

07

***Software Web* para simulação do modelo dinâmico inercial rígido em sistemas hidráulicos**

André Luiz Souza¹Luiz Fernando dos Santos Anjo²David Calhau Jorge³Jefferson Beethoven Martins⁴

Resumo

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de *software* que permita a simulação de redes hidráulicas, avaliando o comportamento da água em sistemas de abastecimento com base no Modelo Dinâmico Inercial Rígido (MDIR). São apresentados as etapas e processos aplicados no desenvolvimento do *software* MDIR (Modelo Dinâmico Inercial Rígido). O uso de técnicas e engenharia de *software* em conjunto com tecnologias de desenvolvimento e programação para internet tornou possível um ambiente para criação de redes de distribuição e análise do comportamento da água, tanto no regime permanente como não permanente. O modelo matemático utilizado no desenvolvimento deste projeto considera o efeito da inércia nas simulações, diferentemente do Epanet, que é o sistema de *software* mais difundido na área. O uso de bibliotecas de acesso e uso gratuito disponíveis na internet, como Jointjs e Google Chart Tools, colaboraram na implementação de interfaces amigáveis e ricas em recursos. O produto final resultante deste trabalho está disponível na internet no endereço <http://mdir.sqlweb.com.br> para acesso e uso de qualquer pessoa interessada no tema.

Palavras-Chave: Hidráulica. Internet. Transiente. *Software*.

Abstract

A software system that enables the simulation of hydraulic networks is presented in this work. The behavior of water supply systems based on the dynamic inertial rigid model (MDIR) is evaluated. The steps and processes involved in the development of the software MDIR are presented. Software engineering and programming techniques are used to create an environment for the analysis of the water behavior in distribution networks, both in steady and transient states. The mathematical model used for developing this project considers the inertia effect in the simulations, unlike Epanet which is the most well-known software in the area. The use of free software, such as Jointjs and Google chart tools, collaborated in the implementation of user-friendly and rich in resources interfaces. The resulting end product of this work is available on the Internet at the address <http://mdir.sqlweb.com.br> with free access to be used by anyone interested in the topic.

Keywords: Hydraulic. Internet. Transient. *Software*.

¹UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro. andreluizsouza@gmail.com;

²UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro. luizfernando@reitoria.uftm.edu.br;

³UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro. david@eletrica.uftm.edu.br;

⁴UFTM – Universidade Federal do Triângulo Mineiro. jefferson.beethoven@hotmail.com.

1. Introdução

O objetivo principal deste trabalho é criar um *software* via web, utilizando a formulação do modelo dinâmico inercial rígido (MDIR) para simulação do comportamento da água em sistemas de abastecimento de água. O uso do MDIR irá permitir que as análises do comportamento da água em período extensivo (já simuladas pelo *software* Epanet) sejam mais condizentes com a realidade, ou seja, contemplando os efeitos da inércia.

Os sistemas computacionais são ferramentas importantes em diversas áreas do conhecimento. Britto (2010) demonstra que a área de *software* é um ramo de atividade no qual o conhecimento é um fator crítico na competição e principal gerador de vantagens. Mesmo com os segmentos mais rentáveis dominados por grandes empresas multinacionais, o setor apresenta grandes oportunidades em vários nichos de mercado. O autor ressalta ainda que a estrutura do setor tende a constantes reconfigurações, em função do surgimento de novas necessidades, novos produtos ou demandas setoriais. Trata-se de um processo de crescente internacionalização de mercados e estratégias, que converte a qualidade e produtividade em fatores determinantes da competitividade. O desenvolvimento de *software* envolve mais diretamente a acumulação de conhecimentos, qualificação técnica pessoal, realização de esforços metodológicos para o aprofundamento da interação com usuários.

Uma das grandes áreas do conhecimento das engenharias, principalmente da Engenharia Civil e Ambiental, é a análise de sistemas de abastecimento de água. Anjo (2008) explica que um sistema de abastecimento de água é caracterizado pelo conjunto de dispositivos (bombas, válvulas, reservatórios, equipamentos de controle, etc.) e condutos, destinados ao transporte de um fluido (no caso em estudo - água), com a finalidade de atender os diversos pontos de consumo da cidade, com vazões e pressões convenientes. Na sua operação, podem aparecer vários problemas como: oscilação de pressão e de vazão, rompimento das tubulações, perdas por vazamento, falhas em mecanismos de válvulas de controle.

Outro fato a ser considerado vem da necessidade de se ter que atender demandas advindas do crescimento populacional, acima dos valores previamente projetados para a instalação, resultando em comportamentos e operações inadequados. Isso tem levado os gerenciadores desses serviços a buscarem

alternativas que contribuam para um melhor gerenciamento e acompanhamento das demandas do sistema, garantindo maior confiabilidade operacional. Com um controle operacional adequado, consegue-se atender às necessidades de consumo, fazendo com que os serviços prestados à comunidade sejam satisfatórios e eficazes, evitando assim, desperdícios, contaminações e problemas de oscilações de pressões. Em instalações hidráulicas, em geral, há diversos sistemas de *software* que colaboram para a obtenção de resultados melhores ou na simulação de sistemas. Como exemplo, podemos citar o programa computacional Bubbler, versão 1.1, considerado adequado ao dimensionamento hidráulico de um projeto de irrigação de pequeno porte e baixa pressão (SOUZA; ANDRADE; SILVA, 2005). Outro exemplo é que para estudar o comportamento da equação de Swamee-Jain nas mais variadas situações de condução de água em sistemas pressurizados, um aplicativo computacional foi desenvolvido usando o compilador Visual Basic (ANDRADE; CARVALHO, 2001).

Soares *et al.* (2004) usam o *software* Epanet e Algoritmos Genéticos desenvolvidos com a linguagem de programação C++ para avaliar as perdas por vazamentos de um setor da rede de distribuição de água da cidade de Campo Grande-MS. Considerando a complexidade do sistema avaliado, os resultados apresentados foram muito satisfatórios e evidenciam a necessidade das companhias de saneamento utilizar ferramentas computacionais que representem as condições de campo com um nível de realismo maior.

