



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**VICENTE DE CASTRO SANDERS NETO**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO DE REDES  
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO LAGRANGEANO DAS  
ONDAS CARACTERÍSTICAS**

**FORTALEZA**

**2019**

VICENTE DE CASTRO SANDERS NETO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO DE REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO LAGRANGEANO DAS ONDAS  
CARACTERÍSTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Marco Aurelio Holanda de Castro, PhD.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S198m Sanders Neto, Vicente de Castro.

Modelagem computacional do transitório hidráulico de redes de distribuição de água utilizando o método lagrangeano das ondas características / Vicente de Castro Sanders Neto. – 2019.  
113 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Marco Aurelio Holanda de Castro.

1. Método das Características. 2. Método das Ondas Características. 3. Redes de Distribuição de Água. I. Título.

CDD 627

---

VICENTE DE CASTRO SANDERS NETO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO DE REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MÉTODO LAGRANGEANO DAS ONDAS  
CARACTERÍSTICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 12/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Professor Marco Aurelio Holanda de Castro, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Professor D.Sc. John Kenedy de Araújo (Membro Interno)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Professor D.Sc. Paulo Sérgio Franco Barbosa (Membro Externo)  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

*Ao meu avô, Vicente de Castro Sanders,  
Exemplo de pai, avô, empreendedor e cristão.*

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, Aquele que rege o universo e que em sua infinita bondade possibilitou o meu recomeço como profissional, sendo um eterno aprendiz.

Aos meus pais José Helio e Maria do Socorro, àqueles que me concederam o dom da vida, obrigado pela nossa adorável família. Às minhas irmãs, Tatiana e Ticiania, e a seu marido, Luciano, por terem me acompanhado durante esta longa caminhada e por terem me presenteado com maravilhosos sobrinhos: Sophie, Letícia e Eduardo. E por fim agradeço, ao presente que Deus me proporcionou, minha companheira Jessica, que se tornou minha sustentação para aguentar a exaustiva rotina acadêmica.

Ao grande amigo Luís Felipe Candido, minha gratidão pelo apoio, compreensão e pelas palavras de incentivo para seguir a diante na vida discente. Todavia, não posso esquecer-me dos estimados amigos Carlos David Rodrigues, Julien Souto, Lucas Façanha e Nestor Bendô, colegas da graduação que ainda possuo vínculo de amizade. Valeu, turma boa!

Ao Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, por ter me acolhido como orientando, pela paciência e prontidão. Como Coordenador, tornou-se de fundamental importância para que eu encontrasse a área de pesquisa ideal, de acordo com as minhas habilidades e experiências de trabalho. Como Professor, ensinou-me o lado moderno e versátil da ciência e da engenharia. Como Orientador, me instruiu sobre o propósito de um verdadeiro pesquisador e o principal ensinamento que deixara: "... não complique...". A minha mais sincera gratidão.

Ao João Marcelo Barbosa Costa, muito obrigado pela Coorientação e prontidão, sou grato pelo excepcional auxílio durante toda esta dissertação. Aquele que se manteve sempre prestativo e incentivando-me a avançar na programação em Java para o desenvolvimento dos nossos trabalhos científicos. A você a minha sempre eterna gratulação.

Ao corpo docente da Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração: Recursos Hídricos, em especial aos Professores (sugestão: se estes professores possuem mestrado e doutorado, seria interessante colocar a titulação abreviada, como formalidade) Assis Filho, Carlos Pestana, Iran Eduardo, José Capelo, Kenedy, Nilson Campos, Paulo Roberto, Thomas Ballesteros e Ticiania, eu vós gratifico pelo incentivo à produção acadêmica, pelo apoio e dedicação ao aluno durante as aulas.

Aos colegas da turma de 2017: Átila Alves, Celso Lira Jr, Danilo Jorge, Ítalo Ruan, Larissa Zaira, Lucas Falcão, Renata Locarno, Tácio Ribeiro e Victor Porto, melhor turma não há. À meu parceiro de pesquisa e colega de turma Bruno Araújo, amigo de todas as horas, que

busca a minúcia da informação para afirmar as coisas sem titubear, pragmático e um exemplo de superação. Que nossa parceria e amizade perdurem por anos.

Aos colaboradores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental que sempre estiveram à disposição para tudo o que precisei, em especial ao Erivelton, Shirley e Edineuza, que se empenharam bastante em ajudar-nos dia a dia e nos prover em problemas diversos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - pelo auxílio financeiro com a disponibilização e manutenção da bolsa para mestrado.

*“... Living in the limelight: the universal dream for those who wish to SEEM. Those who wish to BE, must put aside the alienation, get on with the fascination, the real relation, the underlying theme...”*

*Neil Peart (Limelight - Rush)*



## RESUMO

O Método das Ondas Características (WCM, *Wave Characteristics Method*) é um modelo o que facilita o entendimento físico e o cálculo do golpe de aríete, bem como o dimensionamento de equipamentos de proteção e alívio e a simulação da cavitação e da separação de coluna e, acima de tudo, gera resultados próximos aos do Método das Características (MOC, *Method of Characteristics*) realizando menos cálculos a cada passo de tempo da simulação. O WCM funciona com base na equação da perda de carga em função da celeridade de Joukovsky, fazendo uma análise do caminhamento, transmissão e reflexão das ondas de pressão do ponto de excitação transiente até as extremidades da adutora ou rede de distribuição de água. Visto que a simulação do transitório hidráulico torna-se mais complexa quando é realizado numa rede malhada ou mista de distribuição de água, este trabalho realizará a modelagem do WCM para simulação computacional do transitório hidráulico numa rede de distribuição de água e comparar com o resultado obtido com MOC identificando vantagens e desvantagens de ambos. Utilizou-se para testes três exemplos disponíveis na literatura, onde o regime permanente é simulado diretamente no programa EPANET. No regime transiente, para os testes do MOC e do WCM, as rotinas dos dois modelos foram implementadas no programa UFC7, que realiza a modelagem computacional do golpe de aríete em Adutoras e Redes de Distribuição de Água. Como resultado a modelagem de cada rede, considerando o fechamento rápido de válvula, o WCM apresentou resultados próximos aos resultados gerados pelo MOC, no que se refere às envoltórias de cargas máximas e mínimas, geradas, trecho a trecho, pelo UFC7. Conclui-se que o WCM gera resultados satisfatórios em comparação ao MOC, necessitando de menos esforço computacional e resultando em valores de mesma grandeza nas envoltórias de carga. Apesar dos problemas com a implementação do WCM em planilha de cálculo, conseguiu-se desenvolver uma rotina em Java que calcule o MOC em redes de distribuição de água. Que permitirá a aplicação em diversos outros problemas de redes, possibilitando uma análise mais rápida e precisa dos resultados do transitório hidráulico.

**Palavras-chave:** Método das Características. Método das Ondas Características. Redes de Distribuição de Água.

## ABSTRACT

The Wave Characteristics Method (WCM) is a model comes to easy the physical comprehension and the water hammer calculus method, as well as the design of protective devices and the cavitation and column separation simulation; and, above all tasks, generate the results next to the Characteristics Method (MOC), which performs the calculations at each step of the simulation time. The WCM works based on the head loss equation as a function of Joukovsky's celerity, doing an analysis of the movement, transmission and reflection of the pressure waves from the excitation point to the ends of the water distribution network. By the way, this work can be done in a simulation of the computational processing of the hydraulic system in a water network and a result with the result obtained with MOC identifying the advantages and disadvantages of both. For the tests three examples were available in the literature, where the permanent regime is simulated directly in the EPANET program. In the transient regime, for the MOC and WCM tests, as the routines of the two models were implemented in the UFC7 program, which performs a computational model of the water hammer in Pipelines and Water Distribution Networks. As a result of the modeling of each network, considering the rapid placement of the valve, the WCM had results compared to the results generated by the MOC, regarding the estimates of maximum and minimum loads, generated, reach by reach, in UFC7. It is concluded that the WCM presents satisfactory results in relation to the MOC, requiring less computational importance and resulting in values of equal magnitude in the load wrappings. Despite the problems with the implementation of the WCM in spreadsheet calculation, it was possible to elaborate a routine in Java that calculates the MOC in networks of water distribution. What is more difficult than nets, enabling a faster and more accurate analysis of the hydraulic transient results.

**Keywords:** Method of Characteristics. Wave Characteristics Method. Water Distribution Networks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Linha Piezométrica e de Energia durante o regime permanente .....	30
Figura 2	– Representação de uma rede ramificada .....	33
Figura 3	– Representação de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas .....	33
Figura 4	– Exemplo da transição entre regimes permanentes após um curto período de durante regime transiente .....	38
Figura 5	– Linhas Características no plano x-t .....	42
Figura 6	– Malha x-t para a solução do MOC em uma simples tubulação .....	44
Figura 7	– Junção de Ramificação, Modelo Wylie e Streeter .....	45
Figura 8	– Junção de Ramificação, Modelo Chaudhry .....	47
Figura 9	– Significado dos subscritos, Modelo Chaudhry .....	48
Figura 10	– Propagação da Onda de Pressão numa Tubulação .....	50
Figura 11	– Início da propagação da onda de pressão numa tubulação .....	52
Figura 12	– Momento da onda de pressão após percorrer o trecho na velocidade do som .....	52
Figura 13	– Transmissão e reflexão da onda de pressão originária no fechamento rápido da válvula .....	53
Figura 14	– Momento em que as ondas de pressão geradas percorrem a rede .....	53
Figura 15	– Reflexão das ondas de pressão repetindo o processo inicial .....	53
Figura 16	– Condição do contorno antes e após a colisão das ondas de pressão .....	55
Figura 17	– Versão do EPANET® utilizado neste trabalho .....	59
Figura 18	– Ambiente EPANET®, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005) .....	60
Figura 19	– Configurações para o modelo de cálculo da perda de carga para o regime permanente .....	60
Figura 20	– Exemplo de planilha de cálculo com os dados necessários para iniciar o MOC .....	63
Figura 21	– Exemplo de simulação do MOC, de um trecho com quatro seções entre dois nós (Reservatório a montante e válvula a jusante) .....	63
Figura 22	– Ambiente UFC7, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005) .....	64
Figura 23	– Exemplo de planilha de cálculo com dados necessários para iniciar o WCM .....	66

Figura 24	– Exemplo de simulação do WCM (Reservatório a montante e válvula a jusante) .....	67
Figura 25	– Ambiente WCM, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005) .....	67
Figura 26	– Ambiente WCM, exemplo do gráfico de variação da carga piezométrica no nó 5, Rede Boulos (2005) .....	68
Figura 27	– Rede malhada hipotética .....	70
Figura 28	– Vazão na secção 1,6 .....	72
Figura 29	– Vazão na secção 2,1 .....	72
Figura 30	– Vazão na secção 3,1 .....	72
Figura 31	– Vazão no reservatório .....	73
Figura 32	– Comparação com um caso de reservatório sem ramificação .....	73
Figura 33	– Carga piezométrica a montante do registro, trecho 2 .....	75
Figura 34	– Carga piezométrica a montante do registro, trecho 3 .....	75
Figura 35	– Carga piezométrica na Secção 1,6 = 2,1 = 3,1 .....	76
Figura 36	– Comparação com um problema sem junção (adutora em linha) .....	76
Figura 37	– Estudo de Caso 2 - Tubulação de um reservatório a uma válvula de fechamento .....	77
Figura 38	– Variação da carga piezométrica na válvula - Estudo de Caso 2 - modelo WCM .....	78
Figura 39	– Variação da carga piezométrica na válvula - Estudo de Caso 2 - modelo MOC .....	78
Figura 40	– Rede Boulos et al. (2005) .....	81
Figura 41	– Lei de fechamento da Válvula a Jusante. (2005) .....	81
Figura 42	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 2, comparação entre métodos	82
Figura 43	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 3, comparação entre métodos	82
Figura 44	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 4, comparação entre métodos	83
Figura 45	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 5, comparação entre métodos	83
Figura 46	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 6, comparação entre métodos	84
Figura 47	– Variação da Carga Piezométrica na Válvula, comparação entre métodos	84
Figura 48	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 2, sem celeridade fictícia .....	85
Figura 49	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 3, sem celeridade fictícia .....	86
Figura 50	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 4, sem celeridade fictícia .....	86

Figura 51	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 5, sem celeridade fictícia .....	87
Figura 52	– Variação da Carga Piezométrica na Junção 6, sem celeridade fictícia .....	87
Figura 53	– Variação da Carga Piezométrica na Válvula, sem celeridade fictícia .....	88
Figura 54	– Número de cálculos entre MOC e WCM .....	89
Figura A1	– Rede Boulos et al. (2005), no ambiente UFC7 .....	96
Figura A2	– Simulação da variação da carga piezométrica no reservatório .....	96
Figura A3	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 2 .....	97
Figura A4	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 3 .....	97
Figura A5	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 4 .....	98
Figura A6	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 5 .....	98
Figura A7	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 6 .....	99
Figura A8	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó da válvula .....	99
Figura A9	– Simulação da variação da vazão no reservatório .....	100
Figura A10	– Simulação da variação da vazão no nó 2 .....	100
Figura A11	– Simulação da variação da vazão no nó 3 .....	101
Figura A12	– Simulação da variação da vazão no nó 4 .....	101
Figura A13	– Simulação da variação da vazão no nó 5 .....	102
Figura A14	– Simulação da variação da vazão no nó 6 .....	102
Figura A15	– Simulação da variação da vazão na válvula .....	103
Figura B1	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 2 .....	104
Figura B2	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 3 .....	105
Figura B3	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 4 .....	106
Figura B4	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 5 .....	107
Figura B5	– Simulação da variação da carga piezométrica no nó 6 .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Informações dos trechos do cenário hipotético proposto .....	71
Tabela 2	– Informações das seções do cenário hipotético proposto .....	71
Tabela 3	– Resultados máximos e mínimos da variação da carga piezométrica nas seções dos trechos do cenário hipotético durante o transitório hidráulico ...	74
Tabela 4	– Dados de entrada para a modelagem do WCM - Estudo de Caso 2 .....	77
Tabela 5	– Dados dos trechos utilizados para a Figura 1 .....	80
Tabela 6	– Dados dos trechos utilizados para a Figura 1 (continuação) .....	80
Tabela 7	– Dados dos nós (junções) utilizados para a Figura 1 (continuação) .....	80

## LISTA DE VARIÁVEIS

Variáveis	Significado	Dimensão
$a$	Celeridade ou Velocidade da Onda de Pressão	$[LT^{-1}]$
$A$	Área da seção transversal da tubulação	$[L^2]$
$A(t), B(t), C(t)$	Coefficientes da equação característica do contorno do WCM	-
$b$	Constantes do WCM	-
$B$	Constante do MOC - Modelo Wylie e Streeter	-
$B_p, B_m$	Constantes do MOC - Modelo Wylie e Streeter	-
$C$	Coefficiente de rugosidade de Hazen-Williams	$[L^{0,37}.T^{-1}]$
$C^+, C^-$	Equações características do MOC	-
$C_a$	Constantes do MOC - Modelo Chaudrhy	-
$C_p, C_n$	Constantes do MOC - Modelo Chaudrhy	-
$C_p, C_m, C_n$	Constantes do MOC - Modelo Wylie e Streeter	-
$C_N$	Condição ou Número de Courant	-
$C_v$	Coefficiente referente à lei de fechamento da válvula	-
$D$	Diâmetro da tubulação	$[L]$
$E$	Módulo de Elasticidade de Young	$[ML^{-1}T^{-2}]$
$dH$	Variação diferencial da carga	-
$dt$	Variação diferencial do tempo	-
$dV$	Variação diferencial da velocidade	-
$dx$	Variação diferencial do comprimento da tubulação	-
$\partial H$	Variação diferencial parcial da carga	-
$\partial t$	Variação diferencial parcial do tempo	-

$\partial V$	Variação diferencial parcial da velocidade	-
$\partial x$	Variação diferencial parcial do comprimento da tubulação	-
$f$	Fator de atrito	-
$F_1, F_2$	Constantes do WCM	-
$g$	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
$h$	Número de horas de funcionamento do sistema elevatório	$[T]$
$H$	Carga Piezométrica	$[L]$
$H_A, H_B, H_P$	Cargas Piezométricas durante o transitório hidráulico	$[L]$
$H_t$	Primeira derivação da carga em relação ao tempo	-
$H_x$	Primeira derivação da carga em relação ao comprimento	-
$J$	Perda de carga unitária (m/m)	-
$k_1$	Coefficiente do dia de maior consumo	-
$k_2$	Coefficiente da hora de maior consumo	-
$K$	Coefficiente de perda de carga localizada	-
$L$	Comprimento da tubulação	$[L]$
$L, L_1, L_2$	Operadores lineares do MOC	-
$n$	Número de Manning	$[L^{-1/3}.T]$
$N$	Número de trechos em uma tubulação	-
$N + 1$	Número de seções em uma tubulação	-
$V$	Velocidade da água na tubulação	$[LT^{-1}]$
$V_t$	Primeira derivação parcial da velocidade em relação ao tempo	-
$V_x$	Primeira derivação parcial da velocidade em relação ao comprimento	-
$P$	População a ser abastecida no horizonte do projeto	-
$p$	Pressão relativa interna na tubulação	$[ML^{-1}T^{-2}]$



$q_m$	Taxa ou cota de consumo <i>per capita</i> média da população do projeto	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Q$	Vazão volumétrica do sistema	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Q_a$	Vazão de adução	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Q_d$	Vazão de distribuição	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Q_m$	Vazão média anual	$[L^{-3}T^{-1}]$
$Q_n$	Vazão nodal em redes	$[L^{-3}T^{-1}]$
$H_A, H_B, Q_P$	Vazões volumétricas durante o transitório hidráulico	$[L^{-3}T^{-1}]$
$R$	Constantes do MOC - Modelo Wylie e Streeter	-
$R_H$	Raio hidráulico	$[L]$
$Re_y$	Número de Reynolds	-
$S_C, S_B$	Constantes do MOC - Modelo Wylie e Streeter	-
$t$	Tempo total de simulação	$[T]$
$x$	Eixo x – Comprimento ao longo da tubulação.	$[L]$
$z$	Altura ou Cota geométrica do eixo da tubulação	$[L]$
$z$	Energia ou Carga Potencial, Equação de Bernoulli	$[L]$

### Símbolos Gregos

Variáveis	Significado	Dimensão
$\gamma$	Peso Específico	$[ML^{-2}T^{-2}]$
$\Delta H_{1-2}$	Perda de Carga do ponto 1 para o ponto 2	$[L]$
$\Delta H$	Onda de Pressão, WCM	$[L]$
$\varepsilon$	Rugosidade do material da tubulação	$[L]$

$\lambda$	Multiplicador desconhecido da combinação linear do MOC	-
$\nu$	Coefficiente de Poisson	-
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	$[L^2.T^{-1}]$
$\Sigma Q_{in}$	Somatório da vazões de entrada numa junção	$[L^{-3}T^{-1}]$
$\Sigma Q_p$	Somatório de todas vazões nos tubos conectados numa junção	$[L^{-3}T^{-1}]$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Condições de Contorno
DVCM	<i>Discrete Vapor Cavity Model</i> (Modelo de Cavidade de Vapor Discreto, em português)
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EPANET	Programa computacional de dimensionamento de sistemas hidráulicos (Sigla sem significado relevante)
MDF	Método das Diferenças Finitas
MOC	<i>Method of Characteristics</i> (Método das Características, em português)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Aeronautica Nacional e Administração do Espaço, em português)
PEAD	Polietileno de Alta Densidade, tipo de material para tubulações
POO	Programação Orientada a Objeto
PPR	Polipropileno Copolímero Random, tipo de material para tubulações
PVC	Policloreto de Vinila, tipo de material para tubulações
SI	Sistema Internacional de Unidades
TAU	Tanque de Alimentação Unidirecional
VB	Visual Basic (linguagem de programação)
WCM	<i>Wave Characteristics Method</i> (Método das Ondas Características, em português)

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
L	Litro
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
mm	Milímetro
Pa	Pascal
s	Segundo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>1.1</b>	<b>Contextualização e Problematização</b> .....	23
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	25
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	25
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	25
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
<b>2.1</b>	<b>Terminologia</b> .....	27
<b>2.2</b>	<b>Hidráulica de Redes de Distribuição de Água</b> .....	28
<i>2.2.1</i>	<i>Determinação da Linha de Energia e Linha Piezométrica</i> .....	29
<i>2.2.2</i>	<i>Perda de Carga em Conduitos Forçados</i> .....	30
<i>2.2.3</i>	<i>Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água</i> .....	32
<b>2.3</b>	<b>Métodos Eulerianos e Métodos Lagrangeanos</b> .....	34
<b>3</b>	<b>MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA</b> .....	37
<b>3.1</b>	<b>Relevância da Análise do Transitório Hidráulico</b> .....	37
<b>3.2</b>	<b>Equações Fundamentais do Transitório Hidráulico e o Método das Características (MOC)</b> .....	39
<b>3.3</b>	<b>Regime Transiente de Redes de Abastecimento de Água</b> .....	45
<i>3.3.1</i>	<i>Junção de Ramificação, Modelo Wylie et al. (1993)</i> .....	45
<i>3.3.2</i>	<i>Junção de Ramificação, Modelo Chaudhry (2014)</i> .....	47
<b>3.4</b>	<b>As Ondas de Pressão e Método das Ondas Características (WCM)</b> .....	49
<i>3.4.1</i>	<i>Determinação da equação da onda de pressão ao longo do trecho</i> .....	49
<i>3.4.2</i>	<i>Análise das Ondas de Pressão</i> .....	51
<i>3.4.3</i>	<i>Determinação das condições de contorno para o WCM</i> .....	54
<b>3.5</b>	<b>Contornos MOC utilizados nos Estudos de Caso</b> .....	57
<i>3.5.1</i>	<i>Condição de Contorno do Reservatório a Montante com Nível Constante</i> .....	57
<i>3.5.2</i>	<i>Condição de Contorno da Válvula a Jusante</i> .....	57
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	58
<b>4.1</b>	<b>Caracterização Objeto de Estudo e da Pesquisa</b> .....	58

<b>4.2</b>	<b>Premissas para a realização do estudo .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>Método para a Modelagem do Regime Permanente .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelagem do transitório hidráulico em sistemas de abastecimento de água através do MOC .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4.1</b>	<b><i>Ferramentas Computacionais para a Modelagem Numérica do MOC .....</i></b>	<b>62</b>
<b>4.4.1.1</b>	<b><i>Planilha de Cálculo para o MOC .....</i></b>	<b>62</b>
<b>4.4.1.2</b>	<b><i>O Módulo UFC7 .....</i></b>	<b>64</b>
<b>4.5</b>	<b>Modelagem do transitório hidráulico em sistemas de abastecimento de água através do WCM .....</b>	<b>65</b>
<b>4.5.1</b>	<b><i>Ferramentas Computacionais para a Modelagem Numérica do WCM .....</i></b>	<b>65</b>
<b>4.5.1.1</b>	<b><i>Planilha de Cálculo para o WCM .....</i></b>	<b>66</b>
<b>4.5.1.2</b>	<b><i>Programas Wood et al. (2005) .....</i></b>	<b>67</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise dos Resultados Gerados entre os Modelos MOC e WCM .....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Estudo de Caso 1 - Rede Ramificada Hipotética – MOC .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1.1</b>	<b><i>Dados do Sistema .....</i></b>	<b>69</b>
<b>5.1.2</b>	<b><i>Efeito do Golpe de Aríete na Vazão da Ramificação e do Reservatório .....</i></b>	<b>70</b>
<b>5.1.3</b>	<b><i>Efeito do Golpe de Aríete na Carga de Pressão na Ramificação e nas Válvulas .....</i></b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Estudo de Caso 2 - Adutora Wood (2005) - MOC e WCM .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Dados do Sistema .....</i></b>	<b>77</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Desenvolvimento do WCM no problema proposto .....</i></b>	<b>77</b>
<b>5.3</b>	<b>Estudo de Caso 3 - Rede Boulos et al. (2005) - MOC e WCM .....</b>	<b>79</b>
<b>5.3.1</b>	<b><i>Dados do Sistema .....</i></b>	<b>79</b>
<b>5.3.2</b>	<b><i>Análise dos Resultados MOC e WCM .....</i></b>	<b>79</b>
<b>5.3.3</b>	<b><i>Mudanças em Relação à Celeridade Fictícia no MOC .....</i></b>	<b>85</b>
<b>5.3.4</b>	<b><i>Análise dos Resultados .....</i></b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>90</b>
<b>6.1</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>90</b>
<b>6.2</b>	<b>Recomendações para Próximas Pesquisas .....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE A - GRÁFICOS GERADOS PELO UFC7 .....</b>	<b>96</b>
	<b>APÊNDICE B - GRÁFICOS GERADOS PELO PROGRAMA WCM .....</b>	<b>104</b>

**APÊNDICE C - ARQUIVOS REDE BOULOS (2005) GERADOS NO  
EPANET® ..... 109**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e Problematização

O golpe de aríete na tubulação de uma adutora ou numa rede de distribuição de água resulta de uma mudança abrupta da vazão e da pressão, causados por um fechamento rápido de registro de linha ou através de uma parada ou falha de funcionamento de uma bomba sem o devido controle. Este efeito ocasiona um transiente hidráulico que oscila entre pressões/cargas positivas e negativas superpostas às condições permanentes.

Desta forma, a infraestrutura hidráulica deve ser projetada com um tipo de material, diâmetros e espessuras de parede de tubulação, juntamente com seus equipamentos de proteção e ancoragens para suportar este tipo de oscilação de pressão (BARBOSA et al., 2018). Contudo, o golpe de aríete em sistemas de adução e distribuição de água, ainda não recebe a atenção que merece nos currículos dos cursos de engenharia, assim como, a consideração necessária para a segurança efetiva na fase de projeto, construção e operação de sistemas de adução e distribuição de água (WOOD et al., 2005).

Nada obstante, pesquisas de alta performance computacional e experimental, vem sendo realizadas, à exemplo dos estudos considerando o fator de atrito variável (BHATTACHARYYA et al., 2018), a cavitação, separação de coluna e o efeito viscoelástico do material de tubulações plásticas como PVC, PEAD, PPR e similares (SOARES et al., 2012; DUAN, 2015; FERREIRA et al., 2015; ZHU et al., 2018).

Se as pressões máximas desta oscilação forem excessivamente maiores do que as pressões nas quais a tubulação da adutora fora projetada a suportar, podem ocasionar falhas de contenção e vazamentos nas conexões da tubulação. Por outro lado, em pressões negativas excessivas podem causar implosões/esmagamentos das paredes da tubulação. Estas pressões baixas podem ser contempladas normalmente num fechamento de válvula à jusante da tubulação (CHAUDHRY, 2014; WYLIE et al. 1993, apud DAUDE et al., 2018).

Vale ressaltar que o comportamento do transiente hidráulico é mais intenso quando a vazão varia rapidamente, provindo do resultado de um fechamento rápido de válvula ou parada de bomba, por exemplo. Com isso, distúrbios que podem ser causados por erro de projeto ou acidente, podem criar ondas de pressão de grandes proporções, que superpostas às condições do estado permanente presentes na tubulação no mesmo instante quando o transiente ocorre, podem facilmente exceder os limites de pressão preestabelecidos e causar severos danos ao sistema (BOULOS et al., 2005, apud TRIKI, 2018).



Isto é, pressões muito altas podem resultar em danos no bombeamento, registro e outros recursos até ao colapso do sistema. Pressões muito baixas, o suficiente para alcançar a pressão de vapor da água, podem levar à cavitação e separação de coluna dentro da tubulação, podendo fazê-la implodir ou ocasionando também uma possível intrusão externa de ar e contaminantes (DAUDE et al., 2018).

Referente aos métodos numéricos para a obtenção aproximada das vazões e cargas no transitório hidráulico, Parmakian (1955, apud MENICONI et al., 2018) que introduz o Método da Coluna Rígida e Método da Coluna Elástica, que antecede e gera base aos estudos de Wylie e Streeter (1993, apud DAUDE et al., 2018), Thorley (1991, apud FERRAS et al., 2018), Chaudhry (2014) evoluindo a utilização das equações da continuidade e da quantidade de movimento, com o auxílio do Método das Características (MOC), que é um método com base analítica euleriana (WOOD et al., 2005; BOULOS et al., 2005, apud TRIKI, 2018)).

Também, pelo método da coluna rígida, Larock et al. (1999, apud MENICONI et al., 2018) realiza análise de transiente em redes com base nas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Estudos específicos de modelagem do regime transiente em redes de distribuição de água realizados por Tullis (1989, apud FERREIRA et al., 2018), Almeida e Koelle (1992, apud FERREIRA et al., 2018), Axworthy (1997, apud JUNG & KARNEY, 2017).

Por outro lado, Wood et al. (2005, BOULOS et al., 2015) analisa o fenômeno transiente por um método com base analítica Lagrangeana, denominado Método das Ondas Características (WCM), que é um melhoramento do método das ondas planas, inicialmente desenvolvido por Wood et al. (1965, BOULOS et al., 2015).

Boulos et al. (2005, apud TRIKI, 2018), refere-se ao WCM como um método que facilita o entendimento físico e o cálculo do golpe de aríete, bem como o dimensionamento de equipamentos de proteção e alívio e a simulação da cavitação e da separação de coluna e, acima de tudo, gera o mesmo resultado que o MOC realizando menos cálculos a cada passo de tempo da simulação.

Contudo é um método que poupa esforço computacional de cálculo, com base na equação da perda de carga em função da celeridade de Joukovsky (1898, apud MORVARID et al., 2018), fazendo uma análise do caminhamento, transmissão e reflexão das ondas de pressão do ponto de excitação transiente até as extremidades da adutora ou rede de distribuição de água.

Visto que, a simulação do transitório hidráulico torna-se mais complexa quando realizada numa rede malhada ou mista de distribuição de água, este trabalho realizará a modelagem do Método das Ondas Características para simulação computacional do transitório

hidráulico numa rede de distribuição de água comparando com o resultado obtido com o Método das Características tradicional identificando vantagens e desvantagens de ambos.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Esta dissertação tem como objetivo principal modelar computacionalmente o transitório hidráulico de redes de distribuição de água utilizando o Método lagrangeano das Ondas Características (WCM), em alternativa ao Método das Características (MOC).

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

Para atingir o objetivo supracitado, esta dissertação deverá seguir os seguintes passos:

- Desenvolver uma planilha de cálculo para o MOC em um problema reservatório-válvula com ramificação;
- Desenvolver uma planilha de cálculo para o MOC e WCM em um problema reservatório-válvula;
- Desenvolver uma rotina computacional em Java para o MOC em um problema de rede malhada de distribuição de água;
- Testar o programa disponibilizado por Wood et al. (2005) para a modelagem do WCM num um problema de rede de distribuição de água;
- Comparar os resultados das modelagens MOC e WCM obtidos entre os estudos de casos que serão propostos;
- Verificar se, de fato, o WCM é de fácil entendimento, se é um método de fácil aplicação, se realiza menos cálculos em relação ao MOC e se pode substituí-lo em posteriores modelagens computacionais.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro, uma introdução do contexto acerca do golpe de aríete na tubulação de uma adutora ou numa rede de distribuição de água e os efeitos que podem ocasionar falhas de contenção, vazamentos nas conexões, implosões e esmagamentos das paredes da tubulação. Além da problemática, tem-se a proposição dos objetivos gerais e específicos que abordam a modelagem do MOC e do WCM e a verificação do resultado dos dois modelos.

No segundo capítulo é apresentada a Revisão Bibliográfica, que abrange a terminologia acerca dos temas principais da hidráulica permanente e transiente. Também, são abordadas as principais equações para a hidráulica permanente e hidráulica de redes de distribuição de água. Por fim, é discutida a diferença entre os métodos numéricos eulerianos e lagrangeanos.

No terceiro capítulo são apresentados os métodos numéricos utilizados neste trabalho: o Método das Características (MOC) e o Método das Ondas Planas (WCM). Juntamente com as condições de contorno que serão necessárias para a implementação dos modelos supracitados nos estudos de casos que serão propostos ao decorrer dos capítulos.

No quarto capítulo mostra Metodologia deste trabalho que terá a natureza da pesquisa aplicada e com abordagem qualitativa, exploratório com levantamento bibliográfico acerca do tema. Ferramentas de programação orientada a objeto e planilhas de cálculo darão o suporte para realizar as análises numéricas necessárias para a o a conclusão da pesquisa.

No quinto capítulo apresentou-se os Resultados, com base na metodologia, sendo realizado três estudos de casos envolvendo adutoras e redes de distribuição de água hipotéticos sugeridos na literatura. No sexto e último capítulo, fez-se a conclusão do presente trabalho, que teve como tema principal a modelagem computacional do transitório hidráulico de redes de distribuição de água utilizando o método lagrangeano das ondas características, o WCM.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Terminologia

*Escoamento ou Regime Permanente (Steady Flow)*: é o tipo de escoamento onde as propriedades e características do líquido, em cada ponto ao longo do trecho, não possuem variação com o tempo (PORTO, 2006).

*Escoamento ou Regime Não-Permanente (Unsteady Flow)*: é quando as propriedades e características do líquido variam em função do tempo ao longo do trecho (PORTO, 2006).

*Escoamento ou Regime Transiente (Transient Flow)*: É um estado transitório, intermediário, quando as condições do regime mudam de um estado permanente para outro estado permanente (CHAUDHRY, 2014).

*Regime Uniforme (Uniform Flow)*: É quando a velocidade do fluido é constante em qualquer distância ou trecho, dado qualquer tempo (CHAUDHRY, 2014).

*Regime Não-Uniforme (Nonuniform Flow)*: É quando a velocidade do fluido varia entre trechos, em qualquer distância (CHAUDHRY, 2014).

*Regime Permanente-Oscilatório ou Periódico (Steady-Oscillatory or Periodic Flow)*: Ocorre quando as condições de regime variam com o tempo e se eles se repetem após um fixo intervalo de tempo, também chamado de período (CHAUDHRY, 2014).

*Golpe de Aríete (Waterhammer)*: Nome dado ao fenômeno que ocorre no transporte de líquidos num conduto forçado, caracterizado pela variação súbita entre sobrepressão e subpressão num curto espaço de tempo ocasionado pelo fechamento ou abertura de um registro, ligamento ou desligamento/parada de uma bomba ou algo semelhante. Internacionalmente conhecido por *Waterhammer* (CHAUDHRY, 2014) (Tradução Literal: Martelo D'Água), o Golpe de Aríete na língua portuguesa (do latim: *aries* “carneiro”, *-etis* “ajudante”) é uma analogia à ferramenta cilíndrica utilizada para arrombamento de portas e portões.

*Surtos de Pressão (Surge Pressure)*: É o conceito que se refere às oscilações bruscas (rápidas) ou lentas de pressão no sistema, durante o transitório hidráulico (CHAUDHRY, 2014).

