

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS  
MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

**THOMAZ FELIPE SOARES ARNIZANT**

**ANÁLISE DE DISPERSÃO: EPANET x MDIR**

**UBERABA-MG**

**2016**

**THOMAZ FELIPE SOARES ARNIZANT**

**ANÁLISE DE DISPERSÃO: EPANET x MDIR**

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

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

**UBERABA-MG**

**2016**

Dedico este trabalho à minha família e minha namorada Viviane que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis durante todo o mestrado.

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

A539a Amizant, Thomaz Felipe Soares  
Análise de dispersão: EPANET x MDIR / Thomaz Felipe Soares Amizant. -- 2016.  
28 f. : il., fig., graf.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2016  
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo

1. Engenharia de software. 2. Software – Testes. 3. EPANET (Programa de computador). 4. Hidráulica. I. Anjo, Luiz Fernando Resende dos Santos. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 004.41

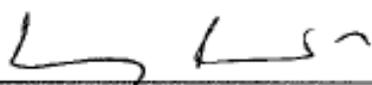
THOMAZ FELIPE SOARES ARNIZANT

ANÁLISE DE DISPERSÃO - EPANET X MDIR

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

Uberaba, 15 de fevereiro de 2016

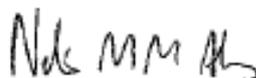
Banca Examinadora:



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



Profa. Dra. Mônica Hitomi Okura  
Membro Titular – UFTM



Prof. Dr. Nélcio Muniz Mendes Alves  
Membro titular – IFTM

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo apoio e toda paciência durante o desenvolvimento do meu trabalho.

À minha namorada Viviane pelo incentivo e pela força nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo, pela sua orientação, dedicação e paciência na construção deste conhecimento.

Ao Prof. Mr. Gustavo Marino Botta pelo auxílio e todo o tempo que disponibilizou para que meu trabalho fosse concluído.

A todos os meus colegas de trabalho, pela paciência e pelo auxílio na flexibilização do meu horário de trabalho quando precisei.

Aos professores do PMPIT, pelos conhecimentos transmitidos.

"Hoje eu vou fazer o que outros não vão, então amanhã conseguirei fazer o que outros não vão conseguir."

Jerry Rice – Hall da Fama da NFL (National Football League)

## RESUMO

Este trabalho vislumbrou desenvolver a simulação de análise de dispersão (qualidade), no software EPANET, cujas vantagens principais são ter código aberto e ser amplamente utilizado em trabalhos científicos. Apesar desses e vários outros pontos positivos do EPANET, o mesmo não utiliza em seus cálculos os efeitos da inércia. Como metodologia, foram adquiridos os arquivos fontes do software EPANET com o Modelo Dinâmico Inercial Rígido (MDIR) e realizou-se a análise da engenharia de software para o entendimento de seu funcionamento. Foram simuladas redes de distribuição de água no software, feita análises de dispersão, utilizando o método gradiente, nativo no EPANET, e a mesma análise usando o MDIR, e traçou-se um paralelo entre os resultados encontrados. Com a introdução da análise de dispersão utilizando o MDIR, no software EPANET, foi otimizado o motor de cálculo do EPANET utilizando algoritmos que consideram os efeitos da inércia. Conclui-se que para o estudo da parte de qualidade da água, os cálculos implementados se apresentam como uma solução viável para uma análise mais real do comportamento da rede durante um processo de dispersão de um componente.

Palavras-chave: EPANET, dispersão, rede de distribuição de água, MDIR.

## **ABSTRACT**

As a research problem, it was searched to develop a quality analysis simulation, taking into account the effect of inertia in the EPANET software, that its main advantage is to be open source and be widely used in scientific papers. Despite these and many other positive aspects of the EPANET, the same doesn't use in its calculations the effect of inertia. As methodology, were purchased the source code files of the EPANET software, conducted the analysis of software engineering, developed the algorithms necessary for the dispersion analysis wear calculations generated by the implemented method (IRDM, which takes into account the inertia) and discarding the native method in the software. It is simulated the IRDM in the hydraulic network as the model hydraulic calculations take into account the inertia and monitoring of load and flow in the hydraulic systems is necessary to detect the supply levels and pressure surges that can cause disruptions in the pipeline. With the introduction of the dispersion analysis taking into consideration the inertia in EPANET software it was optimized the EPANET calculation engine using algorithms that consider the effects of inertia. It is concluded that to study the quality of the water, the implemented calculations present as a substantial solution to a more realistic analysis of network behavior during a dispersion process of a component.

Keywords: EPANET, dispersion, hydraulic network, IRDM.

## **LISTA DE SIGLAS**

**DEV-C++** – Ambiente gráfico de desenvolvimento para linguagem C/C++.

**DLL** – Dynamic Link Libraries – Biblioteca de Vinculação Dinâmica

**EPANET** – Software de simulação de redes de distribuição hidráulica

**MDIR** – Modelo Dinâmico Inercial Rígido

**NBR** - denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>14</b>
3.1	CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO PARA A SIMULAÇÃO HIDRÁULICA .....	14
3.2	ESTUDO DOS CÁLCULOS E DA PROGRAMAÇÃO DO EPANET.....	14
3.2.1	Engenharia Reversa – Depuração .....	15
3.2.2	Adaptação no ambiente Delphi .....	17
3.2.3	Adaptação na DLL .....	19
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASOS .....</b>	<b>21</b>
4.1	ESTUDO DE CASO 01 – REDE 1.....	21
4.2	ESTUDO DE CASO 02 – REDE 2.....	24
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo TSUTIYA (2006) o abastecimento de água é dividido nas seguintes partes: manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição.

O manancial é a origem de onde é retirada a água para o abastecimento como, por exemplo, os rios.

A captação engloba os equipamentos instalados junto ao manancial para extrair a água de forma adequada. A captação é a primeira unidade do sistema de abastecimento de água e seu funcionamento é importante, pois dele é que se desencadeia o restante do processo.

A estação elevatória é o conjunto de obras e equipamentos para deslocar a água para a unidade seguinte. São unidades providas de bombas hidráulicas e tanques que elevam e aumentam a pressão da água.

A adutora é a canalização que conduz a água entre as unidades, isto é, o encanamento destinado a conduzir as águas.

A estação de tratamento de água é o conjunto destinado a tratar a água para o consumo. Nesta etapa é feito um tratamento químico, a floculação, a decantação e a filtração. Segundo a SABESP (2014), o conjunto destas 3 últimas etapas é chamado de clarificação, pois nelas são retiradas as partículas de impurezas deixando a água límpida.

O reservatório é a parte do sistema de distribuição de água que regula as condições de pressões na rede de distribuição. Inicialmente a água é armazenada em reservatórios de distribuição e posteriormente em reservatórios de bairros, espalhados em pontos estratégicos na cidade.

A rede de distribuição é a estrutura do sistema mais próxima à realidade urbana e é constituída de um conjunto de tubulações interligadas instaladas ao longo das vias públicas, junto aos edifícios, conduzindo a água aos pontos de consumo (moradias, escolas, hospitais).

Este projeto executou a simulação de qualidade utilizando o Modelo Dinâmico Inercial Rígido (ANJO, 2008) que abrange as duas últimas etapas que são: o reservatório e a rede de distribuição. Foi considerada a água já tratada e realizada a simulação com a pressão do reservatório na rede de distribuição.

Esta simulação é importante, pois o acompanhamento da carga e da vazão, no decorrer do tempo, nas instalações hidráulicas é necessário quando se estuda os resultados de manobras que alteram as condições de escoamento.

A análise do escoamento de fluido através de um sistema hidráulico a condutos forçados é usualmente feita de forma unidimensional segundo o eixo dos condutos, seguindo diferentes hipóteses simplificadoras, que permitem a concepção de distintos modelos. Estes modelos são classificados, como observa Cabrera, et al. (1994), em modelos dinâmicos e estáticos, segundo a variação ou não do escoamento no tempo. Os modelos dinâmicos se subdividem em modelos dinâmicos inerciais e não inerciais, caso levem ou não a inércia como elemento na variação temporal. Os modelos dinâmicos inerciais podem, por sua vez, considerar ou não efeitos de deformação do fluido e do conduto como decorrência, o que leva a sub-classificá-los em elásticos ou não elásticos (rígidos). (ANJO, 2008)

O EPANET é um software que simula sistemas de tubulação de distribuição de água. É um software de código aberto (domínio público) sendo possível sua cópia e/ou alteração do código fonte. É um programa para a plataforma Windows que realiza simulação ao longo do período de movimento da água dentro de redes de tubulação pressurizada. (EPA, 2013)

Heller e Pádua (2010) enfatizam a importância do uso cotidiano de simulações no EPANET, destacando que os problemas operacionais devem ser resolvidos com mais rapidez e por isto não podem depender de licitações. Como os problemas na rede hidráulica urbana são resolvidos com os materiais guardados em estoque no município, então no lugar de um projeto completo se faz uma simulação usando os dados desses mesmos equipamentos. Os modelos de simulação contribuem, desta forma, para soluções rápidas e com custos menores.

O problema abordado neste trabalho é desenvolver a possibilidade de simular análises de qualidade, no caso a dispersão de um componente na rede de distribuição, levando em consideração o efeito da inércia.

## **2 OBJETIVOS**

Simular redes de distribuição de água no software EPANET, comparando esse com o Modelo Dinâmico Inercial Rígido (MDIR) – elaborado por ANJO (2008) – já integrado e em funcionamento, para a análise de dispersão de um componente. Comparar os resultados gerados pelo EPANET com os resultados gerados do MDIR.

