

**XI SILUBESA*****Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*****28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil**

I-027 – ANÁLISE ECONÔMICA DA REABILITAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO – EPANET E PNL 2000

Ferdnando Cavalcanti da Silva⁽¹⁾

Estudante de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Campus I, Centro de Tecnologia - CT, João Pessoa – PB, Bolsista de Iniciação Científica – PIBIC/ CNPq.

Isabelly Cícera Souza Dias⁽²⁾

Estudante de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Campus I, Centro de Tecnologia - CT, João Pessoa – PB, Bolsista de Iniciação Científica – PIBIC/ CNPq.

Saulo de Tarso Marques Bezerra⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba, em João Pessoa, 2003. Mestrando em Recursos Hídricos na UFCG.

Endereço(1): Rua Hercílio Alves de Souza, 99 - Bancários – João Pessoa - PB - CEP: 58051-290 - Brasil - Tel: (83) 255-1027/ (83) 8809-2101 -  fnandojp@pop.com.br

RESUMO

O abastecimento de água, em condições satisfatórias, é essencial para o desenvolvimento humano. Seu fornecimento está relacionado com aspectos ambientais, econômicos e sociais - tendo em vista, a sua estreita ligação com a manutenção da saúde de seus consumidores, enquanto bem estar físico, mental e social.

Com o aumento da demanda de água, se torna cada vez mais urgente a otimização destes sistemas, particularmente no seu projeto, na operação e manutenção. Os altos custos refletem a importância de se buscar meios de diminuir os desperdícios tão comuns de água e energia. No Brasil, as perdas físicas são, em média, superiores a 50% do volume injetado nos sistemas, e decorrem de muitos fatores, como: valores extremos de pressões nas redes, rupturas nas tubulações, golpes de aríete, sobrepressões decorrentes de interrupções no fluxo d'água nas tubulações, desperdício, etc.

Este trabalho tem o propósito de, inicialmente, apresentar um panorama das perdas de água nos sistemas de abastecimento, para a partir da análise dos dados, proceder, juntamente com a formulação de um modelo, uma estratégia de reabilitação da rede baseado-se em técnicas de simulação, mediante o emprego dos programas EPANET e PNL2000, para a rede de abastecimento do bairro do Bessa em João Pessoa.

Palavras-chave: sistemas de abastecimento, redes de distribuição, modelação de redes, EPANET, PNL2000.

INTRODUÇÃO

As preocupações ambientais impulsionaram os questionamentos sobre o papel do meio ambiente e dos recursos naturais no cenário de desenvolvimento dos países. O recurso natural – água – carece de uma atenção especial dos governos. Nas últimas décadas está sendo cada vez mais disputado, tanto em quantidade quanto em qualidade, principalmente em razão do acentuado crescimento demográfico e do próprio desenvolvimento econômico.

A água é um recurso bastante peculiar entre os recursos naturais, desempenhando diferentes papéis: ora é vista como produto para consumo direto, ora como matéria-prima, ora como ecossistema. Essas atribuições múltiplas determinam dois posicionamentos importantes e até certo ponto divergentes: se por um lado a água é um bem econômico, obedecendo às leis de mercado, por outro lado seu caráter induz que haja uma normatização do seu uso, com legislação específica e atuação do poder público. Por isso, é exigido um modelo de gestão, embasado nos princípios gerais de gestão ambiental, incorporando essas particularidades da água (Garrido, 1999).

Analisando a disponibilidade hídrica e também a demanda por água atual no Brasil é possível entender a necessidade, por partes das prestadoras, de metodologias para a reestruturação dos sistemas de abastecimento de água, principalmente pelo fato das perdas ocorridas em redes ampliadas sem que tenha havido uma análise mais consistente do impacto dessa ampliação sobre o sistema atualmente existente. Quanto às perdas físicas na rede de abastecimento, maior parte dos problemas que surgem durante o seu funcionamento poderiam ter sido previstos durante a fase de projeto. O EPANET, que permite a simulação de diversos cenários de funcionamento de redes de distribuição de água, aliado ao PNL2000, que dimensiona redes de distribuição levando em consideração a minimização dos custos, podem auxiliar na elaboração de projetos de maior confiabilidade, que permitam a redução das perdas nos sistemas de distribuição de água e auxiliem na análise do impacto de expansões de redes existentes.

A introdução de softwares no estudo do comportamento hidráulico das redes pode minimizar custos das prestadoras de água na medida em que permitem a simulação hidráulica da rede para diversas configurações de funcionamento. A rede proposta no trabalho como modelo de aplicação foi dimensionada pelo PNL2000 considerando o dimensionamento econômico, em seguida, modelada no EPANET para que se precedesse a simulações de expansão da rede, aumento de demanda e rompimento de trechos.

EXPANSÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Entre 1950 e 2001, a população mundial duplicou, passando de 2,3 bilhões para 5,3 bilhões de habitantes, com o consumo de água aumentando de 1000 Km³ para 4000 Km³ anuais. Ou seja, nesse período o consumo de água per capita quadruplicou. Em 1940, a população brasileira era de 40 milhões de habitantes, dos quais 12,8 milhões viviam em núcleos urbanos, enquanto que a maioria da população vivia na zona rural. Neste início de século, a população brasileira quase quadruplicou e a relação inverteu-se: hoje, mais de 80% da população brasileira vive nas cidades.

O crescimento demográfico e econômico acelerado do país nos últimos trinta anos fez com que os recursos hídricos fossem demandados, em algumas regiões, além das disponibilidades. Uma análise da estimativa de oferta e consumo da água no mundo mostra que o consumo per capita é inferior à disponibilidade hídrica, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Deflúvio Médio e Consumo de Recursos Hídricos no Mundo em 1998.

Regiões	Oferta (Deflúvio Médio)		Consumo**	
	Total	Per Capita	Total	Per Capita***
	(Km ³ /ano)	(m ³ /hab/ano)	(Km ³ /ano)	(m ³ /hab/ano)
África	3996,00	5.133,05	145,14	202
América do Norte	5.308,60	17.458,02	512,43	1.798
América Central	1.056,67	8.084,08	96,01	916
América do Sul	10.080,91	30.374,34	106,21	335
Brasil*	5.744,91	34.784,33	36,47	246
Ásia	13.206,74	3.679,91	1.633,85	542
Europa	6.234,56	8.547,45	455,29	625
Oceania	1.614,25	54.794,64	16,73	591
Mundo	41.497,73	6.998,12	3.240	645
Fonte: WRI, 1998 e *ANEEL, 1999				

Nota: **Ano de registro do consumo: África-1995; A. do Norte-91; A Central-87; A. do Sul-95; Brasil-90; Ásia-87; Oceania-95; Mundo-1987. ***Calculado pela população.

O aumento da demanda de água em todo mundo pressupõe um aumento da extensão das redes de abastecimento. A análise da evolução dos níveis de cobertura dos serviços de saneamento no Brasil, conforme Quadro 2 revela que houve melhorias sensíveis no atendimento à população urbana, particularmente no que se refere ao abastecimento de água.

Quadro 2 - Evolução da Cobertura dos Serviços de Água e Esgotos no Brasil (%).

INDICADORES	PERÍODO			
Abastecimento de Água	1970	1980	1990	2000
Domicílios urbanos - Rede de distribuição	60,5	79,2	86,3	89,8
Domicílios rurais - Rede de distribuição	2,6	5,0	9,3	18,1

Fonte: IBGE, Censos Demográficos 1970, 1980, 1990, 2000.

Em termos numéricos, no período de 1970 a 2000, a população urbana cresceu 137%, passando de 52 milhões para cerca de 123 milhões. Paralelamente, o número de domicílios abastecidos por redes de distribuição de água passou de 60% para 90%. Cerca de 11 milhões de pessoas que residem em cidades ainda não dispõem de acesso à água por meio de rede geral.

No estado da Paraíba, como em outras regiões do Nordeste, a disponibilidade de água não é suficiente para a quantidade demandada, principalmente em épocas de estiagem quando o nível de água nos reservatórios diminui. Embora possa se afirmar que tenha havido também no estado um aumento considerável da extensão do sistema de abastecimento de água – observar Gráfico 1, muito ainda deve ser feito visando a melhoria da qualidade dos sistemas e a redução das perdas decorrentes da falta de um bom planejamento das empresas fornecedoras.