*Cavitação (Cavitation)*: O termo cavitação transiente é adotado para a formação e crescimento de cavidades (fração de vazios composto por vapor d'água e gases) devido à queda de pressão para a pressão de vapor do líquido (CHAUDHRY, 2014). Este termo é comumente utilizado para designar o fenômeno que ocorre no tubo de sucção durante o bombeamento.

*Separação de Coluna (Column Separation)*: a geometria da tubulação e o gradiente de velocidade podem influenciar neste fenômeno de modo que a cavidade cresça até completar a seção da tubulação, dividindo-a em duas colunas d'água (CHAUDHRY, 2014).

*Método da Coluna Rígida de Água (Rigid Water Column Theory)*: É o método que considera a parede dos tubos sendo rígidas e a água um fluido incompressível. Consequentemente, quaisquer surtos de pressão no sistema serão sentidos imediatamente por toda a tubulação (PARMAKIAN, 1955). Produz resultados satisfatórios para o fechamento lento de válvulas. Mas, para uma parada súbita de bomba ou fechamento rápido de válvula, deve-se utilizar o Método da Coluna Elástica de Água.

*Método da Coluna Elástica de Água (Elastic Water Column Theory)*: É o método que considera a elasticidade das paredes dos tubos e a água como sendo um fluido compressível. Utiliza-se as equações do momento e da continuidade, que dão origem as equações fundamentais do golpe de aríete (PARMAKIAN, 1955).

## **2.2 Hidráulica de Redes de Distribuição de Água**

O estudo da hidráulica e afins inicia-se na determinação de regras e equações para o escoamento permanente em condutos forçados com base nos princípios e leis da Dinâmica e da teoria da turbulência (PORTO, 2006). Seja uma adutora ou uma rede de distribuição de água, a determinação dos parâmetros necessários para a análise do escoamento permanente deve seguir tais regras essenciais.

Neste tópico, ilustrar-se-ão as principais equações para a determinação dos parâmetros de Carga e Vazão do sistema. Para uma análise do desenvolvimento de cada

equação para o regime permanente, recomenda-se a consulta das literaturas de Porto (2006) e Azevedo Netto e Fernández (2018).

### 2.2.1 Determinação da Linha de Energia e Linha Piezométrica

Para o caso particular do escoamento permanente (PORTO, 2006), aplica-se a equação de Bernoulli para a determinação dos principais parâmetros de Carga e Vazão do sistema (Equação 1).

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2} \quad (1)$$

Onde:

- $p/\gamma$  [L], é a energia ou carga de pressão;
- $z$  [L], é a energia ou carga potencial;
- $V^2/2g$  [L], é a energia ou carga cinética;
- $\Delta H_{1-2}$  [L], é a perda de energia ou perda de carga.

Isto significa que a soma das três cargas (pressão, potencial e cinética) não se iguala à carga total, sendo a diferença denominada como perda de carga (Equação 2),  $\Delta H_{1-2}$  (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018). Isto se dá devido à viscosidade do fluido e também à rugosidade do material que causa a resistência que configura a perda de energia ou carga ao longo de todo o sistema.

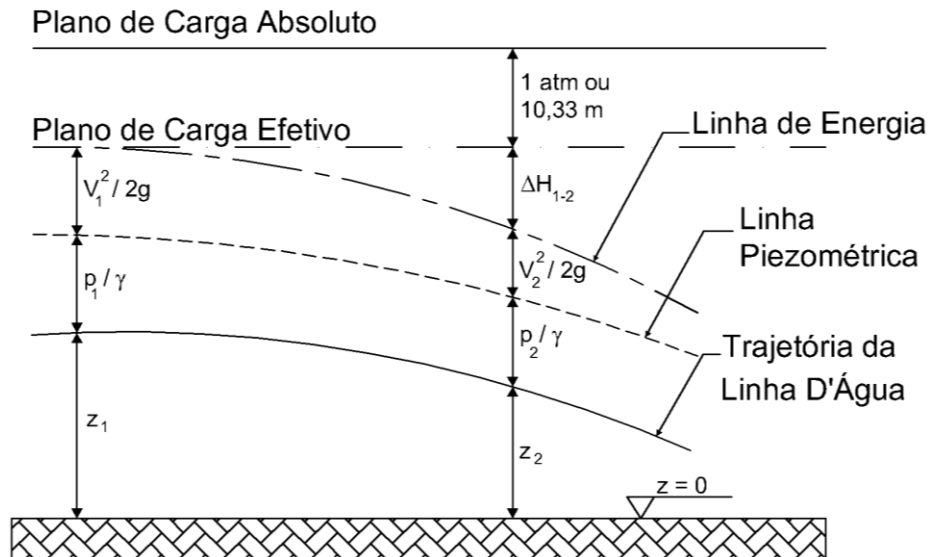
Quando o conduto forçado possui as mesmas características de diâmetro e material, pode-se simplificar o cálculo da equação de Bernoulli desprezando-se as cargas cinéticas (PORTO, 2006), visto que a velocidade permanece a mesma ao longo da tubulação analisada (Equação 3).

$$\Delta H_{1-2} = H_1 - H_2 \quad (2)$$

$$H = \frac{p}{\gamma} + z \quad (3)$$

Onde,  $H$  [L], é a carga piezométrica. Para um melhor entendimento da formulação, tem-se a Figura (1), que ilustra através dos indicadores 1 e 2 as condições de montante e jusante, respectivamente, configurando o fluxo natural gravitatório de um fluido newtoniano em movimento suscetível à lei da entropia.

Figura 1 - Linha Piezométrica e de Energia durante o regime permanente.



Fonte: Adaptado, Porto (2006).

### 2.2.2 Perda de Carga em Condutos Forçados

A estimativa da perda de carga se dá pelas dimensões e geometria da seção transversal (quadrado, circular, etc.), características do material da tubulação (liso ou rugoso) e pelo tipo de escoamento (laminar, transição ou turbulento). Nisso introduz-se o conceito de fator de atrito,  $f$ , que pode ser determinado através de diagramas, ábacos ou equações empíricas (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018), por tratar-se de um adimensional que pode ser determinado por calibração computacional ou experimentos.

Tratando-se de calibração, Porto (2006) introduz a equação de Swamee-Jain expandida para quaisquer tipos de escoamento, oriunda do diagrama de Moody, em função da rugosidade do material,  $\varepsilon$  [L], do diâmetro,  $D$  [L], e do número adimensional de Reynolds,  $Re_y$  (Equações 4 e 5). A Equação (4), dentre outras equações já desenvolvidas, pode ser utilizada um processo iterativo, arbitrando-se um valor inicial de  $f$  para a determinação de um parâmetro desconhecido da equação universal de perda de carga ( $D$ ,  $V$  ou  $\Delta H$ ).

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4)$$

$$Rey = \frac{VD}{\nu} \quad (5)$$

Onde:

- $V$  [ $L.T^{-1}$ ], é a velocidade unidirecional do fluido no conduto forçado;
- $Rey$ , Número Adimensional de Reynolds;
- $\varepsilon$  [ $L$ ], é a rugosidade do material da tubulação;
- $\nu$  [ $L^2.T^{-1}$ ], é a viscosidade cinemática do fluido.

A equação universal de perda de carga, também conhecida como equação de Darcy-Weisbach (Equação 6), é um dos métodos mais utilizados para a determinação do  $\Delta H$ , necessária para o dimensionamento de adutoras e redes de distribuição de água.

Para o conceito de perda de carga localizada, utiliza-se a equação (7) onde inclui-se o fator  $K$  referente à perda cinética causada por orifícios por cada elemento que não seja tubulação no sistema (conexões como curvas, joelhos, tê, registros, reduções, etc.). Para a perda de carga unitária,  $J$  ( $m/m$ ), considera-se a relação  $J = \Delta H / L$  (Equação 8).

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

$$\Delta H = \left[ \sum \left( f \cdot \frac{L}{D} \right) + \sum K \right] \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

$$J = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Existem outras equações mais simples para a determinação da perda de carga num projeto de adutora ou rede de distribuição de água, como a fórmula de Chézy-Manning (Equação 9) e a fórmula de Hazen-Williams (Equação 10), que utilizam valores oriundos da correlação feita entre o material e o tempo de uso das tubulações (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018), no que se refere ao efeito do atrito no escoamento.



$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{J}} = A \cdot R_H^{2/3} \quad (9)$$

$$\frac{J}{Q^{1,85}} = \frac{10,643}{C^{1,85}} \cdot D^{-4,87} \quad (10)$$

Onde:

- n [ $L^{-1/3} \cdot T$ ], é o coeficiente de rugosidade de Manning;
- Q [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ], é a vazão volumétrica do sistema;
- A [ $L^2$ ], é a área da seção transversal do conduto forçado;
- $R_H$  [L], é o raio hidráulico do conduto forçado = área molhada / perímetro molhado;
- C [ $L^{0,37} \cdot T^{-1}$ ], é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams.

### 2.2.3 Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água

Porto (2006) refere-se ao sistema de distribuição de água como um conjunto de tubulações acessórios, reservatórios, bombas e outros equipamentos que tem o propósito de atender, dentro de condições sanitárias de vazão e pressão ideais, cada um dos diversos pontos de consumo de uma cidade ou setor de abastecimento.

De modo geral, qualquer que seja a configuração da rede, esta é constituída por condutos que são classificados como condutos principais ou troncos e condutos secundários. Os principais são aqueles que possuem o maior diâmetro e têm por finalidade o abastecimento de condutos secundários. Estes, por sua vez, possuem diâmetros menores e tem a função direta de abastecer aos pontos de consumo do sistema, ou demanda (PORTO, 2006).

Dependendo da concepção do projeto (pré-projeto), a forma como os tubos são lançados na topografia obedecerão a critérios de demanda e declividades do local. Com isso, a disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias serão classificados como rede ramificada (Figura 2) ou rede malhada (Figura 3).

Para o cálculo da vazão necessária do sistema, considera-se inicialmente a vazão de demanda que é diretamente proporcional à população a ser atendida (PORTO, 2006).

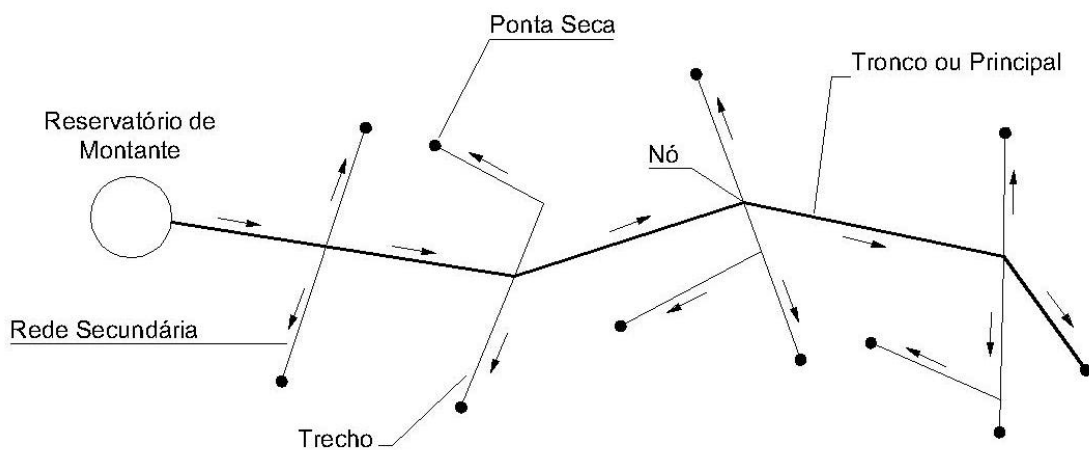
A vazão média anual necessária de distribuição na rede pode ser expressa como:

$$Q_m = \frac{P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \quad (11)$$

Onde:

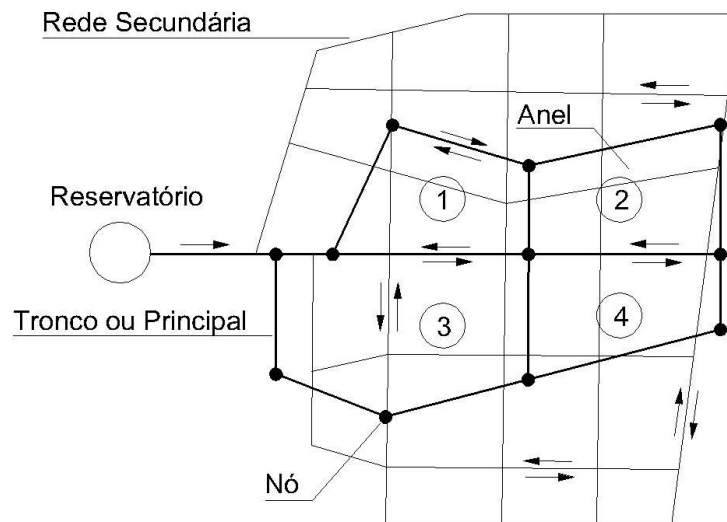
- $Q_m$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ], é a vazão média anual;
- $P$  [adimensional], é a população a ser abastecida no horizonte do projeto;
- $q_m$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ], é a taxa ou cota de consumo *per capita* média da população do projeto;
- $h$  [T], é o número de horas de operação do sistema.

Figura 2 - Representação de uma rede ramificada.



Fonte: Adaptado, Porto (2006).

Figura 3 - Representação de uma rede malhada com quatro anéis ou malhas.



Fonte: Adaptado, Porto (2006).

Levando em conta as variações diárias e horárias de demanda ao longo do ano, multiplica-se a vazão média pelo coeficiente do dia de maior consumo  $k_1$ , que assume valores entre 1,25 e 1,50. Multiplicando-se  $Q_m$  por  $k_1$  (Equação 12), obtém-se a vazão de adução, utilizado para o dimensionamento das unidades do sistema que estão a montante dos reservatórios de distribuição (PORTO, 2006).

Para a determinação da vazão de distribuição,  $Q_d$  (Equação 13), multiplica-se a vazão de adução,  $Q_a$ , por  $k_2$ , que é o coeficiente da hora do dia de maior consumo, cujo valor comum é 1,50.

$$Q_a = k_1 \cdot Q_m = \frac{k_1 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \quad (12)$$

$$Q_d = k_2 \cdot Q_a = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot P \cdot q_m}{3600 \cdot h} \quad (13)$$

Determinada a vazão que sairá do reservatório para a distribuição e sabendo-se as informações topográficas do projeto, inicia-se a análise do regime permanente na rede de distribuição de água. Esta análise, se dá comumente a partir do reservatório até o ponto mais extremo de demanda.

Para os casos de rede ramificada, faz-se a análise trecho a trecho verificando-se as cargas nos nós e nas extremidades com o auxílio da Equação (1), verificando-se os critérios de carga mínima e velocidade máxima para atendimento da demanda (PORTO, 2006).

Para os casos de redes malhadas, Porto (2006) e Azevedo Netto e Fernández (2018) recomendam o uso do método iterativo de Hardy-Cross, com a indicação inicial dos sentidos dos fluxos na tubulação, sendo corrigidos se necessário dentro do processo iterativo.

### 2.3 Métodos Eulerianos e Métodos Lagrangeanos

O transitório hidráulico e seus efeitos vem sendo estudados desde o século XIX, desde o início com Joukowsky (1898, apud MORVARID et al., 2018) que determinava a celeridade em função das características de vazão e perda de carga, e no século XX com Allievi (1932, apud FERRAS et al., 2018) que analisou fisicamente o golpe de aríete. As técnicas gráficas produzidas por Schnyder em 1929 e Bergeron em 1931 permitiram uma análise prática

para o controle de pressões ao longo de tubulações com diferentes condições de contorno (ALMEIDA & KOELLE, 1992).

Parmakian (1955) que introduz o Método da Coluna Rígida e Método da Coluna Elástica, antecede e dá base aos estudos de Pearsall (1965), Thorley (1991), Wylie e Streeter (1993), Chaudhry (2014) evoluindo a utilização das equações da continuidade e da quantidade de movimento com o auxílio do Método das Características (MOC), que é um método com base analítica euleriana (WOOD et al, 2005; BOULOS et al., 2005, apud TRIKI, 2018)).

Por outro lado, Wood et al. (2005, BOULOS et al., 2015) analisam o fenômeno transiente por um método com base analítica lagrangeana denominado Método das Ondas Características (WCM), que é um melhoramento do método das ondas planas, inicialmente desenvolvido por Wood et al. (1965, BOULOS et al., 2015).

Boulos et al. (2005, apud TRIKI, 2018), refere-se ao WCM como um método que facilita o entendimento físico e o cálculo do golpe de aríete, bem como o dimensionamento de equipamentos de proteção e alívio e a simulação da cavitação e da separação de coluna e, acima de tudo, gera o mesmo resultado que o MOC realizando menos cálculos a cada passo de tempo da simulação.

O Método das Ondas Características, WCM, foi demonstrado primeiramente por Wood et al. (1965), onde ilustra-se as primeiras deduções matemáticas para a modelagem do regime não-permanente em sistemas de conduto forçado, denominado inicialmente de Método das Ondas Planas. Trata-se de um estudo inicialmente requerido pela NASA, mas que na década do ano 2000 veio novamente à tona através da empresa MWH Soft®.

Após a parceria supracitada, Lingireddy et al. (2004), juntamente com o desenvolvedor do método, Wood, implementam o conceito de onda de pressão oriunda da equação de Joukowski na análise do funcionamento de ventosas considerando a admissão e expulsão de ar da tubulação. Entretanto, não se refere o método ao WCM, de modo que nos trabalhos posteriores o método é ressaltado e comparado ao MOC. A partir deste trabalho publicado, será introduzido o conceito de Métodos Eulerianos e Lagrangeanos.

O primeiro trabalho que realiza comparações entre MOC e WCM é o de Boulos et al. (2005), que estabelece diretrizes para a modelagem do transitório hidráulico e medidas de prevenção de sinistros em sistemas de distribuição de água.

Inicialmente, o artigo dedica-se em listar, ilustrar e orientar a escolha e o dimensionamento dos equipamentos de proteção contra surtos, dentre eles: by-pass com válvula de retenção, chaminé de equilíbrio, tanque hidropneumático, TAU, válvula antecipadora de onda, válvula redutora de pressão e ventosas (BOULOS et al., 2005). Por fim, detalha as

equações que governam o golpe de aríete, fazendo a comparação entre o método clássico e o novo, ressaltando as seguintes vantagens: o WCM demanda menos esforço computacional e é de melhor entendimento em relação ao MOC, além de os métodos produzirem os mesmos resultados para qualquer problema a ser analisado.

Paralelamente, Wood traz seus argumentos em dois trabalhos semelhantes, Wood (2005), o que é essencial para se ter um bom projeto e operação de sistemas de distribuição de água, além da premissa de que a análise do transitório hidráulico não precisa ser complexa e complicada. O conceito do caminhamento das ondas de pressão fornece um método preciso, intuitivo e simples para a análise de sistemas de tubulação transiente de sistemas de tubulação complexos (WOOD, 2005; WOOD et al. 2005).

O WCM também conseguiu evoluir para um modelo que possibilite a modelagem da cavitação e da separação de coluna. Jung et al. (2009), desenvolve em seu artigo o modelo lagrangeano com a utilização do Modelo de Cavidade de Vapor Discreto, o DVCM, que também é utilizado pelo MOC para a modelagem numérica da cavitação. Em outro artigo publicado no mesmo ano, Jung et al. (2009) reforça a importância do cálculo do golpe de aríete para a detecção de surtos de pressão e dimensionamento de equipamentos de proteção, também fazendo a comparação entre WCM e MOC.

Por outro lado, Ramalingam et al. (2009) enfatiza a necessidade de análise do transitório hidráulico em redes de distribuição de água para verificar o potencial de intrusão associado a oscilação de pressão durante o golpe de aríete. A análise deste fenômeno exige um esforço computacional altíssimo para grandes redes de distribuição quando se utiliza o MOC. Nisso introduz-se como alternativa menos complexa e mais rápida o WCM, investigando-se a precisão numérica e computacional da solução para os dois métodos.

Com isso, pode-se constatar que o WCM é um método promissor, ainda pouco consolidado e utilizado, especialmente no Brasil, para o cálculo do transitório hidráulico em sistemas de adução e distribuição de água e o dimensionamento de equipamentos de proteção ao golpe de aríete. Baseado nessa premissa será feito o desenvolvimento dos principais tópicos do MOC e do WCM que serão implementados na metodologia deste trabalho.

### **3 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSITÓRIO HIDRÁULICO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

#### **3.1 Relevância da Análise do Transitório Hidráulico**

Durante a operação de um sistema hidráulico, ocasionalmente pode-se realizar uma manobra técnica, caracterizada pela restrição de qualquer equipamento hidromecânico para a mudança de equipamentos, alteração de demanda ou manutenção em geral.

O resultado de um fechamento de válvula ou parada/partida de bomba pode ocasionar surtos de pressão, que são suaves quando a operação se faz lentamente ou mais intensas quando a operação se faz mais rapidamente.

Também, surtos de pressão podem ser causados por erro de projeto ou acidente, gerando ondas de pressão de grandes proporções, que superpostas às condições do estado permanente presentes na tubulação no mesmo instante quando o transiente ocorre, e pode facilmente exceder os limites de pressão preestabelecidos e causar danos no sistema (WOOD et al., 2005).

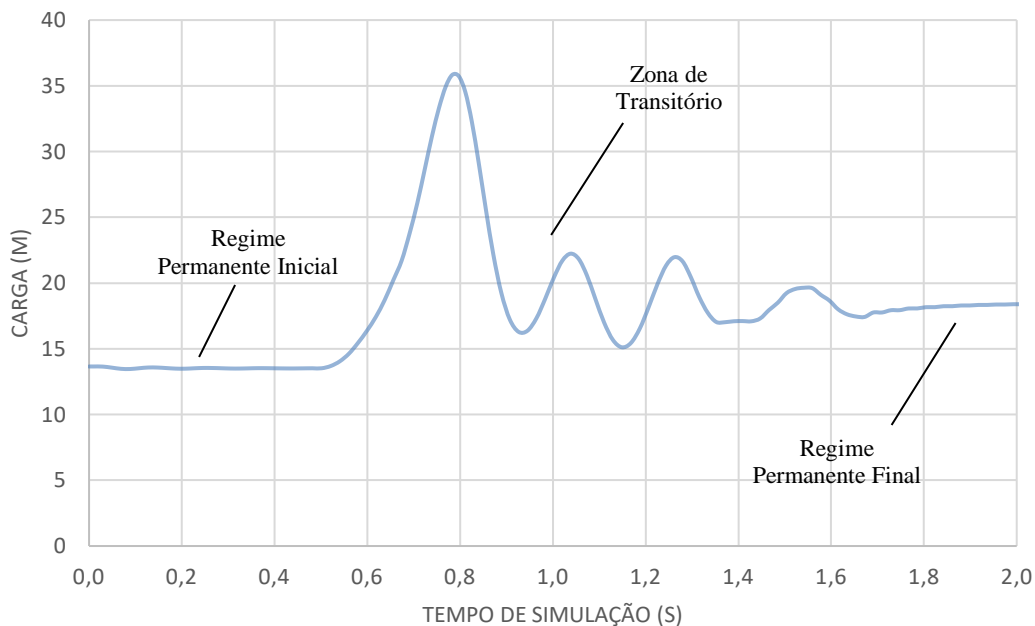
O regime transiente resulta em pressões excessivas altas ou baixas num sistema adutor ou de distribuição. Pressões altas resultam em danos no bombeamento, registro, e outros recursos até ao colapso do sistema. Baixas pressões resultam na cavitação e separação de coluna dentro da tubulação, podendo fazê-la implodir ou ocasionando também uma possível intrusão externa de ar e contaminantes.

Transientes em sistemas de distribuição de água são inevitáveis e tornam-se mais severo nas estações de bombeamento e registros de linha, elevações altas, locais com baixas pressões estáticas e locais remotos que estão distantes de um reservatório elevado.

Ar dissolvido (gás) também pode ser liberado quando a pressão cai consideravelmente, e isso pode promover corrosão nos tubos metálicos, assim como ocasionar incrustação e danos. O uso da modelagem transiente pode prever e eliminar (minimizar) potenciais elos fracos no sistema.

Por serem distúrbios causados durante uma mudança de operação, as ondas de pressão viajam na velocidade do som (acústico ou velocidade sônica), que depende da elasticidade da água e das paredes do tubo. Com o tempo, ações de amortecimento e fricção reduzem as ondas até o sistema estabilizar num novo estado permanente (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo da transição entre regimes permanentes após um curto período de durante regime transiente.



Fonte: Adaptado Wood et al. (2005).

Eventos típicos que ocasionam o transitório hidráulico:

- Ligamento ou desligamento de bombas;
- Abertura ou fechamento de válvulas;
- Mudança nas pressões dos contornos (ex: perda de volume ou recarga hídrica de um reservatório);
- Mudança rápida num nó de demanda (ex: a utilização de um hidrante);
- Alterações de transmissão numa rede (ex: grandes vazamentos, obstrução no ramo principal, congelamento de trecho);
- Enchimento ou esvaziamento de tubos, sem a liberação de ar pelos tubos.
- Problemas de transmissão na rede elétrica que diminua a carga elétrica para o funcionamento de uma bomba;
- Vibrações excessivas;
- O funcionamento de uma válvula de retenção ou registro de linha.

A análise de um regime não-permanente num sistema de distribuição pode-se dar em três teorias distintas (WOOD et al, 2005):

- Teoria do Regime Quase-Permanente;
- Teoria da Coluna Rígida;
- Teoria da Coluna Elástica ou Teoria do Golpe de Ariete.

Estas teorias supracitadas são as mais utilizadas atualmente nos programas computacionais comerciais. Entretanto, no meio acadêmico, a teoria do golpe de aríete é a mais aceita por considerar a compressibilidade do fluido e a elasticidade do material da tubulação. Tal teoria utiliza para solução aproximada numérica o Método das Características (MOC) para simular o transitório hidráulico num sistema de tubulação.

Este tópico abordará a apenas as principais equações para o desenvolvimento da metodologia que será proposta no Capítulo 3. Para consulta do desenvolvimento e demonstração completa das equações fundamentais da teoria do golpe de aríete e do MOC, recomenda-se os textos de Wylie, Streeter e Suo (1993) e Chaudhry (2014).

### **3.2 Equações Fundamentais do Transitório Hidráulico e o Método das Características (MOC)**

Não há, no momento, uma solução analítica para as Equações Diferenciais Parciais do momento e da continuidade. Entretanto, estas EDP's podem transformar-se com o auxílio do MOC em Equações Diferenciais Ordinárias, EDO, particulares em função do tempo (também aplicáveis ao MDF) que possam organizar-se de forma mais simples em equações de substituição direta em qualquer linguagem compiladora numa rotina computacional (WYLIE et al., 1993).

Wylie et al. (1993) ressaltam a importância das condições de contorno, CC, dentro da modelagem. Combinações entre bombas, reservatórios, registros, ventosas, ramificações e equipamentos de proteção de surto de pressão (WOOD et al., 2005), além de considerações de modelos que relacionam materiais com comportamento viscoelástico (Ferreira *et al.*, 2014) e cavitação podem ser atreladas ao MOC e gerando resultados cada vez mais próximos à resultados experimentais.

As equações fundamentais da quantidade de movimento ou momento e a equação da continuidade conjugam um par de EDP hiperbólicas quase-lineares com duas variáveis dependentes (velocidade,  $V$ , e carga piezométrica,  $H$ ) e duas variáveis independentes (Comprimento do ao longo da tubulação,  $x$ , e o tempo,  $t$ ) (WYLIE et al., 1993).



Para iniciar o desenvolvimento das equações características do MOC, identificam-se as equações fundamentais como  $L_1$  (equação da quantidade de movimento ou momentum) e  $L_2$  (equação da continuidade):

$$L_1 = gH_x + V_t + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \quad (14)$$

$$L_2 = H_t + \frac{a^2}{g}V_x = 0 \quad (15)$$

Sendo,  $L_1$  e  $L_2$ , operadores lineares para o MOC;  $H_t$  ou  $\partial H/\partial t$ <sup>1</sup>, é a primeira derivação da carga em relação ao tempo;  $H_x$  ou  $\partial H/\partial x$ , é a primeira derivação da carga em relação ao comprimento;  $V_t$  ou  $dV/dt$ , é a primeira derivação da velocidade em relação ao tempo;  $V_x$  ou  $dV/dx$ , é a primeira derivação da velocidade em relação ao comprimento;  $V$  [ $LT^{-1}$ ] é a velocidade do fluido na tubulação ;  $f$  é o fator de atrito;  $g$  [ $LT^{-2}$ ] é a aceleração da gravidade;  $D$  [ $L$ ] é o diâmetro da tubulação e  $a$  [ $LT^{-1}$ ], a celeridade.

Através da combinação linear das equações (14) e (15), com o auxílio de um multiplicador desconhecido,  $\lambda$  (lambda), tem-se:

$$L = L_1 + \lambda \cdot L_2 \quad (16)$$

Sendo:

$$gH_x + V_t + \frac{f}{2D}V|V| + \lambda \cdot \left( H_t + \frac{a^2}{g}V_x \right) = 0 \quad (17)$$

Reorganizando a equação (17), de modo que se possa isolar  $\lambda$  e agrupar as variáveis  $H$  e  $V$ , tem-se:

$$\lambda \cdot \left( \frac{g}{\lambda}H_x + H_t \right) + \left( \lambda \frac{a^2}{g}V_x + V_t \right) + \frac{f}{2D}V|V| = 0 \quad (18)$$

---

<sup>1</sup> A notação  $H_t$  e  $V_t$  refere-se ao desenvolvimento realizado no livro de Wylie, Streeter e Suo (1993) e a notação  $\partial H/\partial t$  e  $\partial V/\partial t$  refere-se ao desenvolvimento realizado no livro de Chaudhry (2014).

De modo geral, Wylie et al. (1993) assume que ambas as variáveis  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{V}$  são dependentes de  $x$  e  $t$ . No cálculo fundamental, a variável  $\mathbf{x}$  pode-se enquadrar como função de  $\mathbf{t}$ , ou seja, o comprimento pode variar infinitesimalmente em função do tempo. Para Chaudhry (2014), se  $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$  e  $\mathbf{V} = \mathbf{V}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$ , tem-se:

$$\frac{dH}{dt} = H_x \frac{dx}{dt} + H_t \quad (19)$$

$$\frac{dV}{dt} = V_x \frac{dx}{dt} + V_t \quad (20)$$

Ao analisar as equações (18), (19), e (20), percebe-se que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \lambda \frac{a^2}{g} \quad (21)$$

Com isso, a equação (18) torna-se uma EDO ao substituir as equações (19) e (20):

$$\lambda \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (22)$$

Ao isolar  $\lambda$  na equação (21), tem-se:

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (23)$$

Substituindo  $\lambda$  (23) na equação (21), encontra-se a relação entre  $x$  e  $t$  abaixo:

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (24)$$

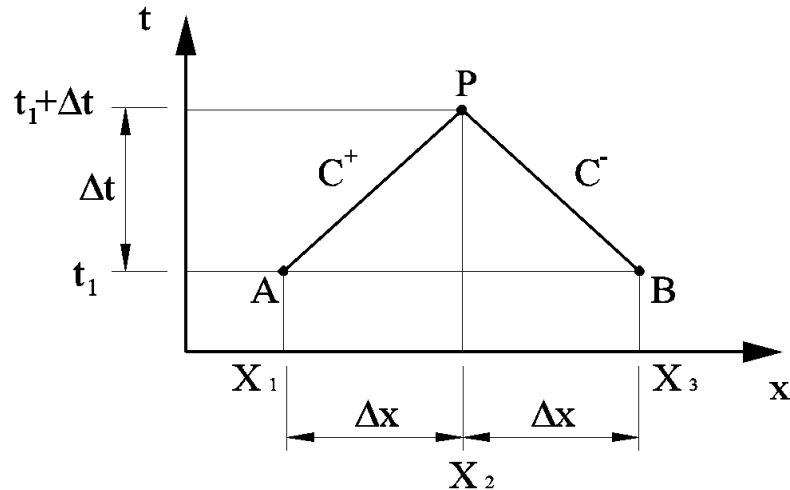
A equação (24) dá a ideia de movimento da onda de pressão (WOOD *et al.*, 2005) e o sinal de positivo ou negativo indica a direção da propagação da celeridade  $a$  (WYLIE et al., 1993; CHAUDHRY, 2014). Por convenção, o sinal positivo de  $a$  se refere a movimentação gráfica da esquerda para a direita em modelagem de adutora e sentido horário para redes ramificadas e/ou malhadas.

$$C^+ \rightarrow \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & (25) \\ \frac{dx}{dt} = +a & (26) \end{cases}$$

$$C^- \rightarrow \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 & (27) \\ \frac{dx}{dt} = -a & (28) \end{cases}$$

Sendo as equações (25) e (27) (Figura 5) intituladas como Equações de Compatibilidade (CHAUDHRY, 2014). Os dois valores reais para  $\lambda$  foram usados para converter as duas originais EDPs (Equações 1 e 2) em duas EDOs totais (Equações 25 e 27). Porém as equações (25) e (27) só são válidas se as equações (26) e (28) forem satisfeitas.

Figura 5 - Linhas Características no plano x-t.



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

O passo de tempo  $\Delta t = \Delta x/a$ , [T], é calculado e satisfeito pela diagonal característica positiva AP (Figura 5). Sendo  $N$  um numeral inteiro, o passo de tempo é um algarismo múltiplo da relação  $L/a$ , que representa o tempo de viagem da onda de pressão ao longo de um tubo de comprimento,  $L$ , e celeridade,  $a$  (WYLIE et al., 1993).

Se as variáveis dependentes  $V$  e  $H$  são conhecidas no ponto A, então a equação (25), no qual é válida ao longo da linha característica positiva  $C^+$ , pode ser integrada entre os limites de A e P, determinando as variáveis desconhecidas  $V$  e  $H$  no ponto P no passo de tempo seguinte (WYLIE et al., 1993).

A equação (27), por sua vez, é satisfeita pela diagonal  $BP$ . A integração da linha característica positiva  $C^-$ , com as condições conhecidas em B, determina as variáveis

desconhecidas no ponto **P**. Introduzindo a área da tubulação nas equações (25) e (27) para escrevê-las nos termos de Vazão no lugar de Velocidade e substituindo a relação  $\mathbf{a} \cdot d\mathbf{t}/g = d\mathbf{x}/g$  faz-se a integral de  $\mathbf{C}^+$  e  $\mathbf{C}^-$  nos intervalos de integração entre **AP** e **BP** respectivamente. A solução de tal desenvolvimento encontra-se no texto de Wylie et al. (1993).

Por fim, determina-se as equações características de modo simplificado como mostram as equações (29) até (36).