Utilizar o software EPANET para a análise de qualidade da água, mas utilizando o MDIR para os cálculos hidráulicos. O modelo MDIR leva em consideração os efeitos da inércia na rede, mostrando uma divergência com o modelo gradiente que é utilizado no EPANET.

### 3 DESENVOLVIMENTO

A metodologia utilizada partiu da aquisição do código fonte do software EPANET, visto que os mesmos são de domínio público. Após isso foi feita a análise da engenharia de software (programação) utilizada no sistema original EPANET para determinar a forma de armazenamentos dos dados das tubulações, reservatórios, bombas e outros. Depois, a compreensão da forma de integração e funcionamento do MDIR no EPANET, interpretando sua lógica e analisando em tempo de execução todo o seu código fonte. Realização de uma pesquisa experimental onde foram validados os resultados com uma série de simulações, cujos valores resultantes da análise de dispersão dos dados hidráulicos do modelo MDIR foram comparados com a mesma análise, porém com os dados hidráulicos do modelo padrão utilizado no software EPANET (Método Gradiente).

#### 3.1 CONTRIBUIÇÃO DESTE TRABALHO PARA A SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

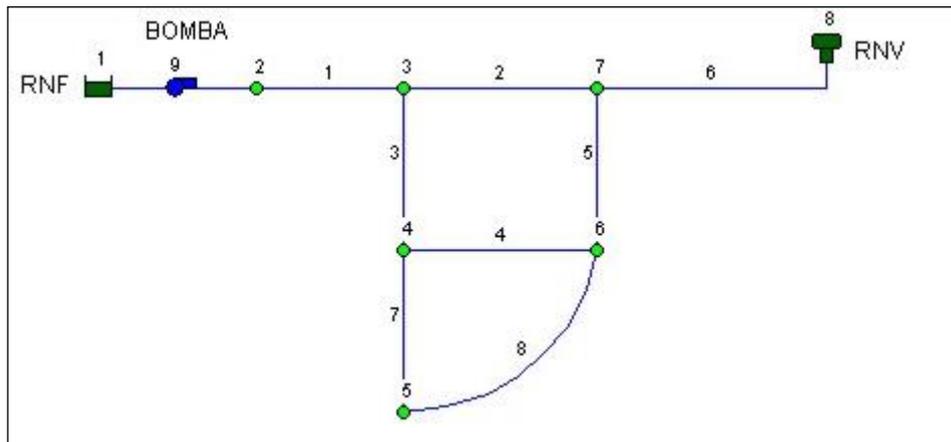
Utilizando-se da análise de dispersão que leva em consideração a inércia busca-se aperfeiçoar os resultados obtidos com o EPANET. Desde o início do projeto teve-se a preocupação de manter a compatibilidade das funções, mantendo o método gradiente e acrescentando os resultados gerados no modelo MDIR, para que o pesquisador possa rodar os dois métodos e efetuar as comparações, assim como foi feito neste trabalho.

#### 3.2 ESTUDO DOS CÁLCULOS E DA PROGRAMAÇÃO DO EPANET

Partindo do software EPANET original, BOTTA (2014) elaborou a programação lógica (algoritmo) do MDIR e integrou-o ao mesmo. Mantiveram-se todas as suas funcionalidades já oriundas com o intuito de utilizar os resultados de análises também com o método gradiente.

Uma rede de distribuição de água é composta de tubos, nós (junções), bombas, válvulas e tanques de armazenamento ou reservatórios (Figura 1). O EPANET fornece vários dados sobre os componentes da rede: o fluxo de água em cada tubo, a pressão em cada nó e a altura de água em cada tanque.

Figura 1 - Exemplo de rede de tubulação no EPANET



Fonte: Software EPANET, 2016

Após estudos práticos no software e constatado que o mesmo não leva em consideração os efeitos da inércia em seus cálculos hidráulicos, foram compreendidas as fórmulas que o MDIR utiliza para os seus cálculos. Essas equações permitem determinar as variáveis de estado; carga, vazão e escoamento ao longo de toda a rede de acordo com o transcorrer do tempo.

A diferença na convergência de um método não inercial (Modelo Gradiente) com um modelo inercial proposto (MDIR) é que no modelo inercial trata-se de uma evolução de acordo com o tempo em que o fenômeno é descrito fisicamente a partir de uma condição inicial para uma outra condição qualquer. Então cabe observar que o  $dt$  na fórmula precisa se adequar ao fenômeno físico (inércia), sendo ele de valor pequeno para garantir a representação da derivada. O uso de  $dt$  de valor alto pode não representar corretamente a evolução do efeito da inércia de acordo com o tempo na rede.

### 3.2.1 Engenharia Reversa – Depuração

Para o desenvolvimento do trabalho, foi preciso estudar a engenharia do EPANET para compreender toda a funcionalidade de seus módulos e funções para compreender a implementação do MDIR no software.

Foi feita a depuração do programa mostrando a ordem de execução linha por linha, facilitando o estudo prático em tempo de execução. Para a depuração das funções do EPANET, que se encontra em um arquivo feito na linguagem C (dll) foi usado o software DEV-C++, muito difundido para essa prática.

Foi obtido o código fonte do EPANET no site da EPA - United States Environmental Protection Agency (2013), na seção downloads. O item *EPANET 2 source code files* contém o código fonte em Delphi e seus respectivos componentes adicionais e possui também o código fonte em C da DLL: epanet2.dll.

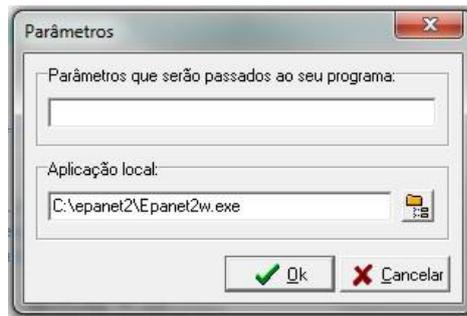
A depuração foi executada com sucesso, porém não depurava a DLL. No site da Epanet Hydraulic Network Analysis (MACKE, 2014) foi possível baixar o projeto para construir a DLL do EPANET na ferramenta de desenvolvimento DEV-C++, pois o código fonte foi disponibilizado, mas a junção dos mesmos em DLL estava inicialmente documentada somente para outros compiladores que não eram de uso e conhecimento do autor.

Para conseguir depurar a DLL, seguiu-se as instruções da Microsoft Developer Network, onde indica que a depuração da DLL pode ser obtida iniciando a depuração do projeto que cria o executável que chama a DLL ou o projeto que cria a própria DLL. E a informação de Leão (2003, p. 652)

Uma DLL pode ser compilada da mesma maneira que um projeto de aplicativo e, após compilada, poderá ser livremente distribuída. Você não pode, no entanto, executar uma DLL a partir do ambiente de desenvolvimento do Delphi, selecionando o item Run do menu Run (embora esse item esteja habilitado), pois uma DLL não é uma aplicação (a menos que você defina um aplicativo como Host, a ser especificado na caixa de diálogo Run Parameters, exibida quando se seleciona o item Parameters do menu Run).

Para conseguir depurar a DLL foi utilizada a seguinte configuração do DEV-C++, indicada por Botta (2014): no menu *Debug*, no item Parâmetros, no campo aplicação local foi especificado o localização do arquivo executável principal, veja na Figura 2. Desta forma a aplicação principal foi executada sem depuração e quando chamava a DLL, a mesma era depurada através da utilização do comando menu *Debug*, item *Debug* ou a tecla de atalho F8.

Figura 2 – Tela parâmetros do debug no DEV-C++.



Fonte: Do autor, 2016

### 3.2.2 Adaptação no ambiente Delphi

A programação existente no ambiente Delphi serve para construir graficamente a rede de distribuição e parametrizar os dados de cada elemento (tubos, nós, etc). Os cálculos hidráulicos para a resolução do sistema são feitos somente na DLL. O que o aplicativo Delphi faz é chamar esta função externa para executar os cálculos. Como a construção da rede é mantida de forma idêntica entre os modelos Gradiente e MDIR, as alterações feitas no ambiente Delphi foram muito simples.

A alteração básica efetuada foi a duplicação do código que executa as chamadas dos cálculos na DLL e por sua vez renomeados para chamarem as rotinas implementadas para rodar o MDIR.

Para incluir as chamadas às rotinas de cálculos do modelo MDIR, foi duplicado o código do arquivo Fsimul.pas para FsimulMDIR.pas. Onde foram realizadas alterações na rotina RunQuality, para que fosse possível chamar as funções do MDIR. Como mostra o Quadro 1:

Quadro 1: Principais alterações na rotina RunQuality

```

begin
  if ENopenQ2 () = 0 then
    begin
      ...
      ENinitQ2 (1);
      ...
      repeat
        ...
        err := ENrunQ2 (t);
        tstep := 0;
        if err <= 100 then err := ENnextQ2 (tstep);
        ...
      until (tstep = 0) or (err > 100) or (RunStatus = rsCancelled);
    end;
    ENcloseH2 ();
    ...
  end;
end;

```

Fonte: Do autor, 2016.

Foram duplicados os códigos das chamadas das funções hidráulicas, adaptando os sufixos “Q” para “Q2” para indicar os novos cálculos usando o MDIR.

Para ser possíveis as chamadas das funções externas da DLL foi necessário alterar o arquivo epanet2.pas.

Neste arquivo, foram declaradas as funções externas (veja Quadro 2) na seção *interface* visto que esta seção é utilizada para informar ao compilador quais objetos e variáveis utilizadas na *unit* são acessíveis por outras *units* (WARNER e GOLDSMAN, 1996, p. 66).

