

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Maykon Fernando de Moraes

**SIMULAÇÃO DE VÁLVULAS EM REGIME NÃO PERMANENTE PARA SISTEMAS
DE ABASTECIMENTO**

Uberaba

2017

Maykon Fernando de Moraes

SIMULAÇÃO DE VÁLVULAS EM REGIME NÃO PERMANENTE PARA SISTEMAS
DE ABASTECIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo.

Uberaba

2017

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

M822s Moraes, Maykon Fernando de
Simulação de válvulas em regime não permanente para sistemas
de abastecimento / Maykon Fernando de Moraes. -- 2017.
66 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2017
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo

1. Hidráulica. 2. Válvulas. 3. Software - Testes. 4. EPANET (Pro-
grama de computador). I. Anjo, Luiz Fernando Resende dos Santos.
II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 551.588.7

MAYKON FERNANDO DE MORAES

SIMULAÇÃO DE VÁLVULAS EM REGIME NÃO PERMANENTE PARA SISTEMAS
DE ABASTECIMENTO

Trabalho de conclusão apresentado ao programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para a obtenção do título mestre.

Uberaba, 23 de Fevereiro de 2017

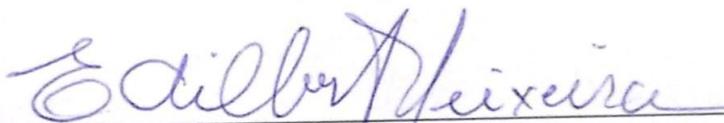
Banca Examinadora



Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo
Orientador – PMPIT - UFTM



Prof. Dr. David Calhau Jorge
Membro Titular – UFTM



Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira
Membro titular – UNIUBE

RESUMO

Este trabalho trata da continuação do trabalho desenvolvido por Anjo (2008) onde foi abordado o modelo dinâmico inercial rígido de maneira semelhante ao método gradiente, modelo este utilizado pelo software EPANET. O presente trabalho fez uma abordagem sobre alguns tipos de válvulas de extrema importância no sistema de abastecimento e a necessidade de uma maior atenção para o dimensionamento do sistema. A partir deste ponto foi investigado o software EPANET e descoberto os parâmetros utilizados em todas as válvulas em manobras de fechamento ou abertura. Foram analisadas outras duas válvulas com funcionamento específico além das manobras citadas, como a válvula de controle de vazão FCV. Ela tem como função controlar a vazão em um determinado valor. A outra válvula analisada é a redutora de pressão PRV, que tem como função principal reduzir a pressão a um valor pré-estabelecido. Após as descobertas dos parâmetros foram aplicados ao modelo dinâmico inercial rígido (MDIR). Foram simuladas diversas situações, como: abertura, fechamento, controle de vazão e pressão. Os resultados apresentados mostraram os transientes gerados quando realizavam a manobra específica, comprovando assim a eficácia na implementação desses parâmetros ao método, sendo agora possível a análise do transiente gerado ao realizar manobras no sistema.

Palavras chaves: EPANET, MDIR, Hidráulico.

ABSTRACT

This work deals with the continuation of the work developed by Anjo (2008), where the inertial dynamic model was approached in a similar way to the gradient method, a model used by EPANET software. The present work made an approach on some types of valves of extreme importance in the system of supply and the need of a greater attention for the sizing of the system. From this point the EPANET software was investigated and the parameters used in all the valves in closing or opening maneuvers were discovered. Two other valves with specific operation were analyzed in addition to the mentioned maneuvers, such as the FCV flow control valve. It has the function of controlling the flow in a certain value. The other valve analyzed is the pressure reducer PRV, whose main function is to reduce the pressure to a pre-set value. After the findings of the parameters were applied to the rigid inertial dynamic model (MDIR). Several situations were simulated, such as: opening, closing, flow control and pressure. The results presented showed the transients generated when performing the specific maneuver, thus proving the efficiency in the implementation of these parameters to the method, being now possible the analysis of the transient generated when carrying out maneuvers in the system.

Key words: EPANET, MDIR, Hydraulic.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. MODELO HIDRÁULICO PARA CONDUTO FORÇADO	14
3.2. MODELO NÃO INERCIAL – (EPANET)	15
3.3. MODELO DINÂMICO INERCIAL RIGIDO NA FORMA MATRICIAL	20
3.4. VÁLVULAS	24
3.4.1. Válvulas de bloqueio	25
3.4.2. Válvulas de regulação	27
3.4.2.1. <i>Válvulas globo</i>	27
3.4.2.2. <i>Válvulas borboleta</i>	28
3.4.3. Válvulas de retenção	30
3.4.4. Válvulas que controlam a pressão	31
3.4.4.1. <i>Válvulas de segurança e de alívio</i>	31
3.4.4.2. <i>Válvulas Redutoras de Pressão</i>	32
3.4.5. Válvulas epanet	32
3.5. PROGRAMA DO MDIR.....	34
4. METODOLOGIA	42
4.1.EQUACIONAMENTO DE VÁLVULAS – ABERTURA E FECHAMENTO TOTAL..	42

4.2.	EQUACIONAMENTO DE UMA VÁLVULA REGULADORA DE VAZÃO FCV .45
4.3.	EQUACIONAMENTO DE UMA VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO PRV.... 46
5.	RESULTADOS47
6.	CONCLUSÃO 65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Válvula de Gaveta de 100 mm com volante.....	26
Figura 2 - Válvula de Esfera.....	27
Figura 3 - Válvula Globo.....	28
Figura 4 – Válvula Borboleta.	29
Figura 5 – Válvula Borboleta.	30
Figura 6 – Válvula de Alívio.	31
Figura 7 – Válvula redutora de pressão.	32
Figura 8 – Rede hidráulica.....	35
Figura 9 – Janela principal do programa.	35
Figura 10 – Janela para simular o transiente.	36
Figura 11 – Dois reservatórios acoplados por um tubo.....	36
Figura 12 – Valores das cargas nos nós 1 e 2 obtidas pelos dois modelos.....	37
Figura 13 – Valores das vazões nos tubos 1 e 2 obtidas pelos dois modelos.....	37
Figura 14 – Valores das cargas no nó 1 obtidas pelos dois modelos.....	38
Figura 15 – Valores das cargas no nó 1 obtidas pelos dois modelos.....	38
Figura 16 – Valores das cargas no nó 2 obtidas pelos dois modelos.....	39
Figura 17 – Valores das cargas no nó 2 obtidas pelos dois modelos.....	39
Figura 18 – Valores das vazões no tubo 1 obtidas pelos dois modelos.....	40
Figura 19 – Valores das vazões nos tubos 2 e 3 obtidas pelos dois modelos.....	40

Figura 20 – Valores do coeficiente de perda de carga singular para diferentes tipos de singularidades.....	43
Figura 21 – Rede 01 para válvula aberta $K=0$	48
Figura 22 – Rede 01 para válvula fechada $K=0$	48
Figura 23 – Vazão EPANET Rede 01 $K=0$	49
Figura 24 – Vazão método gradiente Rede 01 $K=0$	49
Figura 25 – Pressão nos nós Epanet.....	50
Figura 26 – Pressão nos nós Método Gradiente.....	50
Figura 27 – Rede 01 $K=10$	51
Figura 28 – Vazão EPANET Rede 01 $K=10$	51
Figura 29 – Vazão método gradiente Rede 01 $K=10$	52
Figura 30 – Pressão nos nós EPANET rede 01 $K=10$	52
Figura 31 – Pressão nos nós Método Gradiente rede 01 $K=10$	53
Figura 32 – Pressão nos nós 3 e 4 obtida pelos dois modelos.....	54
Figura 33 – Vazão no tubo 3 obtido pelos dois modelos.....	54
Figura 34 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	55
Figura 35 – vazão no tubo 3 obtido pelos dois modelos.....	55
Figura 36 – Rede hidráulica Luvizotto Jr. $K=0$	56
Figura 37 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	57
Figura 38 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.....	57
Figura 39 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	58

Figura 40 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.....	58
Figura 41– Rede hidráulica Luvizotto Jr. $K=10$	59
Figura 42 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	59
Figura 43 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.....	60
Figura 44 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	61
Figura 45 – Vazão tubo 2 obtido pelos dois modelos.....	61
Figura 46 – Rede 01 com válvula FCV.	62
Figura 47 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.....	62
Figura 48– Rede hidráulica PRV desativada.	63
Figura 49 – Rede hidráulica PRV ativa.	63
Figura 50 – Pressão nos nós 3 e 4.....	64
Figura 51 – Vazão no tubo 2.	64

1. INTRODUÇÃO

O sistema de abastecimento de água é composto por um conjunto de equipamentos, tubulações e acessórios, tendo como objetivo o abastecimento de água potável para fins domésticos, públicos, industriais e outros. Para captação, transporte e destinação o sistema é composto de uma rede hidráulica, responsável por interligar todos estes pontos. O estudo de uma rede passa a ser complexo devido ao seu comportamento dinâmico, onde a cada momento a demanda vai para certo ponto da rede, ou devido às manobras realizadas em válvulas para manutenção ou operação do sistema.

O conhecimento do comportamento dos transientes hidráulicos é de extrema importância para otimização de sistemas de abastecimento, podendo assim reduzir custos com a manutenção e conseqüentemente aumentar a eficiência do sistema.

De acordo com Rocha (1998)

Os transientes hidráulicos, como são chamadas as ondas de pressão (positivas ou negativas) geradas em um sistema hidráulico, devido à ação de "manobras" dos componentes deste sistema, podem ocorrer em amplitudes e frequências tais que podem causar a ruptura ou colapso de elementos da instalação como: tubos, válvulas, etc.

Para Carvalho (2011), os efeitos ocorrem também em rede de escoamento forçado, por exemplo, o transporte de óleo e gás, e redes de abastecimento de água. Devido ao grande problema gerado pelos transientes é fundamental a compreensão de tal fenômeno, para que possamos minimizar ao máximo seus efeitos.

Uma ferramenta computacional bastante utilizada para o dimensionamento e análise de sistemas de abastecimento é um programa chamado EPANET. O programa emprega a solução do método gradiente para as simulações hidráulicas pelo sistema de período extensivo, com base num modelo não inercial.

Entretanto o software não considera o efeito da inércia, ou seja, não considera os transientes hidráulicos, em decorrência desse problema. Anjo (2008) encontrou motivação para a implementação do modelo dinâmico inercial rígido e o aproveitou na estrutura do

programa EPANET modificando as equações que definem as condições de escoamento de tal sorte a permitir análise de transitórios. A inclusão foi satisfatória, porém faltou a análise do programa com relação aos tipos de válvulas utilizadas no EPANET.

As válvulas são utilizadas no sistema de abastecimento e têm a função de bloquear, restabelecer, controlar ou interromper o fluxo de uma tubulação. A inclusão de válvulas nos cálculos tem grande importância devido à perda de carga localizada e ao transiente gerado na realização de manobras, esses picos de pressão podem ser responsáveis pela danificação da rede gerando custos e transtornos para população.

Nesse sentido, o presente trabalho deu uma maior atenção às válvulas em um sistema de abastecimento, continuando o trabalho desenvolvido por Anjo (2008) e investigando o Software EPANET. Os principais problemas encontrados foram às nomenclaturas utilizadas pelo manual que não estavam escritos da mesma forma abordada por Anjo (2008). Para as descobertas dos parâmetros foram comparados e modificadas as equações podendo assim aplicar os parâmetros ao modelo dinâmico inercial rígido MDIR, sendo agora possível analisar todas as válvulas em manobras de fechamento e abertura total, e também em situações de controle de vazão e de controle de pressão.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar o software EPANET e descobrir como as válvulas devem ser modeladas e após a descoberta implantá-las, no modelo dinâmico inercial rígido (MDIR), adequando-a a mesma estrutura que define o sistema de equações com o qual é obtida a solução hidráulica no programa EPANET na utilização de válvulas de manobra. Os objetivos específicos desse trabalho serão:

- Comparação dos resultados obtidos pelo software EPANET com o cálculo do método Gradiente desenvolvido manualmente utilizando os parâmetros informados em seu manual;
- Aplicação dos parâmetros utilizados pelo software EPANET em situações de fechamento e abertura total de válvulas;
- Aplicação dos parâmetros utilizados pelo software em uma válvula de controle de vazão FCV;
- Aplicação dos parâmetros utilizados pelo software em uma válvula de controle de pressão PRV.

Esta adequação permitirá que análises em período extensivo sejam mais condizentes, ou seja, contemplando os efeitos da inércia, que decorrem de tais condições.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELO HIDRÁULICO PARA CONDUTO FORÇADO

O escoamento de fluido nos condutos de uma instalação hidráulica a pressão é governado por equações que permitem a determinação das variáveis de estado; carga e vazão ao longo da tubulação no transcorrer do tempo; $H = H(x,t)$ e $Q = Q(x,t)$, onde x é a distância medida ao longo do eixo da tubulação e t , o tempo transcorrido. Sob as hipóteses do modelo dinâmico inercial elástico, estas equações podem ser expressas através das equações da continuidade e da quantidade de movimento na forma (ANJO, 2008 apud STREETER, 1993):

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

Onde:

A	área da seção transversal do tubo.
a	celeridade.
f	fator de atrito da fórmula universal de perda de carga.
D	diâmetro do tubo.
Q	descarga em volume nos tubos.
x	distância medida ao longo do eixo da tubulação.
H	carga piezométrica no nó.
g	aceleração da gravidade.

A celeridade de propagação (a) torna-se infinita sob a hipótese de modelo rígido, levando a zero o primeiro termo do lado esquerdo da equação da continuidade, reduzindo esta

equação a $\partial Q/\partial x = 0$, de onde se conclui que a vazão será a mesma em toda a extensão da tubulação para cada instante de tempo t , logo $Q = Q(t)$ e $\partial Q/\partial t = dQ/dt$.

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

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

Onde:

- L comprimento do tubo.
- H_1 carga piezométrica no nó de montante.
- H_2 carga piezométrica no nó de jusante.

Isso resulta na equação que governa o modelo dinâmico inercial rígido.

Se as variações de vazão no tempo deixam de existir, $dQ/dt = 0$, representando a condição de regime permanente, a equação do modelo estático é obtida:

$$(H_2 - H_1) + f \frac{LQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (3.3)$$

As equações (3.1), (3.2) e (3.3), mostram a hierarquia entre as diversas concepções, resultante das simplificações admitidas durante a elaboração dos modelos.

3.2. MODELO NÃO INERCIAL – (EPANET)

O EPANET é um programa de simulação hidráulica que utiliza o modelo estático (não inercial) conhecido como método Gradiente. Segundo Anjo (2008) ele é baseado nas características de uma rede hidráulica a condutos forçados, definida por sua topologia (tais

como consumos nodais, nós com cargas fixas e uma lei de variação de carga para cada tubo i , expressa por $f(Q_i)$, Todini e Pilati (1988) apresentam na forma matricial o problema da determinação da vazão pelos tubos e cargas nos nós, assumindo condição de regime permanente como:

$$\begin{cases} A_{12}H + f(Q) = -A_{10}H_0 \\ A_{21}Q = q \end{cases} \quad (3.4 \text{ a,b})$$

Onde:

$A_{12} = A_{21}^T$ (np x nn) - matriz de incidência de incógnitas cargas nodais.

A_{10} (np x no) – matriz de incidência de nós com carga fixa.

$Q^T = \{Q_1, \dots, Q_p\}$ (1 x np) – vazão incógnita em cada tubo.

$H^T = \{H_1, \dots, H_p\}$ (1 x nn) – cargas nodais incógnitas.

$q^T = \{q_1, \dots, q_{nn}\}$ (1 x nn) – demandas nodais conhecidas

$H_o^T = \{H_o^1, \dots, H_o^{no}\}$ (1 x no) – nós com cargas estabelecidas (conhecidas ou fixas)

$f(Q)^T = \{f(Q_1), \dots, f(Q_{np})\}$ – lei que expressa a variação de carga nos tubos.

Sendo:

nn = número de nós com carga incógnita.

no = número de nós com carga fixa.

np = número de tubos com incógnita vazão.

Os elementos da matriz A_{12} são escritos na forma:

$$A_{12}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{se a vazão no tubo } i \text{ chega ao nó } j \\ 0 & \text{se o tubo } i \text{ e o nó } j \text{ não estão conectados} \\ -1 & \text{se a vazão no tubo } i \text{ sai do nó } j \end{cases}$$

Onde, i é o identificador do tubo ou trecho e j o identificador do nó.

E os elementos de A_{10} definidos de forma similar a A_{12} , mas em relação aos nós com carga fixa.

Segundo Todini e Pilat(1988), o sistema representado por (3.4) pode ter mais de uma solução, dependendo do perfil da função $f(Q_i)$, mas sendo possível provar que, se todas as $f(Q_i)$ são funções monótonas crescentes a solução do sistema de equações dado por (3.4) existe e é única.

Assumindo para cada tubo i , a função $f(Q_i)$ como:

$$f(Q_i) = R_i |Q_i|^{n-1} Q_i \quad (3.5)$$

Onde:

R coeficiente de perda de carga.

Onde A_{11} é a matriz dos coeficientes de energia:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} R_1 |Q_1|^{n-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R_{np} |Q_{np}|^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Obtém-se o sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10} H_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde o sistema de equações (3.7) é o mesmo de (3.1), sendo a solução do sistema de equações, não lineares, dado por (3.7), única no espaço de todas as incógnitas cargas e vazão.

Os autores encaminham a solução do sistema de equações (3.7) através do método de Newton. Diferenciando o sistema:

$$\begin{bmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ dq \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde A_{21} é a matriz de incidência de incógnitas cargas nodais, transposta de A_{12} e N conforme segue abaixo.

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Sendo:

$$dE = A_{11}Q^K + A_{12}H^K + A_{10}H_0 \quad (3.10)$$

Onde:

- q Demanda nodal
- E matriz de incidência.
- H_0 nó com carga hidráulica fixa ou conhecida.

$$dq = A_{21}Q^K - q \quad (3.11)$$

Resíduos a serem minimizados através do processo iterativo, utilizando:

$$dQ = Q^{K+1} - Q^K \quad (3.12)$$

$$dH = H^{K+1} - H^K \quad (3.13)$$

O resíduo para a iteração $(K + 1)$, pode ser avaliado através da aproximação pelo gradiente:

$$E_1^{K+1} = E_1^K + \left(\frac{\partial E_1}{\partial Q} \right)^K dQ + \left(\frac{\partial E_1}{\partial H} \right)^K dH \quad (3.14)$$

$$q_2^{K+1} = q_2^K + \left(\frac{\partial q_2}{\partial Q} \right)^K dQ + \left(\frac{\partial q_2}{\partial H} \right)^K dH \quad (3.15)$$

Considerando a fórmula universal de perda de carga pode-se definir:

$$f(Q_i) = R_i |Q_i| Q_i \quad (3.16)$$

Com $R_i = f_i L_i / (2g D_i A_i^2)$ é o termo de resistência avaliada em cada tubo i .

