

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BOMBAS COM VELOCIDADE DE  
ROTAÇÃO VARIÁVEL NO EPANET**

**RICARDO SANTOS COUTINHO**

**GOIÂNIA**

**2015**

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       **Dissertação**       **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

|                                                |                                                                                 |                              |       |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------|
| Autor (a):                                     | Ricardo Santos Coutinho                                                         |                              |       |
| E-mail:                                        | ricardoscoutinho@gmail.com                                                      |                              |       |
| Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? | <input checked="" type="checkbox"/> Sim                                         | <input type="checkbox"/> Não |       |
| Vínculo empregatício do autor                  |                                                                                 |                              |       |
| Agência de fomento:                            |                                                                                 | Sigla:                       |       |
| País:                                          | Brasil                                                                          | UF:GO                        | CNPJ: |
| Título:                                        | Simulação computacional de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET. |                              |       |
| Palavras-chave:                                | eficiência, bomba de rotação variável, rede de distribuição de água, EPANET.    |                              |       |
| Título em outra língua:                        | Computer simulation of variable speed pumps in EPANET.                          |                              |       |
| Palavras-chave em outra língua:                | efficiency, variable speed pump, water distribution network, EPANET.            |                              |       |
| Área de concentração:                          | Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental                                        |                              |       |
| Data defesa: (dd/mm/aaaa)                      | 10/12/2015                                                                      |                              |       |
| Programa de Pós-Graduação:                     | Engenharia do Meio Ambiente                                                     |                              |       |
| Orientador (a):                                | Alexandre Kepler Soares                                                         |                              |       |
| E-mail:                                        | aksoares@gmail.com                                                              |                              |       |
| Co-orientador (a):*                            |                                                                                 |                              |       |
| E-mail:                                        |                                                                                 |                              |       |

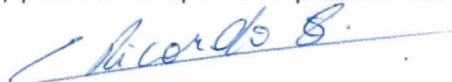
\*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.



Assinatura do (a) autor (a)

Data: 18 / 12 / 15

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

**RICARDO SANTOS COUTINHO**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BOMBAS COM VELOCIDADE DE  
ROTAÇÃO VARIÁVEL NO EPANET**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares.

**GOIÂNIA**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Coutinho, Ricardo Santos

Simulação computacional de bombas com velocidade de rotação  
variável no EPANET [manuscrito] / Ricardo Santos Coutinho. - 2015.  
lxxxviii, 88 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de  
Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
do Meio Ambiente, Goiânia, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista  
de figuras, lista de tabelas.

1. eficiência. 2. bomba de rotação variável. 3. rede de distribuição de  
água. 4. EPANET. I. Soares, Alexandre Kepler, orient. II. Título.

**RICARDO SANTOS COUTINHO**

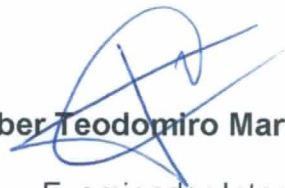
**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BOMBAS COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO  
VARIÁVEL NO EPANET**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 10 de dezembro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:



**Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares – UFG**

Presidente da Banca



**Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – UFG**

Examinador Interno



**Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco – UFG**

Examinador Externo

*À minha esposa Amanda e aos frutos do nosso amor: Helena e Luiza.*

## **AGRADECIMENTOS**

*À Deus pela vida, graça e misericórdia em Jesus Cristo.*

*À minha esposa Amanda por seu amor e compreensão. Sem você este trabalho não seria possível.*

*Às minhas filhas Helena e Luiza por suportarem com amor a minha ausência e pelo carinho que tornaram o deserto dessa caminhada em pasto verdejante.*

*Aos meus pais Juarez e Gracy e à minha irmã Renata pelo apoio incondicional.*

*Ao prof. Alexandre Kepler pela orientação deste trabalho. Seu profissionalismo, dedicação e auxílio me incentivou a prosseguir até o fim.*

*Ao Ministério Público do Estado de Goiás por incentivar e apoiar a capacitação de seu corpo técnico.*

*À técnica Joana Darc pela companhia e carinho.*

*Aos amigos do trabalho Juber, Viníciu, Anselmo, Rogério, Sérgio, Giuliano, Otávio, Thiago, Flávio, Getúlio e Carlos pelo incentivo e alegria.*

*Aos colegas do programa de pós-graduação em Engenharia do Meio Ambiente da UFG pela companhia nos bons e maus momentos dessa caminhada, especialmente à Kamila, Tatiane, Bruna Ferreira, Rubens e Hugo.*

*Aos professores Klebber Formiga, Joel Vasco, José Vicente e Eduardo Queija pelo apoio, orientação e contribuição em minha formação científica.*

*Ao Anselmo Claudino de Sousa, Narumi Abe e Peter B. Cheung pelo auxílio no uso da toolkit do EPANET 2.*

*À Deuzélia Rosa pela gentileza e paciência à frente da secretaria do PPGEMA.*

*A todos os professores, servidores e funcionários anônimos da UFG que desempenham fielmente o seu trabalho, ajudando a construir uma universidade e sociedade melhor.*

## RESUMO

COUTINHO, R. S. Simulação computacional de bombas com velocidade de rotação variável no EPANET. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

Em redes de distribuição de água, a maior parte da energia elétrica é consumida pelos sistemas de bombeamento. Deste modo, a redução da ineficiência das bombas pode proporcionar uma economia expressiva de energia. Isto pode ser alcançado pela substituição de bombas de rotação constante por bombas de rotação variável (BRVs). No entanto, os elevados custos de instalação e operação de BRVs requerem uma avaliação econômica prévia do projeto, a qual geralmente é acompanhada do uso de simuladores hidráulicos para simular o comportamento da rede. Um dos programas mais utilizados para este fim é o EPANET 2, o qual emprega o Método Gradiente para a análise hidráulica do escoamento permanente. Todavia, o EPANET 2 é impreciso ao computar a eficiência de BRVs. Isto ocorre porque o programa não leva em conta a mudança na curva de eficiência da bomba quando sua velocidade de rotação é alterada. No presente trabalho, uma rotina para o cálculo da eficiência de BRVs, baseada na fórmula de Sârbu e Borza (1998), é implementada no código-fonte do EPANET 2. A influência da nova rotina nos resultados previstos pelo programa para a eficiência, potência e consumo de energia de BRVs é avaliada em simulações com uma rede hipotética. Os resultados mostraram que a versão original do EPANET 2 tende a subestimar a eficiência e, conseqüentemente, superestimar a potência e o consumo de energia de BRVs. No caso em tela, o consumo de energia do sistema previsto pela versão original do EPANET 2 foi 21,99% maior que o previsto pela versão modificada. Tais resultados apontam que a versão modificada do EPANET 2 proporciona uma melhor previsão do comportamento de BRVs e, portanto, o seu uso é recomendado na simulação de redes de distribuição de água equipadas com BRVs.

Palavras-chave: eficiência, bomba de rotação variável, rede de distribuição de água, EPANET.

## ABSTRACT

COUTINHO, R. S. Computer simulation of variable speed pumps in EPANET. 2015. 88 p. Thesis (Master in Environmental Engineering) – School of Civil Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, Goiás, Brazil, 2015.

In water distribution systems, most of the electricity is consumed by pumping systems. Thus, reducing the inefficiency of the pump can provide significant energy savings. This can be achieved by substituting fixed-speed pumps by variable-speed pumps (VSP). However, the high costs of installation and operation of the VSPs require a preliminary economic assessment of the design, which is usually accompanied by the use of hydraulic solvers to simulate the behavior of the water network. One of the most used softwares for this purpose is the EPANET 2, which uses the gradient method for the hydraulic analysis of the steady flow. However, the EPANET 2 is inaccurate when computing the VSP efficiency. This is because the software does not take into account the changes in the pump efficiency curve when the pump speed is changed. In this study, a routine for calculating VSPs efficiency, based on the Sârbu and Borza (1998) formula, is implemented in the source code of the EPANET 2. The influence of the new routine on the results predicted by the software for efficiency, power and energy consumption of the VSP is evaluated in simulations with a hypothetical network. The results showed that the original version of EPANET 2 tends to underestimate the efficiency and thus overestimate the power and energy consumption of the VSPs. In the present case, the energy consumption of the system predicted by the original version of EPANET 2 was 21.99% higher than the predicted by the modified version. These results point out that the modified version of EPANET 2 provides a better prediction of VSPs behavior and thus its use is recommended in the simulation of water distribution networks equipped with VSPs.

Keywords: efficiency, variable speed pump, water distribution network, EPANET.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Exemplo de curvas adimensionais para bombas semelhantes.....                                                                                 | 21 |
| Figura 2.2 - Curvas de eficiência em duas velocidades de rotação: a) $\eta \times C_Q$ ; b) $\eta \times Q$ .<br>.....                                    | 23 |
| Figura 2.3 – Rede hipotética testada por Marchi e Simpson (2013) (acima) e sua<br>representação no EPANET (abaixo). .....                                 | 27 |
| Figura 2.4 – Ponto de operação da bomba em duas velocidades de rotação.....                                                                               | 28 |
| Figura 3.1 – Rede hipotética <i>Anytown</i> (WALSKI et al., 1987), com alterações<br>incluídas por Kurek e Ostfeld (2014). .....                          | 38 |
| Figura 3.2 – Padrão de variação das demandas nodais, em relação à demanda<br>base, ao longo do ciclo operacional de 24 horas. ....                        | 40 |
| Figura 3.3 – Padrão de variação da velocidade de rotação das bombas 35 (a) e 36<br>(b).....                                                               | 41 |
| Figura 3.4 – Curva HxQ da bomba 35.....                                                                                                                   | 42 |
| Figura 3.5 – Curva HxQ da bomba 36.....                                                                                                                   | 43 |
| Figura 3.6 – Curva $\eta \times Q$ da bomba 35. ....                                                                                                      | 44 |
| Figura 3.7 – Curva $\eta \times Q$ da bomba 36. ....                                                                                                      | 45 |
| Figura 4.1 – Organograma das simulações realizadas. ....                                                                                                  | 47 |
| Figura 4.2 – Nível de água no reservatório ao longo do ciclo operacional. ....                                                                            | 49 |
| Figura 4.3 – Vazão, altura manométrica e potência das bombas ao longo do ciclo<br>operacional.....                                                        | 50 |
| Figura 4.4 – Curva HxQ e ponto de operação da bomba 35 em cada intervalo de<br>tempo do ciclo operacional.....                                            | 51 |
| Figura 4.5 – Curva HxQ e ponto de operação da bomba 36 em cada intervalo de<br>tempo do ciclo operacional.....                                            | 52 |
| Figura 4.6 – Eficiências estimadas pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) para<br>diferentes valores de $\eta_1$ e de $N_2/N_1$ . ....                      | 55 |
| Figura 4.7 – Eficiências estimada ( $\eta_2$ ) e original ( $\eta_1$ ) para diferentes variações ( $N_2/N_1$ )<br>na velocidade de rotação da bomba. .... | 56 |
| Figura 4.8 – Eficiências horárias previstas pelo EPANET 2, versões original e<br>modificada, para a bomba 35.....                                         | 56 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.9 – Eficiências horárias previstas pelo EPANET 2, versões original e modificada, para a bomba 36.....                                                  | 57 |
| Figura 4.10 – Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 0 às 7h).....   | 58 |
| Figura 4.11 - Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 8 às 15h).....  | 59 |
| Figura 4.12 - Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 16 às 23h)..... | 60 |
| Figura 4.13 - Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 0 às 7h).....   | 61 |
| Figura 4.14 - Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 8 às 15h).....  | 62 |
| Figura 4.15 - Curvas teóricas $\eta \times Q$ e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 16 às 23h)..... | 63 |
| Figura 4.16 – Resultados teóricos e simulados de $\eta_2/\eta_1$ para a bomba 35. ....                                                                          | 66 |
| Figura 4.17 – Resultados teóricos e simulados de $\eta_2/\eta_1$ para a bomba 36. ....                                                                          | 67 |
| Figura 4.18 – Potências horárias estimadas pelo EPANET 2, versão original e modificada, para a bomba 35.....                                                    | 68 |
| Figura 4.19 – Potências horárias estimadas pelo EPANET 2, versão original e modificada, para a bomba 36.....                                                    | 68 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 4.1 – Dados de consumo de energia da rede <i>Anytown</i> , para condições de bombeamento sob eficiência constante. .... | 53 |
| Quadro 4.2 – Dados de consumo de energia da rede <i>Anytown</i> , para condições de bombeamento com eficiência variável. ....  | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 – Comparação da eficiência medida e estimada para três bombas de diferentes portes (SIMPSON; MARCHI, 2013) em duas velocidades distintas de rotação ( $N_1$ e $N_2$ ). ..... | 25 |
| Tabela 3.1 – Características dos nós e reservatórios da rede <i>Anytown</i> .....                                                                                                       | 38 |
| Tabela 3.2 - Características dos tubos da rede <i>Anytown</i> . .....                                                                                                                   | 39 |
| Tabela 3.3 – Pares ordenados ( $Q$ ; $\eta$ ) arbitrados para as bombas do sistema. ....                                                                                                | 44 |
| Tabela 4.1 – Comparação de dados e previsão do fator de correção da eficiência para a bomba 35. ....                                                                                    | 64 |
| Tabela 4.2 – Comparação de dados e previsão do fator de correção da eficiência para a bomba 36. ....                                                                                    | 65 |
| Tabela 4.3 - Potências estimadas pelo EPANET 2, versões original e modificada...70                                                                                                      |    |

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIações

|              |                                                               |
|--------------|---------------------------------------------------------------|
| A, B, C      | constantes de ajuste da curva eficiência versus vazão         |
| BRV          | bomba de rotação variável                                     |
| $C_H$        | coeficiente adimensional de altura manométrica                |
| $C_P$        | coeficiente adimensional de potência                          |
| $C_Q$        | coeficiente adimensional de vazão                             |
| D            | diâmetro                                                      |
| DLL          | <i>dynamic-link library</i>                                   |
| EGGA         | <i>Enhanced Global Gradient Algorithm</i>                     |
| EPA          | <i>United States Environmental Protection Agency</i>          |
| g            | aceleração da gravidade                                       |
| H            | altura manométrica                                            |
| $H_0$ , R, n | constantes de ajuste da curva altura manométrica versus vazão |
| Id           | número de identificação                                       |
| K            | perdas de energia                                             |
| $K_d$        | coeficiente de demanda                                        |
| MOC          | Método das características                                    |
| N            | velocidade relativa de rotação ( $N_2/N_1$ )                  |
| $N_1$        | velocidade nominal de rotação                                 |
| $N_2$        | velocidade de rotação                                         |
| P            | potência                                                      |
| PME          | ponto de melhor eficiência                                    |
| Q            | vazão                                                         |
| SNIS         | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento              |
| V            | velocidade                                                    |
| $\eta$       | eficiência                                                    |
| $\nu$        | viscosidade cinemática                                        |
| $\rho$       | massa específica                                              |

## SUMÁRIO

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                         | <b>13</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                              | <b>15</b> |
| 2.1      | ANÁLISE HIDRÁULICA EM REGIME PERMANENTE                                   | 15        |
| 2.2      | BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA            | 19        |
| 2.3      | SIMULAÇÃO DE BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL NO EPANET                         | 25        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b>                                                        | <b>30</b> |
| 3.1      | IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINA NO EPANET 2                                       | 30        |
| 3.2      | FERRAMENTA PARA DESENVOLVEDORES                                           | 33        |
| 3.3      | ESTUDO DE CASO                                                            | 36        |
| 3.3.1    | <i>Rede hipotética de distribuição de água</i>                            | 37        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS</b>                                                         | <b>47</b> |
| 4.1      | BOMBEAMENTO COM EFICIÊNCIA CONSTANTE                                      | 47        |
| 4.2      | BOMBEAMENTO COM EFICIÊNCIA VARIÁVEL                                       | 54        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                                          | <b>73</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                         | <b>75</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – Construção do epanet2.dll no Borland C++ Builder 6.0.</b> | <b>80</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – Arquivo rede.inp.</b>                                     | <b>84</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A despesa com energia elétrica está entre os principais custos operacionais da atividade de abastecimento de água. Estima-se que este item corresponda entre 5 a 30% dos custos operacionais totais dos prestadores de serviços de água e esgoto, podendo chegar a 40% em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento (LIU et al., 2012). No Brasil, os dados mais atuais do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento – SNIS apontam que os custos com energia elétrica correspondem, em média, à 10,9% do total das despesas de exploração dos serviços de água e esgoto (SNIS, 2014), tendo totalizado em 2013 o valor de R\$ 3,07 bilhões.

Em sistemas de distribuição de água, a maior parte da energia elétrica é consumida no bombeamento (CARLSON; WALBURGER, 2007; IBARRA; ARNAL, 2014). Assim, uma melhoria, ainda que pequena, na eficiência operacional das bombas, pode resultar numa economia significativa de energia e redução de custos para as companhias de água (GIUSTOLISI; LAUCELLI; BERARDI, 2013). Neste sentido, deve-se considerar a possibilidade de substituição de bombas com velocidade de rotação constante por bombas com velocidade de rotação variável.

Quando comparadas às bombas de rotação constantes, as bombas de rotação variável tem a vantagem de se adaptar de forma mais eficiente às exigências do sistema, permitindo manter a pressão e vazão próxima dos níveis mínimos exigidos, o que representa um potencial de economia de energia (WU et al., 2012). Todavia, os altos custos associados à implantação e operação desta tecnologia requerem uma análise prévia de viabilidade econômica do projeto.

A estimativa da economia de energia que pode ser alcançada com sistemas de bombas de rotação variável geralmente é acompanhada do uso de pacotes computacionais para simular o comportamento da rede de distribuição de água em que se pretende implantar tais sistemas. Entre os pacotes computacionais disponíveis para tal fim, destaca-se o simulador hidráulico EPANET 2 (ROSSMAN, 2000a).

Desenvolvido pela *U. S. Environmental Protection Agency* - EPA e de distribuição gratuita, o EPANET 2 é amplamente utilizado para simular o

comportamento de redes de água em regime permanente por contar com um algoritmo de análise hidráulica extremamente eficiente denominado método gradiente (TODINI; PILATI, 1988). Todavia, o programa é impreciso no cômputo da eficiência de bombas de rotação variável (MARCHI; SIMPSON, 2015), o que resulta em estimativas errôneas da potência das bombas e do consumo de energia do sistema de distribuição de água.

Assim, o presente trabalho tem o objetivo de implementar uma rotina para a correção da eficiência de bombas de rotação variável no EPANET 2 e avaliar a influência desta nos resultados previstos pelo programa para a eficiência, potência e energia consumida pelas bombas de uma rede hipotética de distribuição de água.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura foi revisada com ênfase nos modelos para análise hidráulica no escoamento permanente, nas características de bombas de rotação variável e na análise do comportamento operacional desta no simulador hidráulico EPANET 2 (ROSSMAN, 2000a), um dos pacotes computacionais mais utilizados na análise de sistemas de distribuição de água em regime permanente (GIUSTOLISI; LAUCELLI, 2011; ANJO; LUVIZOTTO JR.; VENÂNCIO, 2015).

### 2.1 ANÁLISE HIDRÁULICA EM REGIME PERMANENTE

Redes de distribuição de água podem ser definidas como uma combinação de tubos, componentes hidráulicos (bombas e válvulas) e estruturas hidráulicas (reservatórios e estações elevatórias) interligados com o propósito de transportar água potável para a população, em quantidade e qualidade satisfatórias (CHEUNG, 2004). A análise do comportamento destes sistemas pode ser realizada com o auxílio de modelos matemáticos que representem as leis físicas que regem o fenômeno do escoamento da água em condutos sob pressão.

Um modelo matemático nada mais é que um sistema de equações cuja solução, para determinado conjunto de dados de entrada, é representativa da resposta do processo (CHEUNG, 2004). No caso de modelos de análise hidráulica em regime permanente, o sistema de equações que descreve o comportamento da rede é obtido pela aplicação das leis de conservação da massa nos nós e de energia nos trechos da rede (CARRIJO, 2004).

A natureza não linear das equações de energia requer a adoção de procedimentos numéricos iterativos para a resolução do problema. Segundo Formiga e Chaudhry (2008), os métodos de solução classificam-se em: a) gradiente local; b) Newton-Raphson; c) linearização; d) minimização numérica e; e) métodos híbridos. Os três primeiros métodos nada mais são do que técnicas de solução de equações não lineares. Já o quarto método transforma o problema na minimização de uma função não linear convexa, considerando restrição de igualdade e

desigualdades lineares. E os métodos híbridos são resultados da união de dois ou mais métodos anteriores. Em todos os casos, é necessária uma solução inicial, a partir da qual o procedimento iterativo é repetido até que a solução de certa etapa ou passo de iteração não seja significativamente diferente da solução da iteração anterior, caracterizando a convergência. A diferença entre os métodos recaem na forma de estruturar o procedimento iterativo.

O método de gradiente local fundamenta-se na busca de pontos de máximo ou mínimo na direção da maior taxa de variação da função objetivo. Este conceito é utilizado nos métodos Hardy Cross, os quais são derivados do trabalho de Cross (1936). Segundo Porto (2006), o método Hardy Cross apresenta a vantagem de possibilitar o desenvolvimento manual dos cálculos e ser um método provido de significado físico, o que facilita a interpretação dos resultados intermediários obtidos. Todavia, tem como desvantagens o comportamento instável, com possibilidade de divergência ou convergência lenta, a dependência da escolha dos anéis para se efetuar o balanço de energia e a dificuldade de se acrescentar dispositivos na rede, como bombas e válvulas redutoras de pressão (FORMIGA e CHAUDHRY, 2008).

Os métodos que utilizam a técnica de Newton-Raphson realizam o ajuste simultâneo das incógnitas (variáveis de estado) do sistema de equações e convergem rapidamente para uma solução, se fornecido um bom conjunto de valores iniciais (SHAMIR; HOWARD, 1968). Todavia, a falta deste pode resultar numa convergência mais lenta, uma vez que o número de iterações depende das condições iniciais assumidas.

Os métodos de linearização das equações, com destaque para o método da teoria linear proposto por Wood e Charles (1972) e modificado posteriormente por Isaacs e Mills (1980), empregam aproximações lineares sucessivas da equação de perda de carga nos trechos, produzindo bons resultados, mesmo que não seja fornecida uma boa solução inicial (FORMIGA e CHAUDHRY, 2008).

A análise de redes por técnicas de otimização é abordada no método de minimização numérica, que consiste em transformar o problema numa função objetivo não linear e convexa, sujeita às restrições dadas por um conjunto de equações lineares que representam a conservação da massa nos nós e de energia nos trechos da rede. A vantagem do método reside no fato da convexidade da

função objetivo aliada à linearidade das equações de restrição garantir a existência e a unicidade da solução. Todavia, a solução numérica para o problema requer a utilização de técnicas de otimização, as quais ainda enfrentam limitações quanto à dimensionalidade, ou seja, para redes de grande porte, a capacidade e o tempo de processamento necessário são muito elevados (FORMIGA e CHAUDHRY, 2008).

Os métodos híbridos incorporam as vantagens de dois ou mais métodos supramencionados para reduzir as limitações individuais destes. São exemplos de métodos híbridos o método gradiente (TODINI; PILATI, 1988) e o método proposto por Nielsen (1989). O primeiro contempla a união de técnicas de minimização numérica com o método de Newton-Raphson, o que resultou num algoritmo muito eficiente, sendo utilizados na maioria dos pacotes computacionais de simulação hidráulica, como EPANET, WATERCAD, MIKENET, PIPENET (FORMIGA; CHAUDHRY, 2008). O segundo reuniu as melhores características do método de Newton-Raphson e do método da teoria linear, o que resultou num algoritmo robusto, capaz de convergir num número muito menor de iterações quando comparado aos resultados obtidos com estas técnicas isoladas (SOUZA, 1994).