A notação  $\mathbf{C}^+$  representa a linha característica positiva **AP** (Figura 5):

$$C^+ : H_P = C_p - B_p Q_P \quad (29)$$

Sendo:

$$C_p = H_A - B \cdot Q_A \quad (30)$$

$$B_p = B - R \cdot |Q_A| \quad (31)$$

A notação  $\mathbf{C}^-$  representa a linha característica negativa **BP**:

$$C^- : H_P = C_m - B_m Q_P \quad (32)$$

Sendo:

$$C_m = H_B - B \cdot Q_B \quad (33)$$

$$B_m = B - R \cdot |Q_B| \quad (34)$$

Onde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (35)$$

$$R = \frac{f \cdot \Delta x}{2gDA^2} \quad (36)$$

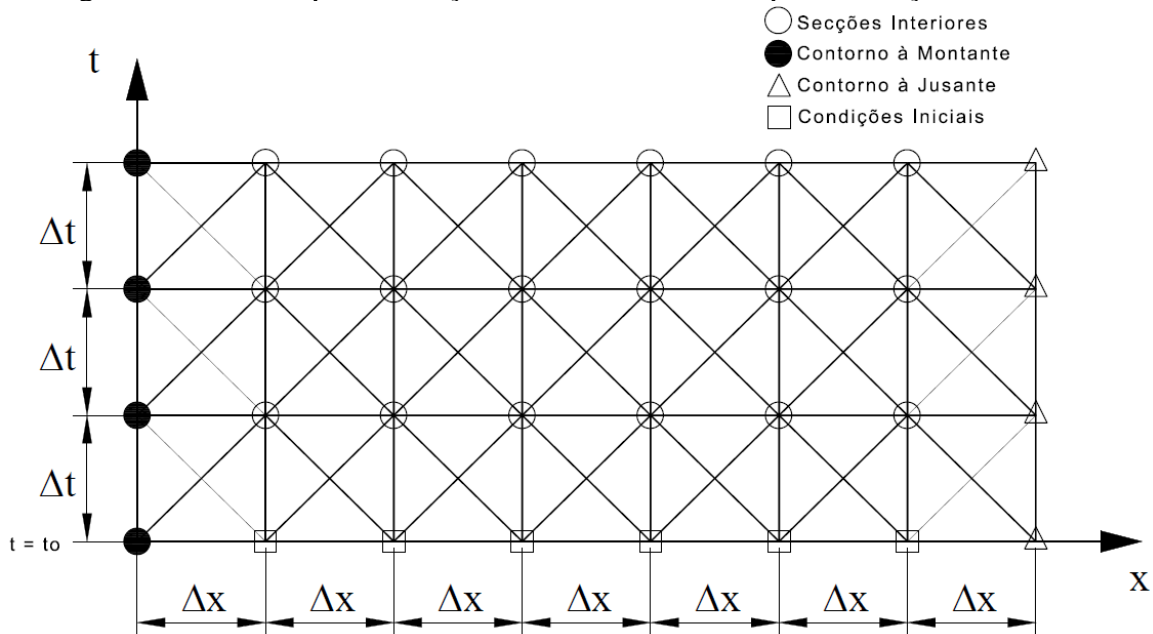
Onde os termos  $C_p$ ,  $B_p$ ,  $C_m$ , e  $B_m$  são constantes conhecidos durante a aplicação das equações. Isolando-se os termos  $H_P$  e  $Q_P$ , tem-se as equações para a determinação de carga e vazão para o passo de tempo posterior:

$$H_P = \frac{C_p B_m + C_m B_p}{B_p + B_m} \quad (37)$$

$$Q_P = \frac{C_p + C_m}{B_p + B_m} \quad (38)$$

Os subscritos **A** e **B** referem-se respectivamente as secções antes e depois de **P**, num passo de tempo anterior (Figura 5). Para uma análise com mais acurácia, uma tubulação é dividida num número de trechos, **N**, sendo o número de secções **N + 1**, espaçadas em  $\Delta x$  [L] (Figura 6). O valor de  $\Delta x$  deve ser tal que permita uma maior precisão do modelo MOC.

Figura 6 - Malha x-t para a solução do MOC em uma simples tubulação.



Fonte: Adaptado de Chaudhry (2014).

A discretização espacial e temporal deve obedecer a algum critério para estabilidade e convergência do MOC, utilizando-se a Condição ou Número de Courant ( $C_N = a \cdot \Delta t / \Delta x$ ), que estabelece uma relação entre  $\Delta x$  e  $\Delta t$ , fixando-se um valor e determinando-se o outro diretamente com o auxílio da celeridade e do  $C_N$  a ser adotado (valores entre 0,5 e 1,0).

### 3.3 Regime Transiente de Redes de Abastecimento de Água

Neste tópico serão abordados dois modelos, Wylie et al. (1993) e Chaudhry (2014), oriundos do MOC, que determinam o contorno para nós e junção de ramificação.

Para os dois modelos, seja para uma adutora com ramificações ou para redes ramificadas, malhadas ou mistas, faz-se a análise da continuidade nos nós das ramificações, considerando que carga é igual para todos os tubos no exato ponto de conexão. Para a dedução dos contornos utiliza-se como base as equações características do MOC de cada modelo.

#### 3.3.1 Junção de Ramificação, Modelo Wylie et al. (1993)

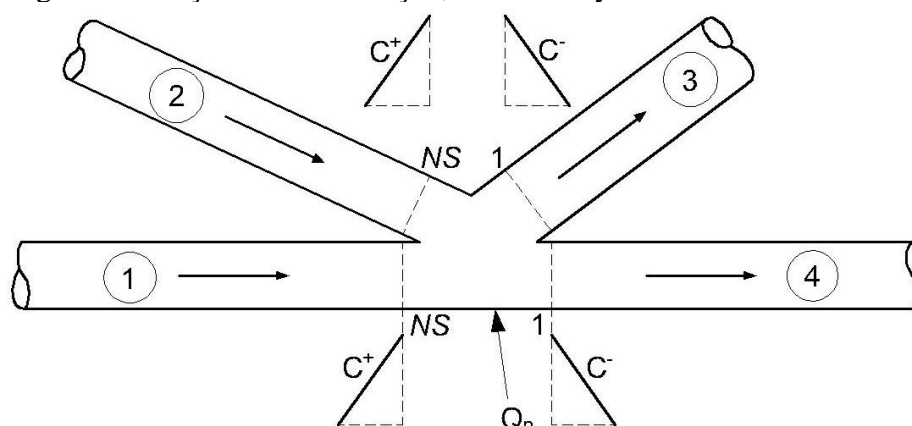
Uma junção pode ser entendida como um ponto de conexão dos elementos de um sistema (WYLIE et al., 1993), onde há duas variáveis: uma vazão nodal,  $Q_n$ , no qual eventualmente pode ser nulo e uma vazão para fora do sistema sendo um valor negativo, e a pressão ou carga piezométrica nodal,  $H$ .

Pode-se considerar dois tipos de junções ou nós:

1. Com cargas constantes ou prescritas (valores conhecidos em função do tempo), com vazões independentes; ou
2. Com vazões constantes ou impostas, com cargas independentes.

A figura (7) mostra o esquema da ramificação ou junção com vazão nodal inclusa e quatro tubos conectados. A equação da continuidade para esta situação pode ser deduzida através do somatório das vazões de entrada incluindo a vazão nodal, que devem ser zero a qualquer instante (Equação 37).

Figura 7 - Junção de Ramificação, Modelo Wylie e Streeter.



Fonte: Wylie et al. (1993).

$$\sum Q_{in} = \sum Q_P + Q_n = 0 \quad (39)$$

Na equação (37),  $\Sigma Q_P$  é o somatório das vazões de entrada dos tubos 1 e 2, incluindo a retirada ou contribuição da vazão nodal,  $Q_n$ . Por outro lado, a equação de energia requer que a carga em cada elemento da junção seja a mesma (Equação 38):

$$H = H_{1,NS} = H_{2,NS} = H_{3,1} = H_{4,1} \quad (40)$$

Para a junção com carga piezométrica conhecida, a vazão pode ser determinada diretamente a partir das equações (29) e (32) e a vazão nodal a partir da equação (39). Na mesma junção analisada, com vazão nodal conhecida (que pode ser zero), as equações de compatibilidade podem ser escritas da seguinte forma:

$$Q_{P1,NS} = \frac{C_{p1}}{B_{p1}} - \frac{H_P}{B_{p1}} \quad (41)$$

$$Q_{P2,NS} = \frac{C_{p2}}{B_{p2}} - \frac{H_P}{B_{p2}} \quad (42)$$

$$-Q_{P3,1} = \frac{C_{m3}}{B_{m3}} - \frac{H_P}{B_{m3}} \quad (43)$$

$$-Q_{P4,1} = \frac{C_{m4}}{B_{m4}} - \frac{H_P}{B_{m4}} \quad (44)$$

Somando se as equações (41) a (44), tem-se:

$$Q_{P1,NS} + Q_{P2,NS} - Q_{P3,1} - Q_{P4,1} = \frac{C_{p1}}{B_{p1}} - \frac{H_P}{B_{p1}} + \frac{C_{p2}}{B_{p2}} - \frac{H_P}{B_{p2}} + \frac{C_{m3}}{B_{m3}} - \frac{H_P}{B_{m3}} + \frac{C_{m4}}{B_{m4}} - \frac{H_P}{B_{m4}} \quad (45)$$

$$\sum Q_P = \frac{C_{p1}}{B_{p1}} + \frac{C_{p2}}{B_{p2}} + \frac{C_{m3}}{B_{m3}} + \frac{C_{m4}}{B_{m4}} - \frac{H_P}{B_{p1}} - \frac{H_P}{B_{p2}} - \frac{H_P}{B_{m3}} - \frac{H_P}{B_{m4}} \quad (46)$$

Expandindo as equações (45) e (46) para uma junção de cinco ou mais tubos, tem-se:

$$\sum Q_P = \sum \frac{C_p}{B_p} + \sum \frac{C_m}{B_m} - \left( \sum \frac{1}{B_p} + \sum \frac{1}{B_m} \right) \cdot H_P \quad (47)$$

$$\sum Q_P = S_C - S_B \cdot H_P \quad (48)$$

Onde  $S_C$  e  $S_B$  é referente ao somatório das razões das constantes características, conforme a equação (47). Substituindo a equação (48) na equação (39), desenvolve-se uma equação similar às equações características, levando em consideração à vazão nodal:

$$S_C - S_B \cdot H_P + Q_n = 0 \quad (49)$$

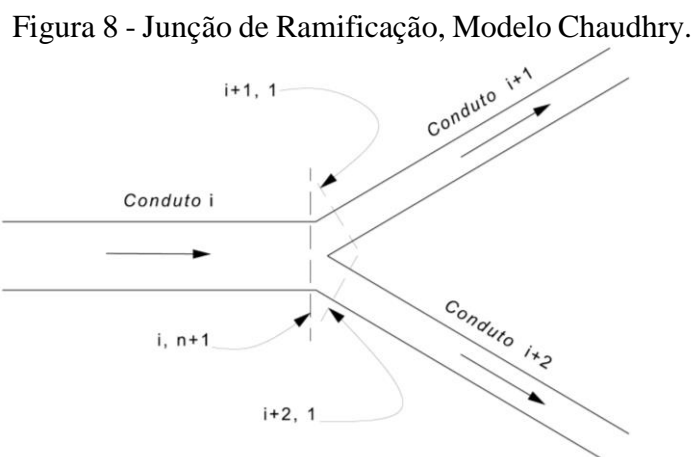
$$H_P = \frac{S_C}{S_B} - \frac{1}{S_B} \cdot Q_n \quad (50)$$

$$H_P = C_n - B_n \cdot Q_n \quad (51)$$

Onde  $C_n$  e  $B_n$  são referentes às razões conforme a equação (50). Este método pode ser aplicado para qualquer quantidade de tubos conectando-se em uma junção de ramificação ou nodal.

### 3.3.2 Junção de Ramificação, Modelo Chaudhry (2014)

O comportamento da junção de uma ramificação no regime transiente (Figura 3) pode ser descrito pelas equações abaixo:

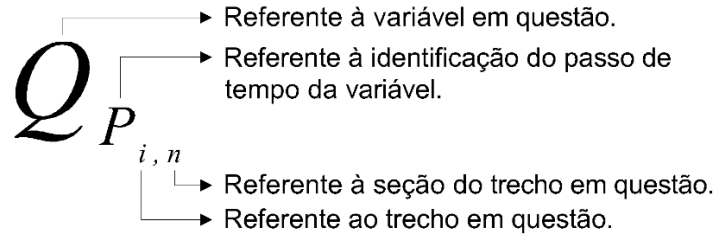


Fonte: adaptado de Chaudhry (2014).



Os subscritos das variáveis devem ser entendidos da seguinte forma:

Figura 9 - Significado dos subscritos, Modelo Chaudhry.



Fonte: adaptado de Chaudhry (2014).

- Equação da Continuidade:

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} + Q_{P_{i+2,1}} \quad (52)$$

- Equações Características:

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (53)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}} \quad (54)$$

$$Q_{P_{i+2,1}} = C_{n_{i+2}} + C_{a_{i+2}} H_{P_{i+2,1}} \quad (55)$$

Onde:

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (56)$$

$$R = \frac{f \cdot \Delta t}{2DA} \quad (57)$$

$$C_p = Q_A + C_a H_A - R \cdot Q_A |Q_A| \quad (58)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - R \cdot Q_B |Q_B| \quad (59)$$

- Equação da energia:

As perdas de carga e o diferencial de velocidade em diferentes tubos na junção serão desprezados, sendo, assim a equação de energia (CHAUDHRY, 2014):

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} = H_{P_{i+2,1}} \quad (60)$$

Sendo solução a Equação (16):

$$H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad (61)$$

Equações semelhantes podem ser derivadas para uma junção de ramificação mais de três tubulações. O estudo do transitório hidráulico em redes também é contemplado nos trabalhos de Almeida e Koelle (1992), Wylie et al. (1993), Axworthy (1998), Sirvole (2007) e Sam Ani e Khayatzadeh (2010).

### 3.4 As Ondas de Pressão e Método das Ondas Características (WCM)

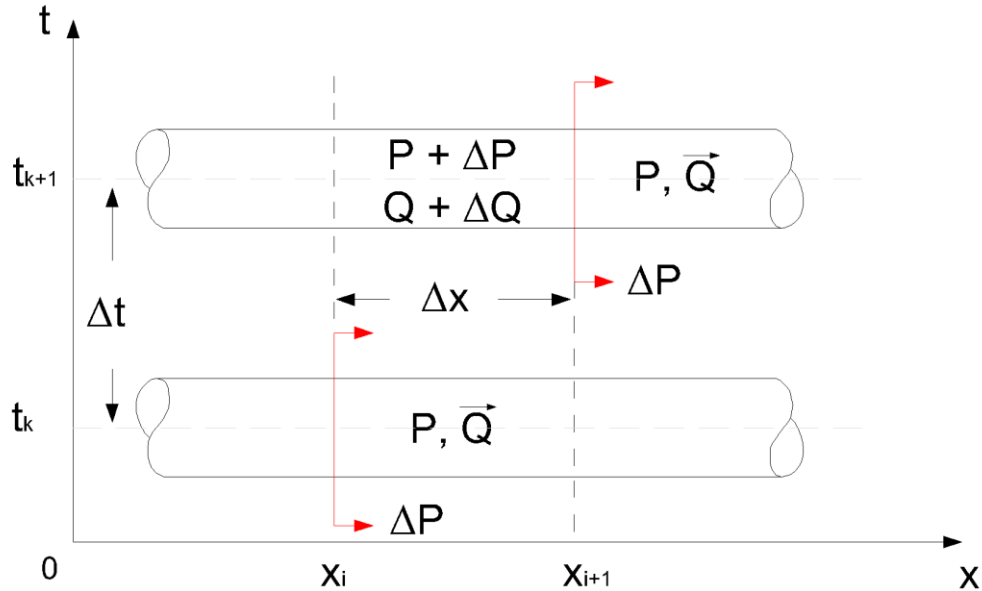
O WCM baseia-se no conceito de que o fluxo transiente resulta da geração e propagação de ondas de pressão que ocorrem a partir do resultado de um distúrbio no sistema. A onda de pressão, que viaja na velocidade do som, é parcialmente transmitida e refletida para todas as discontinuidades na tubulação (Junções, Conexões e Contornos) que pode variar conforme a resistência do material e do fluido, e da rugosidade da parede da tubulação (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015).

#### 3.4.1 Determinação da equação da onda de pressão ao longo do trecho

A relação entre a variação de pressão  $\Delta P$  e a mudança na vazão  $\Delta Q$  durante a passagem da onda de pressão define a reação do transitório hidráulico na tubulação, sendo a base para o desenvolvimento das expressões matemáticas requeridas (WOOD et al., 2005).

O método consiste em que, durante o passo de tempo,  $\Delta t$ , a onda de pressão,  $\Delta P$ , viaja numa velocidade sônica (celeridade),  $a$ , causando uma aceleração no fluido correspondente a uma variação de vazão,  $\Delta Q$ , numa distância percorrida,  $\Delta x$  (Figura 10).

Figura 10 - Propagação da Onda de Pressão numa Tubulação.



Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

Com isso, a aceleração causada pelo desequilíbrio imposto pela variação de pressão  $\Delta P$  pode ser verificada aplicando o princípio da primeira lei de Newton ( $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ ):

$$(P + \Delta P - P) \cdot A = \rho \cdot \Delta x \cdot A \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (19)$$

Considerando que a celeridade no transitório hidráulico pode ser escrito como  $a = \Delta x / \Delta t$  e dividido por  $\gamma \cdot A$ , a equação (19) pode ser escrita em função da carga como:

$$\Delta H = a \frac{\Delta Q}{gA} \quad (20)$$

Sendo a equação (20), apresentada primeiramente por Joukowsky (1898, apud MORVARID et al., 2018). A celeridade,  $a$ , pode ser estimada assim como Chaudhry (2014) e Wylie e Streeter (1993, apud DAUDE et al., 2018) realizam no MOC. Para a aplicação desta relação, o WCM analisa a cada passo de tempo o caminhamento da onda de pressão de modo que, a cada nó encontrado, ela seja transmitida para outros nós e refletida de volta para o ponto

de excitação (no caso, uma válvula ou uma bomba) (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015).

### **3.4.2 *Análise das Ondas de Pressão***

As ondas de pressão são geradas em qualquer trecho de uma adutora ou de uma rede de distribuição de água a partir de uma perturbação que resulta na alteração do comportamento da vazão requerida. Tal ocorrência pode-se dar através da abertura ou fechamento de uma válvula, a parada ou partida de uma bomba ou qualquer outro tipo interferência diretamente no comportamento do sistema (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015).

Uma vez gerada, a onda de pressão percorre por todo o sistema, replicando-se e refletindo-se a cada contorno em que colide e retornando ao seu ponto de origem. As condições de carga e vazão são também afetadas durante a colisão entre ondas e nos contornos supracitados (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015). A abordagem de rastreamento de ondas de pressão forma a base para o funcionamento do WCM (Figuras 11 a 15).

Quando se inicia o regime transiente, tomando por exemplo o fechamento instantâneo de uma válvula gaveta (Figura 11), é gerado uma onda de pressão que percorre na velocidade do som todo o trecho da tubulação da rede até o próximo contorno (Figura 12).

Logo após encontrar a junção, a onda de pressão é imediatamente transmitida para os demais tubos da rede e refletida em direção ao seu ponto de origem (Figura 13).

Após a etapa de transmissão e reflexão, as ondas de pressão percorrem, cada uma em seu respectivo trecho, na velocidade do som até cada uma encontrar o seu respectivo contorno (Figura 14).

Por fim, após as ondas de pressão viajarem por todo o trecho, elas colidirão com os seus respectivos contornos e alterarão suas respectivas cargas e vazões, refletindo novas ondas de pressão para o sistema (Figura 15). E isso ocorrerá até o amortecimento total do golpe de aríete, configurando o fim do regime transiente para o sistema.

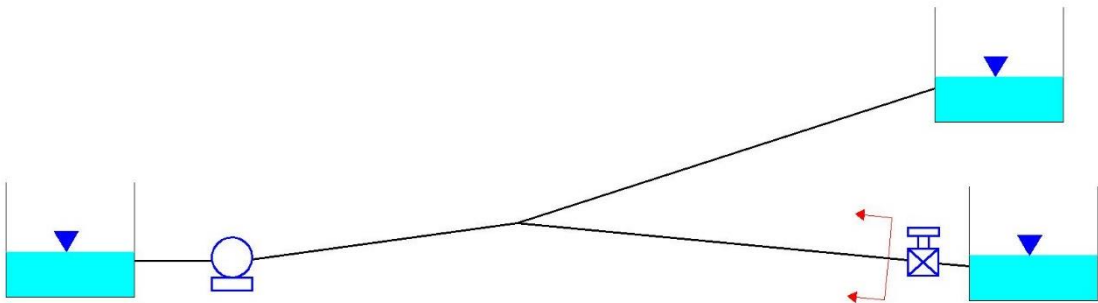
Este método consiste essencialmente no rastreamento a cada passo de tempo da propagação e atenuação das ondas de pressões que se movimentam em velocidade sônica, e a computação de seus efeitos nas cargas e vazões ao longo do sistema de adução ou distribuição de água (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015).

Iniciando no regime permanente, o mecanismo de rastreamento é iniciado após o distúrbio que é aplicado num dado ponto do sistema. Tal distúrbio causa um incremento na

vazão que resulta na onda de pressão ( $\Delta H$ ) no local (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015). A onda de pressão percorre toda a tubulação em velocidade sônica, e é parcialmente transmitida e refletida nas discontinuidades. As variações de carga e vazão a cada passo de tempo são computadas nas seções da tubulação somando a parcela da onda de pressão, durante a sua passagem.

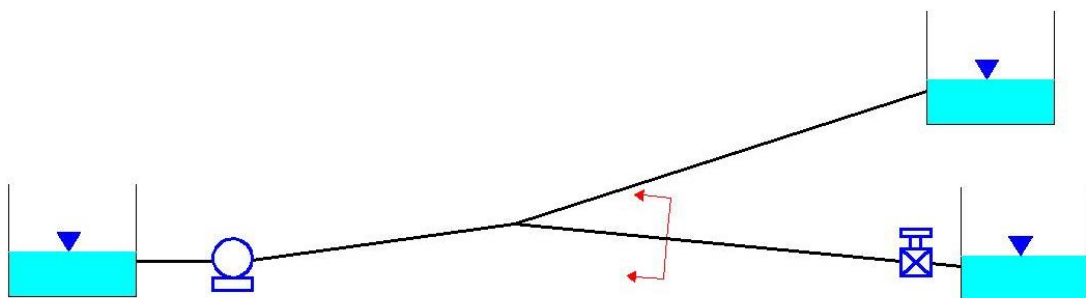
Os efeitos do atrito (resistência devido à viscosidade/rugosidade) interferem na propagação das ondas de pressão e são simuladas usando uma analogia com o orifício. Eles são modelados sob lei quadrática de orifícios de atrito ou discontinuidades artificiais com a seleção de seus devidos coeficientes de orifício (WOOD et al, 2005 apud BOULOS et al., 2015). Estes são colocados em vários pontos discretos ao longo de cada tubo para melhor aproximar os efeitos distribuídos das perdas de linha. As ondas de pressões são então refletidas e transmitidas nesses orifícios de fricção, resultando em um fluxo incremental e mudanças de pressão.

Figura 11 - Início da propagação da onda de pressão numa tubulação.



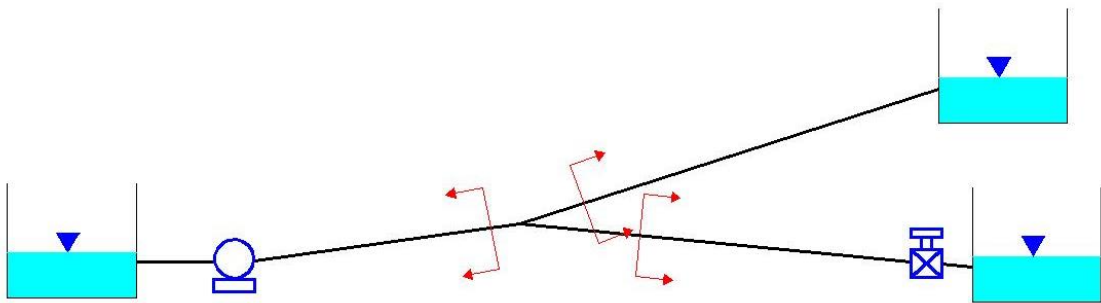
Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

Figura 12 - Momento da onda de pressão após percorrer o trecho na velocidade do som.



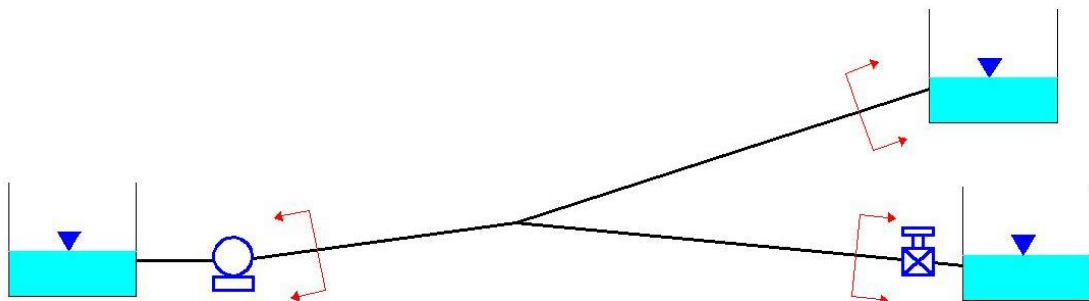
Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005, apud BOULOS et al., 2015).

Figura 13 - Transmissão e reflexão da onda de pressão originária no fechamento rápido da válvula.



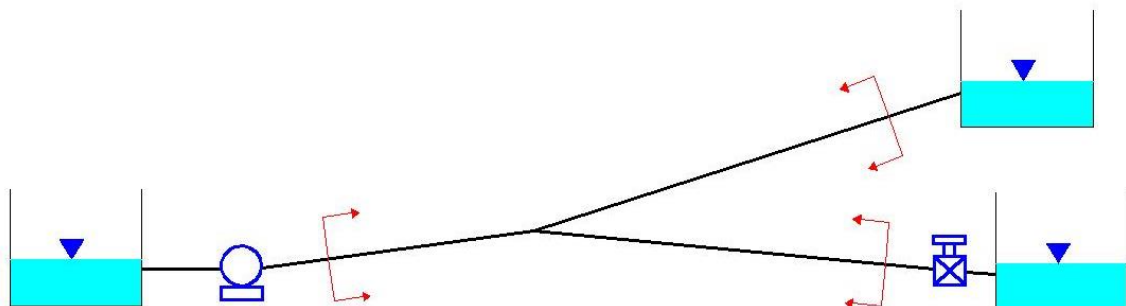
Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

Figura 14 - Momento em que as ondas de pressão geradas percorrem a rede.



Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005, apud BOULOS et al., 2015).

Figura 15 - Reflexão das ondas de pressão repetindo o processo inicial.



Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

Os históricos de vazão, carga e ondas de pressão, partindo de cada descontinuidade, são determinadas nos termos das magnitudes das ondas, da natureza da descontinuidade (nó, ramificação, válvula, bomba centrífuga, reservatórios e equipamentos de proteção), e das condições anteriores à ação das ondas (WOOD et al, 2005). As novas informações obtidas

devem estar disponíveis a cada passo de tempo, pois o método tem o seu funcionamento atrelado a estas mudanças de carga nos contornos que ocorrem na simulação.

Para Wood et al. (2005), as definições abaixo devem ser consideradas:

- 1- Um evento transiente é um evento interno que ocorre quando a onda de pressão alcança uma descontinuidade como um nó de junção, bomba, válvula, ou qualquer elemento da rede que causará a sua transmissão e reflexão;
- 2- Um passo de tempo transiente ( $\Delta t$ ) ocorre entre dois eventos transientes consecutivos e é um período de tempo durante o qual as ondas de pressão permanecem inalteradas estruturalmente na simulação.

O passo de tempo transiente ( $\Delta t$ ) define o intervalo de tempo entre cálculos sucessivos que é determinado por dois fatores:

- 1-  $\Delta t$  deve ser suficientemente pequeno para representar com precisão todas as nuances do modelo durante a passagem das ondas de pressão; e
- 2- É necessário que todas as atualizações de carga, vazão e onda de pressão no sistema ocorram num número inteiro de intervalos de tempo.

Os períodos de traslado das ondas de pressão por entre todas as descontinuidades serão então um número inteiro de passos de tempo no regime transiente.

### 3.4.3 Determinação das condições de contorno para o WCM

A análise generalista do comportamento das ondas de pressão em um contorno (descontinuidade) de uma tubulação se dará conforme a Figura 16.

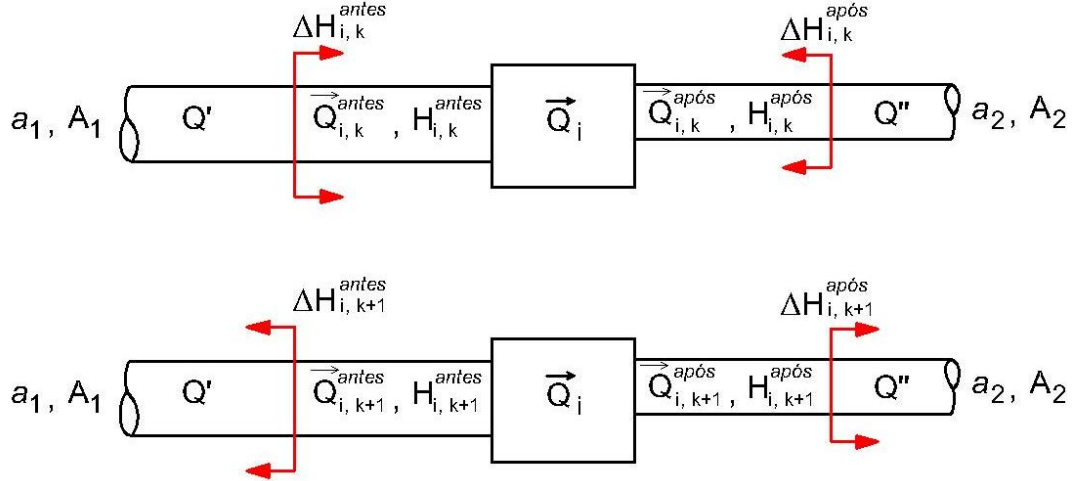
Para o cálculo dos valores de  $\mathbf{Q}$  e  $\mathbf{H}$  em cada nó (também chamado de componente), seja ele um equipamento, bomba, reservatório, registro ou apenas uma junção, utiliza-se a seguinte condição:

$$\Delta H_{i,k} = A(t) + B(t)|Q| + C(t)|Q|Q \quad (62)$$

Onde  $\Delta \mathbf{H}$  [L] é a variação da carga, num dado passo de tempo e os termos  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{B}(t)$  e  $\mathbf{C}(t)$  representam os coeficientes para uma representação geral da equação característica.

Para o método,  $\Delta H_{i,k} = H_{i,k}^{após} - H_{i,k}^{antes}$ , ou seja, é verificada as cargas imediatamente antes e depois do nó para o cálculo da variação de carga, sendo  $i$ , a localização do nó no sistema e  $k$ , o passo de tempo da simulação.

Figura 16 - Condição do contorno antes e após a colisão das ondas de pressão.



Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

Para o cálculo da onda de pressão no próximo passo de tempo, faz-se a seguinte consideração:

$$\Delta H_{i,k+1}^{antes} = \Delta H_{i,k}^{antes} + F_1(Q_{i,k+1}^{antes} - Q_{i,k}^{antes}) \quad (63)$$

$$\Delta H_{i,k+1}^{após} = \Delta H_{i,k}^{após} + F_2(Q_{i,k+1}^{após} - Q_{i,k}^{após}) \quad (64)$$

Onde:

$$F_1 = \frac{a_1}{g \cdot A_1} \quad (65)$$

$$F_2 = \frac{a_2}{g \cdot A_2} \quad (66)$$

Com isso:

$$H_{i,k+1}^{antes} = H_{i,k}^{antes} + \Delta H_{i,k}^{antes} + \Delta H_{i,k+1}^{antes} \quad (67)$$



$$H_{i,k+1}^{após} = H_{i,k}^{após} + \Delta H_{i,k}^{após} + \Delta H_{i,k+1}^{após} \quad (68)$$

Para a variação na carga no passo de tempo  $\mathbf{k+1}$ , tem-se:

$$H_{i,k+1}^{após} - H_{i,k+1}^{antes} = A(t) + B(t)|Q| + C(t)|Q|Q \quad (69)$$

Substituindo as equações de (63) a (68) na equação (69), esta pode ser rearranjada e reescrita da seguinte forma:

$$C(t)|Q|Q + B(t)|Q| - (F_1 + F_2)Q + b = 0 \quad (70)$$

Sendo:

$$b = [A(t) + H_{i,k}^{antes} + 2\Delta H_{i,k+1}^{antes} - H_{i,k}^{após} - 2\Delta H_{i,k+1}^{após} + (F_1 + F_2)Q] \quad (71)$$

A equação (70) pode ser solucionada usando-se a solução de equações quadráticas de Bhaskara ou através do método numérico iterativo de Newton-Raphson iniciando com a solução inicial,  $Q_0 = Q_i$ .

Caso não seja utilizado algum modelo de cavitação como o DVCM, a vazão nos trechos são numericamente iguais a vazão no contorno:  $Q_{i,k+1}^{antes} = -Q_0$  e  $Q_{i,k+1}^{após} = Q_0$ .

As ondas de pressão  $\Delta H_{i,k+1}^{antes}$  e  $\Delta H_{i,k+1}^{após}$  são calculadas para determinar a magnitude de sua influência nos contornos, por sua vez, determinando as cargas  $H_{i,k+1}^{antes}$  e  $H_{i,k+1}^{após}$  após a passagem das ondas de pressão.

Os coeficientes da equação característica do contorno do WCM,  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$ , são determinados usando-se os dados de carga/vazão da operação do contorno, seja ele uma bomba centrífuga ou uma válvula gaveta.

Diversos componentes, podem ser modelados usando somente o coeficiente  $C(t)$  que é tido como o coeficiente resistivo, onde a relação carga/vazão é adequadamente descrita por um único termo resistivo, onde:

$$C(t) = \frac{\Delta H}{Q^2} \quad (72)$$

### 3.5 Contornos MOC utilizados nos Estudos de Caso

#### 3.5.1 *Condição de Contorno do Reservatório a Montante com Nível Constante*

$$Q_P = \frac{C_m - H_{res}}{B_m} \quad (73)$$

$$H_P = H_{res} \quad (74)$$

#### 3.5.2 *Condição de Contorno da Válvula a Jusante*

$$Q_P = 0,5 \cdot (-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4 \cdot C_p \cdot C_v}) \quad (75)$$

$$H_P = \frac{C_p - Q_P}{B_p} \quad (76)$$

Onde  $C_v$  é o coeficiente referente à lei de fechamento da válvula a jusante.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Caracterização Objeto de Estudo e da Pesquisa**

Este trabalho tem como objeto de estudo o transitório hidráulico (sinônimo de regime transiente) em redes de distribuição de água. Condição que ocorre durante um fechamento de válvula ou parada/partida de bomba que pode ocasionar surtos de pressão, que são suaves quando a operação se faz lentamente ou mais intensas quando a operação se faz mais rapidamente.

