitas diversas análises empregando a ferramenta desenvolvida. Optou-se por aplicá-la a estudos de casos apresentados na literatura que trata do tema, mencionados na referência bibliográfica. Isso permitiu verificar e validar a ferramenta. Os casos analisados são de redes hipotéticas de distribuição de água para verificar a influência dos dados de entrada: variação das demandas dos nós e critério de fração de água.

5.1 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS

O primeiro caso analisado refere-se à rede hipotética apresentada por Al-Zahrani e Moied (2003), mostrada na Figura 6. Esta rede possui três reservatórios de água (A, B e C), quinze nós enumerados de 1 a 15 e vinte e três tubulações enumeradas de 1 a 23.

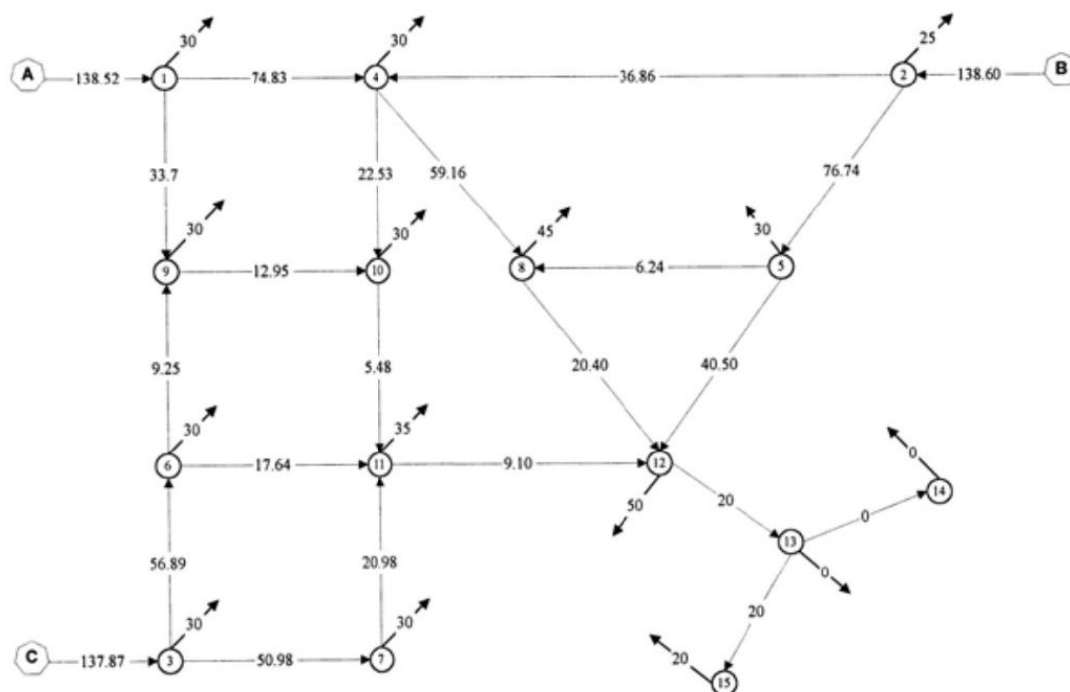


Figura 6: Rede hipotética de distribuição de água – Estudo de caso 1.
Fonte: Al-Zahrani e Moied (2003).

Esta rede foi também analisada por Yoshikawa (2011) que empregou a simulação em período extensivo e o simulador de qualidade de água denominado EPANET-MSX, que é uma variante do programa EPANET e, também desenvolvida pela U.S. EPA, que permite a análise de múltiplas espécies e reações entre estas.

Em seu estudo, Yoshikawa observou que nós críticos referentes à qualidade de água podiam ser identificados e que estes seriam candidatos a estações de monitoramento e que a condição crítica da qualidade varia ao longo do período com a variação da demanda. Embora a pesquisa desenvolvida por este não tenha sido sobre a localização de estações de monitoramento, concluiu que o conjunto de estações de monitoramento identificado por Al-Zahrani e Moied (2003), poderia não contemplar as alterações decorrentes das demandas ao longo de um período. Tal constatação motivou o estudo de caso, em que, foi realizada a localização ótima de estações de monitoramento considerando 4 cenários que se diferenciam da seguinte forma: *cenário 1*, caracterizado pela a demanda média multiplicada por 1.6, *cenário 2*, que considera a demanda média multiplicada por 1.2, *cenário 3*, que considera a demanda média multiplicada por 0.8 e *cenário 4*, com a demanda média multiplicada por 0.4. Cabe ressaltar que não se trata de análise em período extensivo já que os reservatórios se mantêm a nível constante, mas sim, simula a condição de quatro diferentes injeções de água fornecidas pelas Estações de Tratamento de Água.

O cenário 1 representa o horário do dia em que ocorre o maior consumo de água e o cenário 4 representa o horário do dia em que ocorre o menor consumo. Os demais se referem a condições intermediárias. Além dos cenários mencionados foi analisado um cenário denominado 0, que indica a condição original apresentada na literatura, por seus autores.

Foram utilizados os seguintes dados de entrada: número de gerações igual a 45; número de nós candidatos a estações de monitoramento igual a 4; número de indivíduos da população igual a 20; probabilidade de ocorre mutação igual a 0,07. Observando que o conjunto de estações de monitoramento também poderia ser influenciado pelo critério fração de água definido pelo usuário, efetuou-se sua variação de 0.40 a 0.70.

Cenário 0 – Este cenário foi analisado, pois representa a situação proposta por Al-Zahrani e Moied (2003), permitindo assim a avaliação direta da ferramenta desenvolvida. Como alguns dados da rede não foram informados, como os das tubulações, estes foram adotados e calibrados por tentativa e erro, para que resultassem em vazões as mais próximas das fornecidas pelos

autores. Os nós originariamente chamados de A, B e C, foram substituídos por reservatórios (Carga fixa) e chamados de 20, 21 e 22 respectivamente. Os resultados apresentados na Figura 7, obtida por simulação usando o programa EPANET 2.0 se aproximam bastante dos valores apresentados pelos autores (Figura 6), sendo considerados adequados para as comparações de resultados.

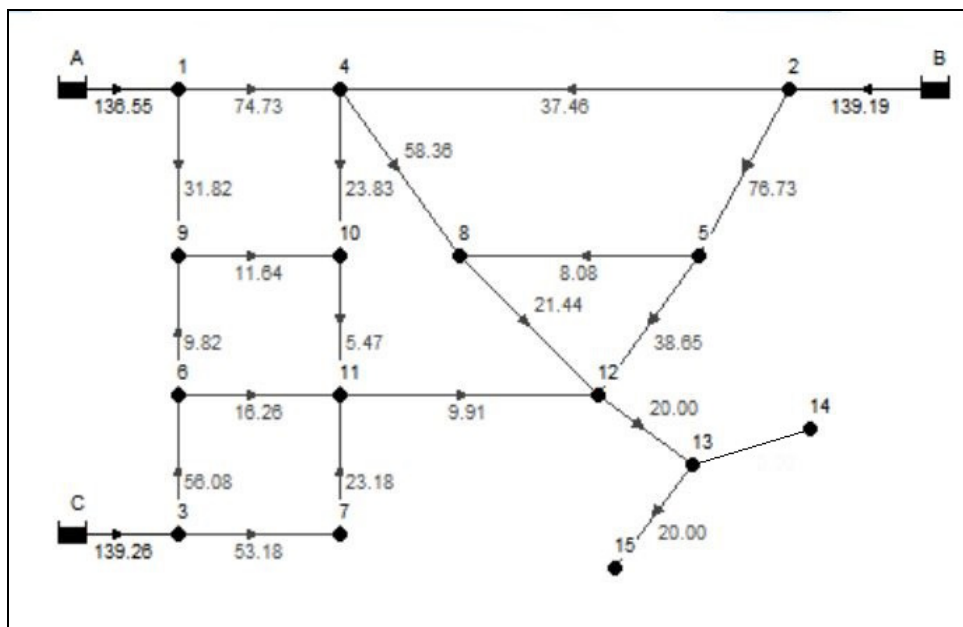


Figura 7: Simulação hidráulica para as demandas originais.

Para este cenário foram utilizados os seguintes dados de entrada.

```
===== Relatório =====
= Arquivo: Redehip_0.inp
= Numero total de nós: 18
= Numero total de elementos: 23
= Numero de estações a alocar: 4
= Porcentagem de cobertura: 50
=====
% Critério de fração de água e numero de estações a locar
criterio = 0.5; %criterio de fração de água
num_est = 4; %Numero de estações de monitoramento (deve ser par)
NGen = 45; %numero de gerações
ind_pop = 20; %Numero de individuos na população
prob_mut = 0.07; %Probabilidade de mutação
```

Listagem 2 – Dados de entrada para rotina Principal

Os resultados após o processamento estão indicados na Figura 8 e indicam os mesmos nós de monitoramento obtidos por Al-Zahrani e Moied (2003), a saber, os nós 8, 10, 11 e 15, que cobrem os nós indicados na Tabela 11.

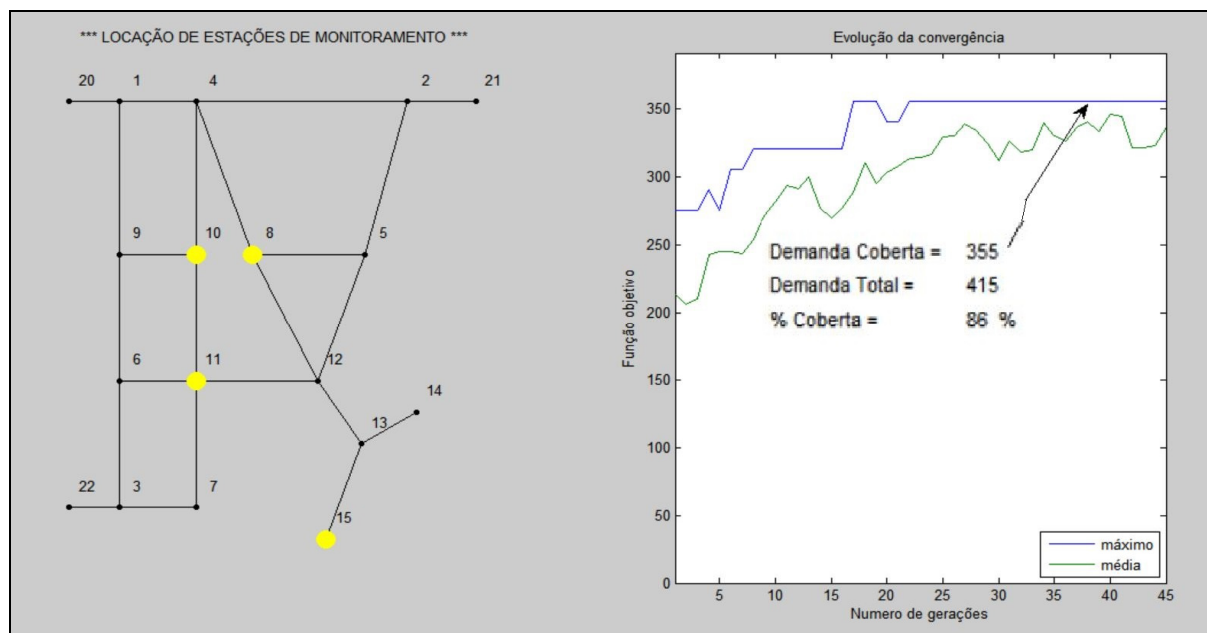


Figura 8 – Resultado para o cenário 0

Tabela 11 – Nós cobertos pelas estações encontradas

=====					
EST. NOS COBERTOS					
=====					
11	3	7	11		
15	2	5	12	13	15
8	1	4	8		
10	1	4	10		
=====					

Além da solução apresentada pelos autores o algoritmo encontrou outra com igual percentual de cobertura, como ilustra a Figura 9 e a Tabela 12.

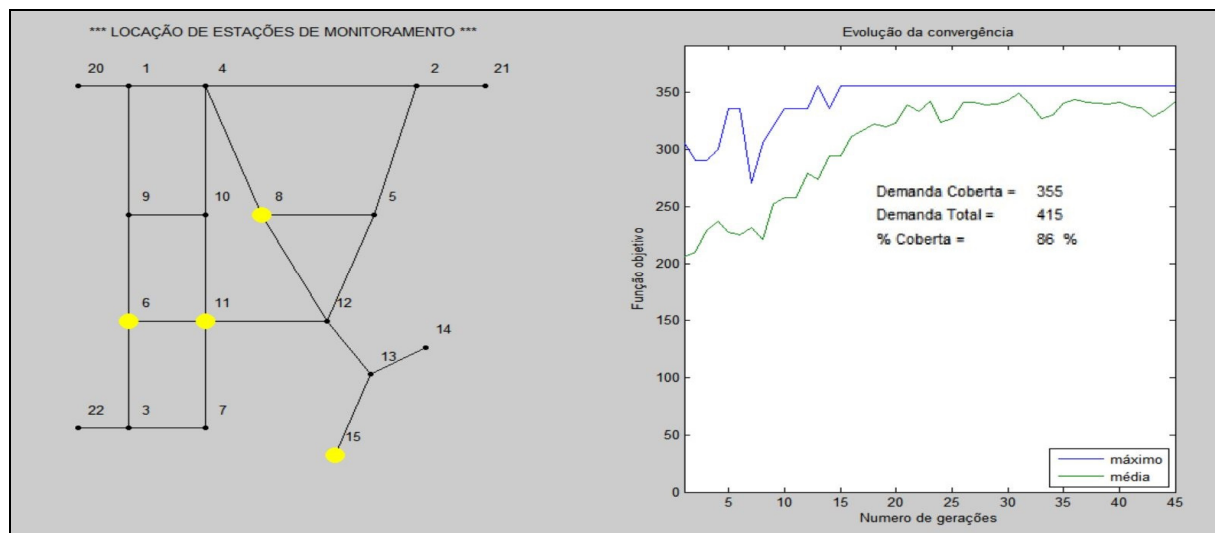


Figura 9 – Segunda solução encontrada para o cenário 0

Tabela 12 – Nós cobertos pelas estações encontradas – Segunda Solução

EST. NOS COBERTOS					
11	3	7	11		
8	1	4	8		
15	2	5	12	13	15
6	3	6			

Estes resultados comprovam a funcionalidade da ferramenta e sua exatidão. Além disso, evidencia um fato importante que não havia sido mencionado na literatura; o de que um problema pode possuir mais de uma solução ótima que fornece o mesmo percentual de cobertura, no caso as soluções apresentam 86% de cobertura da água injetada ao sistema, para um critério de fração de água igual a 0.50. As soluções encontradas cobrem a rede utilizando “esquemas” diferentes como ilustra a Figura 10. Desta forma para explorar as possibilidades de soluções é recomendável a execução da ferramenta mais de uma vez, para que se possam encontrar soluções alternativas de mesma eficiência (mesmo valor de ótimo), caso estas ocorram. Esta busca é bastante facilitada com a aplicação dos AG’s: verifica-se na listagem dos melhores indivíduos encontrados em cada geração, a ocorrência de ótimos similares, como mostra a Listagem 3, extraída de relatório produzido pelo modelo desenvolvido. Cabe observar que a ferramenta para apresentar a solução do problema retém o melhor individuo encontrado em sua primeira ocorrência. Assim no caso da listagem apresentada a solução reproduzida no esquema da rede seria a referente aos nós 10, 8, 11 e 15.

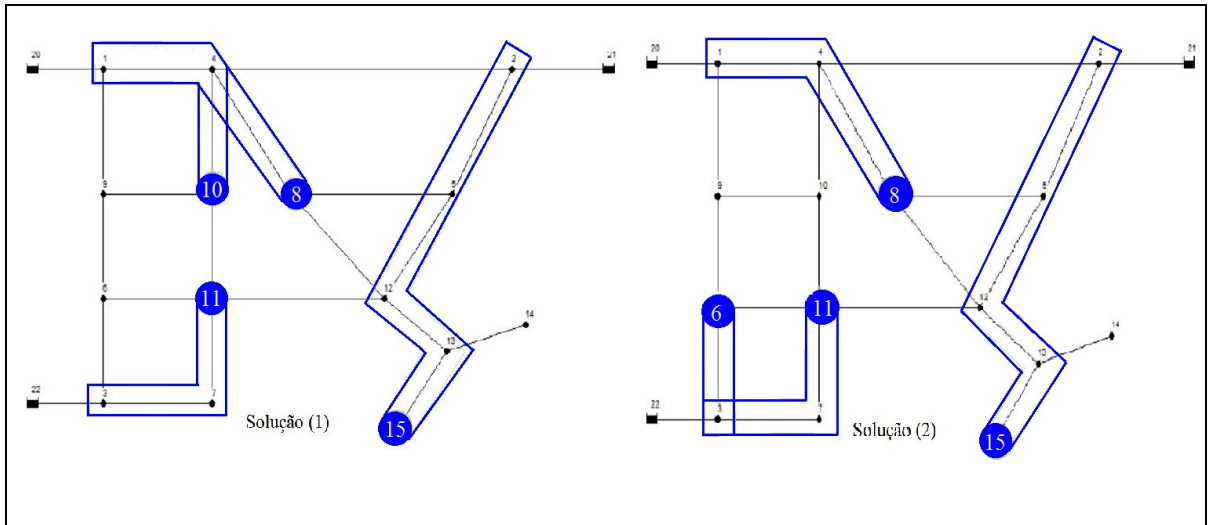


Figura 10 – Ilustração dos nós cobertos para cada uma das soluções

Geração	Melhor Ajuste	Media Geração	Melhor Indivíduo			
...						
20	355.0000	319.5000	10	8	11	15
21	355.0000	325.2500	10	8	11	15
22	355.0000	312.0000	10	8	11	15
23	355.0000	322.5000	10	8	11	15
24	355.0000	332.0000	10	8	11	15
25	355.0000	324.2500	10	8	11	15
26	355.0000	332.2500	10	8	11	15
27	355.0000	334.2500	10	8	11	15
28	355.0000	333.7500	10	8	11	15
29	355.0000	345.5000	10	8	11	15
30	355.0000	337.7500	10	8	11	15
31	355.0000	346.7500	10	8	11	15
32	355.0000	348.5000	10	8	11	15
33	355.0000	349.2500	10	8	11	15
34	355.0000	344.0000	10	8	11	15
35	355.0000	336.7500	10	8	11	15
36	355.0000	348.7500	10	8	11	15
37	355.0000	338.0000	10	8	11	15
38	355.0000	340.5000	10	8	11	15
39	355.0000	343.2500	9	8	11	15
40	355.0000	349.0000	10	8	11	15
41	355.0000	352.0000	10	8	11	15
42	355.0000	348.7500	10	8	11	15
43	355.0000	344.5000	10	8	11	15
44	355.0000	341.7500	10	8	11	15
45	355.0000	311.7500	10	8	11	15

Listagem 3 – Evolução de ajuste das populações ao longo das gerações – Melhores indivíduos

Cenário 1 – 160% da demanda média

Este cenário corresponde à condição em que a demanda é 60% superior à demanda média. A simulação hidráulica para esta situação apresenta os resultados mostrados na **Figura 11**. As análises foram feitas ao variar o critério de fração de água de 0.40 a 0.70.