Giustolisi e Todini (2009) e Berardi et al. (2010) aprimoraram o algoritmo do método gradiente (TODINI; PILATI, 1988) para que fosse considerada uma distribuição uniforme da demanda ao longo do tubo. Nestes trabalhos, os autores concentraram-se no problema de calibração de modelos de redes e mostraram que a abordagem tradicional de se considerar as demandas concentradas somente nos nós, apesar de na prática esta ser distribuída ao longo da tubulação, pode resultar em erros significativos na tentativa de se alcançar o balanço de energia. A versão melhorada do algoritmo, denominada de *Enhanced Global Gradient Algorithm – EGGA*, executa a mesma análise do método gradiente através da agregação de nós em série.

Giustolisi e Laucelli (2011) apresentaram um algoritmo de análise hidráulica dirigida pela pressão, baseado no EGGA, que permite considerar vazamentos e padrões de demandas ao longo das tubulações e simplificar a topologia da rede, sendo esta última característica especialmente útil na análise de redes de grande porte. O algoritmo foi formulado e numericamente testado utilizando-se três redes hipotéticas. Os resultados apontaram uma representação mais acurada dos

padrões, em nível de tubulação, dos vazamentos e demandas na rede. Além disso, demonstrou-se que o algoritmo é bastante estável do ponto de vista numérico.

Giustolisi et al. (2012) apresentaram uma metodologia de transformação matricial para converter o algoritmo do método gradiente em EGGA e avaliaram o desempenho computacional de ambos na análise de quatro redes reais de distribuição de água de grande porte. Os resultados mostraram que o EGGA melhora consideravelmente a eficiência computacional do modelo sem comprometer a exatidão da solução.

No Brasil, entre os trabalhos de análise hidráulica em regime permanente destacam-se os realizados por Barbosa, Costa e Santos Jr. (1999), Formiga e Chaudhry (2008), Soares e Reis (2008a, 2008b) e Araújo, Castro e Righetto (2010).

Barbosa, Costa e Santos Jr. (1999) propuseram um modelo de análise hidráulica que utiliza Programação Linear sobre o conjunto de equações lineares obtido pelo método da teoria linear. O modelo foi testado com sucesso em três redes hipotéticas de diferentes topologias (um, dois e três anéis) e para diferentes cenários de demanda, convergindo num número menor de iterações quando comparado aos métodos Hardy Cross e da teoria linear.

Formiga e Chaudhry (2008) compararam os métodos de Newton-Raphson, da teoria linear, gradiente (TODINI; PILATI, 1988) e de Nielsen (1989) na análise de uma rede hipotética com válvulas de retenção e redutora de pressão, para situações de demanda dirigida pela pressão e vazamentos na rede. Os resultados mostraram que o método do gradiente convergiu num número menor de iterações para redes mais simples, enquanto que o método de Nielsen foi o que melhor se adaptou a redes de diferentes complexidades.

Soares e Reis (2008a) propuseram um modelo hidráulico híbrido para análise de sistemas de distribuição de água sujeito a eventos transitórios, o qual combina o método das características (MOC) com o simulador hidráulico EPANET 2, denominado MOC-EPANET. Todavia, este modelo foi utilizado por Soares e Reis (2008b) na análise do escoamento permanente de uma rede hipotética, sendo os resultados comparados aos obtidos com o simulador EPANET 2. Demonstrou-se que não houve diferenças significativas entre os valores das variáveis de estado

previstos por ambos os modelos para o escoamento permanente, além de simplificação nas avaliações da estimativa inicial pelo MOC-EPANET.

Araújo, Castro e Righetto (2010) desenvolveram um programa computacional que utiliza o método das características para a simulação hidráulica de redes de abastecimento de água em regime permanente e período estendido, introduzindo novas funcionalidades (estações elevatórias, booster, reservatórios de nível fixo e reservatórios de nível variável) ao modelo proposto por Righetto (1994). O programa foi utilizado em simulações com redes hipotéticas de diferentes configurações e os resultados comparados aos obtidos com o EPANET 2 (ROSSMAN, 2000a), simulador hidráulico que utiliza o método gradiente (TODINI; PILATI, 1988). Os resultados apresentaram erros relativos inferiores a 1% para as pressões e vazões associadas à operação do reservatório de nível fixo, estações elevatórias e booster. Já para o reservatório de nível variável, os erros relativos associados à vazão foram da mesma ordem de grandeza dos demais elementos da rede, entretanto, para os valores de pressão obteve-se um erro relativo máximo de 6,61%. Quanto à convergência do modelo, os autores verificaram que esta é afetada pelo padrão de consumo nos nós nos primeiros passos de tempo, diferenças de tamanho das tubulações e celeridade.

## 2.2 BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O crescente aumento dos custos de energia e da preocupação com a sustentabilidade ambiental tem impulsionado o interesse no uso racional da energia. Em sistemas de distribuição de água, as bombas são os componentes que consomem mais energia e, portanto, uma das formas de se reduzir o uso de energia do sistema é diminuindo a ineficiência das bombas, o que pode ser obtido pela substituição de bombas de rotação constante por bombas de rotação variável (MARCHI; SIMPSON, 2013; SIMPSON; MARCHI, 2013).

Bombas de rotação variável são bombas com motores acoplados a inversores de frequência, equipamentos capazes de alterar a frequência do sinal elétrico para que as bombas possam operar em diferentes velocidades de rotação.

Todavia, a introdução de inversores de frequência para modificar a velocidade de rotação das bombas diminui a eficiência do conjunto elevatório, o que enseja uma avaliação econômica do investimento em sistemas de bombas de rotação variável (MARCHI; SIMPSON, 2013).

Quando comparadas às bombas de rotação constantes, as bombas de rotação variável tem a vantagem de se adaptar de forma mais eficiente às exigências do sistema, possibilitando uma melhor resposta às situações de anormalidade, como incêndios e rompimentos de tubulações (WOOD; REEDY, 1995). Além disso, com o emprego desta tecnologia pode-se manter as pressões e vazões perto dos níveis mínimos permitidos, o que representa um potencial de economia de energia (WU et al., 2012).

A operação da bomba em diferentes velocidades de rotação resulta em alterações em suas curvas características e, conseqüentemente, em seu desempenho. Tais alterações no comportamento da bomba podem ser previstas pelas relações de semelhança. Parte-se do pressuposto que bombas geometricamente semelhantes trabalham em condições de semelhança, desde que tenham a mesma eficiência (PORTO, 2006), ou seja, as características adimensionais da bomba permanecem constantes. Assim, tomando-se como variável geométrica o diâmetro do rotor e a velocidade de rotação, tem-se:

$$C_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad 2.1$$

$$C_H = \frac{gH}{N^2D^2} \quad 2.2$$

$$C_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad 2.3$$

Em que:

$C_Q$ : coeficiente adimensional de vazão;

$C_H$ : coeficiente adimensional de altura manométrica;

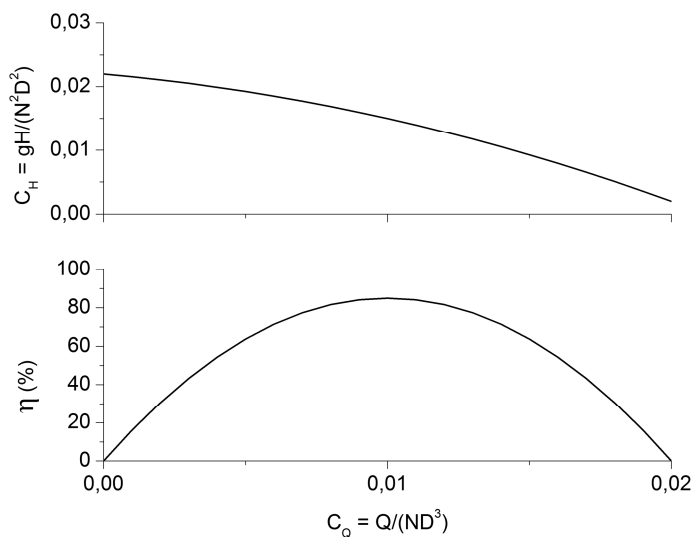
$C_P$ : coeficiente adimensional de potência;

$Q$ : vazão da bomba ( $m^3/s$ );

H: altura manométrica da bomba (m);  
 P: potência da bomba (W);  
 N: velocidade de rotação da bomba (rpm);  
 D: diâmetro do rotor (m);  
 g: aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  
 $\rho$ : massa específica do líquido ( $kg/m^3$ ).

Os coeficientes adimensionais  $C_Q$ ,  $C_H$  e  $C_P$  são constantes para bombas geometricamente semelhantes. Assim, se uma bomba opera em diferentes velocidades de rotação ou com diferentes diâmetros do rotor, as características desta são representadas por curvas adimensionais únicas tanto em termos de  $C_H \times C_Q$  quanto de  $\eta \times C_Q$  (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Exemplo de curvas adimensionais para bombas semelhantes.



Fonte: adaptado de Marchi e Simpson (2013).

A eficiência é indiretamente representada pela equação 2.3, uma vez que a potência da bomba pode ser calculada pela equação 2.4.

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad 2.4$$

Para o caso particular em que somente a velocidade de rotação é modificada, as seguintes equações, conhecidas como relações de semelhança, podem ser derivadas:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 2.5$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad 2.6$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad 2.7$$

Em que:

$N_1$  e  $N_2$ : referem-se a duas velocidades distintas de rotação.

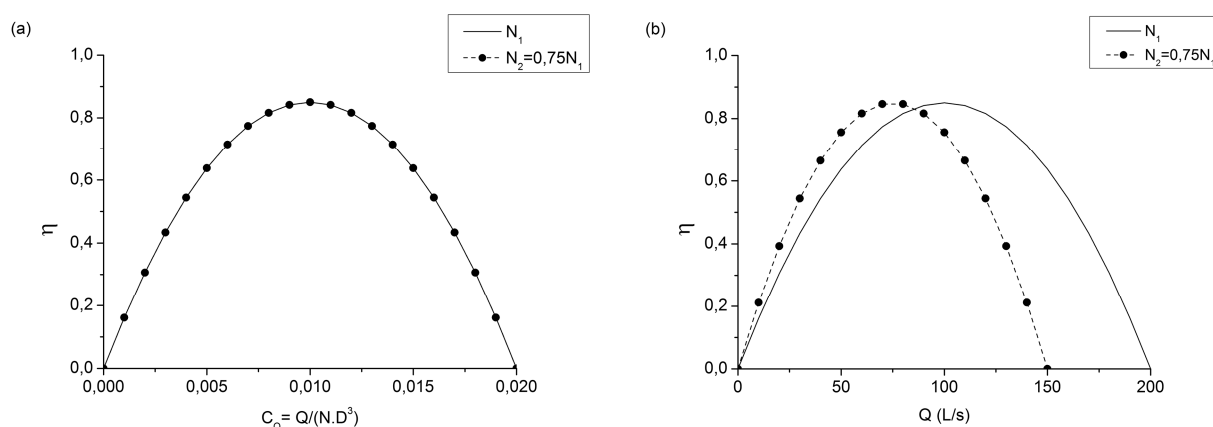
As relações de semelhança dadas pelas equações 2.5 a 2.7 afirmam que a mudança na vazão, altura manométrica e potência variam com a mudança na velocidade de rotação da bomba segundo uma função linear, quadrática e cúbica, respectivamente. Em particular, as equações 2.5 e 2.7 assumem que um ponto na curva da bomba mantém a mesma eficiência quando esta opera em diferentes velocidades de rotação, conforme mostra a Figura 2.2. Por isso, a eficiência do melhor ponto de eficiência é constante (SIMPSON; MARCHI, 2013). A Figura 2.2 também mostra que a curva  $\eta \times C_Q$  não é alterada com a mudança na velocidade de rotação da bomba. O mesmo não ocorre com a curva  $\eta \times Q$ , que é redimensionada segundo a equação 2.5.

Segundo PORTO (2006), as relações entre as variáveis do fenômeno dadas pelas equações 2.5 a 2.7 para dois pontos de operação homólogos, na condição de semelhança, são válidas se as alterações na velocidade de rotação nominal forem relativamente pequenas para que a eficiência possa ser mantida constante. Para Sârbu e Borza (1998), a interferência causada na eficiência pela alteração da

velocidade de rotação pode ser desprezada para reduções de até 1/3 na velocidade nominal de rotação da bomba.

Simpson e Marchi (2013) apontam que as relações de semelhança não levam em conta os fatores que não se ajustam com a velocidade e cuja magnitude depende do tamanho da máquina, o que pode resultar em estimativas com erros relativos significativos, em especial para a eficiência de bombas de pequeno porte. Ao comparar a eficiência prevista pelas relações de semelhança com a medida pelo fabricante para o ponto de melhor eficiência de três bombas de diferentes porte (556 kW, 90 kW e 5,5 kW), estes autores verificaram que uma redução de 22,5% e de 44,4% na velocidade de rotação das bombas de maior e menor porte, respectivamente, resultou em erros relativos de 0,12% e 7,69% entre as eficiências estimadas e medidas.

Figura 2.2 - Curvas de eficiência em duas velocidades de rotação: a)  $\eta \times C_Q$ ; b)  $\eta \times Q$ .



Fonte: adaptado de Simpson e Marchi (2013).

A diminuição da eficiência quando a velocidade de rotação é reduzida foi reportada por vários autores. Morton (1975) propôs um método gráfico para identificar a nova curva, enquanto Sârbu e Borza (1998) relacionou a nova eficiência com a eficiência original e com a velocidade de rotação da bomba. Abordagens mais generalistas consideraram que a eficiência é uma função do número de Reynolds (2.8). Gulich (2003) aponta que um dos primeiros métodos para ajustar a eficiência de bombas semelhantes foi formulado observando-se que somente uma parte das perdas de energia é função do número de Reynolds, conforme equação 2.9.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad 2.8$$

$$\frac{(1-\eta_2)}{(1-\eta_1)} = K + (1 - K) \left(\frac{Re_1}{Re_2}\right)^m \quad 2.9$$

Em que:

Re: número de Reynolds;

V: velocidade do fluido (m/s);

D: diâmetro (m);

$\nu$ : viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s);

$\eta$ : eficiência;

K: perdas de energia;

$\eta_1$  e  $\eta_2$ : referem-se a duas velocidades distintas de rotação.

Assumindo que todas as perdas de energia são independentes do número de Reynolds, ou seja,  $K=0$ , e que o valor de  $m$  é igual a 0,1, a equação 2.9 pode ser reescrita como a fórmula de Sârbu e Borza (1998) (2.10). A razão entre os número de Reynolds ( $Re_1/Re_2$ ) pode ser substituída pela razão entre as velocidades de rotação da bomba ( $N_1/N_2$ ), tendo em vista que a velocidade do fluido é proporcional à velocidade de rotação da bomba, desde que o diâmetro e a viscosidade não mudem. Embora a abordagem apresentada nas equações 2.9 e 2.10 seja limitada pelo fato do expoente  $m$  depender do número de Reynolds e da rugosidade (OSTERWALDER, 1978; GULICH, 2003), a fórmula de Sârbu e Borza (1998) oferece bons resultados se a velocidade de rotação da bomba não for reduzida para menos de 70% da velocidade nominal (SIMPSON; MARCHI, 2013).

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,1} \quad 2.10$$

Simpson e Marchi (2013) utilizaram as relações de semelhança e a fórmula de Sârbu e Borza (1998) para estimar a eficiência do novo ponto de melhor eficiência (PME) de três bombas com potências iguais a 556 kW, 90 kW e 5,5 kW e velocidades de rotação reduzidas para 77,5%, 77,5% e 55,6% das respectivas velocidades de rotação nominal, sendo os resultados comparados às eficiências medidas pelos fabricantes (Tabela 2.1). Verificou-se que os erros relativos das eficiências previstas pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) foram inferiores aos das eficiências previstas pelas relações de semelhança para as bombas de pequeno e de médio porte, e superior a estas, para a bomba de grande porte. Diante destes resultados, os autores concluíram que, apesar de ainda representar uma aproximação, a fórmula de Sârbu e Borza (1998) permite uma estimativa mais acurada da eficiência para uma ampla faixa de velocidades de rotação quando comparada às relações de semelhança e recomendam o uso desta fórmula para diminuir o erro na estimativa da eficiência, especialmente para bombas de pequeno porte.

Tabela 2.1 – Comparação da eficiência medida e estimada para três bombas de diferentes portes (SIMPSON; MARCHI, 2013) em duas velocidades distintas de rotação ( $N_1$  e  $N_2$ ).

| Bomba                               | Potência (kW) | Eficiência medida PME (%) |       | Eficiência estimada do PME em $N_2$ (%) |                      | Erro relativo (%)      |                      |
|-------------------------------------|---------------|---------------------------|-------|-----------------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|                                     |               | $N_1$                     | $N_2$ | relações de semelhança                  | Sârbu e Borza (1998) | relações de semelhança | Sârbu e Borza (1998) |
|                                     |               |                           |       |                                         |                      |                        |                      |
| HPL 54-30-20 <sup>a</sup>           | 556           | 83,6                      | 83,5  | 83,6                                    | 83,2                 | 0,12                   | -0,36                |
| Hydro-Tytan 125x80-250 <sup>b</sup> | 90            | 80,5                      | 79,1  | 80,5                                    | 79,3                 | 1,77                   | 0,25                 |
| 50x32-160 H.T. <sup>b</sup>         | 5,5           | 56,0                      | 52,0  | 56,0                                    | 53,3                 | 7,69                   | 2,50                 |

<sup>a</sup> Sulzer (fabricante).  $N_1 = 1.525$  rpm;  $N_2 = 1.182$  rpm.

<sup>b</sup> Thompsons Kelly and Lewis (fabricante).  $N_1 = 3.600$  rpm;  $N_2 = 2.000$  rpm.

Fonte: adaptado de Simpson e Marchi (2013).

### 2.3 SIMULAÇÃO DE BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL NO EPANET

Os elevados custos associados à implantação e operação de bombas de rotação variável torna imprescindível a análise econômica do projeto, a qual

geralmente é acompanhada do uso de ferramentas computacionais para simular o comportamento da rede de distribuição de água e do sistema de bombeamento. Embora o consumo de energia deva ser estimado levando-se em conta todos os componentes das bombas de rotação variável, ou seja, bomba, motor e inversor de frequência (BERNIER; BOURRET, 1999; WALSKI, 2001; WALSKI et al., 2003; MARCHI et al., 2012), numa avaliação inicial geralmente apenas a potência da bomba é considerada (SIMPSON; MARCHI, 2013). Isto ocorre pelo fato da eficiência desta ser menor do que a dos demais componentes (motores e inversores de frequência geralmente tem eficiências iguais ou superiores a 95%) (SIMPSON; MARCHI, 2013) e, portanto, ter maior influência na eficiência do conjunto elevatório. Assim, deve-se representar o comportamento da bomba do modo mais preciso possível ao computar a eficiência (MARCHI; SIMPSON, 2013).

Um dos pacotes computacionais utilizado neste tipo de avaliação é o EPANET 2 (ROSSMAN, 2000a), o qual realiza a análise de redes de distribuição de água em regime permanente e em período extensivo, empregando a solução do método gradiente (TODINI; PILATI, 1988).

O EPANET 2 utiliza as relações de semelhança dadas pelas equações 2.5 e 2.6 para estimar a vazão e a altura manométrica da bomba quando esta tem sua velocidade de rotação alterada. Todavia, não utiliza a equação 2.7 para calcular a potência. Em vez disso, o programa usa a curva eficiência versus vazão na velocidade nominal de rotação, que geralmente é fornecida pelo fabricante.

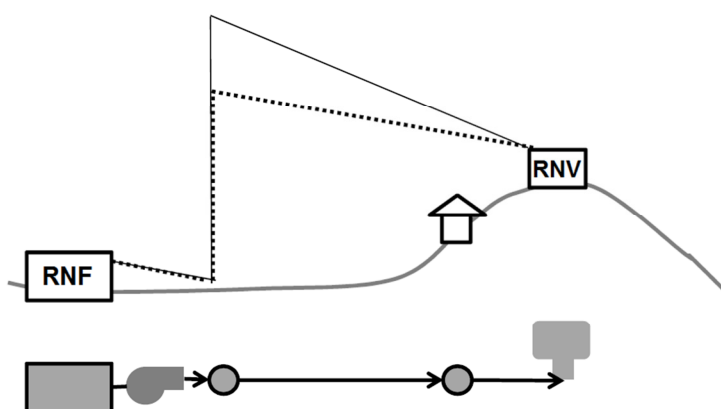
Conforme mencionado na seção 2.2, a mudança na velocidade de rotação da bomba provoca alterações em suas curvas características. No caso da curva eficiência versus vazão, a redução da velocidade de rotação da bomba causa um estreitamento e deslocamento à esquerda da curva, mas mantém o mesmo ponto de melhor eficiência (Figura 2.2) (MARCHI; SIMPSON, 2013). O estreitamento da curva ocorre porque o intervalo de vazões sobre o qual a bomba pode operar é reduzido na mesma proporção que a velocidade de rotação, conforme equação 2.5.

Ao simular o comportamento de bombas de rotação variável, o EPANET 2 modela corretamente as mudanças na curva HxQ. Todavia, o programa continua a utilizar a curva  $\eta \times Q$  na velocidade nominal de rotação e, deste modo, falha em identificar a eficiência do novo ponto de operação da bomba. Esta inacurácia do

simulador hidráulico pode levar tanto a uma subestimativa quanto a uma superestimativa da energia requerida, dependendo da configuração do sistema, o que inclui a posição do ponto de operação na velocidade nominal de rotação e a diferença na vazão na nova velocidade de rotação (MARCHI; SIMPSON, 2013).

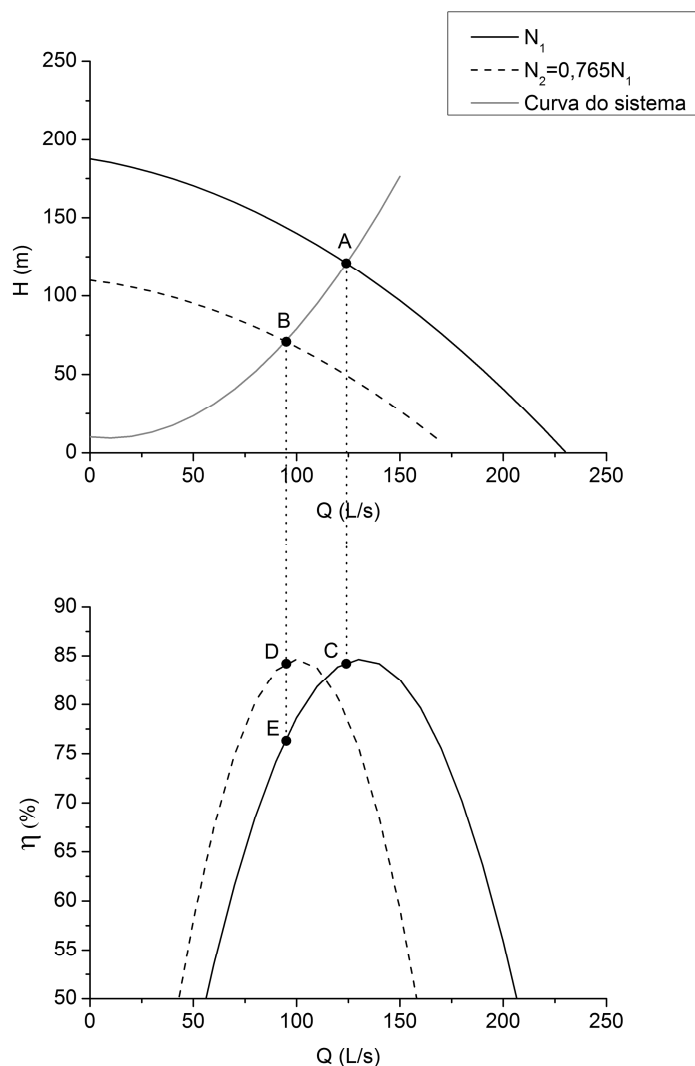
Marchi e Simpson (2013) compararam a potência estimada pelo EPANET 2 com a prevista pelas relações de semelhança. Para isto utilizaram uma rede hipotética simples, em que uma bomba é utilizada para recalcar a água de um reservatório de nível fixo (RNF) para um reservatório de nível variável (RNV) (Figura 2.3). A velocidade de rotação da bomba foi reduzida para 76,5% da velocidade nominal de rotação ( $N_2=0,765N_1$ ), o que resultou na mudança de seu ponto de operação de A (124,1L/s; 120,8m) para B (95L/s; 70,8m), na curva  $H_xQ$ , e de C (124,1L/s; 84,2%) para D (95L/s; 84,2%), na curva  $\eta_xQ$ , conforme mostra a Figura 2.4. Todavia, em vez de considerar a mudança de C para D, o programa computou a mudança de C para E (95L/s; 76,3%). A potência correspondente ao ponto D foi de 78,3 kW, enquanto a correspondente ao ponto E foi de 86,4 kW, ou seja, neste exemplo o EPANET 2 superestimou a potência da bomba prevendo um valor 10,3% maior que o obtido pelas relações de semelhança. No mesmo trabalho, os autores chamam a atenção para a importância de se incluir na avaliação da eficiência de bombas de rotação variável todos os componentes do conjunto elevatório, o que inclui motores e inversores de frequência, os quais atualmente não são modelados pelo EPANET 2.