A oscilação brusca entre sobrepressão e subpressão resultado da mudança de sentido do gradiente de velocidade da água em um conduto forçado provocado pelas condições supracitadas é chamado de golpe de aríete, e este fenômeno pode ser modelado através da teoria da coluna elástica de água com a aplicação do MOC como foi abordado no Capítulo 3.

Entretanto, este trabalho vem com a proposta de implementar o WCM para a realizar a modelagem computacional do transitório hidráulico numa rede de distribuição de água, sugerida por Wood et al. (2005), com o intuito de verificar a eficácia e vantagem computacional comparado ao MOC.

Para o desenvolvimento deste trabalho, a natureza da pesquisa estará aplicada com métodos numéricos computacionais e com abordagem quantitativa, sem a necessidade de análise estatística. O método de pesquisa será exploratório com levantamento bibliográfico acerca do tema, para posterior análise de casos que serão abordados posteriormente. Ferramentas de programação orientada a objeto e planilhas de cálculo darão o suporte para realizar as análises numéricas necessárias para a conclusão da pesquisa.

### **4.2 Premissas para a realização do estudo**

Wood et al. (2005) analisa o fenômeno transiente por um método com base analítica lagrangeana denominado Método das Ondas Características (WCM), que é um melhoramento do método das ondas planas, inicialmente desenvolvido por Wood et al. (1965). É um método que facilita o entendimento físico e o cálculo do golpe de aríete, bem como o dimensionamento de equipamentos de proteção e alívio e a simulação da cavitação e da separação de coluna e, acima de tudo, gera o mesmo resultado que o MOC realizando menos cálculos a cada passo de tempo da simulação.

Sabe-se que a análise do regime transiente é mais complexa quando realizado numa rede malhada ou mista de distribuição de água, este trabalho realizará a modelagem do Método das Ondas Características para simulação computacional do transitório hidráulico numa rede de distribuição de água e comparar com os resultados obtidos através do Método das Características.

### 4.3 Método para a Modelagem do Regime Permanente

Para o início da análise do problema em redes, deve-se realizar os cálculos do regime permanente para que se tenha a base para a verificação do regime transiente e modelagem do golpe de aríete.

Nos casos de rede malhada, onde os métodos computacionais necessitam de iterações para calibrar os dados de vazão e carga, os sentidos das vazões devem ser do ponto de maior para menor energia, fazendo-se a ressalva para casos de bombas à montante que tenha a cota inferior à distribuição. Desta forma, a favor da entropia, que é o caso mais provável da movimentação de fluidos numa rede malhada pressurizada susceptível ao efeito da aceleração da gravidade.

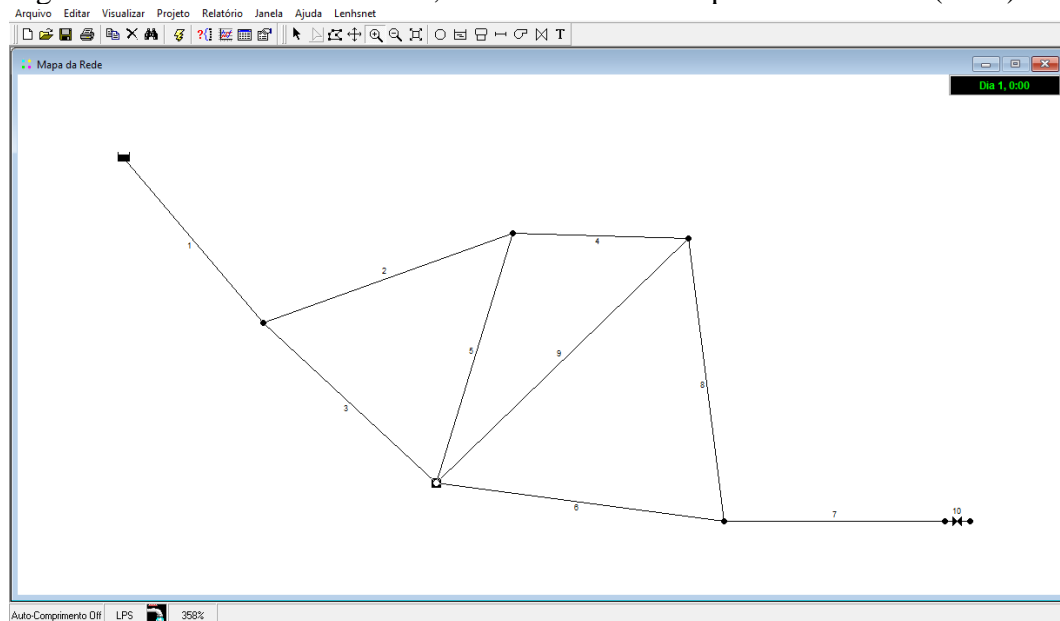
Entretanto, para os resultados deste trabalho, a ferramenta que será utilizada é o programa computacional EPANET<sup>®</sup>, para a simulação do regime permanente nos exemplos que serão discutidos posteriormente (Figura 17).

Figura 17 - Versão do EPANET<sup>®</sup> utilizado neste trabalho.



Fonte: Autor (2019).

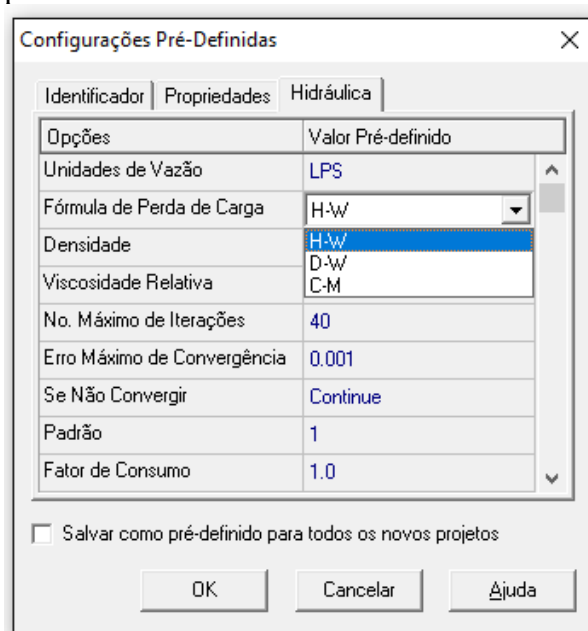
Figura 18 - Ambiente EPANET®, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005).



Fonte: Autor.

Todos os trechos, nós, reservatórios, válvulas e os dados de carga e vazão necessários para o cálculo do regime permanente serão inseridos no programa conforme o Manual EPANET 2.0 (2009). Assim como o cálculo das perdas de cargas que podem ser conforme as equações de (6) a (10), também disponíveis para utilização (Figura 19).

Figura 19 - Configurações para o modelo de cálculo da perda de carga para o regime permanente.



Fonte: Autor (2019).

Após a inserção dos dados no programa, estes serão salvos num arquivo formato .NET, que é a extensão padrão de projetos EPANET, logo após de os cálculos serem realizados para regime permanente.

Entretanto, para este trabalho, o projeto será importado para o arquivo de extensão .INP, que gera um arquivo que pode ser visualizado com qualquer ferramenta computacional de texto. Este arquivo possibilita a visualização dos dados inseridos pelo operador, diretamente no EPANET.

Também, e não menos importante, os resultados gerados pelo EPANET devem ser salvos, paralelamente, num arquivo de extensão .RPT, no qual, representa o relatório da simulação realizada através do programa, com os dados inseridos anteriormente.

Com os arquivos INP e RPT, tem-se as informações necessárias para dar o passo adiante no dimensionamento de um sistema de distribuição de água, no que se refere à modelagem computacional do transitório hidráulico.

No caso, além dos dados de comprimento, diâmetro, rugosidade, tipo de material, altura geométrica dos nós e o nível do reservatório / curva das bombas; tem-se os dados de vazão e carga em todos os nós e trechos do sistema. Que são informações necessárias para a verificação do regime transiente do projeto.

#### **4.4 Modelagem do transitório hidráulico em sistemas de abastecimento de água através do MOC**

Após o cálculo do regime permanente, seja de uma adutora ou seja de uma rede de distribuição de água, os dados de carga piezométrica (**H**) e vazão (**Q**) para cada trecho de tubulação do sistema servirão como condições iniciais para os cálculos do transitório hidráulico.

Para este trabalho, o regime transiente será analisado durante um período de tempo fixo, que independe do fim do transitório, que será apenas para constatar as cargas máximas de sobrepressão e subpressão. A variação da carga de cada seção dos trechos do problema será analisada mediante a definição de um valor de  $\Delta t$ , que depende de  $\Delta x$  e da celeridade,  $a$ , que obedecem à Condição de Courant (definição na página 26).

A partir dessas premissas, o MOC, com base na Teoria da Coluna Elástica de Água, deverá ser implementado para que retorne valores de **H<sub>P</sub>** e **Q<sub>P</sub>** a cada passo de tempo definido por  $\Delta t$ . Isto será feito de modo que se resulte a plotagem de um gráfico, que mostra o comportamento oscilatório de carga e vazão do transitório o suficiente para se realizar a análise do golpe de aríete e que se possa dimensionar equipamentos de alívio para tal.

Neste trabalho, foram utilizadas duas ferramentas para a modelagem do MOC: uma planilha de cálculos, ilustrando o processo de aprendizado para a implementação em rotinas de programação em Java; e no UFC7, programa pertencente ao Sistema UFC, desenvolvido em Java, para a modelagem do golpe de aríete em condutos forçados.

#### **4.4.1 Ferramentas Computacionais para a Modelagem Numérica do MOC**

Para a modelagem do MOC, foi utilizada uma planilha de cálculos em MS Excel<sup>®</sup>, com o intuito de se entender o processo natural do método. Isto se dá de modo que os resultados da planilha sirvam de gabarito, para uma posterior implementação numa rotina computacional mais robusta e escrita em Java.

O UFC7, módulo do Sistema UFC, que será utilizado na análise dos resultados do MOC, é uma rotina totalmente desenvolvida em Java. De modo que problemas mais complexos possam ser modelados, para fins de desenvolvimento de projetos reais em engenharia de infraestrutura hidráulica. Os detalhes de cada ferramenta serão mostrados a seguir.

##### **4.4.1.1 Planilha de Cálculo para o MOC**

A planilha de cálculo é uma ferramenta essencial para o entendimento de qualquer método numérico, que se venha implementar, outrora, computacionalmente. De fato, é um trabalho que demanda mais tempo do que a redação de uma rotina em programação para resolver o mesmo problema. Entretanto, é comum fazer o uso das planilhas de cálculo para o aprendizado de um método numérico e para o entendimento do comportamento dos valores, que são gerados célula por célula.

Nisso, para a simulação do MOC em uma planilha de cálculo, é necessário que se coloque todos os dados necessários organizados em uma única coluna, para a modelagem do golpe de aríete (Figura 20).

Na mesma planilha, será feita a divisão de trechos em seções e nós. Cada trecho possui um número  $N$  de subtrechos com  $N+1$  seções. E cada trecho possui dois nós, representando o início e o fim de um trecho (Figura 21). A partir dessa divisão, será separada uma coluna da planilha para cada seção, de modo que represente a vazão volumétrica na tubulação em cada trecho, durante todos os passos de tempo necessários para a simulação. Da mesma forma, será feita para as cargas piezométricas de cada seção, inclusive dos nós.

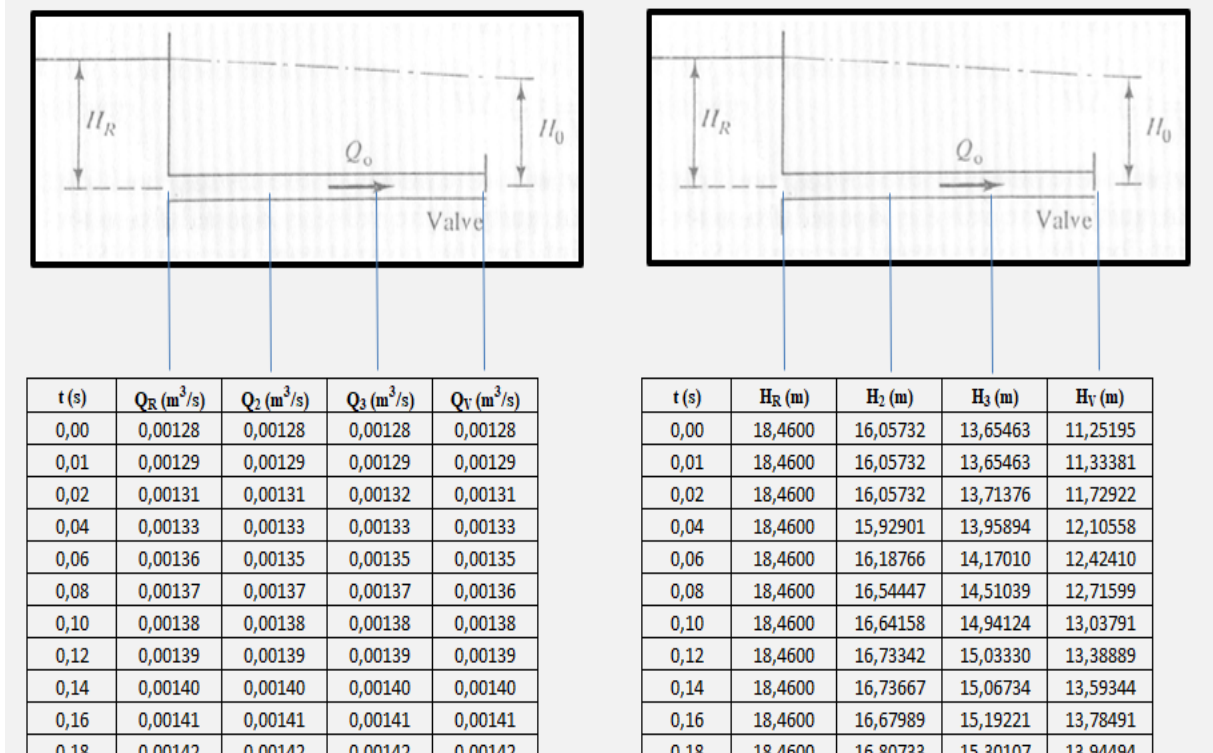
Também, os nós representarão quaisquer contornos que venham compor o sistema, como, por exemplo, uma ventosa de tríplice função ou um TAU. Sendo que neste trabalho o primeiro nó do sistema representará um reservatório a montante e o último representará uma válvula a jusante.

Figura 20 - Exemplo de uma planilha de cálculo com os dados necessários para iniciar o MOC.

Rugosidade - $\epsilon$ (mm):	0.10	Número de Reynolds - Rey:	509296
Diâmetro da Ramificação - $D_R$ (mm):	250.00	Fator de Atrito - $f$ :	0.0155
Diâmetro da Adutora - $D$ (mm):	500.00	Perda de Carga no Sistema - $\Delta H_{O-R}$ (m):	1.639417
Comprimento da Ramificação - $L_R$ (m):	500.00	Carga na Válvula - $H_o$ (m):	148.3606
Comprimento da Adutora - $L$ (m):	1000.00	Ancoragem Contra o Movimento Longitudinal - $\psi$ :	13.72549
Carga no reservatório - $H_{Res}$ (mm):	150.00	Celeridade - $a$ (m/s):	1311.485
Espessura do Tubo - $e$ (mm):	30	Número de Divisões Trecho - $N$ :	10
Coefficiente de Poisson - $\nu_p$ :	0.35	Discretização do Espaço (Nº Courant) - $\Delta x_{def}$ (m):	100
Módulo de Elasticidade Volumétrica - $K$ (GPa):	2.19	Passo de Tempo - $\Delta t$ (s):	0.076249
Módulo de Young - $E$ (GPa):	110	Passo de Tempo (Nº Courant) - $\Delta t_{def}$ (s):	0.076249
Discretização do Espaço - $\Delta x$ (m):	100	Área da Seção da Adutora - $A_1$ (m <sup>2</sup> ):	0.19635
Tempo de Fechamento da Válvula - $t_c$ (s):	2.1	Área da Seção da Ramificação - $A_2$ (m <sup>2</sup> ):	0.049087
Lei de Fechamento da Válvula - $E_m$ :	0.6111	Constantes MOC - $Ca_1$ :	0.001469
Massa Específica da água $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ):	1000	Constantes MOC - $Ca_2$ :	0.000347
Aceleração da Gravidade $g$ (m/s <sup>2</sup> ):	9.81	Constantes MOC - $R_1$ :	0.794501
Vazão do Sistema $Q_o$ (m <sup>3</sup> /s):	0.2000	Constantes MOC - $R_2$ :	10.9193

Fonte: Autor (2019).

Figura 21 - Exemplo de simulação do MOC, de um trecho com quatro seções entre dois nós (Reservatório a montante e válvula a jusante).



Fonte: Autor (2019).



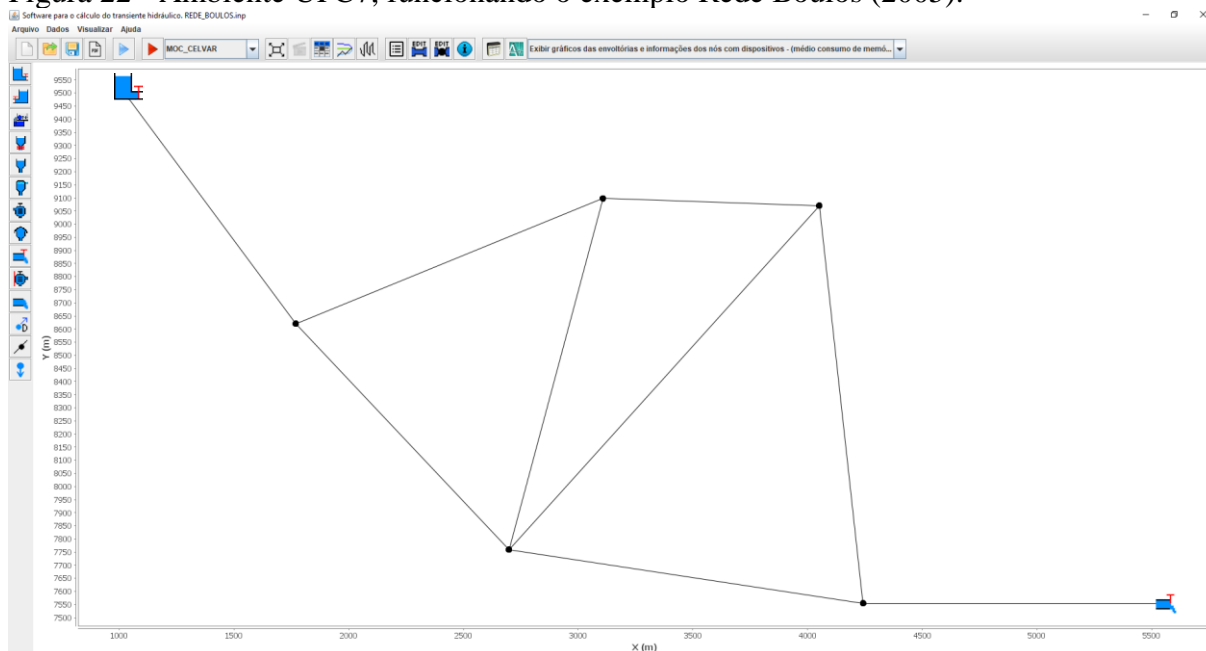
#### 4.4.1.2 O Módulo UFC7

O Laboratório de Hidráulica Computacional tem as suas linhas de pesquisa voltadas para o desenvolvimento de ferramentas computacionais para o dimensionamento de estruturas hídricas e hidráulicas. Este pacote de soluções é chamado de Sistema UFC.

O sistema consiste em módulos enumerados, cada um abrangendo uma área relevante da Engenharia de Recursos Hídricos, como, por exemplo: Drenagem Urbana, cálculo e dimensionamento de redes de abastecimento de água, cálculo e dimensionamento de redes de coleta de esgoto, cálculo e dimensionamento estações elevatórias e adutoras, e modelagem do golpe de aríete em condutos forçados.

O módulo para a modelagem computacional do transitório hidráulico, inicialmente intitulado como UFC6, desde o seu desenvolvimento em 2005. Com a modernização das linguagens de programação e o advento da programação orientada a objeto (POO), desenvolveu-se o UFC7 (Figura 22), escrito em Java, desempenhando as mesmas funções da versão anterior. Isto se deu devido a necessidade de modernizar a linguagem de programação, pois, o Visual Basic (VB), que é a linguagem de escrita do UFC6, passou a não ter mais suporte de sua mantenedora, a Microsoft®.

Figura 22 - Ambiente UFC7, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005).



Fonte: Autor (2019).

Os dados gerados da compilação deste problema, no UFC7, serão apresentados nos Resultados e Apêndices deste trabalho.

## 4.5 Modelagem do transitório hidráulico em sistemas de abastecimento de água através do WCM

Da mesma forma como é exigido para o cálculo do MOC, os dados de carga piezométrica ( $H$ ) e vazão ( $Q$ ) para cada trecho de tubulação do sistema servirão como condições iniciais para os cálculos das ondas de pressão e do transitório hidráulico.

Inicialmente, antes de qualquer cálculo que venha a ser feito, deve-se realizar a análise das Ondas de Pressão ( $\Delta H$ ). Pois, como prevê o WCM, a predeterminação dos caminhamentos das ondas de pressão, a partir do fechamento lento ou rápido de uma válvula a jusante, a cada passo de tempo,  $\Delta t$ , tem-se a geração de uma onda de pressão, seguido de reflexão e transmissão de ondas a cada junção em que se colide.

O regime transiente será analisado durante um período de tempo fixo, que, também, não depende do fim do transitório, apenas para constatar as cargas máximas de sobrepressão e subpressão. A variação da carga de cada seção dos trechos do problema será analisada somente nos nós, a cada passo de tempo  $\Delta t$ . Desta forma, não sendo necessária a obediência à Condição de Courant.

Com base nas condições de contorno do WCM, cada onda de pressão que resulta do fechamento da válvula, causará um acréscimo de pressão, computado pelo coeficiente resistivo,  $C(t)$ . Nisso, o método retornará valores de  $H_P$  e  $Q_P$  a cada passo de tempo definido por  $\Delta t$ .

Para a plotagem dos gráficos de carga piezométrica nos nós, serão utilizadas, também, duas ferramentas para a modelagem do WCM: uma planilha de cálculo, assim como no MOC, para a posterior implementação em rotinas de programação em Java; e no programa desenvolvido por Wood et al. (2005).

### 4.5.1 Ferramentas Computacionais para a Modelagem Numérica do WCM

Para a modelagem do WCM, também foi utilizada uma planilha de cálculos, com o intuito de se entender o processo natural do método. O entendimento desse método é essencial para o desenvolvimento dos resultados deste trabalho.

A base teórica para o desenvolvimento desta planilha consiste num exemplo proposto na literatura por Wood et al. (2005), onde trata um problema de reservatório-válvula para demonstrar o WCM durante o fechamento lento da válvula a jusante. É de suma

importância o entendimento deste método em forma de planilha para se ter uma espécie de gabarito para uma posterior implementação em linguagem de programação.

Entretanto, este trabalho não realizará a implementação em Java deste método. E sim, será utilizado um programa já existente, desenvolvido por Wood et al. (2005) para a verificação do modelo.

#### 4.5.1.1 Planilha de Cálculo para o WCM

Para a simulação do WCM em uma planilha de cálculo, é necessário que se coloque todos os dados necessários organizados em uma única coluna, assim como foi feito na planilha do MOC (Figura 23).

Figura 23 - Exemplo de uma planilha de cálculo com os dados necessários para iniciar o WCM.

DADOS DE ENTRADA	
L	1000 ft
D	6 pol
a	4000 ft/s
Qini	2,356 ft <sup>3</sup> /s
Hini	9 ft
2L/a	0,5 s
$\Delta t$	0,5 s
g	32,2
A	0,20 ft <sup>2</sup>
F1	633,2556

Fonte: Autor (2019).

Ao contrário da planilha do MOC, não se fará a divisão de trechos em seções e nós. Haverá a análise, apenas, dos contornos e junções. A cada passo de tempo da simulação serão calculadas as condições de  $H_P$  e  $Q_P$  imediatamente antes e depois da passagem da onda de pressão (Figura 24).

A partir do desenvolvimento da planilha e da obtenção dos resultados em forma de gráficos, será utilizado um programa desenvolvido por Wood et al. (2005), para a validação do que será obtido.

4.5.1.2 Programas Wood et al. (2005)

O programa intitulado como WCM, foi desenvolvido por Wood et al. (2005), sendo patrocinado e disponibilizado em endereço eletrônico pela MWH Soft®. O programa possui interface desenvolvida em VB e com versatilidade para receber quaisquer entradas para a análise de quaisquer redes ou adutoras (Figura 25).

Figura 24 - Exemplo de simulação do WCM (Reservatório a montante e válvula a jusante).

t	%A	Area(t)	Q1	H1	dH1	Q3	dH3	H3	C(t)	qi	b	e	Q0
0,0	1	0,20	2,356	9	0	2,356	0	9	-1,62				
0,5	0,9	0,18	2,356	9	0	2,353	2,08	11,08	-2,00	2,36	1500,95	-633,26	2,35
1,0	0,8	0,16	2,353	11,08	-2,08	2,342	4,89	13,89	-2,53	2,35	1496,79	-633,26	2,34
1,5	0,7	0,14	2,342	13,89	-4,89	2,320	8,81	17,81	-3,31	2,34	1487,01	-633,26	2,32
2,0	0,6	0,12	2,320	17,81	-8,81	2,283	14,48	23,48	-4,50	2,32	1469,38	-633,26	2,28
2,5	0,5	0,10	2,283	23,48	-14,48	2,224	23,08	32,08	-6,49	2,28	1440,42	-633,26	2,22
3,0	0,4	0,08	2,224	32,08	-23,08	2,129	36,94	45,94	-10,13	2,22	1394,26	-633,26	2,13
3,5	0,3	0,06	2,129	45,94	-36,94	1,974	61,21	70,21	-18,02	2,13	1320,38	-633,26	1,97
4,0	0,2	0,04	1,974	70,21	-61,21	1,706	108,91	117,91	-40,54	1,97	1197,95	-633,26	1,71
4,5	0,1	0,02	1,706	117,91	-108,91	1,187	219,45	228,45	-162,14	1,71	980,13	-633,26	1,19
5,0	0	0,00	1,187	228,45	-219,45	0,721	75,38	84,38	-162,14	1,19	541,22	-633,26	0,72
5,5	0	0,00	0,721	84,38	-75,38	0,542	38,54	47,54	-162,14	0,72	390,46	-633,26	0,54
6,0	0	0,00	0,542	47,54	-38,54	0,444	23,01	32,01	-162,14	0,54	313,37	-633,26	0,44
6,5	0	0,00	0,444	32,01	-23,01	0,384	14,95	23,95	-162,14	0,44	267,35	-633,26	0,38
7,0	0	0,00	0,384	23,95	-14,95	0,345	10,25	19,25	-162,14	0,38	237,44	-633,26	0,34
7,5	0	0,00	0,345	19,25	-10,25	0,317	7,28	16,28	-162,14	0,34	216,95	-633,26	0,32
8,0	0	0,00	0,317	16,28	-7,28	0,297	5,30	14,30	-162,14	0,32	202,38	-633,26	0,30

Fonte: Autor (2019).

Figura 25 - Ambiente WCM, funcionando o exemplo Rede Boulos (2005).

WCM Data Editor

Line Segment Data

Item	Pos-1	Pos-2	# of Time Increments	C/GA	Initial Flow	Resistance
1	7	3	47	14,4985		30,0009
2	9	4	62	23,7249		14,3395
3	10	2	39	39,5415		15,6613
4	11	6	31	65,9025		7,9901
5	13	12	47	52,722		6,3493
6	14	5	54	19,8656		17,9549
7	15	8	47	14,4985		30,0009
8	16	17	39	29,6561		12,046
9	18	19	39	56,2368		4,0558

Tabulated Output

# of Time Increments between Results: 77

Node #	Node #
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

Junction Data

Item	Junction Location	Number of Legs	Hydraulic Grade
1	2	4	611,788
2	3	3	621,06
3	4	3	616,597
4	5	3	604,47
5	6	3	609,607
6	7	0	626,64
7			
8			
9			

Transient Characteristics

Item	Time seconds	Area/Speed Ratio
1	0	1
2	0,1	0,787
3	0,2	0,597
4	0,3	0,428
5	0,4	0,273
6	0,5	0,131
7	0,6	0

Component Type:  Pump  Valve

Component Position: 8

Pump: Reference Values: A:  B:

Valve: Wide Open Resistance: 0,6666

Component (Valve/Pump) Data

Item	Pos-1	Pos-2	Coefficient A	Coefficient B	Coefficient C	HGL Left	HGL Right
1	8	20	0	0	0	-0,6666	599,97
2							
3							
4							
5							
6							

Number of Lines Segments: 9

Number of Components: 1

Number of Junctions: 6

Simulation Time(sec): 60

Time Increment: 0,0129

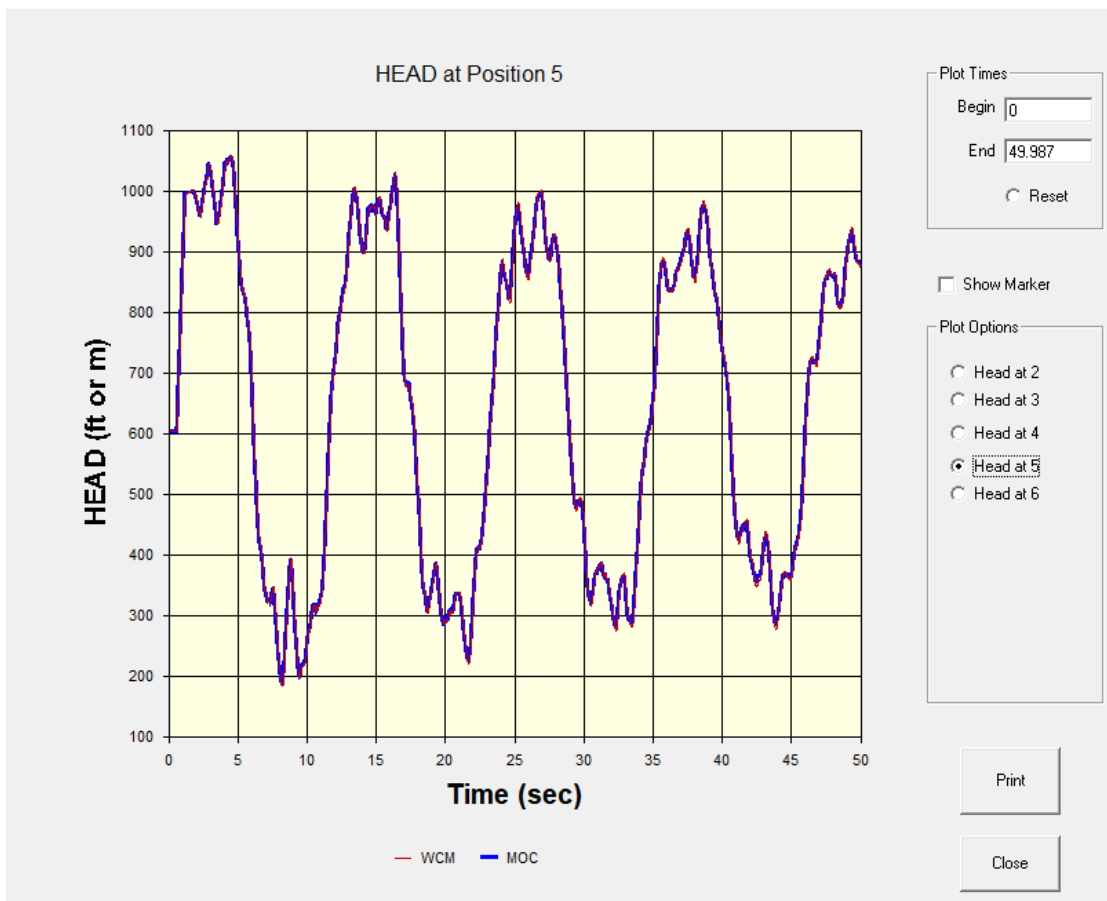
Copyright 2004 by Wood/Lingireddy/Boulos. All rights reserved.

Fonte: Autor (2019).

Os resultados gerados pelo programa serão calculados tanto para o MOC quanto para o WCM, com o intuito de se realizar a comparação entre métodos. No caso, serão plotados gráficos da variação da carga piezométrica em todos os nós do problema inserido na interface do programa (Figura 26).

Figura 26 - Ambiente WCM, exemplo do gráfico de variação da carga piezométrica no nó 5, Rede Boulos (2005).

Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

#### 4.6 Análise dos Resultados Gerados entre os Modelos MOC e WCM

Para a realização da análise dos resultados obtidos através do MOC e pelo WCM, será utilizada a ferramenta de plotagem de gráficos do MS Excel<sup>®</sup>. Isto se dará através da sobreposição dos resultados dos gráficos obtidos entre os métodos, para verificar a validade entre um modelo já consolidado pela literatura (MOC; WYLIE et al., 1993; CHAUDHRY, 2014) e um modelo promissor, que é pouco difundido e conhecido (WCM, WOOD et al., 2005).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a apresentação dos Resultados, serão propostos três estudos de casos: uma rede ramificada hipotética, fruto da produção de um artigo produzido para revista (em fase de revisão); um problema reservatório-válvula proposto na literatura de Wood et al. (2005); e uma rede malhada oriunda do trabalho de Boulos et al. (2005).

### 5.1 Estudo de Caso 1 - Rede Ramificada Hipotética - MOC

Para realizar o entendimento da modelagem transitório hidráulico em ramificação de junções, utilizando o MOC, um cenário hipotético foi desenvolvido preliminarmente em planilha de cálculo, de modo que representasse o efeito do golpe de aríete em uma ramificação de 250 mm de diâmetro numa secção central de uma adutora linear simples de diâmetro de 500 mm, de material em ferro fundido, com seus respectivos Módulo de Young ( $E = 110$  GPa) e Coeficiente de Poisson ( $\nu = 0,35$ ).