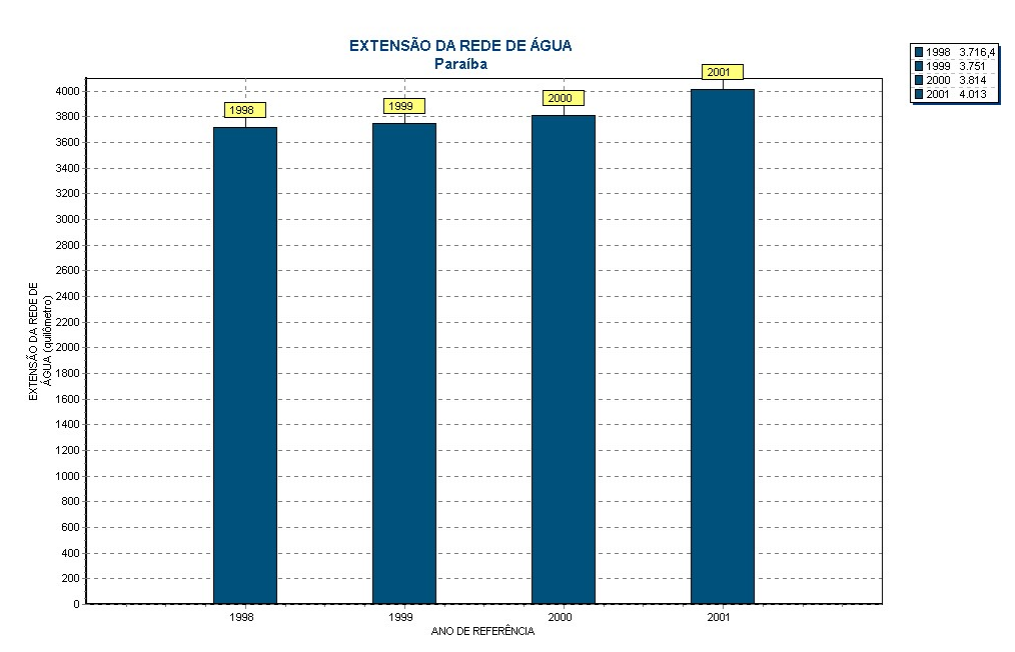


Gráfico 1: Extensão da rede de abastecimento de água na Paraíba em áreas de operação da CAGEPA – SNIS 2002

PERDAS NOS SISTEMAS PÚBLICOS DE ABASTECIMENTO

Em sistemas públicos de abastecimento, do ponto de vista operacional, as perdas de água são consideradas

correspondentes aos volumes não contabilizados. Esses englobam tanto as perdas físicas, que representam a parcela não consumida, como as perdas não físicas, que correspondem à água consumida e não registrada.

As perdas físicas originam-se de vazamentos no sistema, envolvendo a captação, a adução de água bruta, o tratamento, a reservação, a adução de água tratada e a distribuição, além de procedimentos operacionais como lavagem de filtros e descargas na rede, quando estes provocam consumos superiores ao estritamente necessário para operação.

A redução das perdas físicas permite diminuir os custos de produção - mediante redução do consumo de energia - e utilizar as instalações existentes para aumentar a oferta, sem expansão do sistema produtor. A redução das perdas não físicas permite aumentar a receita tarifária, melhorando a eficiência dos serviços prestados e o desempenho financeiro do prestador de serviços.

O combate a perdas ou desperdícios implica, portanto, redução do volume de água não contabilizada, exigindo a adoção de medidas que permitam reduzir as perdas físicas e não físicas, e mantê-las permanentemente em nível adequado, considerando a viabilidade técnico-econômica das ações de combate a perdas em relação ao processo operacional de todo o sistema.

O desenvolvimento de medidas de natureza preventiva de controle de perdas nas fases de projeto e construção do sistema envolve a necessidade de passos iniciais de organização anteriores à operação, daí a importância da aplicação de programas computacionais que permitam simular o comportamento da rede e possibilitar possíveis reestruturações em sua concepção. Aquelas medidas devem contemplar, dentre outras:

- a boa concepção do sistema de abastecimento de água, considerando os dispositivos de controle operacional do processo;
- a qualidade adequada de instalações das tubulações, equipamentos e demais dispositivos utilizados;
- a implantação dos mecanismos de controle operacional (medidores e outros);
- a elaboração de cadastros; e
- a execução de testes pré-operacionais de ajuste do sistema.

Em relação às perdas físicas na rede distribuidora, nos ramais prediais registra-se a maior quantidade de ocorrências (vazamentos). Isso nem sempre significa, porém, que esta seja a maior perda em termos de volume. As maiores perdas físicas na distribuição, em volume, ocorrem por extravasamento de reservatórios ou em vazamentos nas adutoras de água tratada e nas tubulações da rede de distribuição.

Para ilustrar esse tema, apresentam-se a seguir alguns dados referentes a perdas no estado da Paraíba, no Brasil e no exterior. No caso brasileiro, são utilizados dados de 1995 das companhias estaduais (SNIS - SEPURB, 1997), conforme Gráfico 2. Observe-se que os percentuais de Água Não Faturada oscilam entre 25% e 65%. Na mesma fonte, o indicador foi relatado para cidades brasileiras com serviços autônomos, ocorrendo uma variação entre 20% e 60%, o que demonstra que o cenário das companhias estaduais se repete nos serviços autônomos

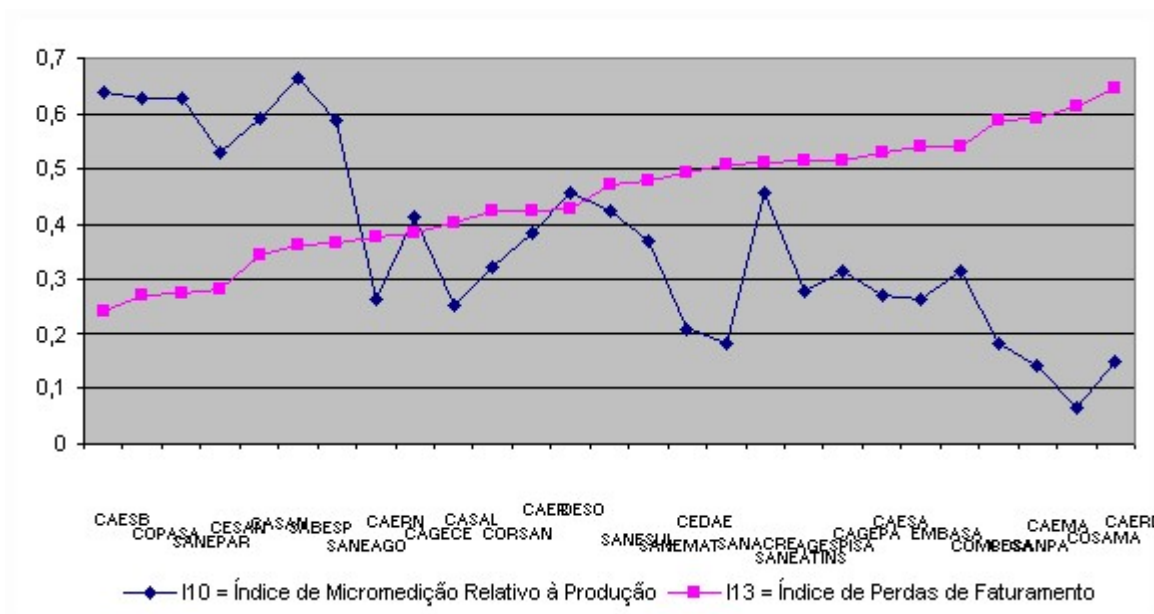


Gráfico 2: Água Não Faturada nas Companhias Estaduais de Saneamento Básico em 1995

No caso do estado da Paraíba, no qual é feito o estudo da rede proposta neste trabalho, o índice de perda de água durante a distribuição apresentou moderado declínio entre os anos de 1998 a 2001, havendo uma pequena oscilação para mais no ano de 2000 em relação ao ano anterior, como se verifica no Gráfico 3. Observa-se, assim, que para o caso da companhia distribuidora de água no estado – CAGEPA – os valores percentuais de perda estão dentro da média nacional, índice este ainda muito alto e que, excepcionalmente para o caso da Paraíba como para os demais estados da região, assume maior relevância em virtude da pouca disponibilidade hídrica e financeira do estado.

Comparando os Gráficos 3 e 4 percebe-se que a redução nas perdas representa também, como não seria diferente, uma redução nas perdas de faturamento pela empresa, demonstrando a importância que se deve dar a processos que visem minimizar possíveis perdas físicas e não físicas de água desde o processo de captação ao de distribuição.