Figura 2.3 – Rede hipotética testada por Marchi e Simpson (2013) (acima) e sua representação no EPANET (abaixo).



Fonte: Adaptado de Marchi e Simpson (2013).

Figura 2.4 – Ponto de operação da bomba em duas velocidades de rotação.



Fonte: adaptado de Marchi e Simpson (2013).

Apesar da limitação do EPANET 2 no cômputo da eficiência e, conseqüentemente, da potência de bombas de rotação variável, Kurek e Ostfeld (2014) utilizam o programa na otimização operacional de duas redes hipotéticas de distribuição de água com bombas de rotação variável visando a minimização do custo da energia consumida no bombeamento e do uso de desinfetante que deve ser aplicado à água, enquanto satisfaz às restrições do sistema. Para isto, os autores assumiram uma eficiência constante e igual a 75% para as bombas, sob a hipótese de que esta representaria a eficiência global de todo o conjunto elevatório. Esta abordagem também foi utilizada por Wu et al. (2012) em seu trabalho de otimização multiobjetivo do projeto de sistemas de bombeamento de água, no qual

foram avaliadas alternativas de projeto com bombas de rotação constante e com bombas de rotação variável.

### 3 METODOLOGIA

No presente capítulo, são apresentadas as intervenções realizadas no código-fonte do simulador hidráulico EPANET 2 (ROSSMAN, 2000a) para a implementação de rotina de cálculo da eficiência de bombas de rotação variável utilizando-se a fórmula de Sârbu e Borza (1998). A influência de tais intervenções na análise hidráulica realizada pelo programa foi avaliada pela realização de simulações, em período estendido, com uma rede hipotética de referência equipada com bombas de rotação variável, para condições de bombeamento sob eficiência constante e sob eficiência variável. Para isto contou-se com o suporte do Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás devidamente instrumentado com computadores, impressoras e softwares como o compilador Microsoft Visual C++ 2010 Express Edition, de distribuição gratuita, e o simulador hidráulico EPANET 2 desenvolvido pela *U. S. Environmental Protection Agency - EPA* e de domínio público.

#### 3.1 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINA NO EPANET 2

A mudança na velocidade de rotação de uma bomba implica em alteração de suas curvas características  $H_xQ$ ,  $P_xQ$ ,  $\eta_xQ$  e, conseqüentemente, de seu ponto de operação. A eficiência da bomba no novo ponto de operação geralmente é estimada utilizando-se as relações de semelhança (Eq. 2.5 a 2.7), as quais descrevem a relação entre as variáveis associadas ao desempenho da bomba (vazão, altura manométrica e potência) e sua velocidade de rotação.

O simulador hidráulico EPANET 2 utiliza as relações de semelhança dadas pelas equações para modelar as mudanças na curva  $H_xQ$  da bomba quando esta tem sua velocidade de rotação alterada. Todavia, não considera tais relações no cálculo da nova eficiência. Em vez disso, o programa continua a utilizar a curva  $\eta_xQ$  na velocidade nominal de rotação e, deste modo, retorna resultados incorretos da potência e do consumo de energia da bomba (MARCHI; SIMPSON, 2013).

Para corrigir essa inacurácia do EPANET 2, implementou-se uma rotina no código-fonte do programa para a correção da eficiência de bombas de rotação variável pela fórmula de Sârbu e Borza (1998). A opção pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) deve-se ao fato de ter sido reportado pela literatura uma melhor acurácia desta na estimativa da eficiência de bombas de rotação variável de pequeno e médio porte quando comparada à eficiência estimada por meio das relações de semelhança, ao passo que também apresenta uma boa estimativa para bombas de grande porte (SIMPSON; MARCHI, 2013).

As intervenções necessárias no código-fonte do EPANET 2 para a implementação da fórmula de Sârbu e Borza (1998) são descritas no trabalho de Simpson e Marchi (2013) e apresentadas a seguir.

O código-fonte do EPANET 2 foi escrito em C e é composto por vários arquivos. Para o cálculo da eficiência pela equação de Sârbu e Borza (1998), é necessário somente a alteração do arquivo `hydraul.c`, em particular, a função `getenergy()`. A aplicação da fórmula de Sârbu e Borza (1998) requer somente o conhecimento da eficiência na velocidade de rotação nominal, isto é,  $\eta_1$  na equação 2.10 e  $eN$  no trecho de código a seguir, e a velocidade relativa de rotação, isto é, o inverso de  $\eta_1/\eta_2$  na equação 2.10 e `patMult` no trecho de código a seguir. Observa-se que inicialmente  $eN$  está sob a forma de porcentagem, devido ao modo que a curva  $\eta \times Q$  é inserida no EPANET 2, e deve ser convertida em taxa para ser utilizada na fórmula de Sârbu e Borza (1998). Em seguida,  $eN$  deve ser novamente convertida em porcentagem para a continuação dos cálculos de energia. As alterações realizadas no arquivo `hydraul.c` encontram-se destacadas em negrito no trecho de código a seguir:

[...]

```
void getenergy(int k, double *kw, double *eff)
```

```
{
```

```
    int i,j;
```

```
    double dh, q, e;
```

```
    double q4eff, patMult; /*vazão da bomba na velocidade de rotação nominal e; fator correspondente à velocidade de rotação relativa*/
```

```
    long p, temp; /*variáveis utilizadas no cálculo da velocidade relativa de rotação quando esta é inserida no EPANET 2 como um padrão temporal /*
```

```
double eN; //eficiência da bomba na velocidade nominal de rotação
```

```
[...]
```

```
/* For pumps, find effic. at current flow */
```

```
if (Link[k].Type == PUMP)
```

```
{
```

```
    j = PUMPINDEX(k);
```

```
    e = Epump;
```

```
    if ((i = Pump[j].Ecurve) > 0)
```

```
    {
```

```
        /*determine a velocidade relativa de rotação (patMult) para um intervalo de tempo específico*/
```

```
        if (Pump[j].Upat > 0)
```

```
        {
```

```
            p = (Htime+Pstart)/Pstep;
```

```
            temp = p % (long) Pattern[Pump[j].Upat].Length;
```

```
            patMult = Pattern[Pump[j].Upat].F[temp];
```

```
        }
```

```
        else patMult = K[k];
```

```
        q4eff = q/patMult; /*Determinação da vazão da bomba na velocidade de rotação nominal utilizando-se a relação de semelhança dada pela equação 2.5 */
```

```
        eN = interp(Curve[i].Npts,Curve[i].X,Curve[i].Y, q4eff*Ucf[FLOW]);
```

```
        /*Determinação da eficiência (eN) correspondente à vazão na velocidade nominal de rotação (q4eff) por interpolação linear utilizando-se a curva EficiênciaxVazão inserida como dado de entrada da bomba*/
```

```
        eN = eN/100; /*Conversão em taxa para uso na fórmula de Sârbu e Borza (1998)*/
```

```
        e = 1-((1-eN)*pow((1/patMult),0.1)); //Fórmula de Sârbu e Borza (1998)
```

```
        e = e*100; //Conversão em porcentagem para uso no EPANET 2
```

```
    }
```

```
    e = MIN(e,100.0);
```

```
    e = MAX(e, 1.0);
```

```
    e /= 100.0;
```

```
}
```

```
[...]
```

### 3.2 FERRAMENTA PARA DESENVOLVEDORES

O pacote do simulador hidráulico EPANET 2 conta com uma extensão para desenvolvedores denominada *EPANET 2 Programmer's Toolkit*, a qual consiste numa coleção de chamadas de funções que residem numa biblioteca de vínculo dinâmico (*dynamic-link library - DLL*), arquivo de bibliotecas compartilhadas utilizadas em sistemas operacionais Microsoft Windows. A ferramenta permite a desenvolvedores personalizar os algoritmos de análise hidráulica e de qualidade da água implementados no EPANET de acordo com suas necessidades, podendo ser incorporada a aplicativos Windows 32-bit escritos em C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic ou qualquer outra linguagem que seja capaz de chamar funções de um arquivo DLL (ROSSMAN, 2000b)

O EPANET 2 versão toolkit foi escrito no padrão ANSI C com módulos separados de código para o processamento dos dados de entrada, análise hidráulica, análise da qualidade da água, análise de matrizes esparsas e equações lineares, e geração de relatórios. Todavia, como o módulo de análise hidráulica da toolkit é o mesmo do código-fonte do EPANET 2, a ferramenta também é imprecisa no cálculo da eficiência de bombas de rotação variável.

Para corrigir essa imprecisão da toolkit é necessário criar uma nova DLL a partir do código-fonte do EPANET 2. Obviamente, deve-se realizar as alterações necessárias no código-fonte do programa antes de se criar a nova DLL.

Assim, preliminarmente, foram realizadas intervenções no código-fonte do EPANET 2 com duas finalidades: i) calcular a eficiência de bombas de rotação variável e; ii) recuperar a eficiência das bombas como dado de saída da toolkit. Para isto, implementou-se, no código-fonte do programa, a fórmula de Sârbu e Borza (1998), para se estimar a eficiência das bombas (ver seção 2.1), e as modificações propostas por Marchi e Simpson (2013), para recuperar diretamente a eficiência das bombas. Estas últimas são descritas a seguir.

Para recuperar diretamente a eficiência das bombas no EPANET 2 versão Toolkit é necessário modificar três arquivos do código-fonte do programa: toolkit.h, epanet.h e epanet.c. Como nos arquivos toolkit.h e epanet.h são definidos os códigos dos parâmetros associados aos componentes do modelo (nós, tubos,

sistema de unidades, entre outros), um novo código de parâmetro foi adicionado à lista de propriedades da tubulação que podem ser recuperadas utilizando-se a função `ENgetlinkvalue()`. Por sua vez, esta função foi modificada para considerar a opção de eficiência previamente adicionada à lista de propriedades da tubulação. As alterações realizadas nos arquivos supramencionados constam, em negrito, no trecho de código a seguir.

**Arquivo toolkit.h:**

```
[...]
#define EN_DIAMETER          0      /* Link parameters */
[...]
#define EN_ENERGY            13
#define EN_EFFICIENCY       14    /*adicionado para recuperar a eficiência de
                                bombas*/

#define EN_DURATION         0      /* Time parameters */
[...]
```

**Arquivo epanet2.h:**

```
[...]
#define EN_DIAMETER          0      /* Link parameters */
[...]
#define EN_ENERGY            13
#define EN_EFFICIENCY       14    /*Adicionado para recuperar a eficiência de
                                bombas*/

#define EN_DURATION         0      /* Time parameters */
[...]
```

**Arquivo epanet.c:**

```
[...]
int DLLEXPORT ENgetlinkvalue(int index, int code, float *value)
[...]
```

Case EN\_ENERGY:

```
getenergy(index, &v, &a)
break;
```

**Case EN\_EFFICIENCY:**

```
getenergy(index, &v, &a)
```

```

v=a;
break;
default: return(251);
}
*value = float(v);
return(0);
}

```

Após a implementação das alterações supramencionadas no código-fonte do EPANET 2, utilizou-se um compilador C++, em particular, o Microsoft Visual C++ 2010 Express para criar a nova DLL. Para tanto adotou-se o seguinte procedimento:

- i) Com o auxílio de um editor de texto, abriu-se o arquivo epanet.c, o qual integra o código-fonte do EPANET 2, e habilitou-se a linha de definição da DLL destacada em negrito no trecho de código a seguir:

```

/**/ New compile directives ***/                               //(2.00.11 - LR)
#define CLE /* Compile as a command line executable */
#define SOL /* Compile as a shared object library */
#define DLL /* Compile as a Windows DLL */

```

- ii) Em seguida, no prompt de comando do Microsoft Visual C++ 2010, acessou-se o diretório do código-fonte do EPANET 2 e digitou-se o seguinte comando:

```

cl -o epanet2.dll epanet.c hash.c hydraul.c inpfile.c input1.c input2.c input3.c mempool.c
output.c quality.c report.c rules.c smatrix.c /link /DLL

```

Ao final do processo obteve-se os arquivos epanet2.dll e epanet2.lib. Estes e o arquivo epanet2.h são necessários para se compilar, em ambiente Microsoft Visual C++ 2010 Express, qualquer rotina que chama as funções do EPANET 2 definidas na referida DLL.

Um procedimento alternativo para a criação da DLL, utilizando-se o compilador Borland C++ Builder 6.0, é apresentado no Apêndice A.

### 3.3 ESTUDO DE CASO

A fim de se avaliar a influência das alterações efetuadas no código-fonte do EPANET 2 (ver seção 3.1) na previsão do comportamento hidráulico de sistemas de distribuição de água, foram realizadas simulações dinâmicas com a rede hipotética *Anytown* (WALSKI et al., 1987), cujas características são descritas na seção 3.3.1.

Na avaliação, foram consideradas duas condições distintas de bombeamento: uma com eficiência constante e a outra com eficiência variável. Para ambas, foram realizadas simulações em período estendido com duração igual a 96 horas, estabelecendo-se, contudo, a operação diária final nas últimas 24 horas para mitigar a influência das condições iniciais sobre a operação da rede.

As simulações para condições de bombeamento com eficiência constante tiveram por objetivo verificar o acionamento da rotina implementada no código-fonte do EPANET 2, já que esta deve ser computada pelo programa somente se informada, como dado de entrada da rede, a curva eficiência versus vazão das bombas. Caso contrário, o programa adota uma eficiência global constante, com valor padrão de 75% para as bombas durante o período de simulação. Assim, em condições de bombeamento com eficiência constante, os resultados previstos pela versão original do programa, para as variáveis de estado de todos os elementos da rede, devem ser iguais aos previstos pela versão modificada.

A verificação consistiu na comparação de resultados de saída do EPANET 2, versões original e modificada, para variáveis de estado relacionadas ao reservatório e às bombas do sistema, a saber: nível de água do reservatório; vazão, altura manométrica e potência das bombas, sendo que somente esta última é dependente da eficiência. A seleção de tais variáveis levou em consideração a necessidade de uma análise por amostragem - devido à existência de vários elementos na rede, como tubos e nós - e a influência da operação do reservatório e das bombas no atendimento da demanda dos usuários e no consumo de energia do sistema.

Considerou-se ainda, na etapa de verificação, as estatísticas relacionadas ao consumo de energia do sistema, as quais são apresentadas no relatório de uso de energia gerado pelo EPANET 2, ao final das simulações, e incluem: utilização (%), eficiência média, potência média por unidade de vazão bombeada ( $\text{kW}/\text{m}^3$ ),

potência média (kW) e potência máxima (kW) de cada bomba do sistema. Diferentemente dos demais resultados, as estatísticas mencionadas referem-se ao período de 96 horas de simulação.

As simulações para condições de bombeamento com eficiência variável tiveram por objetivo avaliar a influência das intervenções realizadas no código-fonte do EPANET 2 no cálculo da eficiência e, conseqüentemente, da potência e do consumo de energia de bombas de rotação variável. Para isto, foi necessário informar, como dado de entrada do modelo, a curva de eficiência das bombas, que é utilizada pelo programa apenas nos cálculos de energia. Na avaliação, foram considerados os valores mínimos e máximos de eficiência e de potência previstos pelo programa, o erro dos resultados em relação aos valores teóricos obtidos pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) (equação 2.10) e as estatísticas de consumo de energia do sistema, que são apresentadas no relatório de uso de energia gerado pelo programa ao final da simulação.

### 3.3.1 Rede hipotética de distribuição de água

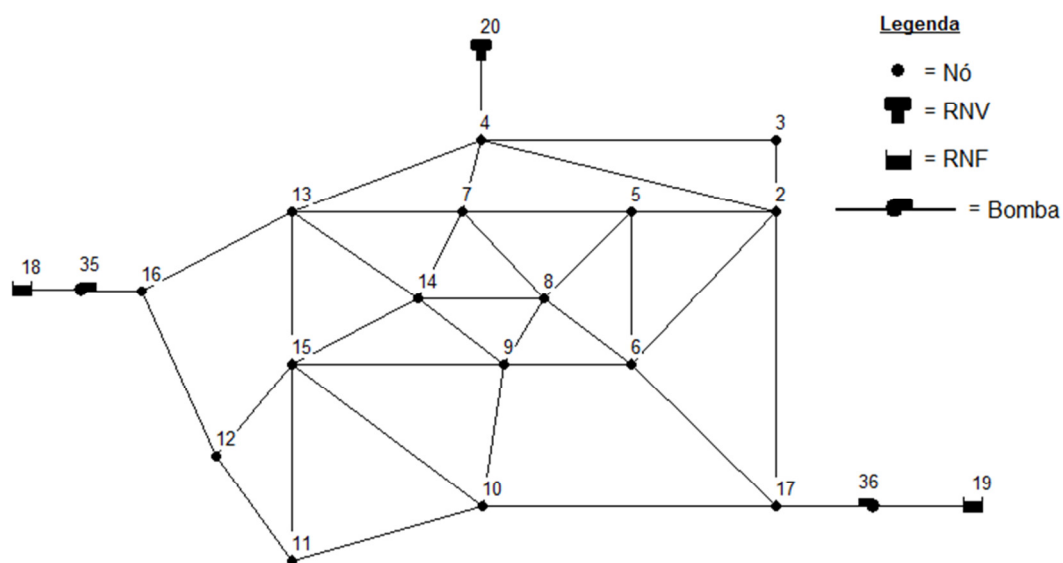
Nesta pesquisa, utilizou-se a rede hipotética *Anytown* (WALSKI et al., 1987) (Figura 3.1), com as alterações incluídas por Kurek e Ostfeld (2014), nas simulações hidráulicas realizadas no EPANET 2, versões original e modificada.

A rede *Anytown* foi proposta originalmente como um problema de determinação do projeto economicamente mais eficaz para reforçar o sistema existente de modo a atender às demandas projetadas, levando-se em consideração os custos de bombeamento e os gastos de capital (GIACOMELO; KAPELAN; NICOLINI, 2013). Todavia, tem sido utilizada pela comunidade científica como um sistema de referência na comparação de algoritmos de análise hidráulica e de otimização (JOLLY et al., 2014).

A opção pela rede *Anytown* alterada por Kurek e Ostfeld (2014) deve-se ao fato do trabalho destes autores apresentar padrões diários de variação da velocidade de rotação das bombas, os quais foram obtidos após a otimização multiobjetivo da operação da referida rede.

Conforme mostra a Figura 3.1, a rede em estudo consiste em 2 reservatórios de nível fixo (RNF) que fornecem água, com auxílio de 2 bombas, a uma rede de distribuição com 16 nós, 34 tubos e 1 reservatório de nível variável (RNV). As características dos nós e dos reservatórios da rede são apresentadas na Tabela 3.1 e as características dos tubos da rede são apresentadas na Tabela 3.2.

Figura 3.1 – Rede hipotética *Anytown* (WALSKI et al., 1987), com alterações incluídas por Kurek e Ostfeld (2014).



Fonte: Adaptado de Kurek e Ostfeld (2014).

Tabela 3.1 – Características dos nós e reservatórios da rede *Anytown*.

| Nós |          |                                  | RNF |                  | RNV              |                   |                |                |              |
|-----|----------|----------------------------------|-----|------------------|------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------|
| Id  | Cota (m) | Demanda Base (m <sup>3</sup> /h) | Id  | Nível d'água (m) | Cota da Base (m) | Nível Inicial (m) | Nível Mín. (m) | Nível Máx. (m) | Diâmetro (m) |
| 2   | 140      | 400                              | 18  | 60               | 180              | 10                | 0              | 40             | 35,68        |
| 3   | 155      | 300                              | 19  | 80               |                  |                   |                |                |              |
| 4   | 160      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 5   | 120      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 6   | 130      | 500                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 7   | 130      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 8   | 130      | 300                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 9   | 140      | 300                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 10  | 150      | 400                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 11  | 110      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 12  | 100      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |

Continua

Tabela 3.2 – Características dos nós e reservatórios da rede *Anytown*. (Conclusão)

| Nós |          |                                  | RNF |                  | RNV              |                   |                |                |              |
|-----|----------|----------------------------------|-----|------------------|------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------|
| Id  | Cota (m) | Demanda Base (m <sup>3</sup> /h) | Id  | Nível d'água (m) | Cota da Base (m) | Nível Inicial (m) | Nível Mín. (m) | Nível Máx. (m) | Diâmetro (m) |
| 13  | 120      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 14  | 145      | 200                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 15  | 130      | 300                              |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 16  | 65       | 0                                |     |                  |                  |                   |                |                |              |
| 17  | 85       | 0                                |     |                  |                  |                   |                |                |              |

Fonte: Material suplementar de Kurek e Ostfeld (2014).