Quando o assunto é hidráulica, o *software* mais popular e reconhecido pela comunidade técnico-científica é o Epanet que dispõe de várias funcionalidades. Trata-se de um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações nas quais seja necessário efetuar simulações de sistemas pressurizados de distribuição (ROSSMA, 2009).

Anjo (2008) investiga a formulação do modelo dinâmico inercial rígido (MDIR) para adequá-la à mesma estrutura que define o sistema de equações com o qual é obtida a solução hidráulica no programa Epanet. Demonstra em seus estudos que no MDIR,

por levar em consideração o efeito da inércia em sua estrutura de cálculo, as simulações apresentam-se mais fisicamente adequadas quando comparadas com a do Epanet. Com base neste cenário, surgiu a motivação para o desenvolvimento de um *software* via *web* que ofereça a engenheiros, técnicos, estudantes e demais interessados em Hidráulica a possibilidades de simular o MDIR. Acredita-se que, com esse *software* via *web*, os profissionais de engenharia que já empregam cotidianamente o “*software*” EPANET serão beneficiados com a nova implementação.

2. PHP

Segundo Hughes e Zmievski (2001) a linguagem de programação para internet PHP surgiu da necessidade de Rasmus Lerdorf detectar quem estava lendo seu currículo online. Ele escreveu a versão inicial em uma tarde usando uma combinação de Perl (Practical Extraction And Report Language) e CGI (Common Gateway Interface), posteriormente reescreveu o código Perl na linguagem C para eliminar a sobrecarga cada vez que seu currículo era acessado. Depois de algum tempo, as pessoas que estavam no mesmo Servidor Web solicitaram que Lerdorf liberasse o acesso ao PHP. Quanto mais pessoas usavam o código mais solicitações de novos recursos eram requeridas, resultando na distribuição de um pacote com a documentação, este pacote recebeu o nome de Personal Home Page Tools. Em seguida, o nome mudou para Personal Home Page Construction Kit e, junto com os novos recursos, foram incorporadas rotinas para processamento de códigos SQL no uso de banco de dados.

Estrozi, Batista Neto e Bruno (2010) relatam que o PHP coloca-se como uma das mais poderosas ferramentas para os profissionais de desenvolvimento e programação voltada para a internet. É capaz de reduzir bruscamente a quantidade de tempo necessário para a realização de um projeto ou mesmo permitir que novos mecanismos sejam criados de maneira que se possa obter um produto final diferenciado e digno de destaque. O PHP teve participação importante neste projeto para fazer os cálculos do MDIR, gerando os dados necessários para os gráficos, além de todo o controle para armazenar as informações das redes no banco de dados. Dentre os recursos técnicos disponíveis e usados, vale destacar a função `Array()`, que viabilizou o trabalho com matriz, que está fortemente presente no algoritmo do MDIR.

As funções matemáticas também foram decisivas, possibilitando todos os cálculos, inclusive alguns mais complexos.

3. MySql

De acordo com Lobo (2008), a internet crescia assustadoramente em meados de 1997 e os Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) utilizados nas empresas eram voltados para robustez, segurança e confiabilidade. Surgiram então duas novas características que deveriam estar presentes nos SGBDs: rapidez e flexibilidade. Na época, era difícil encontrar um SGBD com todas as características reunidas, mesmo com as empresas precisando de mais performance e flexibilidade. Reunir todas as características necessárias em um único SGBD era um desafio que foi enfrentado por um grupo de desenvolvedores que criou um sistema para armazenamento e gerenciamento de dados rápido, flexível e seguro, que recebeu o nome de MySQL. Tornou-se popular rapidamente em função da sua rapidez e flexibilidade, além de ser compatível com vários sistemas operacionais. Até a quinta versão, o MySQL era muito utilizado na internet, mas passou a ser opção também em computadores locais e remotos porque ganhou características compatíveis com os robustos servidores de banco de dados como tabelas seguras e transações. Com relação aos requisitos de tecnologia de banco de dados, o projeto apresentado neste trabalho não requer recursos especiais ou configurações técnicas diferentes dos sistemas tradicionais. Mesmo com esse cenário, a escolha do *software* MySQL como sistema de gerenciamento de banco de dados levou em consideração os seguintes fatores: disponível na maioria dos planos de hospedagens das empresas que oferecem o serviço de Hosting; compatibilidade com a linguagem de programação PHP; número de funções disponíveis no PHP para acesso, controle e manipulação das requisições ao banco de dados; histórico de sucesso do seu uso em projetos de *software* para internet.

4. MDIR para a simulação de redes de distribuição de água

Como explica Anjo (2008), usualmente os modelos dinâmicos inerciais são utilizados na análise de escoamentos variados, em que se considera a importância do efeito da inércia do movimento de fluido, como é o caso do golpe de aríete e dos

escoamentos oscilatórios. Nos modelos dinâmicos em que não se consideram os efeitos da inércia do escoamento é admitido que a característica dinâmica seja fornecida por alterações temporais das condições de contorno, como por exemplo, variação dos níveis dos reservatórios, variação de demandas, etc. Esses modelos são usualmente empregados nas análises em período extensivo, como uma sucessão de aplicações do modelo estático, após alteração das condições de contorno em cada intervalo de análise.

Pela natureza das equações que os governam, os modelos estáticos permitem apenas a análise em regime permanente, em que as grandezas associadas ao escoamento não variam no tempo. Sob um ponto de vista conceitual, os modelos dinâmicos inerciais elásticos englobam os demais modelos como subcasos decorrentes de simplificações naturais desse caso geral. Koelle (1989) descreve a possibilidade de um tratamento unificado para o escoamento permanente, transitório e oscilatório com base neste modelo geral. Luvizotto Jr. (1995) apresenta uma sistematização para a construção de um simulador hidráulico em período extensivo, utilizando o modelo dinâmico inercial elástico, valendo-se de celeridades e comprimentos fictícios para as tubulações, com o objetivo de acelerar a convergência do processo, quando simula o regime permanente.