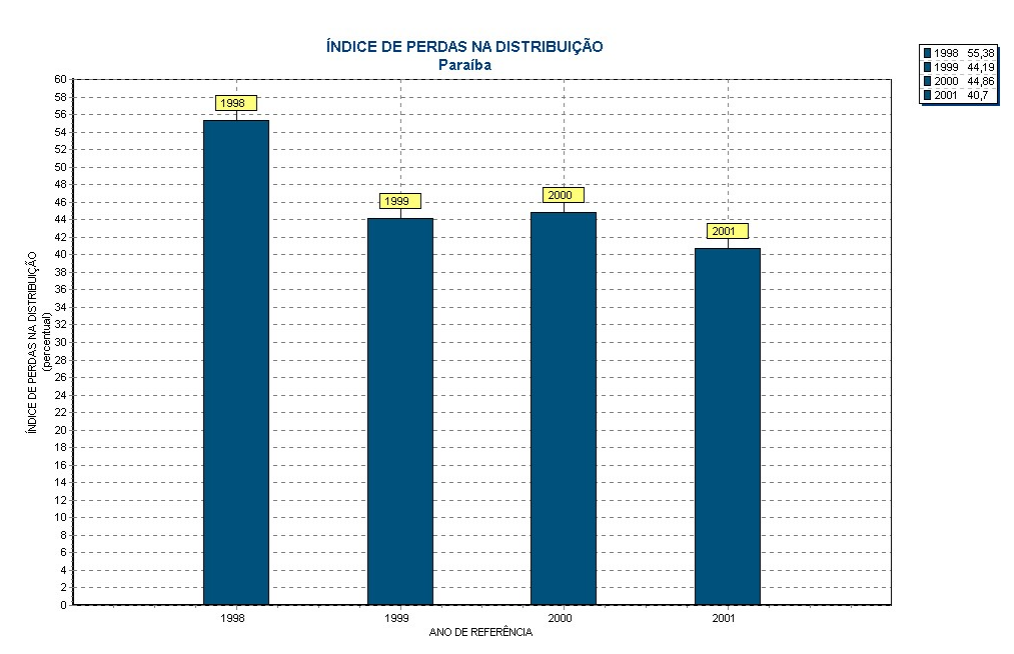


Gráfico 3: Índice de perdas de água na distribuição no estado da Paraíba

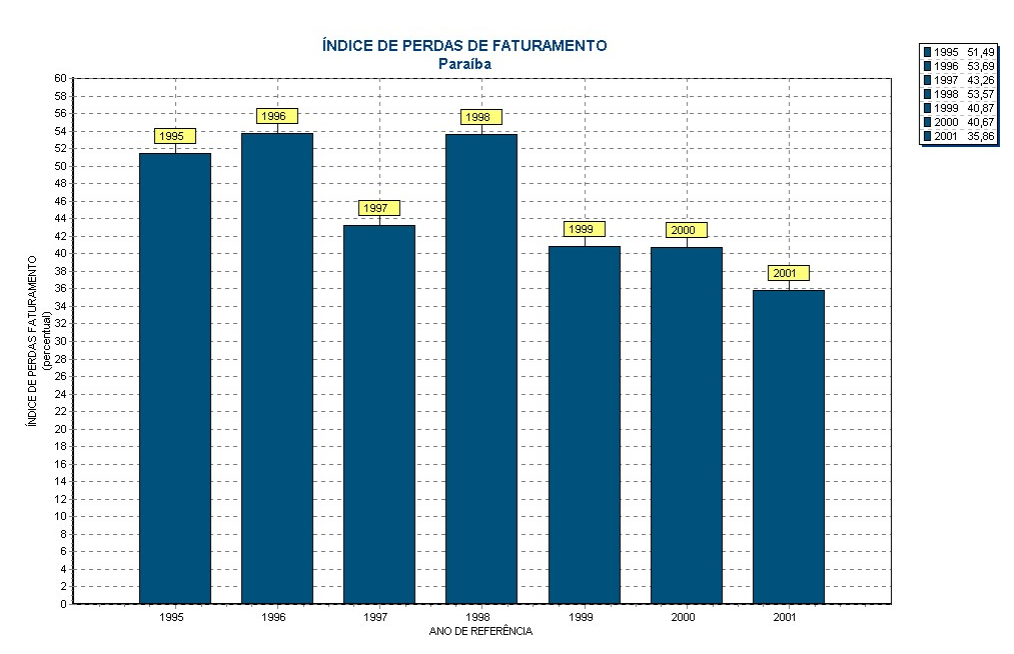


Gráfico 4: Índice de perdas de faturamento no estado da Paraíba

Dados do exterior são apresentados nos gráficos 5 e 6 (IWSA,1995), para água não faturada em percentagem e em vazão por quilômetro de rede, respectivamente. As variações foram de 7% (Singapura, Suíça e Alemanha) até valores entre 25% e 30% (Grã-Bretanha, Taiwan e Hong Kong), com um valor médio de 17%, abaixo da média brasileira.

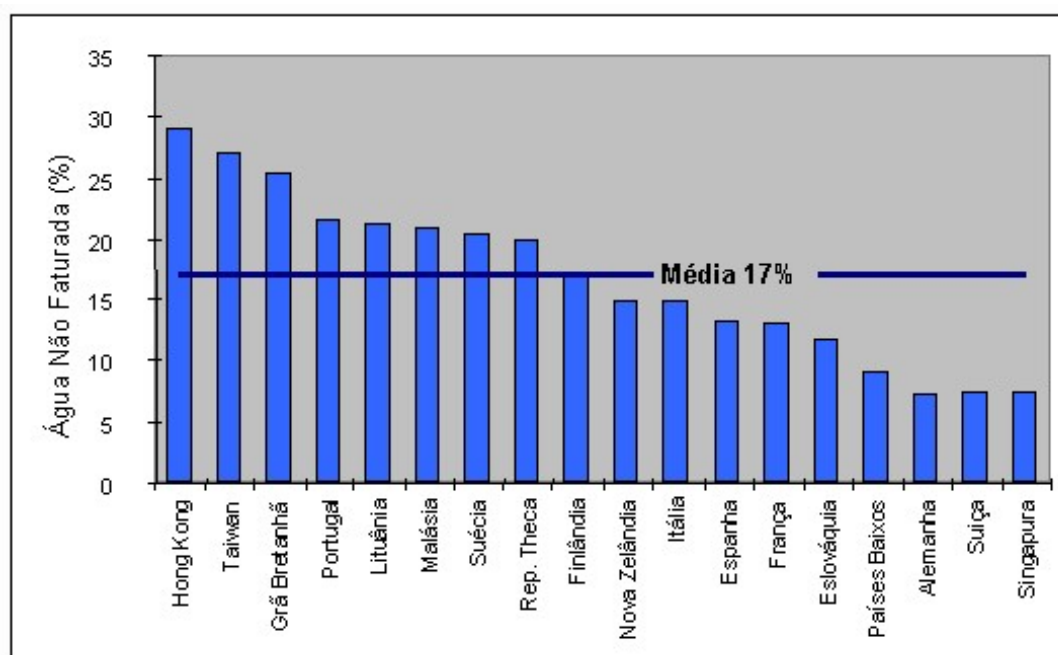


Gráfico 5: Percentual de Água Não Faturada em Diversas Regiões do Mundo

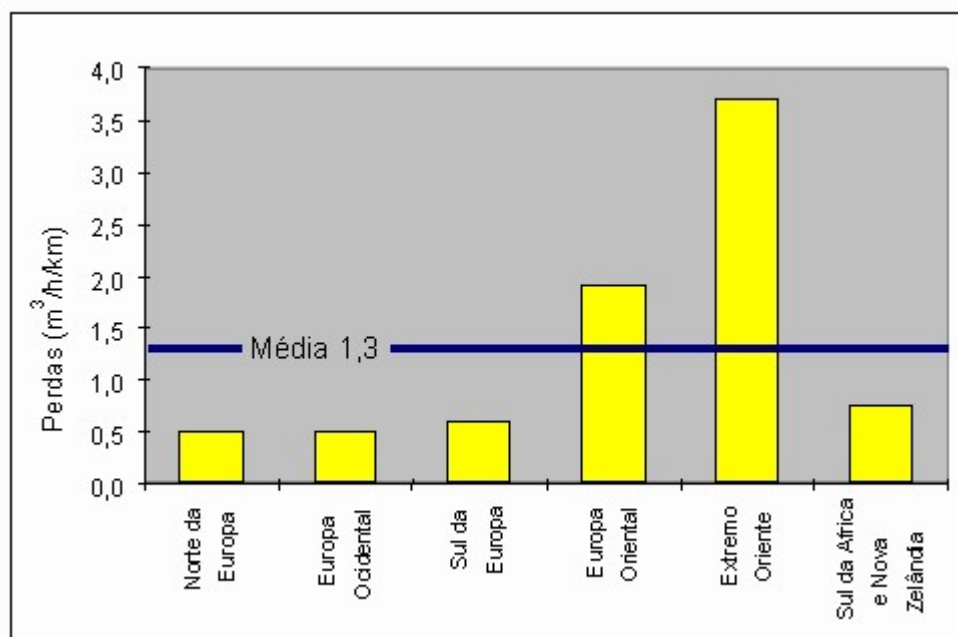


Gráfico 6: Perdas de Água por Regiões do Mundo em m³/h/km de Rede

O que se pretende ilustrar com esses exemplos é que o tratamento das perdas deve ter caráter permanente, devendo, portanto, ser considerado como um programa estratégico dos prestadores de serviços. Caso não se adote tal política, as ações de combate a perdas nem sempre serão efetivas, e os resultados positivos serão temporários.

PERDAS FÍSICAS NA DISTRIBUIÇÃO

Em um sistema de abastecimento de água as perdas físicas totais são as perdas de água que ocorrem entre a captação de água bruta e o cavalete do consumidor. Estas incluem as perdas na captação e adução de água bruta; no tratamento; nos reservatórios; nas adutoras, subadutoras de água tratada e instalações de recalque; e nas redes de distribuição e ramais prediais, até o cavalete. Dar-se-á importância aqui as perdas decorrentes de falhas na rede de distribuição de água, que, como se verá a seguir, muitas das vezes têm origem em projetos mal dimensionados.

As origens e magnitudes das perdas físicas por subsistema podem ser representadas esquematicamente, conforme o quadro 3.

Quadro 3: Perdas Físicas por Subsistema: Origem e Magnitude

	SUBSISTEMA	ORIGEM	MAGNITUDE
	Adução de Água Bruta	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção*	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
FÍSICAS	Tratamento	Vazamentos estruturais Lavagem de filtros* Descarga de lodo*	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional
PERDAS	Reservação	Vazamentos estruturais Extravasamentos Limpeza*	Variável, função do estado das instalações e da eficiência operacional

	Adução de Água Tratada	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção* Descargas	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Distribuição	Vazamentos na rede Vazamentos em ramais Descargas	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões

Nota:* Considera-se perdido apenas o volume excedente ao necessário para operação.