Tabela 3.3 - Características dos tubos da rede *Anytown*.

| Id | Nó de montante | Nó de jusante | Comprimento (m) | Diâmetro (m) | Rugosidade <sup>a</sup> |
|----|----------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------|
| 1  | 17             | 6             | 3000            | 508.00       | 130                     |
| 2  | 17             | 2             | 3000            | 76.20        | 130                     |
| 3  | 17             | 10            | 3000            | 101.60       | 130                     |
| 4  | 2              | 6             | 1000            | 50.80        | 130                     |
| 5  | 6              | 9             | 1000            | 406.40       | 130                     |
| 6  | 6              | 8             | 1000            | 203.20       | 130                     |
| 7  | 6              | 5             | 1000            | 457.20       | 130                     |
| 8  | 8              | 5             | 1000            | 254.00       | 130                     |
| 9  | 5              | 7             | 1000            | 457.20       | 130                     |
| 10 | 8              | 7             | 1000            | 254.00       | 130                     |
| 11 | 8              | 14            | 1000            | 508.00       | 130                     |
| 12 | 8              | 9             | 1000            | 50.80        | 130                     |
| 13 | 9              | 14            | 1000            | 76.20        | 130                     |
| 14 | 14             | 7             | 1000            | 254.00       | 130                     |
| 15 | 2              | 5             | 1000            | 76.20        | 130                     |
| 16 | 2              | 3             | 1000            | 457.20       | 130                     |
| 17 | 2              | 4             | 1000            | 406.40       | 130                     |
| 18 | 3              | 4             | 1000            | 508.00       | 130                     |
| 19 | 7              | 4             | 1000            | 558.80       | 130                     |
| 20 | 7              | 13            | 1000            | 76.20        | 130                     |
| 21 | 14             | 13            | 1000            | 152.40       | 130                     |
| 22 | 15             | 14            | 1000            | 558.80       | 130                     |
| 23 | 9              | 15            | 1000            | 76.20        | 130                     |
| 24 | 10             | 15            | 1000            | 355.60       | 130                     |
| 25 | 9              | 10            | 1000            | 406.40       | 130                     |
| 26 | 10             | 11            | 1000            | 355.60       | 130                     |
| 27 | 11             | 15            | 1000            | 558.80       | 130                     |
| 28 | 11             | 12            | 1000            | 152.40       | 130                     |

Continua

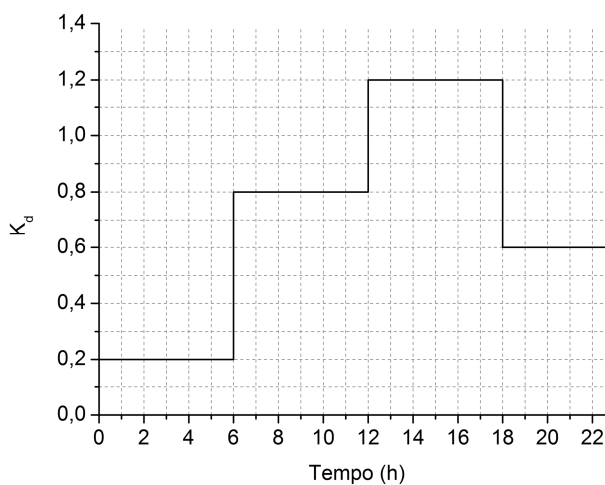
Tabela 3.4 - Características dos tubos da rede *Anytown*. (Conclusão)

| Id | Nó de montante | Nó de jusante | Comprimento (m) | Diâmetro (m) | Rugosidade <sup>a</sup> |
|----|----------------|---------------|-----------------|--------------|-------------------------|
| 29 | 12             | 15            | 1000            | 457.20       | 130                     |
| 30 | 16             | 12            | 3000            | 457.20       | 130                     |
| 31 | 13             | 15            | 1000            | 355.60       | 130                     |
| 32 | 13             | 16            | 3000            | 76.20        | 130                     |
| 33 | 13             | 4             | 1000            | 508.00       | 130                     |
| 34 | 4              | 20            | 100             | 609.60       | 130                     |

<sup>a</sup> Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams  
 Fonte: Material suplementar de Kurek e Ostfeld (2014).

A cada nó da rede está associada uma demanda base (Tabela 3.1) e um padrão de variação desta. A demanda base corresponde à vazão média requerida pelos usuários do nó e o padrão fornece os coeficientes que devem ser aplicados à demanda base para obtenção da demanda real nos diferentes intervalos de tempo do ciclo operacional. As demandas nodais da rede em estudo seguem o mesmo padrão de variação (Figura 3.2) apresentando valores mínimos de 0-6h, valores máximos de 12-18h e valores intermediários de 6-12h e de 18-24h.

Figura 3.2 – Padrão de variação das demandas nodais, em relação à demanda base, ao longo do ciclo operacional de 24 horas.

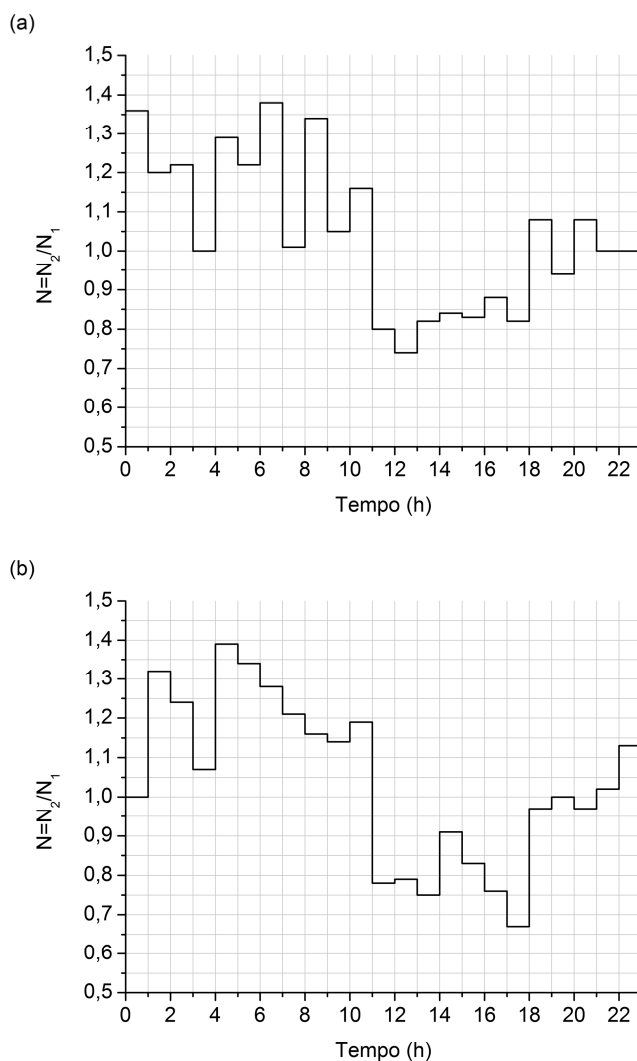


Fonte: Adaptado de Kurek e Ostfeld (2014)

O único reservatório de nível variável do sistema tem formato cilíndrico, com 35,68 m de diâmetro e 40 m de altura útil. O nível de água em seu interior varia ao longo do ciclo operacional de acordo com a vazão recalçada pelas bombas e com a demanda do sistema. Nas simulações hidráulicas, estipulou-se em 10 m o nível inicial da água no reservatório.

As duas bombas do sistema operam sob rotação variável e possuem curvas características distintas. Os padrões de operação das bombas foram retirados do trabalho de Kurek e Ostfeld (2014) e são apresentados na Figura 3.3, em que  $N$  representa a velocidade relativa de rotação da bomba, sendo definida como o quociente entre determinada velocidade de rotação  $N_2$  e a velocidade nominal de rotação  $N_1$ .

Figura 3.3 – Padrão de variação da velocidade de rotação das bombas 35 (a) e 36 (b).



Fonte: Adaptado de Kurek e Ostfeld (2014).

A curva característica altura manométrica (H) versus vazão (Q) das bombas é gerada automaticamente pelo EPANET 2 a partir da informação de ao menos um ponto de operação conhecido. A forma da curva depende do número de pontos de operação inserido como dado de entrada da bomba. No caso em tela, foram informados 3 pontos de operação para cada bomba: o primeiro para condição de vazão nula; o segundo para a condição desejada de operação e; o terceiro para a condição de máxima vazão. Para esta quantidade de pontos, o programa tenta ajustar uma função potência do tipo da equação 3.1 aos dados disponíveis. As Figuras 3.4 e 3.5 mostram as curvas HxQ ajustadas pelo EPANET 2 aos pontos de operação inseridos como dados de entradas das bombas do sistema.

$$H = H_0 - RQ^n \quad 3.1$$

Em que:

H: altura manométrica ou carga hidráulica da bomba (m);

H<sub>0</sub>: altura manométrica no ponto de shutoff (vazão nula) (m);

Q: vazão da bomba (m<sup>3</sup>/s);

R, n: constantes da função de ajuste.

Figura 3.4 – Curva HxQ da bomba 35.

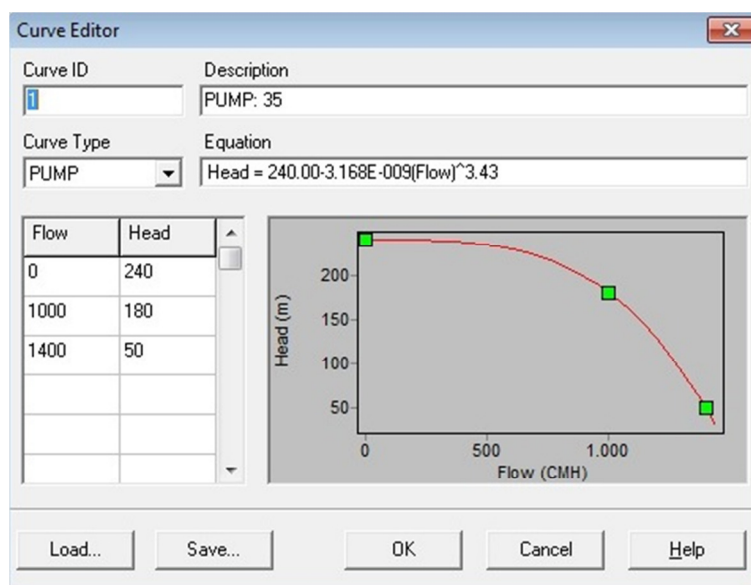
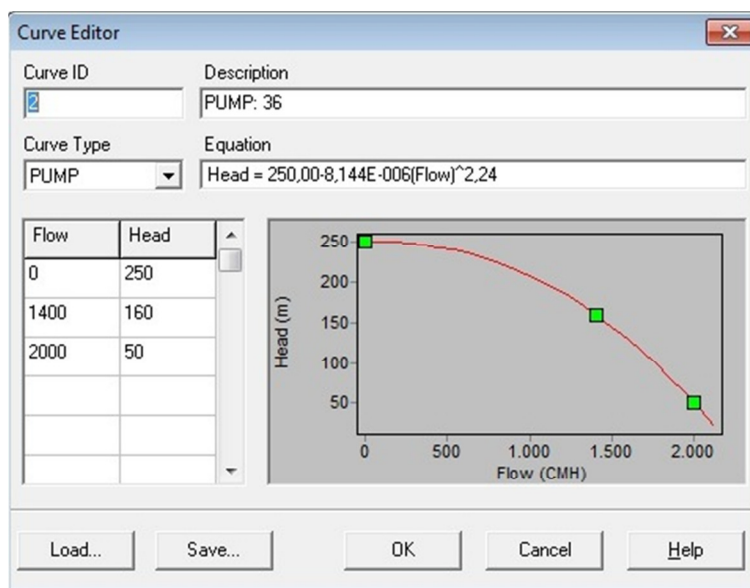


Figura 3.5 – Curva HxQ da bomba 36.



As curvas HxQ mostradas nas Figuras 3.4 e 3.5 correspondem à velocidade nominal de rotação das bombas. Se a velocidade de rotação destas é alterada, as respectivas curvas HxQ também o são. Para determinar as curvas HxQ correspondentes à nova velocidade de rotação das bombas, o EPANET 2 utiliza as relações de semelhança (Eq. 2.5 e 2.6). Assim, considerando-se o tipo da função de ajuste utilizado pelo EPANET 2 ao gerar as curvas HxQ (Eq. 3.1), a relação entre a altura manométrica e a vazão das bombas para determinada velocidade de rotação pode ser representada pela equação 3.2.

$$H = N^2 \left[ H_0 - R \left( \frac{Q}{N} \right)^n \right] \quad 3.2$$

Em que:

H: altura manométrica da bomba (m) na velocidade de rotação  $N_2$ ;

$H_0$ : altura manométrica no ponto de shutoff (m) na velocidade nominal de rotação  $N_1$ ;

Q: vazão da bomba ( $m^3/s$ ) na velocidade de rotação  $N_2$ ;

R, n: constantes da função de ajuste para a velocidade nominal de rotação  $N_1$ ;

$N$ : velocidade relativa de rotação da bomba dada pelo quociente entre a velocidade de rotação  $N_2$  e a velocidade nominal de rotação  $N_1$ .

A curva eficiência versus vazão das bombas é definida por pontos representados por pares ordenados ( $Q$ ;  $\eta$ ) conhecidos, os quais são inseridos como dados de entrada das bombas. A partir destes dados, o EPANET 2 cria uma curva completa unindo os pontos com seguimentos de reta. Para as bombas da rede em estudo, arbitraram-se os pares ordenados ( $Q$ ;  $\eta$ ) apresentados na Tabela 3.3. As curvas  $\eta \times Q$  criadas pelo EPANET 2 a partir destes dados são mostradas nas Figuras 3.6 e 3.7.

Tabela 3.5 – Pares ordenados ( $Q$ ;  $\eta$ ) arbitrados para as bombas do sistema.

| Bomba 35           |        | Bomba 36           |        |
|--------------------|--------|--------------------|--------|
| $Q$<br>( $m^3/s$ ) | $\eta$ | $Q$<br>( $m^3/s$ ) | $\eta$ |
| 100                | 0,40   | 500                | 0,40   |
| 500                | 0,60   | 700                | 0,50   |
| 800                | 0,70   | 1100               | 0,68   |
| 1000               | 0,75   | 1400               | 0,75   |
| 1300               | 0,65   | 1700               | 0,70   |
| 1800               | 0,40   | 2000               | 0,60   |
|                    |        | 2500               | 0,40   |

Figura 3.6 – Curva  $\eta \times Q$  da bomba 35.

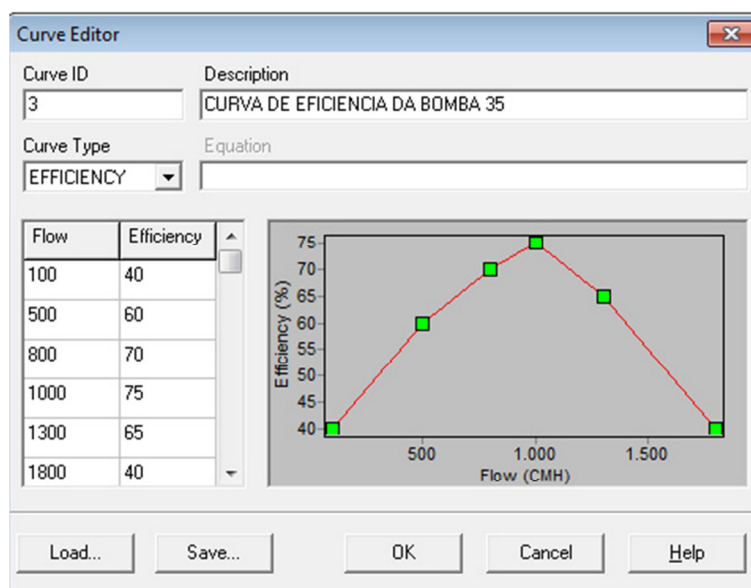
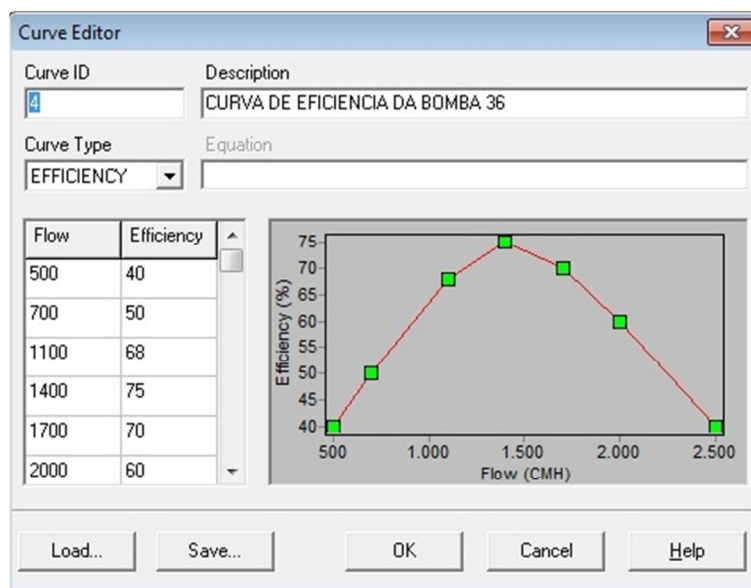


Figura 3.7 – Curva  $\eta \times Q$  da bomba 36.

As curvas  $\eta \times Q$  apresentadas nas Figuras 3.6 e 3.7 referem-se à velocidade nominal de rotação das bombas. Se a velocidade destas é alterada, as respectivas curvas de eficiência também o são. Todavia, o EPANET 2 não leva em conta as mudanças na curva de eficiência decorrentes da alteração da velocidade de rotação da bomba e continua a utilizar as curvas  $\eta \times Q$  correspondentes à velocidade nominal de rotação para estimar a eficiência do novo ponto de operação das bombas. Em vista disso, foram determinadas as curvas teóricas de eficiência para as velocidades relativas de rotação previstas no padrão operacional das bombas (Figura 3.3). Para isto ajustou-se um polinômio de grau 2 aos pares ordenados ( $Q$ ;  $\eta$ ) conhecidos para a velocidade nominal de rotação e aplicou-se a este a relação de semelhança dada pela equação 2.5, conforme sugerido por Sá Marques e Sousa (2007). Deste modo, a curva de eficiência correspondente a uma velocidade de rotação qualquer pode ser representada pela equação 3.3.

$$\eta = A \left( \frac{Q}{N} \right)^2 + B \left( \frac{Q}{N} \right) + C \quad 3.3$$

Em que:

$\eta$ : eficiência da bomba na velocidade de rotação  $N_2$ ;

Q: vazão da bomba na velocidade de rotação  $N_2$ ;

N: velocidade relativa de rotação, definida como o quociente entre a velocidade de rotação  $N_2$  e a velocidade nominal de rotação  $N_1$ ;

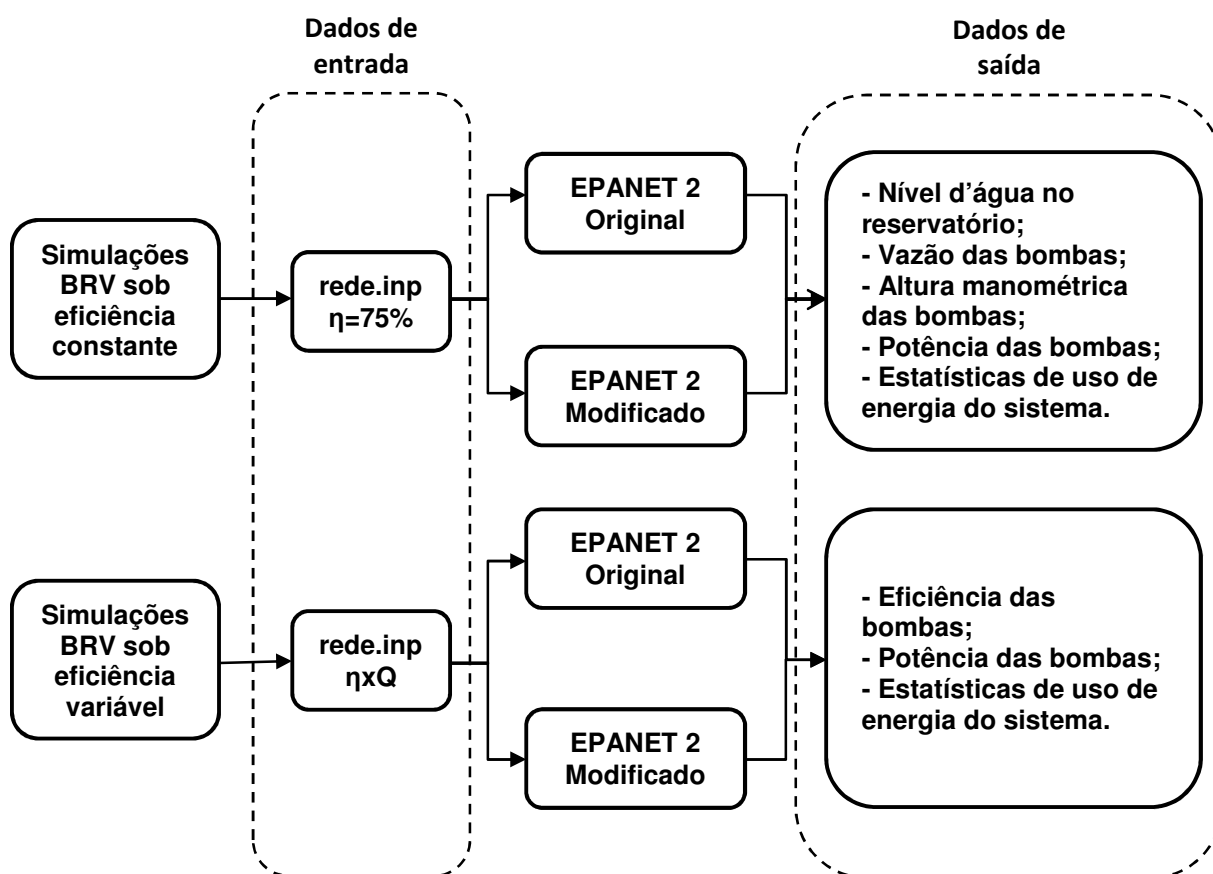
A, B, C: constantes da função de ajuste para a velocidade nominal de rotação  $N_1$ ;

As informações da rede *Anytown* mencionadas nesta seção e os demais dados de entrada do modelo constam no arquivo `rede.inp`, cujo conteúdo é apresentado no Apêndice B.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das simulações dinâmicas realizadas com a rede hipotética *Anytown*, para condições de bombeamento sob eficiência constante e de bombeamento sob eficiência variável. Um organograma é apresentado na Figura 4.1 com o objetivo de enfatizar as etapas desenvolvidas na pesquisa e facilitar ao leitor o acompanhamento das investigações e conclusões obtidas.

Figura 4.1 – Organograma das simulações realizadas.



### 4.1 BOMBEAMENTO COM EFICIÊNCIA CONSTANTE

A rotina implementada no código-fonte do EPANET 2 para o cálculo da eficiência de bombas de rotação variável é computada somente se informada, como

dado de entrada do modelo, a curva  $\eta \times Q$  das bombas, ou seja, como a eficiência varia com a vazão recalçada. Para condições de bombeamento com eficiência constante a rotina não é acionada e, desse modo, os resultados previstos pela versão modificada do EPANET 2 para as variáveis de estado de todos os elementos da rede devem ser iguais aos previstos pela versão original, pois, caso contrário, indicaria que as intervenções realizadas não foram bem sucedidas. Assim, as simulações realizadas com a rede hipotética *Anytown* para condições de bombeamento com eficiência constante tiveram a finalidade de validar as intervenções realizadas no código-fonte do EPANET 2.

Nas simulações foi adotada a eficiência global de 75% para as bombas, já que este é o valor padrão utilizado pelo EPANET 2 quando a curva de eficiência das bombas não é fornecida. Também foram adotados os padrões de variação da velocidade de rotação apresentados na Figura 3.3 (seção 3.2.1), que foram retirados do trabalho de Kurek e Ostfeld (2014).

Na verificação, foram considerados os resultados previstos pelo EPANET 2, versões original e modificada, para uma amostra de variáveis de estado da rede, especificamente, o nível de água do reservatório de nível variável e a vazão, altura manométrica e potência das bombas, e também as estatísticas apresentadas no relatório de usos de energia gerado pelo EPANET 2, ao final das simulações.

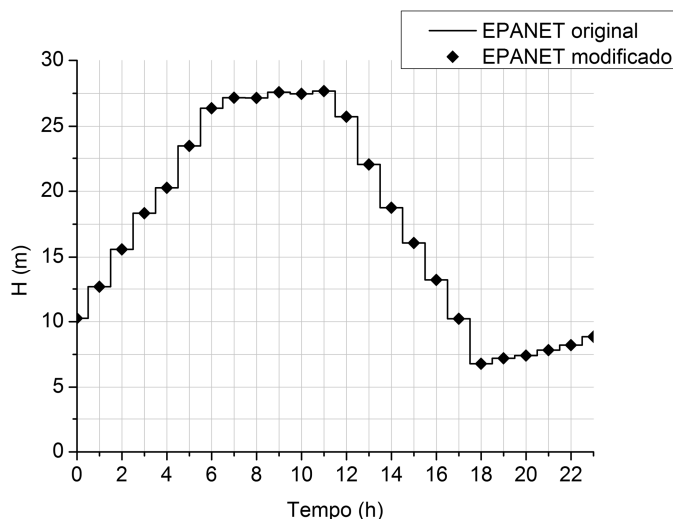
A rede em estudo conta somente com um reservatório de nível variável. O comportamento operacional deste, em termos de variação do nível de água ao longo do tempo, previsto pelo EPANET 2, versões original e modificada, é apresentado na Figura 4.2.