As equações gerais que governam o escoamento fluido nos condutos de uma instalação hidráulica a pressão, permitem a determinação das variáveis de estado; carga e vazão ao longo da tubulação no transcorrer do tempo; $H = H(x, t)$ e $Q = Q(x, t)$, onde x é a distância medida ao longo do eixo da tubulação e t o tempo transcorrido. Sob as hipóteses do modelo dinâmico inercial elástico, essas equações podem ser expressas por meio das equações da continuidade e da quantidade de movimento na forma (STREETER; WILYE, 1968).

$$\begin{cases} \frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 & \text{continuidade} \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + f \frac{Q|Q|}{2gDA^2} = 0 & \text{quantidade de movimento} \end{cases} \quad (3.1a, b)$$

Sob a hipótese de modelo rígido, a celeridade de propagação ^(a) torna-se infinita, levando a zero o

primeiro termo do lado esquerdo da equação da continuidade, reduzindo essa equação a $\partial Q / \partial x = 0$, de onde se conclui que a vazão será a mesma em toda a extensão da tubulação para cada instante de tempo

$$t, \text{ logo } Q = Q(t) \text{ e } \partial Q / \partial t = dQ / dt.$$

A equação da quantidade de movimento integrada entre as seções extremas da tubulação, (1) seção de montante e (2) seção de jusante, distantes um comprimento medido ao longo de seu eixo, permite obter:

$$(H_2 - H_1) + f \frac{LQ|Q|}{2gDA^2} = - \frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} \quad (3.2)$$

Resultando na equação que governa o modelo dinâmico inercial rígido.

A equação do modelo rígido pode ser expressa na seguinte forma matricial, aproveitando-se das definições das matrizes definidas para o modelo estático:

$$A_{12}H + A_{10}H_0 + f(Q) = -\beta \frac{dQ}{dt} \quad (3.3)$$

Onde β é uma matriz diagonal quadrada de ordem np , com o elemento (i,i) , formado pela relação obtida do tubo i , dada por $\beta_{ii} = L_i / (gA_i)$.

Utilizando uma aproximação simples para $\frac{dQ}{dt}$, na forma: $(Q - Q_0) / \Delta t$, com que Q_0 avaliada em k relativa ao instante $(^t)$ e Q avaliada em $(^{k+1})$ no instante $(^{t+\Delta t})$, e considerando que, na evolução no tempo, o termo de atrito possa ser avaliado em relação ao instante t , pode-se reescrever a equação anterior como:

$$A_{12}H + A_{10}H_0 + GQ_0 + BQ = 0 \quad (3.4)$$

Onde G e B são matrizes diagonais quadradas de ordem np :

$$G = \begin{bmatrix} R_1|Q_{01}| - B_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_{np}|Q_{0np}| - B_{np} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{gA_1\Delta t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{L_{np}}{gA_{np}\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\beta_1}{\Delta t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{\beta_{np}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O sistema de equações a ser resolvido para a solução do problema será:

$$\begin{cases} A_{12}H + BQ = GQ_0 - A_{10}H_0 \\ A_{21}Q = q \end{cases} \quad (3.7)$$

Que resulta no sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} B & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GQ_0 - A_{10}H_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Linear, tendo como uma propriedade importante o fato da matriz dos coeficientes ser constante, ou seja, será montada apenas uma vez durante o processo de solução. O vetor de soluções é variável no tempo e dependerá da equação de resistência utilizada. Considerando a Fórmula Universal de perda de carga, pode-se escrever:

$$A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{12}H - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 = q \quad (3.9)$$

Separando os termos da equação acima, tem-se:

$$A_{21}B^{-1}A_{12}H = A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 - q \quad (3.10)$$

Chamando o produto de matrizes, que multiplica as cargas incógnitas, de J e o vetor resultante do segundo

membro de F :

$$JH = F \quad (3.11)$$

Uma vez obtida a solução para o sistema de equação dada por (3.11), para a determinação do vetor de cargas, pode-se obter as vazões pela equação:

$$Q = B^{-1}GQ_0 - B^{-1}A_{12}H - B^{-1}A_{10}H_0 \quad (3.12)$$

O processo de solução se dá da seguinte maneira: resolve-se o sistema de equações para a determinação das cargas, equação (3.11), com os valores de carga obtidos determinam-se as vazões nos tubos por operações matriciais simples obtidas pela equação (3.12).

Deve se observar que a matriz inversa que permite a solução do sistema de equações em (3.11), se mantém constante durante todo o processo, sendo, portanto necessário calculá-la apenas uma vez, pois não está expresso em termos das vazões. Essa observação pode ser importante, pois o fato de não necessitar do recálculo da matriz inversa, se o sistema for demasiadamente grande, pode reduzir significativamente o tempo final de processamento.

Cabe observar a diferença fundamental de convergência do método não inercial, que consta no *software* Epanet e o MDIR. No primeiro caso, a convergência é numérica e decorrente do processo de minimização de resíduos; no segundo caso, trata-se de uma evolução no tempo (convergência no tempo) em que o fenômeno é descrito fisicamente, a partir de uma condição inicial para outra condição qualquer.

Se o interesse é o de obtenção da condição estática, como faz o modelo estático empregado no EPANET, o modelo proposto também poderá ser empregado. Nesse caso pode-se abrir mão da precisão numérica durante a condição transitória, para se obter a aceleração da convergência para o regime permanente, adotando-se valores de dt maiores. Cabe observar que o dt é a discretização numérica de uma equação diferencial e, portanto para garantir sua adequação ao fenômeno físico este valor deve ser pequeno para garantir a representação da derivada. O uso de dt s grandes (dentro de certos limites, como serão observados em exemplos ilustrativos) não traduz corretamente a evolução do fenômeno físico, embora para os testes efetuados tenha-se obtido a

convergência para o regime permanente final, de forma acelerada.