As perdas na distribuição são decorrentes de vazamentos na rede e nos ramais prediais e de descargas. As perdas físicas que ocorrem nas redes de distribuição, incluindo os ramais prediais, são muitas vezes elevadas, mas estão dispersas, fazendo com que as ações corretivas sejam complexas, onerosas e de retorno duvidoso, se não forem realizadas com critérios e controles técnicos rígidos. Nesse sentido, é necessário que operações de controle de perdas sejam precedidas por criteriosa análise técnica e econômica.

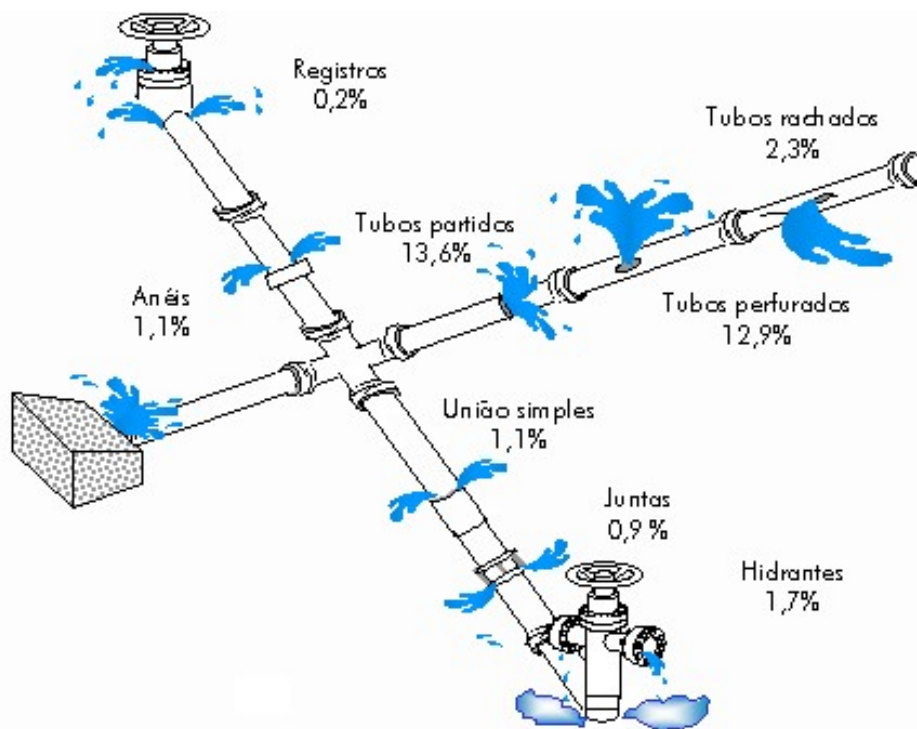
A magnitude das perdas será tanto mais significativa quanto pior for o estado das tubulações, principalmente nos casos de pressões elevadas.

A figuras 1 a seguir ilustra os pontos onde geralmente ocorrem vazamentos nas redes de distribuição.

Figura 1

Pontos Frequentes de Vazamentos em Redes de Distribuição

(percentuais ilustrativos baseados em experiência da SANASA)



Ressalte-se que geralmente o recebimento de obras em novos loteamentos é feito sem que houvesse fiscalização durante a construção. Tal fato decorre da cultura de parte do setor privado em executar obras a toque de caixa, simultaneamente à fase de elaboração e aprovação do projeto, e há casos em que o projeto simplesmente inexistente.

Esse fato, com certeza, se repete por todo o país, onde novas redes são recebidas consciente ou inconscientemente pelos prestadores de serviços, com altos níveis de perdas. A solução para esse círculo vicioso é adotar maior rigor na aprovação de projetos inclusive com a utilização de softwares computacionais que permitam simular diversas situações de funcionamento da rede, e no controle e fiscalização durante a fase de execução da obra.

Estudos de simulação com modelos matemáticos disponíveis podem e devem ser mais explorados e utilizados pelos prestadores de serviços para definição de regras e procedimentos operacionais, em situações normais de escoamento ou em casos de transientes. Entretanto, a ausência de um cadastro confiável não justifica a não utilização desse recurso adicional.

Como ficou evidenciado anteriormente, as perdas por vazamentos nas tubulações são causadas por rompimentos ou falhas que têm origens múltiplas, as mais diversas e dispersas possíveis.

O quadro 4 a seguir apresenta as causas prováveis de falhas e rupturas nas tubulações em função da fase de desenvolvimento do sistema de abastecimento, destacando-se as fases de planejamento e expansão, estudadas pelo EPANET e o PNL2000 neste trabalho.

Quadro 4: Causas Prováveis de Falhas e Rupturas em Tubulações

FASE DA FALHA	CAUSA DA FALHA	CAUSA DA RUPTURA
Planejamento e Projeto	● subdimensionamento ● ausência de ventosas ● cálculo transientes ● regras de operação ● setorização ● treinamento	● sobrepressão ● subpressão ● sub e sobrepressão ● sub e sobrepressão ● sobrepressão ● sub e sobrepressão
Construção	● construtivas ● materiais ● peças ● equipamentos ● treinamento	
Operação	● enchimento ● esvaziamento ● manobras ● ausência de regras ● treinamento	● sub e sobrepressão ● subpressão ● sub e sobrepressão ● sub e sobrepressão ● sub e sobrepressão
Manutenção	● sem prevenção ● mal-feita ● treinamento ● interação operação/usuário ● tempo de resposta	
Expansão	● sem projeto ● sem visão conjunta	● sub e sobrepressão ● sub e sobrepressão

Conforme afirmado anteriormente, a boa operação e manutenção permite que o sistema de abastecimento atenda satisfatoriamente ao cliente ou consumidor. Por outro lado, há que se reconhecer que os sistemas de abastecimento em operação são geralmente muito diferentes daqueles planejados e construídos inicialmente, tornando-se tanto mais próximos da realidade quanto maior for a compatibilidade entre o modelo e a situação real, através, por exemplo, da calibração do modelo simulado com dados do sistema de distribuição real.

Para os sistemas já implantados, os aspectos considerados a seguir apontam para a priorização da redução de pressões na rede de distribuição, para que haja redução de perdas.

As perdas por vazamentos na rede de distribuição, sejam decorrentes de falhas construtivas, defeitos em peças especiais e conexões, rupturas, materiais inadequados, etc., aproximam-se ao escoamento em orifícios e fendas.

Para tubos metálicos em geral, a vazão perdida (Q) é uma função proporcional à raiz quadrada da carga hidráulica (H), ou seja, $Q = f(H^{1/2})$.

Dessa forma, especial atenção deve ser dada ao controle de cargas hidráulicas na rede, pois sua simples redução leva a substanciais reduções nas perdas nos vazamentos existentes, além de restringir o risco de novas rupturas.

O quadro 5 ilustra as reduções de perdas que podem ser conseguidas por intermédio de diferentes percentuais de redução de cargas na rede de distribuição.

Quadro 5: Reduções de Perdas Físicas por Reduções de Pressões $Q = f(H^{1/2})^*$

Redução da carga (%)	Redução da perda (%)
20	10
30	16
40	23
50	29
60	37

Portanto, é possível quantificar previamente as reduções de perdas esperadas por meio de reduções de pressões e, com isso, avaliar economicamente o retorno dos investimentos a realizar para atingir os objetivos.

No caso de tubos plásticos, estudos estrangeiros recentes têm apontado para uma redução ainda maior das perdas em função da diminuição de pressão. Admite-se, segundo técnicos do setor, uma correlação linear entre pressão e vazamento, em virtude da resiliência do material.

MÉTODOS APLICADOS

A rede de distribuição de água usada como exemplo neste trabalho, foi dimensionada considerando o menor custo através da planilha do PNL2000. Em seguida, essa rede foi modelada no EPANET, donde foi executada a simulação estática do seu comportamento hidráulico. Os dados de pressão e vazão fornecidos pelo PNL2000 foram, então, comparados com o do EPANET com o propósito de testar a compatibilidade entre esses dois métodos aplicados.

Com a rede modelada no EPANET foram feitos diferentes configurações de comportamento da rede, visando reabilitar o sistema para o caso de expansão da rede.

PNL 2000

O PNL2000 é um método de dimensionamento econômico de redes malhadas, desenvolvido por GOMES (2001). Esta metodologia procura fazer a otimização da rede de distribuição como um todo, ou seja, efetuando o balanceamento das vazões nos trechos da rede, juntamente com o dimensionamento econômico das tubulações. Para isso, é utilizado o algoritmo de otimização GRG2 (Gradiente Reduzido Generalizado), que é um algoritmo de programação não linear, desenvolvido por LASDON et al. (1984), que pode ser formulado e processado através da ferramenta SOLVER da planilha EXCEL®.

Juntamente com o dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, outra componente que tem grande importância quanto a este aspecto, é a operação e a manutenção destes sistemas, pois são os derivados destes componentes que demonstram a eficiência no abastecimento em termos de vazão e pressão disponível. Na reabilitação dos sistemas, o PNL2000 será utilizado no dimensionamento da rede proposta e na determinação do custo da rede.