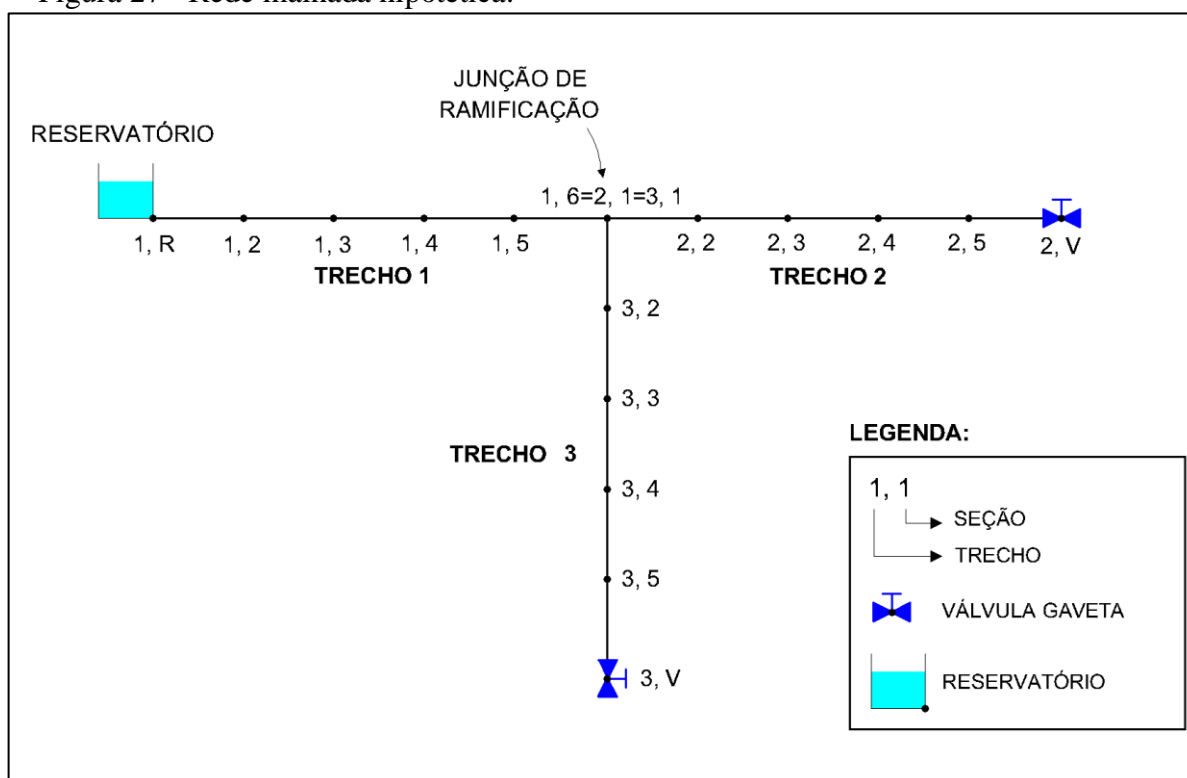
Primeiramente, foram determinadas as pressões e vazões em regime permanente utilizando a equação de Bernoulli, proposto por Porto (PORTO, 2006; AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018). Só então o método das características foi utilizado para modelar o regime transiente nas secções internas da adutora com as condições de contorno de uma junção numa ramificação através das equações de momento e continuidade desenvolvidos e ilustrados por Wylie et al. (1993) e Chaudhry (2014).

A modelagem numérica baseou-se num cenário de distribuição gravitária, reservatório-válvula, com uma junção de ramificação localizada no meio da adutora (Figura 27). O regime permanente do sistema foi alocado como condição inicial no tempo  $t = 0$ .

#### 5.1.1 Dados do Sistema

Os trechos 1 e 2 possuem 500 m de comprimento e 500 mm de diâmetro. O trecho 3 possui 500 m de comprimento e 250 mm diâmetro. Também, cada trecho foi dividido em 5 partes com 6 seções cada, todas sobre a cota geométrica +0,00 m, onde são desenvolvidas as análises do transiente hidráulico. O reservatório a montante possui o nível d'água de 150 m acima da cota das seções e o material da tubulação é equivalente ao ferro fundido (rugosidade = 0,10 mm, espessura = 30 mm).

Figura 27 - Rede malhada hipotética.



Fonte: Autor (2019).

O MOC nesta análise de transiente consiste em definir uma condição inicial para realizar os cálculos a cada  $\Delta t$  (passo de tempo) predefinido, assim como realizado no trabalho de Ferreira et al. (2015) e Barbosa et al. (2018). No entanto, esse cenário tem uma junção de ramificação, que necessita de uma condição de contorno específica para equalizar a variação da carga de pressão nos trechos. A modelagem foi calculada em 400 passos de tempo de 0,07 segundos.

### 5.1.2 Efeito do Golpe de Aríete na Vazão da Ramificação e do Reservatório

As seções (1,6), (2,1) e (3,1) estão sob o mesmo nó na junção da ramificação. A descarga nesta seção é dividida para cada ramificação. No fim dos trechos 2 e 3 há duas válvulas totalmente abertas. O regime transiente inicia quando os registros começam a fechar lentamente (conforme a regra  $2L/a >$  tempo de fechamento da válvula). A válvula gaveta da secção 2,V (leia-se válvula do trecho 2) fecha-se após 2,10 segundos (28 passos de tempo) e o da secção 3,V (leia-se válvula do trecho 3) fecha-se após 3,10 segundos (41 passos de tempo). Depois do fechamento, a medição da vazão na secção da junção oscila até tornar-se estático (Figura 28 e 29).

Tabela 1 - Informações dos trechos do cenário hipotético proposto.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
<b>1</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>0.200</b>
<b>2</b>	<b>500</b>	<b>500</b>	<b>0.150</b>
<b>3</b>	<b>500</b>	<b>250</b>	<b>0.050</b>

Fonte: Autor (2019).

Tabela 2 - Informações das seções do cenário hipotético proposto (Regime Permanente inicial).

Seção	Carga Piezométrica (m)
<b>1,R</b>	<b>150.00</b>
<b>1,2</b>	<b>148.35</b>
<b>1,3</b>	<b>146.71</b>
<b>1,4</b>	<b>145.06</b>
<b>1,5</b>	<b>143.41</b>
<b>1,6</b>	<b>141.77</b>
<b>2,1</b>	<b>141.77</b>
<b>2,2</b>	<b>140.84</b>
<b>2,3</b>	<b>139.91</b>
<b>2,4</b>	<b>138.99</b>
<b>2,5</b>	<b>138.06</b>
<b>2,V</b>	<b>137.13</b>
<b>3,1</b>	<b>141.77</b>
<b>3,2</b>	<b>136.10</b>
<b>3,3</b>	<b>130.43</b>
<b>3,4</b>	<b>124.77</b>
<b>3,5</b>	<b>119.10</b>
<b>3,V</b>	<b>113.43</b>

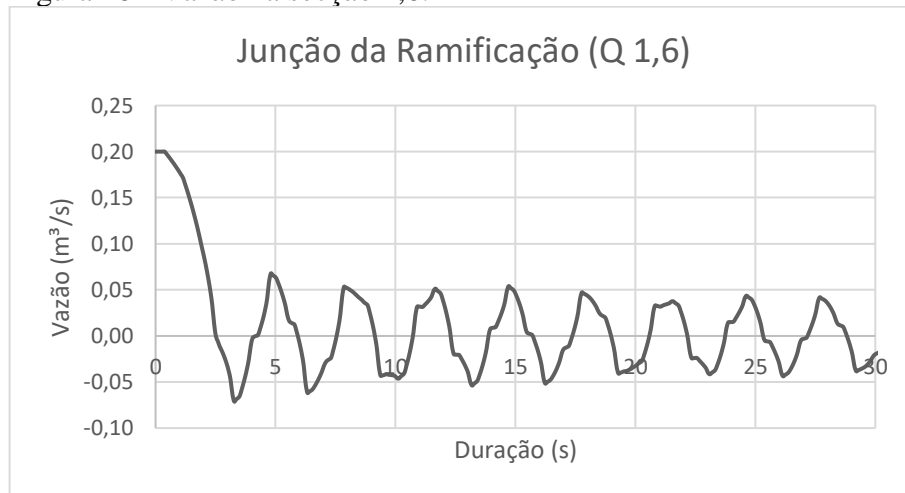
Fonte: Autor (2019).

Na junção da ramificação, esta oscilação é mais intensa no trecho 3 (Figura 30). Justifica-se porque a tubulação de diâmetro de 250 mm (Trecho 3) recebe uma variação de carga de pressão de uma tubulação de 500 mm de diâmetro.

Pelo fato da inserção de uma ramificação num simples problema de Reservatório - Válvula, sugerido por Wylie et al. (1993) e Chaudhry (2014), as oscilações na vazão que ocorrem na Reservatório (Figura 31) mostram peculiaridades não observadas num caso mais simples (Figura 32).

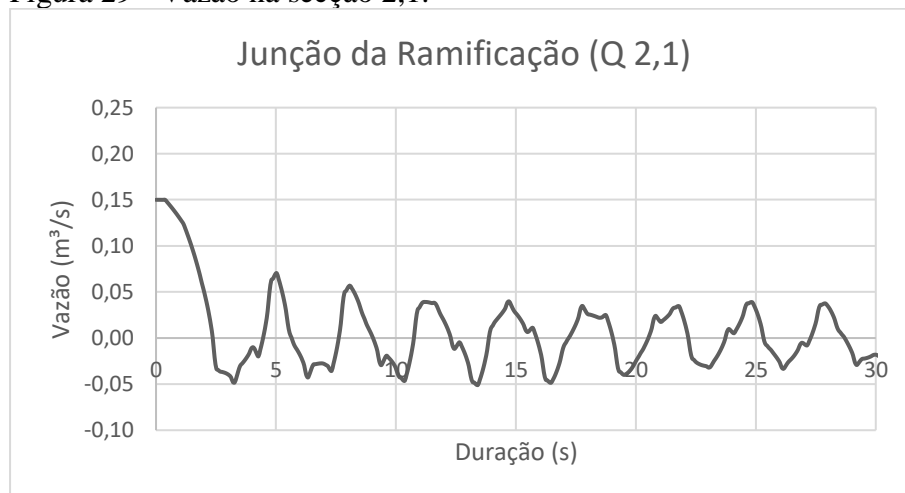


Figura 28 - Vazão na secção 1,6.



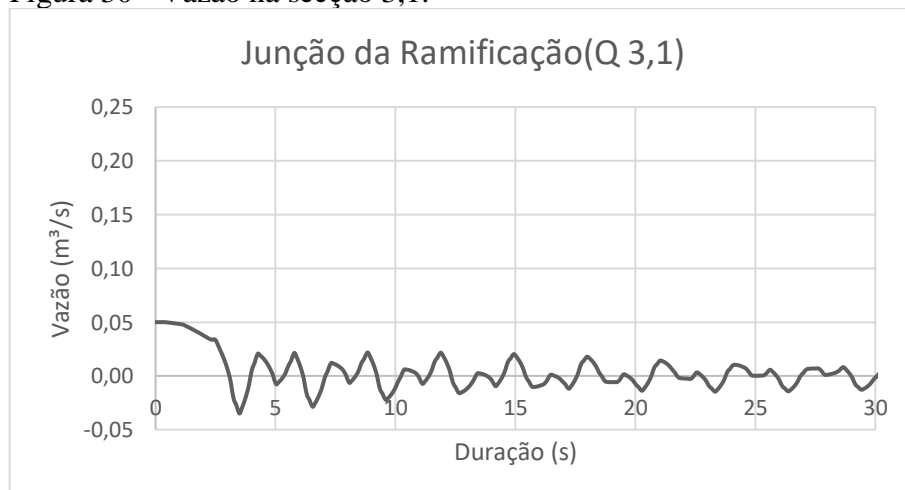
Fonte: Autor (2019).

Figura 29 - Vazão na secção 2,1.



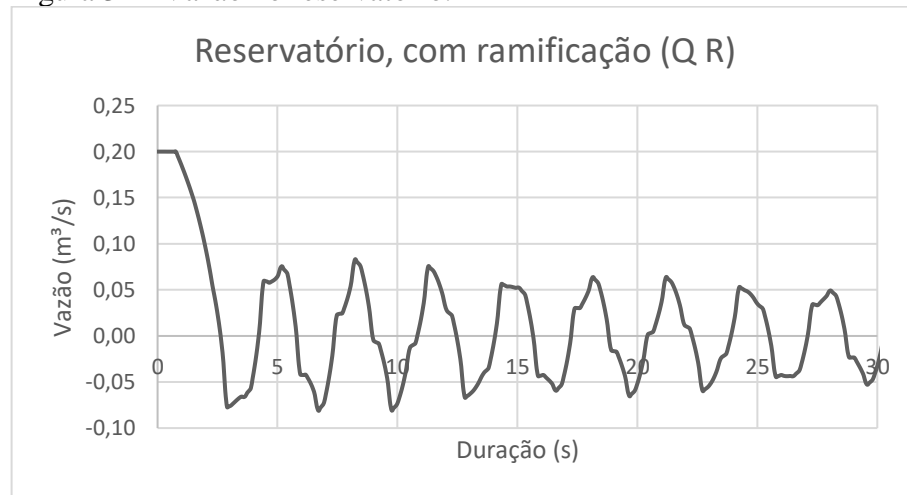
Fonte: Autor (2019).

Figura 30 - Vazão na secção 3,1.



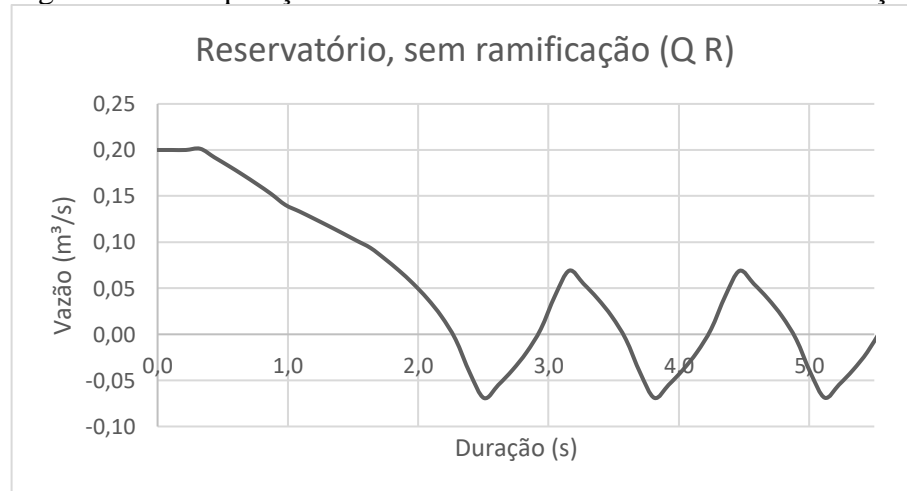
Fonte: Autor (2019).

Figura 31 - Vazão no reservatório.



Fonte: Autor (2019).

Figura 32 - Comparação com um caso de reservatório sem ramificação.



Fonte: Autor (2019).

### 5.1.3 Efeito do Golpe de Aríete na Carga de Pressão na Ramificação e nas Válvulas

Analisando as cargas de pressão, nota-se uma forte e irregular oscilação a montante da válvula do trecho 3 comparado ao trecho 2 (Figura 33 e 34).

Embora o comportamento da carga hidráulica seja semelhante ao sugerido por Wylie e Streeter (1993) e Chaudhry (2014) e aos resultados de Barbosa et al. (2018), Boulos *et al.* (2005), a interferência dos efeitos da ramificação intensificou a carga em 54,4% (Tabela 3) na seção da válvula do trecho 3. Isso pode causar muitos danos no sistema de adução, como vazamentos e rompimentos. Tal comportamento também é analisado nos trabalhos de Sirvole (2007) e Sam Ani e Khayatzaeh (2010).

Na análise das cargas mínimas não houve indícios de cavitação, no caso, pressão relativa menor que zero, que poderiam causar problemas de formação de vapor, acúmulo de vazios na tubulação, separação de coluna ou até a implosão das paredes dos tubos (DAUDE et al., 2018; SANTORO et al., 2018; ZHOU, 2018). Entretanto, em situações reais com variação de cota em todo o sistema, haverá a cavitação em trechos que estejam próximos à linha piezométrica (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018)

Comparando com a situação sem ramificação proposta por Wichowsky (2006), a pressão, assim como a vazão, tem um efeito harmônico e rápido do transiente (Figura 35 e 36). Estes efeitos danosos dos transientes podem ser minimizados com mecanismos de alívio como ventosas (PEROBA JUNIOR, 2007; RODRIGUES, 2008; BARBOSA, 2015), chaminé de equilíbrio, reservatórios hidropneumáticos, válvulas de alívio e outros equipamentos disponíveis no mercado (BOULOS et al., 2005; TASSINARI, 2017). Também, em condições de operação de manobra de registros, nos casos das válvulas dos trechos 2 e 3, o fechamento lento favorece ao alívio do golpe de aríete de modo que, quanto mais demorado for, menor será o efeito do transitório hidráulico.

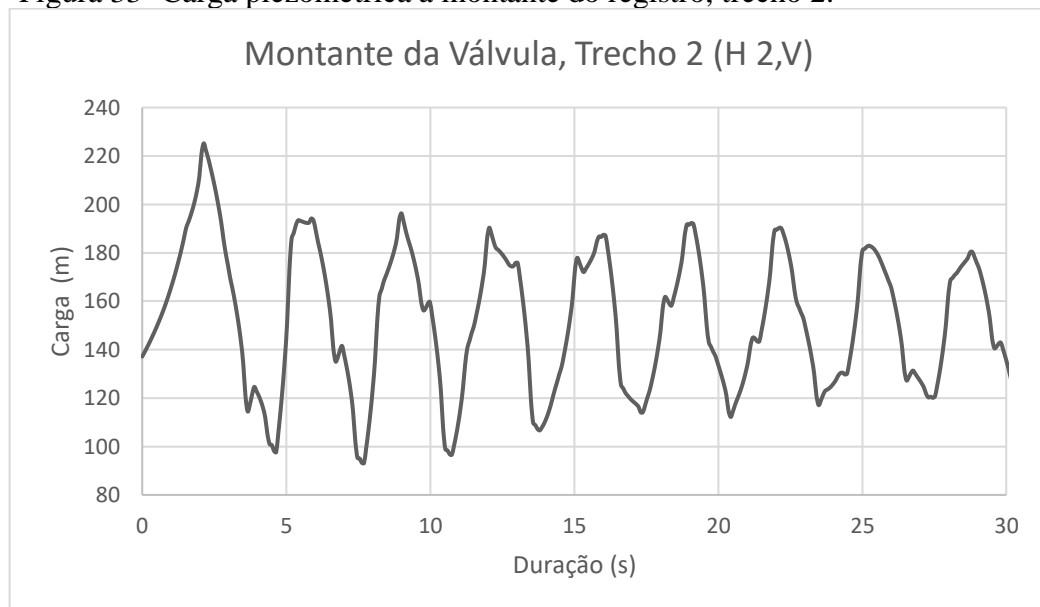
Tabela 3 - Resultados máximos e mínimos da variação da carga piezométrica nas seções dos trechos do cenário hipotético durante o transitório hidráulico.

Seção	Carga Piezométrica (m)	Carga Máxima Transiente	Variação (%)	Carga Mínima Transiente	Variação (%)
1,R	150.00	150.0000	0.00	150.0000	0.00
1,2	148.35	167.3537	11.36	133.6993	10.96
1,3	146.71	178.8535	17.97	122.7777	19.49
1,4	145.06	187.6844	22.71	114.1989	27.02
1,5	143.41	194.8217	26.39	109.5971	30.85
1,6	141.77	202.4334	29.97	107.7237	31.61
2,1	141.77	202.4334	29.97	107.7237	31.61
2,2	140.84	208.7464	32.53	109.3419	28.81
2,3	139.91	214.0062	34.62	104,5569	33.81
2,4	138.99	218.3953	36.36	97.4037	42.69
2,5	138.06	222.1956	37.87	94.1209	46.68
2,V	137.13	225.1987	39.11	93.1742	47.18
3,1	141.77	202.4334	29.97	107.7237	31.61
3,2	136.10	207.1343	34.29	91.8766	48.13
3,3	130.43	212.8285	38.72	78.9120	65.29
3,4	124.77	226.8926	45.01	67.2426	85.55
3,5	119.10	238.4126	50.04	57.7539	106.22
3,V	113.43	251.3025	54.86	50.2959	125.53

Fonte: Autor (2019).

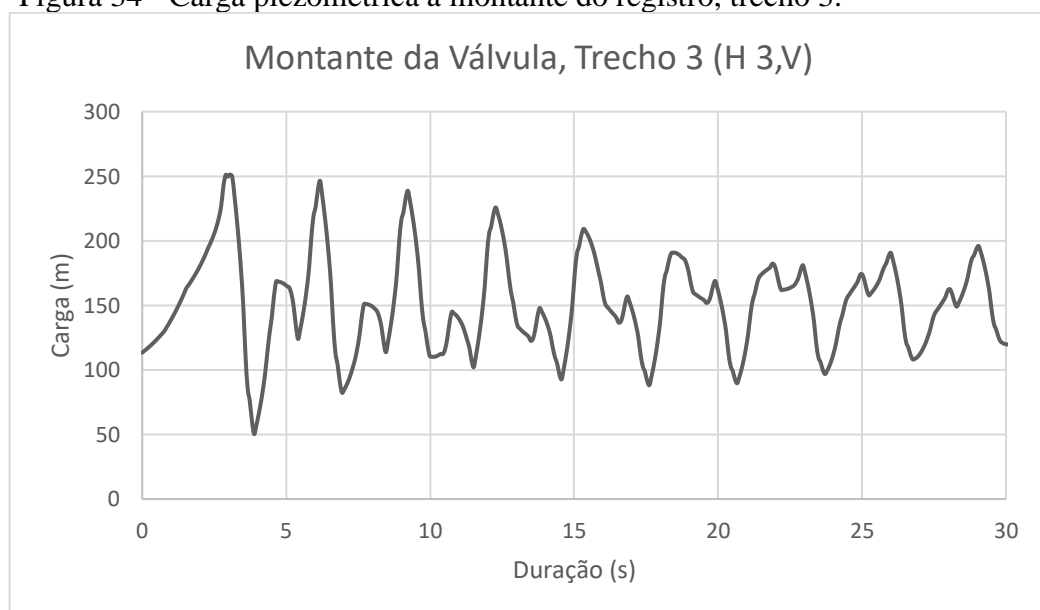
Para estudos futuros, a análise dos efeitos de superposição da celeridade pode ser melhor calibrada, pois este trabalho não considerou o fator de atrito variável no regime transiente. Além disso, a modelagem com mecanismos de alívio pode ser implementada para verificar a viabilidade de uma junção de ramificação no projeto.

Figura 33- Carga piezométrica a montante do registro, trecho 2.



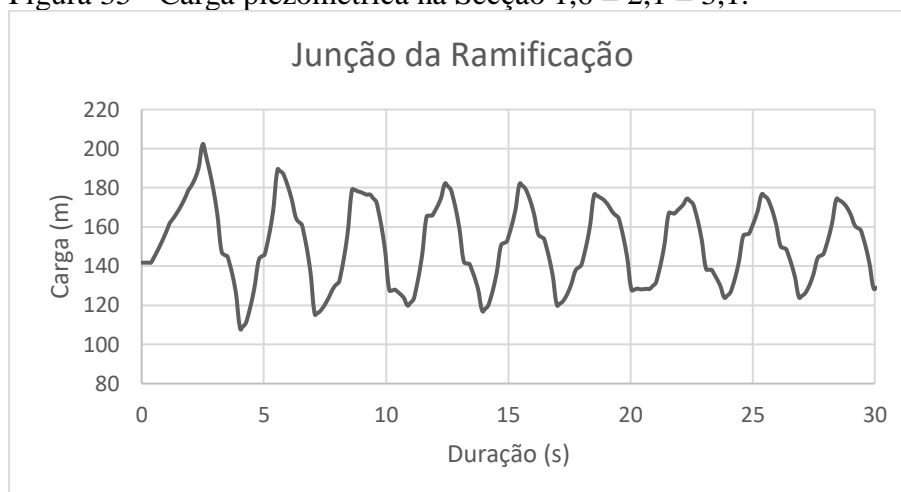
Fonte: Autor (2019).

Figura 34 - Carga piezométrica a montante do registro, trecho 3.



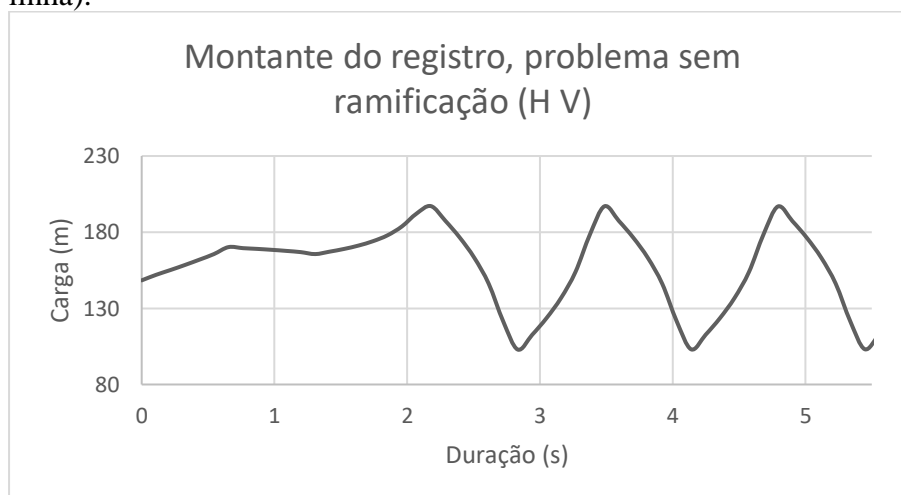
Fonte: Autor (2019).

Figura 35 - Carga piezométrica na Secção 1,6 = 2,1 = 3,1.



Fonte: Autor (2019).

Figura 36 - Comparação com um problema sem junção (adutora em linha).

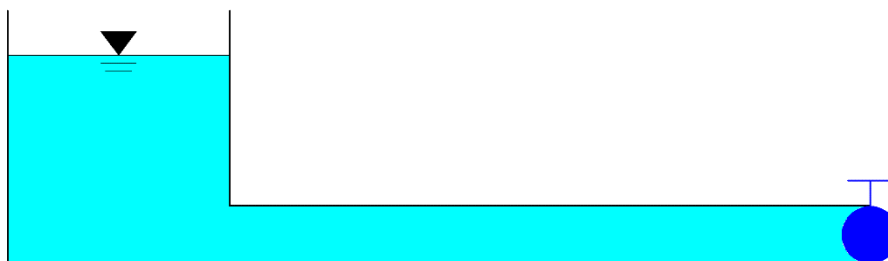


Fonte: Autor (2019).

## 5.2 Estudo de Caso 2 - Adutora Wood (2005) - MOC e WCM

Trata-se de um problema proposto na literatura de Wood et al. (2005). Intitulado como “Tubulação de um reservatório a uma válvula de fechamento”, o caso possui a configuração clássica, reservatório-válvula, da análise do golpe de aríete. Com isso, é calculado o surto de pressão gerado por um fechamento lento da válvula a jusante da tubulação, conforme rege o WCM.

Figura 37 - Estudo de Caso 2 - Tubulação de um reservatório a uma válvula de fechamento.



Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

### 5.2.1 Dados do Sistema

Os dados para a realização da modelagem numérica foram convertidos para o SI (Sistema Internacional de Unidades), pois as informações disponíveis de Wood et al. (2005) do estudo de caso foram disponibilizadas no Sistema Inglês.

Tabela 4 - Dados de entrada para a modelagem do WCM - Estudo de Caso 2.

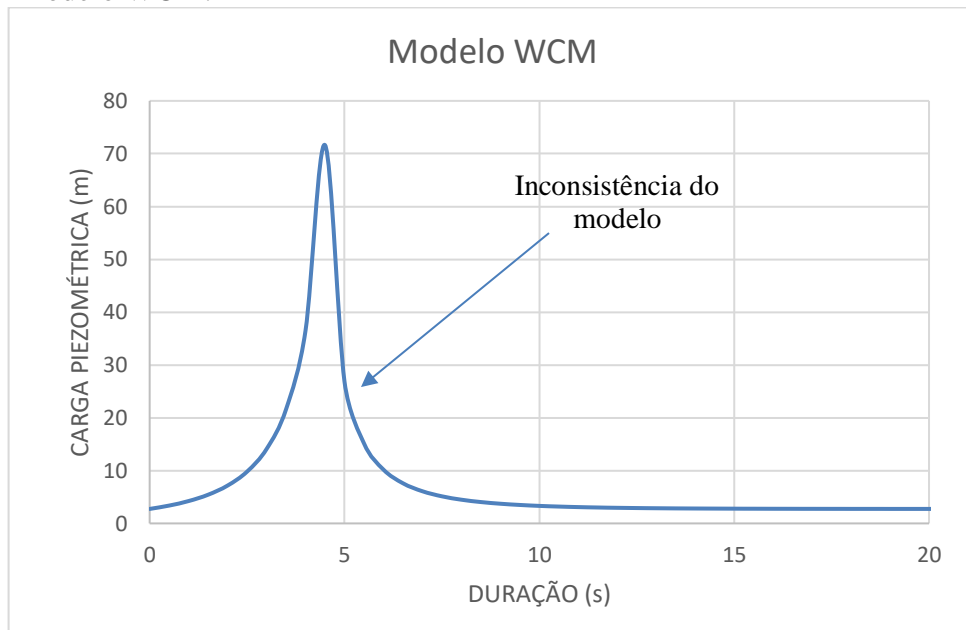
DADOS DE ENTRADA	
L	305 m
D	150 mm
a	1219 m/s
Q <sub>ini</sub>	0.067 m <sup>3</sup> /s
H <sub>ini</sub>	2.74 m
2L/a	0.50 s
Δt	0.50 s
g	9.81 m/s <sup>2</sup>
A	0.02 m <sup>2</sup>
F1	7032.89

Fonte: Adaptado de Wood et al. (2005).

### 5.2.2 Desenvolvimento do WCM no problema proposto

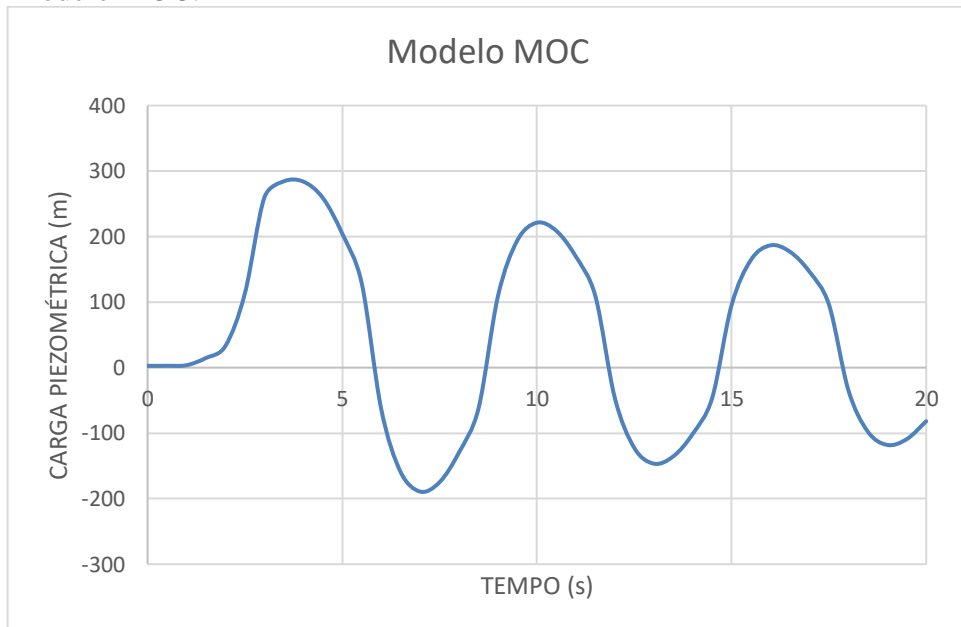
Para a aplicação do WCM o problema desenvolveu-se uma planilha de cálculo, com base no que foi realizado no trabalho de Wood et al. (2005). Paralelamente à simulação realizada com o WCM, fez-se a do MOC, dividindo-se a tubulação (trecho) em quatro subtrechos, totalizando cinco seções no trecho. O resultado da variação da carga piezométrica na válvula a jusante foi obtido para os dois modelos (Figura 38 e 39).

Figura 38 - Variação da carga piezométrica na válvula - Estudo de Caso 2 - modelo WCM.



Fonte: Autor (2019).

Figura 39 - Variação da carga piezométrica na válvula - Estudo de Caso 2 - modelo MOC.



Fonte: Autor (2019).

Durante a implementação do WCM, na planilha de cálculo, percebeu-se uma inconsistência durante a obtenção dos resultados. Caracterizando um resultado bem abaixo do que fora obtido no primeiro pico de pressão do modelo MOC. Vale ressaltar que cada etapa proposta por Wood et al. (2005) no problema proposto foi executado conforme rege o método.

Mediante o problema que ocorreu durante a modelagem WCM, duas hipóteses foram levantadas: existe alguma etapa que não foi devidamente ilustrada na literatura ou, após o fechamento da válvula, o contorno comporta-se como um orifício fechado. Entretanto, o modelo não apresentou melhorias com as modificações que foram realizadas, após a ocorrência de tal inconsistência.

### **5.3 Estudo de Caso 3 - Rede Boulos et al. (2005) - MOC e WCM**

Para aplicar o MOC e o WCM, será utilizado o problema proposto no livro de Wood et al. (2005) e nos artigos de Boulos et al. (2005), Wood et al. (2005), Jung et al. (2009) e Ramalingan et al. (2009).

#### **5.3.1 Dados do Sistema**

Trata-se de uma rede hipotética, oriunda do artigo de Streeter (1964) e amplamente utilizado no trabalho de Boulos et al. (2005), onde, a montante, há um reservatório com uma carga de 191 m a partir do nível de água, e a jusante, um registro de gaveta que será responsável pela excitação do transitório hidráulico no sistema (Figura 40). A rede de distribuição de água entre estes dois contornos estará sob a cota +0,00 m e os dados utilizados foram conforme a Tabela 5 6 e 7.

#### **5.3.2 Análise dos Resultados MOC e WCM**

Referente ao comportamento do Reservatório a Montante, considerou-se como de nível fixo e carga piezométrica constante. A válvula a jusante utilizada é do tipo gaveta, com  $C_d = 0.7$  e tempo de fechamento,  $t_c = 0.7$  s, com o comportamento da vazão referente à porcentagem de fechamento é conforme a Figura 41.

Com todos os dados dispostos, executou-se o problema inicialmente no EPANET, para obter-se os dados de carga e vazão nos trechos e nós do sistema (Tabela 6 e 7). Posteriormente no UFC7, com o auxílio dos arquivos REDE\_BOULOS.inp e REDE\_BOULOS.rpt, gerados no EPANET (Apêndice C), gerou-se os dados do regime transiente utilizando-se o MOC. Paralelamente, com o programa disponibilizado por Wood et al. (2005) gerou-se os dados do regime transiente utilizando-se o MOC.



Tabela 5 - Dados dos trechos utilizados para a Figura 1.

Nº DO TRECHO	COMPRIMENTO (m)	DIAMETRO (mm)	C DE HAZEN-WILLIAMS ( $m^{0,37}/s$ )	CELERIDADE (m/s)
1	610	914	92	1005.8
2	914	762	107	1143.0
3	610	610	98	1219.2
4	457	457	105	1143.0
5	549	457	100	914.4
6	671	762	93	957.1
7	610	914	105	1005.8
8	457	610	105	914.4
9	488	457	140	975.4

Fonte: Adaptado de Boulos et al. (2005).