Após operações aritméticas as equações (3.14) e (3.15) resultam:

$$E_1^{K+1} = A_{11}^K Q^K + A_{10} H_0 + G Q^{K+1} - G Q^K + A_{12} H^{K+1} \quad (3.17)$$

$$q_2^{K+1} = A_{21} Q^{K+1} - q \quad (3.18)$$

Onde G é uma matriz diagonal quadrada de ordem np :

$$G = \begin{bmatrix} 2R_1 |Q_1| & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2R_{np} |Q_{np}| \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Admitindo atingido o objetivo ($E_1^{K+1} = 0$ e $q_2^{K+1} = 0$), após algumas operações:

$$A_{21} G^{-1} A_{12} H^{K+1} = q_2^K - A_{21} G^{-1} A_{11}^K Q^K - A_{21} G^{-1} A_{10} H_0 \quad (3.20)$$

Chamando o produto de matrizes, que multiplica as cargas incógnitas do primeiro termo, de J e o vetor resultante do segundo membro de F :

$$JH^{K+1} = F \quad (3.21)$$

Onde a matriz J se associa à matriz Jacobiana e pode ser escrita como:

$$J_{ij} = \begin{cases} i = j \Rightarrow J_{ij} = \sum_{K \in i} \frac{1}{G_{iK}} \\ i \neq j \Rightarrow J_{ij} = -\frac{1}{G_{ij}} \end{cases} \quad (3.22)$$

O vetor resultante F pode ser escrito:

$$F_i = \left(\sum_{K \in i} Q_K - D_i \right) + \sum_{K \in i} \frac{1}{G_K} R_K Q_K |Q_K| + \sum_{j \in i} \frac{H_{0j}}{G_K} \text{sgn}(Q_K) \quad (3.23)$$

Uma vez obtida a solução para o sistema de equações dada por (3.21), para a determinação do vetor de cargas, podem-se obter as vazões pela equação:

$$Q^{K+1} = Q^K - G^{-1} A_{11}^K Q^K - G^{-1} A_{10} H_0 - G^{-1} A_{12} H^{K+1} \quad (3.24)$$

A equação anterior pode ser escrita da forma explícita:

$$Q_{ij}^{K+1} = Q_{ij}^K - \left[\frac{1}{G_{ij}} [A_{11}]_{ij} Q_{ij}^K \sin al(Q_{ij}^K) \right] + \frac{1}{G_{ij}} (H_i^{K+1} - H_j^{K+1}) \quad (3.25)$$

A solução iterativa é feita com base na solução proposta de (3.21) para o sistema de equações baseado nas cargas nodais, os valores de carga obtidos permitem a determinação através da equação (3.24), das vazões pelos tubos, num processo iterativo até o estabelecimento da convergência adotada.

3.3. MODELO DINÂMICO INERCIAL RÍGIDO NA FORMA MATRICIAL

Anjo (2008) faz uma abordagem semelhante á Todini & Pilati (1988), ele utiliza a equação do modelo rígido expressando-a na forma matricial. É aproveitado das definições das matrizes anteriormente definidas para o modelo estático (EPANET):

$$A_{12} H + A_{10} H_0 + f(Q) = -\beta \frac{dQ}{dt} \quad (3.26)$$

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

Utilizando uma aproximação simples para dQ/dt , na forma: $(Q-Q_0)/\Delta t$, com que Q_0 avaliada em K relativa ao instante (t) e Q avaliada em $(K+1)$ no instante $(t+\Delta t)$, e considerando que na evolução no tempo o termo de atrito possa ser avaliado em relação ao instante t , pode-se reescrever a equação (3.26) como:

$$A_{12}H + A_{10}H_0 + GQ_0 + BQ = 0 \quad (3.27)$$

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

$$G = \begin{bmatrix} R_1|Q_{01}| - B_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_{np}|Q_{0np}| - B_{np} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{gA_1\Delta t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{L_{np}}{gA_{np}\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\beta_1}{\Delta t} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{\beta_{np}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

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

$$\begin{cases} A_{12}H + BQ = GQ_0 - A_{10}H_0 \\ A_{21}Q = q \end{cases} \quad (3.30)$$

Observe que GQ_0 está com sinal positivo devido ao fato de G ter sido multiplicado por -1 , ficando $G = B - R_1|Q_{01}|$, resultando o sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} B & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GQ_0 - A_{10}H_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Tal sistema é linear e tem como uma propriedade importante o fato da matriz dos coeficientes ser constante, ou seja será montada apenas uma vez durante o processo de

solução. O vetor de soluções é variável no tempo e dependerá da equação de resistência utilizada. Considerando a Fórmula Universal de perda de carga pode-se escrever:

$$A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{12}H - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 = q \quad (3.32)$$

Separando os termos da equação (3.32) tem-se:

$$A_{21}B^{-1}A_{12}H = A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 - q \quad (3.33)$$

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

$$JH = F \quad (3.34)$$

Tem-se um sistema análogo ao do modelo estático (EPANET).

$$J_{ij} = \begin{cases} i = j \Rightarrow J_{ij} = \sum_{K \in i} \frac{1}{B_{iK}} \\ i \neq j \Rightarrow J_{ij} = -\frac{1}{B_{ij}} \end{cases} \quad (3.35)$$

Uma vez obtida a solução para o sistema de equação dada por (3.34), para a determinação do vetor de cargas, pode-se obter as vazões pela equação:

$$Q = B^{-1}GQ_0 - B^{-1}A_{12}H - B^{-1}A_{10}H_0 \quad (3.36)$$

Que recai em uma estrutura de solução similar à dada por (3.21) e (3.24). O processo de solução é análogo, ou seja, resolve-se o sistema de equações para a determinação das cargas, equação (3.34). Com os valores de carga obtidos determinam-se as vazões nos tubos por operações matriciais simples obtidas pela equação (3.36).

Deve se observar que a matriz inversa que permite a solução do sistema de equações em (3.21 – modelo estático) depende de G , que é expresso em termos das vazões nas tubulações, sendo portanto calculada em cada iteração. No caso da equação (3.33 – modelo dinâmico), a matriz inversa se mantém constante durante todo o processo, sendo, portanto necessário calculá-la apenas uma vez, pois B não está expresso em termos das vazões. Os

vetores solução apresentam em ambos os casos grau semelhante de complexidade de cálculo. O mesmo inconveniente ocorrido no sistema de equações (3.21) se repete no atual modelo se a escolha da aproximação da equação (3.26) for mista ao invés de simples, resultando na equação a seguir:

$$A_{12}H + A_{10}H_0 - BQ_0 + GQ = 0 \quad (3.37)$$

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

$$\begin{cases} A_{12}H + GQ = BQ_0 - A_{10}H_0 \\ A_{21}Q = q \end{cases} \quad (3.38)$$

Na solução desse sistema obtém-se a equação:

$$A_{21}G^{-1}A_{12}H = A_{21}G^{-1}BQ_0 - A_{21}G^{-1}A_{10}H_0 - q \quad (3.39)$$

Note que a cada nova iteração deve-se realizar a inversa de G ao invés da inversa de B , pois seu valor depende dos valores das vazões de cada novo instante de tempo. A matriz J assume o mesmo sistema da equação (3.34).

Quando alguns nós de um sistema hidráulico possuem reservatórios de nível variado, os seus contornos deverão ser realizados fora da equação (3.33), da seguinte forma:

$$H^{t+\Delta t} = \frac{\sum Q}{A_r} \Delta t + H^t \quad (3.40)$$

Onde A_r é a área da seção transversal do reservatório.

Quando se deseja simular um reservatório de nível fixo, basta impor no programa do modelo hidráulico que o nível no reservatório permaneça constante ao longo do tempo. Pode-se também empregar a equação (3.40) e adotar um valor muito grande para A_r (infinito), pois quando A_r tende a infinito $\frac{\sum Q}{A_r}$ tende a zero e, conseqüentemente, $H^{t+\Delta t} = H^t$

Cabe aqui observar a diferença fundamental de convergência do método não inercial e o inercial proposto. No primeiro caso, a convergência é numérica e decorrente do processo

de minimização de resíduos. Ao segundo caso, trata-se de uma evolução no tempo (convergência no tempo) em que o fenômeno é descrito fisicamente a partir de uma condição inicial para uma outra condição qualquer.

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

3.4.VÁLVULAS

O intuito desse trabalho é utilizar válvulas em um modelo dinâmico inercial rígido MDIR, com as mesmas características utilizadas pelo software EPANET, e com isso analisar os transientes gerados ao ser realizado uma manobra na rede hidráulica, para isso será apresentado algumas das principais válvulas utilizadas em um sistema de abastecimento e como são abordadas no software EPANET.

Um dos equipamentos mais importantes no setor de abastecimento, às válvulas, são acessórios que raramente percebemos o seu funcionamento e conseqüentemente não levamos em consideração para o dimensionamento, normalmente, ignoramos a sua importância. Por definição, uma válvula é um acessório destinado a bloquear, restabelecer, controlar ou interromper o fluxo de uma tubulação. Existem diversos tipos de válvulas, e a escolha depende de diversos fatores, como a natureza de operação, propriedades físicas e químicas do fluido, pressão e temperatura.

De um modo geral as principais válvulas são:

- Válvulas de bloqueio
- Válvulas de regulação
- Válvulas que permitem o escoamento em um só sentido
- Válvulas de controle de pressão

3.4.1. Válvulas de bloqueio

São válvulas que estabelecem a interrupção do fluxo e devem ficar completamente aberta ou fechada. Para o sistema de abastecimento temos a válvula de gaveta e a válvula de esfera.

3.4.1.1. Válvulas de gaveta

Utilizadas em serviços de bloqueio, em linhas de água, óleos e líquidos em geral, desde que não sejam muito corrosivos, nem deixem muitos sedimentos ou tenham grande quantidade de sólidos em suspensão.

As válvulas de gaveta são utilizadas para qualquer velocidade e temperatura, mas não são recomendadas a sua utilização em situações com velocidades de escoamentos elevadas. O fechamento desse tipo de válvula é feita por uma peça chamada de gaveta, onde através de movimentos aplicados a ela, a mesma se desloca paralelamente ao orifício da válvula e perpendicularmente ao sentido do escoamento, conforme mostra a Figura 1. Devem trabalhar totalmente abertas ou fechadas, e quando trabalham em situações parciais de abertura e fechamento podem ocasionar no sistema laminagem da veia fluida, cavitação, corrosão, erosão e elevada perda de carga localizada.

Em válvulas de gaveta, não é possível realizar o processo de fechamento ou abertura da mesma de forma instantânea, o tempo de fechamento ou abertura varia conforme o tamanho da válvula.

Figura 1 - Válvula de Gaveta de 100 mm com volante.



Fonte: do Autor (2017).

3.4.1.2. *Válvulas de esfera*

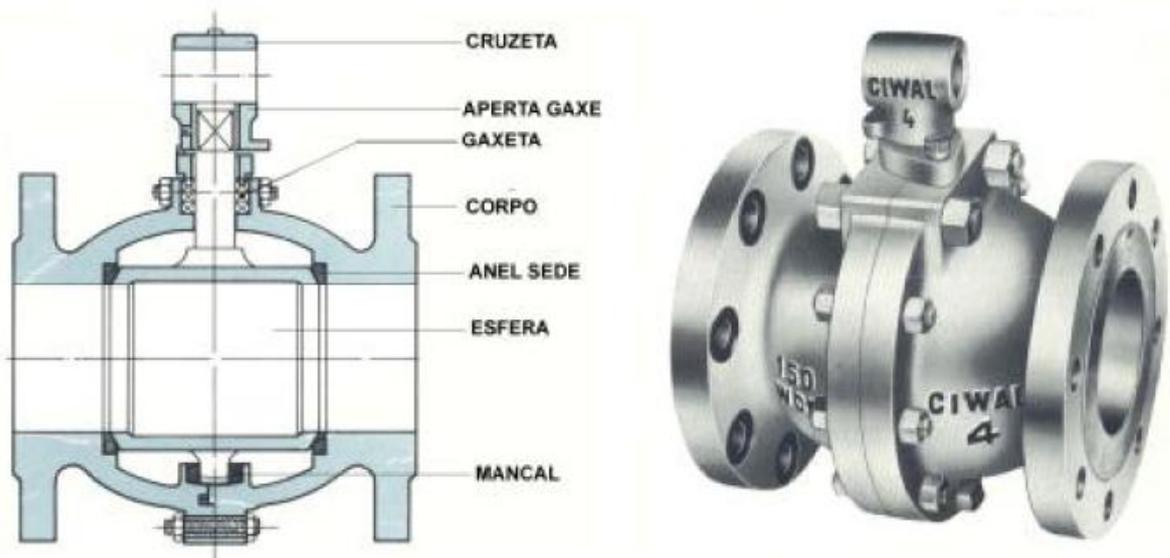
Tem esse nome devido ao seu obturador ser uma esfera vazada onde o fluido passa quando ela está totalmente aberta e alinhada com a tubulação. Na posição fechada, o furo da esfera fica perpendicular ao sentido de escoamento do fluxo, bloqueando a sua passagem. Sua principal característica é a mínima perda de carga para os modelos de passagem plena e a baixa perda de carga para os outros modelos devido à pequena obstrução do fluxo quando totalmente abertas. (ZATTONI, 2005)

As válvulas de esfera possuem as seguintes vantagens sobre as válvulas de gaveta:

- a) Menor tamanho;
- b) Menor peso;
- c) Menor custo;
- d) Menor vedação;
- e) Maior facilidade de operação;
- f) Menor perda de carga.

As válvulas de esferas são recomendadas para fluídos que tendem ocasionar o depósito de sólidos, por arraste, polimerização, coagulação, etc.. A característica interna lisa da válvula dificulta a formação de depósitos de materiais dentro da mesma, característica que não é presente nas válvulas de gaveta e que ocasiona uma perda de eficiência das mesmas devido ao depósito de materiais dentro da mesma quando utilizada em sistema com fluídos que tendem a ocasionar o depósito de sólidos (PAULI & ULIANA, 1996).

Figura 2 - Válvula de Esfera.



Fonte: Zattoni (2008).

3.4.2. Válvulas de regulação

São destinadas a controlar o escoamento, podendo trabalhar em qualquer posição de fechamento parcial.

3.4.2.1. Válvulas globo

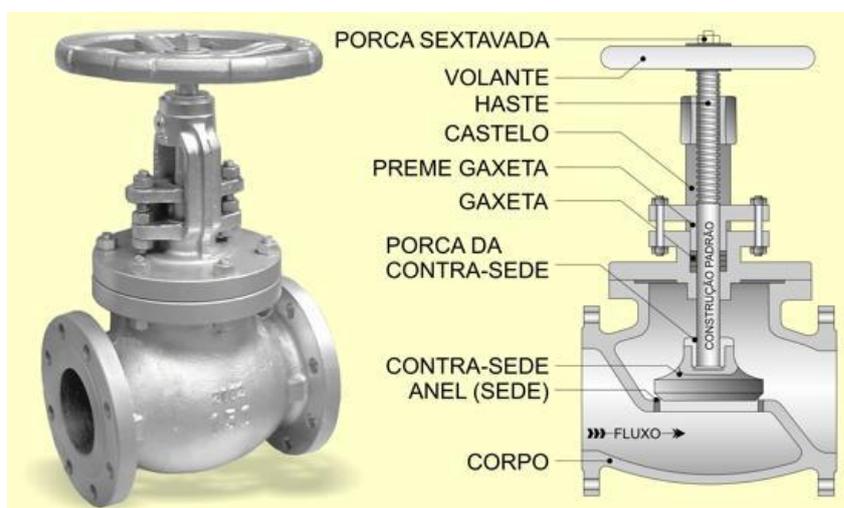
Segundo Zattoni (2005), as válvulas globo, ou também registro de pressão, tem como função regular a vazão ou bloquear o fluxo em uma tubulação (Figura 3).

O processo de fechamento e abertura é realizado manualmente através de um volante fixo à extremidade de uma haste. Quando a haste é girada, ocorre o movimento ascendente ou

descendente do obturador acoplado à outra extremidade da haste que atuará no corpo da válvula, abrindo, fechando ou regulando o fluxo de fluido pela mesma (ZATTONI, 2005).

Para Pauli e Uliana (1996), as válvulas globo devem ser instaladas de forma que o fluido entre pela face inferior do tampão e devem ser utilizadas em situações que se tenha a necessidade de regular o fluxo ou queira promover o fechamento estanque de linhas de líquidos não muito corrosivos e em linhas de vapor e gases. Para as finalidades citadas, as válvulas globo são empregadas mediante quaisquer pressões e temperaturas, em diâmetros não superiores a 8” por motivos econômicos e também por não permitirem uma boa vedação.

Figura 3 - Válvula Globo.



Fonte: Valaco acessórios industriais (2016).

3.4.2.2. Válvulas borboleta

Segundo Zattoni (2005), as válvulas borboleta ter função de regular e ou bloquear o fluxo em uma tubulação, podendo trabalhar em posições parciais de fechamento e abertura.

O manuseio da válvula é feito através da rotação de uma peça circular, chamada de disco, em torno de um eixo perpendicular em direção do escoamento do fluido. Possuem uma excelente vedação promovida por anéis de sede em elastômeros (ZATTONI, 2005).

São utilizadas em redes de adução e distribuição de água e em estações de tratamento de água e esgotos, em indústrias químicas, petroquímicas, etc.. Podem ser utilizadas em redes

com líquidos em geral, gases, bem como fluídos corrosivos, pois possuem revestimento anti-corrosivo (ZATTONI, 2005).

Para Zattoni (2005), as válvulas borboletas possuem muitas vantagens, sendo as principais:

- a) Facilidade de montagem;
- b) Construção compacta;
- c) Robusta;
- d) Leve;
- e) Ocupa pequenos espaços;
- f) Características que permitem uma excelente capacidade de vazão;
- g) Baixo custo;
- h) Bom desempenho como válvula de regulagem e de controle.

Na Figura 4, que segue abaixo, é mostrado o esquema de uma válvula tipo borboleta pra melhor entendimento.

Figura 4 – Válvula Borboleta.



Fonte: do Autor (2017).

3.4.3. Válvulas de retenção

As válvulas de retenção não necessita da atuação de um operador, ela caracteriza pela auto operação proporcionada pelas diferenças de pressão entre montante e jusante exercidas pelo fluido em consequência do próprio fluxo. São válvula unidirecionais, ou seja, permitem o fluxo em somente um sentido e desta forma são instaladas em situações que a inversão do sentido de fluxo não é desejada. Como função secundária, as válvulas de retenção tem como finalidade a retenção da coluna líquida dentro da tubulação durante a paralisação de bombas devido à interrupção do fornecimento de energia, desta forma as válvulas evitam que a sobre pressão causadas por golpes de aríete resultantes da parada brusca do escoamento chegue às bombas (ZATTONI, 2005).

Figura 5 – Válvula Borboleta.



Fonte: do Autor (2017).

3.4.4. Válvulas que controlam a pressão

3.4.4.1. Válvulas de segurança e de alívio

As válvulas de segurança e de alívio são aquelas que têm a função de proteger linhas, equipamentos e pessoas que trabalham junto à rede. É uma válvula de auto operação que usa a energia do fluido para promover a sua abertura ou fechamento (ZATTONI, 2005).

Para Zattoni (2005) as válvulas de segurança e de alívio devem ser instaladas diretamente nos pontos à serem protegidos e entre a válvula e a tubulação não pode existir nenhum elemento que possa impedir o fluxo. Na saída da válvula, o alívio, o tubo deverá descarregar em uma área de segurança completamente livre. Quando o fluido se tratar de ar comprimido, vapor e gases inertes o ponto de descarga poderá ser a atmosfera em um ponto acima do local mais alto da edificação, quando tratar-se de líquidos o ponto poderá ser o próprio tanque que contém o fluido.