Na primeira etapa, faz-se um pré-dimensionamento do sistema, no qual os diâmetros e as vazões dos trechos, e a cota

piezométrica de alimentação, são variáveis a serem determinadas no processo de otimização. Em seguida, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se uma segunda etapa, na qual se realiza o ajuste da solução inicialmente obtida. Nesta etapa o diâmetro teórico (variável contínua), calculado inicialmente para um determinado trecho, é desdobrado em dois diâmetros comerciais, um imediatamente inferior e outro imediatamente superior, considerando como variáveis de decisão os comprimentos de seus sub-trechos. Além dos diâmetros e dos comprimentos dos tubos, as vazões nos trechos também são consideradas como variáveis a serem otimizadas, tanto na primeira como na segunda etapa do método.

Primeira Etapa do Método

A primeira etapa representa o processo inicial onde o conjunto de equações equilibra a rede de distribuição, projetando o que será o esboço dos cálculos e otimizações seguintes. Tais dados, após análise, farão parte da segunda etapa do método. O processo de simulação pode ser feito a partir desta etapa, sem a necessidade dos cálculos de diâmetro e comprimento dos trechos, pois estes serão apenas inseridos.

Função Objetivo: A equação que representa o custo total do sistema de distribuição, que compreende o custo de implantação da rede, mais o custo de operação da estação de bombeamento, é expressa por:

$$C(D_i, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m L_i P(D_i) + C_h H F_a \quad (1)$$

Onde:

C(D_i, Q_i, H) é o custo do sistema de abastecimento, em função dos diâmetros dos trechos D_i, das vazões requeridas nos nós da rede Q_i e da altura de bombeamento H;

L_i é o comprimento do trecho i;

P(D_i)* é a função que relaciona o preço unitário do tubo do trecho i com o diâmetro D_i;

m é o número de trechos da rede;

F_a é o fator ou coeficiente de atualização do custo de operação;

C_h é o custo de operação da estação de bombeamento;

H é a altura manométrica de bombeamento.

As restrições que devem ser fornecidas á ferramenta SOLVER do Excel são: pressões mínimas nos nós, diâmetros mínimos e máximos, conservação de energia no anel, continuidade nos nós e as velocidades mínima e máxima admissíveis.

Segunda Etapa do Método

Os resultados dessa segunda etapa são os definidos no dimensionamento econômico da rede malhada, fornecendo os diâmetros ótimos com seus respectivos comprimentos de trechos para que a rede seja abastecida com eficiência e menor custo possível (custo de implantação e energético).

Função Objetivo: A partir do equilíbrio da rede e dos resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se a segunda etapa do PNL2000. Assim, para cada trecho, o diâmetro ótimo contínuo, obtido na primeira etapa, é desdobrado em dois diâmetros comerciais, sendo um o imediatamente superior e o outro o imediatamente inferior àquele encontrado. Dessa forma, a função objetivo a ser minimizada, será:

$$C(L_{ij}, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 L_{ij} P(D_j) + C_h H F_a \quad (2)$$

Onde:

L_{ij} é o comprimento ocupado pelo diâmetro D_j no trecho i considerado;

P(D_j)_i é o preço unitário do tubo de diâmetro D_j no trecho i;

m é o número de trechos da rede.

As restrições para essa etapa, além das da etapa anterior, são o comprimento dos sub-trechos e a não negatividade dos comprimentos dos sub-trechos.

EPANET

O EPANET é um modelo de simulação do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de abastecimento d'água. Permite obter os valores de todas as variáveis de estado da rede, como a vazão em cada tubulação, a pressão em cada nó, a altura da água em cada reservatório e a concentração de espécies químicas, em qualquer momento durante o período de simulação.

O EPANET foi projetado como uma ferramenta de investigação para melhorar o conhecimento do movimento e evolução dos componentes da água dentro dos sistemas de distribuição.

O programa EPANET é um simulador dinâmico em período estendido para redes hidráulicas de pressão composto por :

- Um módulo de análise hidráulica que permite simular o comportamento dinâmico da rede sob determinadas leis de operação
- Um módulo para o segmento da qualidade da água pela rede.

O EPANET utiliza as seguintes fórmulas para o cálculo da perda de carga contínua na tubulação:

1. Fórmula de Hazen-Williams:

$$J = \frac{10,641}{C^{1,85}} \times \frac{Q^{1,85}}{D^{4,87}} \quad (3)$$

onde:

Q: Vazão, em m³/s;

D: Diâmetro, em m;

J: Perda de carga unitária, em m/m;

C: Coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos tubos e das condições de suas paredes internas.

2. Fórmula de Darcy-Weisbach

$$J = \frac{f}{D} \times \frac{U^2}{2g} \quad (4)$$

O coeficiente de atrito (f) é um fator adimensional, que depende da rugosidade relativa do tubo (ε / D) - ε é a rugosidade absoluta – e do número de Reynolds, quando se trata de um escoamento em regime turbulento. Para um fluxo em regime laminar ($Re < 2000$) a perda de carga por atrito não depende do material da tubulação e o coeficiente f pode ser obtido diretamente pela fórmula de Poiseuille, dada a seguir:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (6)$$

onde:

V: velocidade média do fluxo

D: diâmetro interno da tubulação

ν : viscosidade cinemática do líquido

As perdas de carga em curvas, alargamentos e estreitamentos podem ser considerados, associando à tubulação a um coeficiente de perda de carga singular.

As bombas podem ser modeladas como sendo de velocidade constante ou variável. Tal como as tubulações, as bombas podem ser ligadas ou desligadas em determinados períodos de tempo ou quando ocorrem determinadas condições de operação na rede. As condições de operação da bomba podem ser descritas associando-lhe um padrão temporal relativo à variação da Regulação de Velocidade. O EPANET também pode determinar o consumo de energia e o custo de bombeamento.

Permite a modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável, cuja secção transversal varia com a altura, através de curvas de volume em função da altura de água.

Nas situações em que exista mais do que uma categoria de consumo num nó, podem associar-se múltiplas categorias, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo.

As condições de operação do sistema podem ser baseadas em controlos simples, dependentes de uma só condição (por exemplo período do dia, altura de água num reservatório de nível variável), ou em controlos com condições múltiplas.

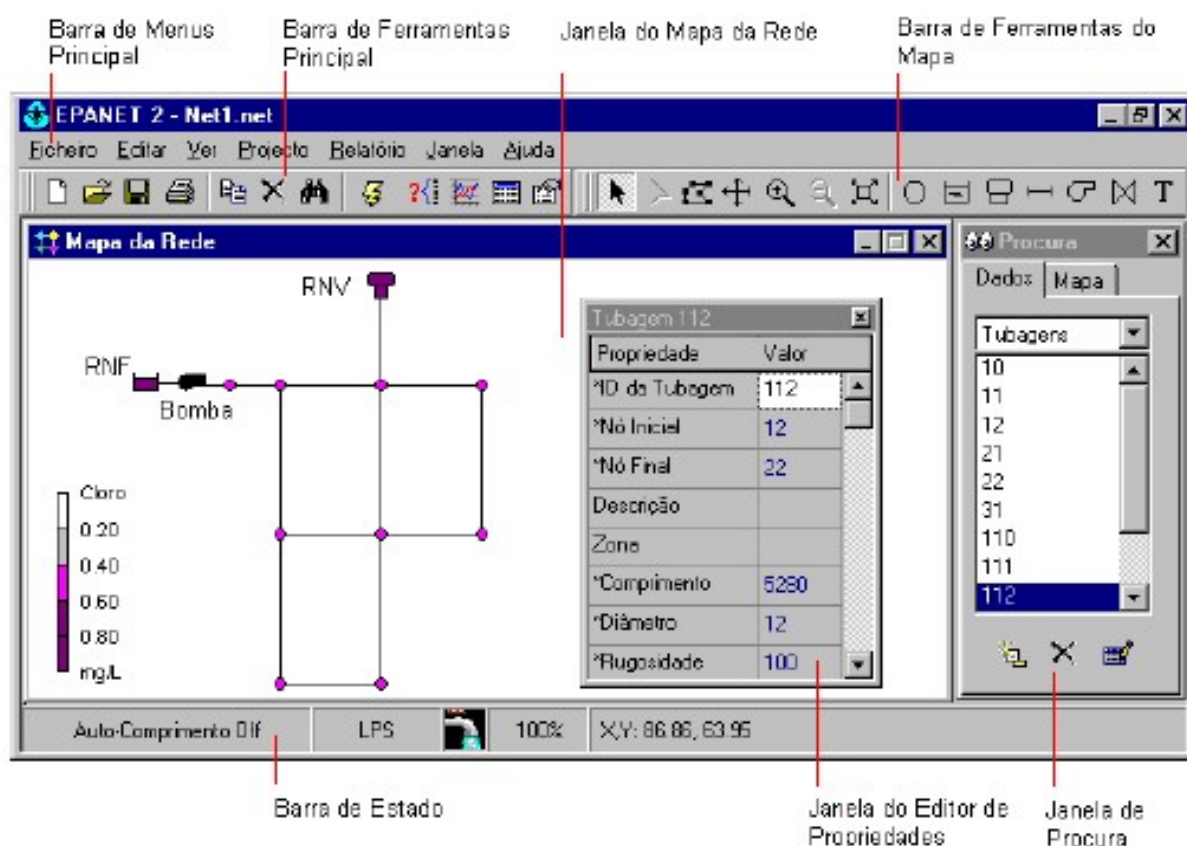
O EPANET permite que sejam feitas dois tipos de simulações hidráulicas: a simulação estática e a dinâmica. A simulação estática permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos, como se dele fornecessem uma fotografia (Alegre, 1999).