Tabela 6 - Dados dos trechos utilizados para a Figura 1 (continuação).

Nº DO TRECHO	SENTIDO		VAZÃO (L/s)	VAZÃO ( $m^3/s$ )	Rey
1	R	2	850.00	0.850	1183567
2	3	4	404.67	0.405	676170
3	3	2	445.33	0.445	930137
4	4	6	227.23	0.227	632805
5	4	2	177.43	0.177	494118
6	2	5	511.02	0.511	853873
7	5	V	850.00	0.850	1183567
8	6	5	338.98	0.339	708010
9	2	6	111.75	0.112	311208

Fonte: Adaptado de Boulos et al. (2005).

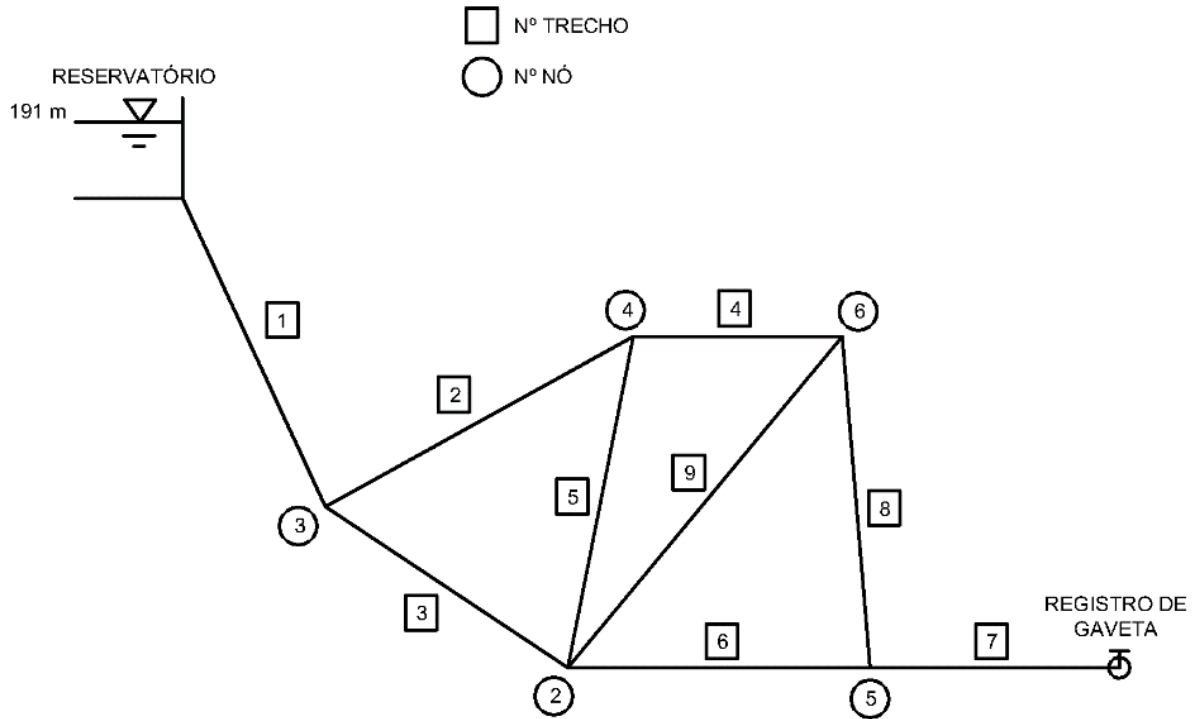
Tabela 7 - Dados dos nós (junções) utilizados para a Figura 1 (continuação).

NÓS	CARGA (m)
R	191,00
2	185,55
3	189,14
4	187,85
5	183,65
6	185,08
V	182,20

Fonte: Adaptado de Boulos et al. (2005).

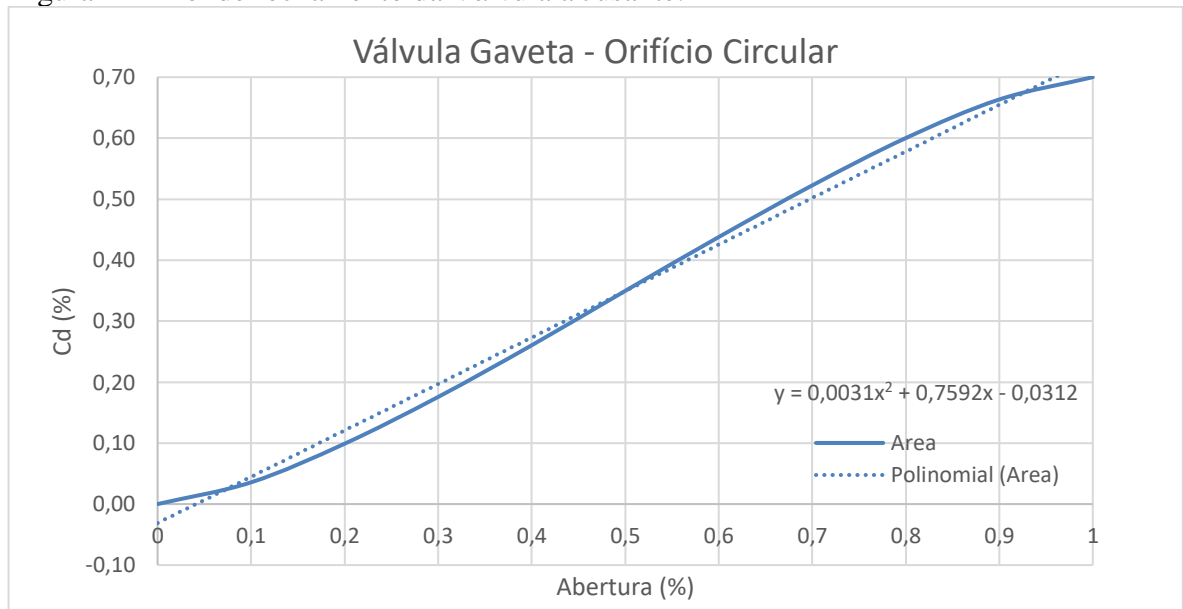
A comparação entre o resultado dos dois métodos foi ilustrada nas figuras 42 a 47, onde se faz a sobreposição dos gráficos de variação de carga piezométrica nos nós de junção utilizando o MOC e WCM.

Figura 40 - Rede Boulos et al. (2005).



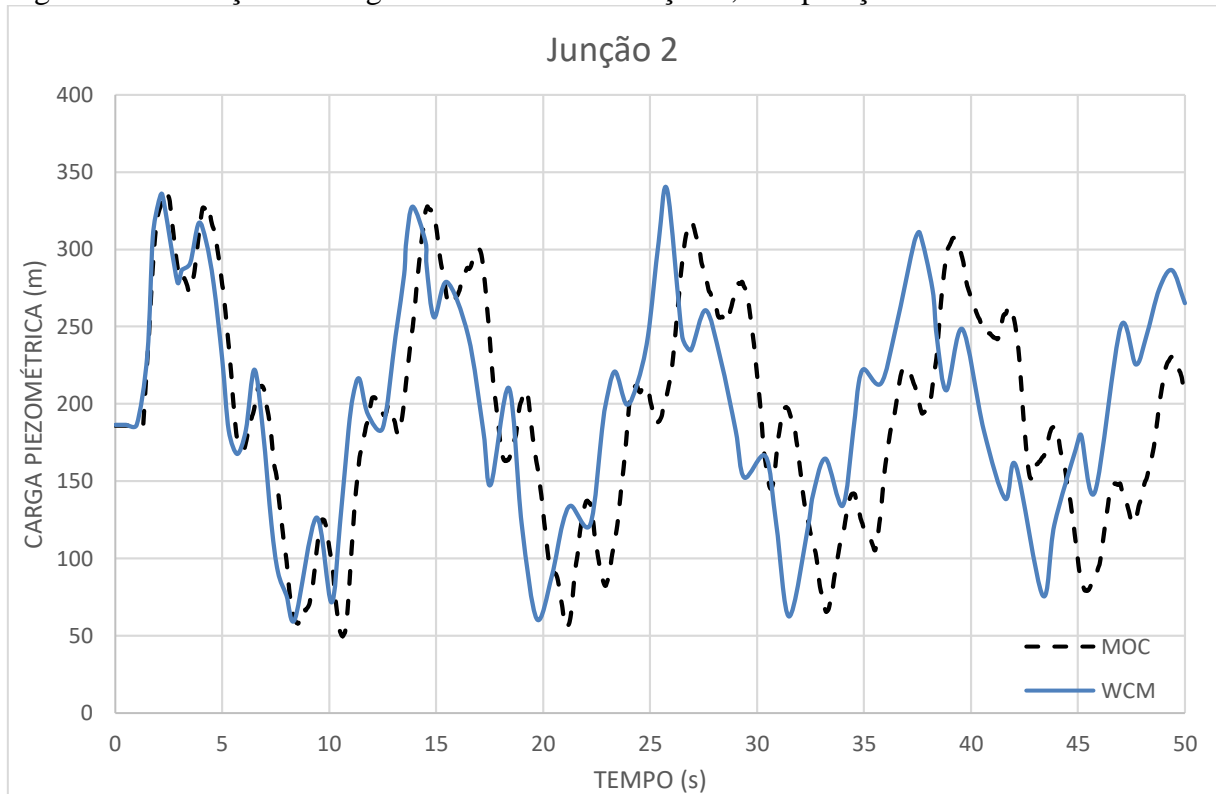
Fonte: Adaptado de Boulos et al. (2005).

Figura 41 – Lei de fechamento da Válvula a Jusante.



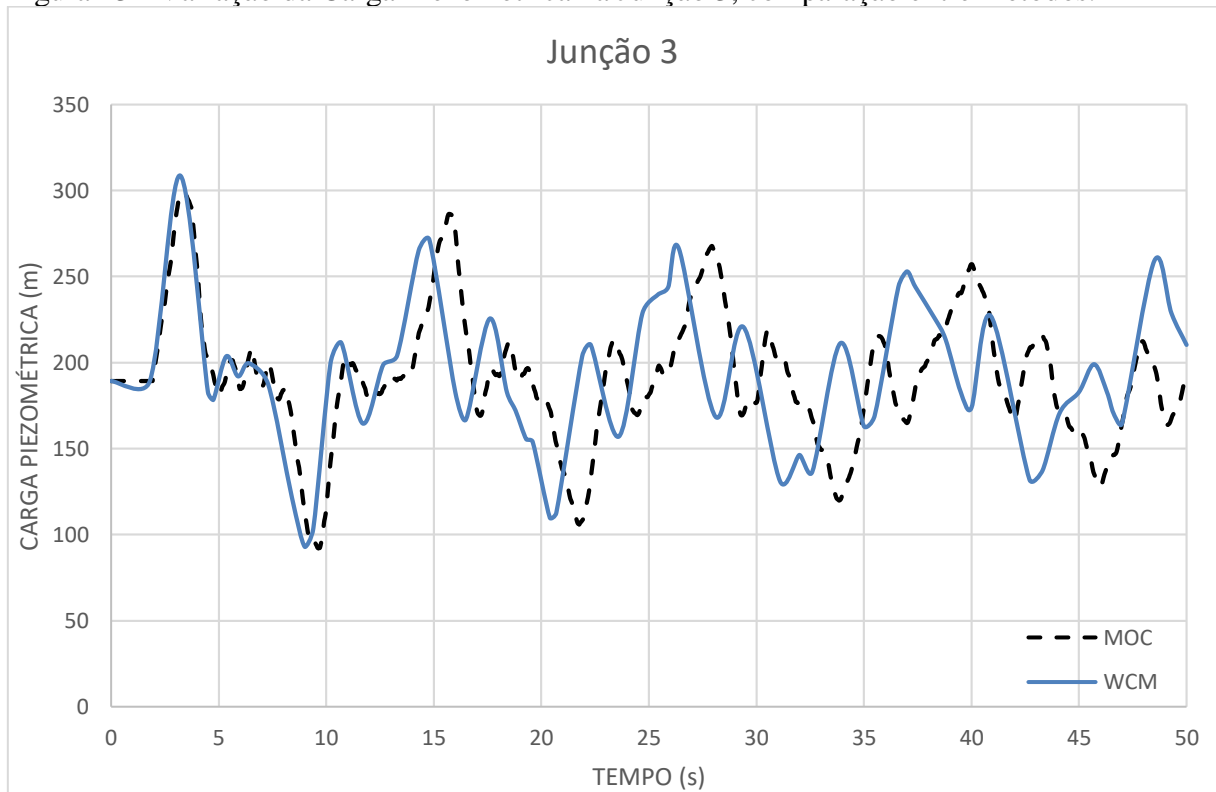
Fonte: Autor (2019).

Figura 42 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 2, comparação entre métodos.



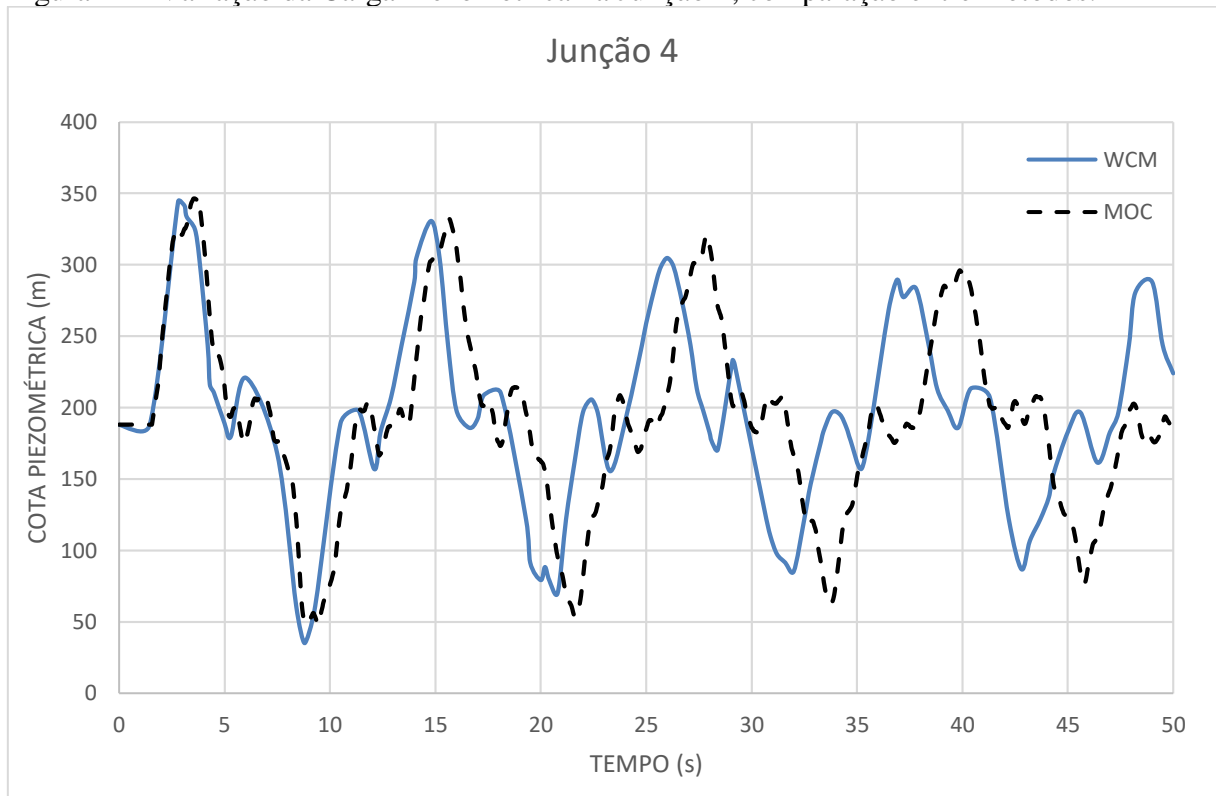
Fonte: Autor (2019).

Figura 43 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 3, comparação entre métodos.



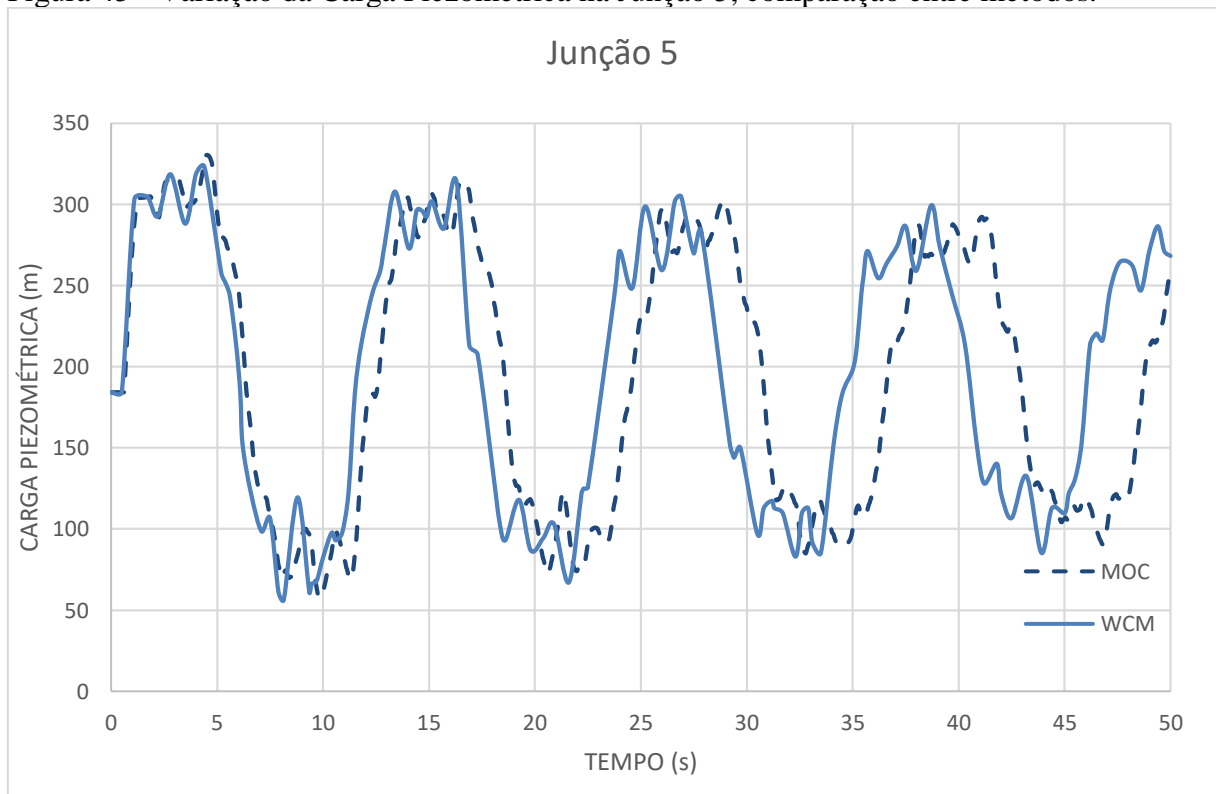
Fonte: Autor (2019).

Figura 44 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 4, comparação entre métodos.



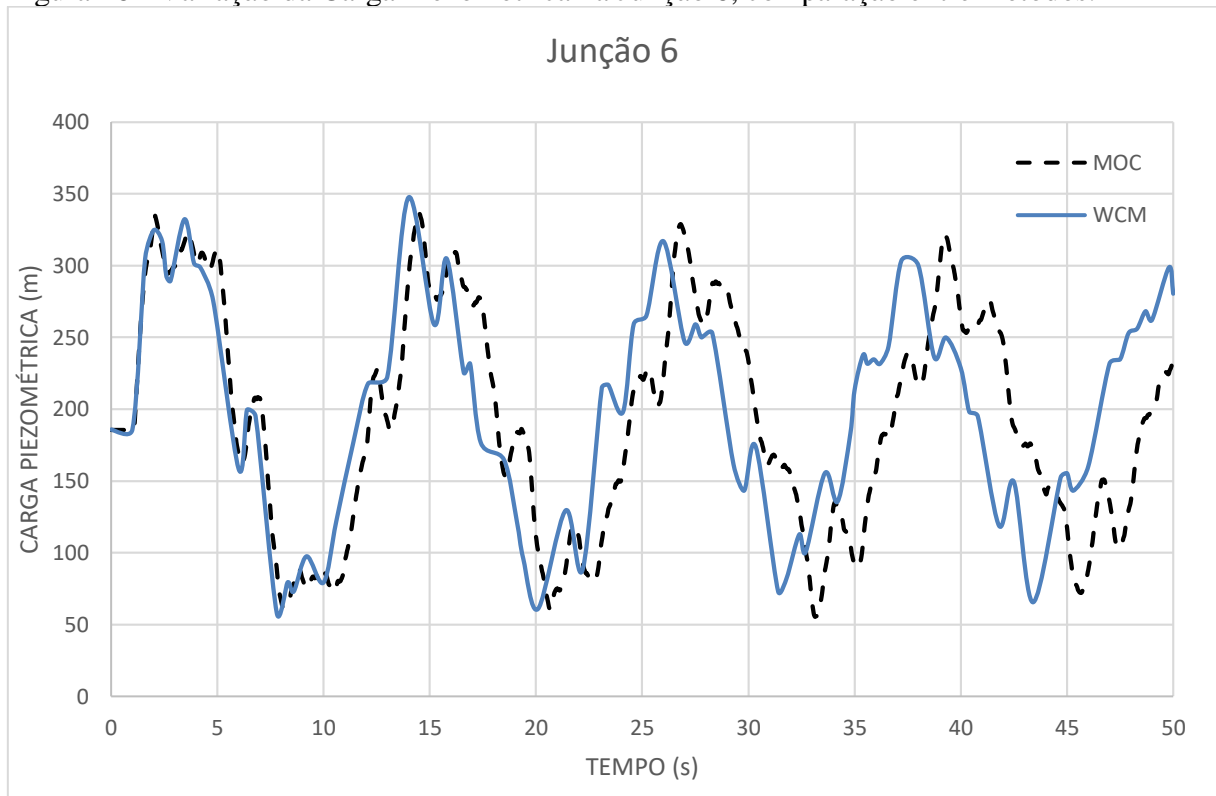
Fonte: Autor (2019).

Figura 45 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 5, comparação entre métodos.



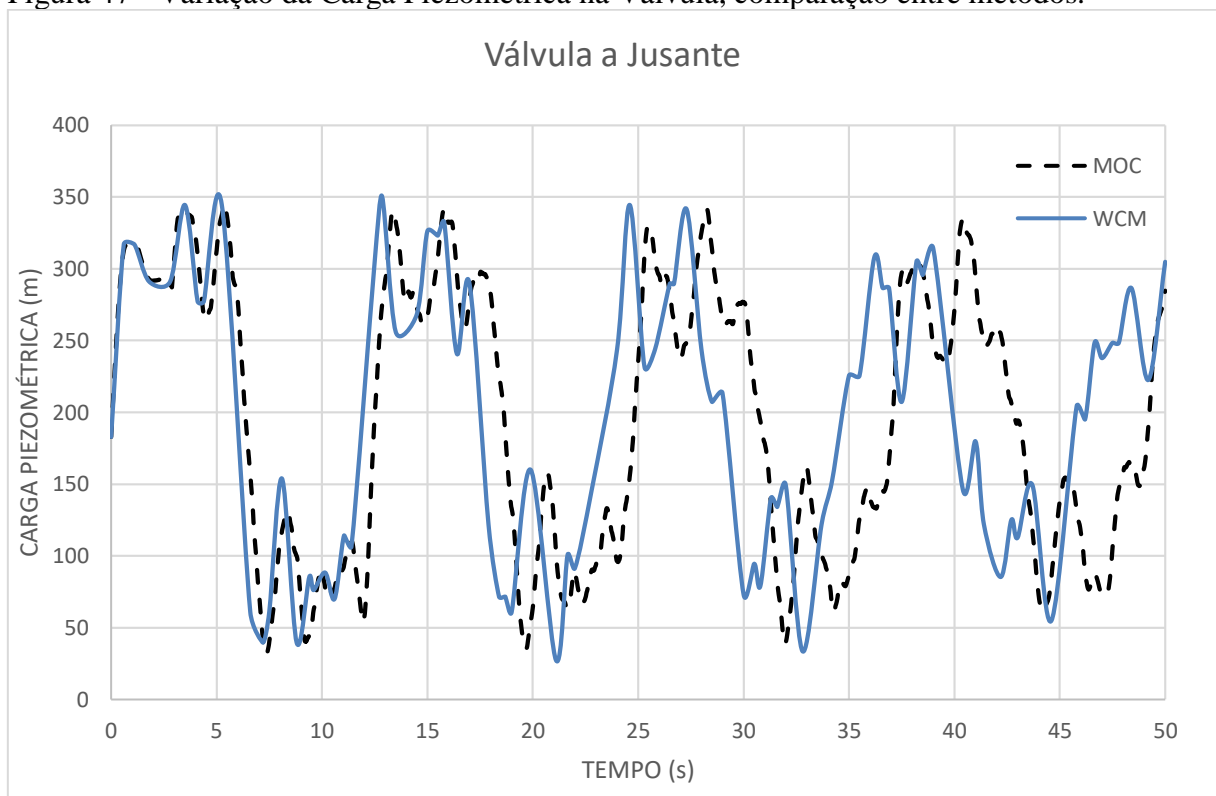
Fonte: Autor (2019).

Figura 46 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 6, comparação entre métodos.



Fonte: Autor (2019).

Figura 47 - Variação da Carga Piezométrica na Válvula, comparação entre métodos.



Fonte: Autor (2019).

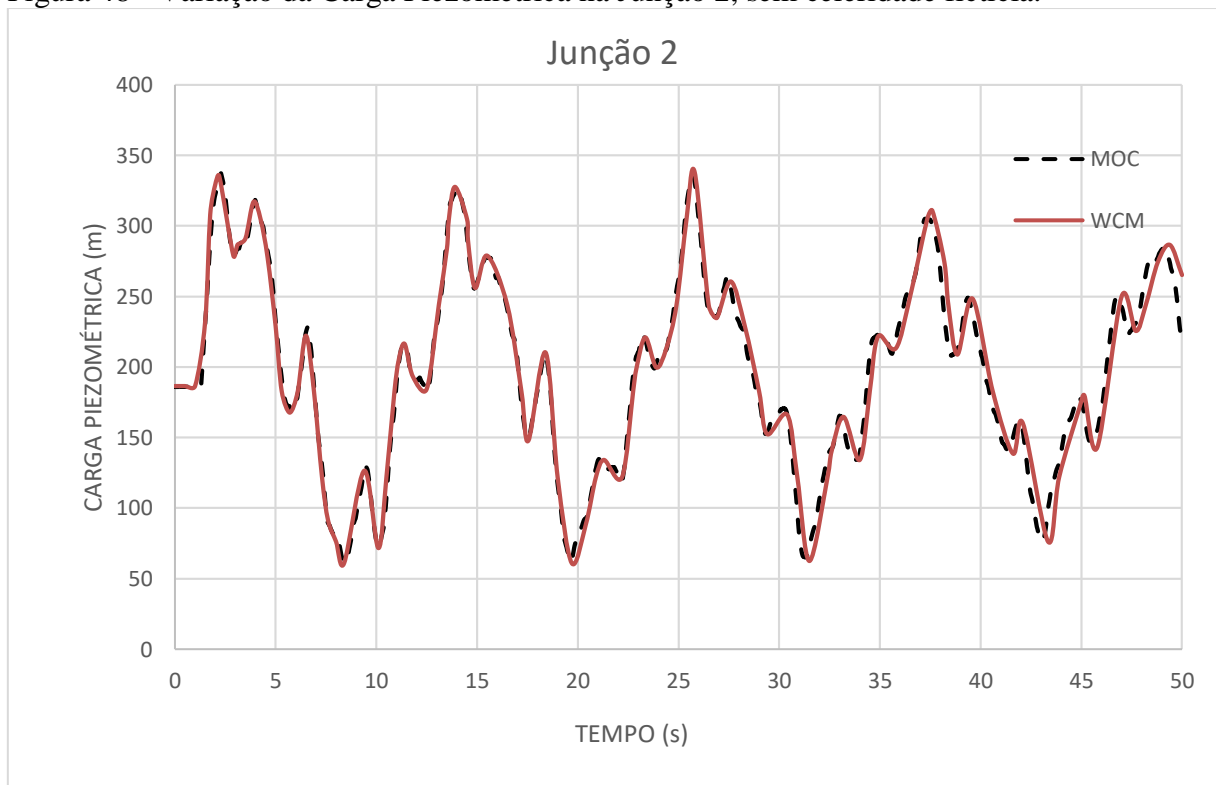
### 5.3.3 Mudanças em Relação à Celeridade Fictícia no MOC

Posteriormente às aos resultados obtidos do MOC, utilizando o UFC7, realizaram-se tentativas de aproximar mais os gráficos obtidos deste modelo aos gráficos obtidos através do programa WCM.

Com isso, percebeu-se que a fixação do  $\Delta x$  (no caso, a discretização homogênea para todos os trechos do sistema) para toda a rede, de modo que se calcule a celeridade fictícia, interferia no resultado do MOC em relação ao WCM. Quando se desconsiderou esta condição, o gráfico do MOC recuou em todas as seções analisadas, fazendo com que, de fato, os dois gráficos se sobrepusessem.

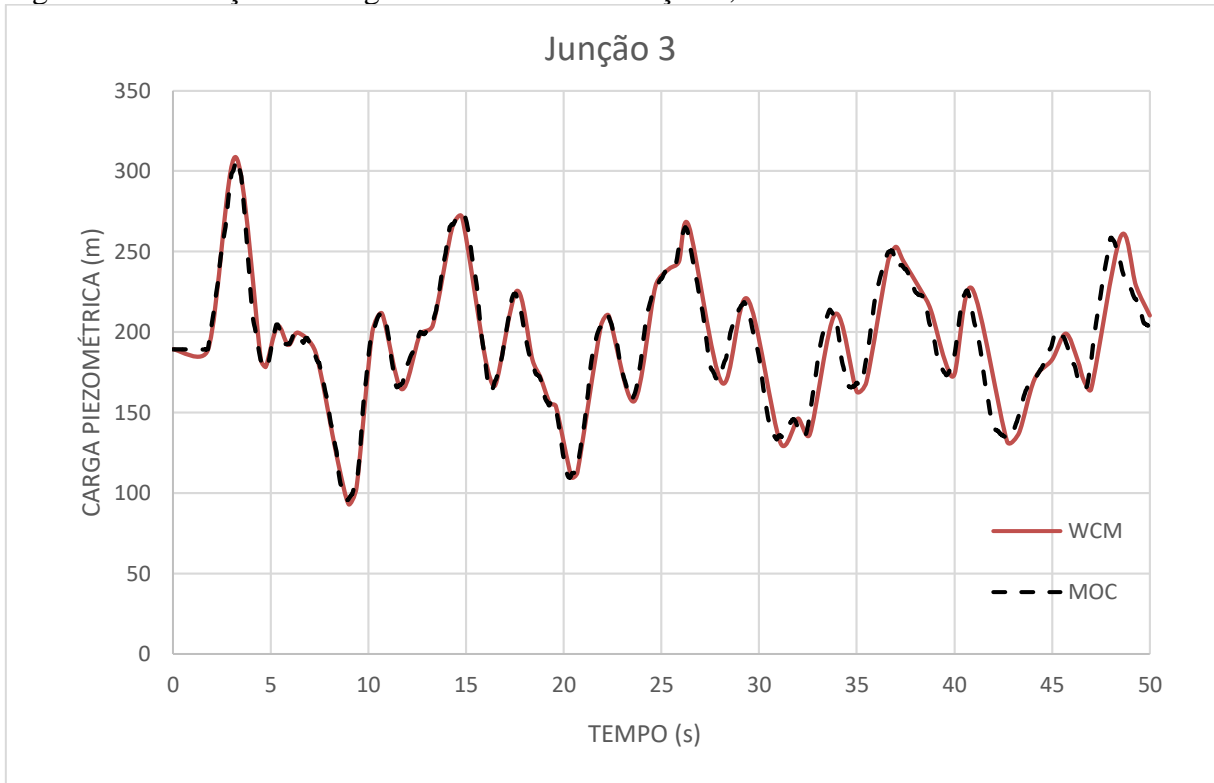
Isto se deu pelo fato de WCM não requerer estabilização através do número de Courant, fazendo com que a discretização do MOC seja feita com base nas celeridades naturais de cada trecho, para que os resultados sejam os mais próximos possíveis.

Figura 48 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 2, sem celeridade fictícia.



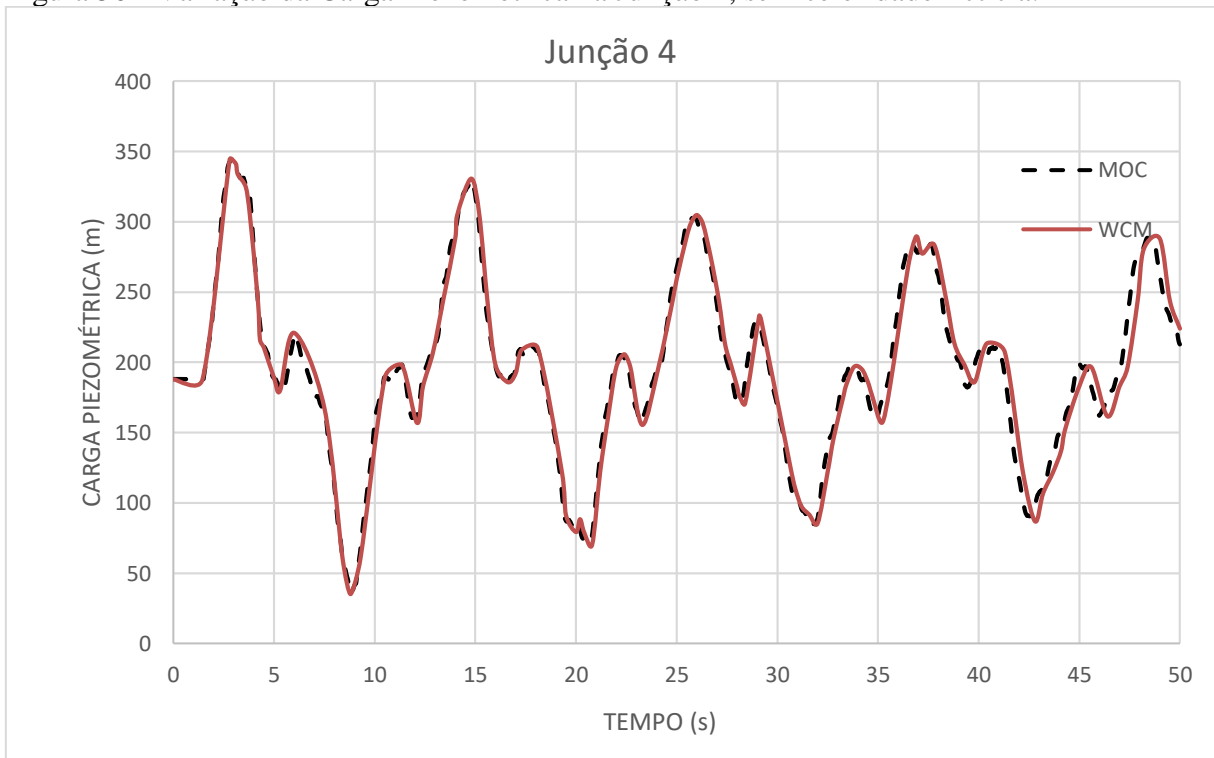
Fonte: Autor (2019).