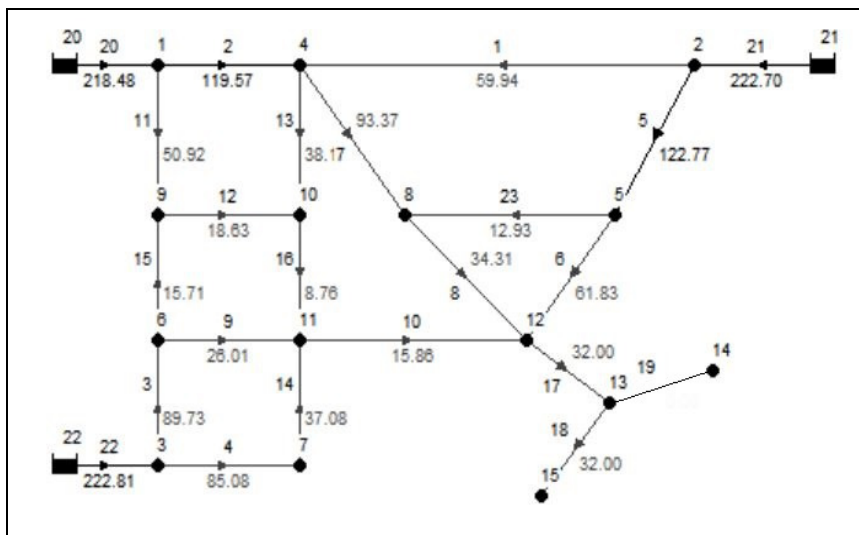


Figura 11. Solução hidráulica - cenário 1

- Critério de fração de água igual a 0.40**

As Figuras 12 e 13 e as Tabelas 11 e 12 mostram duas soluções encontradas para esta condição de cobertura que resultam em 86% de cobertura do total de 668 litros injetados para atender a demanda do sistema nesta condição.

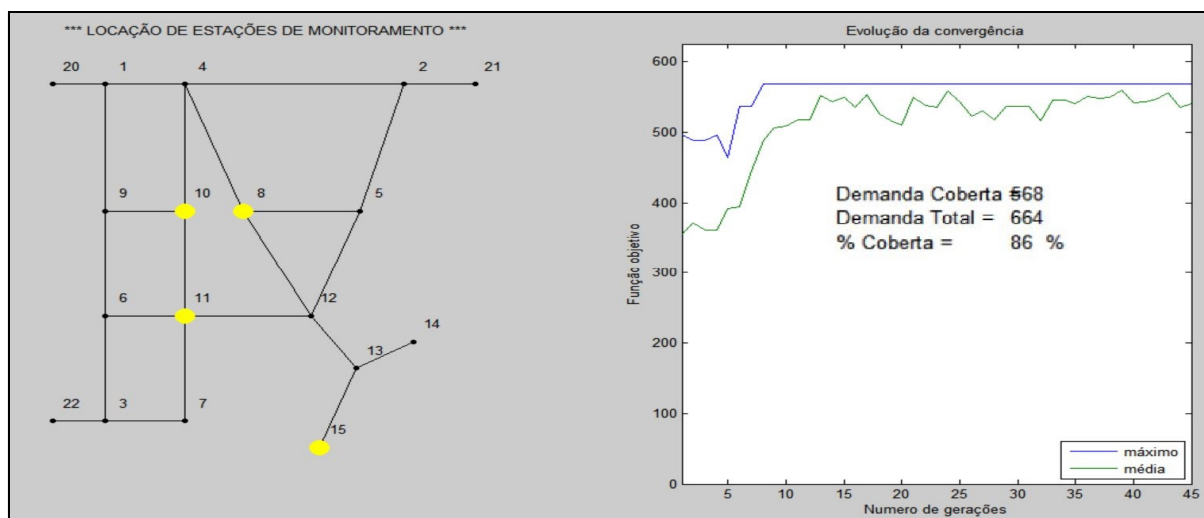


Figura 12 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 1

Tabela 13 - – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 1

EST. NOS COBERTOS					
11	3	7	11		
8	1	2	4	8	
15	2	5	12	13	15
10	1	4	10		

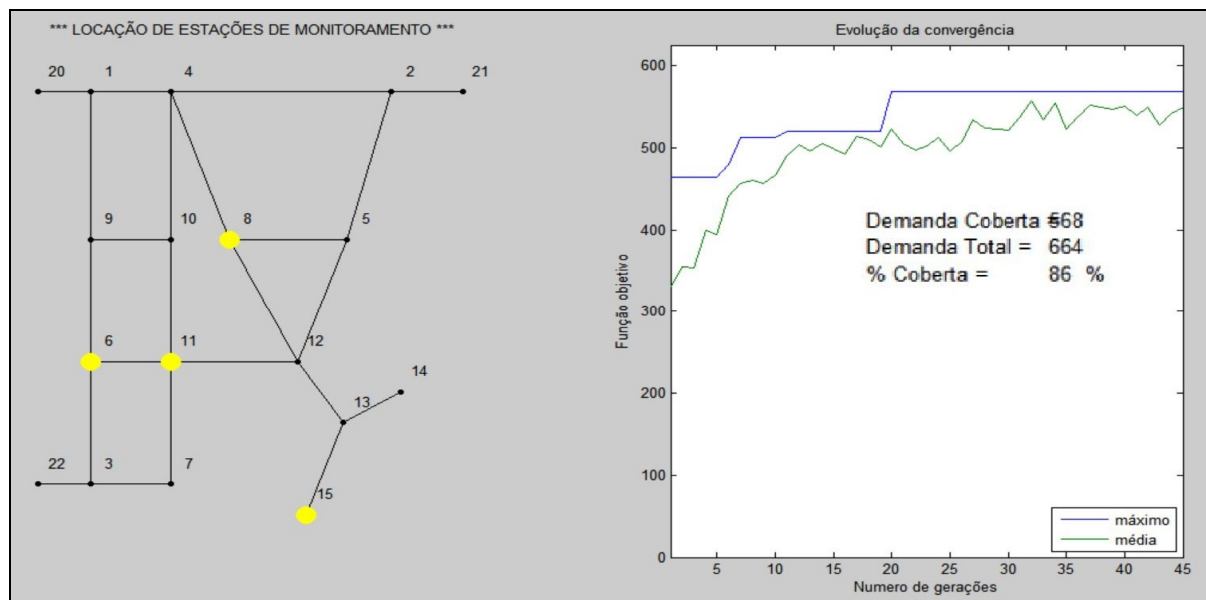


Figura 13 - Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 2

Tabela 14 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.40 – Solução 2

EST. NOS COBERTOS					
8	1	2	4	8	
11	3	7	11		
6	3	6			
15	2	5	12	13	15

Os resultados mostram as mesmas estações encontradas para o cenário 0, entretanto observa-se que a cobertura dos nós é feita de forma distinta pela mudança da condição de cobertura. A porcentagem coberta da demanda total pelas estações não sofreu alterações para esta condição de acréscimo de demanda.

- **Critério de fração de água igual a 0.50**

As Figuras 14, 15 e 16 e as Tabelas 13, 14 e 15 mostram três soluções encontradas para o critério de fração de água igual a 0.50 que resultaram em uma cobertura de 86% da água injetada no sistema.

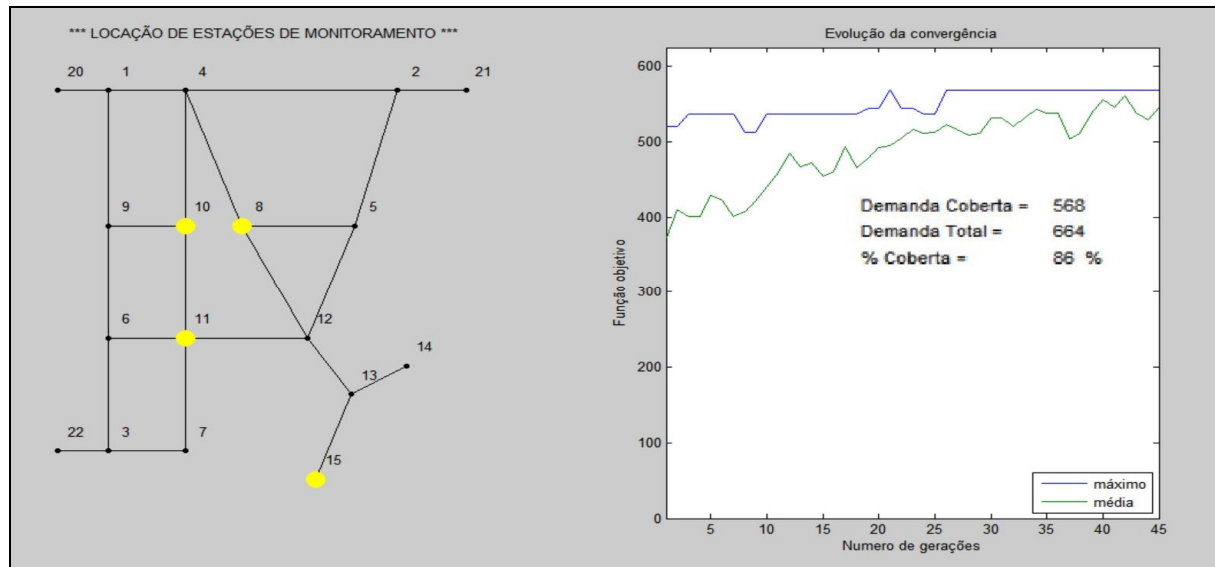


Figura 14 – Cenário 1 - critério de fração de água igual a 0.50 – solução 1

Tabela 15 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 1

EST. NOS COBERTOS					
10	1	4	10		
15	2	5	12	13	15
11	3	7	11		
8	1	4	8		

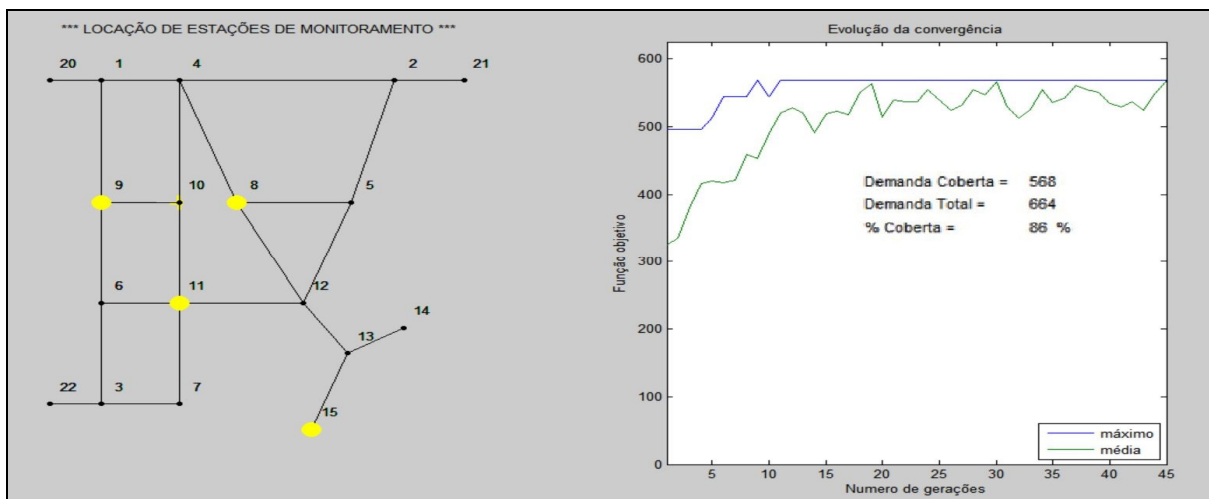


Tabela 16 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 2

EST. NOS COBERTOS					
9	1	9			
15	2	5	12	13	15
8	1	4	8		
11	3	7	11		

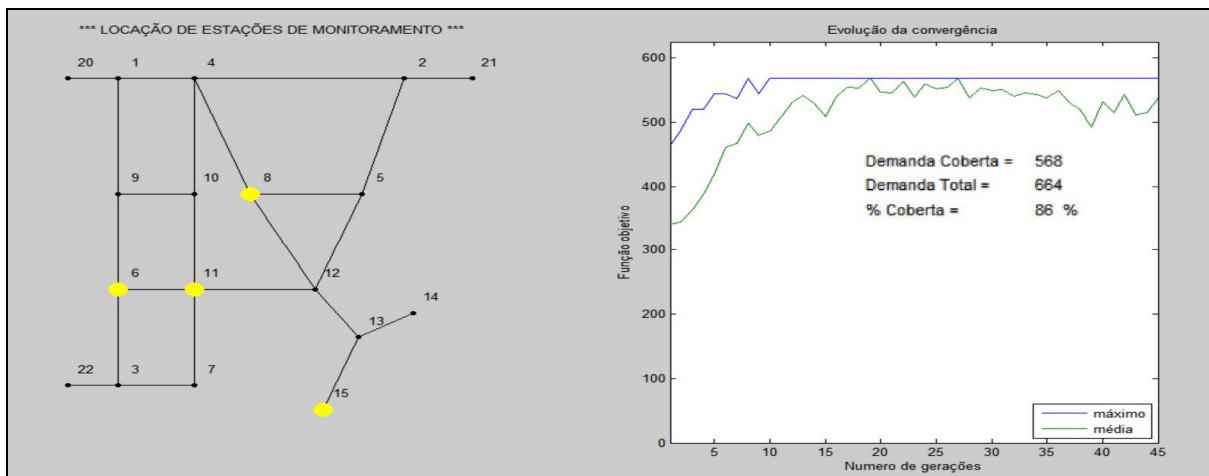


Tabela 17 - Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – Solução 3

=====					
EST. NOS COBERTOS					
=====					
6	3	6			
11	3	7	11		
8	1	4	8		
15	2	5	12	13	15
=====					

É interessante observar que a solução 2 não havia sido encontrada anteriormente (no cenário 0 e cenário 1 com critério de fração de água igual a 0.40), mas deve ser também solução para estes casos. Isto fortalece a afirmação feita anteriormente de que caso se deseje avaliar várias possibilidades de solução deve-se executar o modelo diversas vezes, para certificar-se da ocorrência de soluções alternativas. É fato, entretanto, que qualquer uma das soluções adotadas resulta na mesma eficiência como monitoramento.

Para se evitar repetições de resultados, a partir deste ponto do trabalho apresenta-se apenas uma solução para cada análise, mesmo que possam existir mais de uma.

- **Critério de fração de água igual a 0.60**

A Figura 17 e a Tabela 18 mostram a solução para o cenário 1 considerando nós com critério de fração de água igual a 0.60. Cabe observar que embora a solução encontrada seja a mesma que solução 1, para o critério fração de água igual a 0.50, o critério mais restritivo resultou em 71% de cobertura do total de água injeta na rede neste cenário. Isto é resultado de um menor número de nós serem considerados cobertos. A comparação da Tabela 18 com a Tabela 15, evidencia que os nós 5 e 7 são considerados cobertos no critério de fração de água igual a 0.50, mas não são cobertos no critério igual a 0.60.

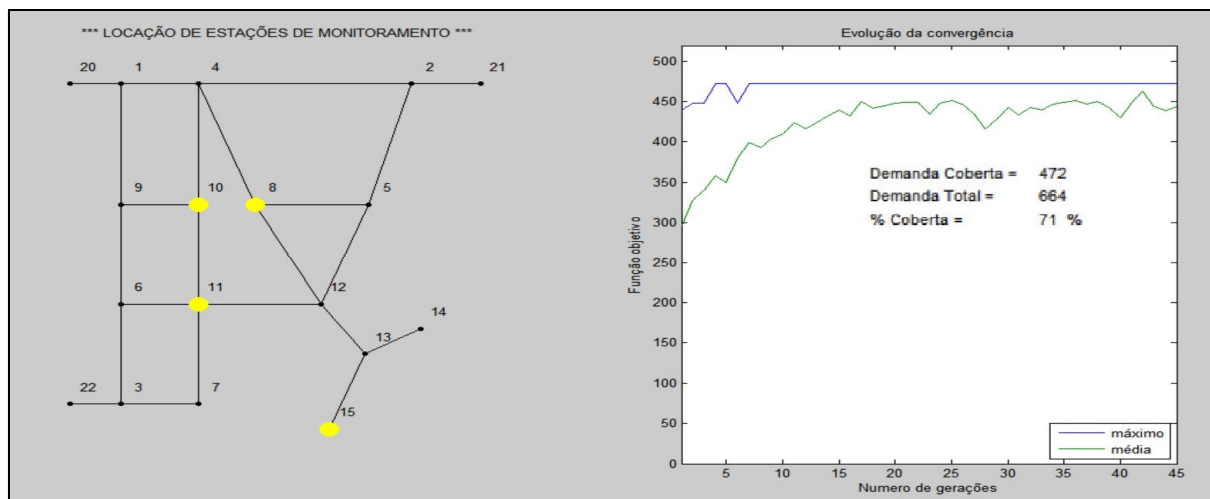


Figura 17– Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.60.

Tabela 18 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.60

EST. NOS COBERTOS				
11	3	11		
15	2	12	13	15
8	4	8		
10	1	4	10	

- **Critério de fração de água igual a 0.70**

A Figura 18 e a Tabela 20 mostram a solução se adotado o critério de fração de água igual a 0.70. Embora a solução encontrada seja a mesma que a obtida para critério igual a 0.50, na solução 2, um menor número de nós é considerado coberto. A comparação da **Tabela 19** com a **Tabela 16** mostra que com o critério igual a 0.70 os nós 2, 5 e 7 não são considerados cobertos. Isto implica que apenas 65% da água injetada no sistema pode ser considerada coberta.