Observa-se, pela Figura 4.2, que os resultados do nível de água no reservatório previstos pelo simulador hidráulico original foram idênticos aos previstos pelo simulador modificado.

Nota-se ainda, pela Figura 4.2, períodos bem definidos no comportamento hidráulico do reservatório. Nos intervalos das 0h a 07h e das 18h às 23h, por exemplo, são registradas variações positivas do nível de água, ou seja, a vazão fornecida ao sistema é superior à demanda e, portanto, o reservatório está enchendo. Já no intervalo das 11h às 18h, são registradas variações negativas do nível de água, ou seja, a demanda é superior à vazão fornecida ao sistema e, por

consequente, o reservatório está se esvaziando. No intervalo das 07h às 11h são registradas tanto variações negativas quanto positivas.

Figura 4.2 – Nível de água no reservatório ao longo do ciclo operacional.



Considerando todos os intervalos de tempo do ciclo operacional, o nível máximo de água no reservatório foi igual a 27,67 metros, sendo registrado no intervalo de tempo das 11h, e o nível mínimo foi igual a 6,79 metros, sendo registrado no intervalo de tempo das 18h.

Os resultados das variáveis de estado associadas à operação das bombas, ou seja, a vazão, altura manométrica e potência, são apresentados na Figura 4.3.

Observa-se, pela Figura 4.3, que os resultados horários da vazão, altura manométrica e potência de ambas as bombas, previstos pelo EPANET 2 original, foram iguais aos previstos pelo EPANET 2 modificado, em todos os intervalos de tempo.

Nota-se ainda, pela Figura 4.3, que a vazão, a altura manométrica e a potência das bombas variaram ao longo do ciclo operacional, o que indica uma mudança em seu ponto de funcionamento ao longo do tempo. Tal fato é decorrente de alterações nas curvas características das bombas, pela mudança da velocidade de rotação destas, e na curva do sistema, pela variação da demanda e do nível de água do reservatório. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as curvas características das

bombas do sistema e os respectivos pontos de funcionamento em cada intervalo de tempo do ciclo operacional.

Figura 4.3 – Vazão, altura manométrica e potência das bombas ao longo do ciclo operacional.

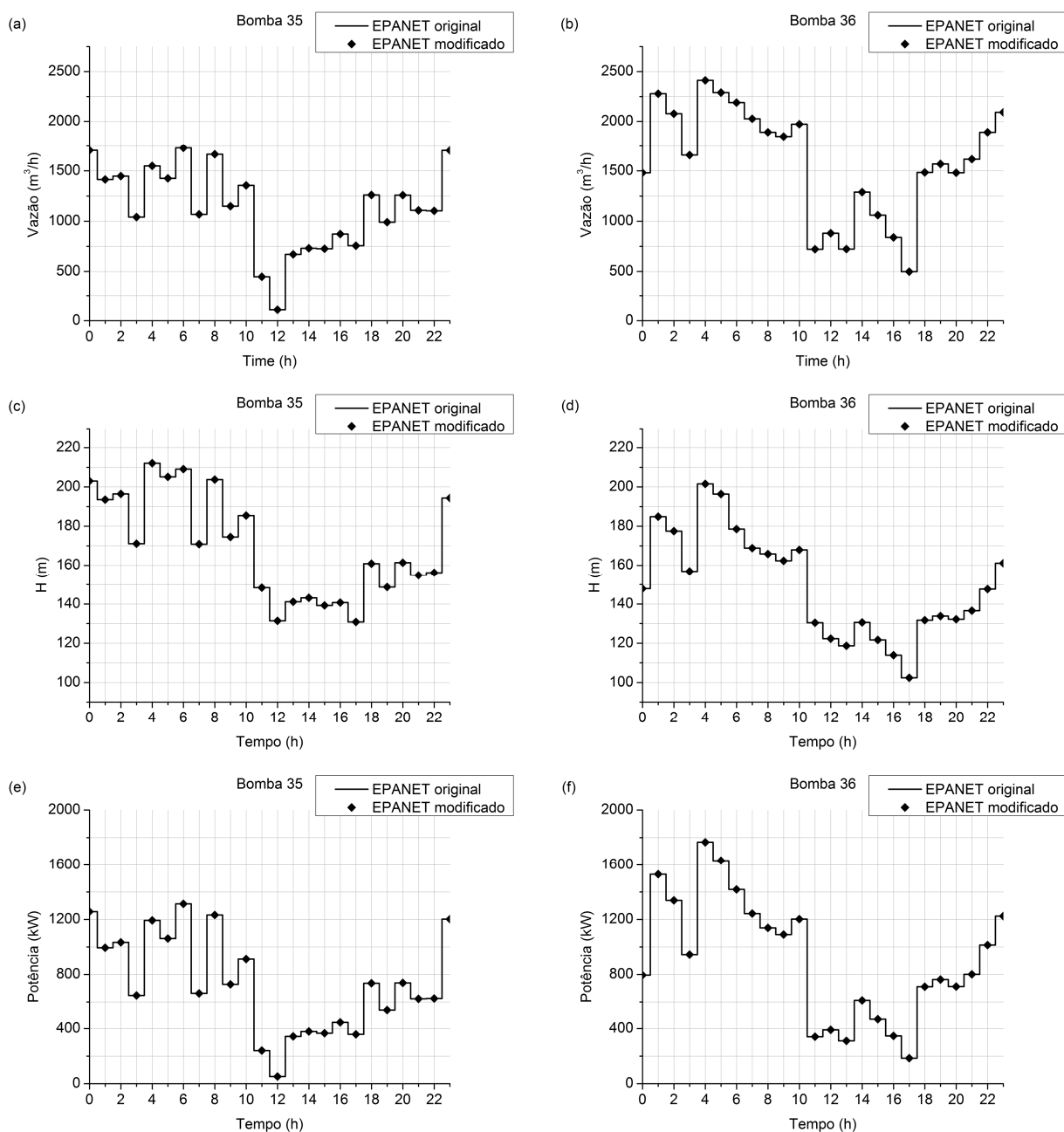


Figura 4.4 – Curva HxQ e ponto de operação da bomba 35 em cada intervalo de tempo do ciclo operacional.

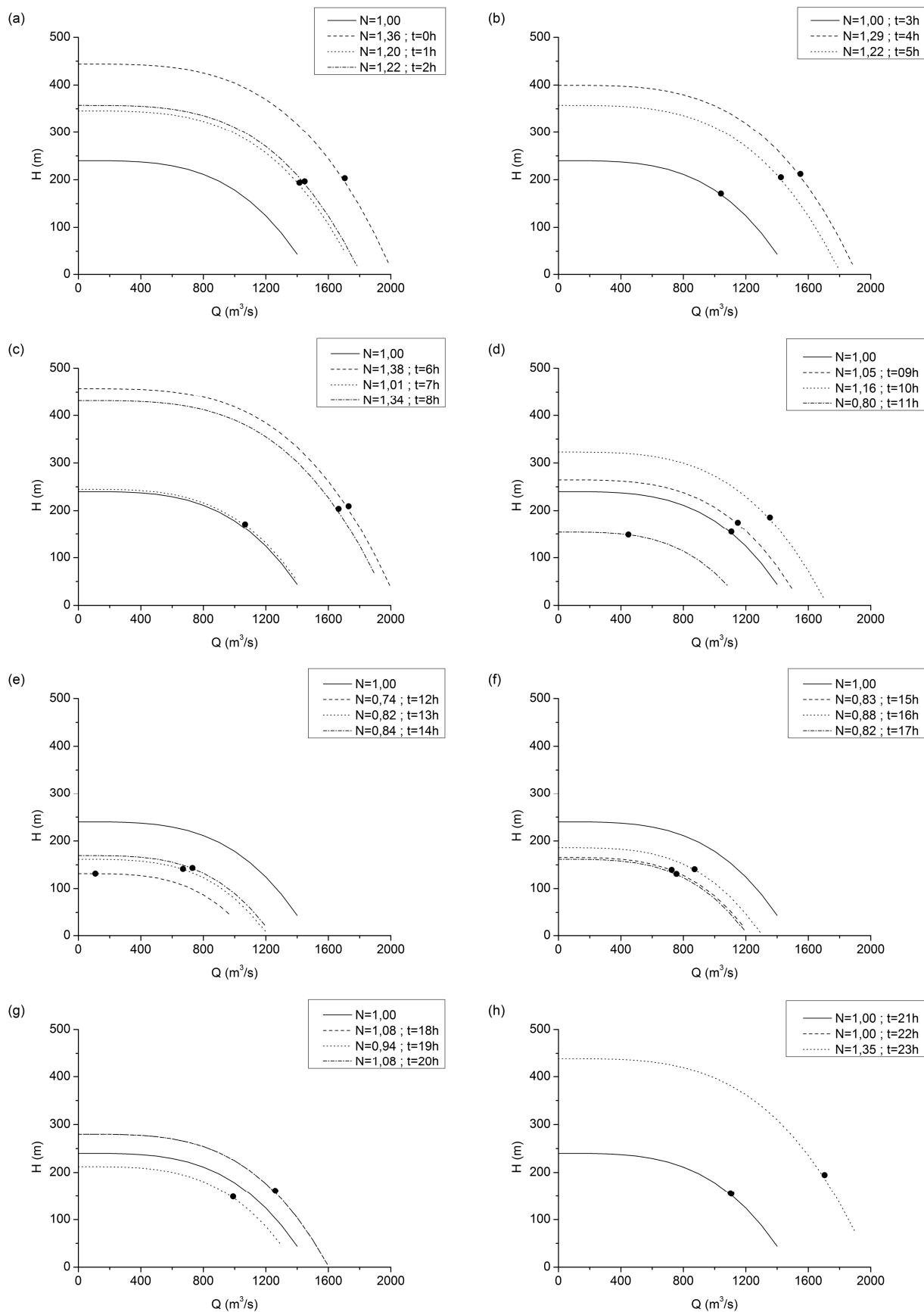
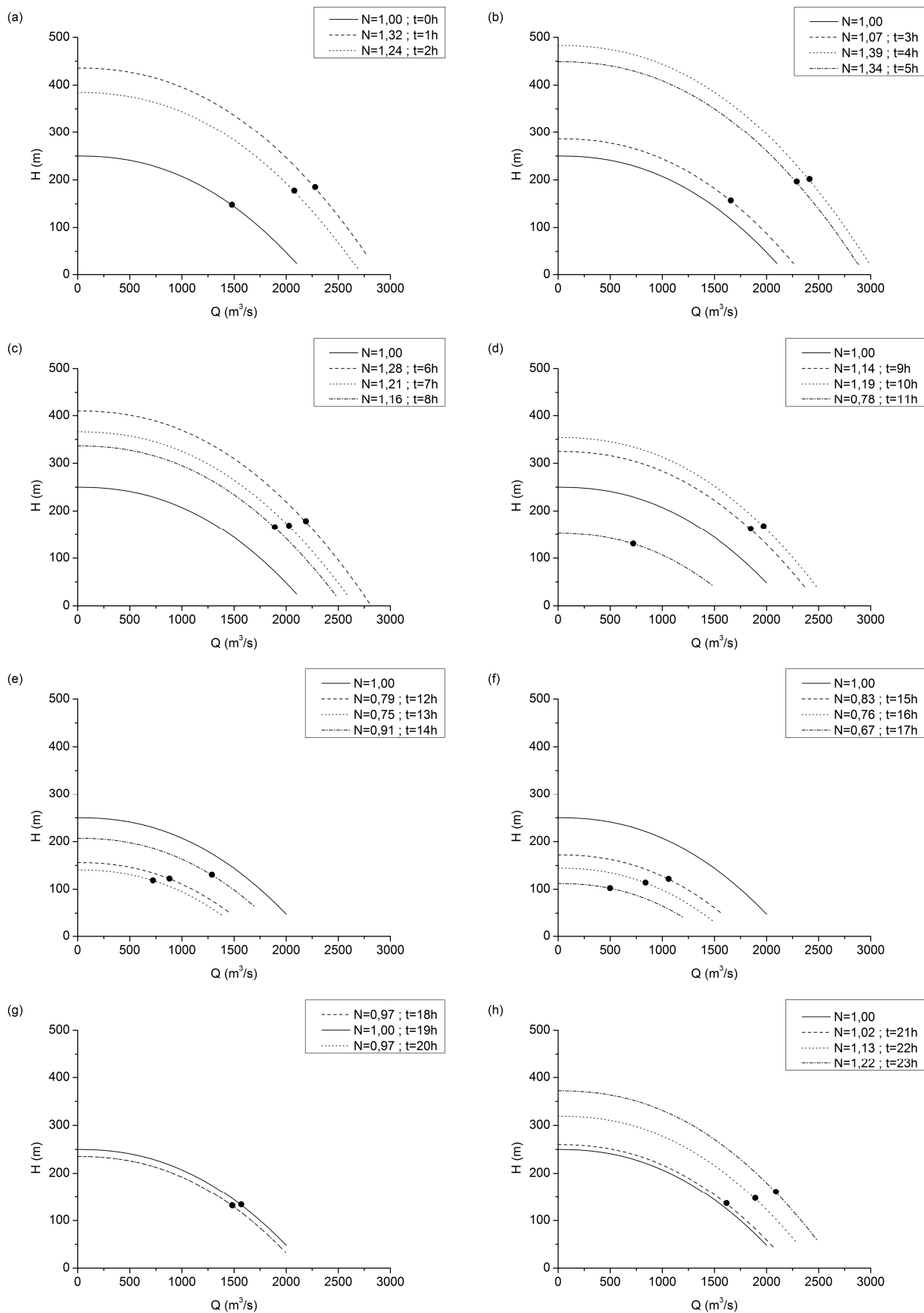


Figura 4.5 – Curva HxQ e ponto de operação da bomba 36 em cada intervalo de tempo do ciclo operacional.



Destacam-se aqui os resultados previstos pelos simuladores hidráulicos para a potência das bombas, já que esta é a única, entre as variáveis de estado analisadas, que é influenciada pela eficiência. Neste caso particular de bombeamento com eficiência constante e igual a 75%, as potências máxima e mínima foram, respectivamente, iguais a 52,13 kW (t = 12h) e 1313,52 kW (t = 06h), para a bomba 35, e 185,34 kW (t = 17h) e 1766,02kW (t = 04h), para a bomba 36.

Ao final de cada simulação hidráulica, o EPANET 2 gera um relatório padrão contendo informações a respeito do consumo de energia do sistema e do custo associado a este, considerando todo o período de simulação, ou seja, 96 horas. Para as simulações realizadas com a rede hipotética *Anytown*, sob condições de bombeamento constante, o relatório gerado pelo EPANET 2 apresentou os resultados mostrados no Quadro 4.1. Ressalta-se que os dados relacionados ao custo de energia foram omitidos por não fazerem parte do escopo desta pesquisa.

Quadro 4.1 – Dados de consumo de energia da rede *Anytown*, para condições de bombeamento sob eficiência constante.

|                             | EPANET 2 Original |          | EPANET 2 Modificado |          |
|-----------------------------|-------------------|----------|---------------------|----------|
|                             | Bomba 35          | Bomba 36 | Bomba 35            | Bomba 36 |
| <b>Utilização (%)</b>       | 100,00            | 100,00   | 100,00              | 100,00   |
| <b>Eficiência Média (%)</b> | 75,00             | 75,00    | 75,00               | 75,00    |
| <b>kWh/m<sup>3</sup></b>    | 0,62              | 0,54     | 0,62                | 0,54     |
| <b>Potência Média (kW)</b>  | 736,70            | 915,65   | 736,70              | 915,65   |
| <b>Potência Máxima (kW)</b> | 1313,52           | 1766,02  | 1313,52             | 1766,02  |

Observa-se, pelo Quadro 4.1, que os resultados de todos os parâmetros de uso de energia considerados foram iguais para ambos os simuladores hidráulicos, conforme o esperado para condições de bombeamento sob eficiência constante.

Para a atual configuração do modelo da rede, tanto a bomba 35 quanto a bomba 36 mantiveram-se em funcionamento durante as 96 horas de simulação.

Em se tratando da eficiência energética das bombas, nota-se que a bomba 35 consumiu, em média, 14,8% mais energia do que a bomba 36 para cada metro cúbico de água recalçada.

#### 4.2 BOMBEAMENTO COM EFICIÊNCIA VARIÁVEL

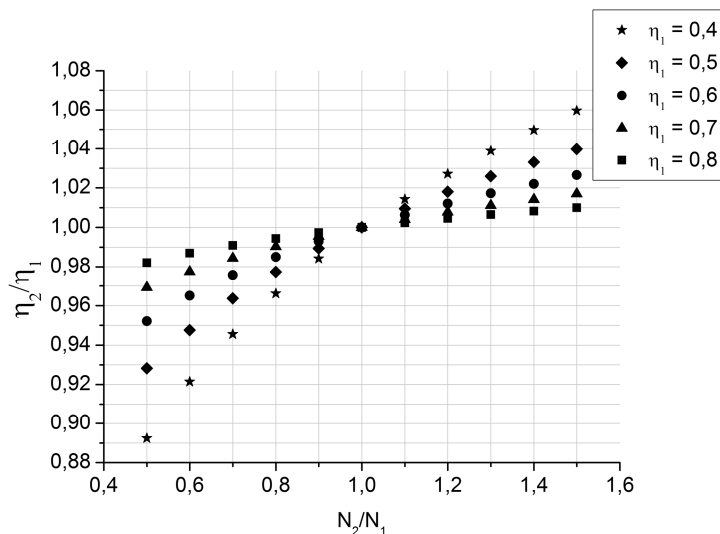
As simulações realizadas com a rede *Anytown* para condições de bombeamento com eficiência variável tiveram por finalidade avaliar a influência das intervenções feitas no código-fonte do EPANET 2 na previsão da eficiência e, conseqüentemente, da potência e consumo de energia de bombas de rotação variável. Para isto, foi necessário informar, como dado de entrada do modelo, as curvas de eficiência e padrões de variação da velocidade de rotação das bombas, que são apresentados na seção 3.2.1.

Os resultados de eficiência previstos pelo EPANET 2 original foram comparados aos valores teóricos obtidos pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) (Eq. 2.10), a qual foi implementada na versão modificada do referido simulador.

A utilização da fórmula de Sârbu e Borza (1998) para se estimar a eficiência  $\eta_2$  do novo ponto de operação de uma bomba, quando esta tem sua velocidade de rotação alterada, requer apenas o conhecimento da eficiência  $\eta_1$  do ponto homólogo na curva  $\eta \times Q$ , correspondente à velocidade nominal de rotação, e da razão da velocidade de rotação atual  $N_2$  para a velocidade de rotação nominal  $N_1$ , ou seja,  $N_2/N_1$ . Deste modo, e a partir da Eq. 2.10, é possível determinar a eficiência teórica de  $\eta_2$  para diferentes valores de  $\eta_1$  e de  $N_2/N_1$  (Figura 4.6).

Observa-se, pela Figura 4.6, que a eficiência estimada  $\eta_2$  aproxima-se da eficiência original  $\eta_1$  se esta é elevada e a variação na velocidade de rotação da bomba é pequena. Para valores de  $\eta_1$  superiores a 0,70 e variações na velocidade de rotação da bomba inferiores a 30% ( $0,7 < N_2/N_1 < 1,3$ ), por exemplo, a diferença entre as eficiências  $\eta_2$  e  $\eta_1$  é inferior a 1,6%. Todavia, a diferença entre  $\eta_2$  e  $\eta_1$  tende a aumentar quanto menor o valor desta última e maior o valor de  $N_2/N_1$ .

Figura 4.6 – Eficiências estimadas pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) para diferentes valores de  $\eta_1$  e de  $N_2/N_1$ .



O fator de correção da eficiência  $\eta_2/\eta_1$  assume valores superiores à unidade, para incrementos na velocidade de rotação da bomba, e inferiores à unidade, para decrementos na velocidade de rotação da bomba.

A diferença entre as eficiências estimada e original é proporcionalmente maior em reduções do que em aumentos na velocidade de rotação da bomba. No caso de  $\eta_1$  igual a 0,6 e variações de  $\pm 30\%$  na velocidade de rotação da bomba, por exemplo, a diferença entre as eficiências estimada e original é de -2,42%, para a redução, e 1,73%, para o aumento na velocidade de rotação da bomba, conforme mostra a Figura 4.7.

No caso da rede em estudo, a eficiência das bombas em cada intervalo de tempo depende de sua curva característica e padrão de operação em termos de velocidade de rotação. A partir destas informações é determinado o valor de  $\eta_1$  com o auxílio das relações de semelhança (Eq. 2.5 e 2.6) e, em seguida, o valor de  $\eta_2$  pela fórmula de Sârbu e Borza (1998) (Eq. 2.10).

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as eficiências horárias previstas pelo EPANET 2, versões original e modificada, para as bombas da rede em estudo. Observa-se, pelas Figuras 4.8 e 4.9, que as eficiências previstas pelo EPANET 2 original foram diferentes das previstas pelo EPANET 2 modificado, nos intervalos de tempo em que houve mudança na velocidade de rotação das bombas. Na maior parte do ciclo operacional, a versão original do simulador subestimou a eficiência das bombas.

As eficiências previstas pelo simulador hidráulico original variaram de 0,4047 (t = 12h) a 0,7476 (t = 19h), para a bomba 35, e de 0,4000 (t = 17h) a 0,7364 (t = 0h), para a bomba 36. Já as eficiências estimadas pelo EPANET 2 modificado variaram de 0,4062 (t = 12h) a 0,7446 (t = 16h), para a bomba 35, e de 0,5002 (t = 17h) a 0,7450 (t = 14h), para a bomba 36. Ressalta-se que a máxima eficiência na curva  $\eta \times Q$  de ambas as bombas, na velocidade de rotação nominal, é igual a 0,75.

Figura 4.7 – Eficiências estimada ( $\eta_2$ ) e original ( $\eta_1$ ) para diferentes variações ( $N_2/N_1$ ) na velocidade de rotação da bomba.

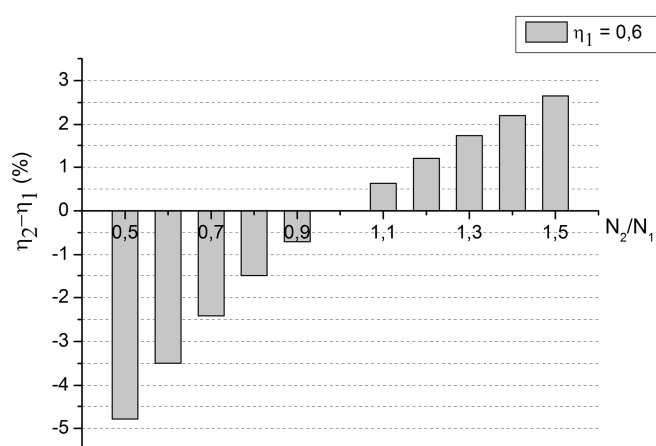


Figura 4.8 – Eficiências horárias previstas pelo EPANET 2, versões original e modificada, para a bomba 35.

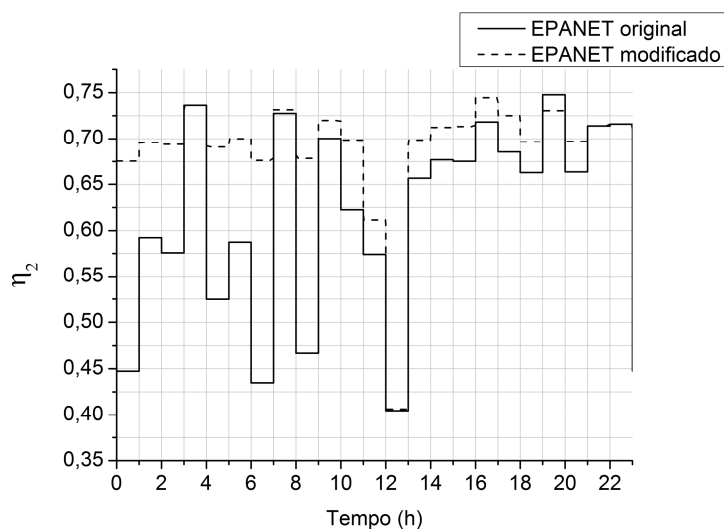




Figura 4.10 – Curvas teóricas  $\eta \times Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 0 às 7h).