Figura 6 – Válvula de Alívio.



Fonte: do Autor (2017).

3.4.4.2. Válvulas Redutoras de Pressão

Regulam a pressão dentro de limites pré-estabelecidos. São automáticas e fecham-se por meio de molas de tensão regulável, de acordo com a pressão desejada (PAULI E ULIANA, 1996) Esse tipo de válvula mantém controle preciso de baixas pressões, independente das variações de vazão ou da pressão de entrada. São muito utilizadas nas instalações de vapor e ar comprimido, nas redes de abastecimento de água nas cidades e nas instalações de água em prédios altos.

Figura 7 – Válvula redutora de pressão.



Fonte: do Autor (2017).

3.4.5. Válvulas EPANET

Apresentaremos neste item as válvulas utilizadas pelo EPANET, como é chamado cada tipo e qual o seu funcionamento, isto será de grande importância na investigação de seu fechamento e abertura total, controle de vazão e pressão. Essa abordagem é de grande importância, devido ao intuito deste trabalho ser a utilização dos parâmetros no modelo

dinâmico inercial rígido MDIR. Abaixo temos as válvulas utilizadas pelo EPANET, para modelagem de sistema de abastecimento:

- Válvula de Controle da Pressão a jusante ou Válvula Redutora de Pressão, PRV (*Pressure Reducing Valve*)
- Válvula de Controle da Pressão a montante ou Válvula Sustentadora de Pressão, PSV (*Pressure Sustaining Valve*)
- Válvula de Perda de Carga Fixa, PBV (*Pressure Breaker Valve*)
- Válvula Reguladora de Vazão, FCV (*Flow Control Valve*)
- Válvula de Controle de Perda de Carga ou Válvula Borboleta, TCV (*Throttle Control Valve*)
- Válvula Genérica, GPV (*General Purpose Valve*).

O Manual do EPANET 2.0 Brasil determina que

As **Válvulas Redutoras de Pressão (PRV)** limitam a pressão de saída na válvula num determinado ponto da rede. O EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para este tipo de válvula: Parcialmente aberta (i.e., ativa), para que a pressão a jusante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a montante é superior a este valor, Completamente aberto, se a pressão a montante esta abaixo do valor pré-definido, Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta (neste caso funciona como válvula de retenção).

As **Válvulas Sustentadoras de Pressão (PSV)** mantem o valor da pressão de entrada na válvula num determinado ponto da rede. O EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para este tipo de válvula: Parcialmente aberta, (i.e., ativa) para que a pressão a montante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a jusante esta abaixo deste valor completamente aberta, se a pressão a jusante e superior ao valor pré-definido Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta (neste caso funciona como válvula de retenção).

As **Válvulas de Perda de Carga Fixa (PBV)** provocam uma perda de carga fixa na válvula. O escoamento através da válvula pode ocorrer em qualquer sentido. Este tipo de válvula não constitui um componente físico da rede, no entanto pode ser

utilizado para modelar situações em que existe uma perda de carga fixa que é conhecida.

As **Válvulas Regadoras de Vazão (FCV)** limitam o valor da vazão. O programa emite uma mensagem de advertência se a vazão não puder ser mantida sem que haja um aumento da carga hidráulica na válvula (i.e., mesmo quando a vazão não pode ser mantida com a válvula completamente aberta).

As **Válvulas de Borboleta (TCV)** simulam válvulas parcialmente fechadas, ajustando o coeficiente de perda de carga singular da válvula. A relação entre o grau de fechamento da válvula e o correspondente coeficiente de perda de carga singular é fornecida usualmente pelo fabricante da válvula.

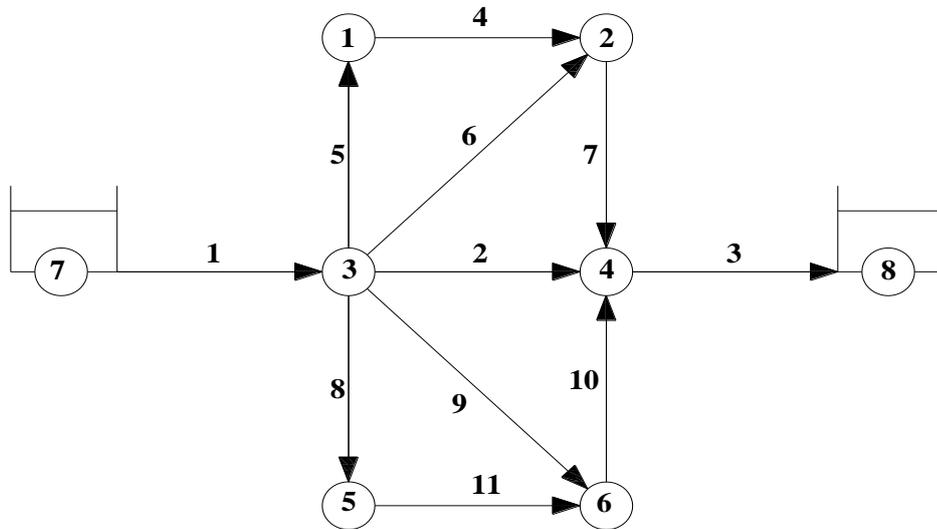
As **Válvulas Genéricas (GPV)** são utilizadas para representar um trecho com uma lei de escoamento especial, diferente das expressões utilizadas para os restantes elementos já apresentados. Podem ser utilizado para simular turbinas, escoamento em poços ou válvulas de retenção de vazão reduzida.

3.5. PROGRAMA DO MDIR

Em seu trabalho ANJO (2008) fez uma abordagem semelhante utilizada no software EPANET ele investigou e aproveitou sua estrutura modificando as equações que definem as condições de escoamento de tal sorte a permitir análise de transitórios, através dessas modificações foi desenvolvido um programa de computador com base no modelo dinâmico inercial rígido MDIR.

O programa resolve de forma separada, a parte hidráulica, utilizada para determinar a vazão (velocidade da água nos tubos) e a carga nos nós. Outro recurso é a análise da qualidade utilizada para determinar a concentração de um componente numa determinada seção, ou seja, os resultados obtidos pelo modelo hidráulico são utilizados na sequência pelo modelo de qualidade. Para a demonstração do programa se está empregando a rede ilustrada na figura 8:

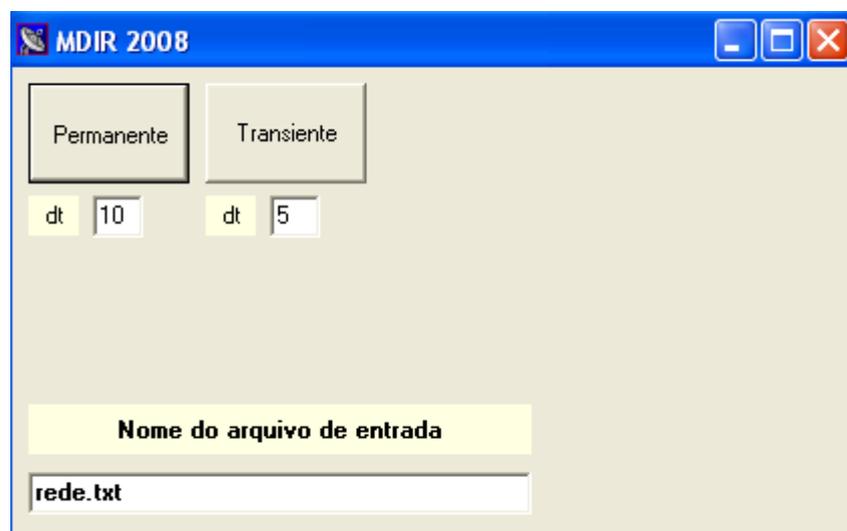
Figura 8 – Rede hidráulica.



Fonte: Anjo (2008).

O programa é constituído por duas janelas. A principal, onde se calcula o regime permanente, havendo a possibilidade de acelerar sua convergência para o regime permanente, uma vez que valores diferentes para dt (incluindo valores grandes) podem ser adotados para esta convergência, em detrimento da realidade física da fase transitória conforme será melhor observado nas simulações do capítulo 3.3.5. Para simular o transitório, basta clicar no botão “transiente” para se ter acesso à segunda janela (secundária), onde várias simulações poderão ser realizadas, como descrita a diante nesse capítulo. As figuras 9 e 10 representam, respectivamente, as janelas principal e secundária.

Figura 9 – Janela principal do programa.



Fonte: Anjo (2008).

Figura 10 – Janela para simular o transiente.

nó fixo	componente
7	0
8	0

nó	demanda	componente
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0

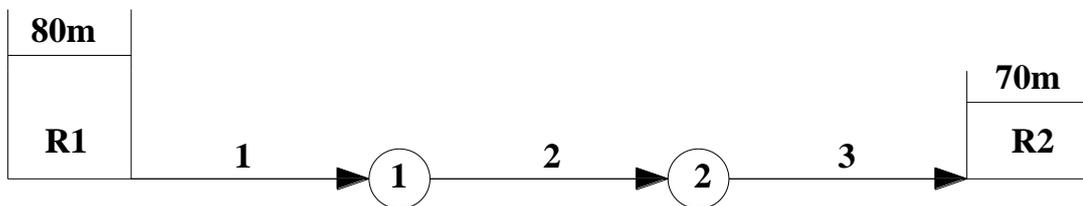
nó fixo	diâmetro
7	0
8	0

tubo	seções
1	229
2	617
3	229
4	1796
5	1796
6	1230
7	730

Fonte: Anjo (2008).

Para comprovação de seu programa Anjo (2008), elaborou alguns testes e o comparou com o EPANET, um deles foi o sistema hidráulico composto de dois reservatórios ligados por um tubo como mostra a figura 11, a seguir:

Figura 11 – Dois reservatórios acoplados por um tubo.

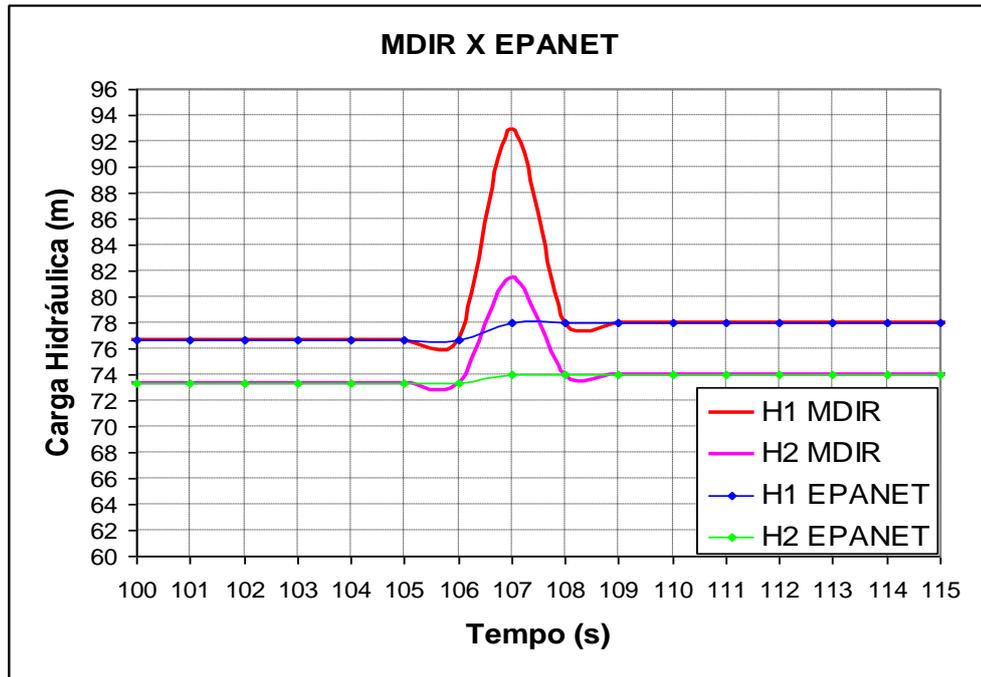


Fonte: Anjo (2008).

A situação simulada teve dois reservatórios de grandes dimensões (nível constante) no primeiro instante atingiram o regime permanente, e posteriormente foi modificado pela adição de uma demanda no nó 1. Foi avaliada a condição transitória para o novo regime permanente, o comprimento da tubulação é de 900m, com espaçamentos iguais de 300m de comprimento e diâmetro da tubulação de 400mm.

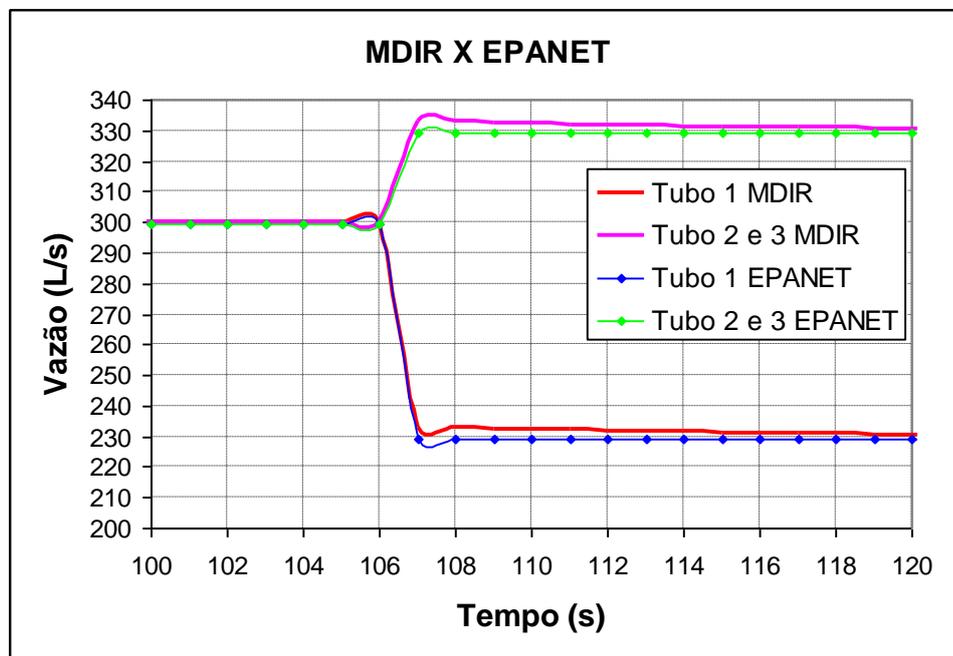
Para a simulação do regime transitório inseriu-se uma demanda, de forma contínua, no nó 1 de 100L/s, uma vez que o regime permanente inicial foi alcançado. Os reservatórios foram mantidos com níveis de água constantes. Os resultados obtidos para carga nos nós 1 e 2 e a vazão nos tubos 1, 2 e 3 são apresentados, respectivamente, pelas figuras 12 e 13:

Figura 12 – Valores das cargas nos nós 1 e 2 obtidas pelos dois modelos.



Fonte: Anjo (2008).

Figura 13 – Valores das vazões nos tubos 1 e 2 obtidas pelos dois modelos.

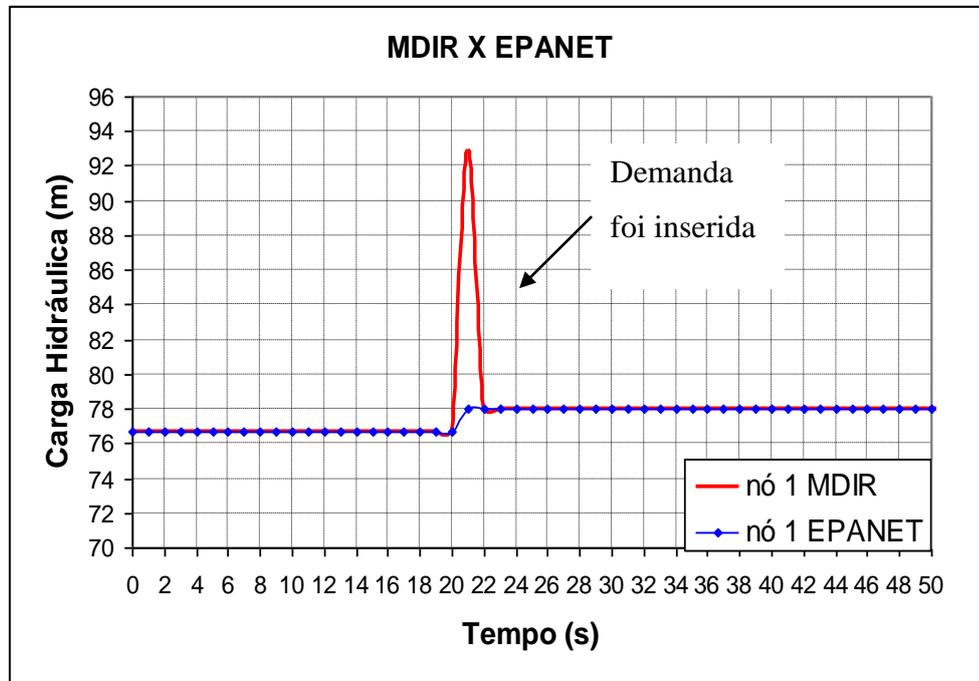


Fonte: Anjo (2008).

Outra simulação foi inserir a mesma demanda de 100L/s durante 150s e não mais de forma contínua. Nas figuras de 14 a 19 são apresentadas os valores de carga e vazão obtidas

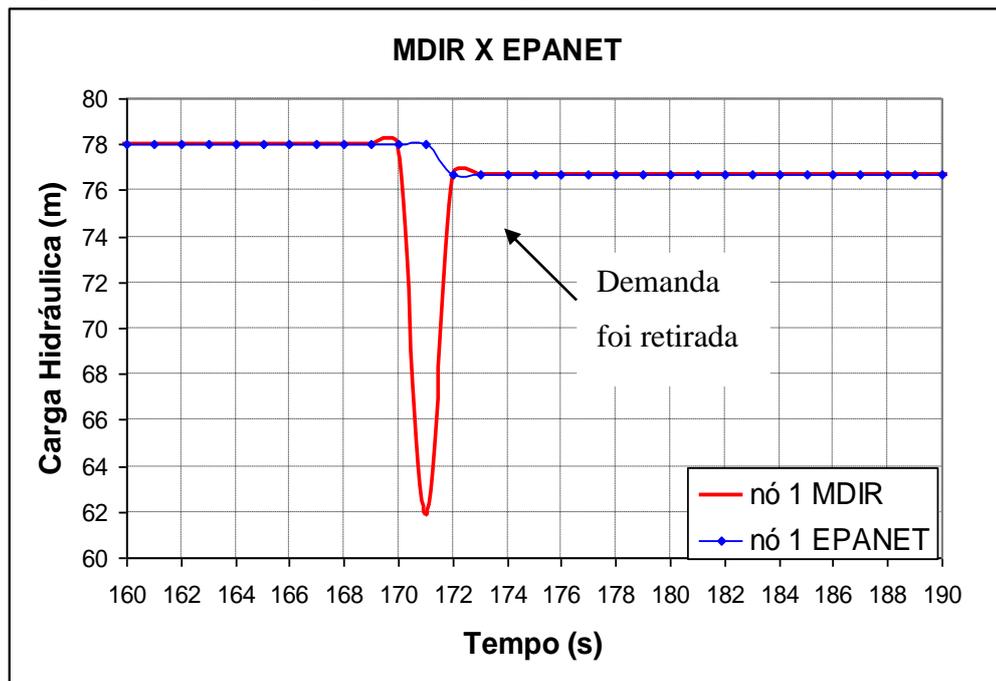
pelos dois modelos. Observe que a figura 15 é a continuação da figura 14 e o mesmo ocorre entre as figuras 16 e 17.