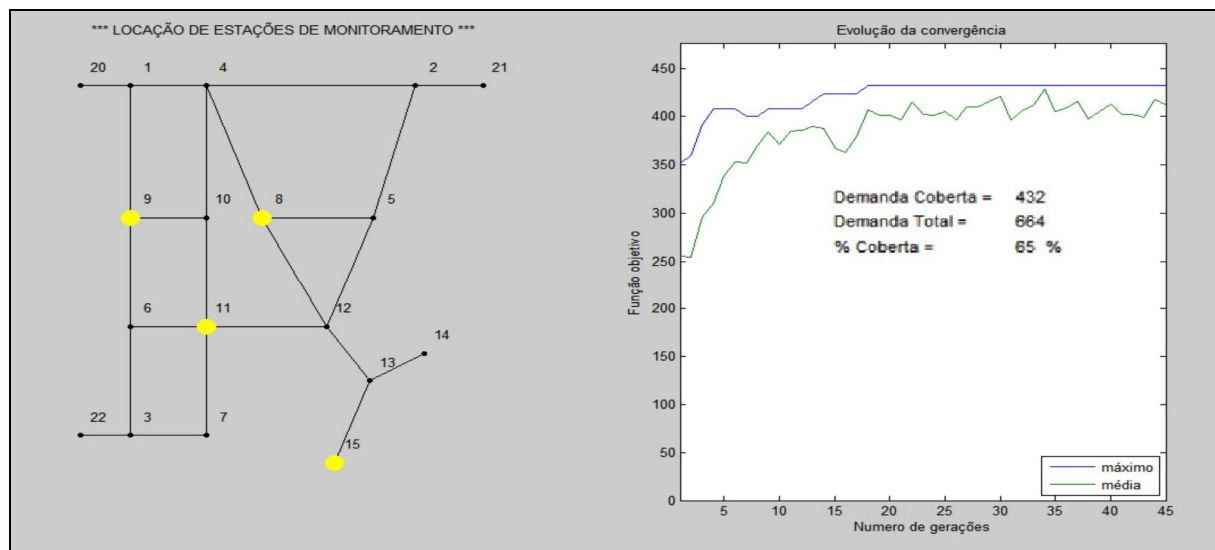


Figura 18 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.70.

Tabela 19 – Nós cobertos Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.70

EST. NOS COBERTOS				
15	12	13	15	
11	3	11		
9	1	9		
8	4	8		

Ainda considerando o cenário 1, tentou-se encontrar o número de estações que proporcionasse cobertura de 100% da água injetada na rede. Adotou-se como critério de fração de água igual a 0.50 para os nós. Foram feitas análises alocando 5 e 6 estações de monitoramento, como indicado a seguir.

- Critério de fração de água igual a 0.50 - 5 e 6 estações de monitoramento

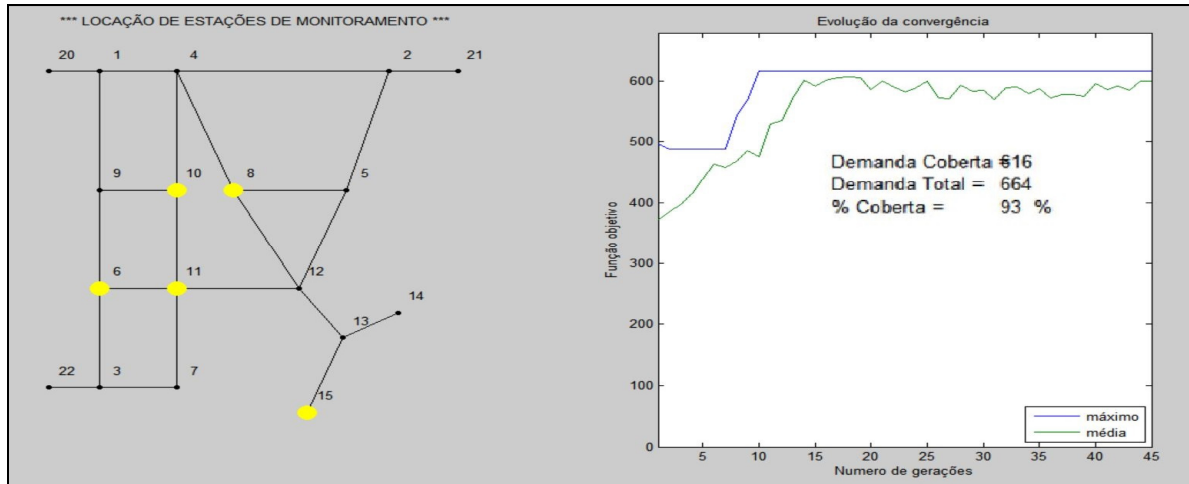


Figura 19 – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 - 5 estações de monitoramento

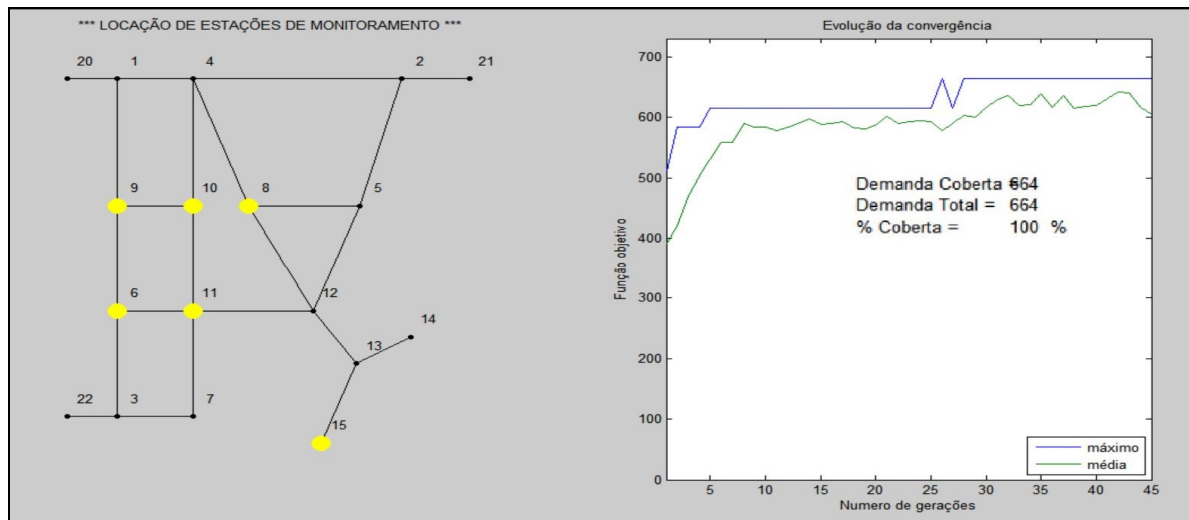


Figura 20 - Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 - 6 estações de monitoramento

A solução desejada está apresentada na Figura 20 e os nós cobertos para esta solução são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Nós cobertos – Cenário 1 – critério de fração de água igual a 0.50 – 6 estações de monitoramento

EST. NOS COBERTOS					
6	3	6			
10	1	4	10		
8	1	4	8		
9	1	9			
15	2	5	12	13	15
11	3	7	11		

Cenário 2 – 120% da Demanda média

Este cenário trata de um acréscimo de 20% no valor das demandas médias de cada nó da rede analisada. O resultado da simulação hidráulica está mostrada na Figura 21. A vazão total injetada ao sistema neste cenário é de 498 l/s.

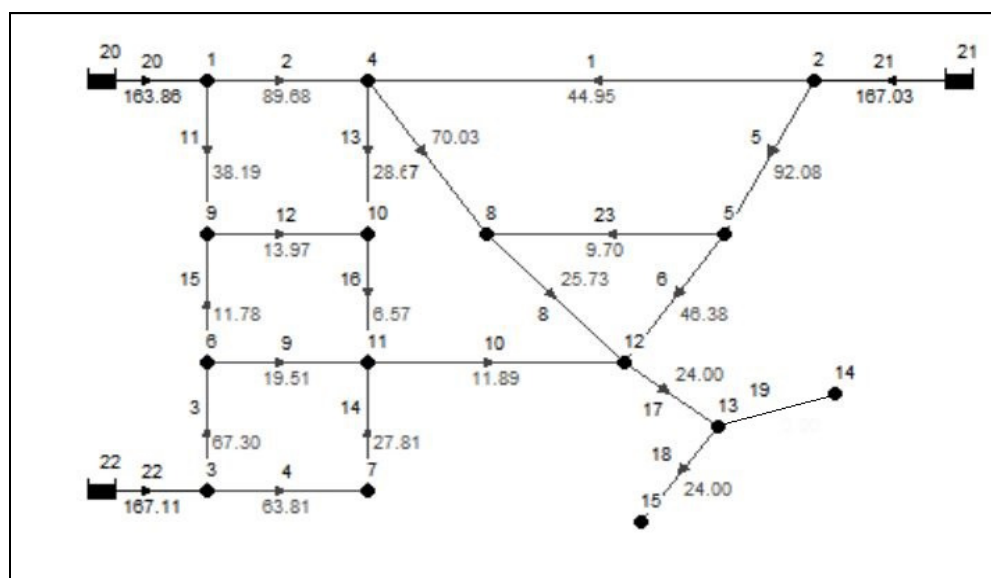


Figura 21 - Solução hidráulica - cenário 2

- **Condição com critério de fração de água igual a 0.40, 0.50, 0.60 e 0.70**

Os resultados destas condições são mostrados nas Figuras 22, 23, 24 e 25, que correspondem a situações análogas as observadas no cenário 1, com as mesmas condições de nós cobertos e, por isso não foram reproduzidas as tabelas com os nós cobertos.

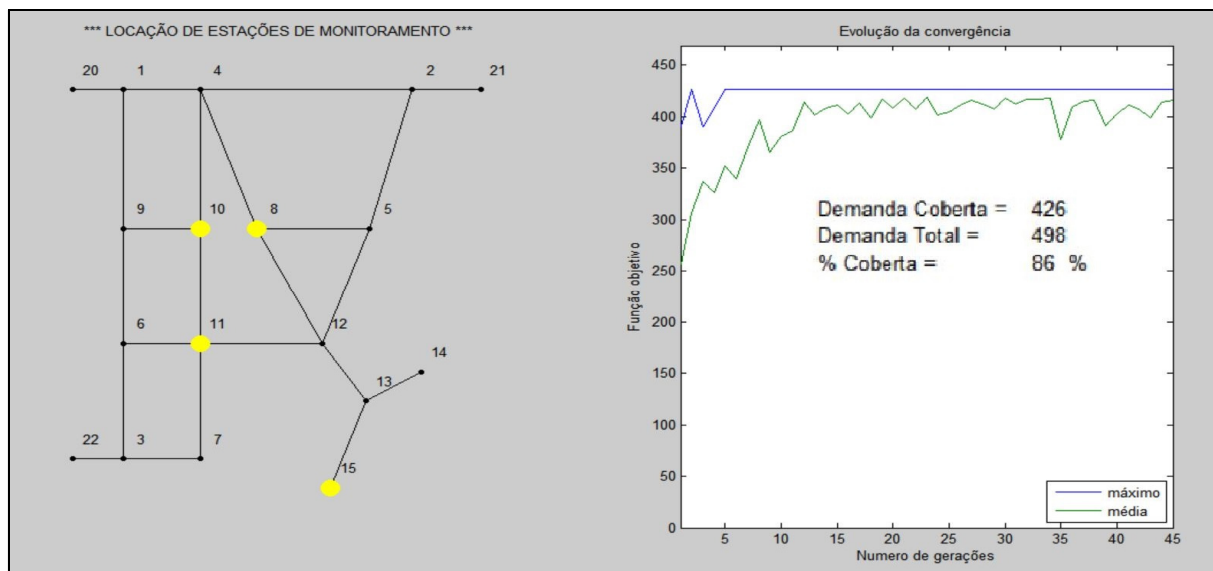


Figura 22 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.40.

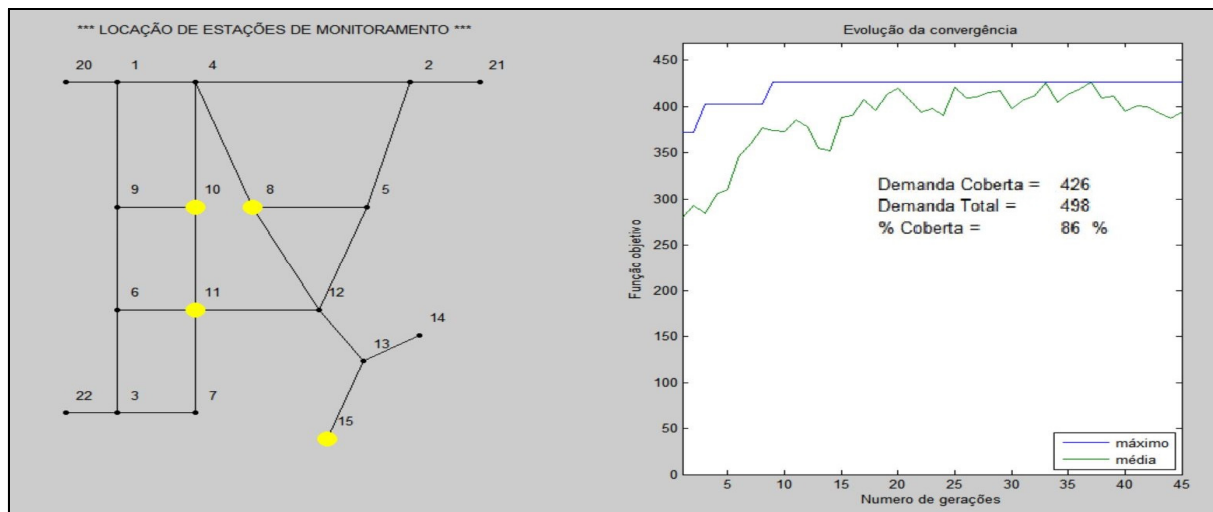


Figura 23– Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.50

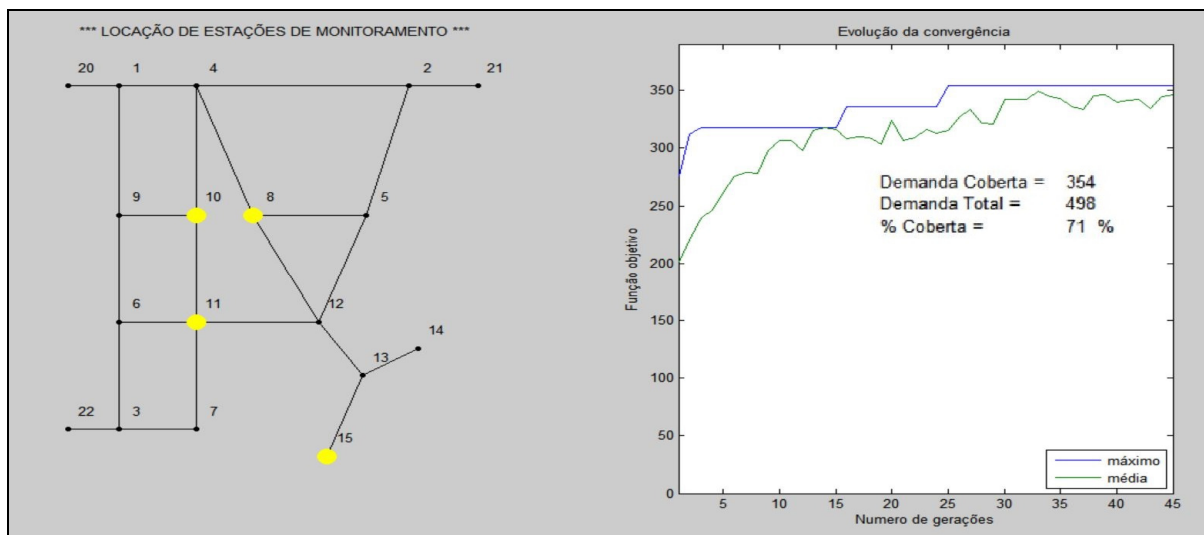


Figura 24 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.60

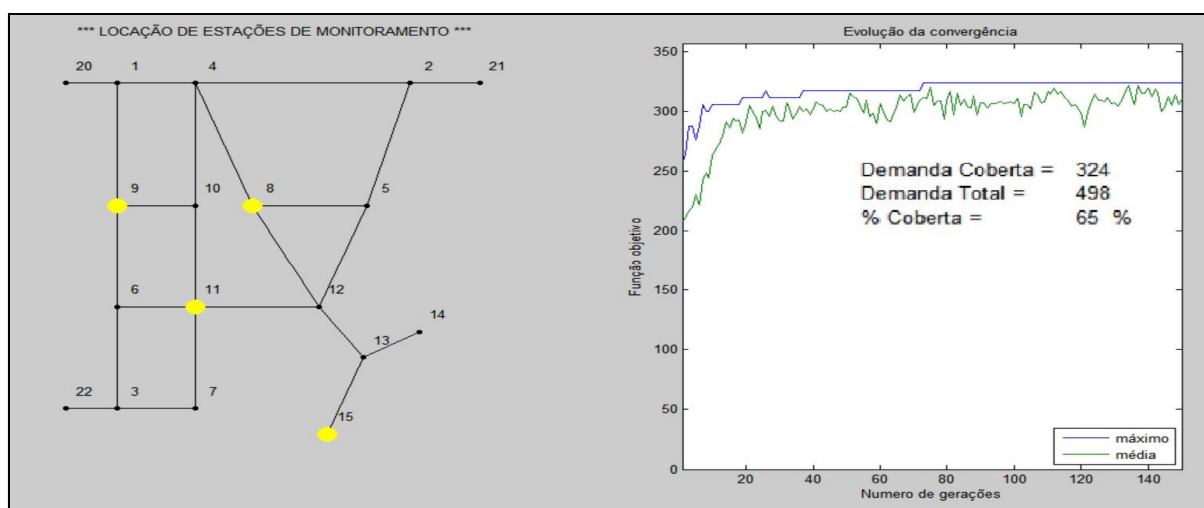


Figura 25 – Cenário 2 – critério de fração de água igual a 0.70

- **Cenário 3 – 80% da Demanda média**

Este cenário trata a condição que corresponde a 80% do valor das demandas médias de cada nó da rede analisada. O resultado da simulação hidráulica para este cenário está mostrada na Figura 26. A vazão total injetada ao sistema neste cenário é de 332 l/s.