Figura 49 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 3, sem celeridade fictícia.



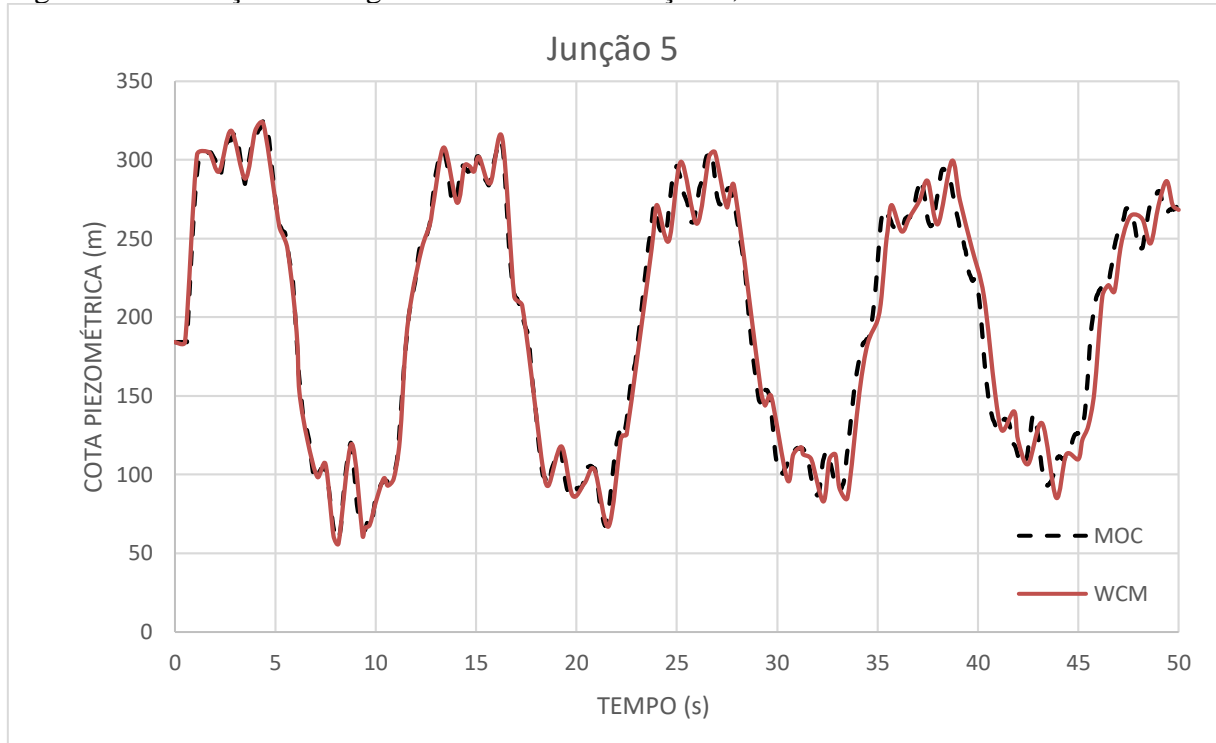
Fonte: Autor (2019).

Figura 50 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 4, sem celeridade fictícia.



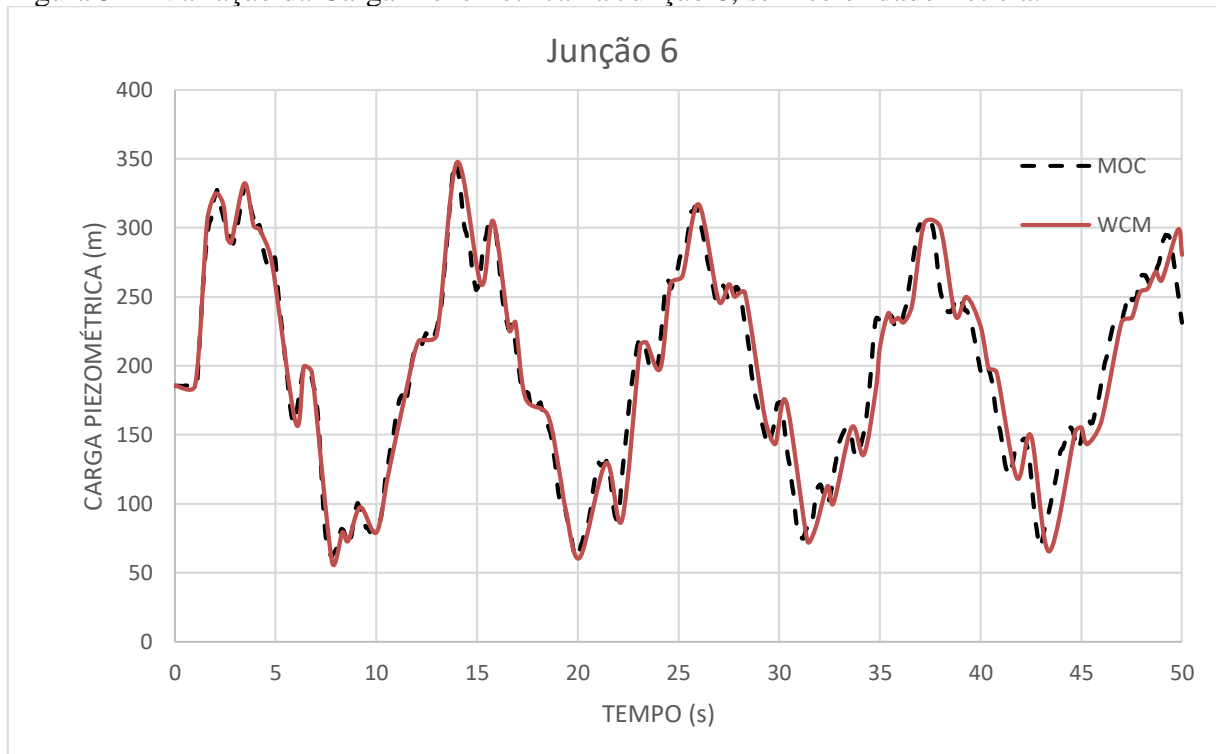
Fonte: Autor (2019).

Figura 51 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 5, sem celeridade fictícia.



Fonte: Autor (2019).

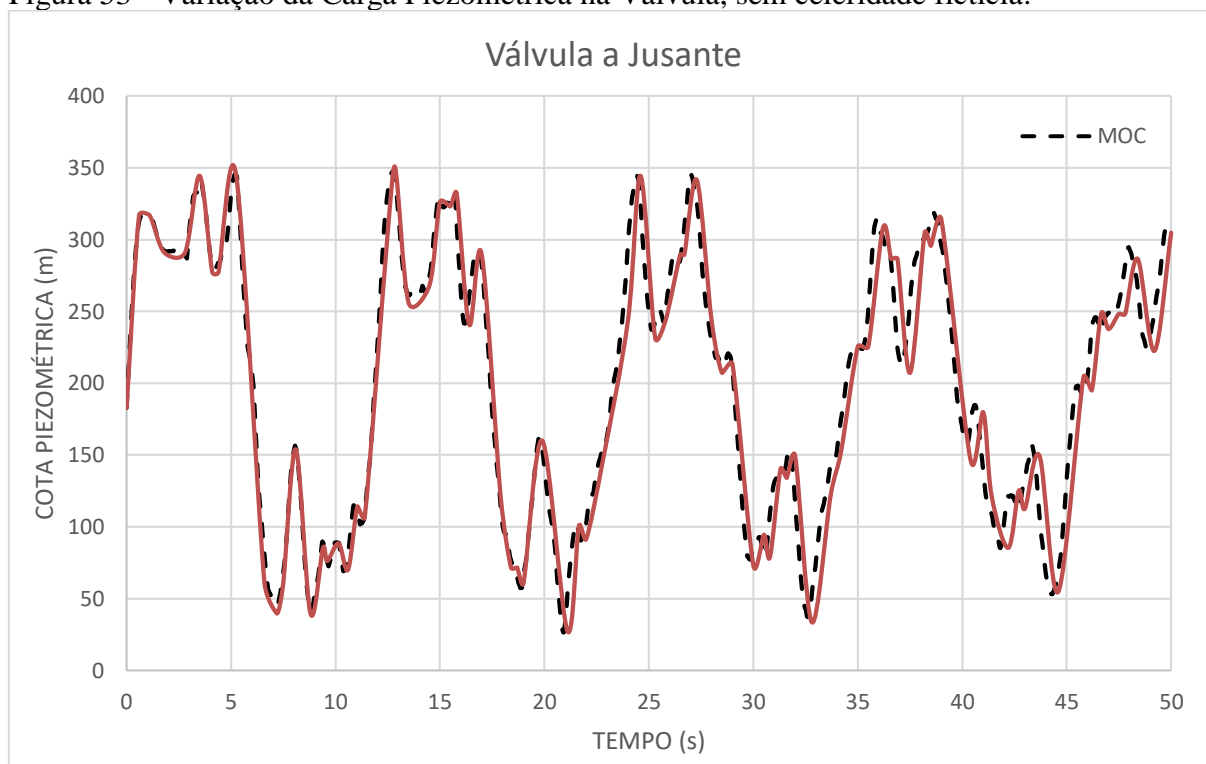
Figura 52 - Variação da Carga Piezométrica na Junção 6, sem celeridade fictícia.



Fonte: Autor (2019).



Figura 53 - Variação da Carga Piezométrica na Válvula, sem celeridade fictícia.



Fonte: Autor (2019).

#### 5.3.4 Análise dos Resultados

Com os resultados plotados, a simulação do transitório hidráulico, tanto pelo MOC quanto pelo WCM resultaram em valores aproximados, assim como é afirmado nos trabalhos de Wood et al. (2005) e nos artigos de Boulos et al. (2005), Wood et al. (2005), Jung et al. (2009) e Ramalingan et al. (2009).

Os trabalhos supracitados afirmam que o resultado das sobrepressões e subpressões máximos do WCM são iguais aos do MOC, a partir do início do fechamento do registro de gaveta até o fim da simulação definido arbitrariamente. Entretanto, os dados gerados pelo programa WCM possibilitam a visualização de resultados aproximados aos que foram gerados pelo MOC.

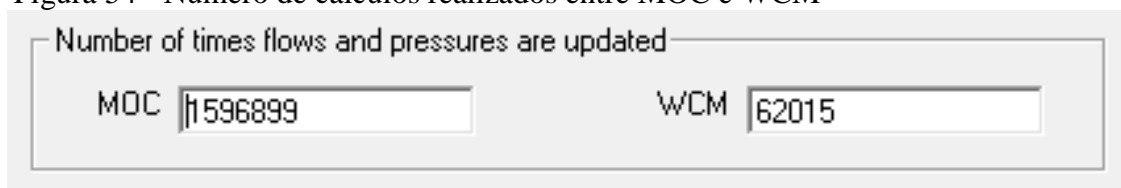
Do ponto de vista científico, sabe-se que um método numérico resulta valores aproximados à solução analítica de qualquer equação diferencial. O MOC é um método numérico de rápida implementação computacional, porém necessita realizar cálculos em todas as seções definidas no projeto.

O WCM dispensa a necessidade de cálculos em todos os nós, pois só é computado os contornos nos momentos antes e após a passagem da onda de pressão. Por outro lado,

necessita-se de uma análise prévia do caminhamento, reflexão e transmissão das ondas de pressão, que se torna mais difícil quanto mais complicada é a rede de distribuição de água. Além do fato de o contorno (Bomba Centrífuga, Válvula de Fechamento, Junção) poder comportar-se de diferentes formas durante o cálculo do transitório hidráulico (algo que não ocorre na modelagem MOC).

A maior vantagem do WCM frente ao MOC é pelo fato de quantos cálculos cada método realizou para chegar ao resultado final em todos os nós. A figura 54 ilustra o número de cálculos realizados no programa WCM. Para grandes projetos, onde o esforço computacional é o fator limitante para a velocidade de obtenção dos resultados, o WCM torna-se uma alternativa ideal para evitar problemas com o excesso de processamento de dados.

Figura 54 - Número de cálculos realizados entre MOC e WCM



Fonte: Autor (2019).

Por fim, a análise final entre os métodos é: o MOC é mais difícil de entender e mais fácil de implementar; e o WCM é mais fácil de entender e difícil de implementar. Entretanto, ambos geram resultados aproximados, viabilizando o WCM para a utilização na modelagem de projetos em Engenharia Hidráulica.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo realizar modelagem computacional do transitório hidráulico de redes de distribuição de água utilizando o método lagrangeano das ondas características, intitulado WCM. Tal método, permite simular o golpe de aríete em condutos forçados com menos cálculos em comparação ao MOC

Três estudos de caso foram utilizados para o entendimento e implementação do MOC em redes de distribuição de água em planilhas de cálculo e com o UFC7. Da mesma forma, realizou-se com o WCM e com o programa desenvolvido por Wood et al. (2005).

Para o Estudo de Caso 1, de acordo com os resultados de variação de pressão na junção da ramificação obtidos através de modelagem computacional do golpe de aríete numa adutora hipotética, pode-se concluir que, no regime transiente forçado pelo fechamento lento do registro da ramificação, houve uma variação positiva na carga piezométrica de 54,4% na junção a montante da válvula do trecho 3, maior do que a carga do reservatório do sistema.

Para o Estudo de Caso 2, durante a implementação do WCM, na planilha de cálculo, percebeu-se uma inconsistência durante a obtenção dos resultados. Caracterizando um resultado bem abaixo do que fora obtido no primeiro pico de pressão do modelo MOC. Duas hipóteses foram levantadas: existe alguma etapa que não foi devidamente ilustrada na literatura ou, após o fechamento da válvula, o contorno comporta-se como um orifício fechado. Entretanto, o modelo não apresentou melhorias com as modificações que foram realizadas, após a ocorrência de tal inconsistência.

Para o Estudo de Caso 3, a simulação do transitório hidráulico, tanto pelo MOC quanto pelo WCM resultaram em valores aproximados, ao contrário do que é afirmado nos trabalhos na literatura. O resultado das sobrepressões e subpressões máximos do WCM são iguais aos do MOC, a partir do início do fechamento do registro de gaveta até o fim da simulação definido arbitrariamente. Entretanto, os dados gerados pelo programa WCM possibilitam a visualização dos mesmos resultados máximos e mínimos gerados pelo MOC.

Apesar dos problemas com a implementação do WCM, conseguiu-se desenvolver uma rotina em Java que calcule o MOC em redes de distribuição de água. Que permitirá a aplicação em diversos outros problemas de redes, possibilitando uma análise mais rápida e precisa dos resultados do transitório hidráulico.

## 6.2 Recomendações para Próximas Pesquisas

Como recomendação para as próximas pesquisas dentro do tema do Método das Ondas Planas (WCM):

- Desenvolver uma rotina computacional que realize a análise das Ondas de Pressão, conforme o item 3.4.2 deste trabalho;
- Utilizar o método de cálculo de cavitação presente nos estudos de Wood et al. (2005) e Jung et al. (2009);
- Após o pleno domínio do método, recomenda-se o estudo para o dimensionamento de equipamentos de alívio ao golpe de aríete; e
- Realizar a validação modelo de cavitação do WCM com testes experimentais.
- Realizar a implementação de contornos para bomba centrífuga e válvula de retenção no WCM;

Em um contexto voltado à Hidráulica Transiente em condutos forçados, voltando à análise em redes de distribuição, recomenda-se:

- Realizar a implementação computacional de contornos para bomba centrífuga e válvula de retenção no MOC em redes de distribuição de água no módulo UFC7;
- Utilizar e validar métodos de cálculo de cavitação para o MOC em redes de distribuição de água no módulo UFC7;
- Implementar métodos de visualização tridimensional das envoltórias de sobrepressão e subpressão em redes de distribuição de água, para a implementação no UFC7;

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. B.; KOELLE, E. **Fluid Transients in Pipe Networks**. New York: Elsevier Applied Science Press. 1992.
- AXWORTHY, D. H. **Water distribution network modelling: from steady state to waterhammer**. 236 f. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 1998.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Editora Blucher. 2018.
- BARBOSA, J. M. C. **Modelagem computacional de transientes hidráulicos em ventosas de tríplex função e non slam considerando as curvas de admissão e expulsão de ar**. 116 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- BARBOSA, J. M. C.; COSTA, J. N. A.; PAIVA, B. A.; SANDERS NETO, V. C.; CASTRO, M. A. H. de. Modelagem computacional de transientes hidráulicos em ventosas de tríplex função e non slam considerando as curvas de admissão e expulsão de ar comerciais. *In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 1., 2018, Buenos Aires. Anais do Evento – Trabajos Completos*. Buenos Aires: INA, 2018. Disponível em: [https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/). Acesso em: 25 fev. 2019. p. 259-269.
- BHATTACHARYYA, E. M.; SAIKIA, M. D.; DAS, M. M. Development of Numerical Model for Transients in pipe flow for Water Hammer situation and comparison of different friction equations for transient friction. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 2995-3001, 2018.
- BOULOS, P. F.; KARNEY, B. W.; WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. **American Water Works Association**. v. 97, n. 5, p. 111-124, 2005.
- BOULOS, P. F.; WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S. Shock and Water Hammer Loading. **Pressure Vessels and Piping Systems. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)**. p. 1-32, 2015.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied Hydraulic Transients**, 3<sup>a</sup> Ed. Columbia: Springer. 2014.
- DAUDE, F.; TIJSELING, A. J.; GALON, P. Numerical investigations of water-hammer with column-separation induced by vaporous cavitation using a one-dimensional Finite-Volume approach. **Journal of Fluids and Structures**. v. 83, p. 91-118, 2018.
- DUAN, H. F. Uncertainty Analysis of Transient Flow Modeling and Transient-Based Leak Detection in Elastic Water Pipeline Systems, **Water Resources Management**. v. 29, n. 14, p. 5413-5427, 2015.

FERRAS, D.; MANSO, P. A.; SCHLEISS, A. J.; COVAS, D. I. Fluid-Structure Interaction Models in Pressurized Fluid-Filled Pipes: A Review. **Applied Sciences**. v. 8, n. 10, p. 1-51, 2018.

FERREIRA, F. E. F. R.; BARBOSA, J. M. C.; CASTRO, M. A. H. de. Modelagem computacional do golpe de aríete em condutos plásticos. **Revista DAE**. v. 64, n. 2, p. 20-31, 2015.

FERREIRA, J. P. B. C. C.; MARTINS, N. M. C.; COVAS, D. I. C. Ball Valve Behavior under Steady and Unsteady Conditions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 4, p. 04018005, 2018.

JACOBINI, L.; GALVÃO, V. M.; PASSOS, D. T.; SALIBA, A. P. M.; VIANA, E. M. F.; TARQUI, J. L. Z. Desempenho hidráulico do vertedor de um dique de enrocamento utilizando modelo reduzido. *In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, 1., 2018, Buenos Aires. **Anais do Evento – Trabajos Completos**. Buenos Aires: INA, 2018. Disponível em: [https://www.ina.gob.ar/congreso\\_hidraulica/](https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/). Acesso em: 25 fev. 2019. p. 417-427.

JUNG, B. S.; BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. Effect of pressure-sensitive demand on surge analysis. **Journal AWWA**. v. 101, n. 4, p. 100-111, 2009.

JUNG, B. S.; BOULOS, P. F.; WOOD, D. J.; BROS, C. M. A lagrangian wave characteristic method for simulating transient water column separation. **Journal AWWA**. v. 101, n. 6, p. 64-73, 2009.

LAROCK, B. E.; JEPSON, R. W.; WATTERS, G. Z. **Hydraulics of Pipeline Systems**. Florida: CRC Press LLC. 1999.

LINGIREDDY, S.; WOOD, D. J.; ZLOCZOWER, N. Pressure surges in pipeline systems resulting from air releases. **Journal AWWA**. v. 96, n. 7, p. 88-94, 2004.

MENICONI, S.; BRUNONE, B.; FRISINGHELLI, M. On the role of minor branches, energy dissipation, and small defects in the transient response of transmission mains. **Water**, v. 10, n. 2, p. 187, 2018.

MORVARID, M.; REZGHI, A.; RIASI, A.; YAZDI, M. H. 3D numerical simulation of laminar water hammer considering pipe wall viscoelasticity and the arbitrary Lagrangian-Eulerian method. **World Journal of Engineering**, v. 15, n. 2, p. 298-305, 2018.

PARMAKIAN, J. **Waterhammer Analysis**. New York: Prentice-Hall, p. 161, 1955.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**, 4ª Ed. São Paulo: EESC USP/Projeto REENGE. 2006.

PEROBA JÚNIOR, F. **Modelagem computacional de ventosas de duplo efeito como mecanismo de alívio do golpe de aríete**. 152 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

RAMALINGAM, D.; LINGIREDDY, S.; WOOD, D. J. Using the WCM for transient modelling of water distribution networks. **Journal AWWA**. v. 101, n. 2, p. 75-89, 2009.

RODRIGUES, M. V. S. **Modelagem computacional de ventosas automáticas de duplo efeito com abertura e fechamento não instantâneos como mecanismo de alívio do golpe de aríete**. 167 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

ROSSMAN, L. A.; GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. **EPANET 2.0 - Manual do Usuário**. Paraíba: Universidade Federal da Paraíba. 2009.

SAMANI, H. M. V.; KHAYATZADEH, A. Transient flow in pipe networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 40, n. 5, p. 637-644, 2010.

SILVA, J. V. V. **Avaliação da resiliência de adutoras de abastecimento de água considerando efeitos transitórios: estudo de caso: Franca/SP**. 150 f. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

STREETER, VICTOR L. Waterhammer analysis with nonlinear frictional resistance. **Hydraulics and Fluid Mechanics**. p. 431-452, 1964.

TASSINARI, L. C. S. **Transientes hidráulicos em sistemas de bombeamento: influência do material do conduto e dispositivo de proteção**. 200 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SANTORO, V. C.; CRIMÌ, A.; PEZZINGA, G. Developments and Limits of Discrete Vapor Cavity Models of Transient Cavitating Pipe Flow: 1D and 2D Flow Numerical Analysis. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 8, p. 04018047, 2018.

SOARES, A. K.; COVAS, D. I. C.; CARRIÇO, N. J. G. Transient Vaporous cavitation in viscoelastic Pipes. **Journal of Hydraulic Research**. v. 50, n. 2, p. 228-235, 2012.

THORLEY, A. R. D. **Fluid transients in pipeline systems**, London: D. and L. George Ltd., Herts. 1991.

TRIKI, A. Dual-technique-based inline design strategy for water-hammer control in pressurized pipe flow. **Acta Mechanica**, v. 229, p. 2019-2039, 2018.

TULLIS, J. P. **Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients**. Florida: John Wiley & Sons. 1989.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L.; SUO, L. **Fluid Transient in Systems**. New Jersey: Prentice Hall. 1993.

WOOD, D. J. Waterhammer analysis - Essential and easy (and efficient). **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 8, p. 1123-1131, 2005.

WOOD, D. J.; DORSCH, R. G.; LIGHTNER, C. Wave-plan analysis of unsteady flow. **Journal of the Hydraulics Division – Proceedings of ASCE**, p. 1-65, 1965.

WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S.; BOULOS, P. F. **Pressure Wave Analysis of Transient Flow in Pipe Distribution Systems, First Edition**. Pasadena: MWH Soft. 2005.

WOOD, D. J.; LINGIREDDY, S.; BOULOS, P. F.; KARNEY, B. W.; MCPHERSON, D. L. Numerical methods for modelling transient flow in distribution systems. **Journal AWWA**. v. 97, n. 7, p. 104-115, 2005.

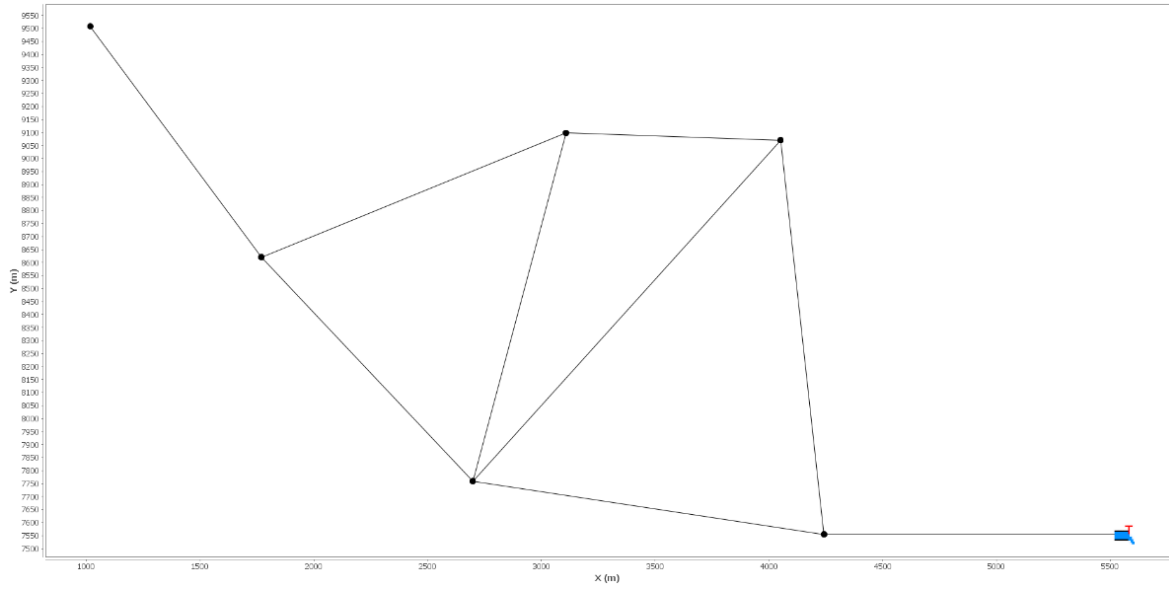
ZHOU, L. et al. Godunov-Type Solutions with Discrete Gas Cavity Model for Transient Cavitating Pipe Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 5, p. 04018017, 2018.

ZHU, Y.; DUAN, H. F.; LI, F.; WU, C. G.; YUAN, Y. X.; SHI, Z. F. Experimental and numerical study on transient air–water mixing flows in viscoelastic pipes. **Journal of Hydraulic Research**. p. 1-11, 2018.



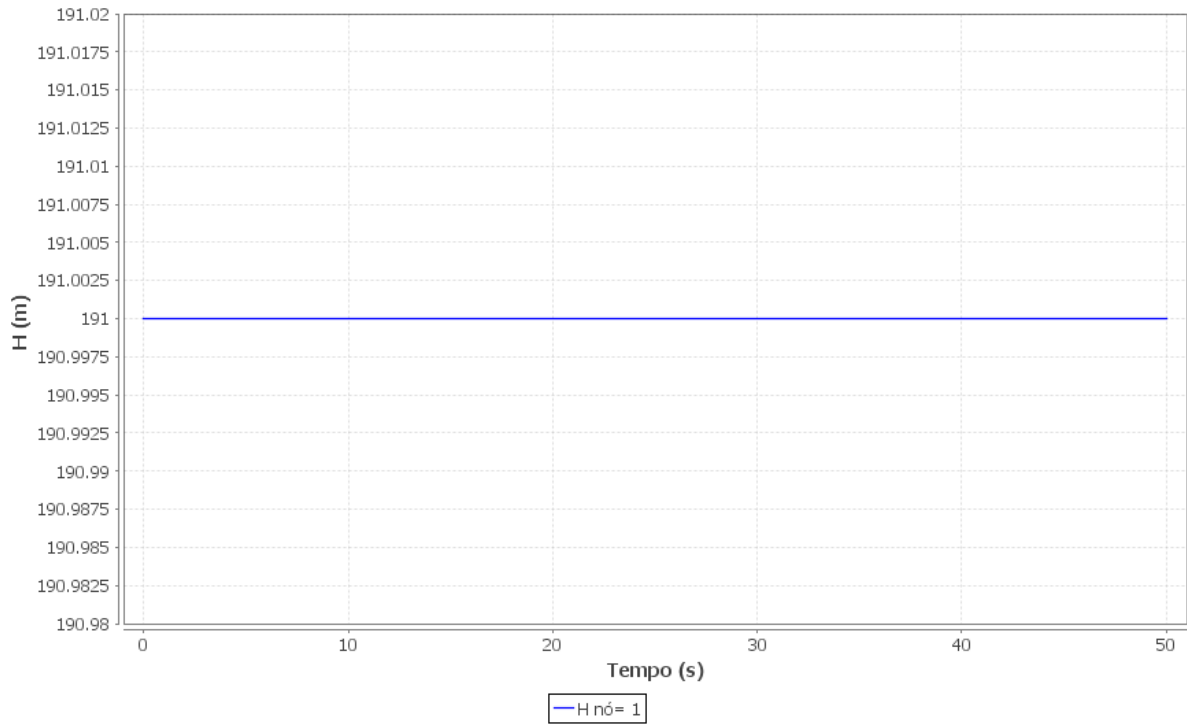
**APÊNDICE A - GRÁFICOS GERADOS PELO UFC7**

Figura A1 - Rede Boulos et al. (2005), no ambiente UFC7.



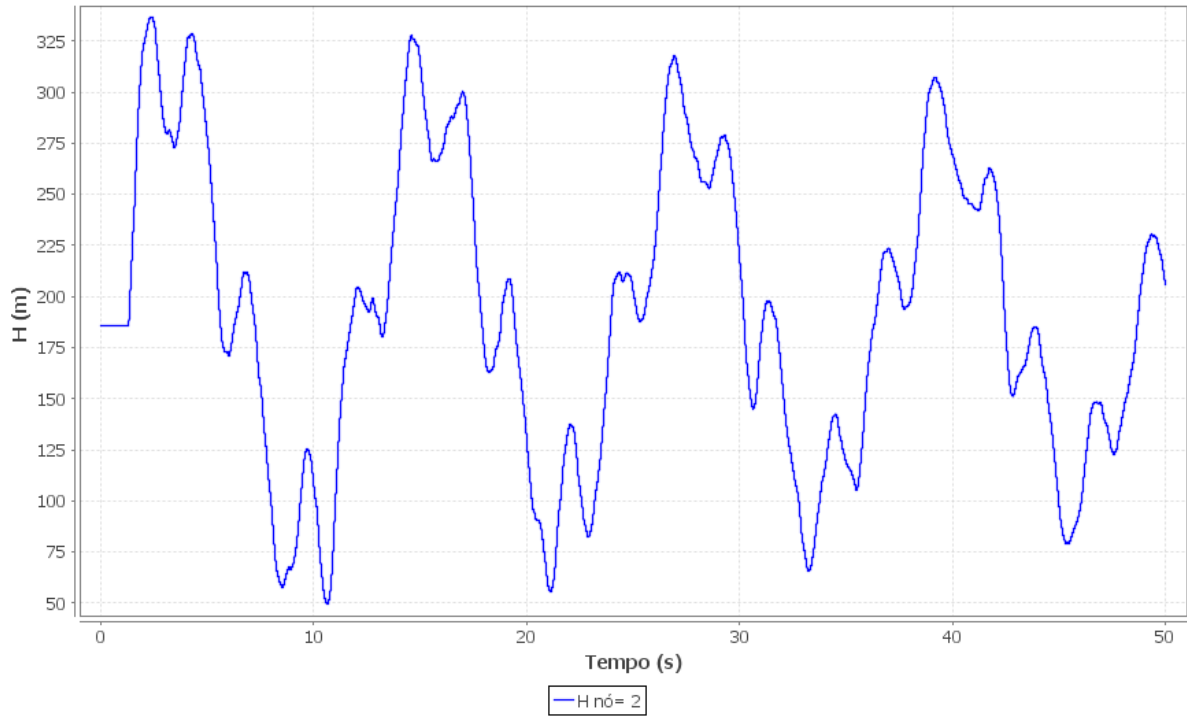
Fonte: Autor (2019).

Figura A2 - Simulação da variação da carga piezométrica no reservatório.



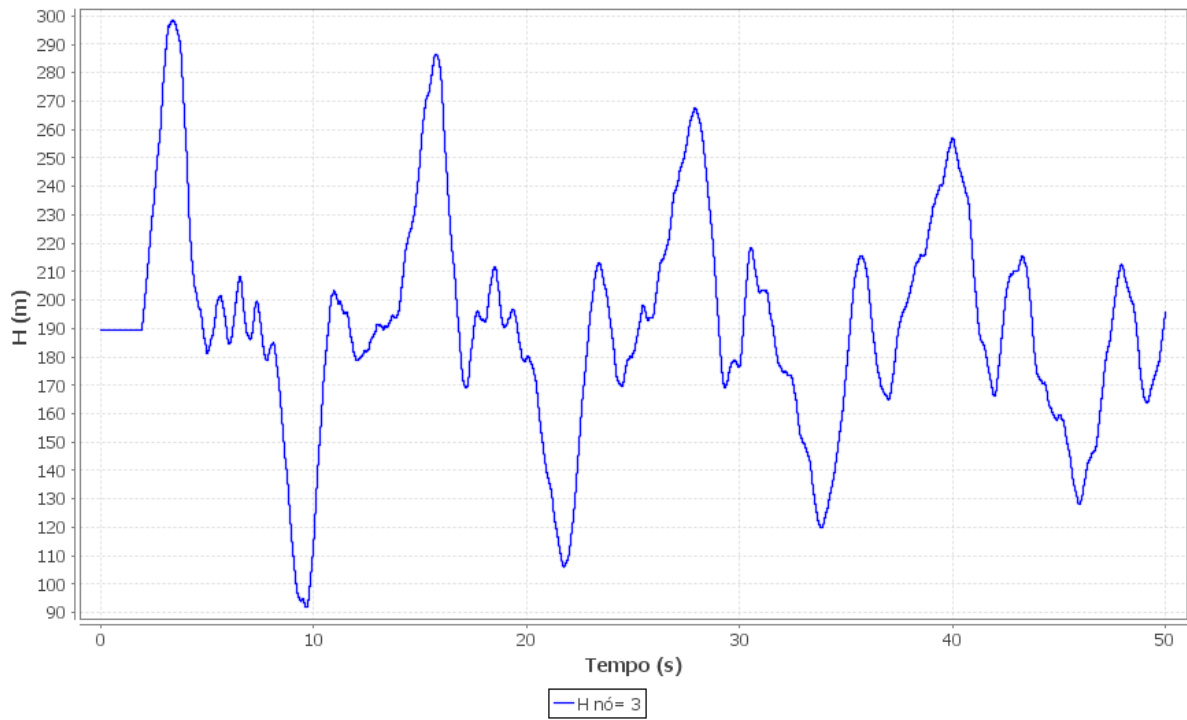
Fonte: Autor (2019).