Quadro 2: Declaração de funções externas na seção interface (epanet2.pas)

```

function ENopenQ2: Integer; stdcall;
function ENinitQ2 (SaveFlag: Integer): Integer; stdcall;
function ENrunQ2 (var T: LongInt): Integer; stdcall;
function ENnextQ2 (var Tstep: LongInt): Integer; stdcall;
function ENcloseQ2: Integer; stdcall;

```

Fonte: Do autor, 2016.

Na seção *implementation*, é onde o compilador irá buscar pelas instruções reais para executar no computador (WARNER e GOLDSMAN, 1996, p. 67). Observa-se no Quadro 3, que o código deve ser buscado em um arquivo externo (DLL).

Quadro 3: Declaração de funções externas na seção implementation (epanet2.pas)

function	ENopenQ2;	external	'EPANET2MDIR.DLL';
function	ENinitQ2;	external	'EPANET2MDIR.DLL';
function	ENrunQ2;	external	'EPANET2MDIR.DLL';
function	ENnextQ2;	external	'EPANET2MDIR.DLL';
function	ENcloseQ2;	external	'EPANET2MDIR.DLL';

Fonte: Do Autor, 2016

### 3.2.3 Adaptação na DLL

A biblioteca externa epanet2.dll onde os cálculos hidráulicos são efetuados foi escrita na linguagem C. Os arquivos alterados foram: epanet.c e quality2.c.

O arquivo quality2.c foi criado da duplicação do arquivo quality.c que realiza os cálculos do método gradiente e cujo arquivo não foi alterado, manteve-se o cálculo original do EPANET. Por sua vez o arquivo hydraulics2.c passou a ser adaptado para receber o modelo MDIR. Desta forma o software final realiza os 2 cálculos: os cálculos do modelo Gradiente e do MDIR.

O arquivo epanet.c é o módulo principal. É dele que se chama as demais funções do arquivo quality.c (método de cálculo nativo do EPANET - gradiente) e quality2.c (método utilizado no projeto usando os dados gerados da simulação do MDIR). Por este motivo neste módulo principal foi necessário duplicar as funções de chamadas das rotinas do MDIR, conforme BOTTA (2014) fez para os cálculos hidráulicos conforme Quadro 4, onde as alterações entre a rotina original e a duplicada se encontram em negrito para melhor visualização das diferenças. Todas as funções duplicadas neste arquivo epanet.c tiveram somente estas alterações simplificadas. Desta forma as grandes alterações na forma de cálculo foram realizadas e centralizadas no arquivo quality2.c. Nota-se também que foi utilizado o sufixo 2 para indicar rotinas de cálculos do projeto, diferenciando das rotinas já utilizadas pelo EPANET.

## Quadro 4: Exemplo de adaptação no arquivo epanet.c

```
int DLLEXPORT ENcloseQ()
{
    if (!Openflag) return(102);
    closequal();
    OpenQflag = FALSE;
    return(0);
}

int DLLEXPORT ENcloseQ2()
{
    if (!Openflag) return(102);
    closequal2();
    OpenQflag = FALSE;
    return(0);
}
```

Fonte: Botta, 2014.

## 4 ESTUDO DE CASOS

Esse capítulo apresenta as simulações que foram realizadas para comparar os resultados obtidos pelo Modelo Dinâmico Inercial Rígido (MDIR) com os obtidos pelo EPANET. Topologias de diferentes sistemas hidráulicos foram analisadas para o modelo proposto. Os estudos de caso apresentados nesse capítulo estão assim sequenciados:

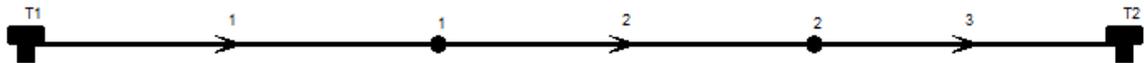
4.1 Estudo de caso 01 – Rede 1.

4.2 Estudo de caso 02 – Rede 2.

### 4.1 ESTUDO DE CASO 01 – REDE 1

Para esse estudo de caso foi usada uma topologia de rede simples, como mostra a Figura 3 a seguir:

Figura 3 – Rede de distribuição de água (Rede 1).

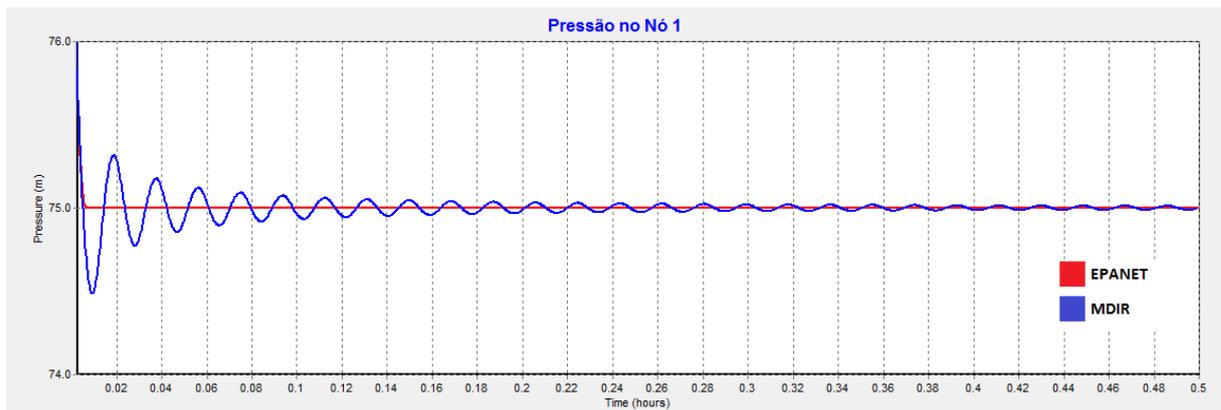


Fonte: Do autor, 2016

O Reservatório de Nível Variável (T1) possui 150m de cota de fundo, 3m de diâmetro, um nível máximo de 200m nível inicial de 80m. Cada tubo usado tem 30m e um diâmetro de 600mm. O Reservatório de Nível Variável (T2) tem quase as mesmas especificações do T1, apenas com a diferença no nível inicial que é de 70m.

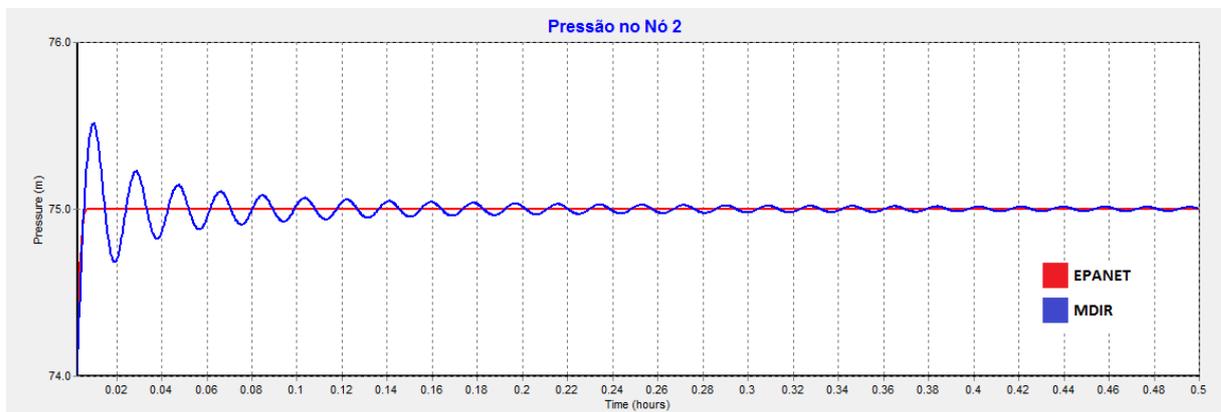
A simulação ocorreu em um intervalo de tempo de 30 minutos. Foi utilizado um intervalo de cálculo hidráulico de 2 segundos, e um intervalo de cálculo de qualidade, parte essa que faz a análise do cloro, de 5 segundos.