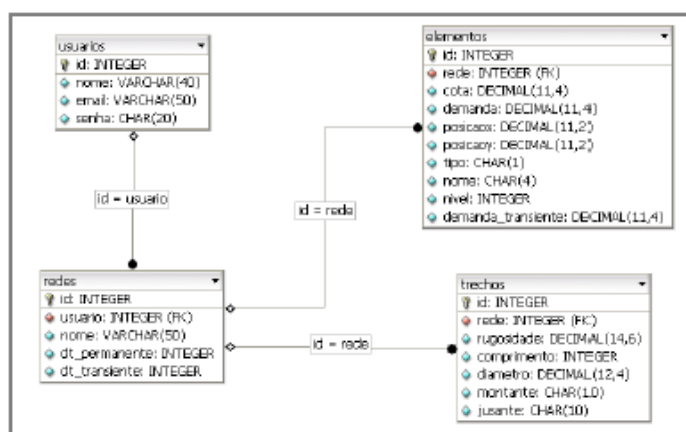
5. Engenharia de Software: O Desenvolvimento

O *software* que permite a simulação do MDIR está em um *site* na internet disponível no endereço <http://mdir.sqlweb.com.br>. É o produto deste trabalho desenvolvido após meses de testes de tecnologias e desenvolvimento de códigos. Pode ser usado por qualquer usuário gratuitamente após um rápido cadastro. O cadastro se faz necessário para que seja possível controlar quem é o autor de cada rede com suas definições, evitando o acesso indevido. A sigla MDIR definida por Anjo (2008) foi escolhida como nome do *software/site*.

5.1 Projeto do Banco de Dados

Na primeira versão do MDIR, é possível montar uma rede hidráulica com três elementos: nó, reservatório de nível fixo e trechos. Porém o projeto de banco de dados está estruturado para que nas próximas versões outros elementos possam ser inseridos, como, por exemplo, válvula e bomba. O modelo lógico do banco de dados, ilustrado na Figura 1, apresenta quatro tabelas.

Figura 1 – Modelo lógico do banco de dados



Fonte: Acervo do autor (2013).

A tabela usuários com as colunas “id” para identificação interna, a coluna “nome” para armazenar o nome completo do usuário, a coluna “e-mail” registra o e-mail de contato do usuário para, por exemplo, recuperar uma senha esquecida e finalmente a coluna senha onde é gravada a senha do usuário. A tabela redes possui a coluna “id”, como em todas as tabelas

para identificação interna do sistema, a coluna usuário para identificar o proprietário da rede demonstrado na ligação com a tabela usuários. O usuário deve dar um nome para sua rede, que será armazenado na coluna nome, além de estipular “dt_permanente” e “dt_transiente”, que é o incremento de tempo usado no cálculo para o regime permanente e transiente, como apresentado por Anjo (2008). No projeto de banco de dados, a rede é composta pelos elementos Nó, RNF (Reservatório de Nível Fixo), além de trechos, que são os tubos de conexão entre os elementos. Os elementos são armazenados na tabela elementos, que possui as seguintes colunas:

Rede: identifica a qual rede pertence o elemento, inclusive, no modelo lógico do banco de dados, há o relacionamento desta coluna com a coluna id da tabela redes;

Cota: registra a cota definida em metros pelo usuário ao inserir o elemento na rede;

Demanda: grava o valor de uma demanda para o elemento, a unidade é metros cúbicos por segundo;

Posição x e posição y: ao inserir o elemento na tela o usuário pode movimentá-lo colocando onde julgar mais conveniente no desenho da rede. Nestas colunas é registrada a coordenada x y em pixels onde o elemento está posicionado. Esta informação torna possível posicionar todos os elementos da rede na coordenada selecionada pelo usuário;

Tipo: nesta coluna fica registrada uma letra referente ao tipo do elemento da rede. Por exemplo, a letra N, se é um Nó, e R, se é um RNF;

Nome: é preciso dar nomes aos elementos da rede para que em uma análise as pessoas possam se referir ao elemento pelo nome. O nome registrado nesta coluna é apresentado no elemento na rede desenhada pelo usuário;

Nível: coluna de preenchimento não obrigatório porque não necessariamente todos os elementos possuem um nível;

Demanda transiente: quando o usuário cria um elemento na rede a demanda transiente recebe o mesmo valor informado para a coluna demanda, que é usada no cálculo do regime permanente. O usuário tem a opção de alterar a demanda transiente para ver o comportamento da rede no regime transiente. Para armazenar as informações dos trechos da rede foi definida a tabela trechos com as seguintes colunas:

Rede: identifica a qual rede pertence o trecho, no modelo lógico do banco de dados, há o relacionamento

desta coluna com a coluna id da tabela redes;

Rugosidade: armazena a rugosidade do tubo informada pelo usuário, ao inserir o trecho na rede;

Diâmetro: registra o diâmetro do tubo digitado pelo usuário, ao colocar o trecho na rede;

Montante: para inserir um trecho na rede, o usuário deve informar a origem do trecho e essa informação é armazenada nesta coluna;

Jusante: além da origem, o usuário deve informar a jusante, que é o destino do trecho, informação registrada nesta coluna. Importante ressaltar que, no modelo lógico do banco de dados, não há o uso de acentuação, cedilha ou outros tipos de caracteres considerados especiais. Esse fato se deve a uma prática comum na definição da nomenclatura dos elementos do banco de dados, uma vez que os caracteres especiais podem gerar eventuais incompatibilidades entre tecnologias.

Importante ressaltar que, no modelo lógico do banco de dados, não há o uso de acentuação, cedilha ou outros tipos de caracteres considerados especiais. Este fato se deve a uma prática comum na definição da nomenclatura dos elementos do banco de dados, uma vez que os caracteres especiais podem gerar eventuais incompatibilidades entre tecnologias.

O modelo também apresenta ligações entre as tabelas, que são os relacionamentos. Como detalha Date (2004), relações são (conjuntos de) coisas que dizemos a respeito das coisas sobre as quais podemos falar. É uma metodologia com a qual se obtém maior eficiência na estrutura projetada para armazenar as informações em banco de dados, com o uso de tabelas e a relação entre suas informações. No projeto de banco de dados, há três relacionamentos representados pelas ligações entre as quatro tabelas. O relacionamento rotulado com id = usuário permite relacionar os usuários cadastrados com as suas redes. Os dois outros relacionamentos rotulados com id = rede permitem relacionar cada rede com seus elementos e trechos.