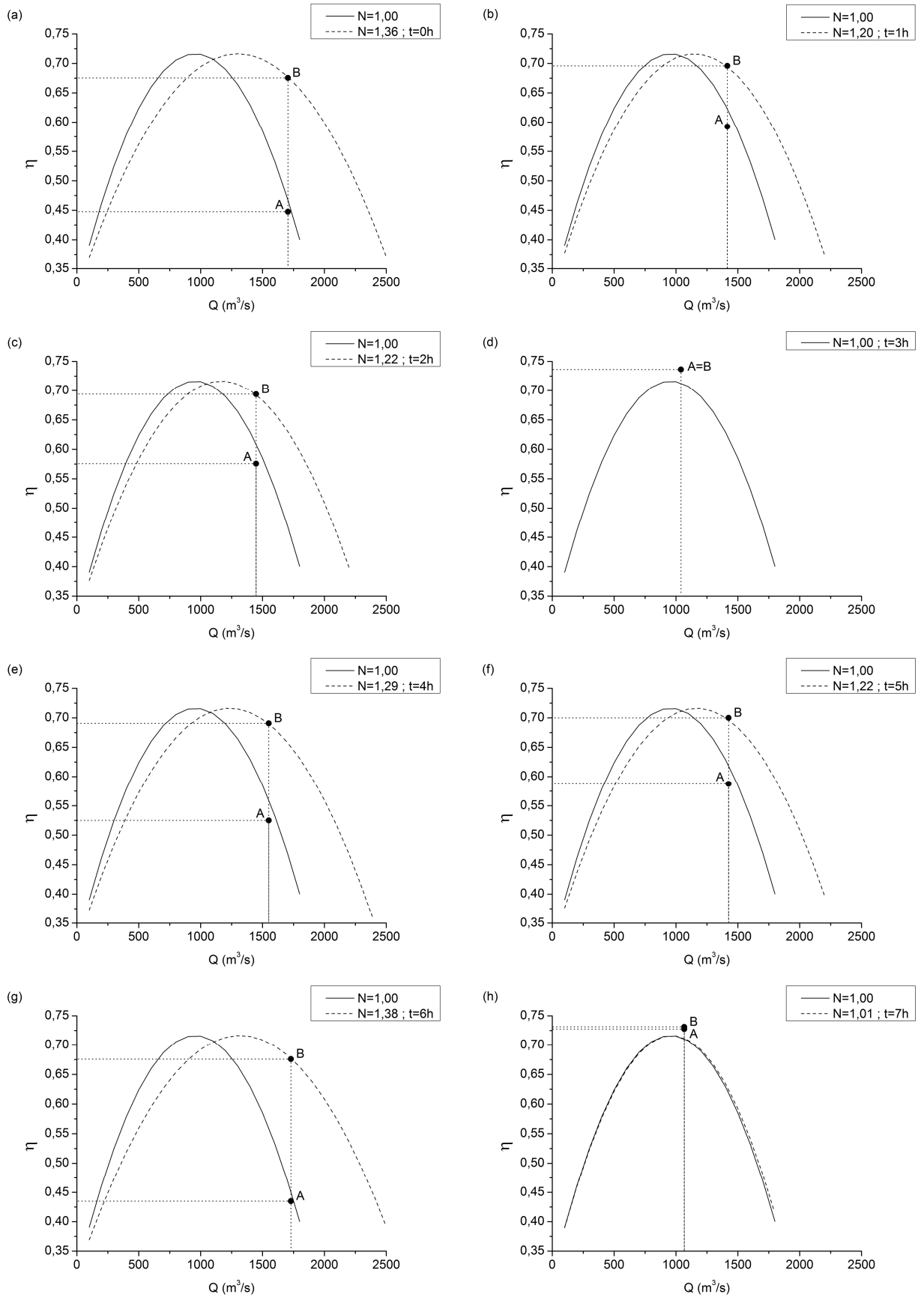


Figura 4.11 - Curvas teóricas  $\eta \times Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 8 às 15h).

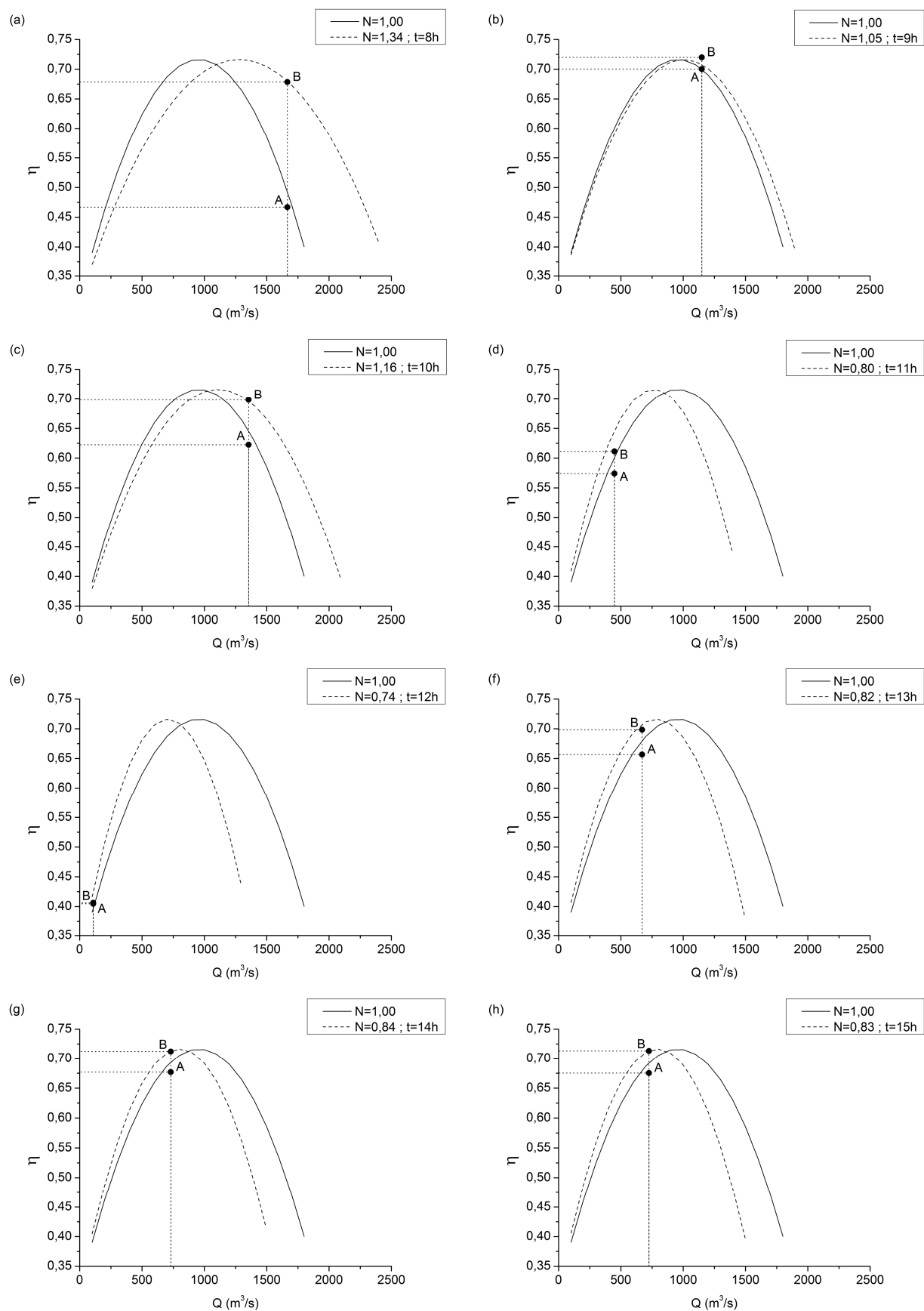


Figura 4.12 - Curvas teóricas  $\eta \times Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 35 (de 16 às 23h).

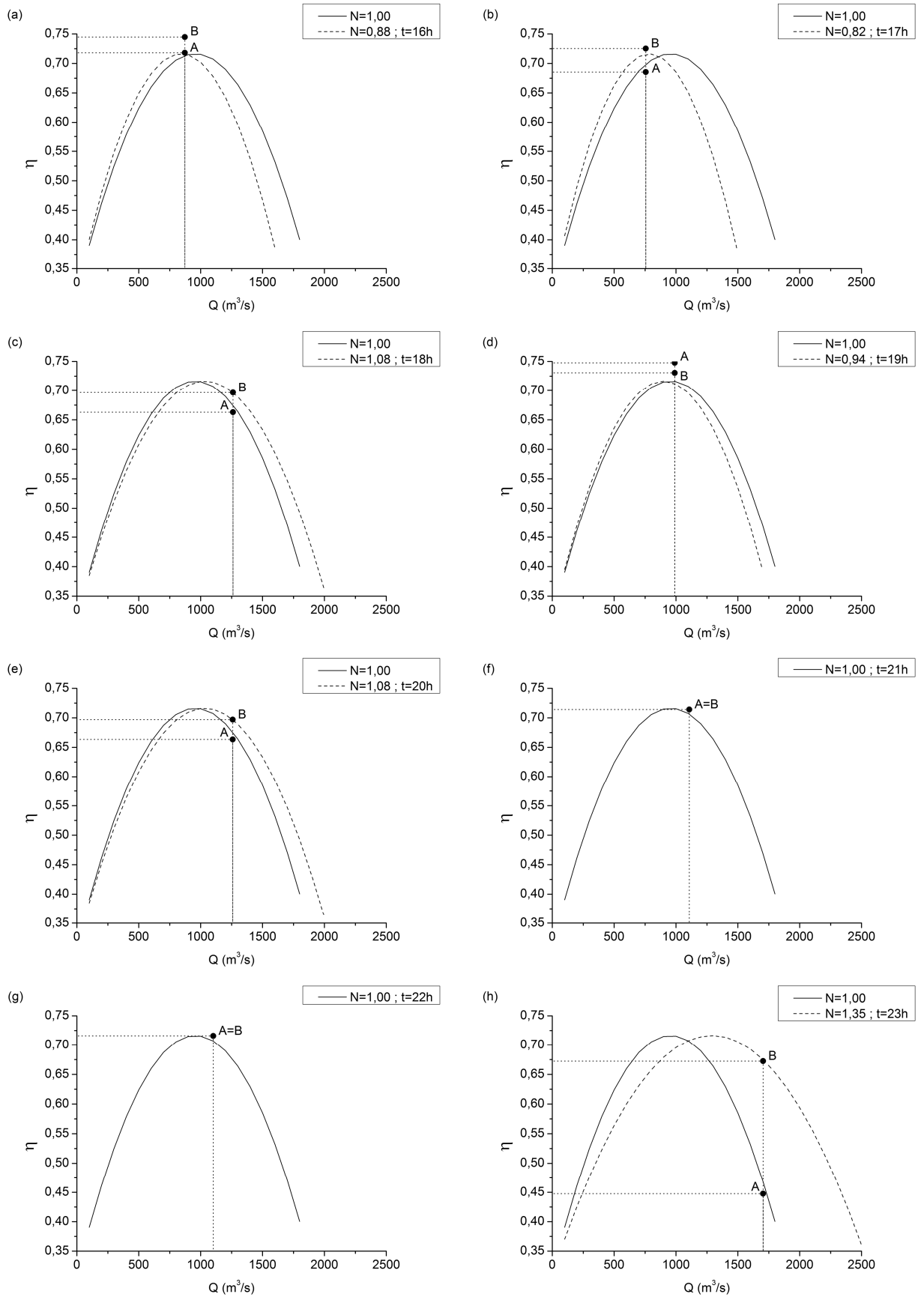


Figura 4.13 - Curvas teóricas  $\eta \times Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 0 às 7h).

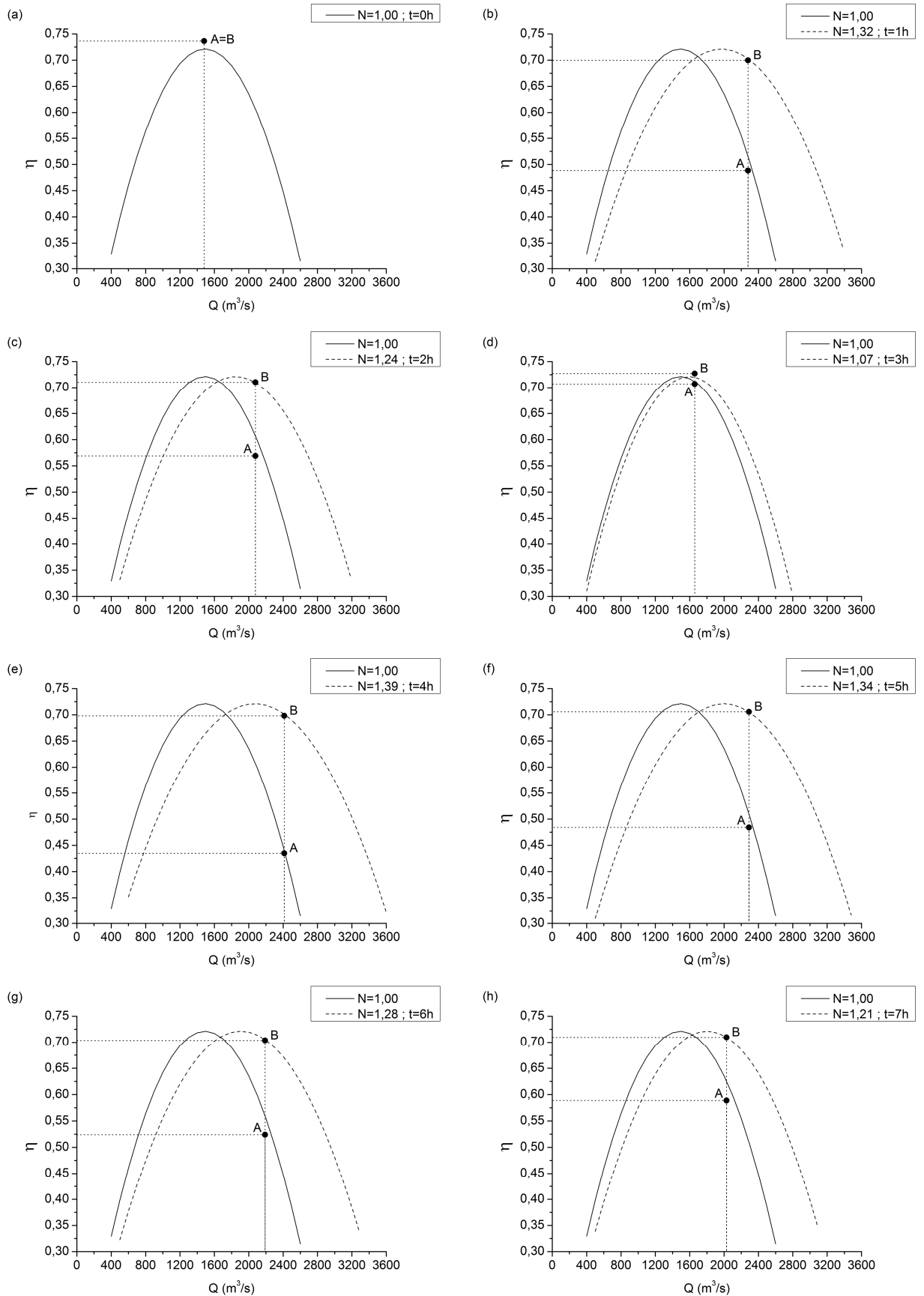


Figura 4.14 - Curvas teóricas  $\eta_Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 8 às 15h).

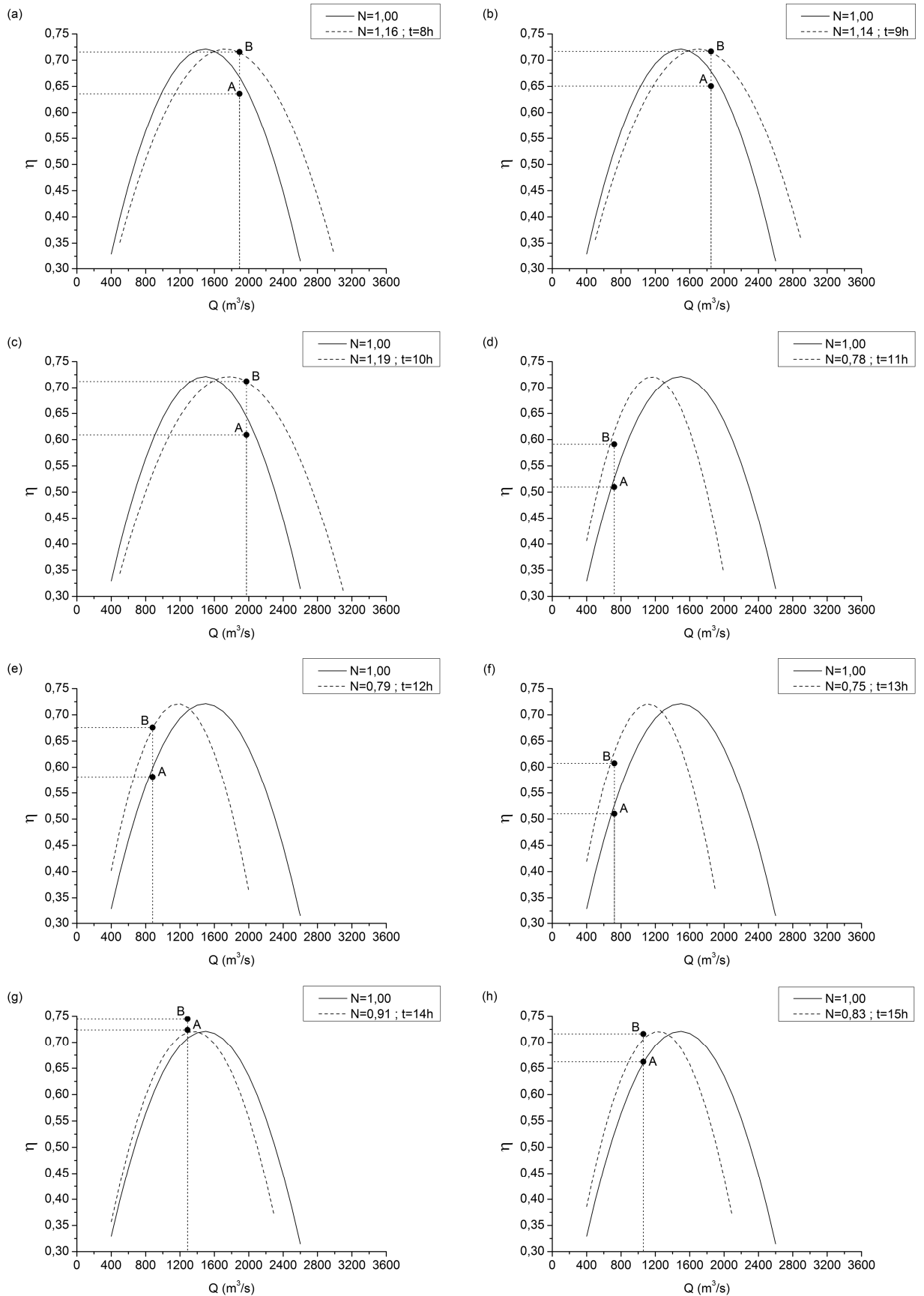
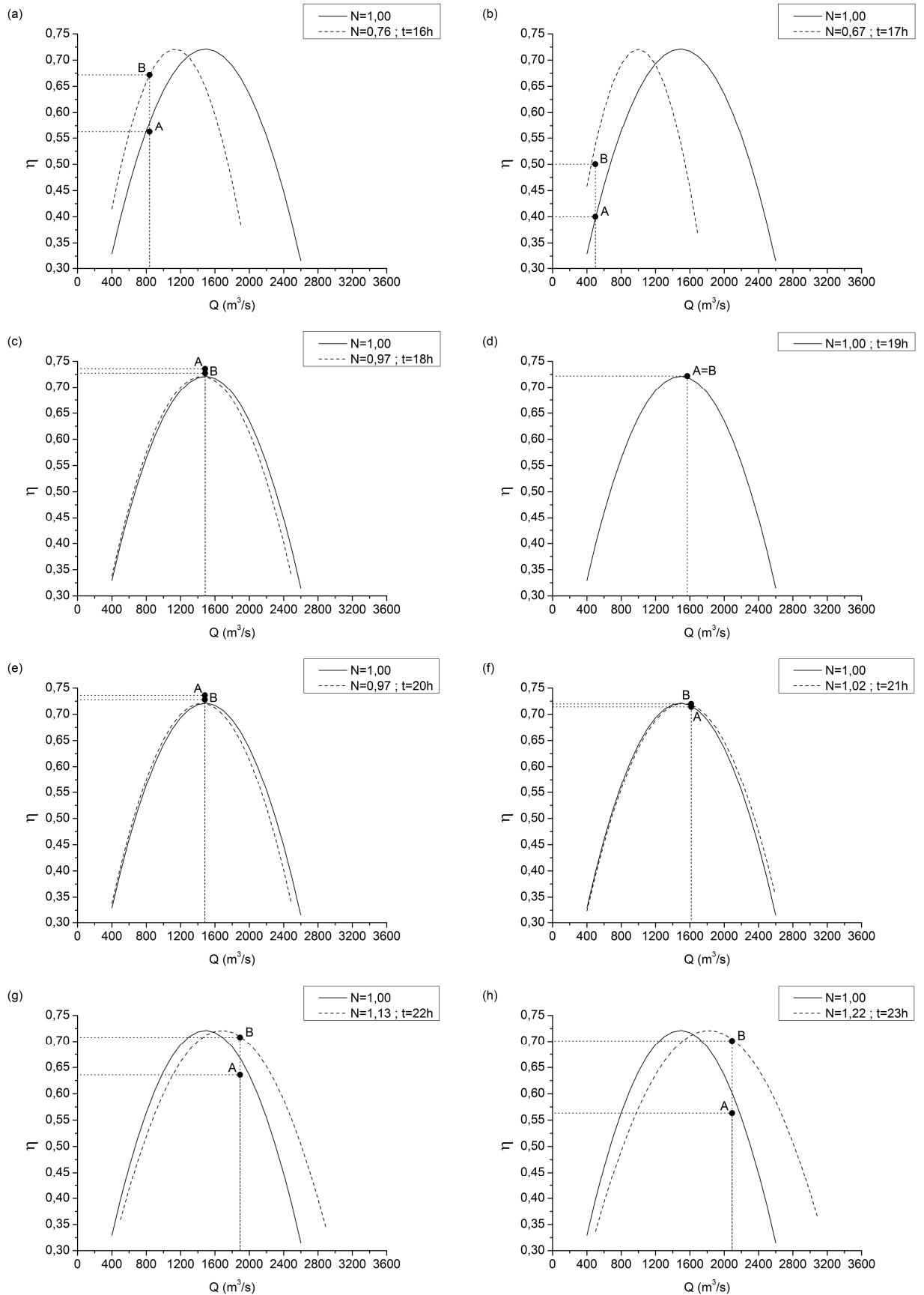


Figura 4.15 - Curvas teóricas  $\eta \cdot Q$  e eficiências previstas pelo EPANET 2, versões original (A) e modificada (B), para a bomba 36 (de 16 às 23h).



As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os dados utilizados pelo EPANET 2, versões original e modificado, na previsão da eficiência das bombas da rede em estudo, assim como o erro relativo entre as eficiências estimadas pelo simulador hidráulico original e as previstas pelo simulador modificado, tomando-se estas últimas por verdadeiras, já que foram obtidas pela fórmula de Sârbu e Borza (1998).