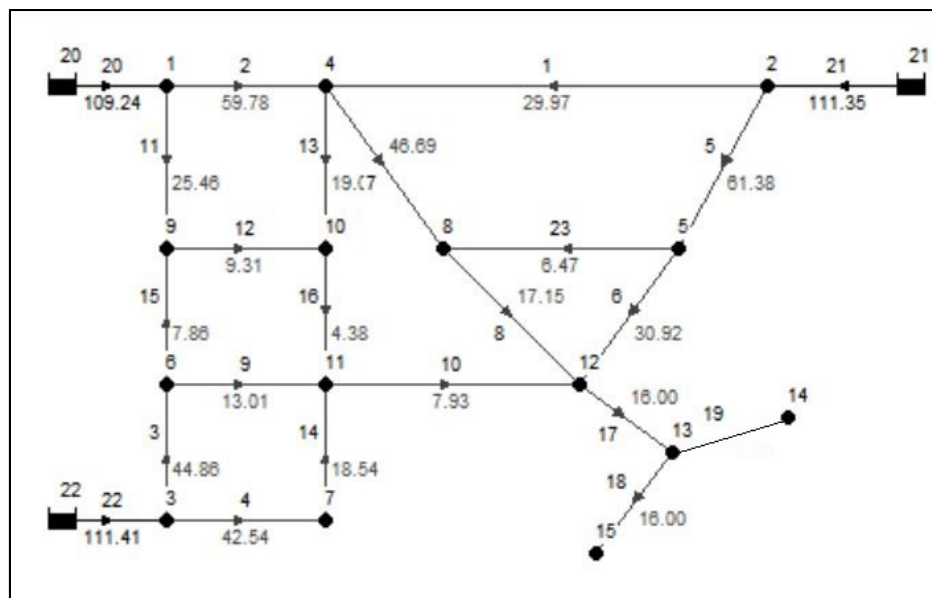


Figura 26. Solução hidráulica - cenário 3

- **Condição com critério de fração de água igual a 0.40, 0.50, 0.60 e 0.70**

Vale para este cenário, nas condições avaliadas, as mesmas considerações feitas para o cenário anterior.

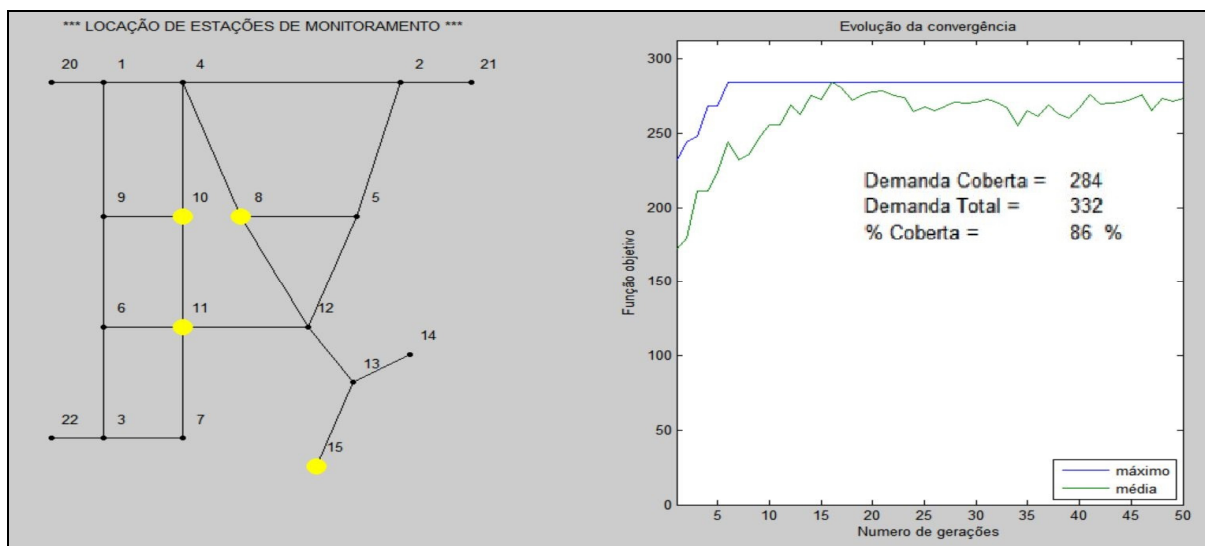


Figura 27- Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.40

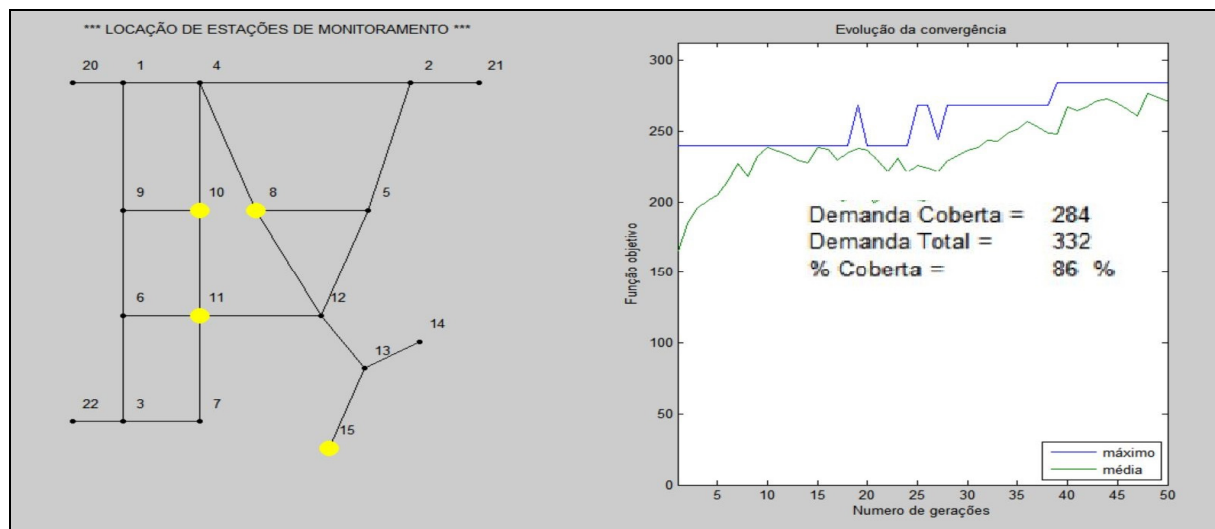


Figura 28– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.50

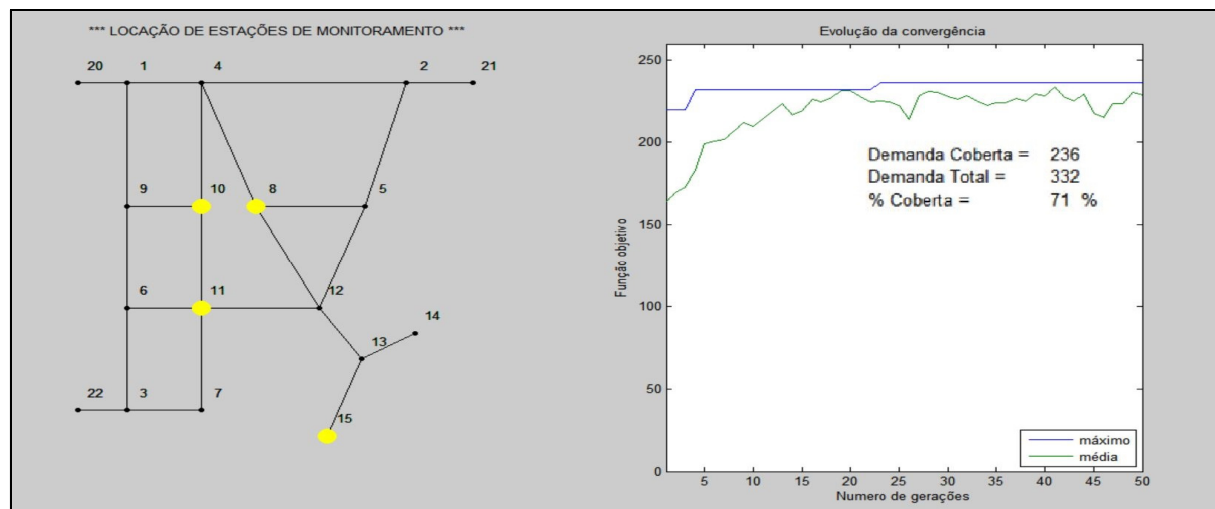


Figura 29– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.60

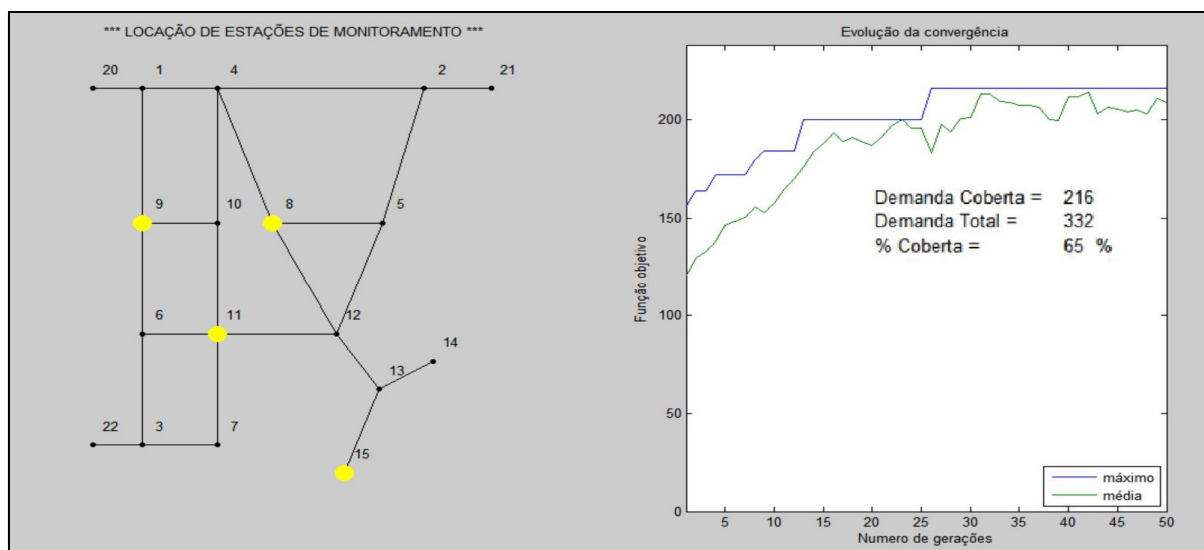


Figura 30– Cenário 3 – critério de fração de água igual a 0.70

Cenário 4 – 40% da Demanda média

Este cenário trata das condições de consumo mínimo hipotético e corresponde a 40% do valor das demandas médias de cada nó da rede analisada. O resultado da simulação hidráulica para este cenário esta mostrada na Figura 31. A vazão total injetada ao sistema neste cenário é de 332 l/s.

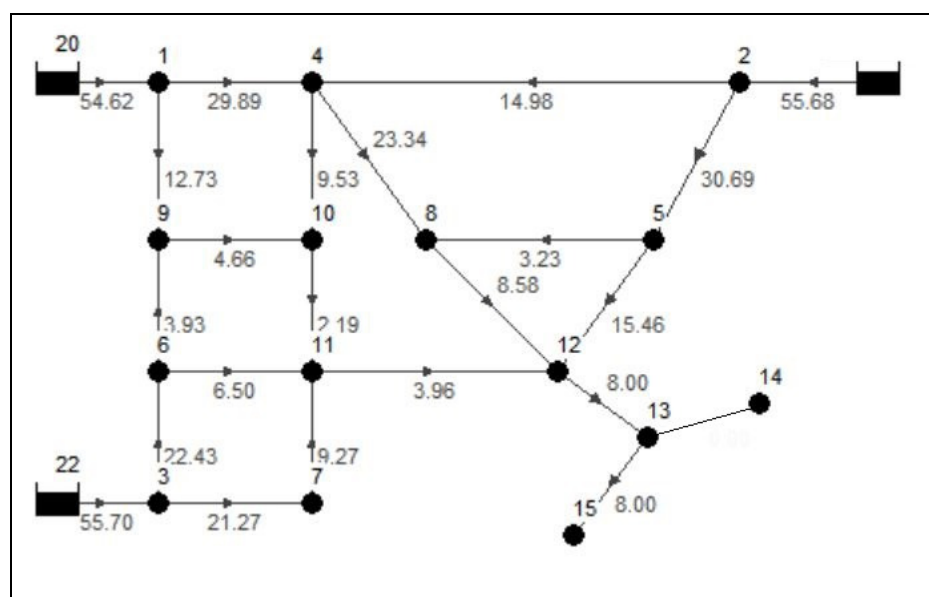


Figura 31. Simulação hidráulica – cenário 4

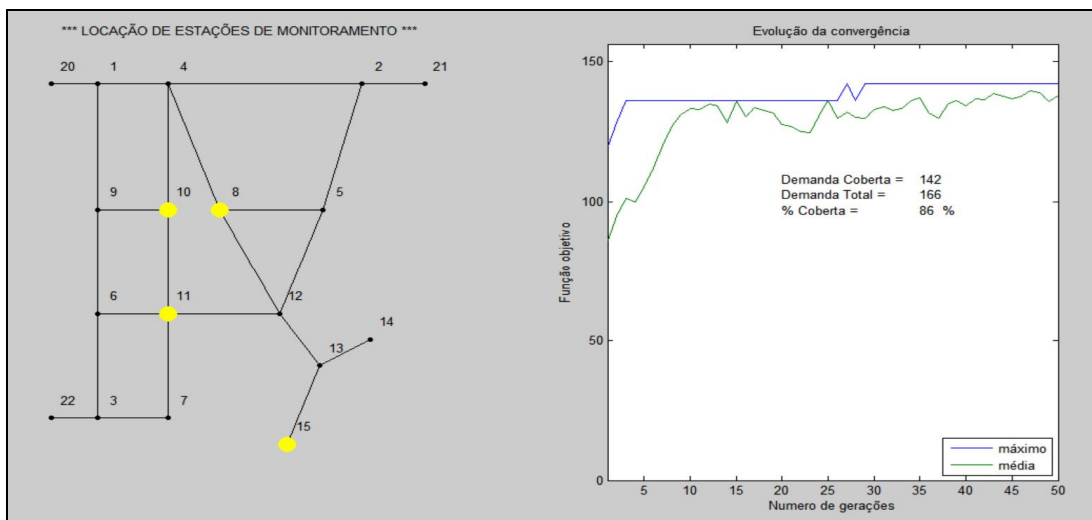


Figura 32 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.40

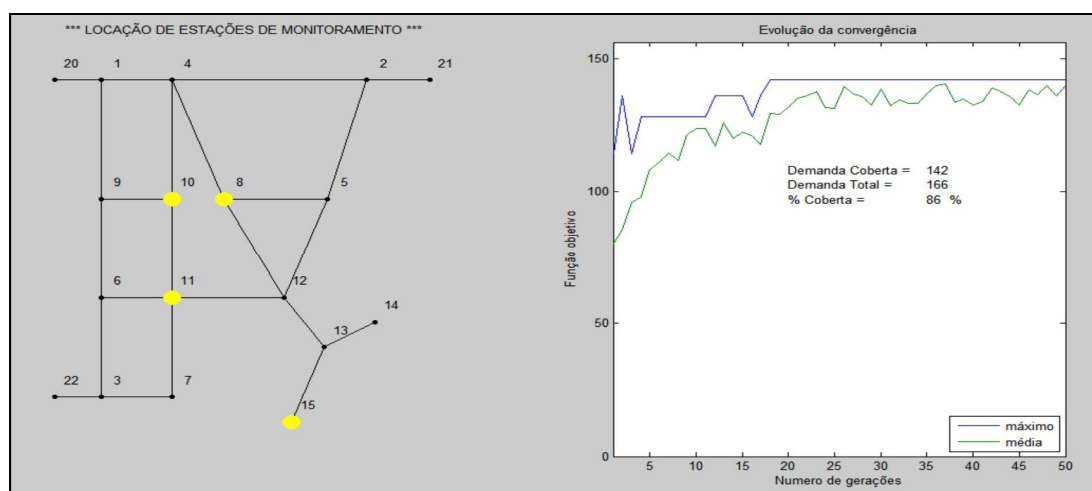


Figura 33 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.50

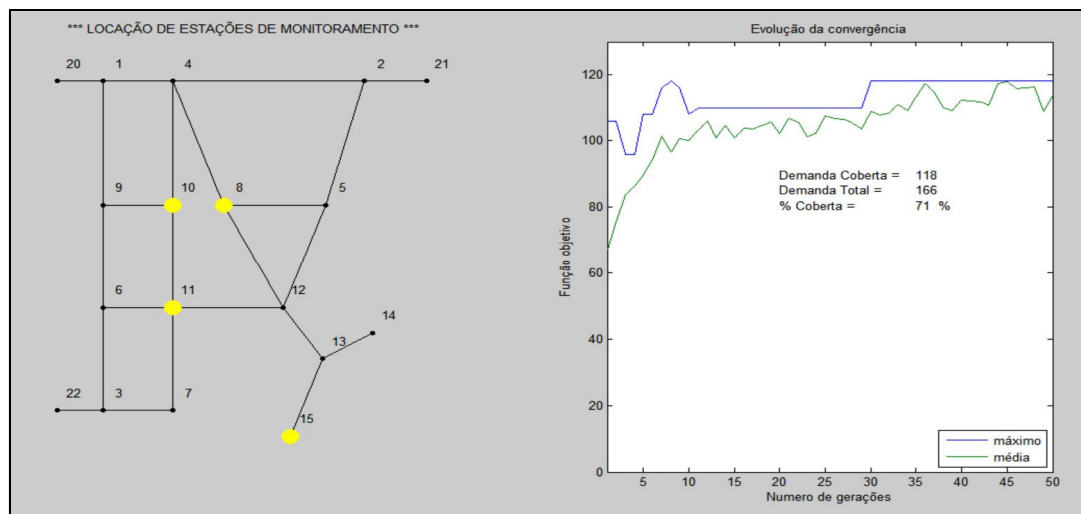


Figura 34 – Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.60

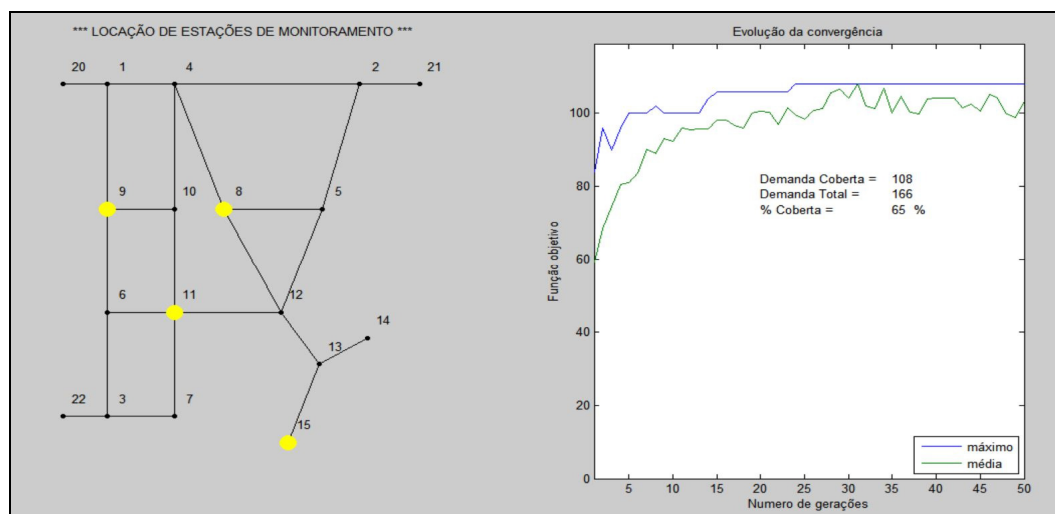


Figura 35– Cenário 4 – critério de fração de água igual a 0.70

5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO CRITÉRIO DE FRAÇÃO DE ÁGUA

Neste estudo de caso pretendeu-se avaliar, para uma dada demanda, a influência do critério de fração de água sobre as estações de monitoramento selecionadas. Para tanto foi empregada a rede hipotética de distribuição de água proposta por Kumar et al. (1997), mostrada na **Figura 36**, composta por 34 tubulações, 19 nós de consumo e duas fontes de abastecimento. A adoção deste exemplo permitiu comparar a solução encontrada pelos autores, que empregaram outra técnica de otimização (programação inteira), com a técnica proposta que utiliza algoritmos genéticos. Trata-se de uma rede hipotética e novamente a maior dificuldade foi a falta de dados, neste caso, além das tubulações a da estação de bombeamento.