Figura 14 – Valores das cargas no nó 1 obtidas pelos dois modelos.



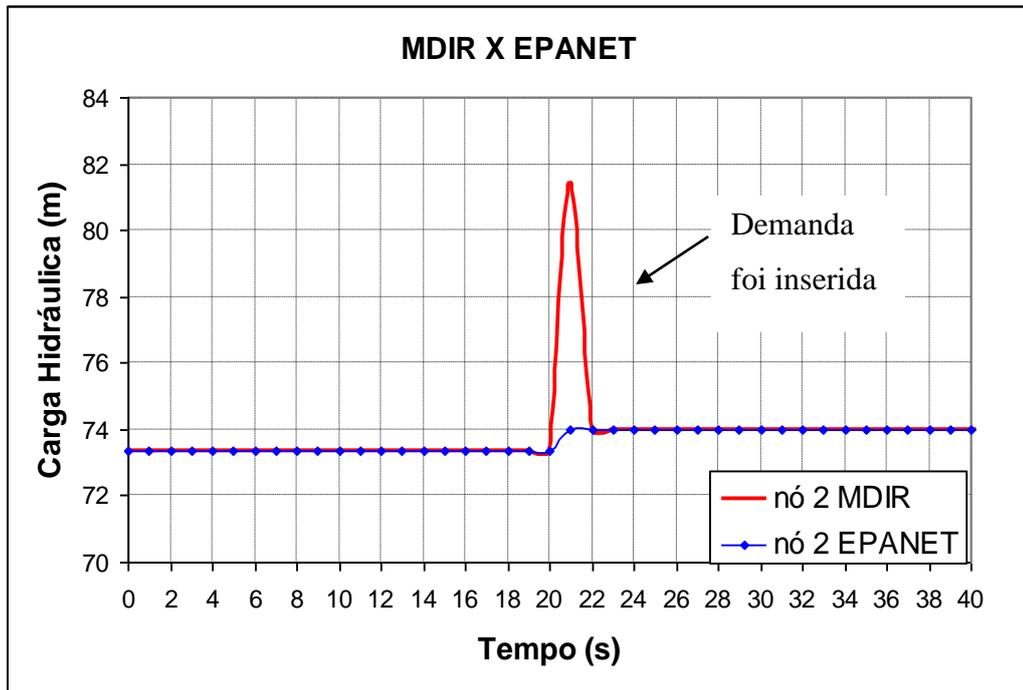
Fonte: Anjo (2008).

Figura 15 – Valores das cargas no nó 1 obtidas pelos dois modelos.



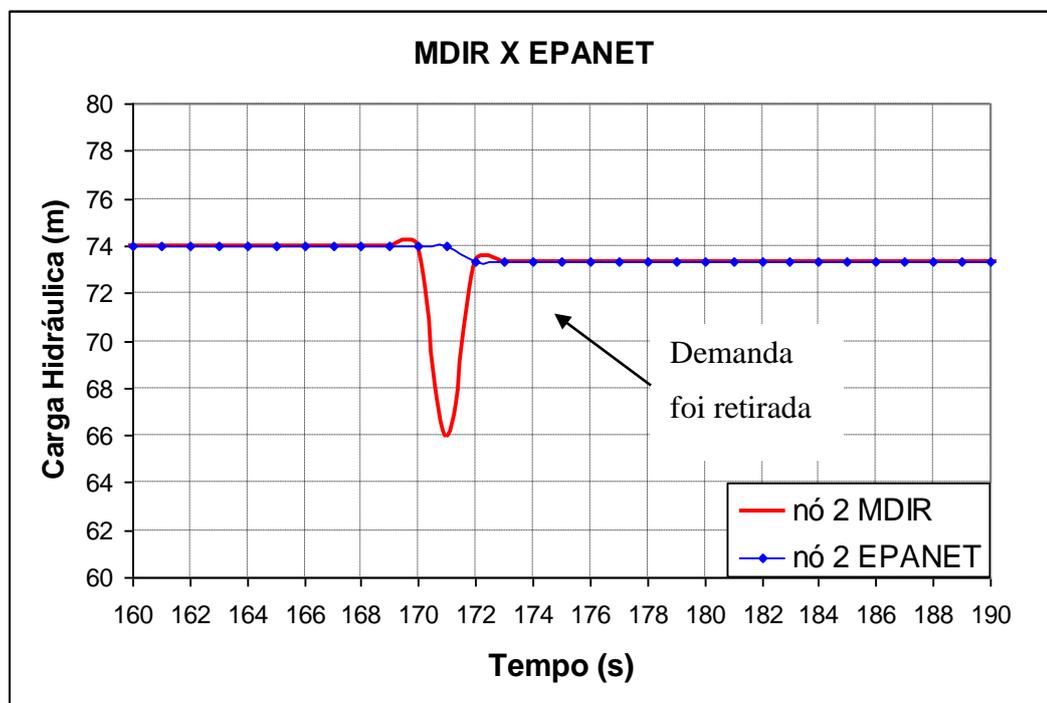
Fonte: Anjo (2008).

Figura 16 – Valores das cargas no nó 2 obtidas pelos dois modelos.



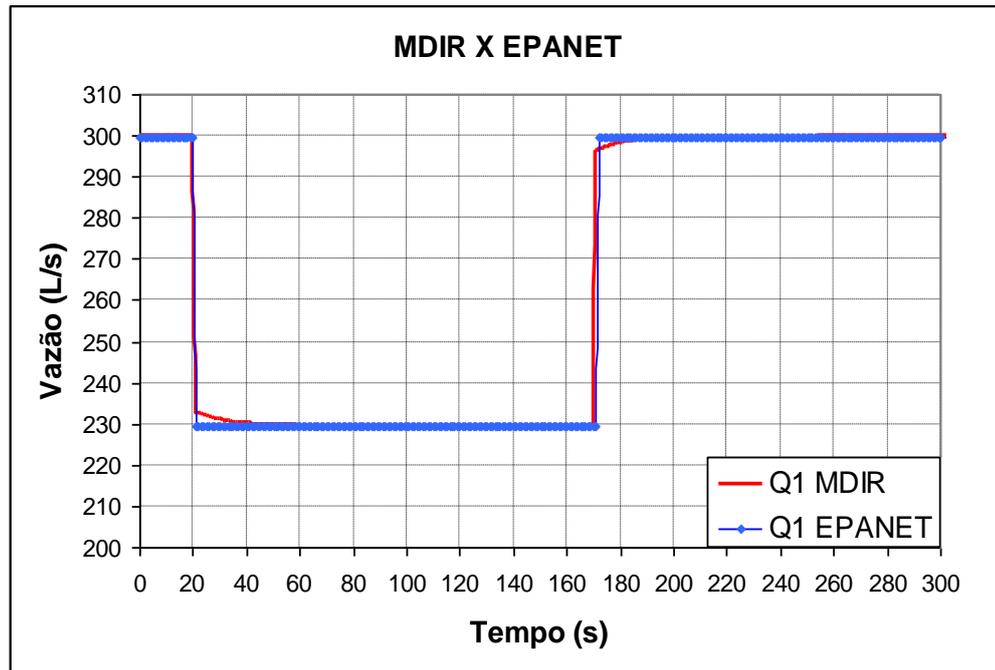
Fonte: Anjo (2008).

Figura 17 – Valores das cargas no nó 2 obtidas pelos dois modelos.



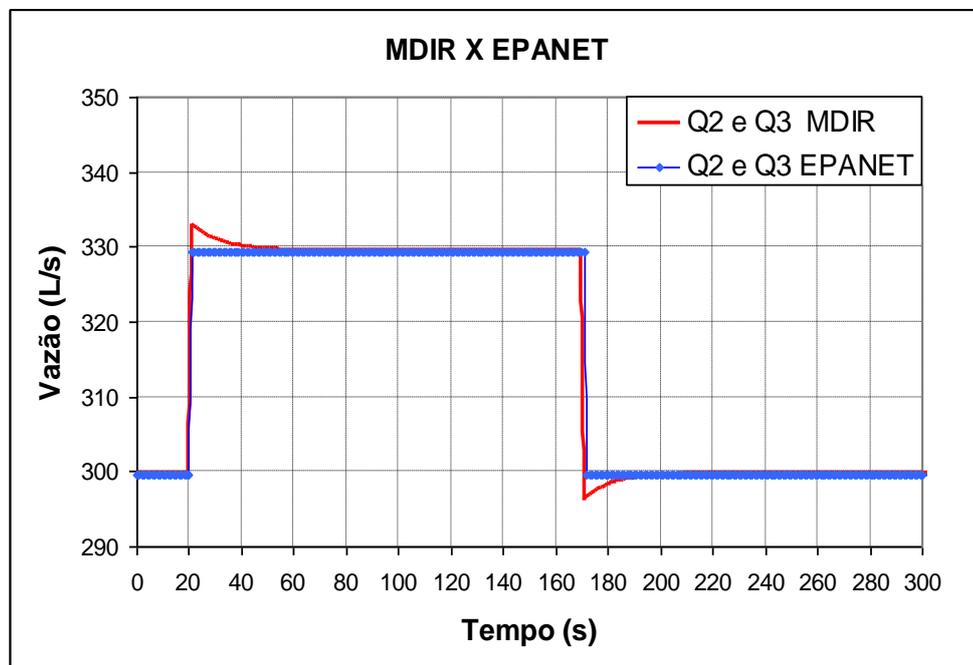
Fonte: Anjo (2008).

Figura 18 – Valores das vazões no tubo 1 obtidas pelos dois modelos.



Fonte: Anjo (2008).

Figura 19 – Valores das vazões nos tubos 2 e 3 obtidas pelos dois modelos.



Fonte: Anjo (2008).

Os resultados ilustrados nas figuras de 12 a 19 mostraram o que ocorre no sistema da figura 11, quando submetidos à inserção de demandas de forma contínua ou não. O EPANET, como não considera o efeito da inércia do escoamento, apenas atualiza os dados de carga e

vazão para a nova condição imposta. O mesmo não ocorre com os resultados encontrados pelo MDIR. A figura 12, por exemplo, demonstra o pico de pressão que ocorre nos nós 1 e 2 quando se inseriu uma demanda de 100L/s no nó 2.

Conforme vistos nos resultados, é possível através do MDIR visualizar os picos de pressão quando a inserção de demandas, por outro lado o que aconteceria no sistema da figura 11 se fosse acrescentado uma válvula e esta realizasse uma manobra, com certeza teríamos uma alteração no sistema. O MDIR teve resultados satisfatórios, no entanto ainda falta a análise de válvulas e bombas que estão presentes em praticamente todos os sistemas de abastecimento, necessitando de um aprimoramento para que tenha melhor eficiência e maior adesão entre os profissionais responsáveis pelo seu desenvolvimento.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada mostrando as modificações realizadas para implantação das válvulas utilizadas pelo EPANET ao modelo dinâmico inercial rígido MDIR.

Foram analisadas as válvulas utilizadas pelo EPANET conforme os parâmetros fornecidos pelo anexo D do manual, através destes dados verificou-se a possibilidade de implementar ao MDIR a análise de transientes hidráulicos através de curvas de contorno nas mesmas válvulas utilizadas pelo EPANET.

As válvulas trabalham em situações de abertura ou fechamento total, parcialmente fechada e reguladora de pressão, para este trabalho usaremos equações para situações de fechamento e abertura completa, essa situação pode ser adotada por qualquer válvula, situações de abertura parcial utilizadas por válvulas reguladoras de vazão FCV e situações de redução de pressão PRV.

4.1. EQUACIONAMENTO DE VÁLVULAS – ABERTURA E FECHAMENTO TOTAL

Para a simulação de válvulas o EPANET considera alguns parâmetros ao modelo matemático utilizado, para a válvula aberta é acrescentado à perda de carga localizada $f(Q_i)$ através da seguinte fórmula.

$$f(Q_i) = R_i |Q_i|^{n-1} Q_i + M_i |Q_i| Q_i \quad (4.1)$$

Para determinação da perda de carga localizada h_L o EPANET utiliza a seguinte expressão:

$$h_L = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (4.2)$$

Através desta fórmula o EPANET considera M como:

$$M = \left(\frac{K}{2gA^2} \right) \quad (4.3)$$

Onde:

K = coeficiente de perda de carga singular
V = velocidade do escoamento (comprimento/tempo)
g = aceleração da gravidade (comprimento/tempo²)
A = área.

O coeficiente K é fornecido conforme a figura 20 retirada da tabela 3.3 do manual do EPANET.

Figura 20 – Valores do coeficiente de perda de carga singular para diferentes tipos de singularidades.

Tabela 3.3 - Valores do coeficiente de perda de carga singular para diferentes tipos de singularidades.

Singularidade	Coeficiente da Perda de Carga
Válvula de globo, abertura completa	10.0
Válvula de ângulo, abertura completa	5.0
Válvula de retenção, abertura completa	2.5
Válvula de cunha, abertura completa	0.2

Fonte: Manual do Epanet (2009) Adaptado pelo autor.

Ao considerar a perda de carga localizada a matriz G mostrada na expressão 3.19 fica da seguinte forma:

$$G = \begin{bmatrix} 2R_1|Q_1| + 2M_1|Q_1| & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2R_{np}|Q_{np}| + 2M_{np}|Q_{np}| \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Com relação a trechos fechados, o EPANET assume que a perda de carga segue uma relação linear com um elevado fator de resistência, $h = 10^8 Q$, onde $p = 10^8$ e $y = Q$.

A equação 3.25 do método gradiente é apresentada novamente a seguir:

$$Q_{ij}^{K+1} = Q_{ij}^K - \left[\frac{1}{G_{ij}} [A_{11}]_{ij} Q_{ij}^K \sin al(Q_{ij}^K) \right] + \frac{1}{G_{ij}} (H_i^{K+1} - H_j^{K+1})$$

O EPANET considera a expressão da seguinte forma:

$$Q_{ij}^{K+1} = Q_{ij}^K - y_{ij} + p_{ij}(H_i - H_j) \quad (4.5)$$

Sendo

$$y_{ij} = \left[\frac{1}{G_{ij}} [A_{11}]_{ij} Q_{ij}^K \sin al(Q_{ij}^K) \right] \quad (4.6)$$

$$p_{ij} = \frac{1}{G_{ij}} \quad (4.7)$$

Ao substituírmos os parâmetros fornecidos pelo EPANET, $p = 10^{-8}$ e $y = Q$ na equação 4.5 tem-se:

$$\begin{aligned} Q_{ij}^{K+1} &= Q_{ij}^K - y_{ij} + p_{ij}(H_i - H_j) \\ Q_{ij}^{K+1} &= Q_{ij}^K - Q_{ij}^K + 10^{-8}(H_i - H_j) \\ 10^8 Q_{ij}^{K+1} &= (H_i - H_j) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Após a descoberta de como o sistema é implantado foi utilizado os mesmos parâmetros no MDIR onde a expressão 3.28 foi escrita dessa forma para a válvula aberta:

$$G = \begin{bmatrix} R_1|Q_{01}| + M|Q_{01}| - B_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_{np}|Q_{0np}| + M|Q_{0np}| - B_{np} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para a simulação de válvula fechada também foram utilizados os parâmetros do EPANET onde $\frac{1}{G_{ij}} = 10^{-8}$.

4.2. EQUACIONAMENTO DE UMA VÁLVULA REGULADORA DE VAZÃO FCV

O EPANET considera para uma FCV ativa do nó i para o nó j , com o parâmetro de controle Q_{set} , tem-se que o valor de Q_{set} é adicionado a vazão que sai do nó i para o nó j e é subtraído de F_i e adicionado a F_j . Se a carga hidráulica no nó i for inferior à carga hidráulica no nó j , a válvula não consegue fornecer a vazão necessária e passa a ser modelada como uma tubulação.

Onde

$$F_i = \left(\sum Q_{ij} - D_i \right) + \sum y_{ij} + \sum p_{ij} h_j \quad (4.10)$$

$$Q_{ij}^{K+1} = Q_{set} \quad (4.11)$$

Para a vazão a montante é escrito da seguinte forma

$$F_i = \left(\sum Q_{ij} - D_i \right) + \sum y_{ij} + \sum p_{ij} h_j - Q_{set} + Q_{tubovalvula} \quad (4.12)$$

Para a vazão a jusante é escrito da seguinte forma

$$F_j = \left(\sum Q_{ij} - D_j \right) + \sum y_{ij} + \sum p_{ij} h_j + Q_{set} - Q_{tubovalvula} \quad (4.13)$$

Uma abordagem semelhante foi adotada no MDIR deixando a equação 3.33 da seguinte forma.

$$Q_{ij}^{K+1} = Q_{set}$$

Para a vazão a montante é escrito da seguinte forma

$$A_{21} B^{-1} A_{12} H = A_{21} B^{-1} G Q_0 - A_{21} B^{-1} A_{10} H_0 - q - Q_{set} + Q_{tubovalvula} \quad (4.14)$$

Para a vazão a jusante é escrito da seguinte forma

$$A_{21}B^{-1}A_{12}H = A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 - q + Q_{set} - Q_{tubovalvulã} \quad (4.15)$$

4.3. EQUACIONAMENTO DE UMA VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO PRV

A vazão através de uma PRV ativa e mantida para garantir a continuidade no nó de jusante, do nó i para o nó j:

$$p_{ij} = 0$$

$$F_j = F_{j+} + 10^8 Hset$$

$$A_{jj} = A_{jj} + 10^8$$

Isto obriga que a carga no nó de jusante corresponda ao parâmetro de controle *Hset*. Os coeficientes para PRVs abertas e fechadas são tratados do mesmo modo que para as tubulações.

Onde:

$$A_{jj} = J$$

dessa forma a equação no MDIR fica escrita nessa forma

$$((A_{21}B^{-1}A_{12}) + 10^8) * H = (A_{21}B^{-1}GQ_0 - A_{21}B^{-1}A_{10}H_0 - q) + 10^8 Hset \quad (4.16)$$

Foram levantadas as principais válvulas utilizadas pelo EPANET e através disso acrescentado ao MDIR, possibilitando assim a modelagem dessas, podendo agora simular o efeito da inércia em manobras.