A simulação dinâmica é uma simulação de evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico obtidas para sucessivos instantes. Para a execução de uma simulação dinâmica, deve-se criar um Padrão Temporal, para representar a variação periódica dos consumos nos nós ao longo do tempo.

A vantagem do EPANET explorada neste trabalho é a de permitir uma visualização gráfica da rede – ver figura 2 - em estudo como também facilitar a obtenção dos resultados após a alteração de reabilitação proposta: expansão da rede.

Figura 2

Ambiente de trabalho do EPANET

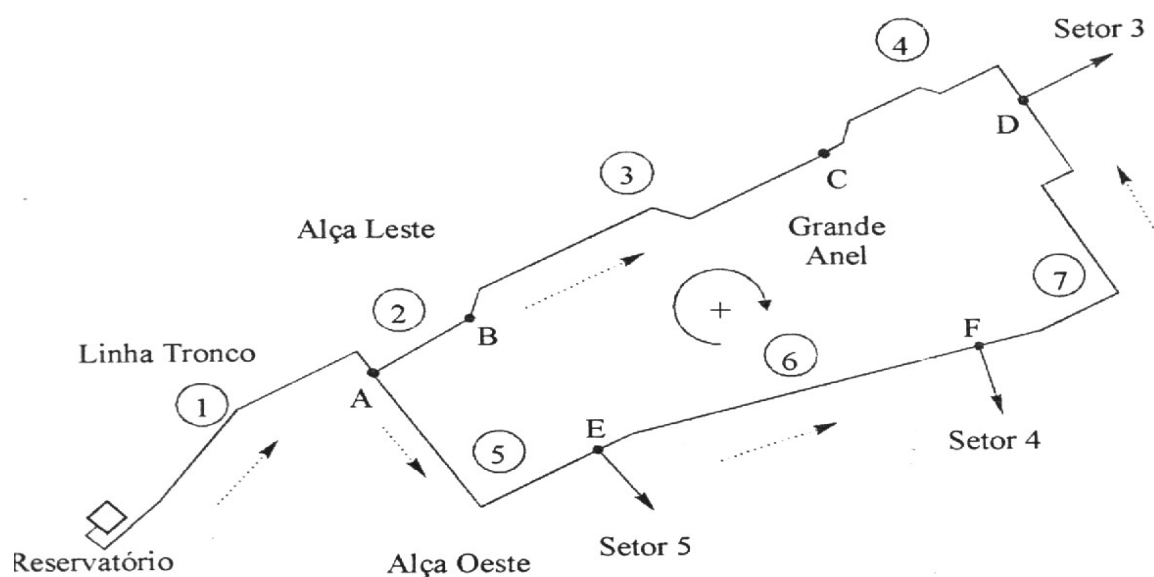


A REDE EXEMPLO

A rede do exemplo foi projetada pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba - CAGEPA, em 1982, para abastecer o bairro do Bessa, na cidade de João Pessoa - PB. O suprimento de água é realizado a partir de um reservatório elevado (Reservatório R-9, situado no bairro de Tambaú). O sistema projetado compreende a linha tronco, que parte do reservatório R-9 e atravessa a área de Tambaú, sem que haja derivação de água; o grande anel, que envolve toda a área do bairro do Bessa, e anéis secundários de distribuição, cada um ligado em um ponto distinto do grande anel. O traçado e os sentidos arbitrados para as vazões do grande anel, que inclui a linha tronco são mostrados na Figura 3.

Figura 3

Esquema do grande anel que abastece o bairro do Bessa em João Pessoa



O quadro 6 mostra as demandas de água, as pressões requeridas, e a cota altimétrica do terreno. Enquanto que o quadro 7 mostra os dados referentes aos comprimentos dos trechos da rede. As pressões mínimas requeridas nos nós do Grande Setor é de 15 mca, e as velocidades máximas e mínimas admitidas nos trechos da rede são e 3,0 m/s e 0,2 m/s, respectivamente. O material da tubulação utilizado no sistema é de ferro dúctil para tubos de diâmetros superiores a 300 mm e de PVC para diâmetros entre 100 e 300 mm. Os tubos de PVC rígido, são do tipo DEFoFo (diâmetros externos idênticos aos de ferro fundido), fabricados de acordo com a norma NBR 7665 da ABNT, dimensionados para trabalhar com água a 20°C e pressões de serviço máximas de 1MPa (100 mca), incluindo as variações dinâmicas. Os tubos de ferro dúctil são da Classe K-7, cujas pressões máximas de serviço são de 1,9 MPa para o diâmetro de 350 mm e de 1,8 MPa para os diâmetros entre 400 e 600 mm. Os coeficientes de rugosidade "C", da fórmula de Hazen-Williams, que serão utilizados nos cálculos das perdas de carga, são de 145, para os tubos de PVC, e de 130 para os de ferro dúctil.

Quadro 6 - Pressão Requerida e cotas dos nós do Grande Anel

Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)
A	0.00	5.0
B	43.44	5.0
C	40.29	4.0
D	40.00	4.5
E	80.32	4.5
F	47.78	4.5
Pressão Requerida = 15 mca		

Quadro 7 - Comprimento dos trechos do Grande Anel

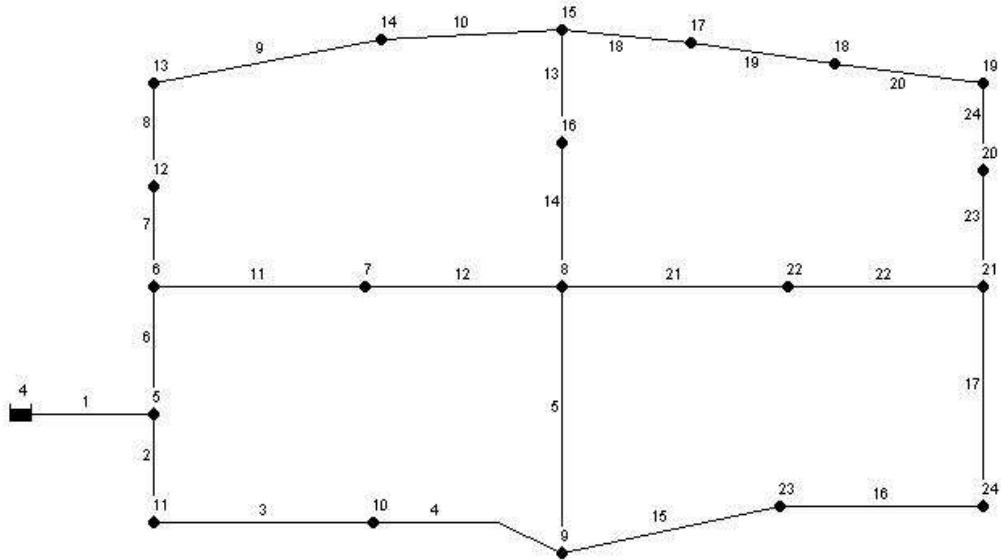
Trecho	Comp. (m)
1	2540
2	350
3	1140
4	1430
5	1020
6	1430
7	1710

O dimensionamento será efetuado considerando as condições de contorno bem estabelecidas, com relação ao fornecimento da água na origem ou cabeceira da rede, neste exemplo como já foi dito anteriormente a cota de cabeceira será tido como fixa em 54 m.

Como proposta para análise da reabilitação do grande anel será acrescentada uma expansão dessa rede, partindo do nó D. Essa expansão corresponderá a uma outra rede que abastecerá o setor 3. A rede de distribuição do setor 3 – Figura 4 – é formada por 4 anéis e tem para a propriedade dos materiais que compõem as suas tubulações as mesmas indicadas acima para o grande anel.

Figura 4

Esquema da rede de expansão do grande anel – setor 3



O quadro 8 mostra as demandas de água, as pressões requeridas, e a cota altimétrica do terreno. Enquanto que o quadro 9 mostra os dados referentes aos comprimentos dos trechos da rede.

Quadro 8 - Pressão Requerida e cotas dos nós da rede do setor 3

Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)
A	0.00	5.0
B	43.44	5.0
C	40.29	4.0
D	40.00	4.5
E	80.32	4.5
F	47.78	4.5
Pressão Requerida = 15 mca		

Quadro 9 - Comprimento dos trechos da rede do setor 3

Trecho	Comp. (m)
1	2540
2	350
3	1140
4	1430
5	1020
6	1430
7	1710

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da reabilitação do sistema do grande anel compreenderá três fases. Na primeira dimensionaremos o grande anel através do PNL2000 considerando o custo mínimo da rede, em seguida, modelaremos o grande anel no EPANET e simularemos uma situação de funcionamento estático da rede, obtendo os valores das pressões nos nós.