Figura 4 – Gráfico de pressão no nó 1



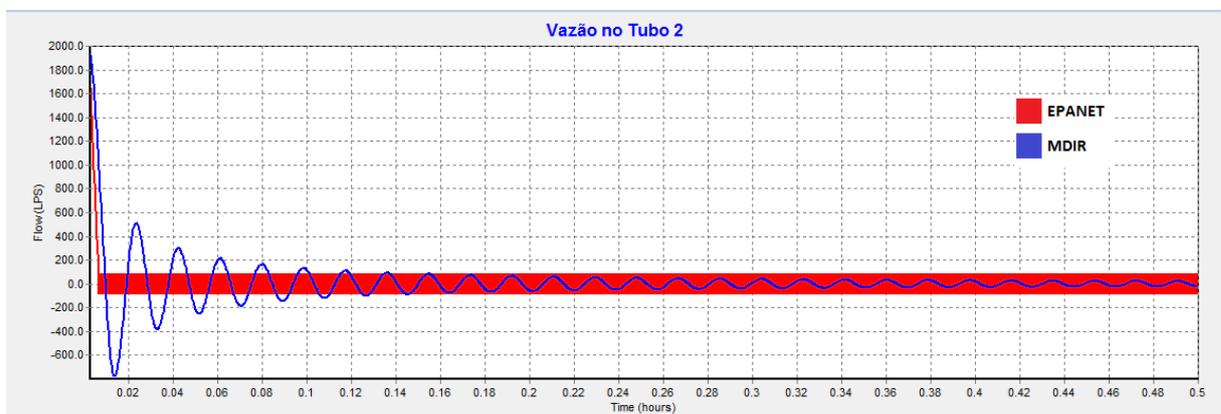
Fonte: Do autor, 2016

Figura 5 – Gráfico de pressão no nó 2



Fonte: Do autor, 2016

Figura 6 – Gráfico de vazão no tubo 2



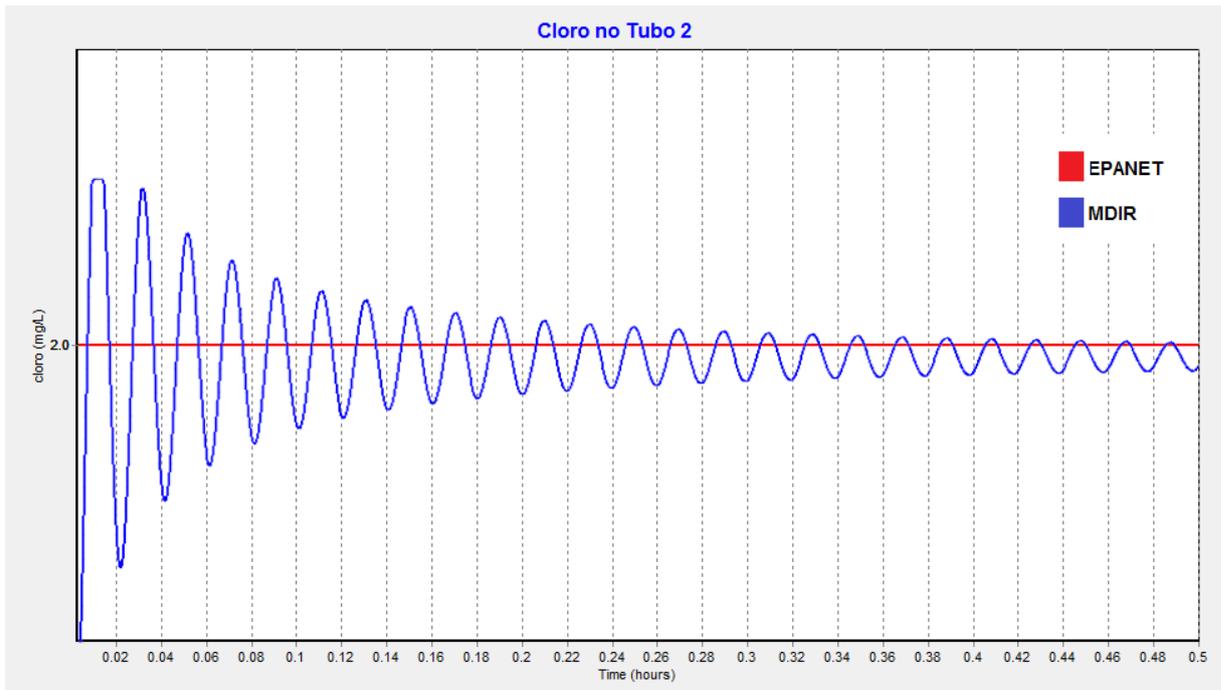
Fonte: Do autor, 2016

Assim sendo, o MDIR mostrou claramente o efeito da inércia. Enquanto o Método Gradiente mostra resultados corretos, porém que não interpretam as reais condições até a rede chegar aquele valor, o MDIR mostra toda a variação de pressão nos nós 1 (Figura 4) e 2

(Figura 5), além de mostrar a variação no tubo 2 (Figura 6) na rede até o resultado final. Como dito inicialmente os reservatórios T1 e T2 começaram com nível inicial de 80m e 70 respectivamente. Começada a simulação, o sistema foi abandonado e em decorrência ao final da simulação foi atingida a altura de 75m em ambos, mostrando assim a estabilização da rede.

A parte de qualidade vem a seguir. Para a análise de dispersão de um componente, nesse caso o cloro, o princípio de cálculos do EPANET é bem simples: ele armazena a cada instante  $t$  os valores de concentração do componente. Então pode-se ver que a inércia na rede também altera a concentração do cloro até a quantidade do componente ser visualizada por completo. Na Figura 7, são mostradas as simulações com o Método Gradiente e com o MDIR, devidamente identificadas, para traçar essa análise comparatória e mostrar que apesar da mesma concentração, o comportamento da dispersão variou de acordo com os efeitos da inércia da rede (MDIR) ou sem os efeitos da inércia (EPANET). A quantidade de 2.0 mg/L de cloro foi adicionada no reservatório T1 de forma constante, logo seu valor de concentração não alterou pelos cálculos do EPANET (método gradiente), enquanto isso o MDIR mostrou a variação de concentração na rede até atingir o valor da concentração que foi utilizado na simulação:

Figura 7 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 2.

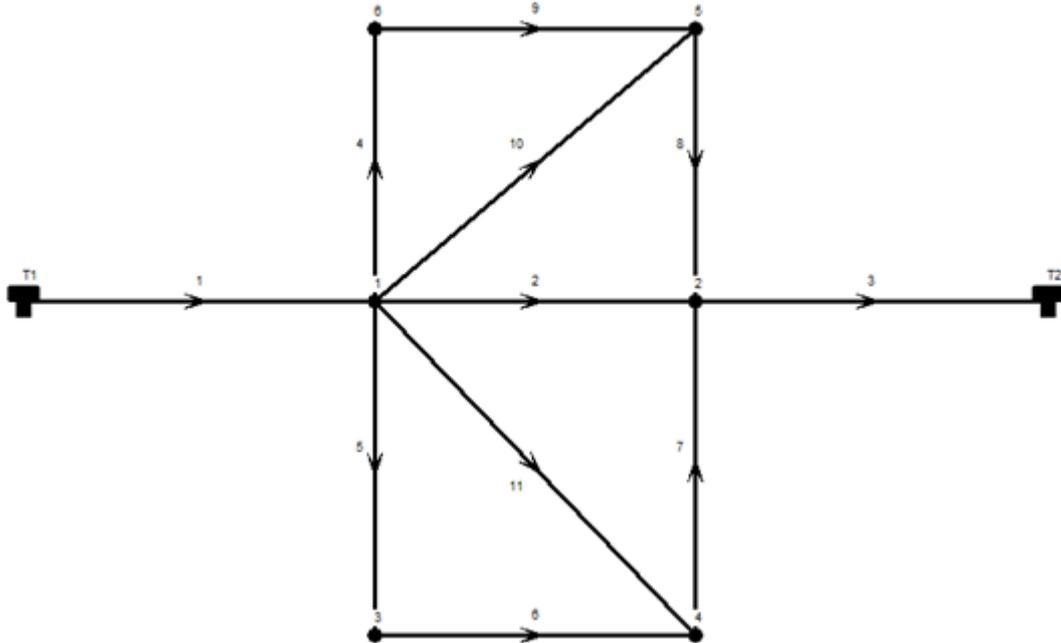


Fonte: Do autor, 2016

#### 4.2 ESTUDO DE CASO 02 – REDE 2

Para esse estudo de caso foi usada uma topologia de rede com 11 tubos e 6 nós, como mostra a Figura 8 a seguir:

Figura 8 – Rede de distribuição de água (Rede 2).

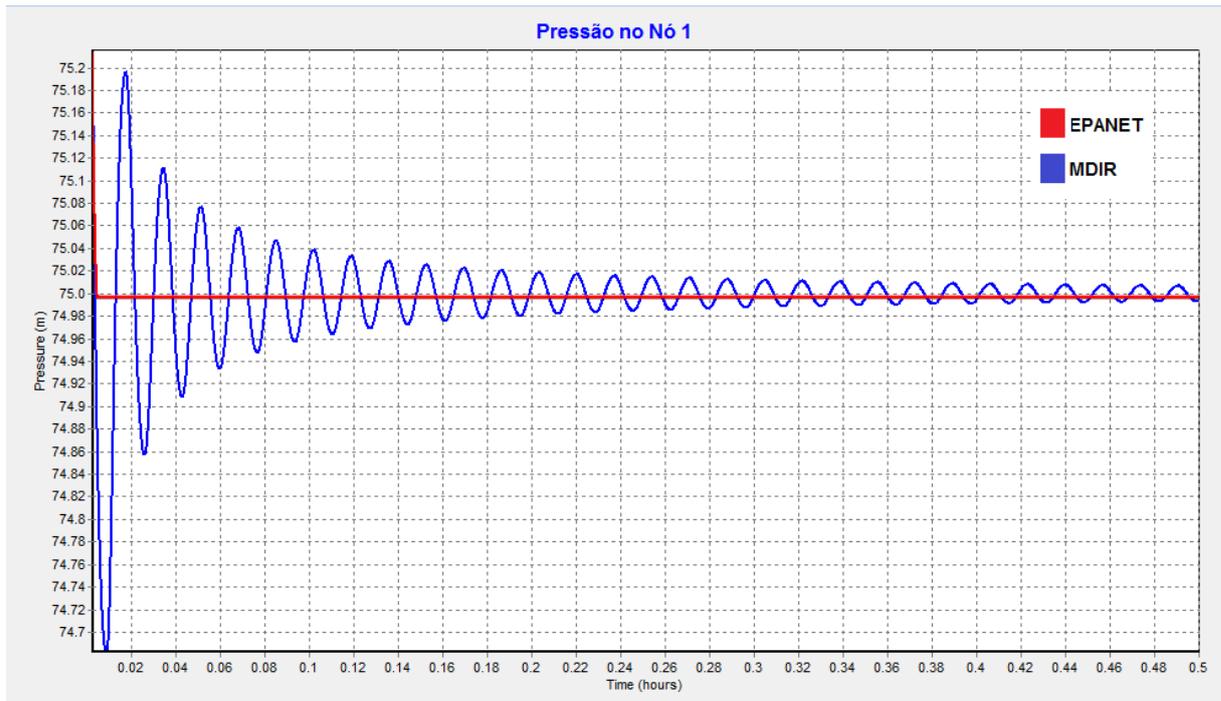


Fonte: Do autor, 2016

O Reservatório de Nível Variável (T1) tem 150m de cota de fundo, 3m de diâmetro, 80m de nível inicial e 200m de nível máximo. Cada tubo usado tem 30m e um diâmetro de 600mm. O Reservatório de Nível Variável (T2) tem 70m de nível inicial, os mesmos 200m de nível máximo e 3m de diâmetro do T1.