Dubois (2012) apresenta como solução para evitar a duplicidade de dados nas tabelas, o uso de chave primária ou índice único. Para garantir que as linhas de uma tabela sejam únicas, uma coluna ou combinação de colunas devem conter valores exclusivos de cada linha. Quando esse requisito é satisfeito, é possível se referir a qualquer linha na tabela de maneira inequívoca, usando seu identificador único.

Para se certificar de que uma tabela tem essa característica, deve se definir uma chave primária ou criar um índice exclusivo na estrutura da tabela, no momento da criação. Essa ação foi acatada no projeto, como mostra o modelo lógico do banco de dados com a definição da coluna id como chave primária em todas as tabelas.

5.2 UML

Booch, Jacobson e Rumbaugh (2005) descrevem que a UML é o trabalho de várias pessoas, e as ideias que ali se encontram vêm de muitos trabalhos anteriores. Seria difícil identificar os muitos precursores que a influenciaram, de maneira mais ou menos relevante.

Em qualquer desenvolvimento de sistemas de informação, é preciso definir passos, regras e coordenar corretamente as interações entre as pessoas, os procedimentos aplicados, as características do produto e o projeto que orienta as atividades a serem desenvolvidas.

Fowler (2005) explica que um bom diagrama frequentemente pode ajudar a transmitir ideias sobre um projeto, particularmente quando se quer evitar muitos detalhes. Os diagramas também podem ajudá-lo a entender um sistema de *software* ou um processo de negócio. Como integrante de uma equipe tentando descobrir algo, os diagramas ajudam toda a equipe, tanto a entender como a comunicar esse entendimento. Embora eles não sejam substitutos, pelo menos ainda, para as linguagens de programação textuais, são úteis assistentes.

5.3 Diagrama de Implantação

Como explica Melo (2010), o diagrama de implantação da UML mostra a estrutura nos quais os artefatos são implantados. Permite definir a arquitetura de execução de sistemas que representam a designação de artefatos de *software*. São tipicamente definidos de maneira aninhada e representam dispositivos de *hardware* ou ambientes de execução de *software*. Artefatos representam elementos concretos no mundo físico, que são o resultado do processo de desenvolvimento. A Figura 2 apresenta o diagrama de implantação do MDIR.

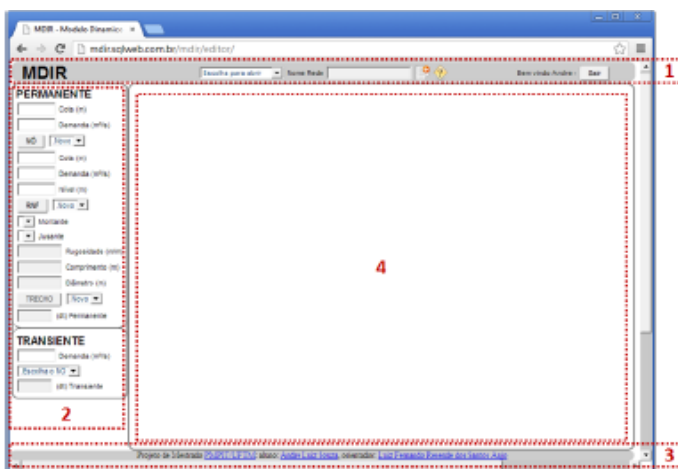
Figura 5 – Página para recuperar senha



Fonte: Acervo do autor (2013).

O próximo passo é abrir a respectiva caixa de e-mail para ver a mensagem com a senha enviada automaticamente. Essa mensagem eventualmente pode cair no sistema antispam, portanto o usuário deve verificar essa possibilidade. A página ainda oferece a opção de voltar ao cadastro, Figura 4, pelo link “Criar conta”, ou o link “Acesso” para ir para a página “Acesso”, ilustrada na Figura 3. Após a identificação do usuário, ele é direcionado para a página ilustrada pela Figura 6, onde poderá desenhar a rede e ver os gráficos.

Figura 6 – Página para desenho rede e ver gráficos

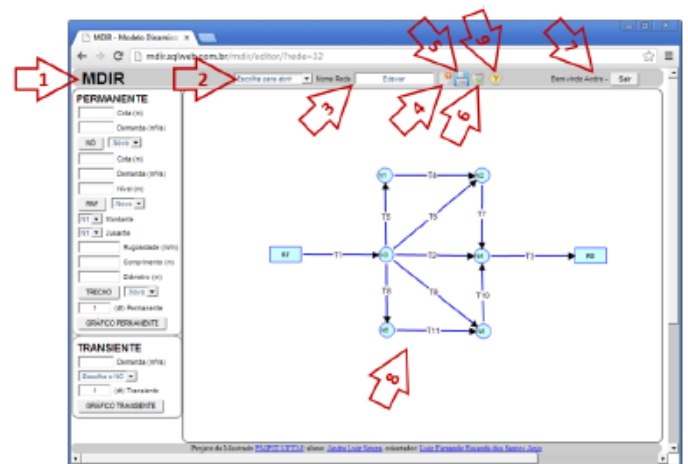


Fonte: Acervo do autor (2013).

A Figura 6 é a imagem da página web, retirada da internet como exemplo, porém foram inseridas marcações pontilhadas em vermelho, numeradas para facilitar a identificação das partes. Dividida em quatro

partes, o número um mostra o cabeçalho no topo. Na lateral esquerda, identificado com o número dois, há dois blocos, um para definição das informações do regime permanente e outro para o regime transiente. Com o número três, está delimitado o rodapé, que apresenta informações sobre autoria. Por último, identificado com o número quatro, é o local onde será desenhada a rede, além de apresentados os gráficos. A Figura 7 é a imagem da página com uma rede aberta pelo usuário. Foram inseridas setas vermelhas numeradas para facilitar a identificação de seus elementos.

Figura 7 – Página com exemplo de uma rede



Fonte: Acervo do autor (2013).