Na segunda etapa, procederemos tal qual a primeira, dimensionando e simulando a rede que abastecerá o setor 3,

também executando uma simulação estática e obtendo os valores das pressões nos nós.

Na terceira etapa, simularemos o grande anel no EPANET considerando no nó D a demanda requerida para abastecimento do setor 3. Verificaremos a ocorrência de pressão negativa devido ao aumento de vazão requerida no nó D para abastecimento do setor. Como solução, será analisada a possibilidade de troca do diâmetro do trecho que liga o reservatório de abastecimento do grande anel ao nó 1 e dos trechos que se ligam ao nó D.

ETAPA 1: Dimensionamento e modelação do grande anel antes da expansão

O grande anel foi dimensionado pelo PNL2000, através da planilha do Excel, considerando o dimensionamento ótimo, isto é, aquele que atende as demandas dos nós da rede considerando as pressões requeridas e o custo mínimo. Os dados obtidos com o dimensionamento ótimo da rede pelo PNL2000 pode ser observado no quadro 10, inclusive o custo total da rede.

Quadro 10 – Resultados do dimensionamento ótimo com o PNL2000

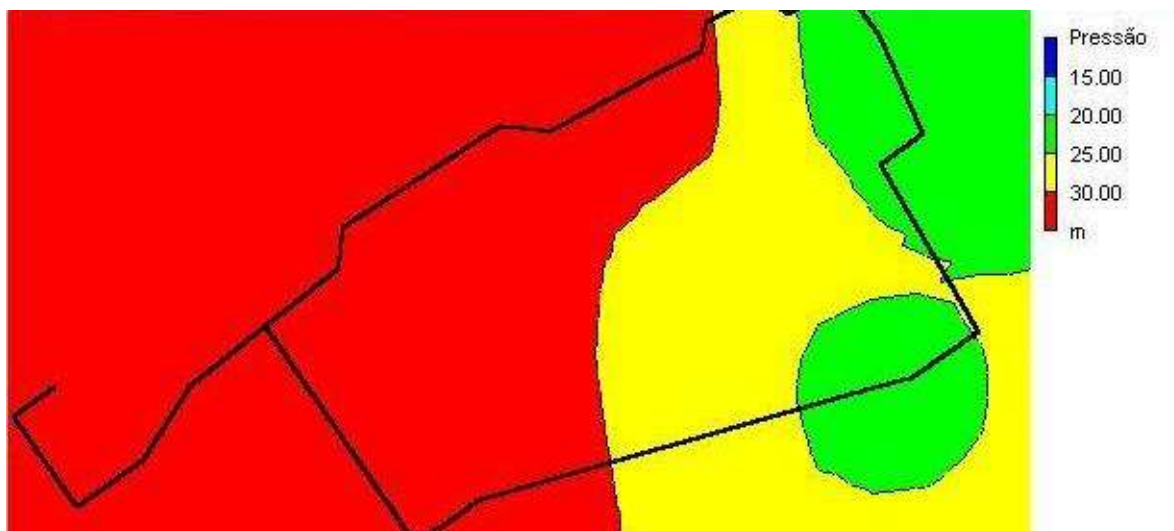
Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)
1	251.83	432.0
2	117.00	381.0
3	73.56	299.8
4	33.27	204.2
5	134.83	381.0
6	54.51	252.0
7	6.73	156.4
Custo total da rede: R\$ 1.573.937,70		

Modelamos o grande anel no EPANET editando as propriedades dos nós e dos trechos com os valores obtidos pelo PNL2000. Os valores dos diâmetros dos trechos editados no EPANET correspondem então aos dos de diâmetro que representam o menor custo da rede.

Para análise comparativa das pressões antes e após a expansão, criamos um gráfico de isolinhas de pressões do grande anel antes da expansão da rede – figura 5. Essas pressões estão dentro da exigência imposta no início do dimensionamento de pressão mínima de 15 mca e são suficientes para o atendimento das demandas dos nós.

Figura 5

Isolinhas de pressão do grande anel antes da expansão



ETAPA 2: Dimensionamento e modelação do setor 3

O setor 3 foi dimensionado pelo PNL2000, através da planilha do Excel, também levando em consideração o dimensionamento ótimo. Os dados obtidos com o dimensionamento ótimo da rede pelo PNL2000 pode ser observado no quadro 11, inclusive o custo total da rede a ser expandida.

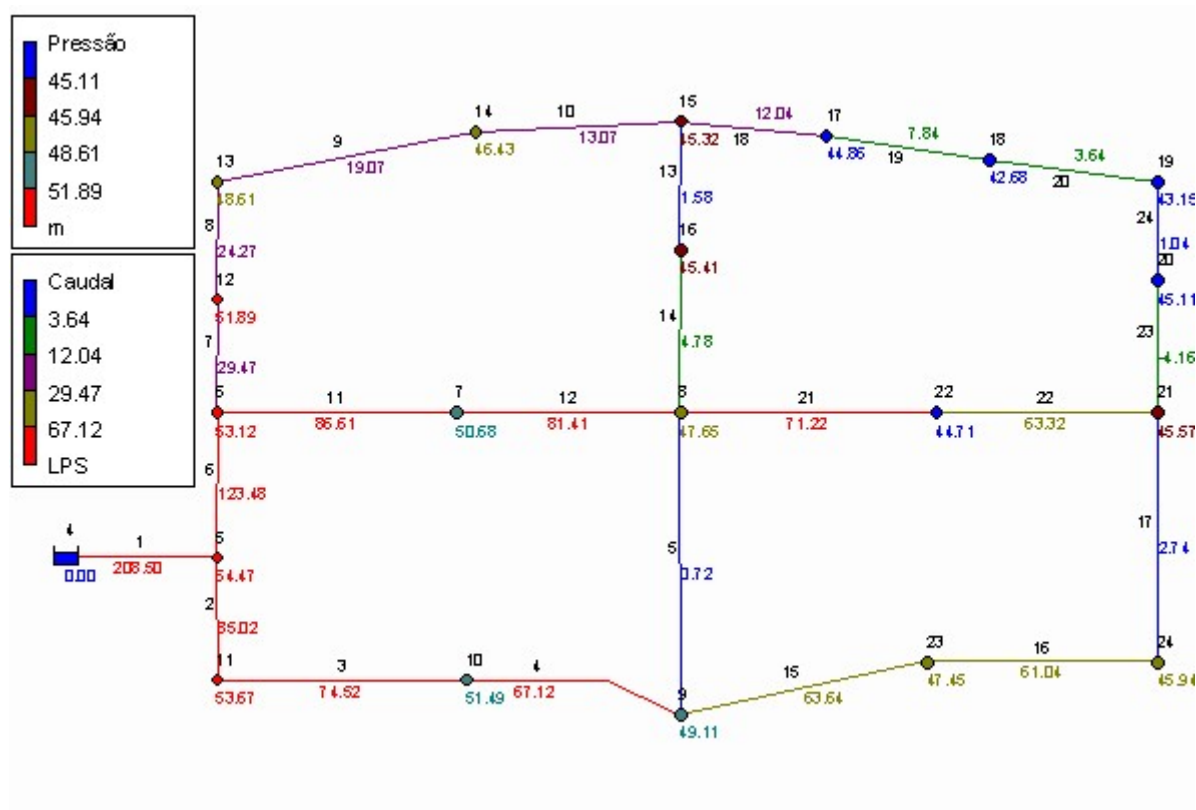
Quadro 11 – Resultados do dimensionamento ótimo com o PNL2000

Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)
1	208.5	381.0
2	87.8	252.0
3	77.30	252.0
4	69.90	252.0
5	4.60	108.40
6	120.7	252.0
7	36.7	204.2
8	31.5	204.2
9	26.3	204.2
10	20.3	156.4
11	76.6	252.0
12	71.4	252.0
13	4.2	108.4
14	7.4	108.4
15	61.1	252.0
16	58.5	204.2
17	0.2	108.4
18	21.9	204.2
19	17.7	156.4
20	13.5	156.4
21	64.0	252.0
22	56.1	204.2
23	5.7	108.4
24	10.9	156.4
Custo total da rede: R\$ 420.877,68		

Da mesma forma que procedemos na etapa 1, modelamos a rede no EPANET e executamos uma simulação estática obtendo os valores dos parâmetros dos nós (pressão, carga hidráulica, consumo, etc) e dos trechos (vazão, diâmetro, velocidade, etc). Na figura 6 indicamos a representação gráfica da rede a expandir indicando a pressão e a vazão (caudal).