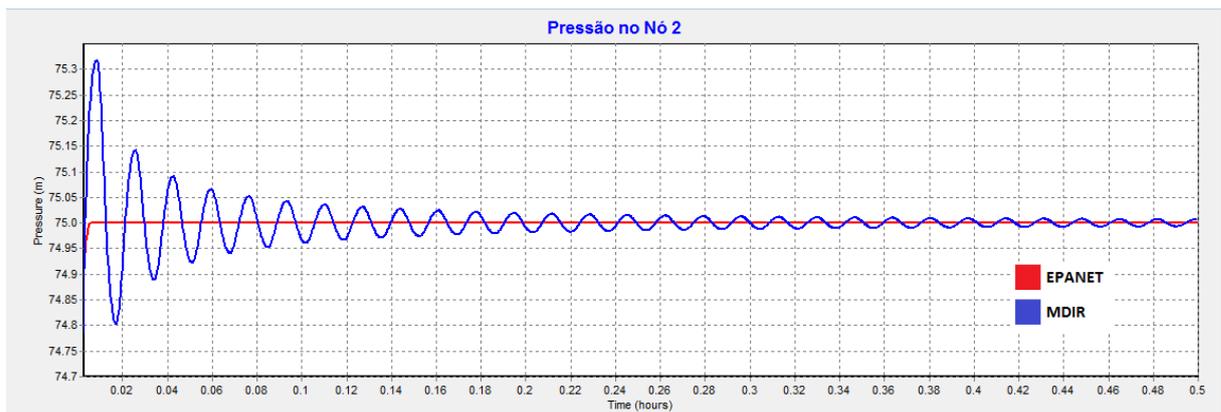
A simulação ocorreu em um intervalo de tempo de 30 minutos. Foi utilizado um intervalo de cálculo hidráulico de 2 segundos, e um intervalo de cálculo de qualidade, parte essa que faz a análise do cloro, de 5 segundos.

Figura 9 – Gráfico de pressão no nó 1



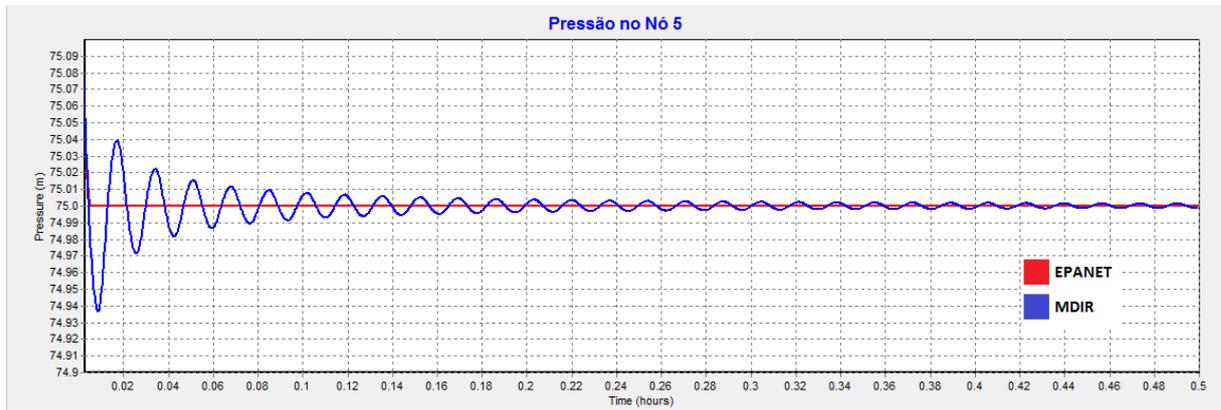
Fonte: Do autor, 2016

Figura 10 – Gráfico de pressão no nó 2



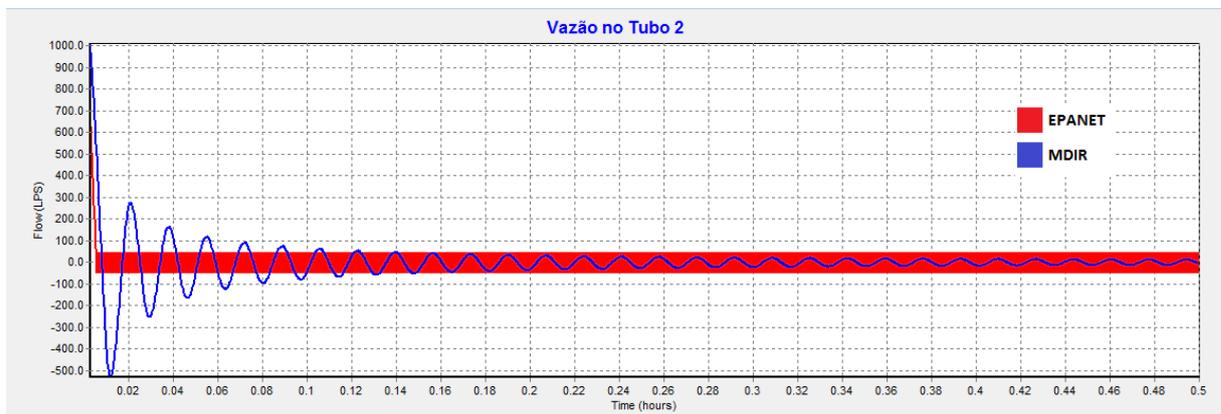
Fonte: Do autor, 2016

Figura 11 – Gráfico de pressão no nó 5



Fonte: Do autor, 2016

Figura 12 – Gráfico de vazão no tubo 2

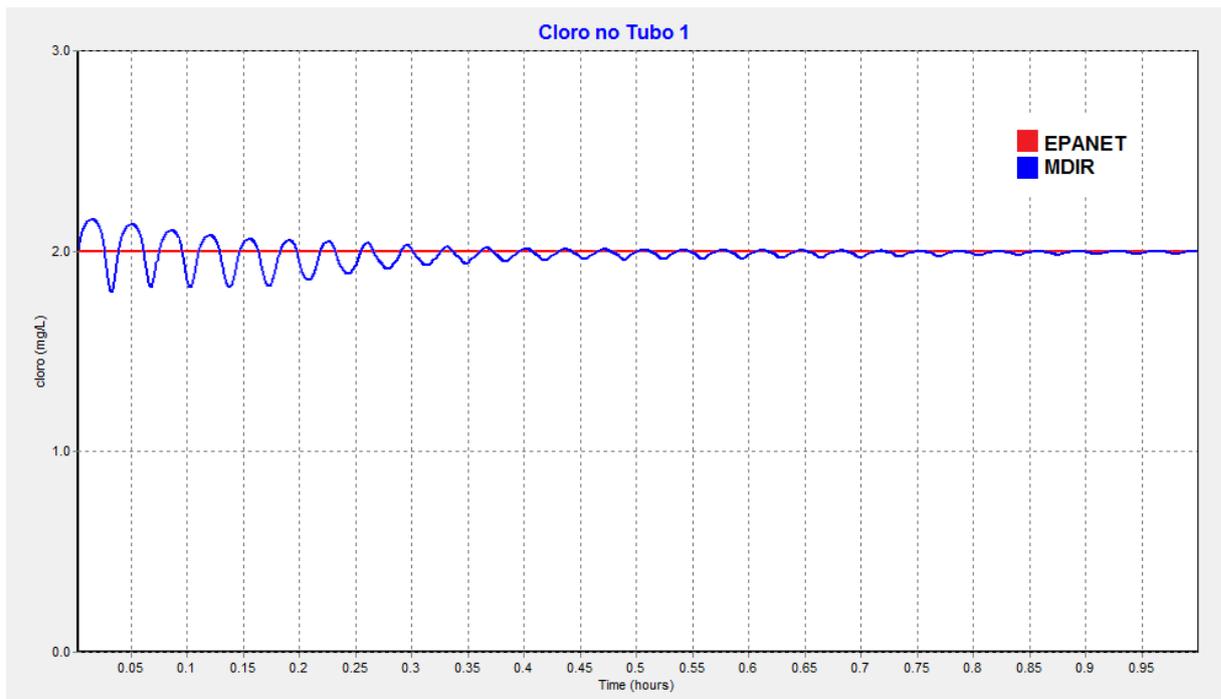


Fonte: Do autor, 2016

Percebeu-se a instabilidade da pressão (nas Figuras 9, 10 e 11 acima) e da vazão (Figura 12 acima) em virtude da inércia. Assim como na primeira simulação, os reservatórios T1 e T2 apresentam os valores de 80m e 70m de nível inicial. Importante ressaltar que, ao contrário da Rede 1, a Rede 2 é composta de uma topologia mais complexa e a variação da rede foi um pouco maior pois existem mais tubos e nós. Foram constatadas nos gráficos essas variações de pressão e vazão calculada pelo MDIR até se encontrar o ponto de estabilização.