5. RESULTADOS

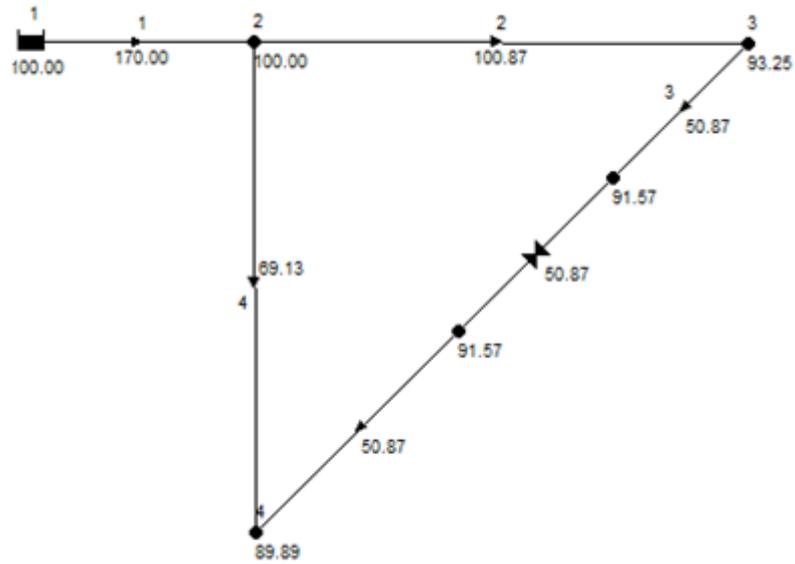
Foram realizadas algumas simulações para avaliação do modelo desenvolvido. Foram analisadas cinco topologias de diferentes sistemas para o modelo proposto. Em todas as simulações foram comparados os resultados obtidos pelo Modelo Dinâmico Inercial Rígido (MDIR) com os obtidos pelo programa EPANET. Os estudos de casos apresentados nesse capítulo estão na seguinte sequência:

- a) Estudo de caso 01 – comprovação do método gradiente com válvula.
- b) Estudo de caso 02 – avaliação em regime transitório.
- c) Estudo de caso 03 – Avaliação em regime transitório Rede Luvizotto Jr
- d) Estudo 04 – Avaliação em regime transitório Válvula FCV
- e) Estudo 05 – Avaliação em regime transitório Válvula PRV

a) Estudo 01 – Comprovação do método gradiente com válvula

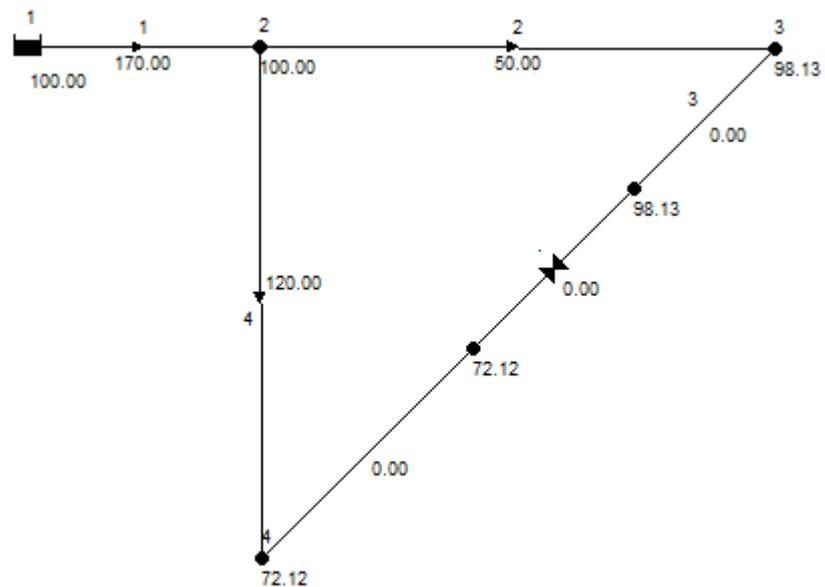
O intuito do teste foi o de comparar os resultados do método gradiente com o EPANET, tendo em vista que os métodos não incluíam válvulas, e com isso verificar se os parâmetros fornecidos pelo manual do EPANET estavam condizentes. Para comparação dos testes, os gráficos gerados pelo EPANET foram adaptados expressando o tempo em segundos, pois ele trabalha com o tempo em horas, não sendo possível a alteração deste. Para o estudo utilizou-se um sistema hidráulico composto de um reservatório, nível constante igual a 100m, tubulação de 200m para o tubo 2, 350m para o tubo 3, 600m para o tubo 4, os diâmetros são todos de 200mm e uma válvula localizada no centro da tubulação 3, como mostra a figura 21:

Figura 21 – Rede 01 para válvula aberta $K=0$.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 22 – Rede 01 para válvula fechada $K=0$.

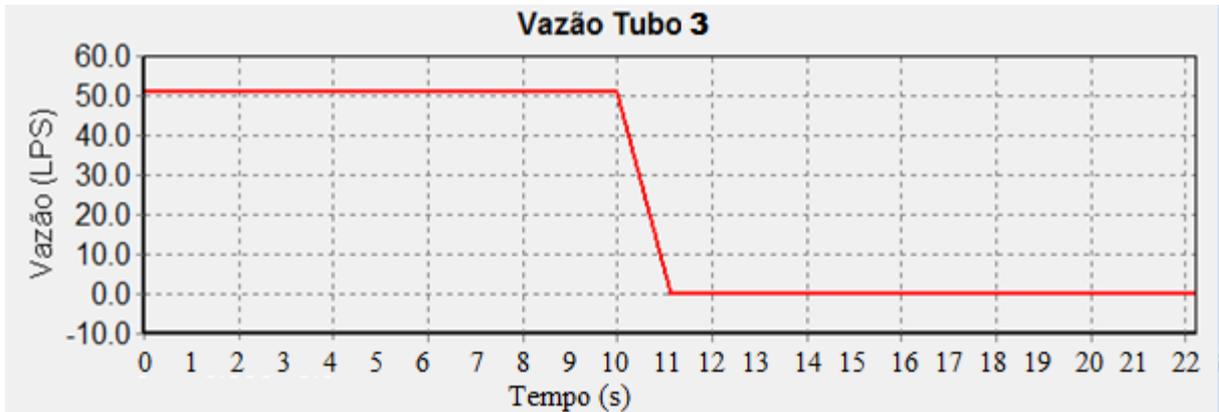


Fonte: do Autor (2017).

No primeiro momento foi considerado que o coeficiente de perda de carga localizada seria igual a zero e realizada uma manobra de fechamento na válvula. No primeiro instante a

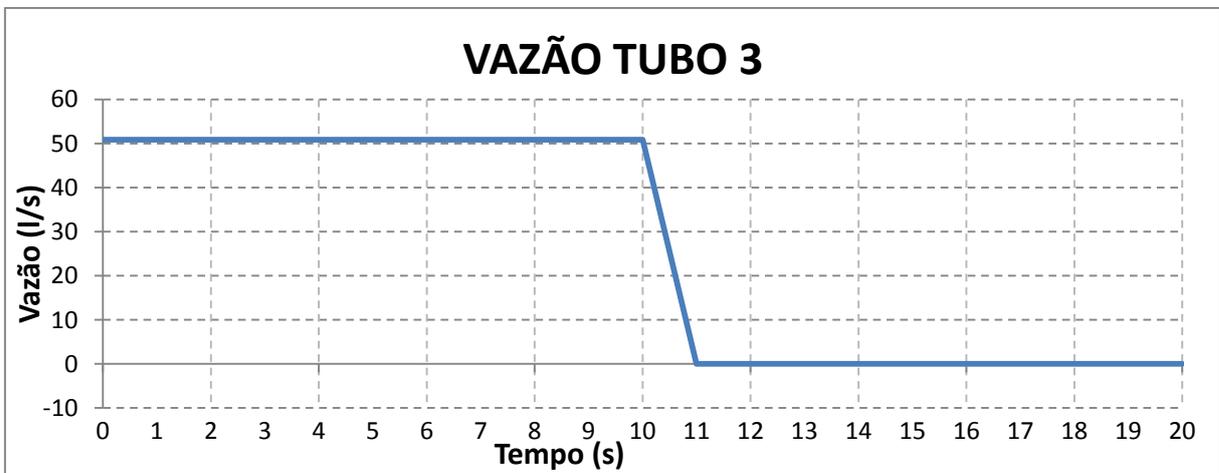
tubulação estava cheia e no outro a vazão foi à zero, e podemos verificar que tanto no programa EPANET e quanto o método gradiente os valores foram iguais.

Figura 23 – Vazão EPANET Rede 01 K=0.



Fonte: do Autor (2017).

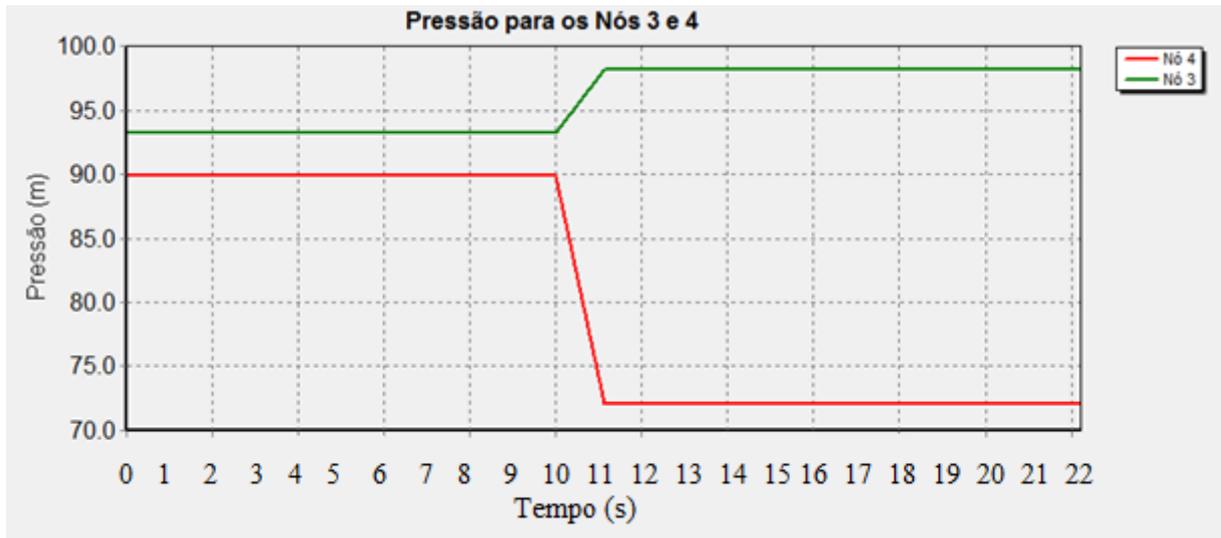
Figura 24 – Vazão método gradiente Rede 01 K=0.



Fonte: do Autor (2017).

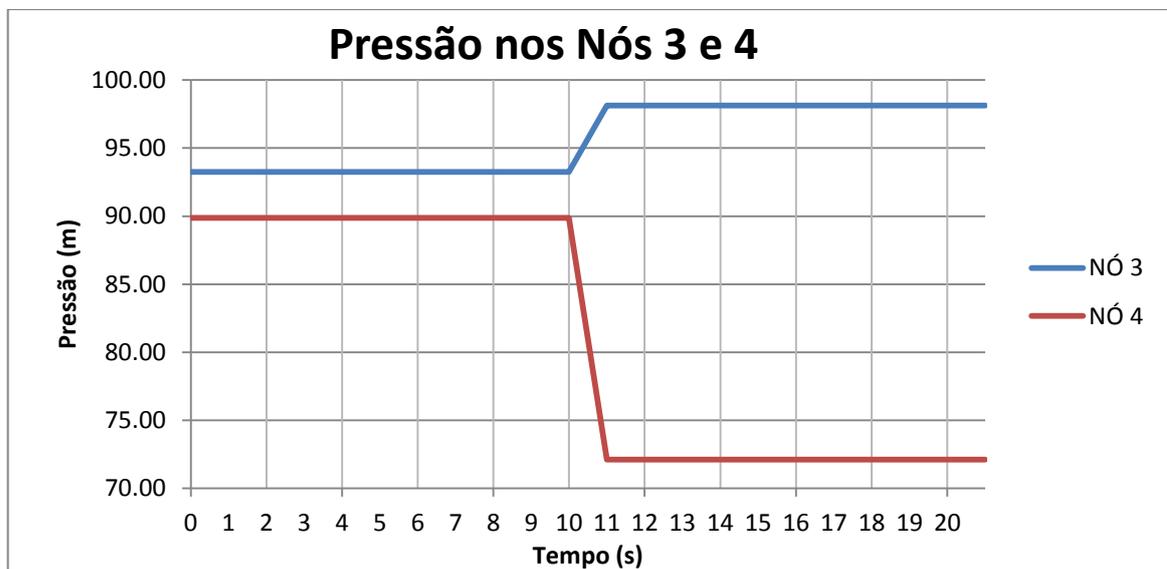
A pressão também sofreu variação como podemos verificar as figuras 25 e 26 e os resultados também foram iguais.

Figura 25 – Pressão nos nós Epanet.



Fonte: do Autor (2017).

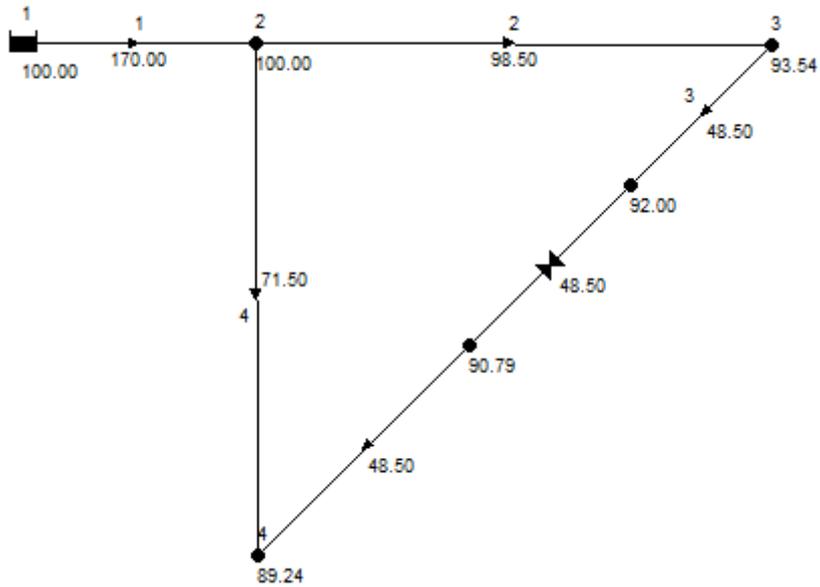
Figura 26 – Pressão nos nós Método Gradiente.



Fonte: do Autor (2017).

Outra simulação foi colocar o coeficiente de perda de carga igual a 10, isso ocasionou em uma perda de carga maior no sistema como podemos verificar na figura 27.

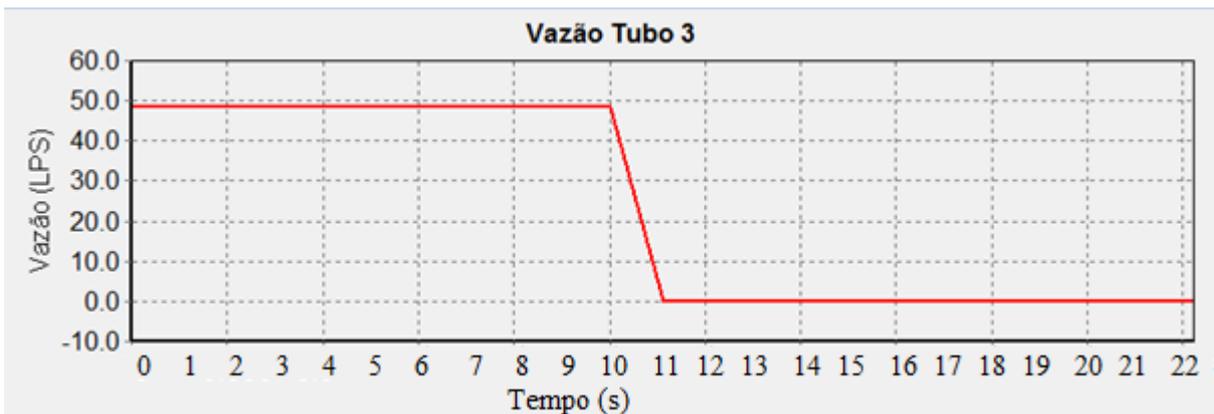
Figura 27 – Rede 01 K=10.



Fonte: do Autor (2017).

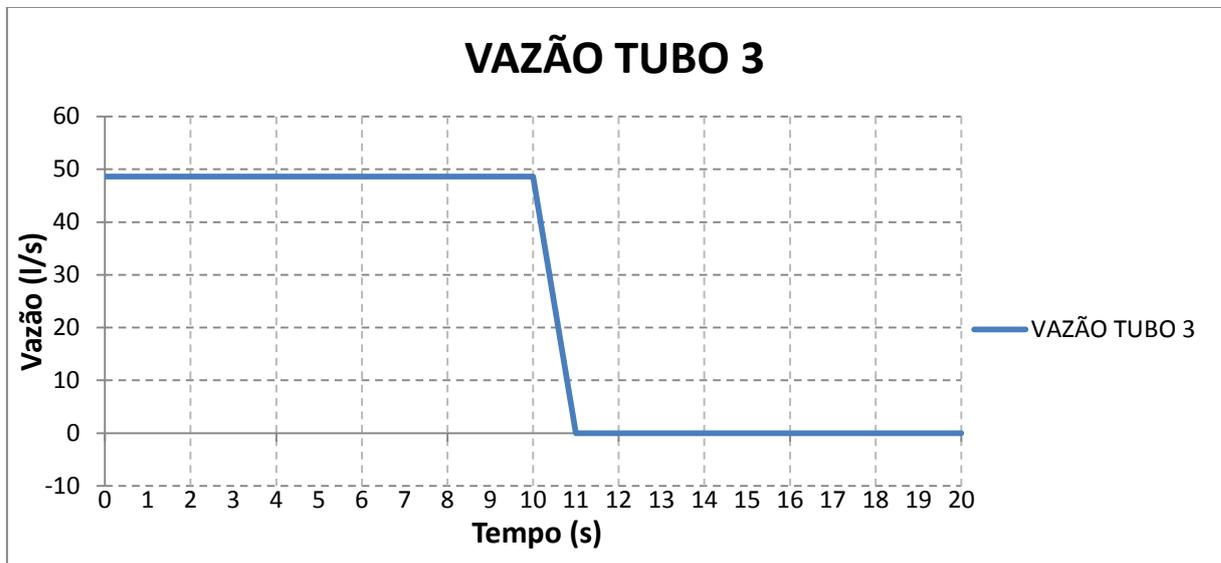
Novamente como podemos verificar nas figuras 28, 29, 30 e 31 que as vazões e pressões no EPANET estão iguais ao método GRADIENTE.

Figura 28 – Vazão EPANET Rede 01 K=10.