Figura 6

Representação gráfica da rede a expandir indicando a pressão nos nós e a vazão nos trechos



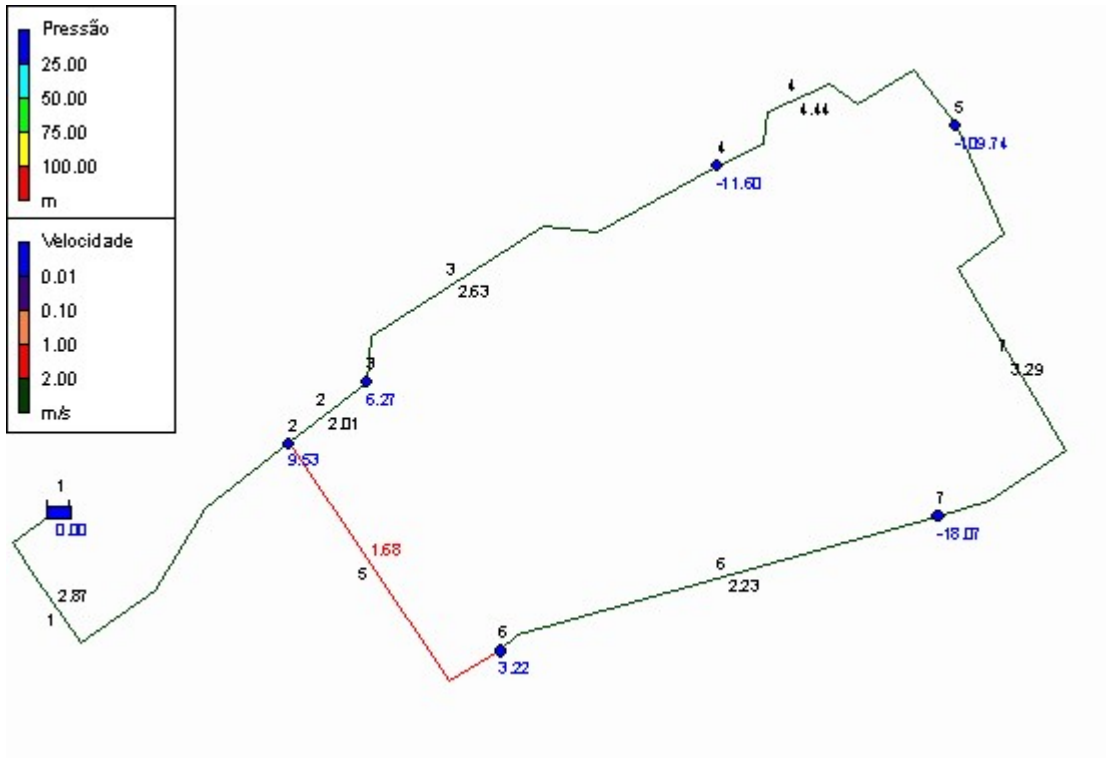
ETAPA 3: Grande anel após a expansão e solução de reabilitação com modificação de diâmetros

Com a expansão do grande anel, a demanda do nó D passa a ser a demanda necessária para o abastecimento da rede do setor 3 (ou seja, 208,5 l/s). Caso não se tenha previsto essas modificações durante a fase de projeto, a rede pode passar a ter um comportamento hidráulico que venha a acarretar perdas no sistema. No exemplo, alguns pontos da rede, após a expansão, passam a apresentar pressão negativa – ver figura 7.

Como proposta de reabilitar o grande anel, isto é, visando eliminar os pontos com pressão negativa, apresentamos a possibilidade de modificação do diâmetro que parte do reservatório ao nó 1 e dos diâmetros que se ligam ao nó D. A vantagem do uso do EPANET nesse procedimento, é de poder executar uma nova simulação da rede e obter os resultados do cálculo com diferentes possibilidades de diâmetro sem que seja necessário proceder com um cálculo hidráulico exaustivo e demorado.

Figura 7

Representação gráfica da rede expandida indicando a ocorrência de pressão negativa em alguns nos nós e velocidades nos trechos



Alternando, no EPANET, diferentes valores de diâmetros internos nas propriedades dos trechos 1, 4 e 7, foi possível verificar as mudanças ocorridas nas pressões dos nós com pressão negativa. Aumentando-se os diâmetros têm-se uma diminuição da velocidade da água na tubulação e conseqüentemente uma diminuição na pressão. Procurando atingir os valores de pressão mínima (15 mca) e de velocidade mínimas ($V > 0,2 \text{ m/s}$) e máximas ($V < 3,0 \text{ m/s}$) requeridas para o funcionamento da rede com a configuração hidráulica semelhante a da antes da expansão, foi possível verificar que alterando o diâmetro de ligação do reservatório ao nó 1 e o do trecho 4 para 638 mm (DN 600) e o diâmetro do trecho 7 para 432 mm (DN 400) resolve-se o problema de pressão negativa em todos os nós. No quadro 12 apresentam-se os valores das cotas, consumo e pressão nos nós e no quadro 13, os valores dos comprimentos, diâmetros, vazão e velocidades dos trechos após a expansão do grande anel.

Quadro 12 – Resultados dos nós do grande anel após expansão

Nós	Cota (m)	Consumo (l/s)	Pressão (mca)
A	5.0	0.00	43.09
B	5.0	43.44	39.58
C	4.0	40.29	19.86
D	4.5	208.5	18.93
E	4.5	80.32	37.41
F	4.5	47.78	19.41

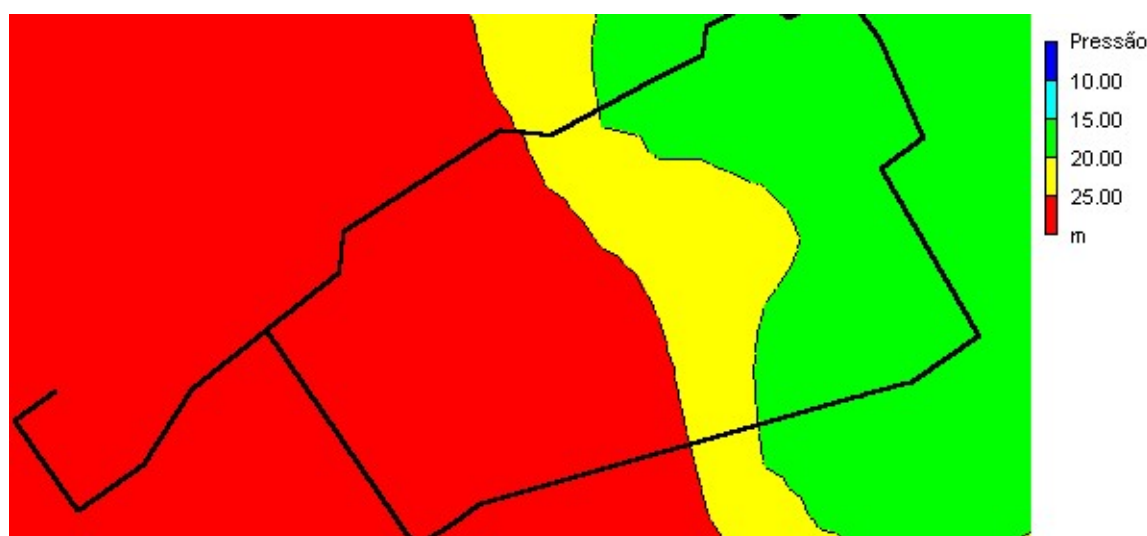
Quadro 13 – Resultados dos trechos do grande anel após expansão

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	Velocidade (m/s)
1	2540	638	420.33	1.31
2	350	381	238.63	2.09
6	1430	252	-101.38	2.03
3	1140	299.8	195.19	2.77
5	1020	381.0	181.70	1.59
7	1710	432	53.60	0.37
4	1430	638	154.90	0.48

O EPANET permite dessa maneira configurar diversos cenários de funcionamento de redes de abastecimento e configura dessa maneira como uma ferramenta útil para análise de modificações em redes e diagnóstico de seu comportamento quando há a necessidade de expansão. De fácil utilização, tem ainda a vantagem de fornecer uma visualização gráfica dos dados obtidos após a simulação da rede. Abaixo, vê-se o gráfico de isolinhas do grande anel após a expansão – figura 8 – permitindo uma análise clara da distribuição das pressões na rede.

Figura 8

Gráficos de isolinhas



O que se pretende mostrar com esse exemplo de expansão da rede, é a importância que as prestadoras de água devem ter quando do planejamento das redes de distribuição, prevendo aumento de demanda futura. Com o uso de programas de computador é possível analisar de maneira rápida que comportamento hidráulico a rede passará a ter quando surgem modificações.

O aumento da população tem influência direta no aumento da demanda de água. As perdas decorrentes nos sistemas têm como muitas de suas origens a falta de planejamento e de conhecimento por parte das próprias empresas distribuidoras, da situação atual das redes existentes. Sem um controle e sem conhecimento do comportamento hidráulico da rede, torna-se difícil a utilização de metodologias de diminuição de perdas nos sistemas. A possibilidade de prever o comportamento da rede, através de dimensionamento e processos de simulação com o uso de programas computacionais, constitui-se como uma alternativa para uma melhor análise das redes uma vez que pode prever falhas no sistema antes de sua execução e evitar tanto perdas físicas nos sistemas como perdas financeiras pelas empresas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, julho 1994.
2. FORMIGA K. T. Metodologia de otimização de redes malhadas através da programação não linear. 1999. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.
3. GOMES, H.P. Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico. Universidade Federal da Paraíba, 2002.
4. GRANADOS, A. Infraestructuras de regadios: redes colectivas de riego a presión. Madrid: Servicio de Publicación de E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, 1990.
5. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE DO BRASIL. Avaliação das águas do Brasil. Brasília, 2002.
6. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Série Histórica 1995-2001. Brasília, 2003.
7. MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO. Programa nacional de combate ao desperdício de água. DTA – Documento Técnico de Apoio nº 2; Definições de perdas nos sistemas públicos de abastecimento. Brasília, 2002.