Tabela 4.1 – Comparação de dados e previsão do fator de correção da eficiência para a bomba 35.

| Tempo<br>(h) | $\eta_1$ | $N_2/N_1$ | $\eta_2$           |                      | $\eta_2/\eta_1$    |                      | Erro<br>relativo<br>(%) |
|--------------|----------|-----------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
|              |          |           | Epanet<br>original | Epanet<br>modificado | Epanet<br>original | Epanet<br>modificado |                         |
| 0            | 0,6654   | 1,36      | 0,4473             | 0,6755               | 0,6723             | 1,0152               | -33,78                  |
| 1            | 0,6902   | 1,20      | 0,5924             | 0,6958               | 0,8582             | 1,0081               | -14,87                  |
| 2            | 0,6876   | 1,22      | 0,5758             | 0,6937               | 0,8374             | 1,0089               | -17,00                  |
| 3            | 0,7363   | 1,00      | 0,7363             | 0,7363               | 1,0000             | 1,0000               | 0,00                    |
| 4            | 0,6828   | 1,29      | 0,5250             | 0,6908               | 0,7688             | 1,0117               | -24,00                  |
| 5            | 0,6939   | 1,22      | 0,5874             | 0,7000               | 0,8465             | 1,0087               | -16,08                  |
| 6            | 0,6654   | 1,38      | 0,4349             | 0,6760               | 0,6536             | 1,0160               | -35,67                  |
| 7            | 0,7311   | 1,01      | 0,7276             | 0,7314               | 0,9952             | 1,0004               | -0,52                   |
| 8            | 0,6689   | 1,34      | 0,4669             | 0,6784               | 0,6981             | 1,0142               | -31,17                  |
| 9            | 0,7185   | 1,05      | 0,7003             | 0,7199               | 0,9747             | 1,0020               | -2,72                   |
| 10           | 0,6939   | 1,16      | 0,6224             | 0,6984               | 0,8970             | 1,0065               | -10,88                  |
| 11           | 0,6200   | 0,80      | 0,5740             | 0,6114               | 0,9258             | 0,9862               | -6,12                   |
| 12           | 0,4239   | 0,74      | 0,4047             | 0,4062               | 0,9546             | 0,9583               | -0,39                   |
| 13           | 0,7044   | 0,82      | 0,6568             | 0,6984               | 0,9324             | 0,9915               | -5,97                   |
| 14           | 0,7173   | 0,84      | 0,6768             | 0,7124               | 0,9435             | 0,9931               | -5,00                   |
| 15           | 0,7186   | 0,83      | 0,6752             | 0,7133               | 0,9396             | 0,9926               | -5,34                   |
| 16           | 0,7479   | 0,88      | 0,7181             | 0,7446               | 0,9602             | 0,9956               | -3,56                   |
| 17           | 0,7306   | 0,82      | 0,6854             | 0,7252               | 0,9382             | 0,9926               | -5,48                   |
| 18           | 0,6941   | 1,08      | 0,6629             | 0,6964               | 0,9551             | 1,0034               | -4,81                   |
| 19           | 0,7321   | 0,94      | 0,7476             | 0,7305               | 1,0212             | 0,9978               | 2,34                    |
| 20           | 0,6946   | 1,08      | 0,6635             | 0,6969               | 0,9552             | 1,0034               | -4,80                   |
| 21           | 0,7141   | 1,00      | 0,7141             | 0,7141               | 1,0000             | 1,0000               | 0,00                    |
| 22           | 0,7159   | 1,00      | 0,7159             | 0,7159               | 1,0000             | 1,0000               | 0,00                    |
| 23           | 0,6625   | 1,35      | 0,4477             | 0,6724               | 0,6758             | 1,0150               | -33,42                  |

Tabela 4.2 – Comparação de dados e previsão do fator de correção da eficiência para a bomba 36.

| Tempo (h) | $\eta_1$ | $N_2/N_1$ | $\eta_2$        |                   | $\eta_2/\eta_1$ |                   | Erro relativo (%) |
|-----------|----------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
|           |          |           | Epanet original | Epanet modificado | Epanet original | Epanet modificado |                   |
| 0         | 0,7364   | 1,00      | 0,7364          | 0,7364            | 1,0001          | 1,0001            | 0,00              |
| 1         | 0,6912   | 1,32      | 0,4884          | 0,6996            | 0,7066          | 1,0122            | -30,19            |
| 2         | 0,7041   | 1,24      | 0,5689          | 0,7104            | 0,8080          | 1,0089            | -19,91            |
| 3         | 0,7251   | 1,07      | 0,7070          | 0,7270            | 0,9751          | 1,0026            | -2,74             |
| 4         | 0,6880   | 1,39      | 0,4348          | 0,6981            | 0,6320          | 1,0147            | -37,71            |
| 5         | 0,6970   | 1,34      | 0,4840          | 0,7057            | 0,6944          | 1,0126            | -31,42            |
| 6         | 0,6963   | 1,28      | 0,5239          | 0,7037            | 0,7524          | 1,0106            | -25,55            |
| 7         | 0,7040   | 1,21      | 0,5887          | 0,7096            | 0,8363          | 1,0079            | -17,03            |
| 8         | 0,7114   | 1,16      | 0,6358          | 0,7157            | 0,8938          | 1,0060            | -11,16            |
| 9         | 0,7131   | 1,14      | 0,6504          | 0,7168            | 0,9121          | 1,0052            | -9,26             |
| 10        | 0,7070   | 1,19      | 0,6090          | 0,7121            | 0,8614          | 1,0072            | -14,47            |
| 11        | 0,6012   | 0,78      | 0,5096          | 0,5912            | 0,8477          | 0,9833            | -13,79            |
| 12        | 0,6834   | 0,79      | 0,5813          | 0,6759            | 0,8506          | 0,9890            | -14,00            |
| 13        | 0,6187   | 0,75      | 0,5102          | 0,6075            | 0,8247          | 0,9819            | -16,01            |
| 14        | 0,7474   | 0,91      | 0,7239          | 0,7450            | 0,9686          | 0,9968            | -2,83             |
| 15        | 0,7215   | 0,83      | 0,6623          | 0,7163            | 0,9179          | 0,9927            | -7,54             |
| 16        | 0,6807   | 0,76      | 0,5623          | 0,6719            | 0,8260          | 0,9870            | -16,31            |
| 17        | 0,5198   | 0,67      | 0,4000          | 0,5002            | 0,7695          | 0,9622            | -20,03            |
| 18        | 0,7281   | 0,97      | 0,7358          | 0,7273            | 1,0105          | 0,9989            | 1,17              |
| 19        | 0,7218   | 1,00      | 0,7218          | 0,7218            | 1,0000          | 1,0000            | 0,00              |
| 20        | 0,7287   | 0,97      | 0,7363          | 0,7278            | 1,0104          | 0,9988            | 1,16              |
| 21        | 0,7193   | 1,02      | 0,7140          | 0,7198            | 0,9926          | 1,0007            | -0,81             |
| 22        | 0,7042   | 1,13      | 0,6358          | 0,7078            | 0,9029          | 1,0051            | -10,17            |
| 23        | 0,6951   | 1,22      | 0,5632          | 0,7011            | 0,8103          | 1,0086            | -19,67            |

Nota-se, pelas Tabelas 4.1 e 4.2, que o erro relativo da eficiência estimada pelo EPANET 2 original variou de -35,67% ( $t = 6h$ ) a 2,34% ( $t = 19h$ ), para a bomba 35, e de -37,71% ( $t = 4h$ ) a 1,17% ( $t = 18h$ ), para a bomba 36. Erros relativos nulos indicam que não houve variação na velocidade de rotação das bombas nos respectivos intervalos de tempo, ou seja, as bombas operavam na velocidade nominal de rotação. Ressalta-se que nesta condição os simuladores hidráulicos testados operam de modo idêntico, utilizando apenas a curva  $\eta \times Q$ , correspondente à velocidade nominal de rotação, para estimar a eficiência das bombas.

Para a condição de decremento na velocidade de rotação das bombas, o erro relativo da eficiência prevista pelo EPANET 2 original variou de -6,12% ( $t = 11h$ )

a 2,34% (t = 19h), para a bomba 35, e de -20,3% (t = 0h) a 1,17% (t = 18h) para a bomba 36. Já para a condição de incremento na velocidade de rotação das bombas, o erro relativo variou de -35,67% (t = 6h) a -0,52% (t = 7h), para a bomba 35, e de -37,71% (t = 4h) a -0,81% (t = 21h), para a bomba 36. Para ambas as bombas do sistema, os maiores erros relativos foram registrados para condições de aumento na velocidade de rotação.

Os valores do fator de correção  $\eta_2/\eta_1$  estimados pela versão modificada do EPANET 2 variaram de 0,9583 (t = 12h) a 1,0160 (t = 6h), para a bomba 35, e de 0,9622 (t = 17h) a 1,0147 (t = 4h), para a bomba 3. Ou seja, a maior variação entre as eficiências correspondentes às velocidades de rotação atual e nominal foi de -4,17%, para a bomba 35, e de -3,78%, para a bomba 36, sendo ambas registradas em situações de decremento na velocidade de rotação das bombas. Já os valores de  $\eta_2/\eta_1$  previstos pela versão original do EPANET 2 variaram de 0,6536 (t = 6h) a 1,0212 (t = 19h), para a bomba 35, e de 0,6320 (t = 4h) a 1,0105 (t = 18h), para a bomba 36. Ou seja, a maior variação entre as eficiências correspondentes às velocidades de rotação atual e nominal foi de -34,64%, para a bomba 35, e de -36,80%, para a bomba 36, sendo ambas registradas para a situação de incremento na velocidade de rotação das bombas. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam a variação do fator de correção  $\eta_2/\eta_1$  para as bombas do sistema ao longo do ciclo operacional.

Figura 4.16 – Resultados teóricos e simulados de  $\eta_2/\eta_1$  para a bomba 35.

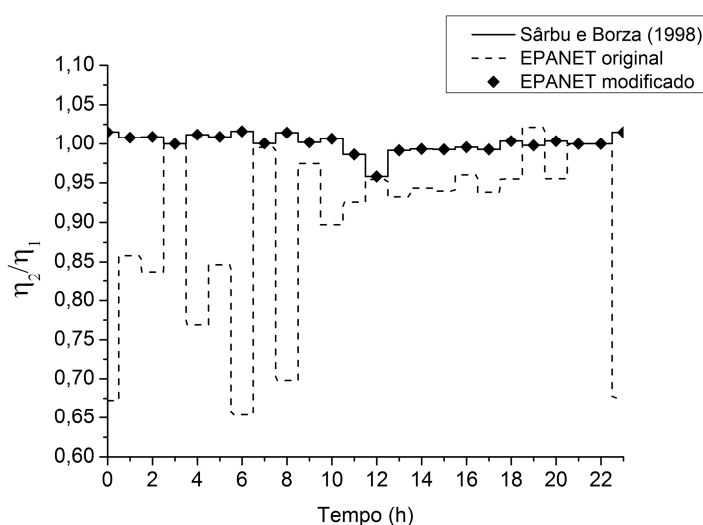
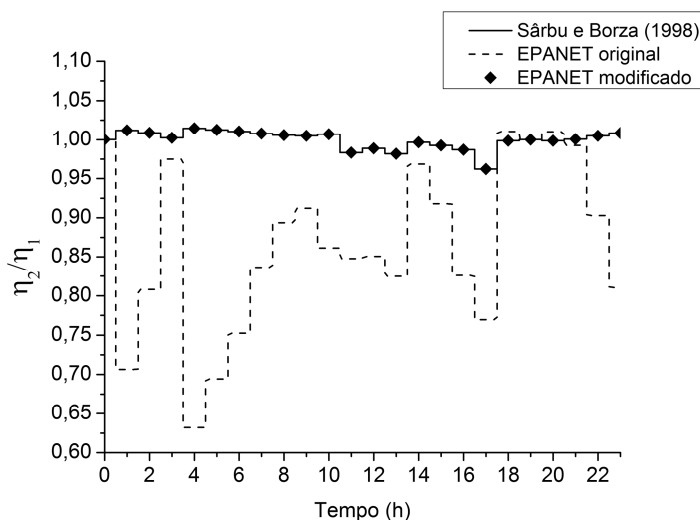


Figura 4.17 – Resultados teóricos e simulados de  $\eta_2/\eta_1$  para a bomba 36.



As Figuras 4.16 e 4.17 mostram que em vários intervalos de tempo os resultados de  $\eta_2/\eta_1$  previstos pelo EPANET 2 original ou assumem valores superiores à unidade, para variações negativas na velocidade de rotação das bombas, ou inferiores à unidade, para variações positivas na velocidade de rotação das bombas, ao contrário do que prevê a fórmula de Sârbu e Borza (1998). Por exemplo, no tempo 19h da bomba 35, foi previsto um fator de correção  $\eta_2/\eta_1$  igual a 1,0212, para uma redução de 6% na velocidade de rotação da bomba e eficiência original ( $\eta_1$ ) igual a 0,7321, quando o resultado esperado era de 0,9978. Já no tempo 4h da bomba 36, foi previsto um  $\eta_2/\eta_1$  igual a 0,6320, para um aumento de 39% na velocidade de rotação da bomba e eficiência original ( $\eta_1$ ) igual a 0,6880, quando o resultado esperado era de 1,0147.

Na determinação da potência de bombas de rotação variável, o simulador hidráulico EPANET 2 não utiliza a relação de semelhança dada pela equação 2.7, cuja aplicação requer o conhecimento da curva característica  $P \times Q$ , e sim a equação 2.4, que requer o conhecimento da eficiência do ponto de operação da bomba. Deste modo a eficiência prevista pelo EPANET 2 tem influência direta no cálculo da potência das bombas do sistema.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam as potências estimadas pelo EPANET 2, versões original e modificada, para as bombas da rede em estudo, quando estas

tem a velocidade de rotação alterada de acordo com os padrões mostrados na Figura 3.3.

Figura 4.18 – Potências horárias estimadas pelo EPANET 2, versão original e modificada, para a bomba 35.

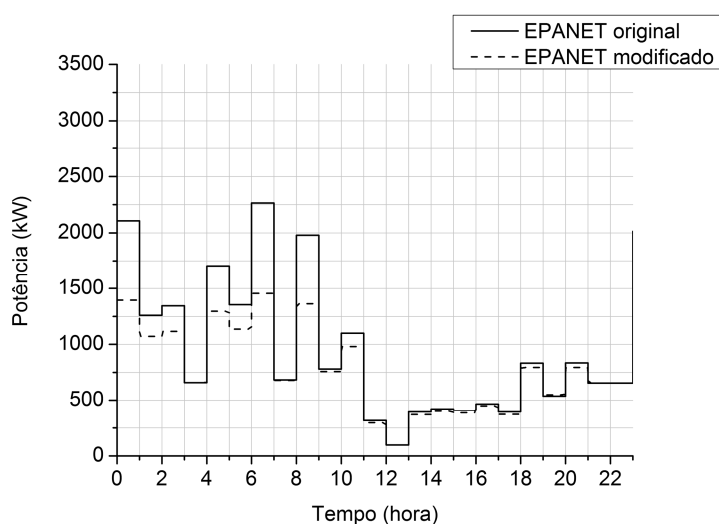
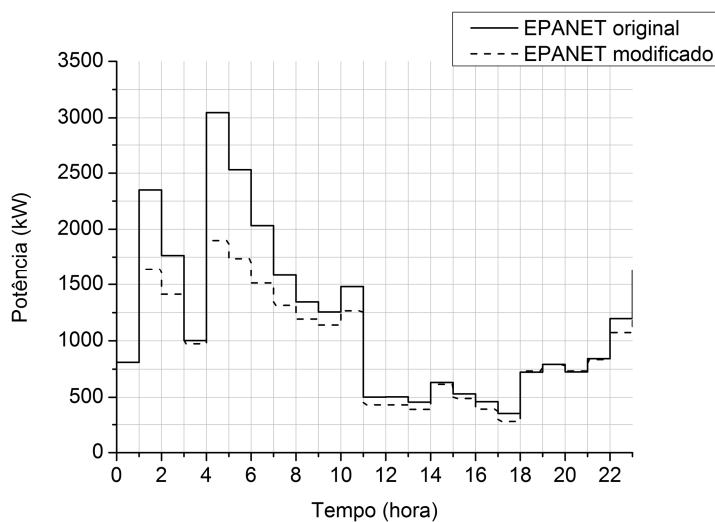


Figura 4.19 – Potências horárias estimadas pelo EPANET 2, versão original e modificada, para a bomba 36.



Observa-se, pelas Figuras 4.18 e 4.19, que as potências previstas pelo EPANET 2 original foram superiores às previstas pelo EPANET 2 modificado, para ambas as bombas e durante a maior parte do ciclo operacional. Houve, entretanto,

intervalos de tempo em que as potências estimadas pelo simulador hidráulico original foram inferiores às previstas pelo simulador modificado.

As potências previstas pelo EPANET 2 original variaram de 96,63 kW (t= 12h) a 2265,14 kW (t = 6h), para a bomba 35, e de 347,51 kW (t = 17h) a 3046,00 kW (t = 4h), para a bomba 36. Já as potências estimadas pelo EPANET 2 modificado variaram de 96,25 kW (t = 12h) a 1457,26 kW (t = 6h), para a bomba 35, e de 277,91 kW (t = 17h) a 1897,21 kW (t = 4 h), para a bomba 36.

A discrepância entre os resultados previstos pelos simuladores hidráulicos para a potência das bombas já era esperada, haja vista que a potência é inversamente proporcional à eficiência das bombas (Eq. 2.4) e esta foi ou subestimada ou superestimada pelo EPANET 2 original em todos os intervalos de tempo em que houve alteração na velocidade de rotação das bombas (Figuras 4.8 e 4.9). Por exemplo, no tempo 6h, a bomba 35 operava com uma vazão igual a 1730,17 m<sup>3</sup>/h, altura manométrica igual a 209,112 m e velocidade de rotação 38% maior do que a nominal, sendo a eficiência do ponto homólogo na velocidade nominal de rotação conhecida e igual a 0,6654. Para esta condição de operação, o EPANET 2 previu uma potência de 2265,14 kW para a bomba 35, enquanto que o valor teórico obtido com a equação 2.4 foi igual a 1455,3 kW, ao se utilizar a fórmula de Sârbu e Borza (1998) (Eq. 2.10), ou igual a 1478,5 kW, ao se utilizar as relações de semelhança (Eq. 2.7 a 2.9). Ressalta-se que Marchi e Simpson (2013) já haviam apontado a possibilidade de resultados subestimados ou superestimados para a potência das bombas, em simulações conduzidas no EPANET 2 original, dependendo das configurações do sistema, o que inclui a posição do ponto de operação na velocidade nominal de rotação e a diferença na vazão provocada pela mudança na velocidade de rotação da bomba.

A Tabela 4.3 apresenta o erro relativo entre a potência prevista pelo EPANET 2 original e a prevista pelo EPANET 2 modificado, considerando o valor desta última como o verdadeiro, para cada intervalo de tempo do ciclo operacional.

Observa-se, pela Tabela 4.3, que o menor erro relativo entre as potências estimadas pelos simuladores hidráulicos considerados foi de 0,39% (t = 12h), para a bomba 35, e de 0,82% (t = 21h), para a bomba 36, sendo registradas nos intervalos de tempo correspondentes às potências mínimas das bombas. Já o maior erro entre

as potências estimadas foi de 55,44% (t = 6h), para a bomba 35, e de 60,55% (t = 4h), para a bomba 36, sendo registradas nos intervalos de tempo correspondentes às potências máximas das bombas. Ressalta-se que diferenças nulas indicam que não houve variação na velocidade de rotação da bomba no respectivo intervalo de tempo.

Tabela 4.3 - Potências estimadas pelo EPANET 2, versões original e modificada.

| Tempo<br>(h) | Potência (kW)<br>Bomba 35 |                      | Erro relativo<br>(%) | Potência (kW)<br>Bomba 36 |                      | Erro relativo<br>(%) |
|--------------|---------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
|              | Epanet<br>original        | Epanet<br>modificado |                      | Epanet<br>original        | Epanet<br>modificado |                      |
|              | 0                         | 2107,01              |                      | 1395,35                   | 51,00                |                      |
| 1            | 1259,10                   | 1071,92              | 17,46                | 2348,87                   | 1639,74              | 43,25                |
| 2            | 1345,56                   | 1116,79              | 20,48                | 1764,95                   | 1413,46              | 24,87                |
| 3            | 658,84                    | 658,84               | 0,00                 | 1001,94                   | 974,47               | 2,82                 |
| 4            | 1705,02                   | 1295,76              | 31,58                | 3046,00                   | 1897,21              | 60,55                |
| 5            | 1355,01                   | 1137,10              | 19,16                | 2529,70                   | 1734,83              | 45,82                |
| 6            | 2265,14                   | 1457,26              | 55,44                | 2032,07                   | 1512,90              | 34,32                |
| 7            | 682,56                    | 679,02               | 0,52                 | 1583,82                   | 1314,13              | 20,52                |
| 8            | 1979,31                   | 1362,27              | 45,29                | 1343,90                   | 1193,98              | 12,56                |
| 9            | 779,66                    | 758,43               | 2,80                 | 1256,53                   | 1140,20              | 10,20                |
| 10           | 1099,19                   | 979,59               | 12,21                | 1481,25                   | 1266,90              | 16,92                |
| 11           | 315,22                    | 295,93               | 6,52                 | 502,82                    | 433,48               | 16,00                |
| 12           | 96,63                     | 96,25                | 0,39                 | 504,50                    | 433,89               | 16,27                |
| 13           | 392,26                    | 368,86               | 6,34                 | 457,77                    | 384,46               | 19,07                |
| 14           | 420,56                    | 399,54               | 5,26                 | 632,89                    | 615,00               | 2,91                 |
| 15           | 407,48                    | 385,74               | 5,64                 | 530,62                    | 490,63               | 8,15                 |
| 16           | 465,60                    | 449,03               | 3,69                 | 462,47                    | 387,05               | 19,49                |
| 17           | 392,96                    | 371,43               | 5,80                 | 347,51                    | 277,91               | 25,04                |
| 18           | 833,40                    | 793,33               | 5,05                 | 724,05                    | 732,50               | -1,15                |
| 19           | 536,27                    | 548,83               | -2,29                | 792,14                    | 792,14               | 0,00                 |
| 20           | 834,36                    | 794,32               | 5,04                 | 724,72                    | 733,15               | -1,15                |
| 21           | 653,90                    | 653,90               | 0,00                 | 841,73                    | 834,91               | 0,82                 |
| 22           | 655,01                    | 655,01               | 0,00                 | 1196,04                   | 1074,45              | 11,32                |
| 23           | 2014,31                   | 1341,18              | 50,19                | 1630,11                   | 1309,52              | 24,48                |

A energia consumida pelas bombas do sistema, ao longo do ciclo operacional de 24 horas, é dada pelo somatório das potências horárias. Assim, considerando-se as potências previstas pelo EPANET 2 original, a energia consumida pelo sistema foi igual 51800,67 kWh, sendo 23254,37 kWh pela bomba

35 e 28546,30 kWh pela bomba 36. Levando-se em conta as potências previstas pelo EPANET 2 modificado, a energia consumida pelo sistema foi igual a 42462,48 kWh, sendo 19065,67 kWh pela bomba 35 e 23396,81 kWh pela bomba 36. Ou seja, no exemplo em tela, o consumo de energia previsto pelo simulador hidráulico original para a bomba 35, bomba 36 e para o sistema como um todo foi, respectivamente, 21,97%, 22,01% e 21,99% maior que o previsto pelo simulador modificado.

O Quadro 4.2 apresenta as informações, quanto ao consumo de energia, contidas no relatório gerado pelo EPANET 2, versões original e modificada, ao final das simulações dinâmicas realizadas com a rede *Anytown*, para condições de bombeamento com eficiência variável. As informações relacionadas ao custo da energia do bombeamento foram omitidas por este não ter sido contemplado nesta pesquisa.