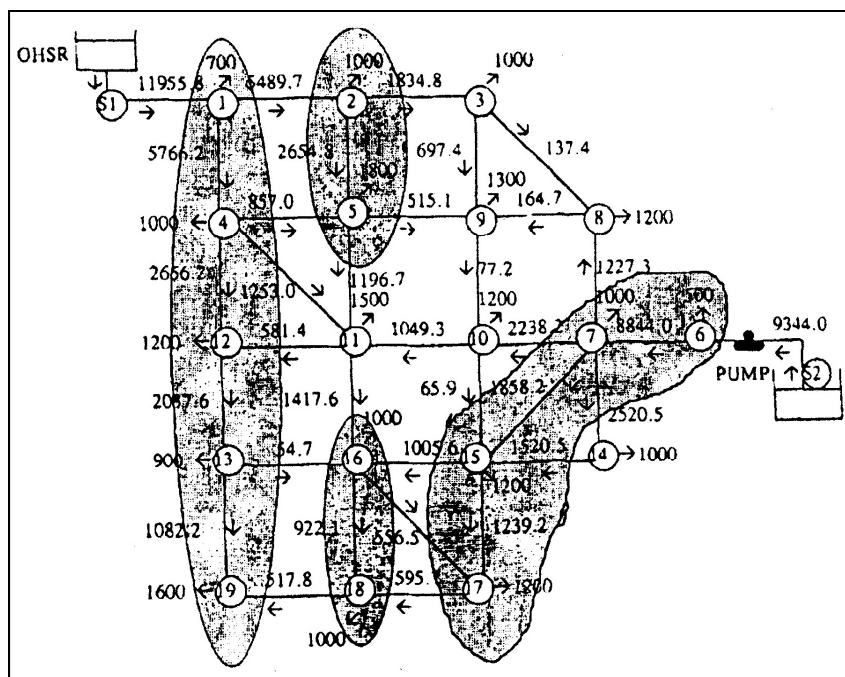


Figura 36 – Rede hipotética analisada – indicando vazão nos tubos e demandas nos nós (m^3/d) e, nós cobertos por 4 estações de monitoramento: Fonte Kumar et. al. 1997.

As demandas originais fornecidas em m^3/dia foram divididas por 10 (dez) e, consideradas em litros por segundo (não foi feita uma conversão correta de unidades). Desta forma os valores de vazão encontrados nas tubulações foram também divididos por dez em relação aos indicados pelos autores, porém em l/s. Tal expediente foi adotado sabendo-se que não iria comprometer a alocação das estações de monitoramento e, facilitaria a adoção dos diâmetros

e a calibração, uma vez que a unidade l/s é mais usual na definição dos diâmetros e, a divisão por dez facilitou uma comparação direta com os valores apresentados pelos autores.

Como não se dispunha dos dados da bomba, esta foi substituída por um reservatório de nível constante de 217m, com o propósito de que este fornecesse carga ao nó de entrada associado. Este recebeu código de identificação 20. O reservatório de entrada conectado ao nó 1 foi considerado de carga fixa também igual a 217 m e foi identificado pelo número 21, em substituição ao código S1 adotado pelos autores.

Após algumas tentativas de calibração chegou-se ao resultado apresentado na **Figura 37**, que podem ser comparado com o original dos autores apresentado na **Figura 36**, lembrando que estes últimos são dez vezes superiores. Embora os resultados não sejam fidedignos, os sentidos dos escoamentos e a ordem de grandeza das vazões se aproximaram bastante dos valores desejados. Como a ferramenta desenvolvida baseia-se essencialmente nos valores das vazões, nos sentidos de escoamento e nas demandas atribuídas aos nós, considerou-se os valores obtidos, com os dados adotados, adequados para as análises seguintes.

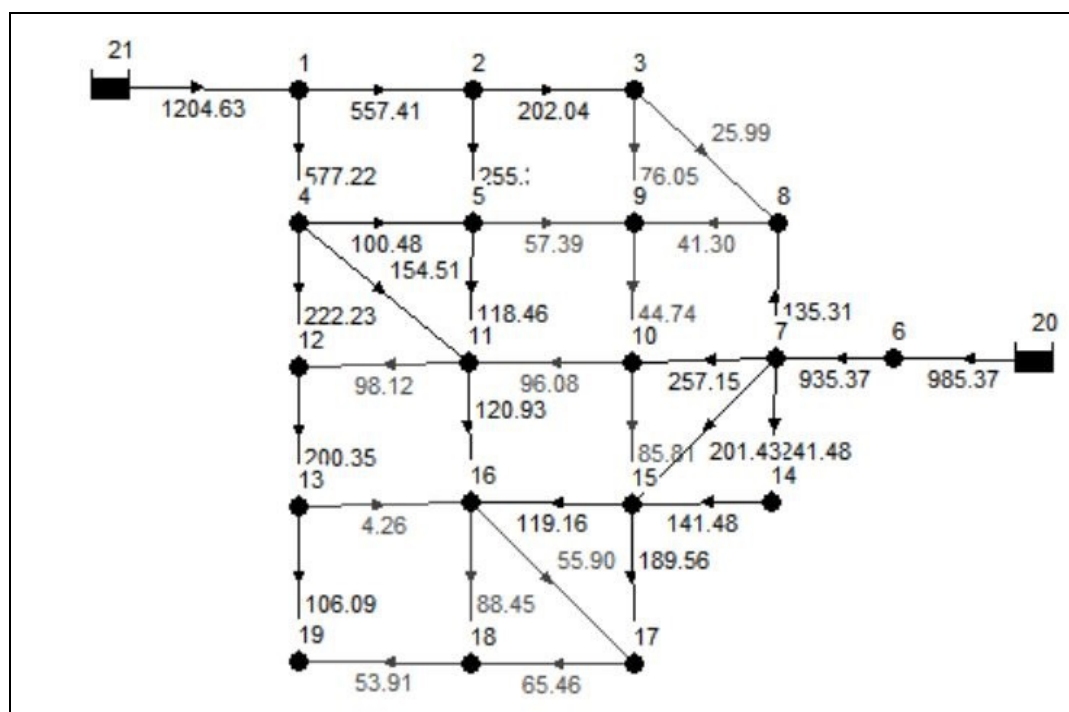


Figura 37 - Resultado de Simulação hidráulica (vazão nas tubulações em L/s)

As análises propostas para este estudo de caso são: alocação de 4, 5, 6 e 7 estações de monitoramento com critérios de fração de água igual a 0.60, 0.50 e 0.70 (nesta sequência). Também foi avaliado o número de estações necessárias para cobrir 100% da vazão injetada, considerando critério de fração de água igual a 0.60.

Condição 0 – 4 estações – Critério de fração de água igual a 0.60 - *Verificação da ferramenta.*

Em seu trabalho, Kumar et al. (1997) propuseram a alocação de 4 estações de monitoramento, utilizando o critério de fração de água igual a 0.60 para os nós. Após empregarem a programação inteira, como técnica de solução, os autores encontraram como locais para a implantação das estações de monitoramento os nós: 5, 17, 18 e 19, que cobrem os nós indicados pelas áreas em hachura indicadas na Figura 36 associadas a cada um dos nós de monitoramento.

Empregando a ferramenta desenvolvida neste trabalho foram encontrados os mesmos locais para a locação das estações de monitoramento, como indica o resultado mostrado na **Figura 38** e na Tabela 21. Como resultado verifica-se que apenas 67% da água injetada à rede estarão cobertos por este monitoramento.

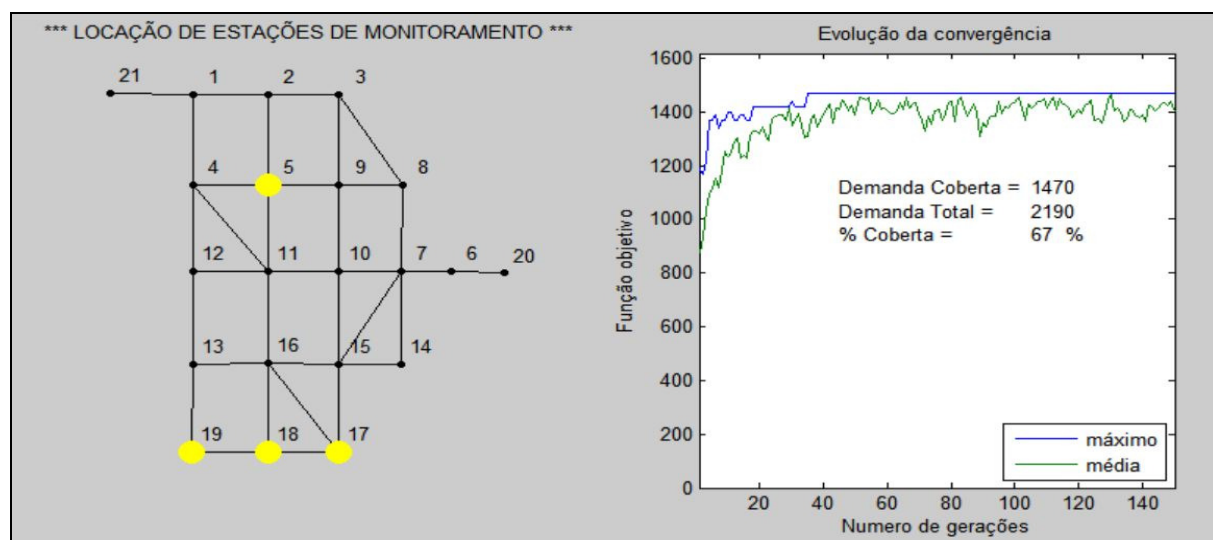


Figura 38 – Solução 4 estações – critério de fração de água igual a 0.60

Tabela 21 – Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.60

EST.	NOS COBERTOS				
19	1	4	12	13	19
5	1	2	5		
17	6	7	15	17	
18	6	7	15	16	18

Condição 1 – 4 estações com os demais critérios de fração de água.

Na sequência foram avaliadas as condições para os critérios de fração de água igual a 0.50 e 0.70.

- Critério de fração de água igual a 0.50

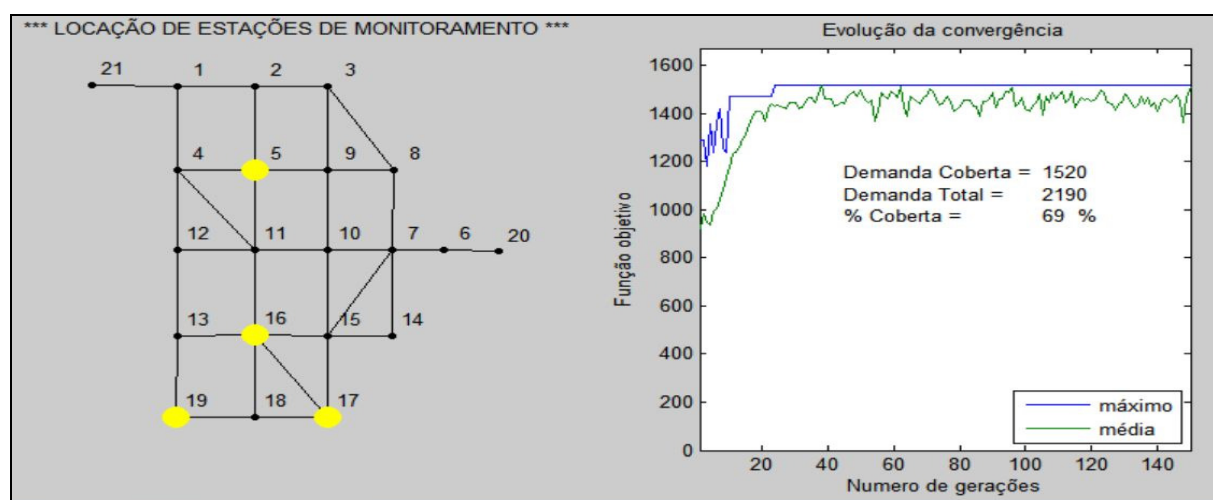


Figura 39 - Localização de 4 estações – critério de fração de água igual a 0.50

Tabela 22 – Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.50

EST.	NOS COBERTOS				
19	1	4	12	13	19
16	6	7	11	16	
17	6	7	15	17	
5	1	2	5		

- **Critério de fração de água igual a 0.70**

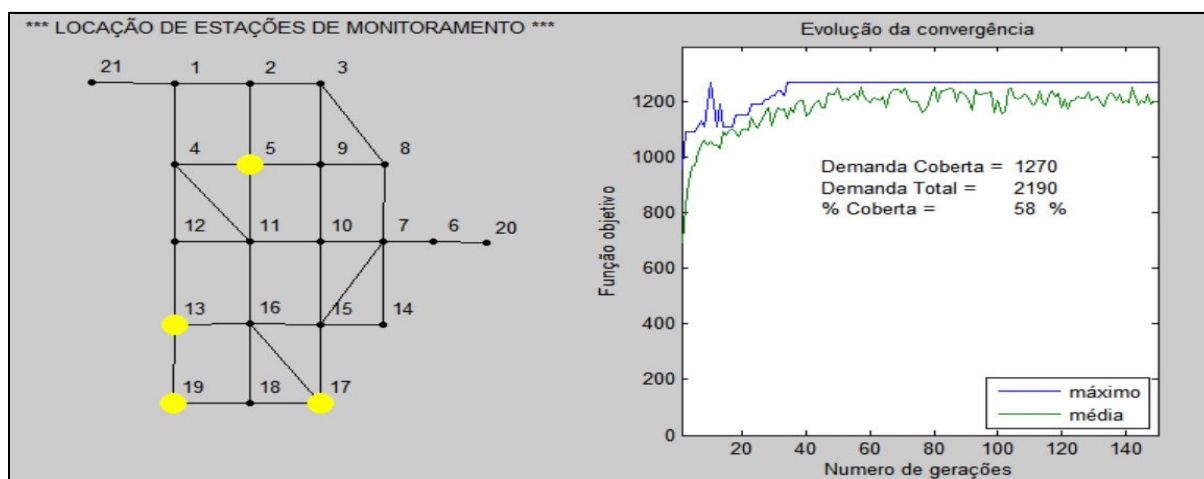


Figura 40– Localização de 4 estações – critério de fração de água igual a 0.70

Tabela 23 - Nós cobertos – 4 estações – critério de fração de água igual a 0.70

EST. NOS COBERTOS				
13	1	4	12	13
17	6	7	15	17
5	1	2	5	
19	1	19		

Tabela 24 – Síntese dos resultados para 4 estações de monitoramento

Critério de fração de água	Estações Obtidas	Nós cobertos	% Coberta
0.50	5-16-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19	69
0.60	5-17-18-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19	67
0.70	5-13-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15, 17, 19	58