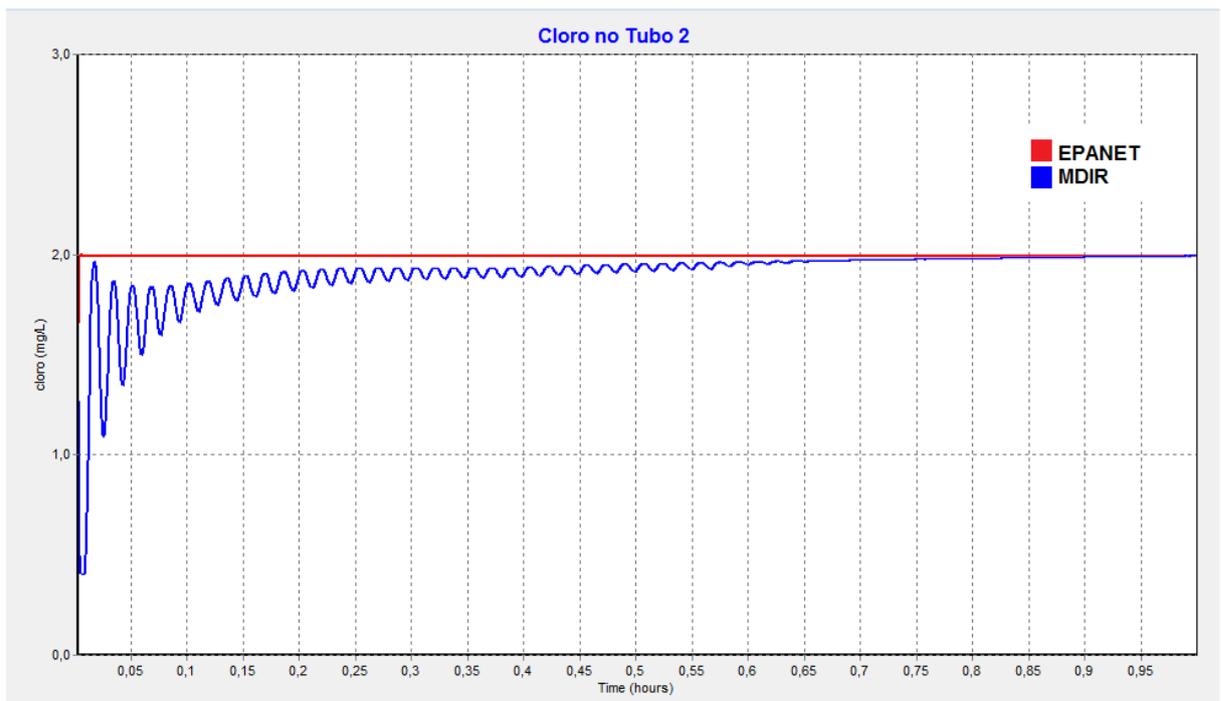
Após o regime hidráulico ficar permanente, foi adicionado de forma constante no reservatório T1 2.0mg/L de cloro e então pôde-se observar que a inércia também altera a concentração do cloro nos pontos analisados, mostrando assim uma dispersão diferente ao longo do tempo. Das Figuras 13 até 23 a seguir, são mostradas as simulações (aqui de 60 minutos) pelo Método Gradiente e pelo MDIR nos tubos 1 e 11 respectivamente. Observa-se que o comportamento da dispersão variou de acordo com os efeitos da inércia.

Figura 13 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 1.



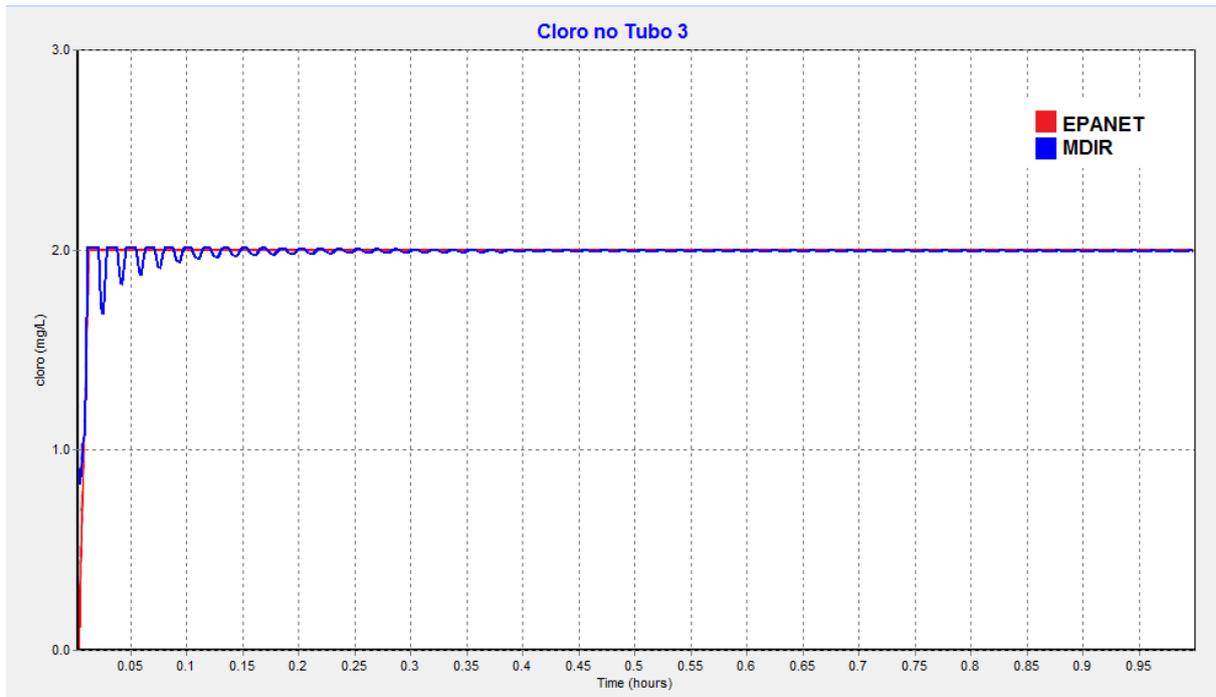
Fonte: Do autor, 2016

Figura 14 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 2.



Fonte: Do autor, 2016

Figura 15 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 3.



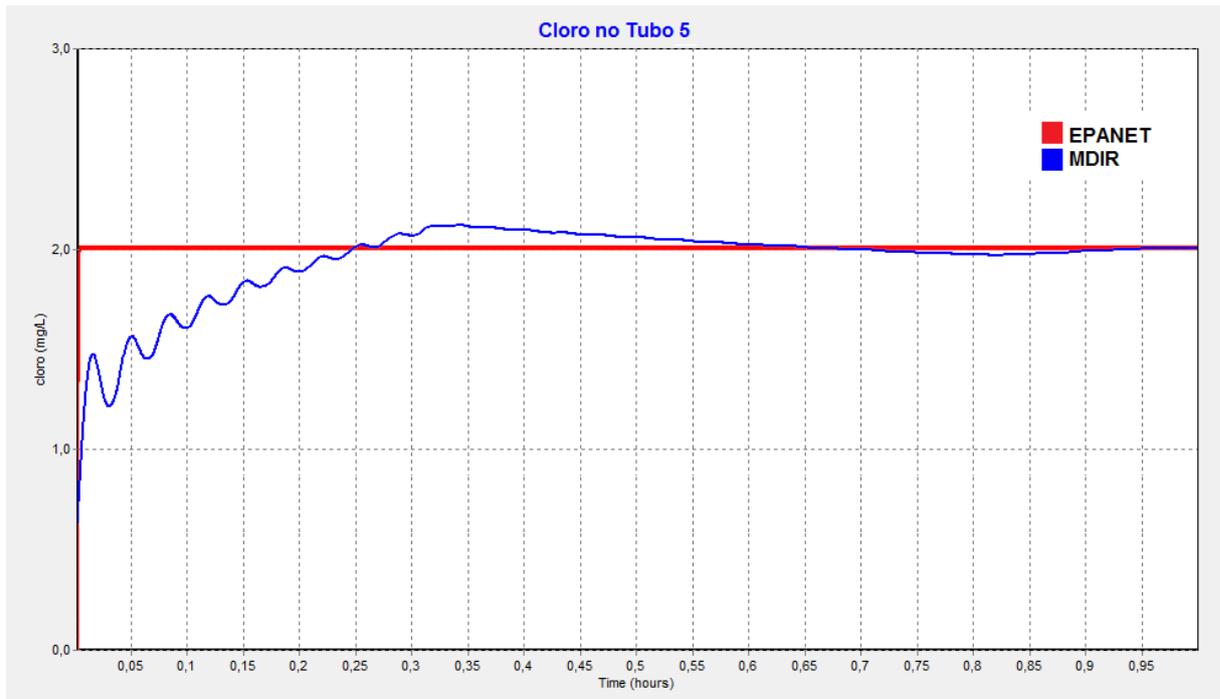
Fonte: Do autor, 2016

Figura 16 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 4.