Quadro 4.2 – Dados de consumo de energia da rede *Anytown*, para condições de bombeamento com eficiência variável.

|                             | EPANET 2 Original |          | EPANET 2 Modificado |          |
|-----------------------------|-------------------|----------|---------------------|----------|
|                             | Bomba 35          | Bomba 36 | Bomba 35            | Bomba 36 |
| <b>Utilização (%)</b>       | 100,00            | 100,00   | 100,00              | 100,00   |
| <b>Eficiência Média (%)</b> | 61,51             | 60,35    | 68,91               | 69,38    |
| <b>kWh/m<sup>3</sup></b>    | 0,79              | 0,70     | 0,68                | 0,59     |
| <b>Potência Média (kW)</b>  | 969,02            | 1189,36  | 794,45              | 974,69   |
| <b>Potência Máxima (kW)</b> | 2265,14           | 3046,10  | 1457,26             | 1897,21  |

Pelo Quadro 4.2, observa-se que ambas as bombas permaneceram em funcionamento durante todo o ciclo operacional. Para ambas as bombas, a eficiência média prevista pelo EPANET 2 original foi inferior à prevista pelo EPANET 2 modificado, o que pode ser explicado pelo fato daquele ter subestimado a eficiência das bombas durante a maior parte do ciclo operacional. Como os demais parâmetros são inversamente proporcionais à eficiência, os valores destes foram superestimados pelo EPANET 2 original.

O erro relativo entre as eficiências médias estimadas pelo EPANET 2, versões original e modificada, foi igual a 10,74%, para a bomba 35, e igual a 13,02%, para a bomba 36. Quanto às energias consumidas por unidade de vazão ( $\text{kWh/m}^3$ ) previstas, o erro relativo foi igual a 16,18%, para a bomba 35, e igual a 18,64%, para a bomba 36. Em relação às potências médias estimadas, o erro relativo foi igual a 21,97%, para a bomba 35, e igual a 22,02%, para a bomba 36. No tocante às potências máximas previstas, o erro relativo foi igual a 55,44%, para a bomba 35, e igual a 60,56%, para a bomba 36.

## 5 CONCLUSÃO

O simulador hidráulico EPANET 2 não leva em conta a mudança na curva eficiência versus vazão da bomba quando esta tem sua velocidade de rotação alterada e, deste modo, prevê valores incorretos para a eficiência, potência e consumo de energia de bombas de rotação variável.

No presente trabalho, uma rotina baseada na fórmula de Sârbu e Borza (1998) é implementada no código-fonte do EPANET 2 para a correção da eficiência de bombas de rotação variável. A influência desta intervenção nos resultados previstos pelo programa é avaliada em simulações dinâmicas, em período estendido, realizadas com uma rede hipotética de referência.

A rotina é acionada somente se informado, como dado de entrada do modelo, a curva eficiência versus vazão das bombas na velocidade de rotação nominal. Caso contrário, o programa adota uma eficiência constante para as bombas e os resultados previstos pelo simulador hidráulico modificado devem ser iguais aos previstos pelo simulador original para as variáveis de estado de todos os elementos do sistema. Assim, para a verificação da rotina foram necessárias simulações para condições de bombeamento sob eficiência constante e sob eficiência variável.

Nas simulações para condição de bombeamento sob eficiência constante, os resultados previstos pela versão modificada do EPANET 2 foram iguais aos previstos pela versão original para todas as variáveis de estado e estatística de uso de energia analisadas. Por sua vez, nas simulações com bombeamento sob eficiência variável, os resultados de eficiência previstos pela versão modificada do simulador hidráulico mostraram-se coerentes com os valores teóricos esperados. Demonstrou-se, portanto, que a rotina foi acionada apenas nas simulações em que as bombas operavam sob eficiência variável e que as intervenções realizadas no código-fonte não afetaram o funcionamento do algoritmo de análise hidráulica original para bombeamentos sob eficiência constante.

Para a condição de bombeamento sob eficiência variável, o EPANET 2 original ou subestimou ou superestimou a eficiência das bombas, com predomínio dos valores subestimados. Os maiores erros relativos de eficiência foram registrados para a condição de aumento na velocidade de rotação das bombas. Como a

eficiência é inversamente proporcional à potência, esta foi superestimada pelo simulador hidráulico original na maior parte do ciclo operacional, chegando a alcançar erros relativos superiores a 50% em ambas as bombas.

O consumo de energia do sistema previsto pela versão original do EPANET 2 foi 21,99% maior que o previsto pela versão modificada. Tal discrepância aponta que o uso do EPANET 2 como ferramenta de apoio à avaliação econômica de projetos de implantação e/ou de intervenção em sistemas de transmissão de água com bombas de rotação variável pode superestimar o consumo de energia, com reflexos nos custos do projeto. Por outro lado, a versão modificada do EPANET 2 apresentada neste trabalho constitui uma alternativa mais apropriada para a avaliação preliminar de projetos desta natureza, já que representa de forma mais acurada o comportamento de bombas de rotação variável.

Por fim, recomenda-se a investigação dos limites de aplicação da fórmula de Sârbu e Borza para bombas de rotação variável, considerando aspectos como o intervalo de variação da velocidade de rotação e características geométricas da bomba. Sugere-se ainda a aplicação da versão modificada do EPANET 2 em estudos comparativos de otimização da operação de sistemas de distribuição de água equipados com bombas de rotação variável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJO, L. F. R. S; LUVIZOTTO JR., E.; VENÂNCIO, S. S. Modelo dinâmico inercial rígido para escoamento transitório lento em sistemas de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, Porto Alegre abr./jun. 2015, p. 533 – 542.

ARAÚJO, F. F. V.; CASTRO, M. A. H.; RIGHETTO, A. M. Modelo Hidráulico Baseado no Método das Características: Análise de Convergência e Comparações com o EPANET. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.15, n.3, Jul/Set 2010, p. 05-19.

BARBOSA, P.S.F.; COSTA, A. A.; SANTOS Jr., J.B.S. Um algoritmo de programação linear para análise de redes hidráulicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 4, p. 75-84, 1999.

BERARDI, Luigi; GIUSTOLISI, Orazio; TODINI, Ezio. Accounting for uniformly distributed pipe demand in WDN analysis: enhanced GGA. **Urban Water Journal**, v. 7, n. 4, p. 243-255, 2010.

BERNIER, Michel A.; BOURRET, Bernard. Pumping energy and variable frequency drives. **ASHRAE journal**, v. 41, n. 12, p. 37-40, 1999.

CARLSON, S.; WALBURGER. A. **Energy index development for benchmarking water and wastewater utilities**. AWWA Research Foundation, Denver, 2007.

CARRIJO, Ivaltemir Barros. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

CHEUNG, Peter Batista. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CROSS, Hardy. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. **University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 286**, 1936.

FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. Modelos de análise hidráulica de redes de distribuição de água considerando demanda dirigida pela pressão e vazamentos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 153-162, 2008.

GIACOMELLO, C.; KAPELAN, Z.; NICOLINI, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 2, p. 175-183, 2013.

GIUSTOLISI, O. et al. Computationally efficient modeling method for large water network analysis. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 4, p. 313-326, 2012.

GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D. Water distribution network pressure-driven analysis using the enhanced global gradient algorithm (EGGA). **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 6, p. 498-510, 2011.

GIUSTOLISI, O.; LAUCELLI, D.; BERARDI, L. Operational optimization: Water losses versus energy costs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 4, p. 410-423, 2013.

GIUSTOLISI, O.; TODINI, E. Pipe hydraulic resistance correction in WDN analysis. **Urban Water Journal**, v. 6, n. 1, p. 39-52, 2009.

GULICH, J. F. Effect of Reynolds number and surface roughness on the efficiency of centrifugal pumps. **Journal of fluids engineering**, v. 125, n. 4, p. 670-679, 2003.

IBARRA, D.; ARNAL, J. Parallel Programming Techniques Applied to Water Pump Scheduling Problems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2014.

ISAACS, Lewis T.; MILLS, Kevin G. Linear theory methods for pipe network analysis. **Journal of the hydraulics division**, v. 106, n. 7, p. 1191-1201, 1980.

JOLLY, M. D. *et al.* Research database of water distribution system models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 4, p. 410-416, 2014.

KUREK, W.; OSTFELD, A. Multiobjective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 2, p. 184-193, 2014.

LIU, F. *et al.* **A Primer on Energy Efficiency for Municipal Water and Wastewater Utilities**. World Bank. Washinton, DC. 2012. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.com/handle/10986/18060>>. Acessado em: 30/06/2014.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R. Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 4, p. 456-459, 2013.

MARCHI, A.; SIMPSON, A. R; ERTUGRUL, N. Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems. **Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 15-21, 2012.

MORTON, W. R. Economics of AC adjustable speed drives on pumps. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 3, n. IA-11, p. 282-286, 1975.

NIELSEN, H. B. Methods for analyzing pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1989.

OSTERWALDER, J. Efficiency scale-up for hydraulic turbo-machines with due consideration of surface roughness. **Journal of Hydraulic Research**, v. 16, n. 1, p. 55-76, 1978.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª Ed. São Carlos, SP: EESC-USP, 2006.

RIGHETTO, A. M. **Cálculo hidráulico de rede de distribuição de água a partir de condições transitórias: adequação e estudo de casos**. 1994. Tese de Livre Docência–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 users manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000a.

ROSSMAN, L. A. **EPANET programmer's Toolkit Manual**. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, 2000b.

SÁ MARQUES, J. A. A.; SOUSA, J. J. O. **Hidráulica urbana: Sistema de abastecimento de água**. 1ª Reedição. Coimbra. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2007. p. 311-313.

SÂRBU, I.; BORZA, I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems. **Mechanical Engineering**, v. 42, n. 2, p. 141-152, 1998.

SHAMIR, Uri Y.; HOWARD, Charles DD. Water distribution systems analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 94, n. 1, p. 219-234, 1968.

SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1314-1317, 2013.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2013**. Brasília: SNSA/MCIDADES, DF, 2014.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. Modelo híbrido MOC-EPANET para análise hidráulica de sistemas de distribuição de água – parte 1: estado da arte e equacionamento. **Revista Minerva**, São Carlos, 5(3): p. 277-286, 2008a.

SOARES, A. K.; REIS, L. F. Modelo híbrido MOC-EPANET para análise hidráulica de sistemas de distribuição de água – parte 2: simulações numéricas. **Revista Minerva**, São Carlos, 5(3): p. 287-295, 2008b.

SOUZA, R. S. **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente**. São Carlos. 236 p. 1994. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: **Computer applications in water supply: vol. 1---systems analysis and simulation**. Research Studies Press Ltd., 1988. p. 1-20.

WALSKI, T. M. Don't forget energy cost when selecting pumps. In: **ACE2001–2001 Annual Conference Proceedings**. 2001. p. 1-16.

WALSKI, T. M. et al. Battle of the network models: Epilogue. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 113, n. 2, p. 191-203, 1987.

WALSKI, T. M. et al. Some surprises in estimating the efficiency of variable speed pumps with the pump affinity laws. In: **Proc. World Water and Environmental Resources Congress 2003**. 2003. p. 1-10.

WOOD, D. J.; CHARLES, C. O. A. Hydraulic network analysis using linear theory. **Journal of the Hydraulics division**, v. 98, n. 7, p. 1157-1170, 1972.

WOOD, Don J.; REDDY, L. S. Using variable speed pumps to reduce leakage and improve performance. In: **Improving efficiency and reliability in water distribution systems**. Springer Netherlands, 1995. p. 135-163.

WU, W. et al. Incorporation of variable-speed pumping in multiobjective genetic algorithm optimization of the design of water transmission systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 5, p. 543-552, 2012.

## APÊNDICE A – Construção do epanet2.dll no Borland C++ Builder 6.0.

Para a construção do arquivo epanet2.dll no compilador Borland C++ Builder 6.0 (BCB), sugere-se a adoção do seguinte procedimento:

- i. Acesse o diretório que contém o código-fonte do EPANET 2 e exclua todos os arquivos que não possuem a extensão \*.c ou \*.h;
- ii. Inicialize o BCB e crie o projeto de uma nova DLL clicando em File, New, Other, DLL Wizard. Marque as opções C e VC++ Style DLL e clique em OK;
- iii. Remova o arquivo \*.c criado automaticamente acessando a aba Project, Remove from Project;
- iv. Salve o projeto como epanet2.bpr no diretório que contém o código-fonte do EPANET 2, clicando em File, Save Project As;
- v. Adicione ao projeto o arquivo epanet.c clicando na aba Project, Add to Project e tente rodá-lo (sem sucesso) clicando na aba Run, comando Run (F9);
- vi. Adicione todos os arquivos \*.c do código-fonte do EPANET 2 ao projeto clicando na aba Project, Add to Project;
- vii. Execute o comando make (Ctrl+F9) clicando em Project, Make epanet2.

Ao final do processo são criados os arquivos epanet2.dll e epanet2.lib. Estes e o arquivo epanet2.h são necessários para a compilação do EPANET2 versão *Toolkit* em ambiente BCB.

A utilização da toolkit a partir da DLL criada no BCB requer as seguintes modificações no arquivo epanet2.h:

- i. Substituir o trecho de código:

```
// --- define WINDOWS
#undef WINDOWS
#ifdef _WIN32
    #define WINDOWS
#endif
#ifdef __WIN32__
    #define WINDOWS
```

```

#endif

// --- define DLLEXPORT
#ifndef WINDOWS
    #ifdef __cplusplus
        #define DLLEXPORT extern "C" __declspec(dllexport) __stdcall
    #else
        #define DLLEXPORT __declspec(dllexport) __stdcall
    #endif
    #else
        #ifdef __cplusplus
            #define DLLEXPORT extern "C"
        #else
            #define DLLEXPORT
        #endif
    #endif
#endif

```

Por:

```

#ifdef __cplusplus
#define EXTERN extern "C"
#else
#define EXTERN extern
#endif
#define CALLTYPE __cdecl

```

- ii. Incluir a palavra Extern antes das funções e substituir a palavra DLLEXPORT por CALLTYPE:

```

// --- declare the EPANET toolkit functions

EXTERN int CALLTYPE ENepanet(char *, char *, char *, void (*) (char *));
EXTERN int CALLTYPE ENopen(char *, char *, char *);
EXTERN int CALLTYPE ENSaveinpfile(char *);
EXTERN int CALLTYPE ENclose(void);

EXTERN int CALLTYPE ENSolveH(void);
EXTERN int CALLTYPE ENSaveH(void);

```

```
EXTERN int CALLTYPE ENopenH(void);
EXTERN int CALLTYPE ENinitH(int);
EXTERN int CALLTYPE ENrunH(long *);
EXTERN int CALLTYPE ENnextH(long *);
EXTERN int CALLTYPE ENcloseH(void);
EXTERN int CALLTYPE ENsavehydfile(char *);
EXTERN int CALLTYPE ENusehydfile(char *);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENSolveQ(void);
EXTERN int CALLTYPE ENopenQ(void);
EXTERN int CALLTYPE ENinitQ(int);
EXTERN int CALLTYPE ENrunQ(long *);
EXTERN int CALLTYPE ENnextQ(long *);
EXTERN int CALLTYPE ENstepQ(long *);
EXTERN int CALLTYPE ENcloseQ(void);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENwriteline(char *);
EXTERN int CALLTYPE ENreport(void);
EXTERN int CALLTYPE ENresetreport(void);
EXTERN int CALLTYPE ENsetreport(char *);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENgetcontrol(int, int *, int *, float *, int *, float *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetcount(int, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetoption(int, float *);
EXTERN int CALLTYPE ENgettimeparam(int, long *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetflowunits(int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetpatternindex(char *, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetpatternid(int, char *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetpatternlen(int, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetpatternvalue(int, int, float *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetqualitytype(int *, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgeterror(int, char *, int);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENgetnodeindex(char *, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetnodeid(int, char *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetnodetype(int, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetnodevalue(int, int, float *);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENgetlinkindex(char *, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetlinkid(int, char *);
```

```
EXTERN int CALLTYPE ENgetlinktype(int, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetlinknodes(int, int *, int *);
EXTERN int CALLTYPE ENgetlinkvalue(int, int, float *);

EXTERN int CALLTYPE ENgetversion(int *);

EXTERN int CALLTYPE ENsetcontrol(int, int, int, float, int, float);
EXTERN int CALLTYPE ENsetnodevalue(int, int, float);
EXTERN int CALLTYPE ENsetlinkvalue(int, int, float);
EXTERN int CALLTYPE ENaddpattern(char *);
EXTERN int CALLTYPE ENsetpattern(int, float *, int);
EXTERN int CALLTYPE ENsetpatternvalue(int, int, float);
EXTERN int CALLTYPE ENsettimeparam(int, long);
EXTERN int CALLTYPE ENsetoption(int, float);
EXTERN int CALLTYPE ENsetstatusreport(int);
EXTERN int CALLTYPE ENsetqualitytype(int, char *, char *, char *);

#endif
```

## APÊNDICE B – Arquivo rede.inp.

[TITLE]

[JUNCTIONS]

| ;ID | Elev   | Demand | Pattern |
|-----|--------|--------|---------|
| 2   | 140.00 | 400.00 | 1 ;     |
| 3   | 155.00 | 300.00 | 1 ;     |
| 4   | 160.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 5   | 120.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 6   | 130.00 | 500.00 | 1 ;     |
| 7   | 130.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 8   | 130.00 | 300.00 | 1 ;     |
| 9   | 140.00 | 300.00 | 1 ;     |
| 10  | 150.00 | 400.00 | 1 ;     |
| 11  | 110.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 12  | 100.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 13  | 120.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 14  | 145.00 | 200.00 | 1 ;     |
| 15  | 130.00 | 300.00 | 1 ;     |
| 16  | 65.00  | 0.00   | 1 ;     |
| 17  | 85.00  | 0.00   | 1 ;     |

[RESERVOIRS]

| ;ID | Head  | Pattern |
|-----|-------|---------|
| 18  | 60.00 | ;       |
| 19  | 80.00 | ;       |

[TANKS]

| ;ID | Elevation | InitLevel | MinLevel | MaxLevel | Diameter | MinVol |
|-----|-----------|-----------|----------|----------|----------|--------|
| 20  | 180.00    | 10.00     | 0.00     | 40.00    | 35.68    | 0.00;  |

[PIPES]

| ;ID | Node1 | Node2 | Length  | Diameter | Roughness | MinorLoss | Status |
|-----|-------|-------|---------|----------|-----------|-----------|--------|
| 1   | 17    | 6     | 3000.00 | 508.00   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 2   | 17    | 2     | 3000.00 | 76.20    | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 3   | 17    | 10    | 3000.00 | 101.60   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 4   | 2     | 6     | 1000.00 | 50.80    | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 5   | 6     | 9     | 1000.00 | 406.40   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 6   | 6     | 8     | 1000.00 | 203.20   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 7   | 6     | 5     | 1000.00 | 457.20   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 8   | 8     | 5     | 1000.00 | 254.00   | 130.00    | 0.00      | Open;  |
| 9   | 5     | 7     | 1000.00 | 457.20   | 130.00    | 0.00      | Open;  |



;Padrão de variação da velocidade de rotação da bomba 35

|   |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 2 | 1.36 | 1.20 | 1.22 | 1.00 | 1.29 | 1.22 |
| 2 | 1.38 | 1.01 | 1.34 | 1.05 | 1.16 | 0.80 |
| 2 | 0.74 | 0.82 | 0.84 | 0.83 | 0.88 | 0.82 |
| 2 | 1.08 | 0.94 | 1.08 | 1.00 | 1.00 | 1.35 |

;Padrão de variação da velocidade de rotação da bomba 36

|   |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 3 | 1.00 | 1.32 | 1.24 | 1.07 | 1.39 | 1.34 |
| 3 | 1.28 | 1.21 | 1.16 | 1.14 | 1.19 | 0.78 |
| 3 | 0.79 | 0.75 | 0.91 | 0.83 | 0.76 | 0.67 |
| 3 | 0.97 | 1.00 | 0.97 | 1.02 | 1.13 | 1.22 |

[CURVES]

;ID X-Value Y-Value

;HxQ da bomba 35

|   |      |     |
|---|------|-----|
| 1 | 0    | 240 |
| 1 | 1000 | 180 |
| 1 | 1400 | 50  |

;HxQ da bomba 36

|   |      |     |
|---|------|-----|
| 2 | 0    | 250 |
| 2 | 1400 | 160 |
| 2 | 2000 | 50  |

;Curva de eficiência da bomba 35

|   |      |    |
|---|------|----|
| 3 | 100  | 40 |
| 3 | 500  | 60 |
| 3 | 800  | 70 |
| 3 | 1000 | 75 |
| 3 | 1300 | 65 |
| 3 | 1800 | 40 |

;Curva de eficiência da bomba 36

|   |      |    |
|---|------|----|
| 4 | 500  | 40 |
| 4 | 700  | 50 |
| 4 | 1100 | 68 |
| 4 | 1400 | 75 |
| 4 | 1700 | 70 |
| 4 | 2000 | 60 |
| 4 | 2500 | 40 |

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency 75.00

Global Price 0

|                    |                |
|--------------------|----------------|
| Demand Charge      | 0.0000         |
| PUMP 35            | EFFIC 3        |
| PUMP 36            | EFFIC 4        |
| [EMITTERS]         |                |
| [QUALITY]          |                |
| [SOURCES]          |                |
| [REACTIONS]        |                |
| [MIXING]           |                |
| [TIMES]            |                |
| Duration           | 96:00          |
| Hydraulic Timestep | 1:00           |
| Quality Timestep   | 0:05           |
| Pattern Timestep   | 1:00           |
| Pattern Start      | 0:00           |
| Report Timestep    | 1:00           |
| Report Start       | 72:00          |
| Start ClockTime    | 0:00           |
| Statistic          | NONE           |
| [REPORT]           |                |
| Pagesize           | 0              |
| File               | Resultados.rpt |
| Status             | Yes            |
| Summary            | Yes            |
| Messages           | Yes            |
| Energy             | Yes            |
| Nodes              | 20             |
| Links              | 35 36          |
| Setting            | Yes            |
| [OPTIONS]          |                |
| Units              | CMH            |
| Headloss           | H-W            |
| Specific Gravity   | 1.0000         |
| Viscosity          | 1.0000         |
| Trials             | 40             |
| Accuracy           | 0.00100000     |
| CHECKFREQ          | 2              |
| MAXCHECK           | 10             |
| DAMPLIMIT          | 0              |
| Unbalanced         | Continue 10    |
| Pattern            | 1              |

Demand Multiplier 1.00  
 Emitter Exponent 2.00  
 Quality Chlorine mg/L  
 Diffusivity 1.0000  
 Tolerance 0.01000000

## [COORDINATES]

| ;Node | X-Coord  | Y-Coord |
|-------|----------|---------|
| 2     | 7212.32  | 7504.05 |
| 3     | 7212.32  | 8363.05 |
| 4     | 3727.71  | 8363.05 |
| 5     | 5494.33  | 7504.05 |
| 6     | 5494.33  | 5688.82 |
| 7     | 3500.81  | 7504.05 |
| 8     | 4473.26  | 6482.98 |
| 9     | 3987.03  | 5688.82 |
| 10    | 3743.92  | 4019.45 |
| 11    | 1491.09  | 3371.15 |
| 12    | 583.47   | 4602.92 |
| 13    | 1491.09  | 7504.05 |
| 14    | 2982.17  | 6482.98 |
| 15    | 1491.09  | 5688.82 |
| 16    | -291.73  | 6564.02 |
| 17    | 7212.32  | 4019.45 |
| 18    | -1717.99 | 6580.23 |
| 19    | 9529.98  | 4019.45 |
| 20    | 3727.71  | 9416.53 |

## [VERTICES]

## [LABELS]

## [BACKDROP]

DIMENSIONS 0.00 0.00 10000.00 10000.00

UNITS None

FILE

OFFSET 0.00 0.00

## [END]