Condição 2 – 5 estações de monitoramento

• Critério de fração de água igual a 0.60

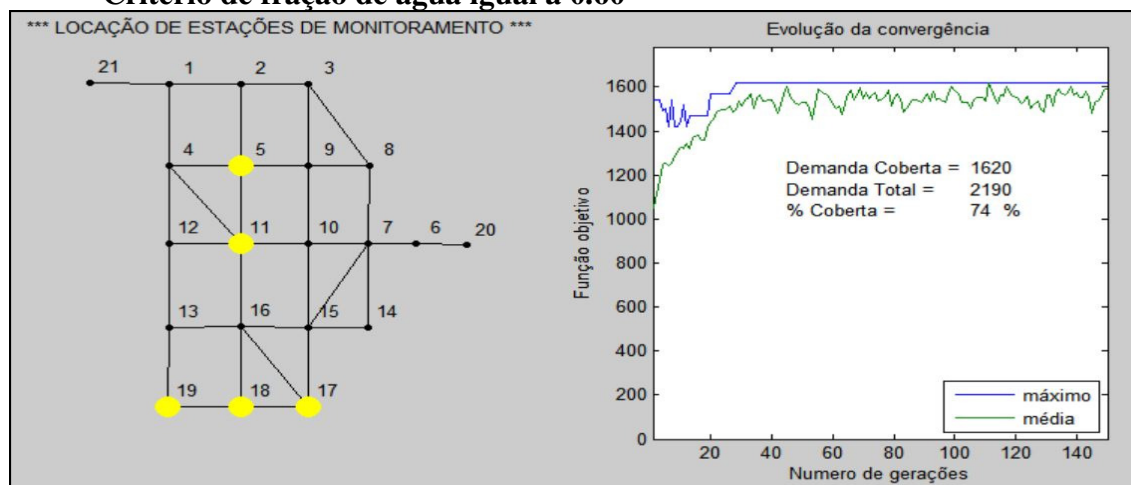


Figura 41 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.60

Tabela 25 - Nós cobertos – 5 estações – critério de fração de água igual a 0.60

EST. NOS COBERTOS					
5	1	2	5		
17	6	7	15	17	
19	1	4	12	13	19
18	6	7	15	16	18
11	1	11			

• Critério de fração de água igual a 0.50

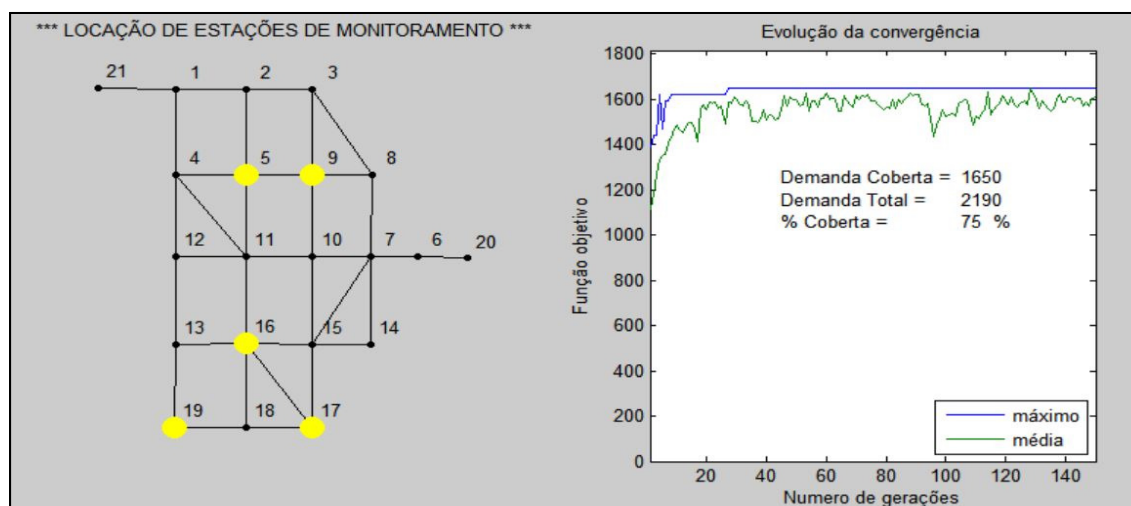


Figura 42 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.50

Tabela 26 - Nós cobertos – 5 estações – critério fração de água igual a 0.50

EST. NOS COBERTOS					
5	1	2	5		
17	6	7	15	17	
9	1	2	9		
19	1	4	12	13	19
16	6	7	11	16	

- Critério de fração de água igual a 0.70**

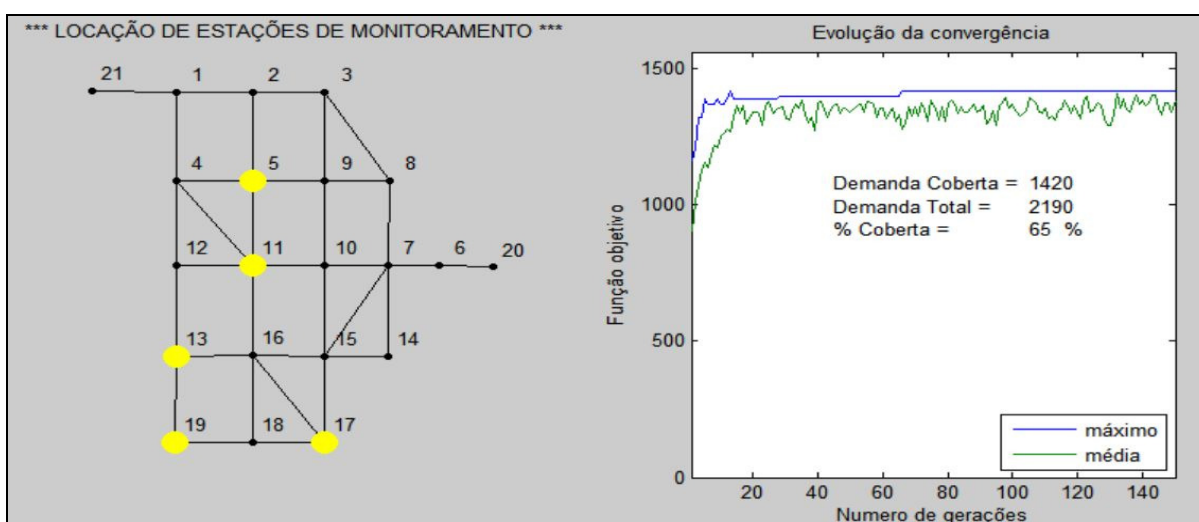


Figura 43 – Localização de 5 estações – critério de fração de água igual a 0.70

Tabela 27 - Nós cobertos – 5 estações – critério de fração de água igual a 0.70

EST. NOS COBERTOS					
19	1	19			
5	1	2	5		
17	6	7	15	17	
13	1	4	12	13	
11	1	11			

Tabela 28 - Síntese dos resultados para 5 estações de monitoramento

Critério de fração de água	Estações Obtidas	Nós cobertos	% Coberta
0.50	5-9-16-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19	74
0.60	5-11-17-18-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19	75
0.70	5-11-13-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15, 17, 19	65

Condição 3 – 6 estações de monitoramento

- **Critério de fração de água igual a 0.60**

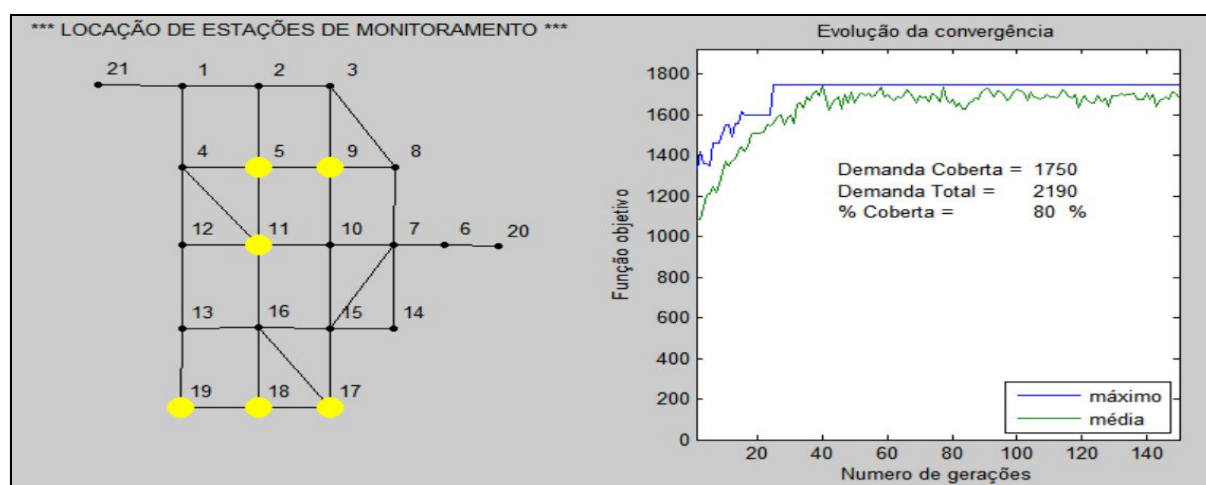


Figura 44 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.60

Tabela 29 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.60

=====					
EST.	NOS COBERTOS				
=====					
11	1	11			
5	1	2	5		
9	1	2	9		
17	6	7	15	17	
19	1	4	12	13	19
18	6	7	15	16	18
=====					

- **Critério de fração de água igual a 0.50**

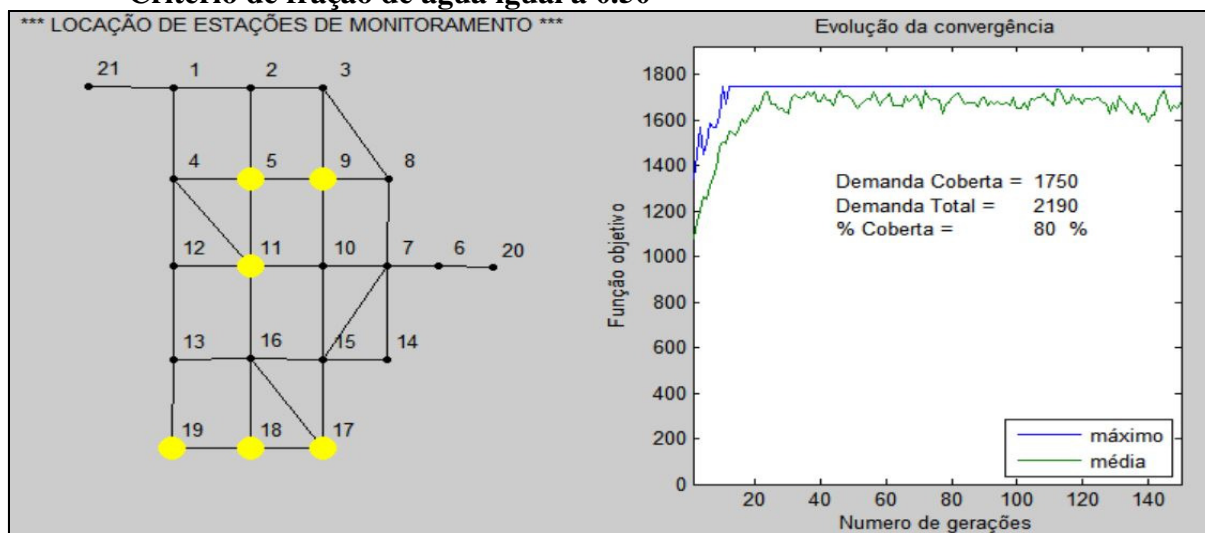


Figura 45 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.50

Tabela 30 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.50

=====

EST. NOS COBERTOS

=====

19	1	4	12	13	19
17	6	7	15	17	
5	1	2	5		
18	6	7	15	16	18
11	1	4	11		
9	1	2	9		

=====

- **Critério de fração de água igual a 0.70**

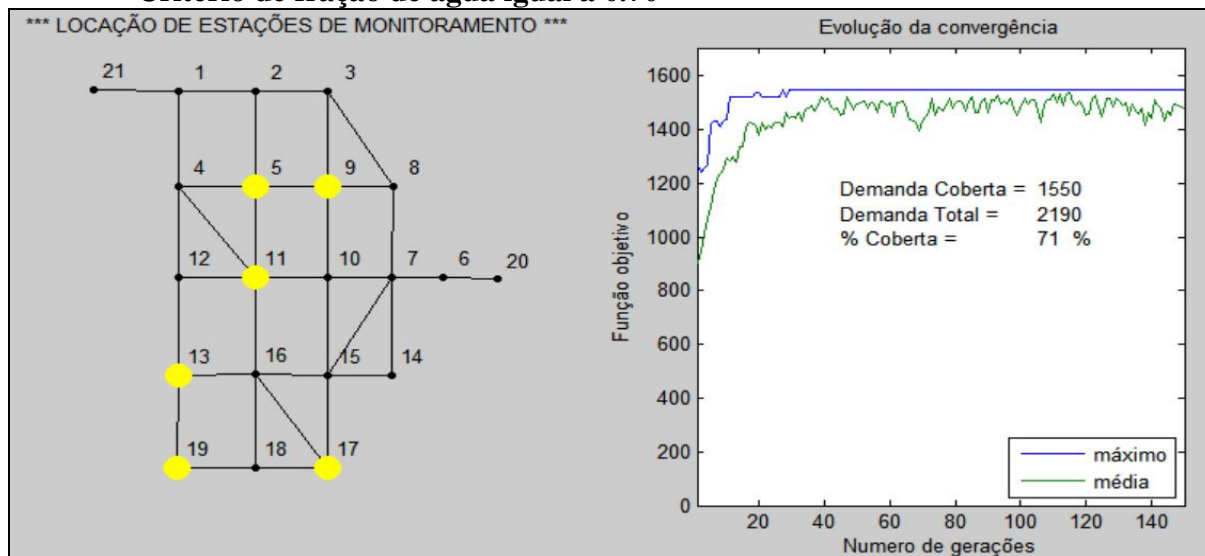


Figura 46 – Localização de 6 estações – critério de fração de água igual a 0.70

Tabela 31 - Nós cobertos – 6 estações – critério de fração de água igual a 0.70

EST. NOS COBERTOS				
19	1	19		
13	1	4	12	13
5	1	2	5	
17	6	7	15	17
11	1	11		
9	1	2	9	

Tabela 32 - Síntese dos resultados para 6 estações de monitoramento

Crit. de fração de água	Estações Obtidas	Nós cobertos	% Cober.
0.50	5-9-11-17-18-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19	80
0.60	5-9-11-17-18-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19	80
0.70	5-9-11-13-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 19	71

Condição 4 – 7 estações de monitoramento

- Critério de fração de água igual a 0.60

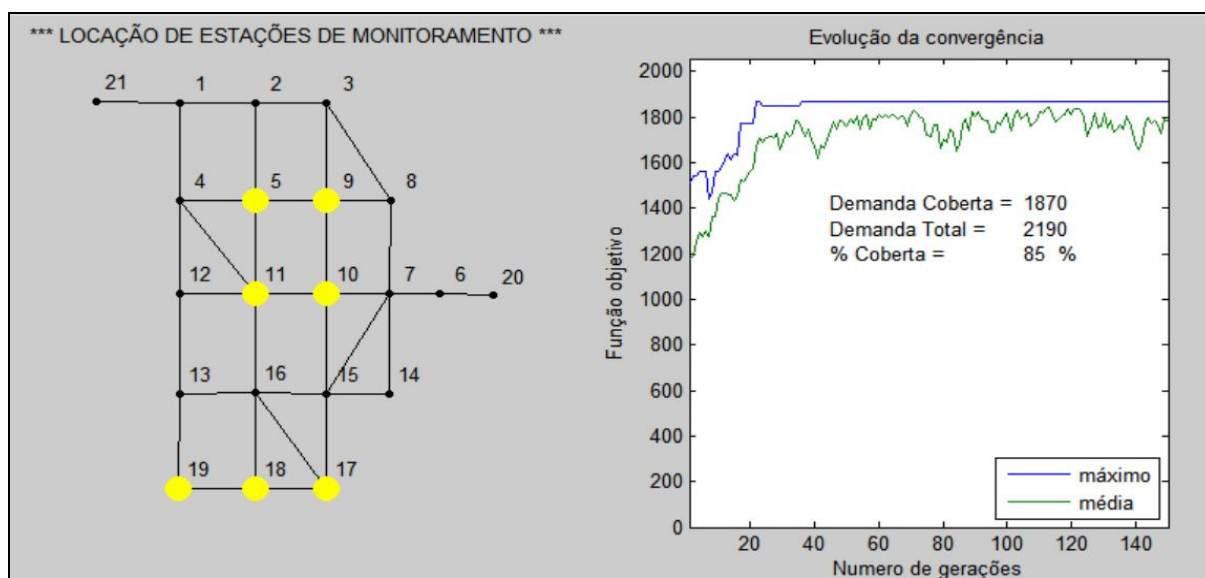


Figura 47– Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.60

Tabela 33 - Nós cobertos – 7 estações – critério fração de água igual a 0.60

EST. NOS COBERTOS

5	1	2	5		
19	1	4	12	13	19
11	1	11			
9	1	2	9		
17	6	7	15	17	
18	6	7	15	16	18
10	6	7	10		

• **Critério de fração de água igual a 0.50**

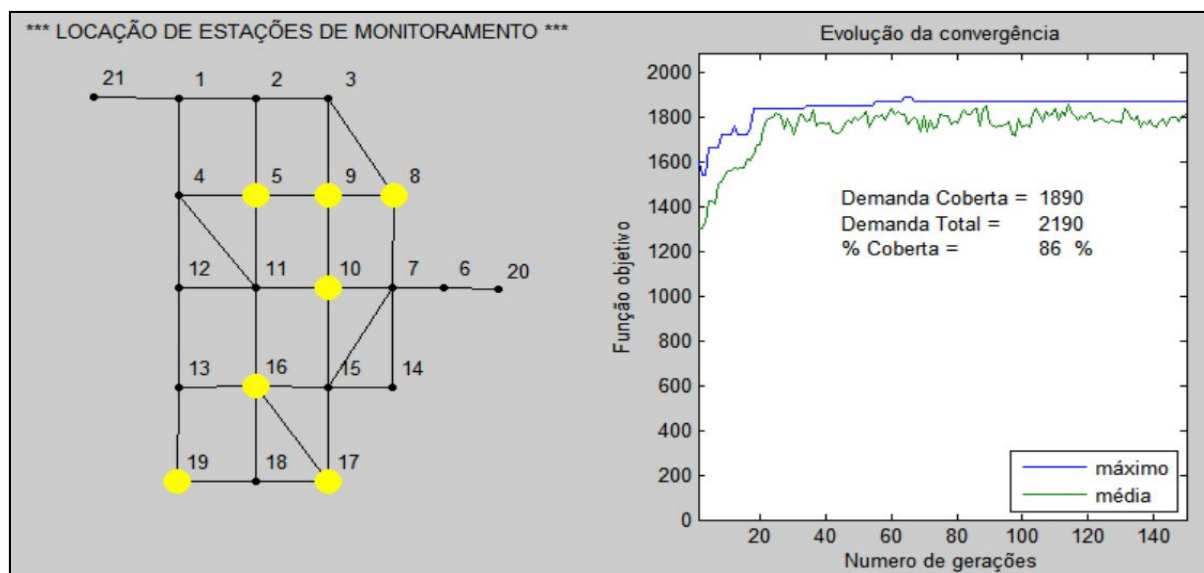


Figura 48 - Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.50

Tabela 34 - Nós cobertos – 7 estações – critério de fração de água igual a 0.50

EST. NOS COBERTOS

17	6	7	15	17	
5	1	2	5		
19	1	4	12	13	19
8	6	7	8		
10	6	7	10		
16	6	7	11	16	
9	1	2	9		

- **Critério de fração de água igual a 0.70**

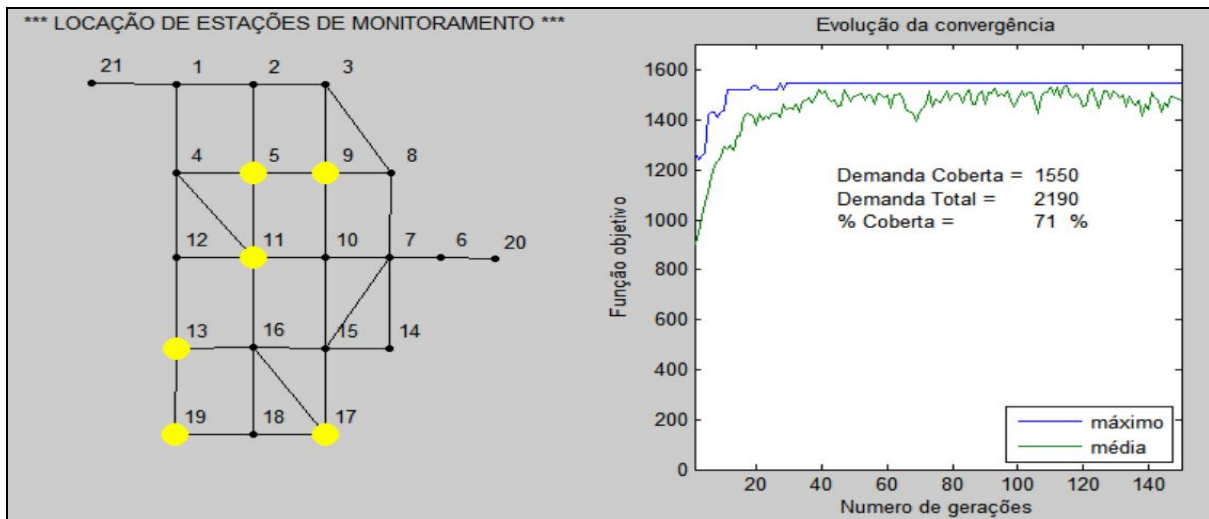


Figura 49 - Localização de 7 estações – critério de fração de água igual a 0.70

Tabela 35 - Nós cobertos – 7 estações – critério de fração de água igual a 0.70

EST. NOS COBERTOS				
11	1	11		
8	6	7	8	
17	6	7	15	17
13	1	4	12	13
9	1	2	9	
19	1	19		
5	1	2	5	

Tabela 36 - Síntese dos resultados para 7 estações de monitoramento

Crit. F.A.	Estações Obtidas	Nós cobertos	% Cob
0.50	5-8-9-10-16-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19	86
0.60	5-9-10-11-17-18-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19	85
0.70	5-8-9-11-13-17-19	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 19	71

Condição 5 – Número de estações para cobertura completa – critério de fração de água igual a 0.60

Considerando um critério de fração de água igual a 0.60 foi continuada a alocação de estações de monitoramento com 8, 9 e 10 estações objetivando a cobertura total da vazão injetada ao sistema. Os percentuais de cobertura obtidos estão apresentados na **Tabela 37**. Como se observa a condição de cobertura total é obtida com a alocação de 10 estações de monitoramento. O resultado desta condição (100% de cobertura) é mostrado na **Figura 50** e na Tabela 38.