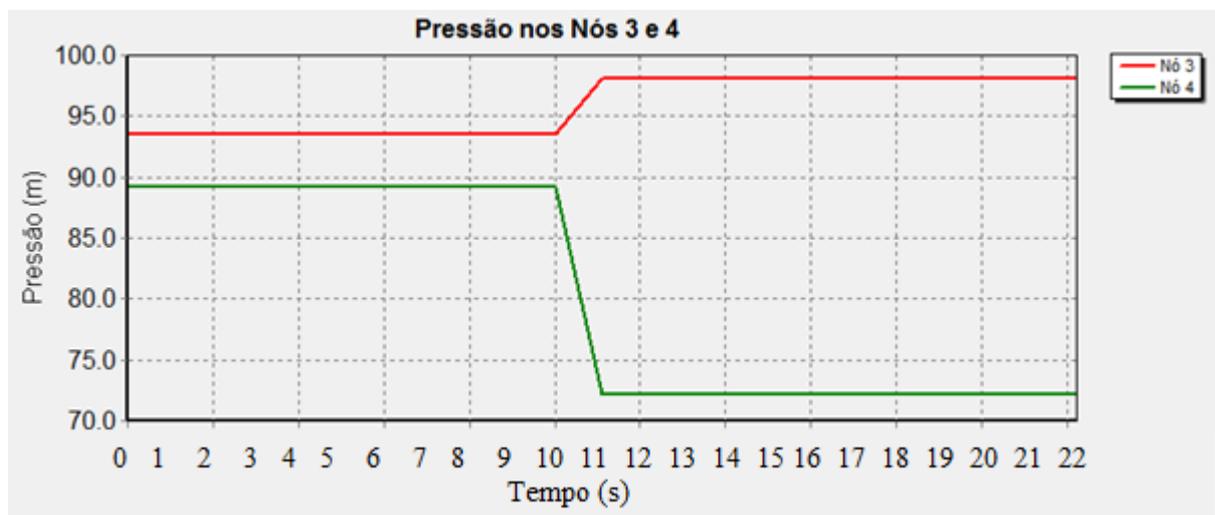
Fonte: do Autor (2017).

Figura 29 – Vazão método gradiente Rede 01 K=10.



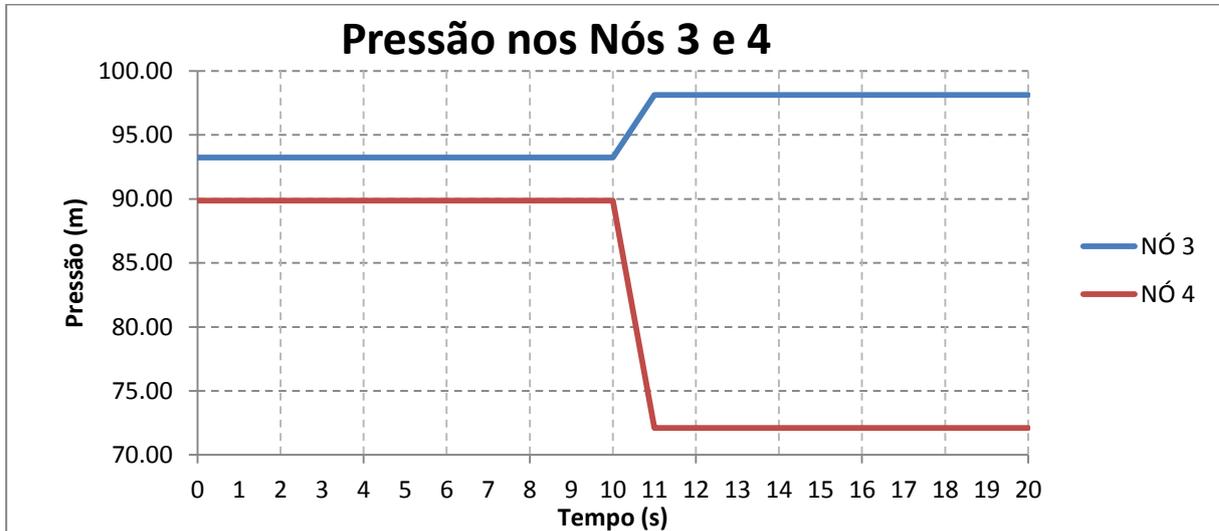
Fonte: do Autor (2017).

Figura 30 – Pressão nos nós EPANET rede 01 K=10.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 31 – Pressão nos nós Método Gradiente rede 01 K=10.



Fonte: do Autor (2017).

Após as simulações foram constatados que os valores estavam iguais e com isso a confirmação de que a fórmula para implantação de perda de carga estava correta e a metodologia informada no manual para sistemas fechados e abertos estavam corretas.

b) Estudo 02 – Avaliação em regime transitório

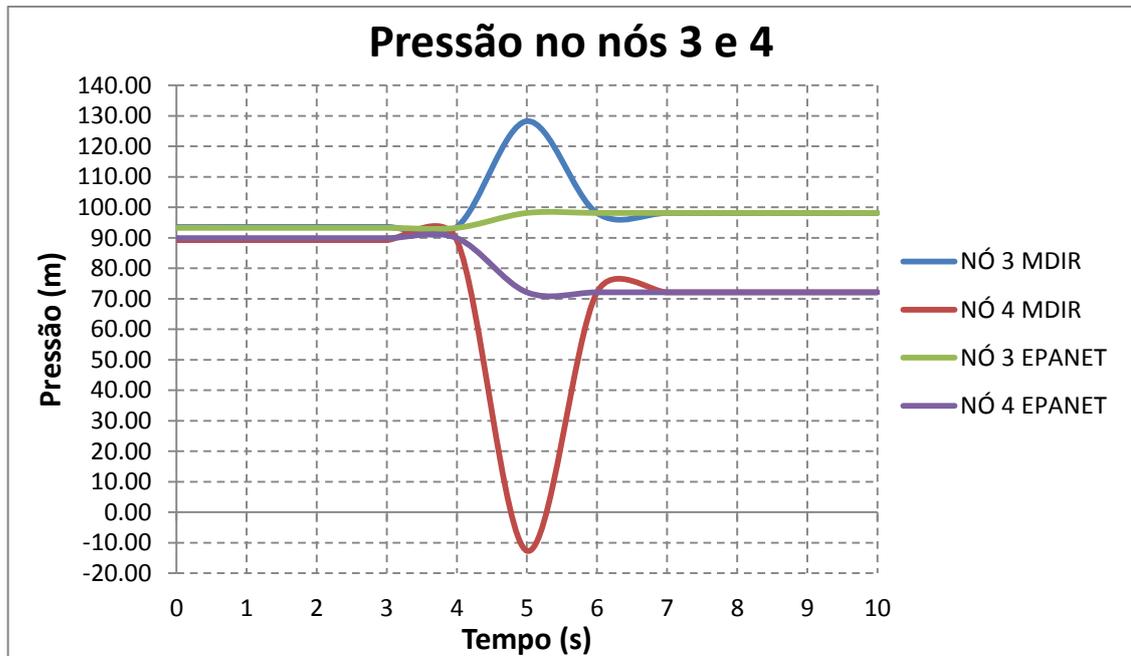
Para as simulações a seguir serão utilizadas situações de fechamento e abertura total, que podem ser utilizadas em todas as válvulas utilizadas pelo EPANET. A rede foi submetida a situações transitórias para comparar os resultados obtidos por um modelo dinâmico inercial rígido (MDIR), com os resultados de um modelo que não leva em consideração o efeito da inércia (EPANET).

A rede utilizada é a mesma do primeiro estudo onde consideramos um K igual a 10 como mostrados nas figuras 27 e 22. A simulação parte do momento em que a rede se encontrava em regime permanente e a partir de um determinado instante foi realizada uma manobra gerando assim transientes na rede.

Na figura 32 mostra uma comparação realizada entre o MDIR e o EPANET, o sistema comporta de maneira semelhante até o momento da realização de uma manobra de fechamento, a partir daí o MDIR mostra o transiente gerado, tendo pico de pressão positiva no

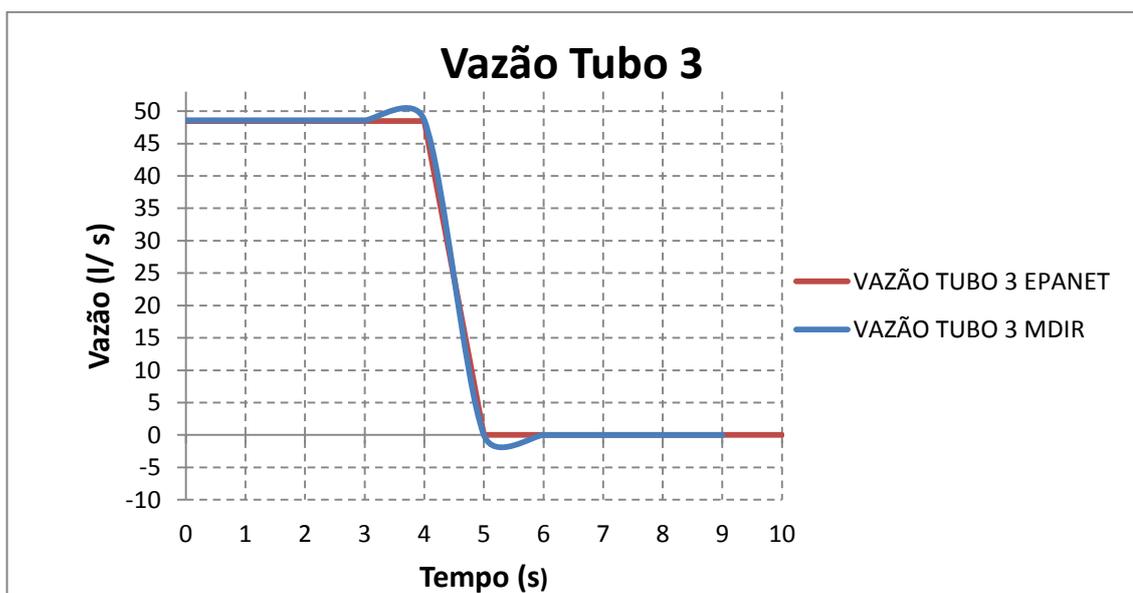
nó 3 e pressão negativa no nó 4 e estabilizou no próximo segundo na segunda iteração enquanto o modelo gerado pelo EPANET atualizou a pressão. Com relação à vazão podemos observar que as vazões obtiveram praticamente os mesmos resultados.

Figura 32 – Pressão nos nós 3 e 4 obtida pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017)

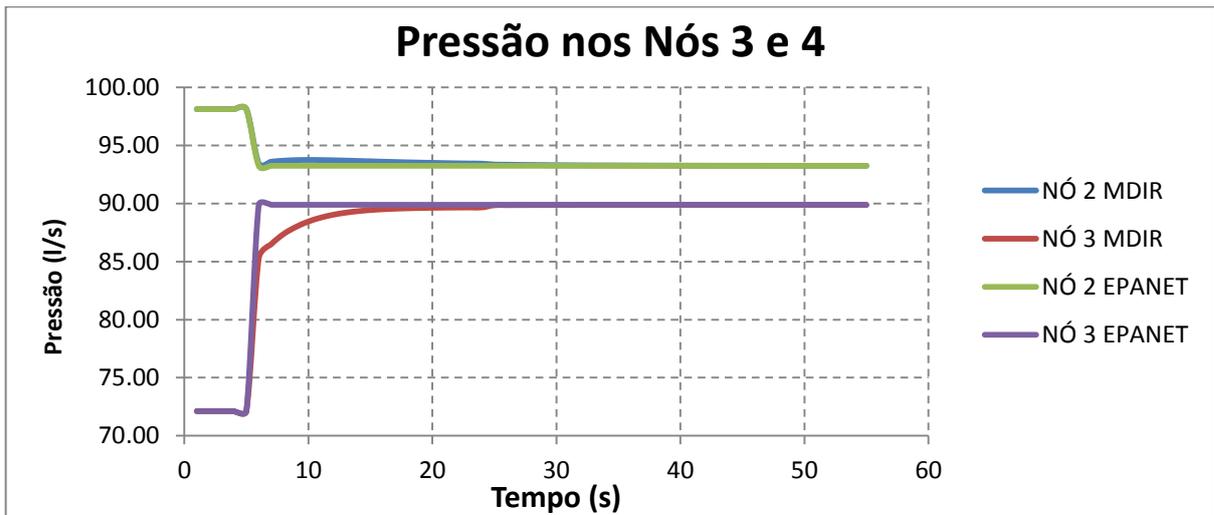
Figura 33 – Vazão no tubo 3 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

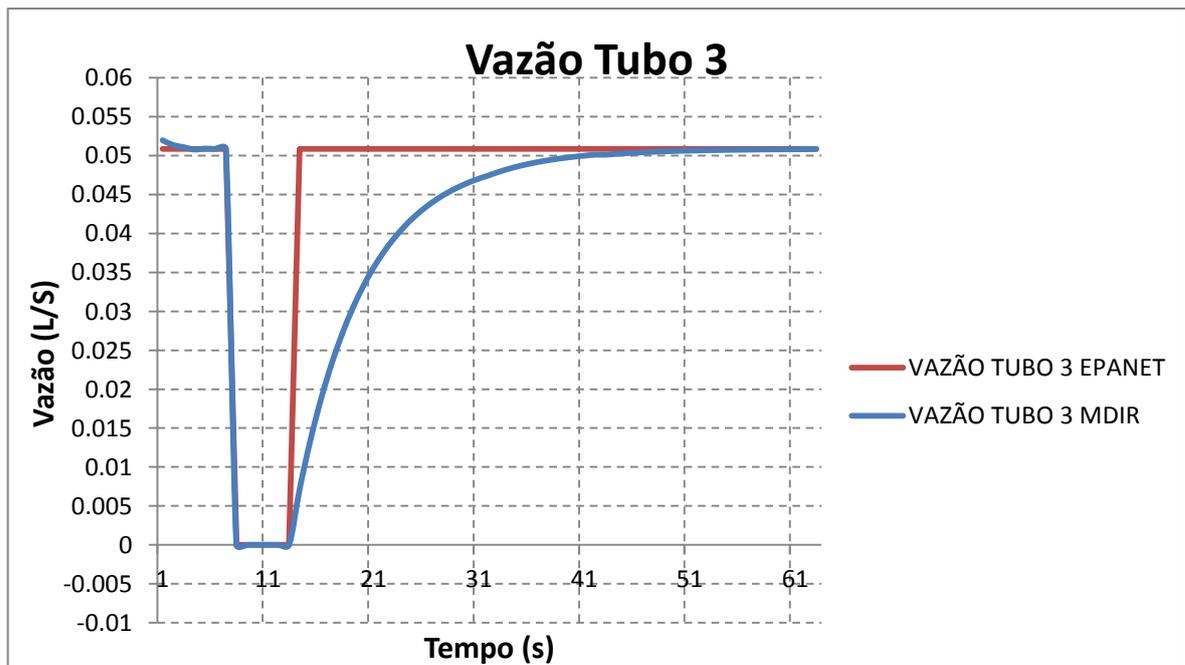
Uma nova simulação foi feita, após o sistema estabilizar e ficar em regime permanente foi realizada a abertura da válvula como mostrado nas figuras 34 e 35 abaixo, podemos verificar que nessa simulação que o efeito do transiente hidráulico foi aproximado ao modelo do epanet não acarretando assim diferenças significativas, no entanto podemos observar que o sistema demora um tempo para estabilizar.

Figura 34 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 35 – vazão no tubo 3 obtido pelos dois modelos.

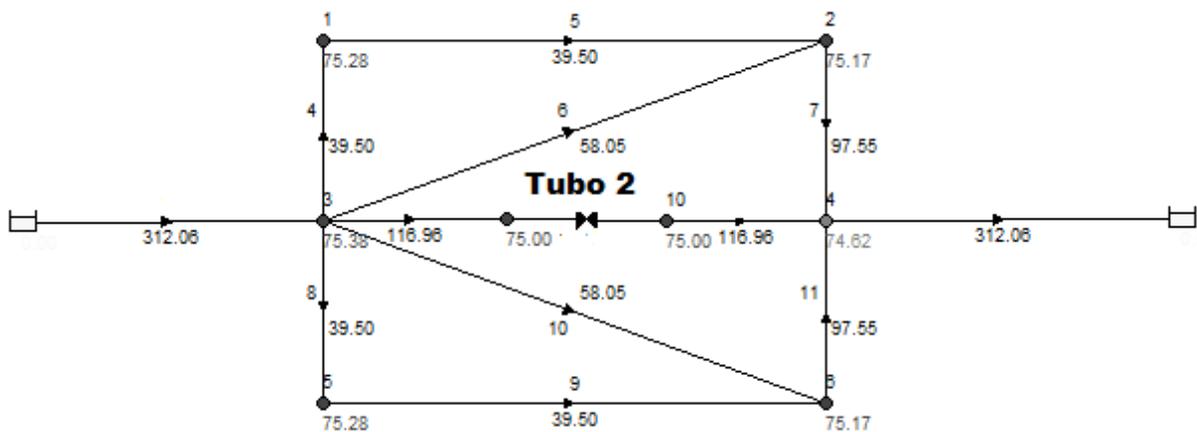


Fonte: do Autor (2017).

c) Estudo 03 – Avaliação em regime transitório Rede Luvizotto Jr.

Para as simulações a seguir serão utilizadas situações de fechamento e abertura total, que podem ser utilizada em todas as válvulas utilizadas pelo EPANET. Foi utilizada para simulação uma rede hidráulica empregada por (ANJO, 2008 apud Luvizotto Jr. (1995)). Trata-se de uma rede simétrica com todos os tubos de 500m de comprimento e 400mm de diâmetro, foi inserida na tubulação 2 uma válvula como mostra a figura a seguir:

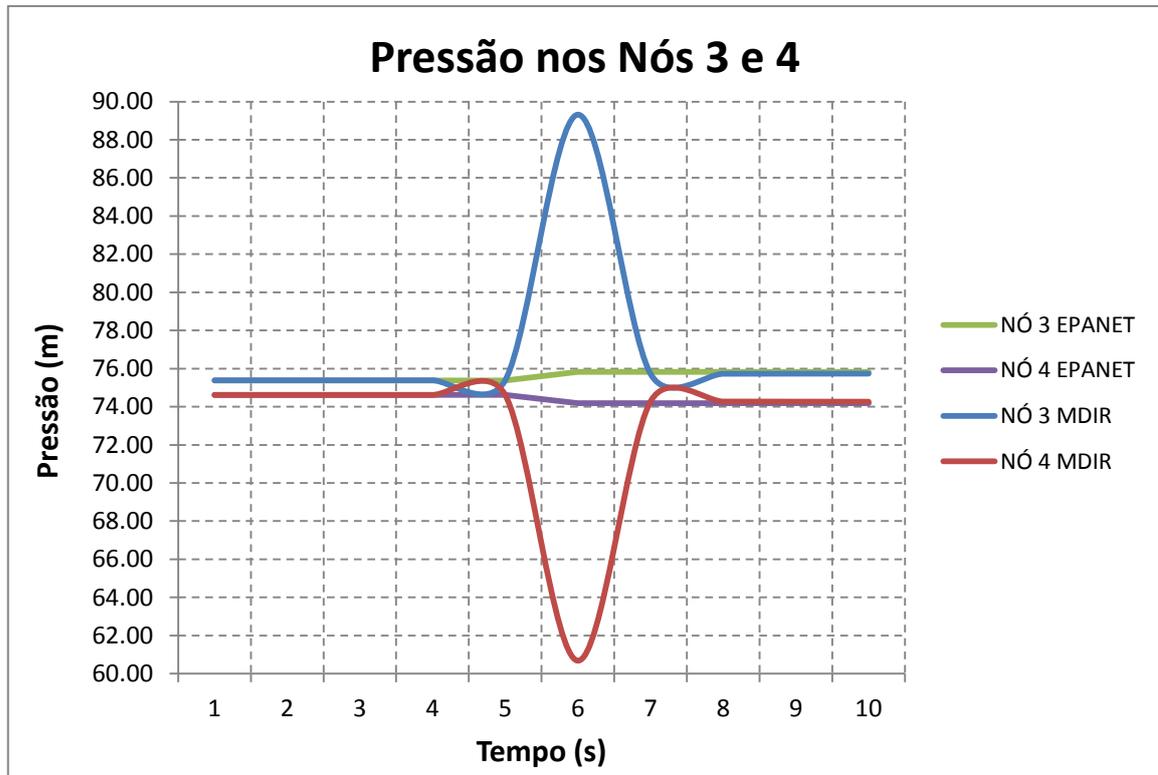
Figura 36 – Rede hidráulica Luvizotto Jr. $K=0$.