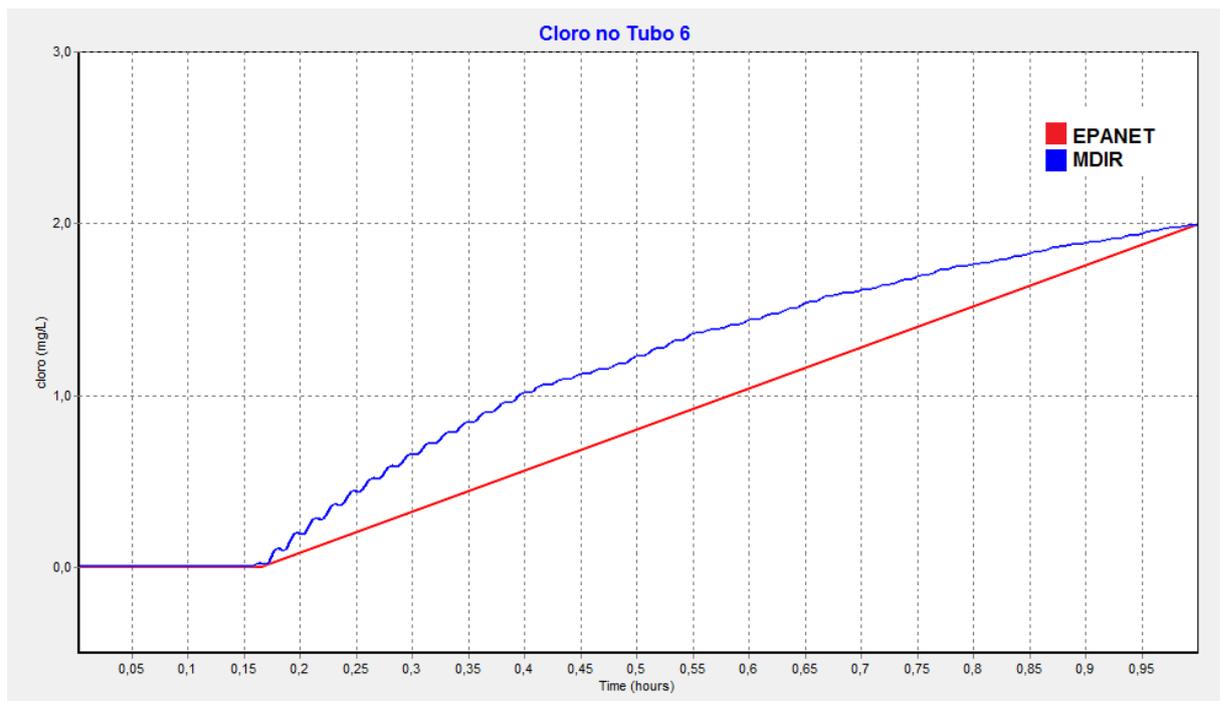
Fonte: Do autor, 2016

Figura 17 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 5.



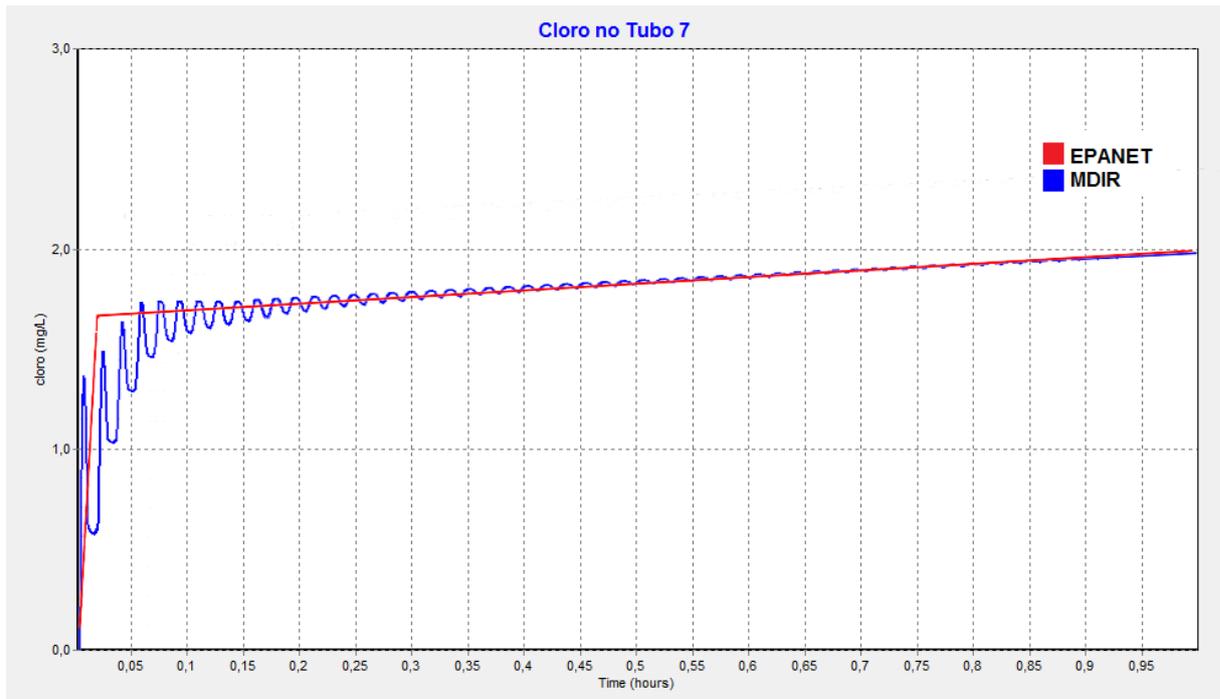
Fonte: Do autor, 2016

Figura 18 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 6.



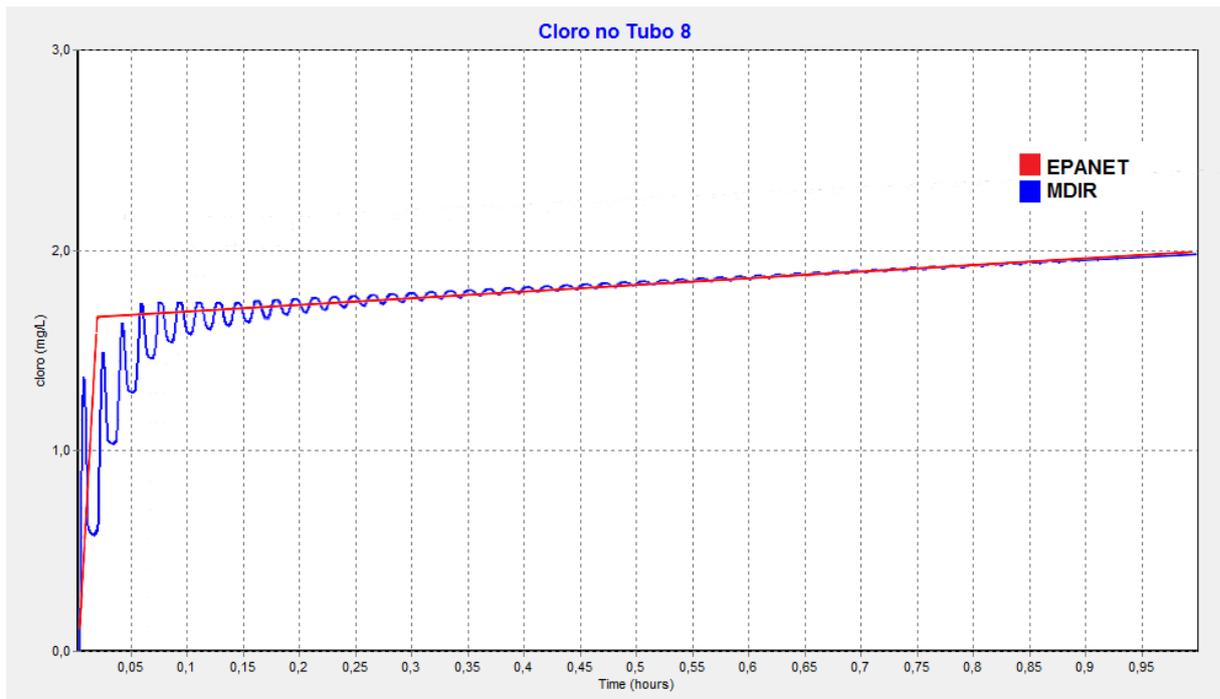
Fonte: Do autor, 2016

Figura 19 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 7.



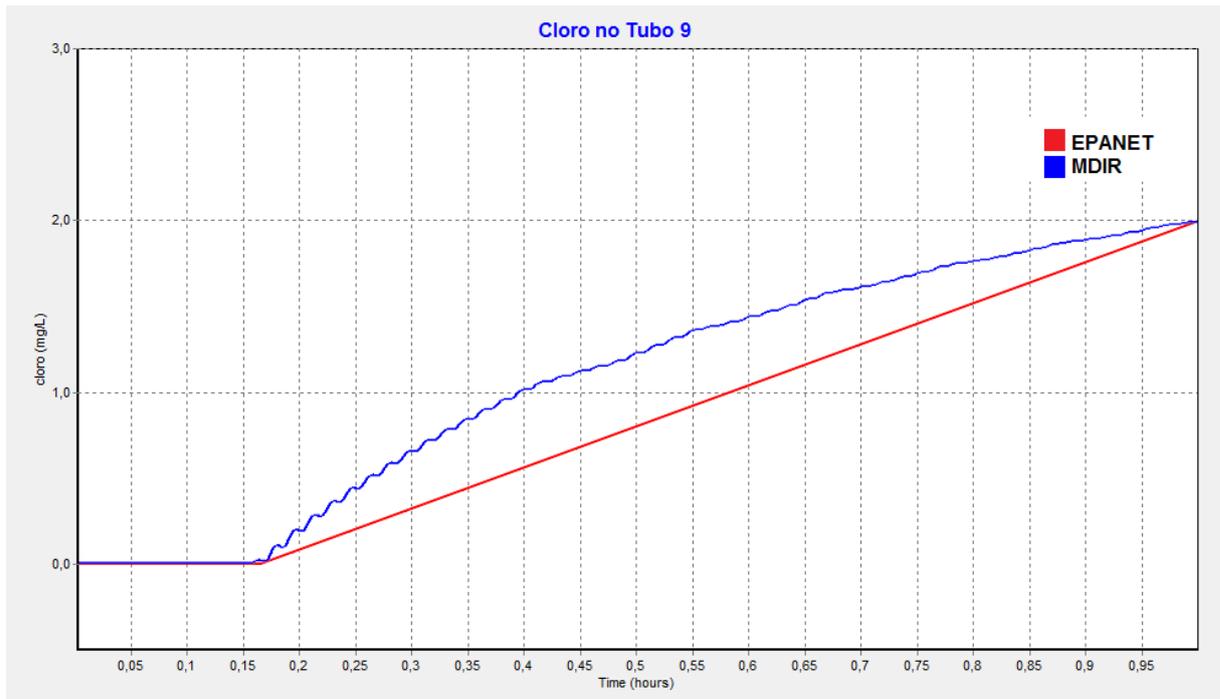
Fonte: Do autor, 2016

Figura 20 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 8.