Tabela 37 – Estações alocadas x Percentual da vazão total coberta

Estações locadas	Porcentagem da vazão total injetada coberta
8	91
9	95
10	100

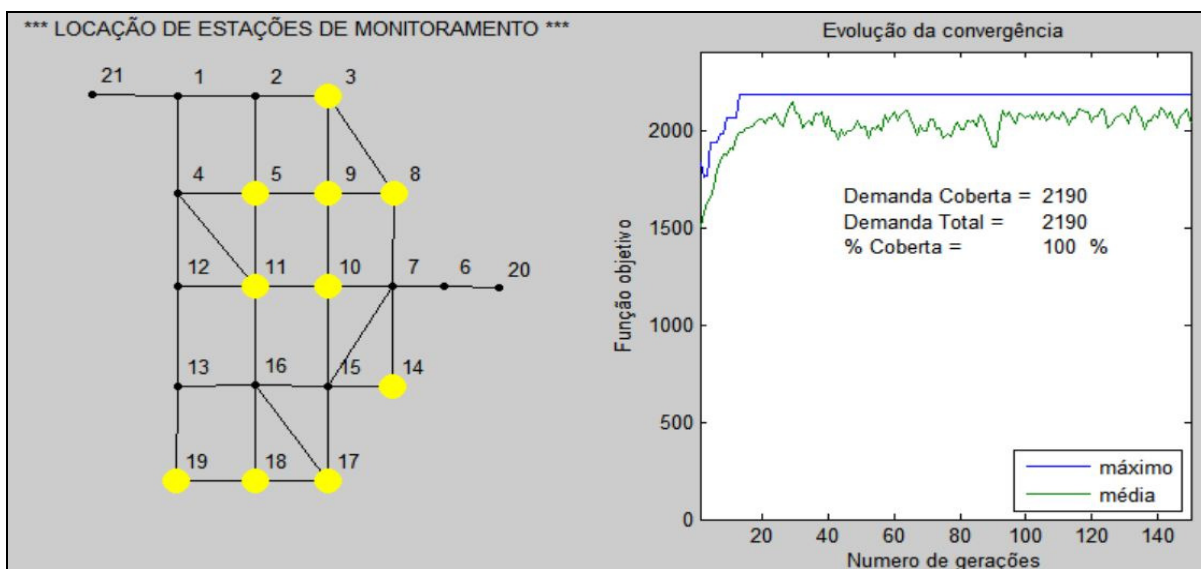


Figura 50 - Localização de 10 estações – critério de fração de água igual a 0.60

Tabela 38 - Nós cobertos – 10 estações – critério de fração de água igual a 0.60

=====					
EST. NOS COBERTOS					
=====					
5	1	2	5		
9	1	2	9		
3	1	2	3		
8	6	7	8		
17	6	7	15	17	
18	6	7	15	16	18
10	6	7	10		
14	6	7	14		
11	1	11			
19	1	4	12	13	19
=====					

6. ANALISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos das redes hipotéticas de distribuição de água apresentadas permitiram avaliar a ferramenta desenvolvida, que produziu os mesmos resultados obtidos por outros pesquisadores. A grande vantagem desta em relação a trabalhos anteriores é a geração automática da matriz de cobertura com o emprego conjunto do simulador hidráulico que foi integrado à ferramenta desenvolvida.

Em relação ao estudo da influência da variação da demanda, a combinação de valores de demandas nodais que em muitos nós apresentavam valores iguais, mostrou que mais de uma solução pode ser obtida para uma mesma porcentagem de cobertura nodal. Esta constatação, evidenciada neste trabalho, não foi mencionada anteriormente na literatura (no caso de programação inteira só se tem uma solução como resultado da técnica). Também se pode mostrar que o resultado listando os melhores de cada geração, que foi adicionado à ferramenta, é útil para a identificação de soluções ótimas semelhantes (**Listagem 3**).

Em relação à variação das demandas médias, simulando 4 condições de operação múltiplos do valor médio, mostrou, como era de se esperar, a manutenção do conjunto de estações ótimas de monitoramento para cada critério de cobertura. Isto devido aos reservatórios terem sido mantidos com níveis constantes e pelo fato da topologia analisada não produzir alterações nas direções dos escoamentos que produzissem alterações na estrutura da matriz de cobertura.

Também se pode observar, da análise do estudo da variação da demanda, com distintos critérios de fração de água, que frações de água mais elevadas não produziram mudança nas estações ótimas localizadas, mas produziram alterações no número de nós considerados cobertos e no “caminho de cobertura”. Isto pode ser observado confrontando as Tabelas 11, 13, 16 e 17.

Uma ressalva quanto à eficiência do emprego do conceito de cobertura de demandas resulta da observação do estudo da variação da demanda, quando se buscou a totalidade de cobertura da vazão injetada ao sistema, quando se obteve 6 estações para um critério de fração de água igual 0.50 dos nós. Como se observa na **Figura 20** e Tabela 20, embora se tenha obtido 100% de cobertura da vazão injetada, o nó 14 não aparece como coberto, uma vez que a demanda associada a este é nula. Entretanto o trecho entre os nós 13 e 14 resulta em um trecho de

estagnação e, portanto, crítico com relação à qualidade de água. Esta constatação mostra que cuidados devem ser tomados em relação a esta condição, uma vez que o emprego do conceito de cobertura de demandas não é capaz de cobrir nós extremos sem demandas.

A literatura que trata sobre o conceito de cobertura de demanda, não faz referência a um valor para o critério de fração de água a ser empregado embora os valores usualmente empregados sejam iguais a 0.50 e 0.60. Os resultados obtidos nestes estudos de casos corroboram para a adoção destes valores como critério de fração de água. A análise do estudo da influência da variação do critério de fração de água mostra a substituição de uma das estações de monitoramento, no caso apenas uma que assume a posição do nó 18, 16 ou 13 de acordo com o critério de fração de água igual a 0.50, 0.60 e 0.70 respectivamente, conforme se observa nas Tabelas síntese de resultados, Tabelas 22, 26, 30 e 34, para 4, 5, 6 e 7 estações respectivamente.

A porcentagem de cobertura da vazão injetada aumenta com o número de estações alocadas, o que é evidente e, a adição de um nó de monitoramento corresponde à adição do valor de sua demanda ao valor da vazão coberta. Em outras palavras para a rede analisada no estudo da influência da variação do critério de fração de água, a vazão total injetada ao sistema foi de 2190 L/s, se fosse considerada esta vazão igualmente distribuída entre os 19 nós de consumo resultariam em um consumo médio por nó de 115 l/s ($2190/19$) o que corresponde a um acréscimo da ordem 5% ($100 \times 115/2190$) em média, de cobertura, pela inclusão de cada nova estação de monitoramento. Embora os valores reais das demandas nos nós diferenciem do valor médio adotado neste cálculo, a variação da cobertura por nó incluído ao monitoramento está nesta ordem de grandeza, principalmente depois de um certo número de estações de monitoramento. Isto pode ser observado no gráfico da **Figura 51**, que apresenta a evolução da porcentagem da água injetada coberta em função do número de nós cobertos, obtido dos resultados do estudo da influência da variação do critério de fração de água, para o valor igual a 0.60

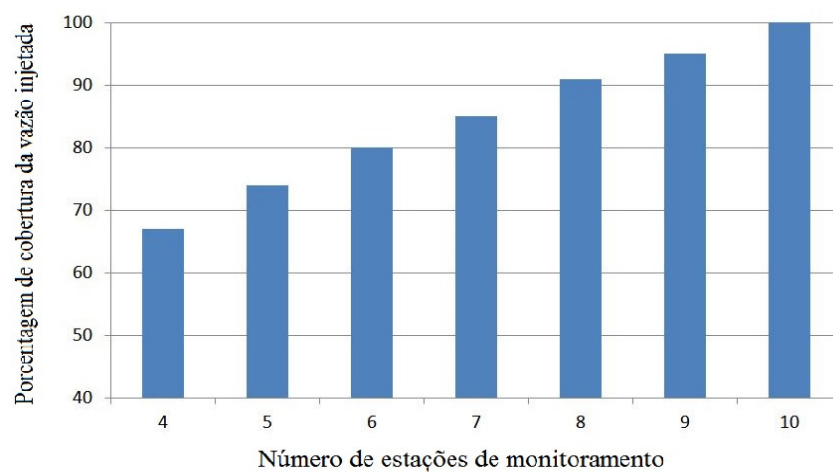


Figura 51 – Evolução da porcentagem de cobertura em função do numero de estações

Para inferir 100% sobre a qualidade de água da rede hipotética de distribuição de água estudada por Kumar et al. (1997), seria necessário local 10 estações de monitoramento. Então, seria necessário acrescentar 6 estações de monitoramento para aumentar em 33% a porcentagem de cobertura a fim de realizar a cobertura total da rede hipotética de distribuição de água estudada.

7. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado disserta sobre o desenvolvimento de uma ferramenta matemático computacional, baseada no conceito de cobertura de demanda e, destinada à localização ótima de estações de monitoramento de qualidade de água. Como procedimento de busca de ótimo emprega Algoritmos Genéticos, uma das técnicas sugeridas pela literatura.

Como principal contribuição deste trabalho destaca-se a incorporação de um simulador hidráulico, empregando o EPANET toolkit, para a geração automática da matriz de cobertura, base do procedimento de localização de estações de monitoramento adotado. Todas as rotinas que compõem a ferramenta desenvolvida foram programadas utilizando o ambiente de programação do Matlab. Rotinas desenvolvidas por terceiros, utilizadas na ferramenta, também foram escritas no ambiente de programação do Matlab e, destinaram-se à leitura de arquivo de dados, em colunas, na forma texto e como auxiliar na chamada do EPANET toolkit. As principais conclusões que podem ser extraídas do trabalho desenvolvido e de sua aplicação aos estudos de casos são:

1. O acoplamento do simulador hidráulico ao modelo de locação empregando matriz de cobertura de demanda facilita as análises que visam à locação de estações de monitoramento. Sem dúvida a etapa de construção da matriz de cobertura é a mais árdua do processo e é um grande benefício ter esta etapa automatizada, principalmente quando se trata de grandes instalações.
2. As facilidades incorporadas à ferramenta como a manutenção de uma listagem com os melhores indivíduos de cada geração facilita a identificação de soluções alternativas de igual desempenho, como foi apresentado no estudo da influência da variação das demandas.
3. O relatório dos nós cobertos por cada estação de monitoramento alocada é uma implementação incorporada à ferramenta que facilita as análises e a tomada de decisão quanto ao número e estações a serem locadas.

4. O estudo mostrou que para uma dada condição de carga fixa, a alocação de estações de monitoramento não se altera com a variação proporcional da demanda de todos os nós. Para tanto deve estar assegurada a não variação dos sentidos dos escoamentos.
5. Conclui-se dos estudos de casos apresentados que os conjuntos de estações de monitoramento diferenciam-se de acordo com o critério de fração de água adotado, entretanto não de maneira significativa (apenas uma como exemplificado para o estudo da influência da variação do critério de fração de água).
6. Foi identificada a possibilidade de uma instalação apresentar mais de uma solução com a mesma eficiência (igualdade da função objetivo), condição não relatada na literatura até então.
7. Uma constatação evidenciada no estudo da variação das demandas foi a não cobertura de nós que não possuam demandas associadas e que podem representar problemas de qualidade de água se forem pontas de rede, pois representam locais de estagnação de fluxo. Estes locais merecem atenção especial no que concerne a questão da qualidade de água, pois à medida que as direções de escoamento na rede se invertem devido a mudanças na distribuição das demandas ao longo do dia, a água estagnada pode passar a circular na rede.

8. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ferramenta desenvolvida mostrou-se promissora e eficaz como meio para auxiliar na identificação de locais ótimos para o posicionamento de estações de monitoramento de qualidade de água. Entretanto, como o método de cobertura de demanda é baseado essencialmente no valor e sentido das vazões nas tubulações e na demanda dos nós, é recomendação de suma importância que para a aplicação da ferramenta, que a rede de distribuição esteja bem calibrada, em relação às características físicas que definem a condição de escoamento nas tubulações.

Outra ressalva a ser feita é que a metodologia proposta baseia-se em uma análise estática, ou seja, em regime permanente. A análise de condições estáticas sucessivas que contemplem o período extensivo é uma extensão que se sugere este trabalho e considera-se a implementação como simples. Assim, seria possível avaliar a influência da variação do sentido do escoamento de água sobre o conjunto ótimo de estações de monitoramento.

É importante a realização de estudos e pesquisas sobre qual valor para o critério de fração de água pode-se afirmar que o conjunto de estações de monitoramento localizadas pela ferramenta pode inferir sobre a qualidade de água da rede. Então, tem-se a necessidade em aplicar a ferramenta desenvolvida em uma rede real de distribuição de água.

Ao considerar relevante a existência de uma equipe multidisciplinar que atua na realização da amostragem da água para cumprir as exigências da Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde, recomenda-se o estudo/pesquisa sobre a relação custo – quantidade de estações de monitoramento – porcentagem de cobertura de uma rede real de distribuição de água. Assim, podem-se balancear aspectos econômicos e técnicos para a realização do monitoramento da qualidade de água nas redes de distribuição.

Cabe, por outro lado, observar que análises dinâmicas, envolvendo os aspectos inerciais que se associam a estes fenômenos podem ser importantes nas análises de qualidade de água, entretanto há poucos relatos de modelos desta natureza, pelo que se identifica esta como outra linha de pesquisa associada ao tema.

9. REFERÊNCIAS*

AL-ZAHRANI, M. A.; MOIED, K. Optimizing water quality monitoring stations using genetic algorithms. **The Arabian Journal for Science and Engineering**. Vol. 28, n. 1B, 57-75. 2003.

ATGIN, R. S. **Modeling vulnerability and effectiveness of chlorination in drinking water distribution systems**. Cincinnati: University of Cincinnati.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica 7ª ed.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1991. p. 517 - 543.

BRASIL . Ministério da Saúde. Portaria N° 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Lex:** portaria do Ministério da Saúde, Brasília, DF, p. 16 e 30, dezembro, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução N° 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Lex:** resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, DF, p. 4, março, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água. Volume 2.** São Carlos: RiMa, 2005. p.1151.

EDIRIWEERA, D. D. e MARSHALL, I. W. Monitoring water distribution systems: understanding and managing sensor networks. **Drinking water engineering and science**. n. 3, 107-113, 2010.

HAESTAD METHODS. **Advanced water distribution modeling and management**. Waterbury, CT, USA. 2003. Chapter 11.

HIROSE, Hugo. **Localização ótima de estações de monitoramento de qualidade da água em redes de distribuição baseada em algoritmo genéticos**. Trabalho de conclusão de curso - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

KUMAR, A.; KANSAL, M. L.; ARORA, G. Identification of monitoring stations in water distribution system. **Journal of Environmental Engineering**. n.123, 746-752. 1997.

Lacerda, E. G. M.; e Carvalho ,A. C. P. L. F. Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais. Capítulo 3. Algoritmos Genéticos. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Vol. 7. ABRH. 1999

LEE, B. H.; DEININGER, R. A. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. **Journal of Environmental Engineering**. n.118, 4-16. 1992.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2005. p. 379 - 390.

MAYS, L. W. **Water distribution systems handbook**. New York: McGraw-Hill, 2000. chapter 9, 11 e 12.

MEIER, R. W.; BARKDOLL, B. D. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms. **Journal of Water Research, Planning and Management**. n. 126, 245-250. 2000.

O'HALLORAN, R.; FOGELMAN, S.; ZHAO, H. Current online water quality monitoring methods and their suitability for the western corridor purified recycled water scheme. **Urban Water Security Research Alliance**, n. 10, chapter 4.

QIAN, Z.; GAO, J.; WU, W.; HOU, X. Q.; WU, Y.; TAO, L.; RAN, N. Harbin water supply network monitoring and evaluation. **IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control**. Londres, UK, 2007.

ROSSMAN, L. A.; CLARK, R. M. and; GRAYMAN, W. M. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. **Jornal of Environmental Engineering**. n. 120, 803-820. 1994.