No topo da página, no cabeçalho identificado com a seta número 1, está o nome do site – MDIR. A seta número dois mostra o campo onde o usuário pode clicar para ver uma lista com suas redes e selecionar qualquer uma para que seja carregada para a página. A seta número três mostra o nome da rede que está aberta, no exemplo da Figura 7, Edevar.

A seta número quatro mostra uma figura que funciona como um botão que, ao ser clicado, leva o usuário para uma página em branco, onde pode ser criada uma nova rede. A seta número cinco indica o local onde o usuário deve clicar sempre que desejar salvar as definições feitas na rede em questão. Para “Exclusão da rede”, deve ser usado o botão indicado pela seta número seis, que dispara um processo que elimina as informações no banco de dados.

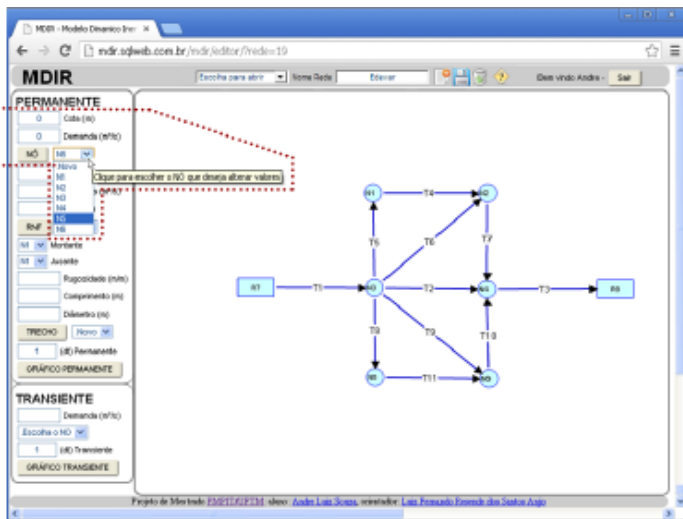
Para identificar qual usuário está autenticado pelo sistema, é apresentado seu primeiro nome no local indicado pela seta número sete. Na sequência, o botão “Sair” oferece a opção de encerrar a sessão e

fechar o sistema, levando o usuário de volta para a página inicial. A seta número oito mostra o desenho da rede Edevar, que é composta de dezenove objetos, oito nós, dois reservatórios de nível fixo (RNF) e onze trechos. Todos os objetos possuem rótulos iniciados com uma letra, de acordo com o tipo, e são numerados sequencialmente. Os nós iniciam com a letra N, os reservatórios de nível fixo com a letra R, e os trechos com a letra T.

A seta número nove indica o ícone ajuda, onde o usuário deve clicar para ter acesso a uma demonstração dos recursos disponíveis na página. Trata-se de uma demonstração da construção de uma rede simples, que ilustra a criação dos nós, trechos e definição das configurações. Após definição de todos os elementos da rede, a demonstração termina com a apresentação dos gráficos.

A Figura 8 mostra, dentro da área pontilhada em vermelho, o local com quatro campos onde o usuário tem todas as ferramentas para inserir, alterar e definir quais as configurações de cada nó da rede em questão.

Figura 8 – Definição dos Nós da rede



Fonte: Acervo do autor (2013).

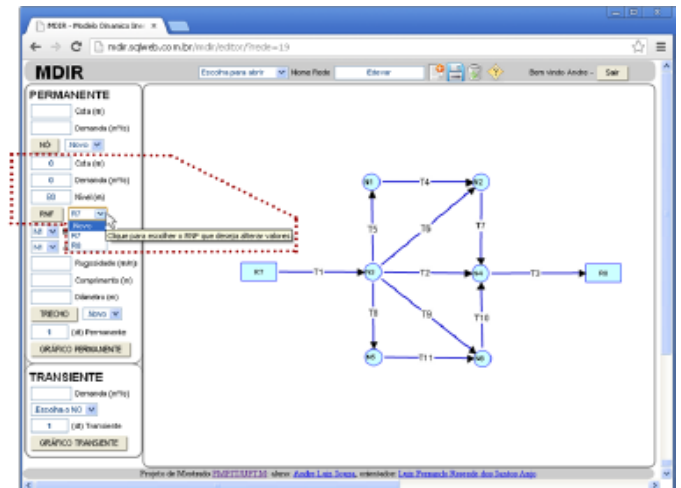
O primeiro campo é o local onde deve ser definido o valor em metros da cota do nó. No segundo campo, deve ser especificada qual a demanda em metros cúbicos por segundo. Ao clicar no botão rotulado de “Nó”, é inserido o nó na rede, com rótulo composto da letra N mais o próximo número da sequência.

O nó é representado com um círculo e pode ser movimentado na tela, bastando para isso que o usuário clique e arraste para o local desejado. O

quarto campo pode ser usado em caso de necessidade de alteração dos valores de cota e ou demanda do nó. Ao clicar, é apresentada uma lista de todos os nós da rede, e basta digitar os novos valores após seleção do nó desejado. No exemplo ilustrado na Figura 8, a lista mostra os seis nós existentes na rede até o momento, além da opção “Novo”, que deve ficar selecionado sempre, quando o objetivo for inserir um novo nó.

A Figura 9 ilustra, dentro da linha pontilhada em vermelho, o local com cinco campos para definição dos reservatórios de nível fixo (RNF) da rede.

Figura 9 – Definição dos RNFs da rede



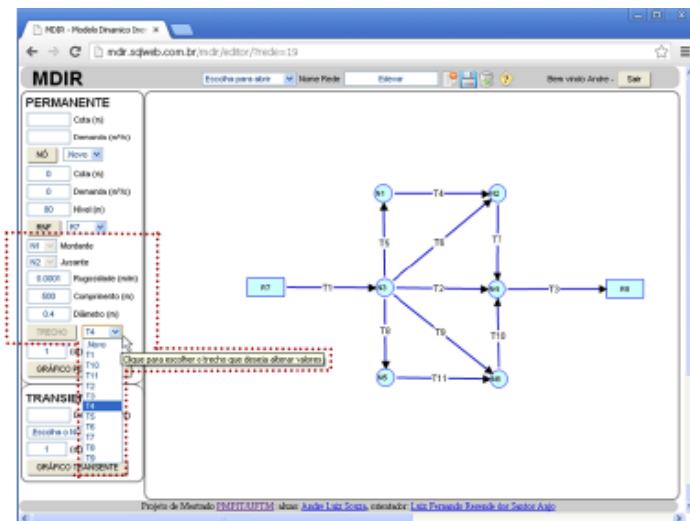
Fonte: Acervo do autor (2013).