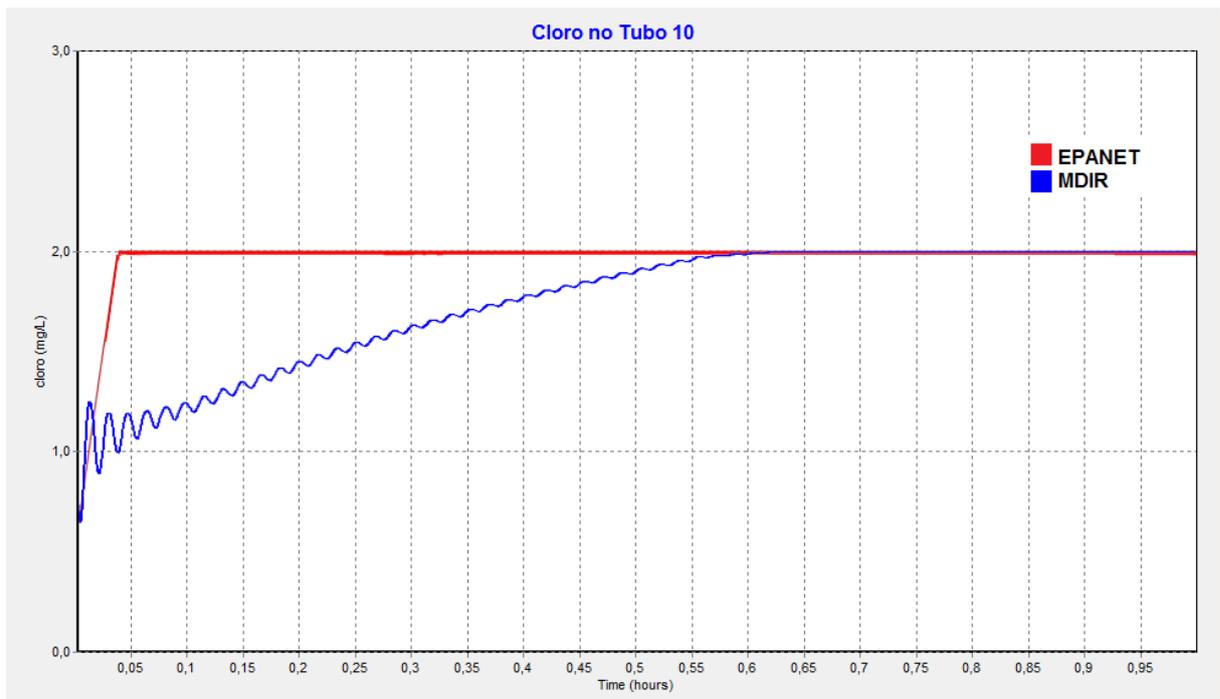
Fonte: Do autor, 2016

Figura 21 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 9.



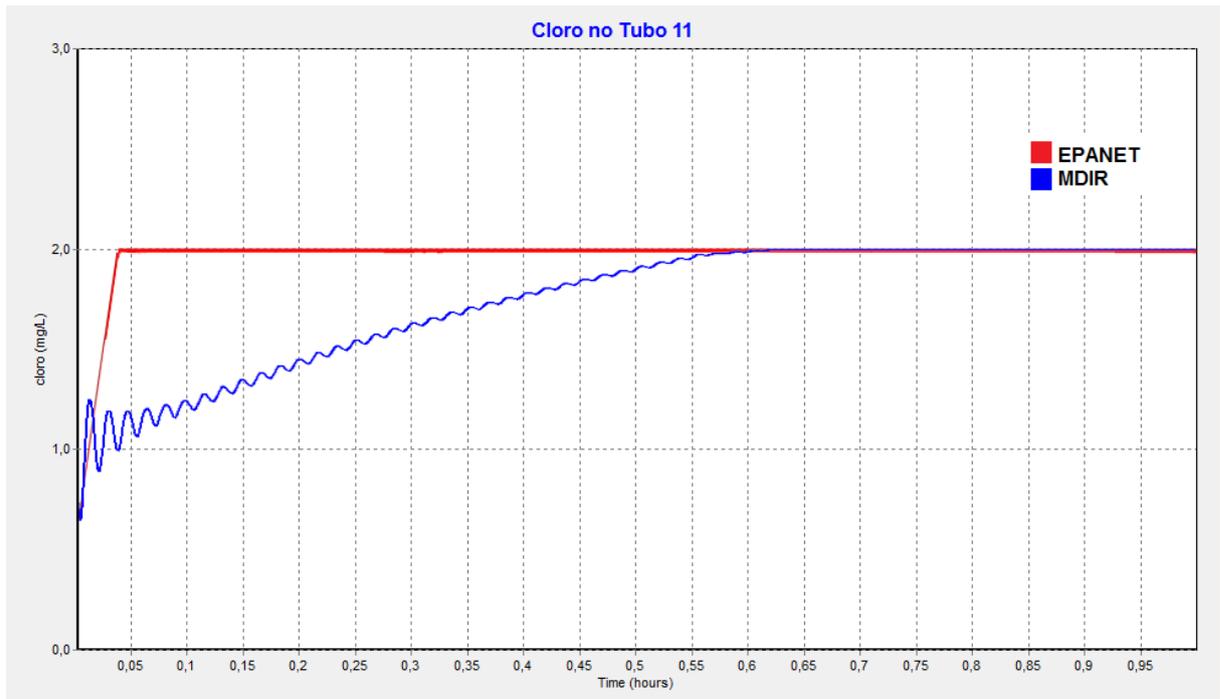
Fonte: Do autor, 2016

Figura 22 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 10.



Fonte: Do autor, 2016

Figura 23 – Gráfico comparativo de dispersão: EPANET X MDIR no Tubo 11.



Fonte: Do autor, 2016

Importante ressaltar o intervalo da simulação. Se acontecesse por um período de tempo maior, a dispersão do cloro variaria mais ainda até atingir a concentração definida na simulação.

## 5 CONCLUSÃO

Este projeto executou a análise de dispersão de um componente em redes de distribuição de água, a partir de algumas simulações. Utilizou-se o Modelo Dinâmico Inercial Rígido, que leva em consideração a inércia da água.

Estas simulações foram importantes, pois os dados gerados na simulação no MDIR levou em consideração a inércia, gerou resultados mais reais ao longo do tempo.

Como se pôde observar os cálculos hidráulicos, usando o MDIR, também afetaram a análise da parte de qualidade, uma vez que o programa faz todos os cálculos hidráulicos antes de realizar os cálculos da parte de qualidade. Isso é possível pois o programa salva a velocidade de escoamento de cada sessão da rede em um arquivo binário, e após todos os cálculos hidráulicos finalizados a parte de qualidade usa desse arquivo binário para fazer seus cálculos.

Foi possível concluir que o programa utilizou métodos distintos (EPANET x MDIR) para encontrar os resultados dos cálculos hidráulicos, porém utilizou os dois resultados da mesma forma para fazer os cálculos da dispersão do componente.

A simulação no cotidiano busca aprimorar e contribuir para soluções rápidas e com custos menores. Desta forma, conclui-se que para o estudo de sistemas hidráulicos e análise de qualidade da água o projeto se apresentou como uma solução muito interessante.

## 6 REFERÊNCIAS

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.

BOTTA, Gustavo Marino. **Implantação do Modelo Dinâmico Inercial Rígido em Sistemas Hidráulicos no Software EPANET**. Uberaba, 2014. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) - Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2014.

BORGES, Geovany Araújo. GMATRIX: Uma biblioteca matricial para C/C++. **Laboratório de automação e robótica**, 2005. Disponível em: <<http://lara.unb.br/~gaborges/recursos/programacao/index.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **EPANET - Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of Water Distribution Piping Systems**, 2013. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>>. Acesso em: 03 nov. 2013.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010. 872 p.

LEÃO, Marcelo. **Borland Delphi 7 Curso Completo**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2003. 1399 p.

MACKE, Steffen. Epanet.de Hydraulic network analysis. **EPANET and C: Build the EPANET toolkit DLL**, 2014. Disponível em: <<http://epanet.de/developer/index.html>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

MICROSOFT Developer Network. **DLLs**, 2014a. Disponível em: <[http://msdn.microsoft.com/library/1ez7dh12\(v=vs.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/library/1ez7dh12(v=vs.90).aspx)>. Acesso em: 08 mar. 2014a.

MICROSOFT Developer Network. **How to: Debug Native DLLs**, 2014b. Disponível em: <<http://msdn.microsoft.com/library/c91k1xcf.aspx>>. Acesso em: 08 mar. 2014b.

SABESP. Tratamento água. Disponível em: <[http://site.sabesp.com.br/uploads/file/flash/tratamento\\_agua.swf](http://site.sabesp.com.br/uploads/file/flash/tratamento_agua.swf)>. Acesso em: 15 fev. 2014.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 3ª. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 643 p.

WARNER, Scott L.; GOLDSMAN, Paul. **Delphi 2 em exemplos**. Tradução de Edmilson Kazuyoshi Miyasaky. São Paulo: Makron Books, 1996. 551 p.