Fonte: do Autor (2017).

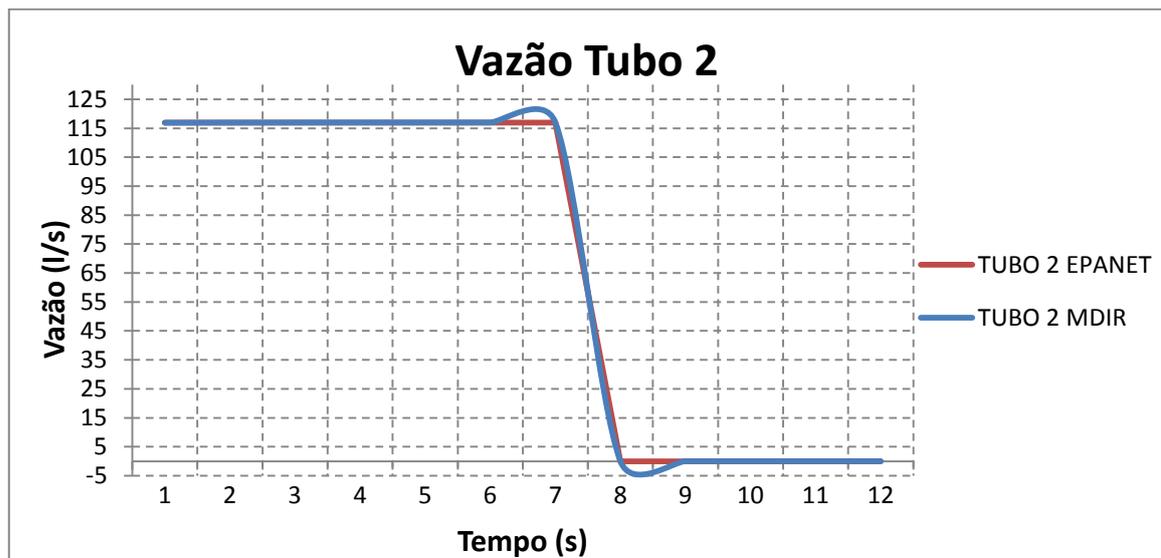
Para a primeira simulação foi considerada o coeficiente de perda de carga igual à zero, o sistema se encontrava estabilizado em regime permanente e em um determinado instante foi realizada uma manobra, observe nos gráficos gerados pelo EPANET que ao fechar a válvula as pressões e vazões foram atualizadas não levando em consideração o transiente gerado nesse instante, já o MDIR mostra no instante do fechamento das válvulas uma brusca alteração de pressão, isso pode ser demonstrado devido à consideração do transiente hidráulico.

Figura 37 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 38 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.

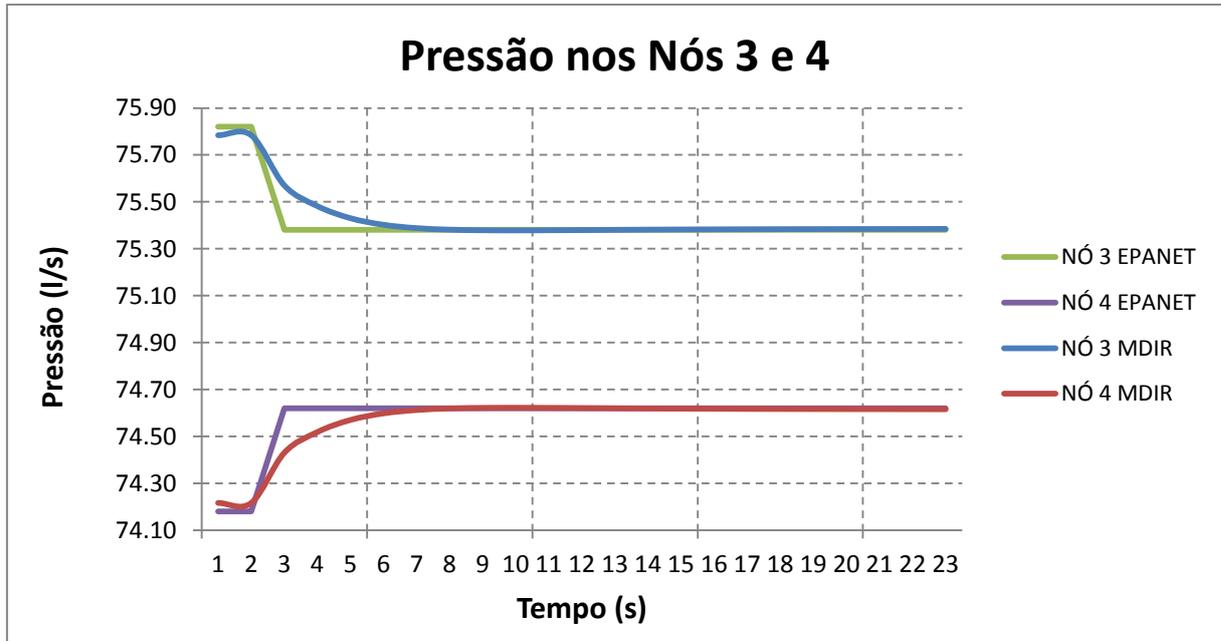


Fonte: do Autor (2017).

Uma nova simulação foi feita, dessa vez o sistema estava fechado e se encontrava em regime permanente até que foi realizada a abertura da válvula como mostrado na figura 39 e

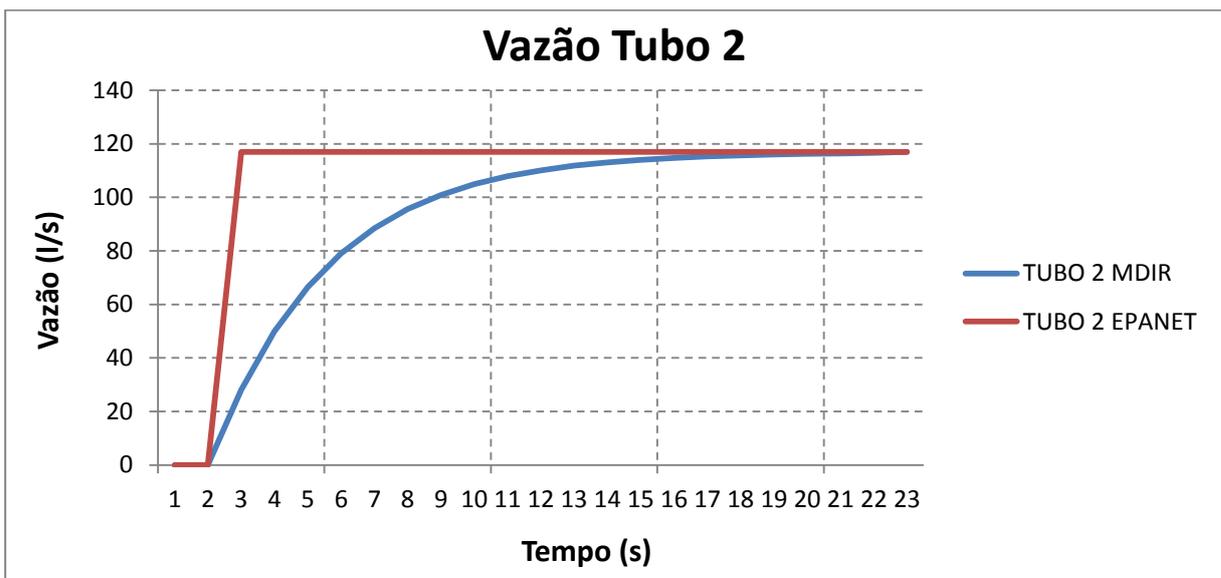
40 abaixo, podemos verificar que nessa simulação que o efeito do transiente hidráulico foi aproximado ao modelo do EPANET não acarretando assim diferenças significativas, no entanto podemos observar que o sistema demora um tempo para estabilizar.

Figura 39 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

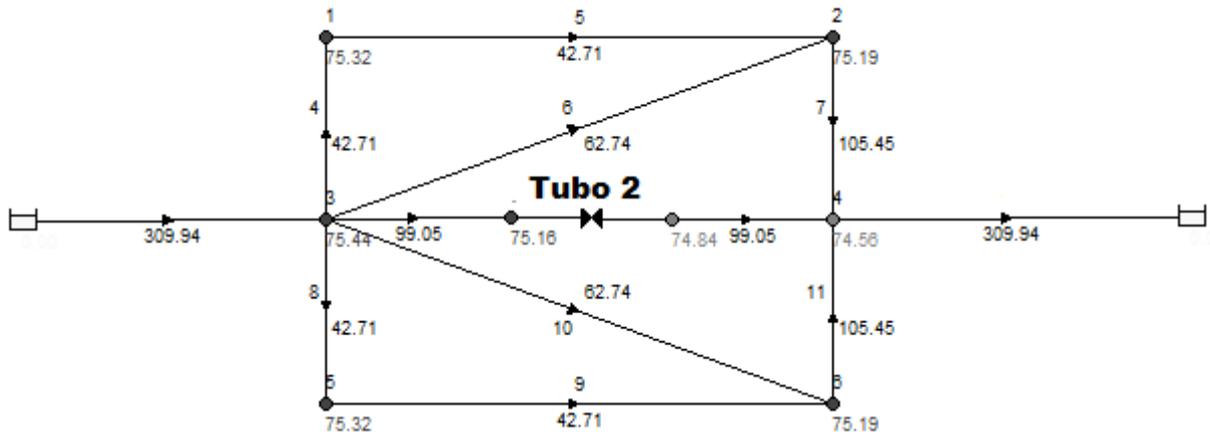
Figura 40 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

Para a próxima simulação foi considerada o coeficiente de perda de carga igual a 10.

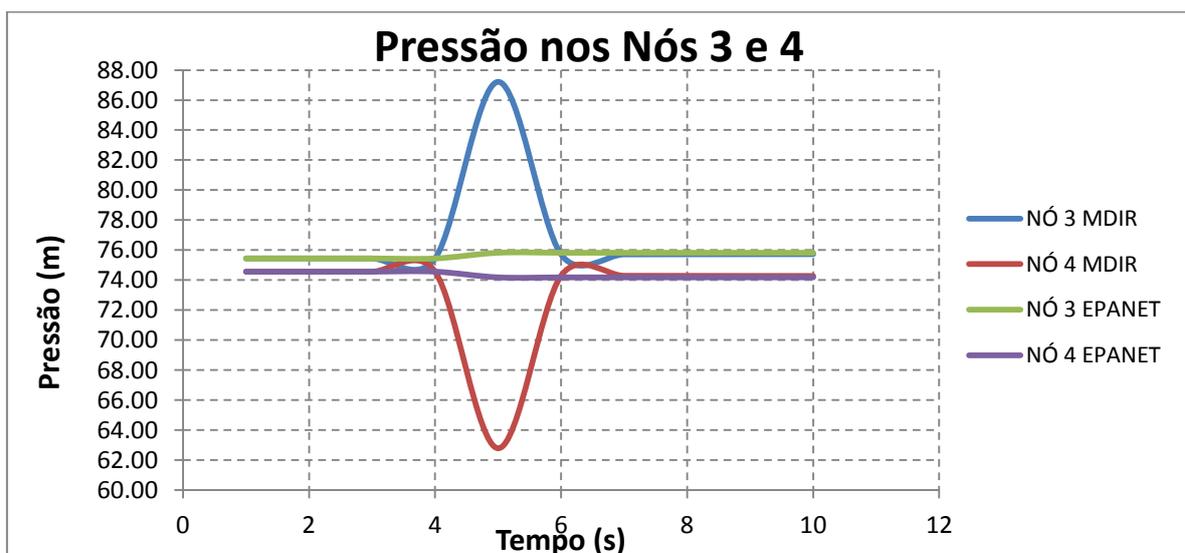
Figura 41– Rede hidráulica Luvizotto Jr. K=10.



Fonte: do Autor (2017).

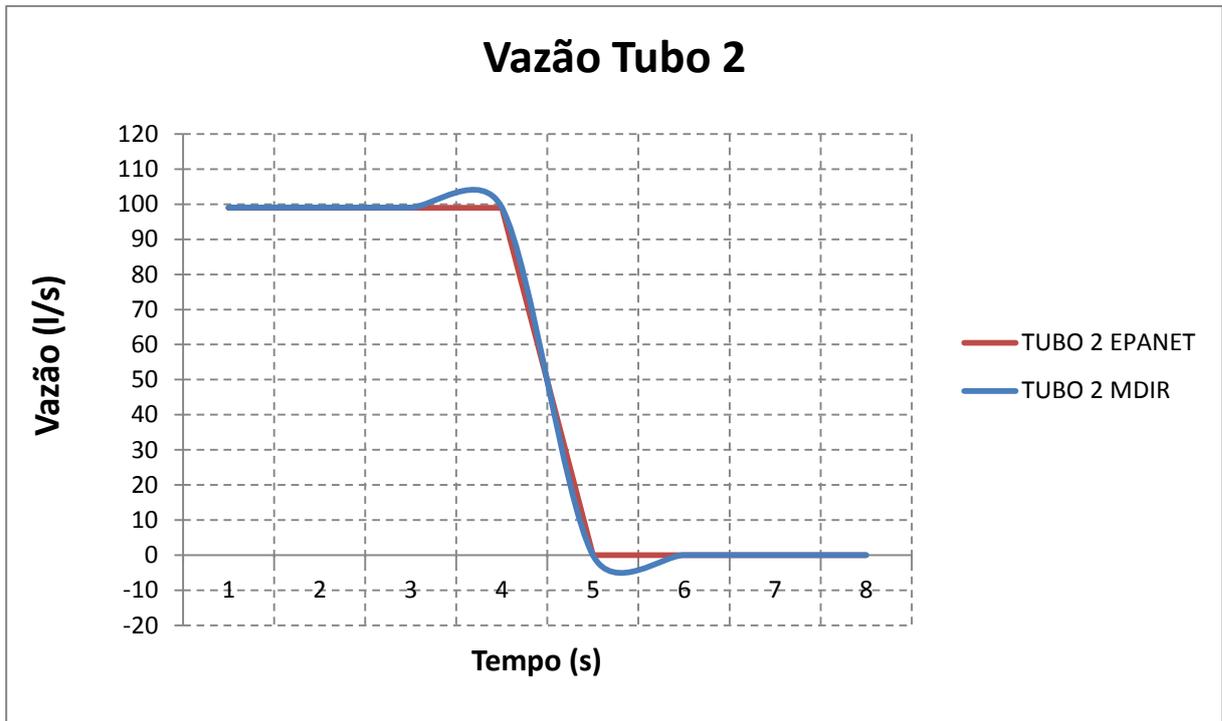
Para essa simulação foi considerado o fator de perda de carga fornecida pelo EPANET com K igual a 10, com a inclusão desse valor as vazões e pressões sofreram reduções. O sistema se encontrava em regime permanente, até que em um determinado instante foi realizada uma manobra, observe nos gráficos que no EPANET, ao fechar a válvula as pressões e vazões foram atualizadas não levando em consideração o transiente gerado nesse instante, já o MDIR mostra no instante do fechamento das válvulas uma brusca alteração de pressão, isso pode ser demonstrado devido à consideração do transiente hidráulico.

Figura 42 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

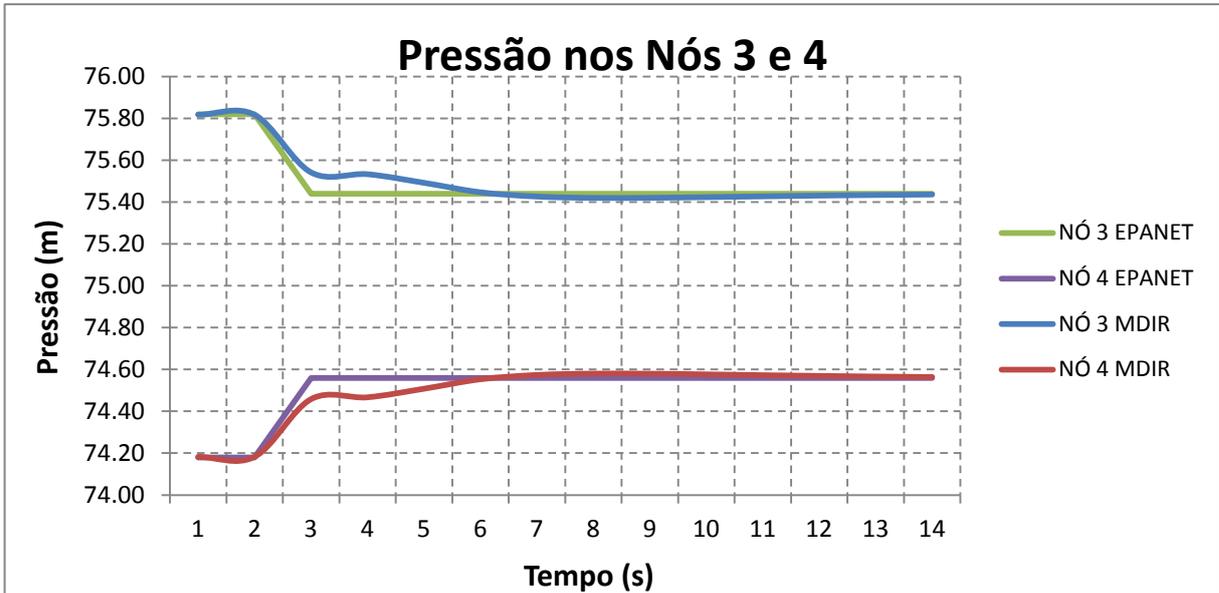
Figura 43 – Vazão no tubo 2 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

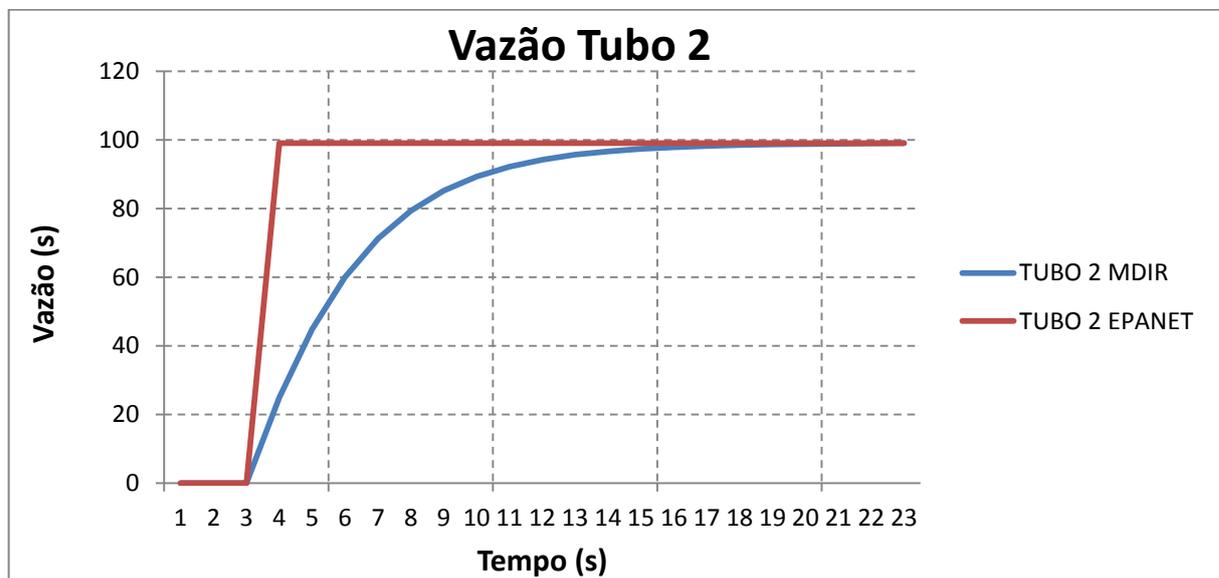
Uma nova simulação foi feita, dessa vez o sistema estava fechado e se encontrava em regime permanente até que foi realizada a abertura da válvula como mostrado na figura 44 e 45 abaixo, podemos verificar que nessa simulação que o efeito do transiente hidráulico foi aproximado ao modelo do EPANET não acarretando assim diferenças significativas, no entanto podemos observar que o sistema demora um tempo para estabilizar.