O primeiro campo é o local onde deve ser definido o valor em metros da cota do RNF. No segundo campo, deve ser especificada qual a demanda em metros cúbicos por segundo. O terceiro campo é usado para informar o nível em metros do RNF.

O quarto campo é o botão RNF que, ao receber um click, dispara o processo que insere na rede um RNF com os valores definidos. O RNF, que é representado por retângulo, pode ser movimentado na tela usando-se o recurso de clicar e arrastar do mouse. O quinto campo é uma lista contendo o nome de todos os RNFs para que os valores de cota, demanda e nível possam ser alterados para o RNF selecionado. Na lista, também aparece a opção “Novo”, que deve estar selecionada quando o objetivo é inserir um novo RNF.

A Figura 10 mostra, dentro da área pontilhada em vermelho, o local onde são criados os trechos da rede.

Figura 10 – Definição dos trechos da rede



Fonte: Acervo do autor (2013).

São sete campos onde são detalhadas as informações técnicas de cada trecho inserido na rede. Os dois primeiros campos, montante e jusante, apresentam uma lista com o nome de todos os RNFs e Nós da rede. Nestes campos, deve-se selecionar qual é a montante (origem) e jusante (destino) do trecho a ser inserido na rede. O campo seguinte é o local para definição da rugosidade do tubo usado no trecho, a unidade é metro por metro. O quarto campo é usado para definição do comprimento do tubo e o valor em metros do comprimento. No quinto campo, especifica-se o diâmetro em metros do tubo usado no trecho. O sexto campo é um botão rotulado de “TRECHO”, e deve ser clicado para a inserção de um trecho com as características definidas nos campos anteriores.

O sétimo campo é uma lista que apresenta uma relação com todos os trechos da rede. Ao selecionar um trecho da lista, é possível alterar rugosidade, comprimento e diâmetro. Quando está selecionado um trecho para alteração do valor de alguma das suas configurações, o campo montante, jusante e o botão TRECHO são bloqueados porque não podem ser alterados. A figura ilustra essa situação, uma vez que o trecho T4 está selecionado.

A Figura 11 apresenta o exemplo de como é apresentado o gráfico para o regime permanente da rede.

Figura 11 – Gráfico da estimativa inicial do regime permanente



Fonte: Acervo do autor (2013).

Foram colocadas marcações em vermelho na figura para facilitar a identificação de elementos. O retângulo pontilhado em vermelho mostra o local onde o usuário definiu qual será o incremento de tempo (dt) do regime permanente. Com um clique no botão “GRÁFICO PERMANENTE” é apresentado o gráfico para o regime permanente. No gráfico, o eixo X indica o tempo em segundos, que estará em múltiplos do valor de dt . No eixo Y, é apresentado o valor da carga hidráulica em metros, quando o gráfico for referente a um dos nós da rede. Se o gráfico é para um dos trechos da rede, então o eixo Y terá o valor da vazão em metros cúbicos por segundo.

A seta vermelha número um indica o local onde o usuário pode clicar para selecionar qual trecho ou nó deve ser considerado na construção do gráfico. Esse é um procedimento simples e rápido porque, no momento em que a rede foi carregada, todos os cálculos já foram processados e os dados já estão disponíveis no navegador *web*. Quando o usuário escolhe outro trecho ou nó o gráfico muda com base nas informações já disponíveis e codificadas em JavaScript.

A seta vermelha número dois mostra que é possível o usuário verificar os valores do gráfico simplesmente passando o mouse em cima da linha do gráfico. É apresentado em um balão o valor correspondente no eixo X em relação à posição do mouse, que, no exemplo da Figura 11 é 159. Em seguida o nome do trecho ou nó com o valor correspondente no eixo Y. A seta vermelha número três mostra o local onde está o link “FECHAR”, que o usuário deve usar para retirar

da tela o retângulo do gráfico do regime permanente. Esse procedimento apenas oculta o gráfico e nenhuma informação é apagada ou recalculada. Um novo clique do mouse no botão “GRÁFICO PERMANENTE” fará com que o gráfico apareça novamente.

O sistema faz o processamento e todos os cálculos da rede para os regimes permanente e transiente. Para que possa ser observado o regime transiente, o usuário deverá alterar a demanda de, no mínimo, um dos nós.

A Figura 2 apresenta um exemplo para o trecho T11, que atingiu a convergência, no regime permanente, em 337 segundos, com uma vazão de 0,03497 metros cúbicos por segundo.

Figura 12 – Gráfico do regime transiente



Fonte: Acervo do autor (2013).

O retângulo pontilhado em vermelho mostra a área da página onde são definidas as informações para o cálculo do regime transiente. Para o regime transiente, é necessário informar o incremento temporal (dt), que preferencialmente deveria ser o mesmo valor informado para o regime permanente, e a alteração do valor da demanda de no mínimo um dos nós da rede.

A seta vermelha número três da Figura 12 mostra o local onde é possível selecionar o nó para consultar ou alterar suas informações do regime permanente. A cada nó inserido na rede ele também é colocado no campo indicado pela seta vermelha de número 4. Neste campo é que deve

ser selecionado qual nó terá demanda alterada para o regime transiente.

Um clique no botão “GRÁFICO TRANSIENTE” faz com que o gráfico transiente seja apresentado na tela. Com os gráficos na tela, permanente e transiente, é possível comparar o comportamento da rede nos dois regimes.

A seta vermelha número um mostra o momento da convergência no gráfico permanente cujo valor corresponde exatamente ao primeiro momento no gráfico transiente, como mostra a seta vermelha número dois. Nos cálculos já processados neste momento, o gráfico transiente apresenta o comportamento também em todos os trechos e nós, demonstrando o comportamento até uma nova convergência.