TRIMBOLI, Marcelo José. **Aplicação e análise de um modelo de qualidade de água para a determinação da concentração de cloro livre residual em um setor de abastecimento de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área Recursos Hídricos) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

YOSHIKAWA, Andréa Manami. **Emprego de modelo computacional para simulação da qualidade de água em redes de distribuição envolvendo múltiplas espécies**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

Baseadas na norma NBR 6023, de 2002, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

10. ANEXOS

ANEXO A – Rotinas desenvolvidas

1. Rotina Principal.m (Faz a chamadas as demais rotinas)

```
% Rotina PRINCIPAL
% Determinação da localização ótima de estações de monitoramento de
% qualidade de água
% DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
% Aluno: Roberto Suse
% Orientador: Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior
% Última atualização: Novembro/2013
%%
%% Limpeza de tela e de memória
clc; %Limpa tela
clear all; %Limpa variáveis
%% Dados de entrada
% Nome dos arquivos de dados
Redefile = 'Exemplo1.inp'; %Nome do arquivo de dados .inp do Epanet
Coordfile = 'Exemplo1.dat'; %Arquivo com coordenada dos nós extraído do inp
%%
% Critério de fração de água e número de estações a localizar
criterio = 0.5; %criterio de fração de água
num_est = 2; %Número de estações de monitoramento (deve ser par)
%%
% Parametros do AG
NGen = 30; %numero de gerações
ind_pop = 6; %Numero de indivíduos na população
prob_mut = 0.05; %Probabilidade de mutação
%% Chamada ao EPANET Toolkit
epanetloadfile(Redefile); %Abre arquivo do Epanet
[Q] = getdata('EN_FLOW'); %Matriz da vazão Período Extensivo
Per = 1; %Período Desejado
%%
% Obtem informações da rede analisada
NoCont = getdata('EN_NODECOUNT'); %obtem numero de nós da rede
LinkCont = getdata('EN_LINKCOUNT'); %Obtem numero de elementos da rede
ND = NoCont; %Indica a dimensão da matriz no. nos x no. de nos
MQ = zeros(ND,ND); %Gera matriz de vazão nula
DM=getdata('EN_BASEDEMAND'); %Obtem vetor de demandas e armazena em DM
%%
% Informações dos nós obtidas do arquivo de entrada INP do Epanet
for i=1:ND
    Nix(i) = i; %Gera um vetor de índices dos nós
    [errorcode, N] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeid', i, '');
    Nid(i) = str2num(N); %Gera um vetor de identificação id dos nós
end
%%
% Informações relacionadas aos tubos obtidas do arquivo INP
for i=1:LinkCont
    [errorcode, N1,N2] = calllib('epanet2', 'ENgetlinknodes', i,0,0);
    VN1(i)= N1; VN2i(i) = N2; %Vetores com índice dos nós início e fim
    [errorcode, Nu] = calllib('epanet2', 'ENgetlinkid', i, '');
    VNu(i) = str2num(Nu); %Vetor com Número do elemento
    [errorcode, Na] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeid', N1, '');
    VN1(i) = str2num(Na); %Vetor com número do nó início
    [errorcode, Nb] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeid', N2, '');
    VN2(i) = str2num(Nb); %Vetor com número do nó jusante
    [errorcode, N1i] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeindex', num2str(VN1(i)),0);
    [errorcode, N2i] = calllib('epanet2', 'ENgetnodeindex', num2str(VN2(i)),0);
    N11(i) = str2num(N1i); N22(i) = str2num(N2i);
end
%%
% Le o arquivo de coordenada dos nós da rede do arquivo DAT
```

```

% contem a parte referente as coordenadas do arquivo Inp do Epanet
[labels,x,y] = readColData(Coordfile,3,1);
% Obtem os valores extremos das coordenadas lidas
[xmax,ind_xmax] = max(y(:,1));
[xmin,ind_xmin] = min(y(:,1));
[ymax,ind_ymax] = max(y(:,2));
[ymin,ind_ymin] = min(y(:,2));
%%
% Define coordenadas da janela para o desenho da rede
xmin = xmin-abs(xmax-xmin)*0.1;
xmax = xmax+abs(xmax-xmin)*0.1;
ymin = ymin-abs(ymax-ymin)*0.1;
ymax = ymax+abs(ymax-ymin)*0.1;
%%
% loop para desenho do tubos e alocação da matriz de vazões
subplot(1, 2, 1);
axis([xmin xmax ymin ymax])
axis off
% Faz o Desenho da rede
hold on
for i=1:LinkCont
Naa = find(Nid==N11(i));
    k = 1;
    while (N11(i) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    x1p = y(k,1); y1p =y(k,2);
    Nbb = find(Nid==N22(i));
    k = 1;
    while (N22(i) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    x2p = y(k,1); y2p =y(k,2);
    line([x1p x2p], [y1p,y2p], 'Color',[.0 .0 .0]); %Desenha as tubulações
if Q(Per,i) > 0.0
    MQ(Nbb,Naa)= abs(Q(Per,i));
else
    MQ(Naa,Nbb)= abs(Q(Per,i));
end
end;
end;
%%
% fecha o Epanet tool kit
epanetclose();
%%
subplot(1, 2, 1);
axis([xmin xmax ymin ymax])
axis off
% Faz o Desenho da rede
hold on
% Redesenha nos e coloca o titulo principal
plot(y(:,1),y(:,2),'o','LineWidth',1,...
    'MarkerEdgeColor','k',...
    'MarkerFaceColor','k',...
    'MarkerSize',4);
    delx = (xmax-xmin)*0.02;
    dely = (ymax-ymin)*0.04;
text(delx+y(:,1),dely+y(:,2),num2str(Nid(:)),...
    'HorizontalAlignment','left')
title('*** LOCAÇÃO DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO ***')
%%
% Impressão na tela dos dados de entrada
fprintf('\n===== Relatório =====\n');
fprintf('Arquivo: %s \n', Redefile);
fprintf('Numero total de nós: %d \n', ND);
fprintf('Numero total de elementos: %d \n', LinkCont);
fprintf('Numero de estações a aloca: %d \n', num_est);
fprintf('Porcentagem de cobertura: %d \n', criterio*100);
fprintf('===== \n');

%% INICIO DO PROCEDIMENTO
% Vetor das demandas

```

```

prt = DM      % Vetor auxiliar utilizado para impressão do vetor das demandas
% Obtem vetor de demandas nodais na forma apropriada
DEM = DM'; %vetor demandas em coluna;
%%
% Obtém a matriz de fração de água
[f] = M_FRAC_AGUA (ND, MQ);          %Gera matriz da fração de água
clear prt;    %Limpa vetor auxiliar
prt = f       %Imprime matriz de fração de água
%%
% Obtém a Matriz de cobertura
[f] = MAT_COBERTURA (ND,f,criterio); %Gera matriz de cobertura global
clear prt;    %Limpa vetor auxiliar
prt = f       %Imprime matriz de cobertura
%%
% Gera População inicial
[POP] = POP_INICIAL(ind_pop, num_est,ND); %Gera população inicial aleatória
%Limpa vetor auxiliar
for i=1:ind_pop
    clear prt
    prt = POP(i).cromossomo %Mostra individuos da população inicial
end
%%
% Calcula a função Objetivo para todos os individuos da população inicial
[vajuste,POP] = F_OBJETIVO (ind_pop, f, POP, ND,num_est,DEM); %Calcula função objetivo da pop.
clear prt;    %Limpa vetor auxiliar
prt = vajuste %Imprime valor da função objetivo da população inicial
%%
% Prepara para entrar no Laço do AG
maxmax = 0;
new_gera = 0; %zera contador de gerações
disp('Geração Melhor Ajuste   Media Geração   Melhor Indivíduo')
%%
% Inicio do laço das gerações do AG
while new_gera < NGen
    new_gera = new_gera+1;
    gerac(new_gera) = new_gera; %Armazena vetor para plotagem
    [POP] = AG (num_est, ND, ind_pop, POP, prob_mut); %gera nova população
    [vajuste,POP] = F_OBJETIVO (ind_pop, f, POP, ND,num_est,DEM); %Avalia população
    % ----- Retem dados para impressão e gráficos -----
    media(new_gera) = mean(vajuste); %Media do vetor auxiliar das funções objetivos
    [maxi,ind_max] = max(vajuste); %Localiza o maximo e o indice da melhor
    maximo(new_gera) = maxi; %Valor do melhor individuo
    if maxmax < maxi
        maxmax = maxi;
        Melhor_de_todos = POP(ind_max).cromossomo;
    end
    Melhor_individuo = POP(ind_max).cromossomo; %Cromossomo da melhor solução
    fprintf(' %d %15.4f %14.4f ',new_gera, POP(ind_max).ajuste, media(new_gera));
    for i=1:num_est-1
        fprintf(' %d ',Nid(Melhor_individuo(i)));
    end
    fprintf(' %d \n',Nid(Melhor_individuo(num_est)));
end
% Fim do processamento das gerações
%%
% Pega Indice do melhor individuo para pintar no gráfico
for i=1:num_est
    k = 1;
    while (Nid(Melhor_de_todos(i)) ~= x(k))
        k = k+1;
    end
    xpl(i) = y(k,1); ypl(i) = y(k,2);
end
%%
% Desenha solução encontrada
subplot(1, 2, 1);
hold on
plot(xpl,ypl,'o','LineWidth',1,...
     'MarkerEdgeColor','y',...
     'MarkerFaceColor','y',...
     'MarkerSize',12)

```



```

%%
%plota grafico dos ajustes do melhor individuo e da média da população
subplot(1, 2, 2);
plot(gerac,maximo,gerac,media);
axis([1 NGen 0 maxmax*1.1])
title('Evolução da convergência');
lgd=legend('máximo','média');
set(lgd,'Location','Best');
xlabel('Numero de gerações');
ylabel('Função objetivo');

```

2. Rotina M_FRAC_AGUA.m – Cálculo da matriz de fração de água

```

function [ f ] = M_FRAC_AGUA( ND, MQ )
%== M_FRAC_AGUA Calcula Matriz de fração de água =====
%   ND - Numero de nós que compõe a rede
%       %numerados sequencial à partir de 1
%   MQ - Matriz das vazões dos elementos entre os nós (linha e coluna)
%       que contribuem com a vazão para o nó de jusante
%   f - Retorna uma matriz de fração de água
% =====
f = MQ;
%Cria uma copia matriz de vazao
%Que retorna a fração de água

for L = 1:1:ND;
    Vsoma(L) = 0;
    %Encontra a soma das vazoes para os nos de jusante
    for C=1:1:ND
        Vsoma(L) = Vsoma(L)+MQ(L,C);
    end
end
% ----- fim totalizacao de vazoes aos nos -----

% ----- CRIA MATRIZ DE FRAÇÃO DE ÁGUA -----
for L=1:1:ND
    for C=1:1:ND
        if Vsoma(L) == 0
            Vsoma(L)=1;
        end
        f(L,C) = MQ(L,C)/Vsoma(L);
    end
end
% ----- Da primeira parte (contribuição direta) -----
f = f'; % Transpõe a matriz de fração para forma usual - vide texto
% -----
% Obtenção das contribuições de nós indiretamente contribuintes
% -----
for i = 1:1:ND
    f(i,i) = 1; % fixa o valor 1 na diagonal da matriz de fração
end
% Inicio do calculo das contribuições e armazenamento na matriz de fração
for C =2:1:ND
    for L=1:1:C-1
        if f(L,C) ~= 0
            ID = L;
            MUL = f(L,C);
            for K = 1:1:ID-1
                f(K,C) = f(K,C)+f(K,ID)*MUL;
            end
        end
    end
end
end
end

```

```
% ----- fim da rotina de obtenção da matriz de fração de agua -----
end
```

3. Rotina MAT_COBERTURA.m – Calcula matriz de cobertura de demanda

```
function [FF] = MAT_COBERTURA(ND, f, criterio)
%MAT_COBERTURA - Obtem A matriz de cobertura associada a f
% Sendo: ND numero de nós na rede hidráulica (dimensão NDXND de f)
% f - Matriz de fração de vazão -> Matriz de cobertura FF
% criterio - percentagem da vazao total coberta
%-----
for L=1:1:ND
    for C=1:1:ND
        if f(L,C) >= criterio
            f(L,C) = 1;
        else
            f(L,C) = 0;
        end
    end
end
FF = f;
end
```

4. Rotina POP_INICIAL.m – Gera população inicial para algoritmo genético

```
function [ Pop ] = POP_INICIAL(ind_pop,num_est, num_nos)
% POP_INICIAL - Gera populacao inicial
% ind_pop - Numero de individuos da população
% num_est - numero de estações de monitoramento
% num_nos - numero total de nós da rede
%-----
pop_ini = zeros(ind_pop,num_est);
%Geração dos individuos da população inicial
for i=1:1:ind_pop
    gera = randperm(num_nos);
    for j=1:1:num_est
        pop_ini(i,j) = gera(j);
    end
    Pop(i).indice = i;
    Pop(i).cromossomo = pop_ini(i,:);
    POP(i).ajuste = 0;
end
end
```

5. F_BJETIVO.m – Avalia a aptidão de cada indivíduo de uma população

```
function [vajuste, POP] = F_OBJETIVO (ind_pop, f, individuo, ND,NE,DEM)
% F_ONJETIVO - Calcula a função objetivo -----
% ind_pop - individuos da população
% f - matriz de cobertura
% individuo - Indivíduos da população (tipo estruturado)
% ND - Numero de nós da rede
% NE - numero de estações de monitoramento
% DEM - vetor de demandas nos nós
% z - valor máximo provável
```

```

%      FE - fator de escala
%      Veajuste - Vetor com os valores da função objetivo da população
%      sem escala
%-----
Vetcob = zeros (ND,NE);

for i=1:1:ind_pop
    ajust = 0;
    ESTAMON = individuo(i).cromossomo;
    %----- Aptidão da população gerada -----
    sumq = 0;
    for L =1:1:ND          %Varre as linhas - correspondentes a todos os nós
        soma = 0;
        for C =1:1:NE      %Varre as colunas com as estações de monitoramento
            soma = soma+f(L,ESTAMON(C));
        end
        if soma >= 1        % Verifica se há coluna não nula
            Vetcob (L) = 1;
        else
            Vetcob(L) = 0;
        end
        VCD(L) = Vetcob(L)*DEM(L);
        sumq = sumq + VCD(L);
    end
    FR = sumq;              %substituiu FR = 100-((z-sumq)/z*100);
    vajuste(i) = FR;
end

for i=1:1:ind_pop
    individuo(i).ajuste = vajuste(i);
end
POP = individuo;

end

```

6. Rotina AG.m – rotina de otimização empregando algoritmo genético

```

function [aux_indiv] = AG (num_est, ND, ind_pop, individuo, prob_mut)
%   AG      - Rotina de algoritmo genetico
%   num_est - numero de estações de monitoramento
%   ND      - numero de nos da rede
%   ind_pop - numero de individuos da população
%   individuo - vetor de dados dos individuos da população
%   prob_mu - probabilidade de mutação
%   aux_indiv - Vetor com individuos da nova população
%-----
    indx = 0;
    while indx < ind_pop
        indx = indx + 1;
        % ----- Seleção por torneio -----
        for j = 1:1:2          %Pais 1 e 2 - seleção
            duelante1 = randperm(ind_pop);
            duelante2 = randperm(ind_pop);
            for i = 1:1:ind_pop
                if individuo(duelante1(i)).ajuste < individuo(duelante2(i)).ajuste
                    pais(j) = individuo(duelante2(i));
                else
                    pais(j) = individuo(duelante1(i));
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

%----- operador Crossover -----
part = 1+(num_est-1)*rand;
for im =1:1:num_est           %Cria uma mascara para Cruzamento
    if im < part
        MASK(im) = 1;
    else
        MASK(im) = 0;;
    end
end;
for kl = 1:1:num_est
    if MASK(kl) == 1
        filhos(1).cromossomo(kl) = pais(1).cromossomo(kl);
        filhos(2).cromossomo(kl) = pais(2).cromossomo(kl);
    else
        filhos(1).cromossomo(kl) = pais(2).cromossomo(kl);
        filhos(2).cromossomo(kl) = pais(1).cromossomo(kl);
    end
end
end
% ----- verificar se o filho não é defeituoso -----
for id=1:1:(num_est-1) %verifica se o filho 1 é normal
    for jd = (id+1):1:num_est
        if filhos(1).cromossomo(id) == filhos(1).cromossomo(jd)
            filhos(1).cromossomo = pais(1).cromossomo;
            jd = num_est;
        end
    end
end
end

    for id=1:1:(num_est-1) %verifica se o filho 2 é normal
        for jd = (id+1):1:num_est
            if filhos(2).cromossomo(id) == filhos(2).cromossomo(jd)
                filhos(2).cromossomo = pais(2).cromossomo;
                jd = num_est;
            end
        end
    end
end

%----- cria uma nova população intermediaria de individuos -----
aux_indiv(indx).cromossomo = filhos(1).cromossomo;
aux_indiv(indx).indice = indx;
aux_indiv(indx).ajuste = 0;
indx = indx+1;
aux_indiv(indx).cromossomo = filhos(2).cromossomo;
aux_indiv(indx).indice = indx;
aux_indiv(indx).ajuste = 0;
end
%-----

%----- Operador Mutação -----
for i=1:ind_pop
    for j =1:1:num_est
        if rand < probab_mut
            repetiu = 1;
            while repetiu == 1
                repetiu = 0;
                no_aux = round(ND*rand);
                if no_aux == 0
                    no_aux = 1;
                elseif no_aux >= ND
                    no_aux = ND;
                end
            end
            for ik=1:1:num_est
                if no_aux == aux_indiv(i).cromossomo(ik)

```

```

        repetiu = 1;
    end
end
end
    aux_indiv(i).cromossomo(j) = no_aux; %gene sofre mutação
end
end
end
end
end
end
end

```

ANEXO B - Arquivos de dados das redes utilizadas

1. Arquivo INP da rede Exemplo 1 – Exemplo1.inp

Arquivo exportado do EPANET. Estão mostrados aqui apenas os dados relevantes, como; dados das tubulações, do reservatório as demandas e as coordenadas dos nós (das informações das coordenadas é extraído o arquivo DAT). O restante do arquivo foi suprimido para redução de espaço.

```

[TITLE]
Exemplo 1 - Rede proposta por Lee e Deininger 1992

[JUNCTIONS]
;ID          Elev          Demand          Pattern
2            0              0              ;
3            0              15              ;
4            0              30              ;
7            0              10              ;
5            0              25              ;
6            0              20              ;

[RESERVOIRS]
;ID          Head          Pattern
1            100           ;

[PIPES]
;ID          Node1      Node2      Length      Diameter      Roughness      MinorLoss      Status
1            1          2          300          50            100            0              Open      ;
2            2          3          200          100           140            0              Open      ;
3            3          4          300          50            110            0              Open      ;
4            4          5          300          50            95             0              Open      ;
5            6          5          300          50            100            0              Open      ;
6            7          6          300          50            120            0              Open      ;
7            7          4          300          50            90             0              Open      ;
8            2          7          300          50            100            0              Open      ;
...
[COORDINATES]
;Node          X-Coord          Y-Coord
2              5455.93          7598.78
3              2507.60          6474.16
4              2477.20          3495.44
7              8221.88          4528.88
5              2477.20          577.51
6              8130.70          1003.04
1              8373.86          8844.98
...

```

2. Arquivo DAT da rede Exemplo 1 – Exemplo1.dat

Este arquivo contém as coordenadas dos nós retiradas do arquivo INP.

[COORDINATES]		
;Node	X-Coord	Y-Coord
2	5455.93	7598.78
3	2507.60	6474.16
4	2477.20	3495.44
7	8221.88	4528.88
5	2477.20	577.51
6	8130.70	1003.04
1	8373.86	8844.98