Figura 44 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 45 – Vazão tubo 2 obtido pelos dois modelos.



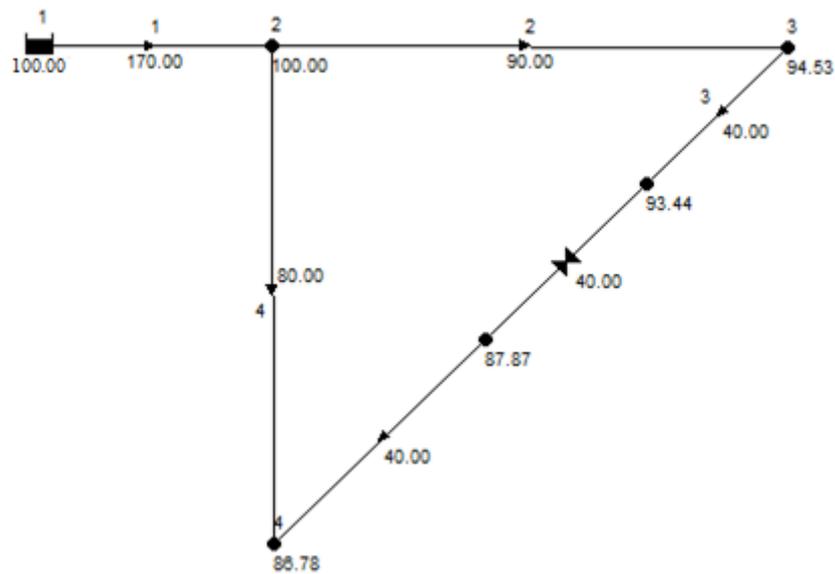
Fonte: do Autor (2017).

Após as simulações constatamos que os transientes hidráulicos tem uma grande variação no fechamento das válvulas enquanto para abertura percebemos que as pressões tendem a ficarem iguais ao modelo do EPANET, no entanto demorando mais tempo para atingir o valor.

d) Estudo 04 – Avaliação em regime transitório Válvula FCV

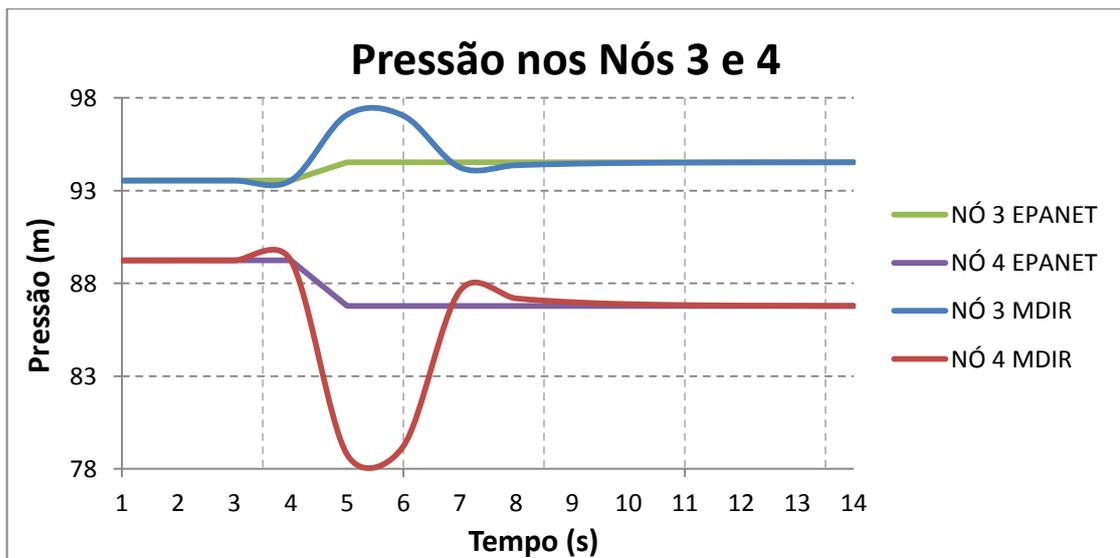
Uma nova simulação foi a de utilizar uma válvula FCV, esta válvula tem como função limitar a vazão em um valor máximo estabelecido. O sistema se encontrava em regime permanente e em um determinado instante foi efetuado uma manobra estabelecendo como parâmetro de controle de vazão um valor igual a 40 litros por segundo.

Figura 46 – Rede 01 com válvula FCV.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 47 – Pressão nos nós 3 e 4 obtido pelos dois modelos.



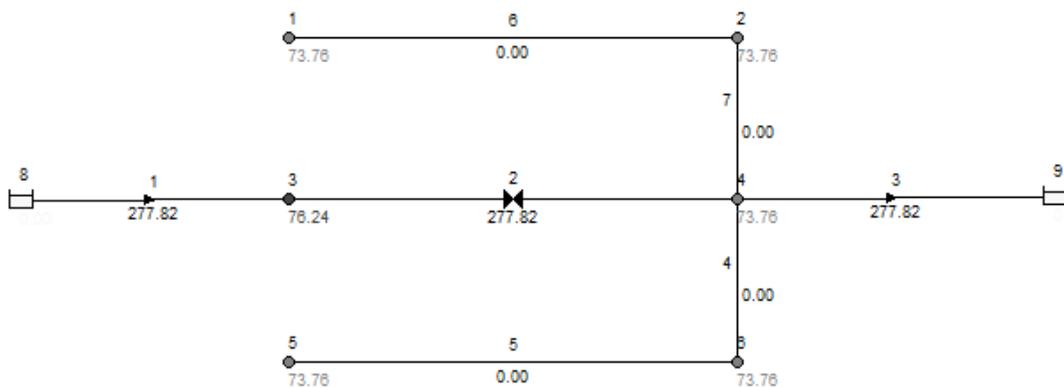
Fonte: do Autor (2017).

Como mostrado na figura 47 podemos verificar que ao estabelecermos um valor de 40 litros por segundo para a válvula, o sistema que se encontrava em regime permanente gerou um transiente hidráulico, isso comprova que qualquer manobra realizada gera uma alteração na rede.

e) Estudo 05 – Avaliação em regime transitório Válvula PRV

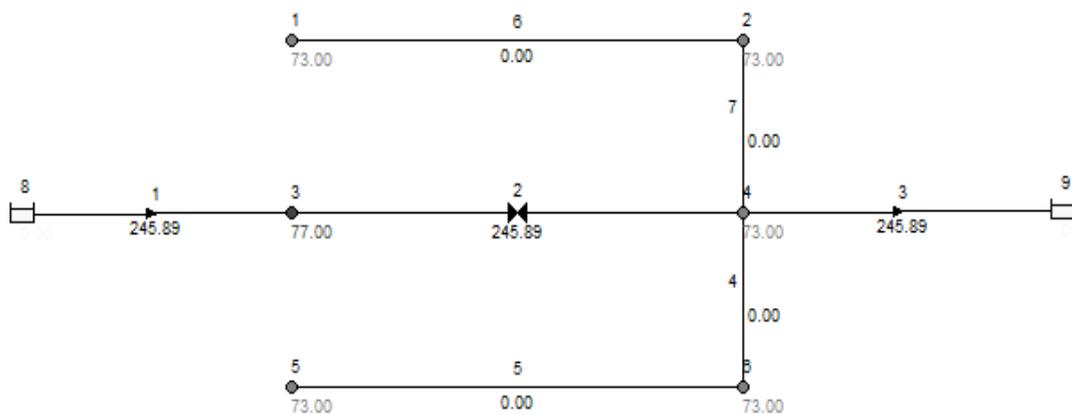
Para a simulação da válvula redutora de pressão PRV foi utilizada uma rede parecida com a do estudo 03 página 57, onde foram retirados alguns trechos. O sistema se encontrava em regime permanente e em determinado instante efetuou uma manobra na rede colocando como parâmetro 73 m, tendo como função reduzir à pressão a jusante abaixo do valor inserido.

Figura 48– Rede hidráulica PRV desativada.



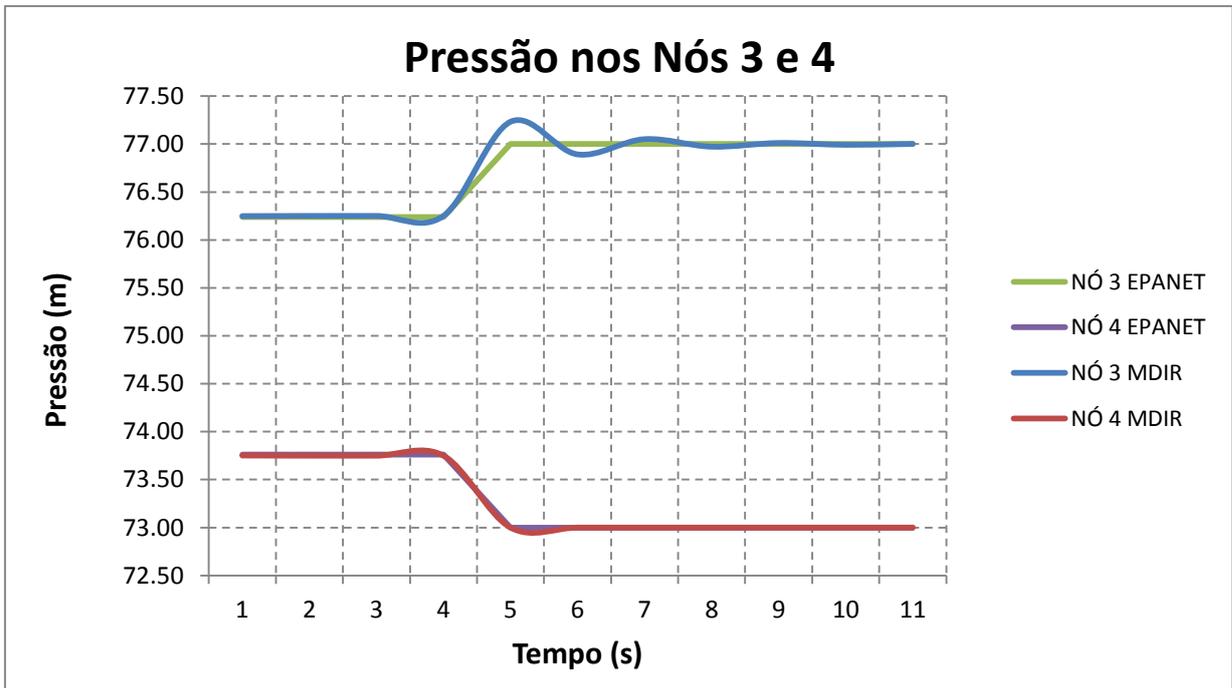
Fonte: do Autor (2017).

Figura 49 – Rede hidráulica PRV ativa.



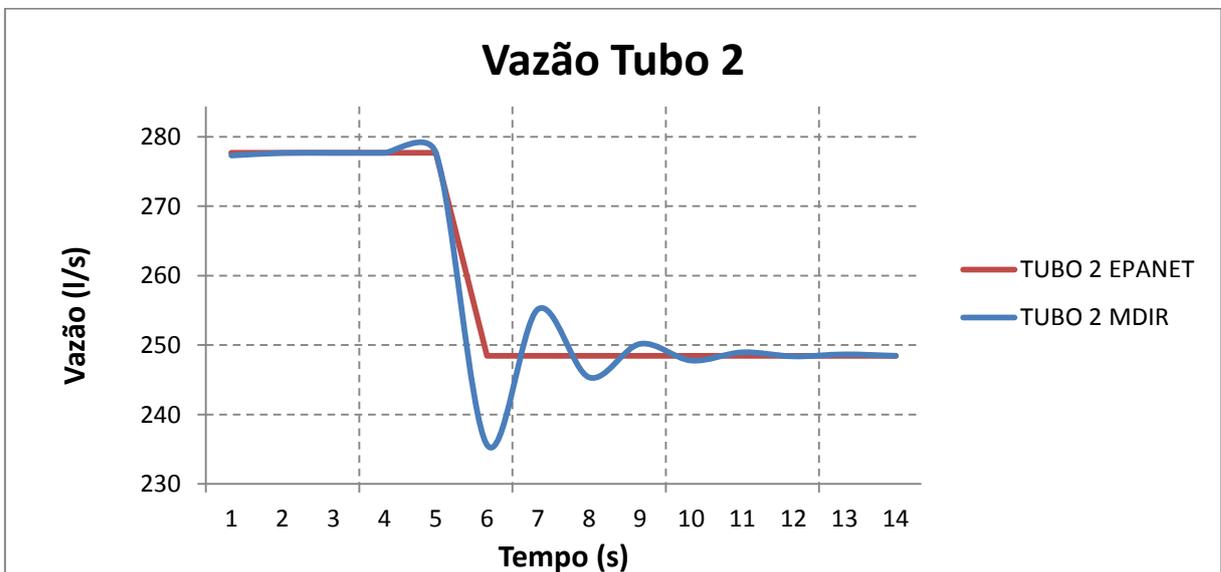
Fonte: do Autor (2017).

Figura 50 – Pressão nos nós 3 e 4.



Fonte: do Autor (2017).

Figura 51 – Vazão no tubo 2.



Fonte: do Autor (2017).

Após a simulação podemos notar que a pressão no nó 3 teve um transitório no momento em que foi efetuado a manobra fixando um valor de 73 m na válvula e consequentemente no nó 4 a jusante da válvula. Verificamos também no tubo 2 o transiente gerado e estabilizado ao longo do tempo.

6. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como intuito possibilitar a utilização de válvulas presentes no programa EPANET, no modelo dinâmico inercial rígido MDIR. O presente trabalho fez uma investigação no programa EPANET descobrindo e implantando ao modelo dinâmico inercial rígido MDIR os parâmetros utilizados para as válvulas em situação de fechamento e abertura total, possibilitando assim simular qualquer uma ao realizar este tipo de manobra, outras duas válvulas foram investigadas sendo uma válvula reguladora de vazão FCV e a outra válvula sendo redutora de pressão PRV. Foram simuladas diversas situações como fechamento, abertura, controle de vazão e redução de pressão e a obtenção dos resultados mostrou a real possibilidade de emprego de válvulas utilizadas no programa EPANET ao MDIR.

Dentre as simulações realizadas, foram constatados nas pressões que as situações de fechamento total eram as que geravam maiores transientes, seguido pelas manobras de controle de vazão e redução de pressão, para a situação de abertura o transiente gerado não teve valores significativos em relação ao EPANET, onde a diferença entre os dois modelos está em que o MDIR demora mais para atingir o regime permanente.

Nas simulações em que foram comparadas as vazões os comportamentos em relação aos fechamentos foram semelhantes entre os dois métodos, para situação de abertura o MDIR apresentou o transiente hidráulico e ao atingir o regime permanente os resultados foram semelhantes. Para simulação da FCV não mostrou o comportamento da tubulação tendo em vista que o modelo matemático apenas adota o valor informado, já para a PRV foi gerado transiente com picos positivos e negativos até que atingisse o regime permanente.

Essas simulações servem para retratar a importância desse trabalho, que a partir desses resultados podemos dimensionar um sistema de abastecimento com as situações de transientes mais próximas a realidade.

O presente estudo mostra a possibilidade de utilização de válvulas utilizadas pelo EPANET ao MDIR, e esperasse em trabalhos futuros a continuação deste trabalho investigando a utilização de bombas, estudando novas redes e aplique esse modelo ao

EPANET, melhorando ainda mais este software tão utilizado no setor didático e profissional para sistemas de abastecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJO, Luiz Fernando Resende dos Santos. **Modelo Hidráulico para Transitórios Lentos em Conduto Forçado**. Campinas, p. 154. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) -Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Campinas,Campinas, 2008.

CARVALHO, Asthar Luana Barcelos. **Interação fluido-estrutura sob ação de transiente hidráulico**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011. Disponível em: < <http://www.poscivil.uff.br/conteudo/interacao-fluido-estrutura-sob-acao-de-transiente-hidraulico>>. Acesso em: 30 abr. 2015.

E-Civil. **EPANET: Modelagem de redes de distribuição de água em sistemas de abastecimento**. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/softwaresepanet_redes_distribuicao_agua.htm>. Acesso em: 05 maio 2015.

ELETROBRAS/PROCEL; UFPB/FUNAPE. **Manual do Usuário – EPANET 2.0 Brasil**. 2009. p. 201. Disponível em: < <https://www.passeidireto.com/#/arquivo/3712335/manual-do-epanet-brasil-20/9>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

PAULI, Evandro Armini de; ULIANA, Fernando Saulo. **Acessórios de Tubulação Industrial**. SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial , CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão, 1996. p. 56. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/#/arquivo/10952413/acessorios-de-tubulacao-industrial-senai--companhia-siderurgica-do-tubarao/5>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

ROCHA, Marcelo da Silva. **Influencia do fator de atrito no calculo do transiente hidráulico**. 1998. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. Disponível em: < <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000134204&fd=y> >. Acesso em: 25 abr. 2015.

ZATTONI, Celio Carlos. **Materiais para tubulação: Válvulas e Acessórios**. 2005. 194f. Faculdade De Tecnologia De São Paulo, Departamento de Hidráulica, São Paulo, 2005. Disponível em: < <https://www.passeidireto.com/#/arquivo/1072188/materiais-para-tubulacao--vol-3/10>> Acesso em: 10 mar. 2016.

TODINI, E., PILAT, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks, **Computer applications in water supply**, vol. 1, System analysis and simulation, editado por: Coubeck, K.B., and Orr, C.H., John Willey & Sons, 1988, p.1-20.