A seta vermelha de número três mostra que, para o regime permanente o nó N6 foi criado com demanda zero, e a seta vermelha de número quatro indica que para o regime transiente o mesmo nó teve uma demanda definida de 0,3 metros cúbicos por segundo. O gráfico permanente mostra o comportamento nos trechos e nós da rede até que a convergência seja atingida. A partir da convergência da rede no regime permanente, inicia-se o gráfico para o regime transiente, considerando as alterações de demandas.

Todos os cálculos para obtenção dos gráficos nos regimes permanente e transiente são processados quando a rede é aberta, o que pode ocorrer logo após o procedimento de gravação no botão salvar. Os gráficos ficam ocultos na página até que o usuário clique nos respectivos botões.

Para exibição de gráficos, é utilizada a API Line Chart do Google Chart Tools. Esta API oferece uma série de facilidades, entre elas está o dimensionamento automático na escala de valores nos eixos X e Y, apresentação de balão com valores, quando o mouse é posicionado como ilustrado na Figura 12.

Um grande esforço foi necessário para testar e avaliar as tecnologias disponíveis para desenvolvimento do *software*. Dezenas de bibliotecas JavaScript foram testadas e avaliadas na busca de uma solução para viabilizar o desenho da rede com os seus elementos. A escolha do Google Chart Tools, para a apresentação dos resultados, deu-se após muitas simulações e testes com dezenas de outras soluções similares

disponíveis na internet.

6. CONCLUSÃO

A internet se mostrou um ambiente favorável e adequado para atender aos objetivos propostos neste trabalho. As tecnologias selecionadas demonstraram ter robustez para suportar a carga de cálculos e dados gerados nos testes e simulações com os mais diversos tipos de redes.

O *site* ficou simples e de fácil utilização, principalmente porque segue os padrões de outros sistemas disponíveis na internet. Certamente engenheiros, alunos, técnicos e outras pessoas interessadas no tema não terão dificuldades na utilização e simulação de suas redes.

O sistema MDIR não apresentou nenhum tipo de instabilidade, porém, por se tratar de um *site* ainda desconhecido, não é possível prever quando e com quantos usuários simultâneos será necessário rever a estrutura de *hardware* para suportar novas demandas. Esse não é um problema que preocupa, porque é de fácil gerenciamento, uma vez que é usado o serviço de hospedagem terceirizado e os custos são baixos. Se o número de usuários aumentar a ponto de comprometer o custo mensal do serviço, há a possibilidade de gerar receita com publicidade.

Pelo fato de o MDIR levar em consideração o efeito da inércia em sua estrutura de cálculo, as simulações que foram realizadas nas diversas topologias analisadas mostraram-se mais fisicamente adequadas na aplicação de sistemas de abastecimento de água.

Sugere-se que em uma próxima etapa outras questões que surgem relativas à possibilidade de um equacionamento dinâmico de alguns elementos, permitindo, por exemplo, a análise dinâmica do comportamento de uma bomba com mudança de rotação ou o efeito dinâmico de uma válvula de controle.

Referências

ANDRADE, L.; CARVALHO, J. A. “Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito”. *In: Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. 5(3):554-557, 2001.

ANJO, L. F. R. S. “Modelo Hidráulico Para Transitórios Lentos Em Conduto Forçado”. Campinas: UNICAMP, 2008. 154 p. Tese (Doutorado), Faculdade De Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de

Campinas, Campinas, 2008.

BRITTO, J.; STALLIVIERI, F. “Inovação, cooperação e aprendizado no setor de software no Brasil: análise exploratória baseada no conceito de Arranjos Produtivos Locais (APLs)”. *Econ. soc.* [online]. 19(2):315-358, 2010.

DATE, C. J. **Introdução a sistemas de bancos de dados**. Rio de Janeiro (RJ): Elsevier: Campus, 2004, 674 p.

DUBOIS, P. **MySQL Cookbook**. O’Reilly Media, Inc., 2012, 980 p.

ESTROZI, L. F.; BATISTA NETO, J. E. S.; BRUNO, O. M. **Programando para a internet com PHP**. Rio de Janeiro (RJ): Brasport, 2010, 332 p.

FOWLER, M. **UML Essencial: Um Breve Guia para Linguagem Padrão**. Porto Alegre: Bookman, 2005, 160 p.

BOOCH, G.; JACOBSON, I.; RUMBAUGH, J. **UML Guia do Usuário**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005, 474 p.

HUGHES, S.; ZMIEVSKI, A. **PHP Developer’s Cookbook**. Sams Publishing, 2001, 480 p.

KOELLE, E. **A general treatment for steady, transient and oscillatory analysis and control**, “Água en la comunidad Valenciana”, editado por: Cabrera, E., Sahuquillo, Valência, Espanha, 1989, 345-376 p.

LOBO, E. J. R. **Curso Prático de MySQL**. São Paulo: Digerati Books, 2008, 128 p.

LUVIZOTTO JR., E. “Controle operacional de redes de abastecimento de água auxiliado por computador”. Tese de doutorado, EPUSP, São Paulo, Brasil, 1995, 143 p.

MELO, A. C. **Desenvolvendo Aplicações com UML 2.2**. Rio de Janeiro: Brasport, 2010, 340 p.

ROSSMAN, L. A. “Epanet 2.0 Brasil: manual

do usuário”. Edição. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB: 2009. 197 p. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf>. Acesso em: 4 jan. 2013.

SOARES, A. K. *et al.* “Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de Água de Campo Grande-MS via modelo inverso”. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 9(4):312-321, 2004.

SOUZA, I. H.; ANDRADE, E. M.; SILVA, E. L. “Avaliação hidráulica de um sistema de irrigação localizada de baixa pressão, projetado pelo *software* ‘bubbler’”. Eng. Agríc., 25(1):264-271, 2005.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecanica de Los Fluidos**, Madrid, Espana, cuarta edicion, Talleres Gráficos de Ediciones Castilla, 1968, 747 p.