Figura A3 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 2.



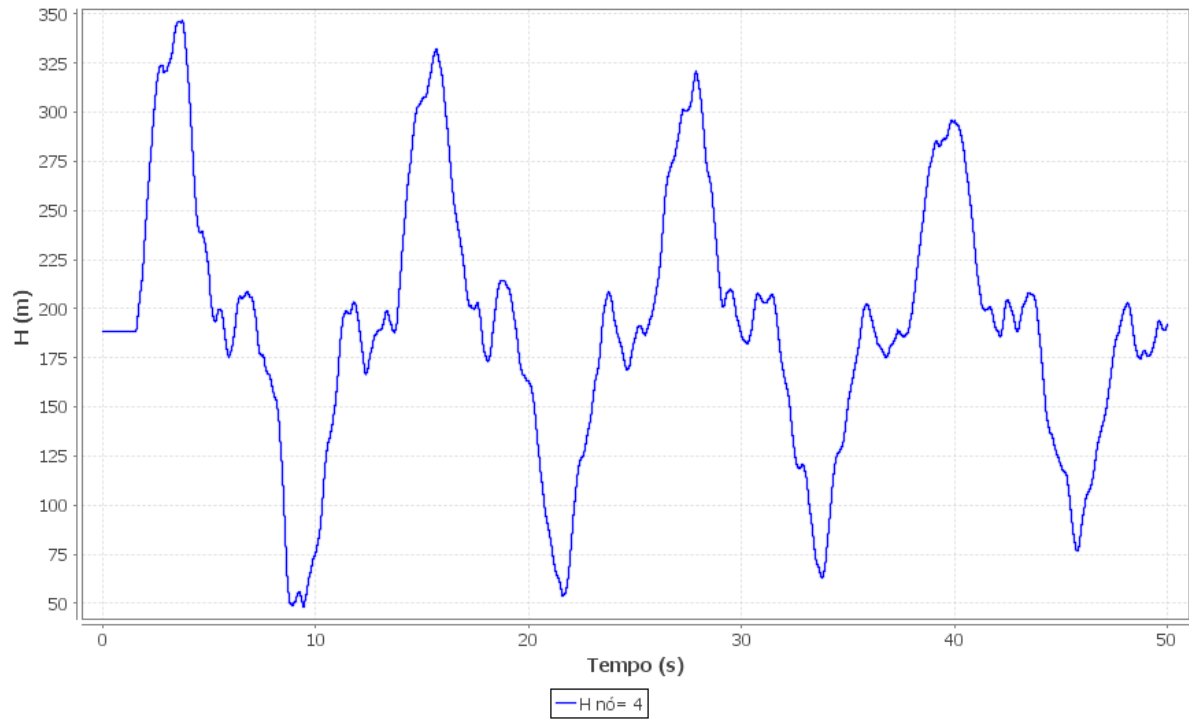
Fonte: Autor (2019).

Figura A4 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 3.



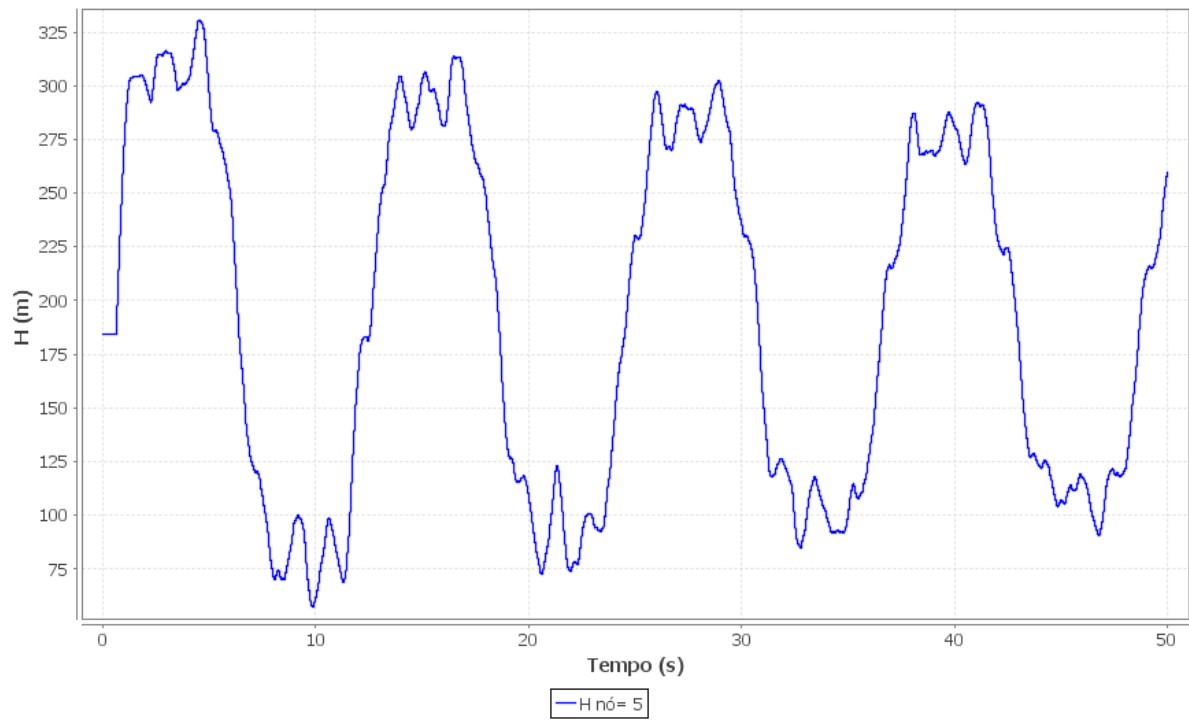
Fonte: Autor (2019).

Figura A5 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 4.



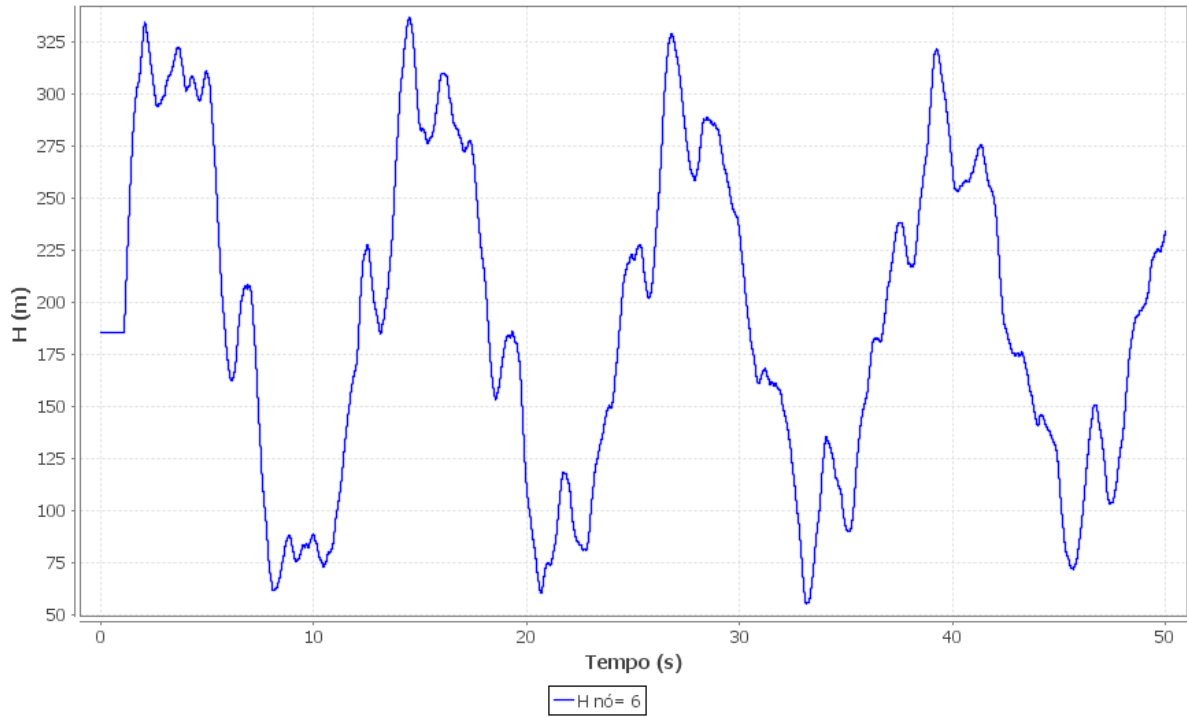
Fonte: Autor (2019).

Figura A6 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 5.



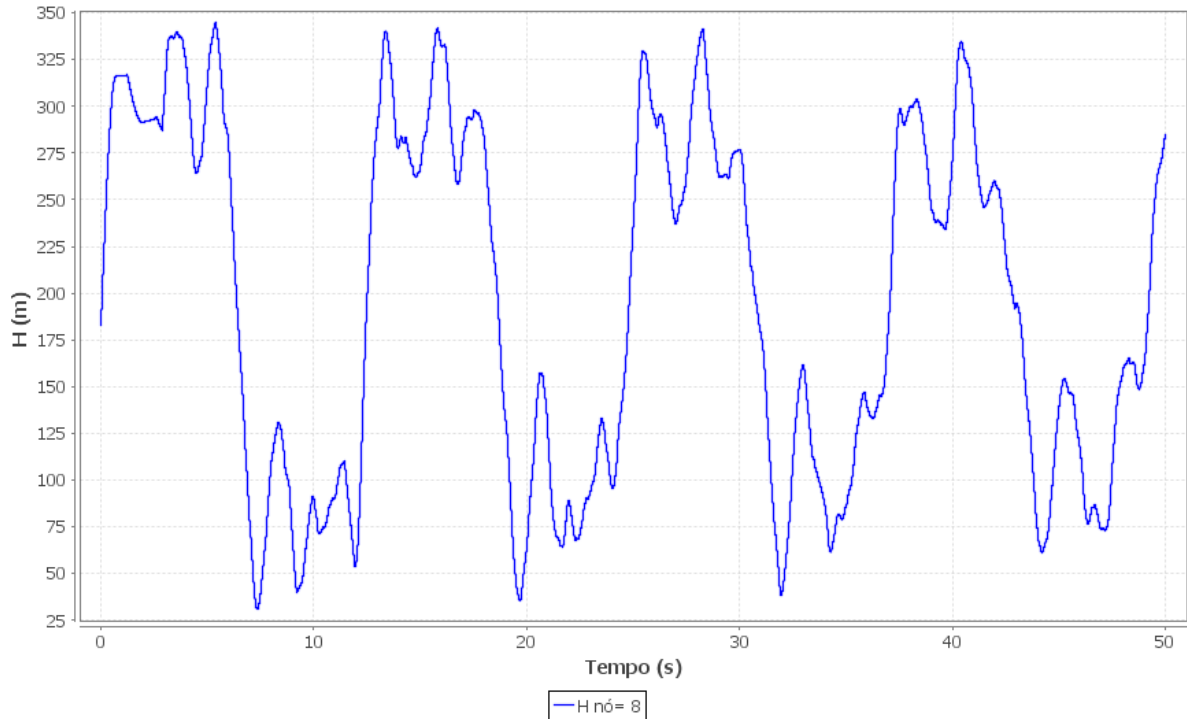
Fonte: Autor (2019).

Figura A7 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 6.



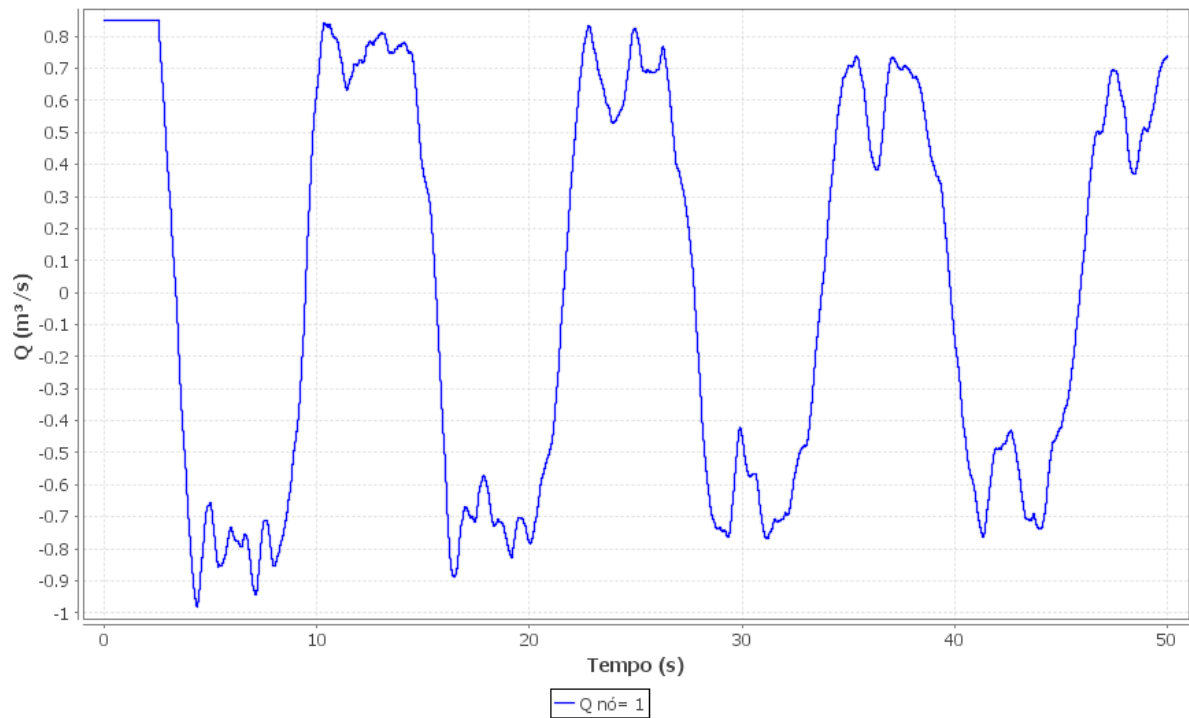
Fonte: Autor (2019).

Figura A8 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó da válvula.



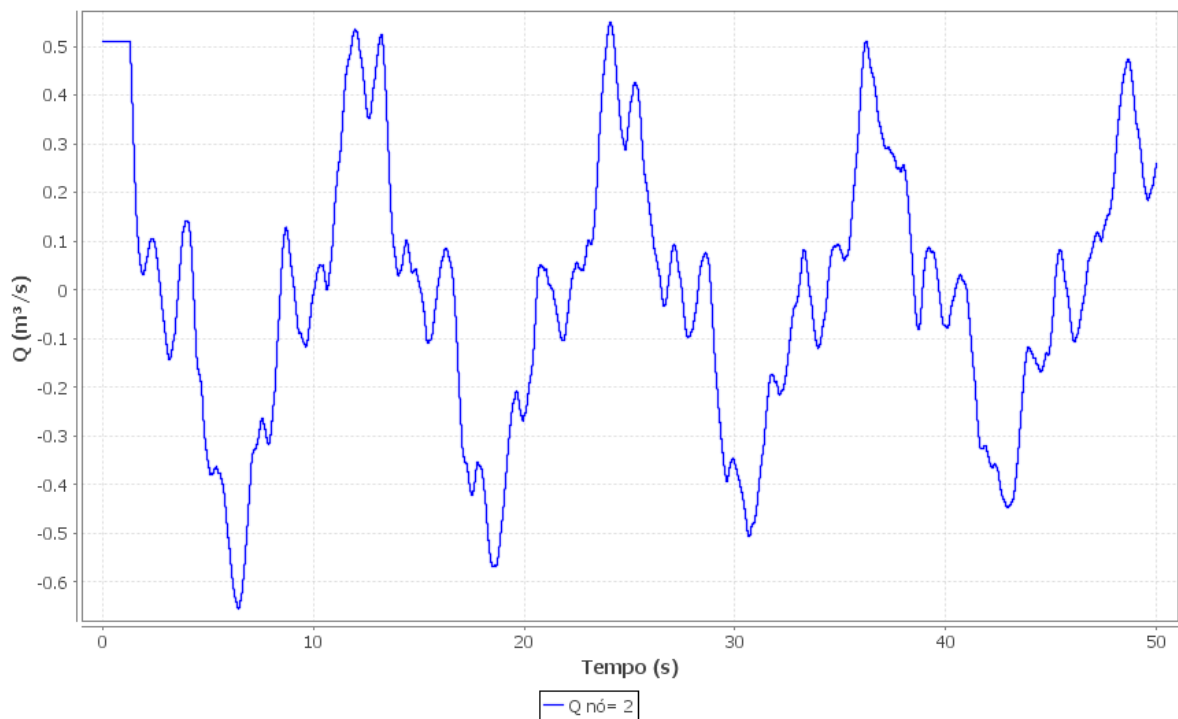
Fonte: Autor (2019).

Figura A9 - Simulação da variação da vazão no reservatório.



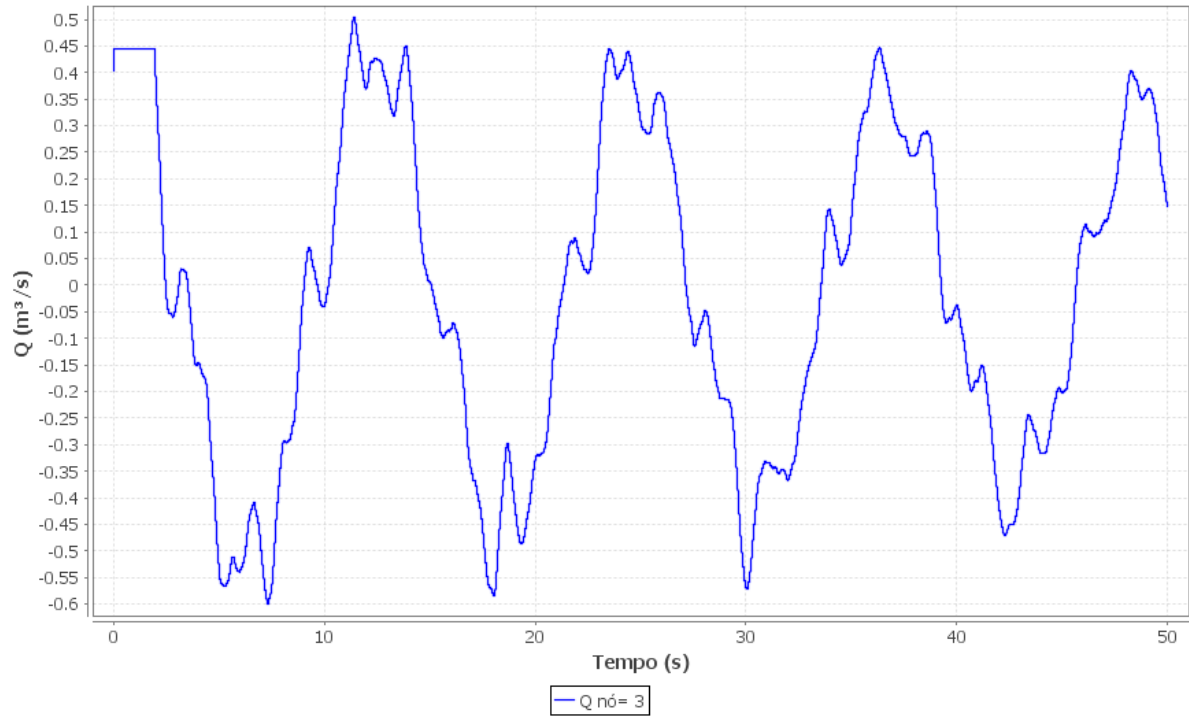
Fonte: Autor (2019).

Figura A10 - Simulação da variação da vazão no nó 2.



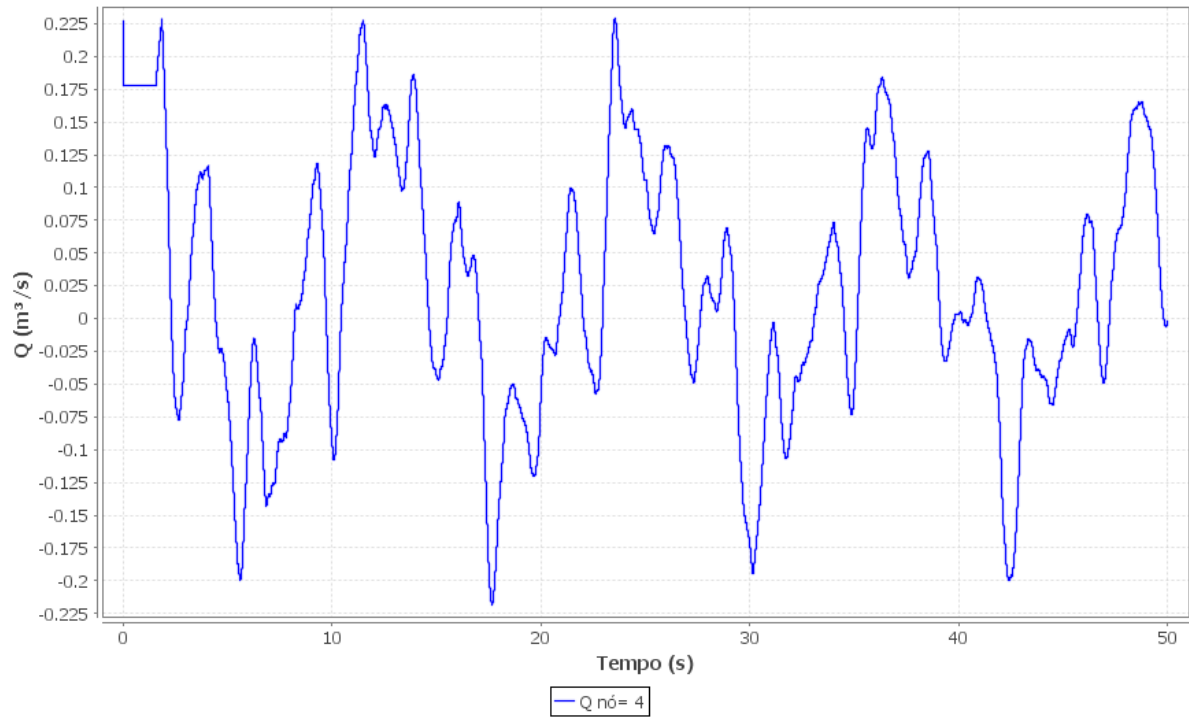
Fonte: Autor (2019).

Figura A11 - Simulação da variação da vazão no nó 3.



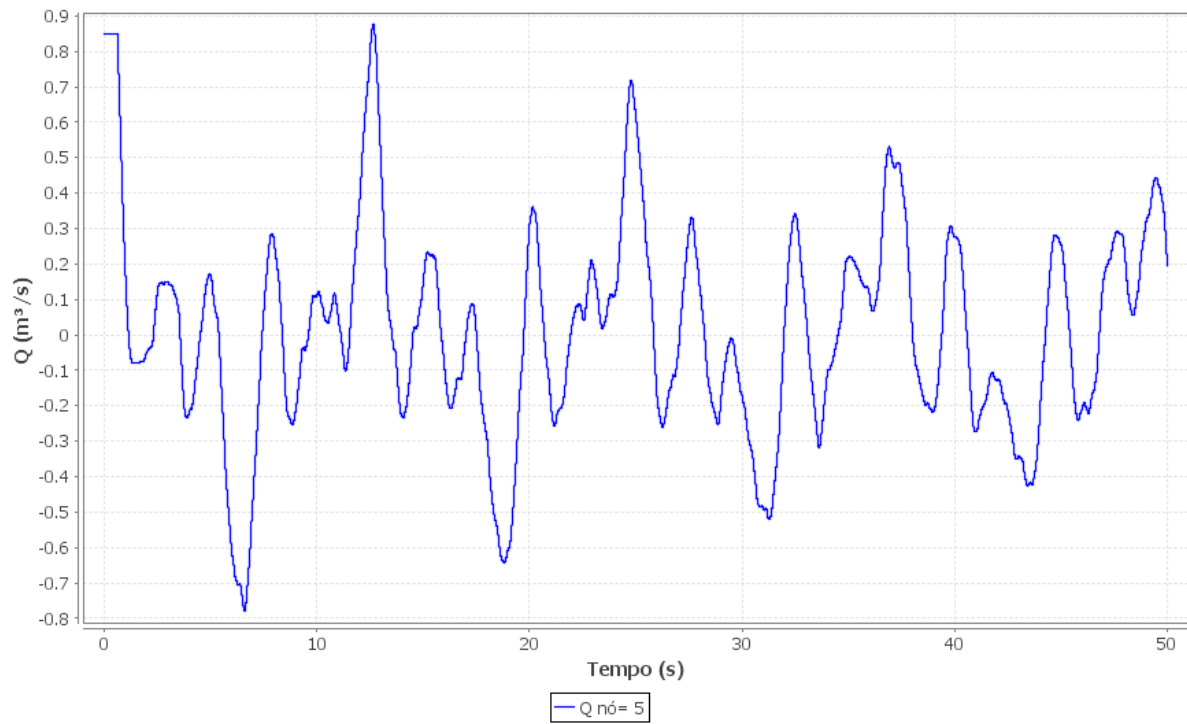
Fonte: Autor (2019).

Figura A12 - Simulação da variação da vazão no nó 4.



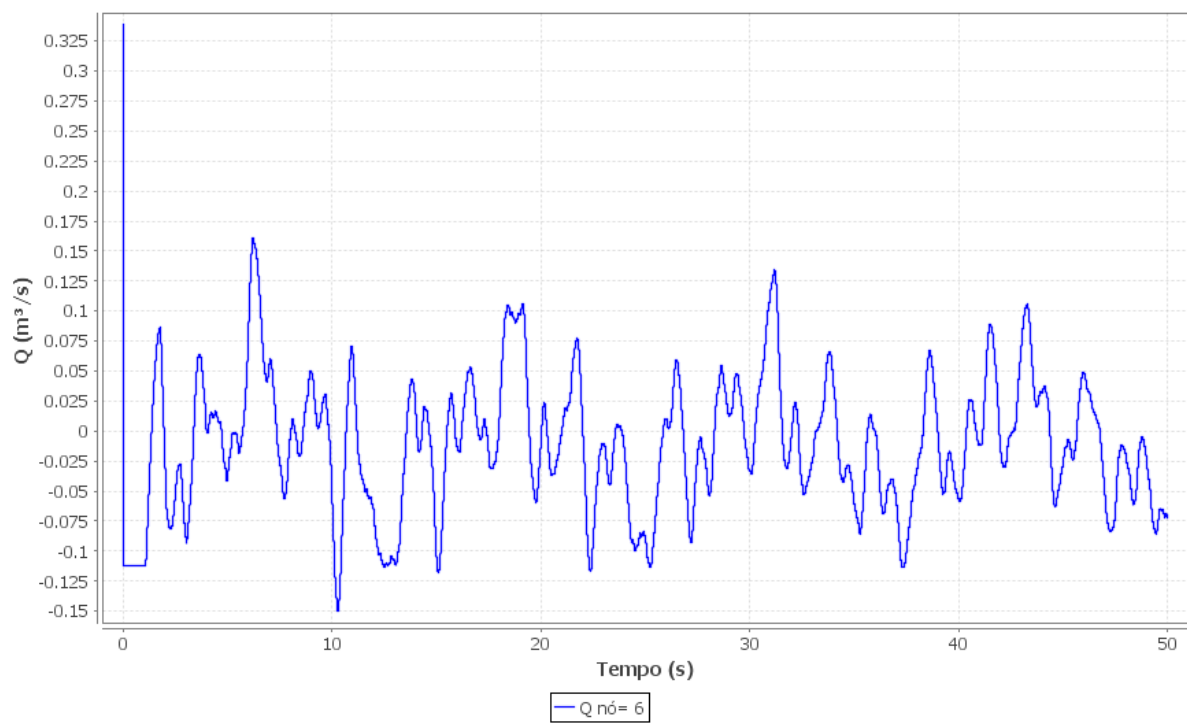
Fonte: Autor (2019).

Figura A13 - Simulação da variação da vazão no nó 5.



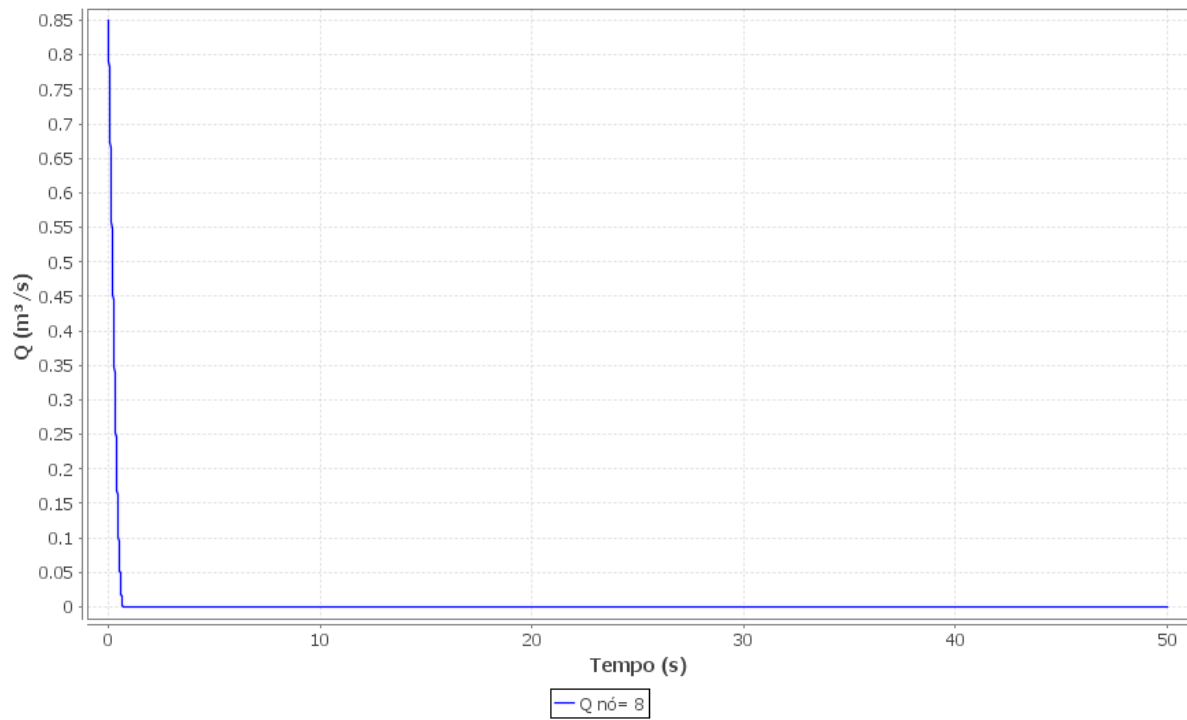
Fonte: Autor (2019).

Figura A14 - Simulação da variação da vazão no nó 6.



Fonte: Autor (2019).

Figura A15 - Simulação da variação da vazão na válvula.



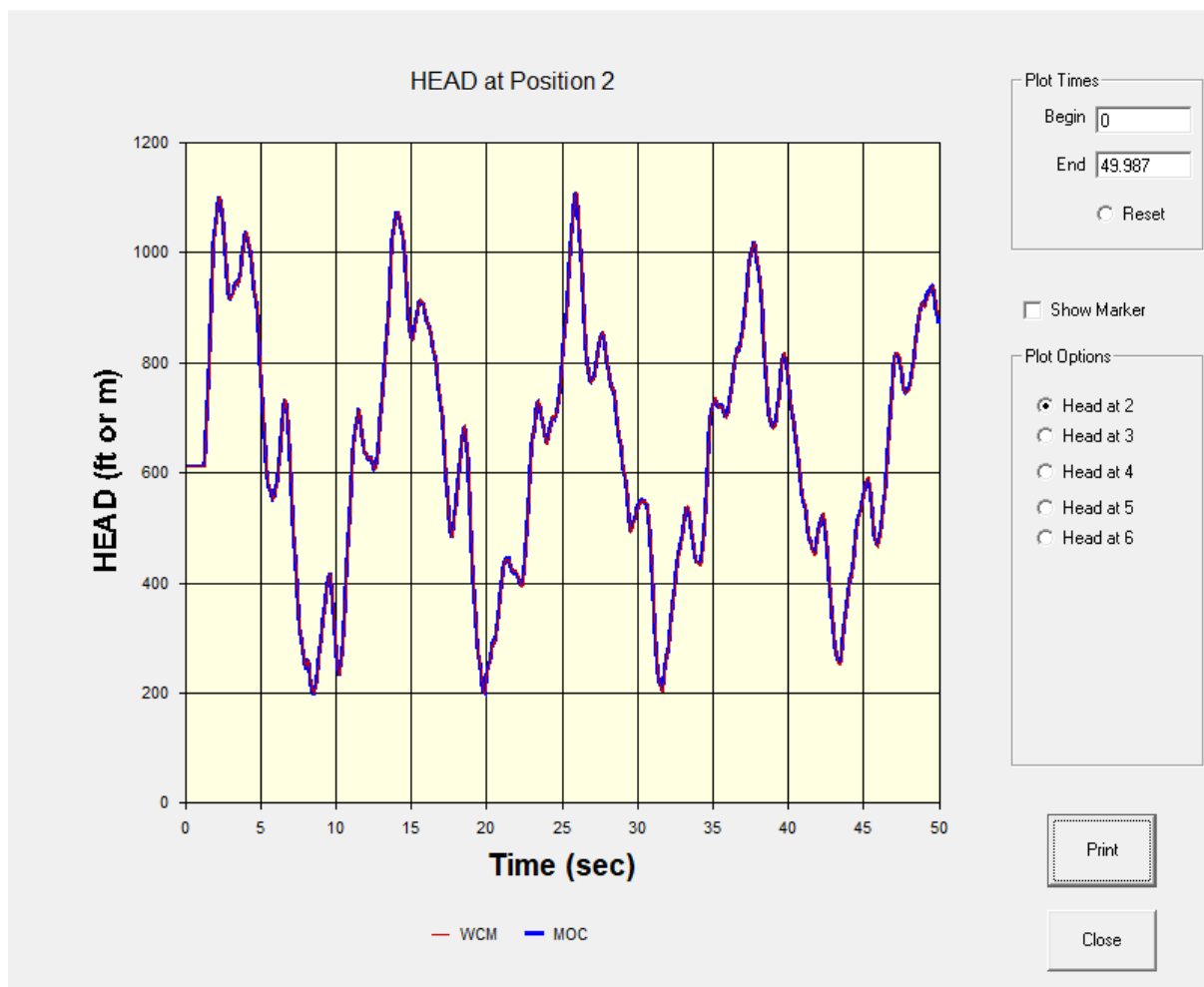
Fonte: Autor (2019).



**APÊNDICE B - GRÁFICOS GERADOS PELO PROGRAMA WCM**

Figura B1 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 2.

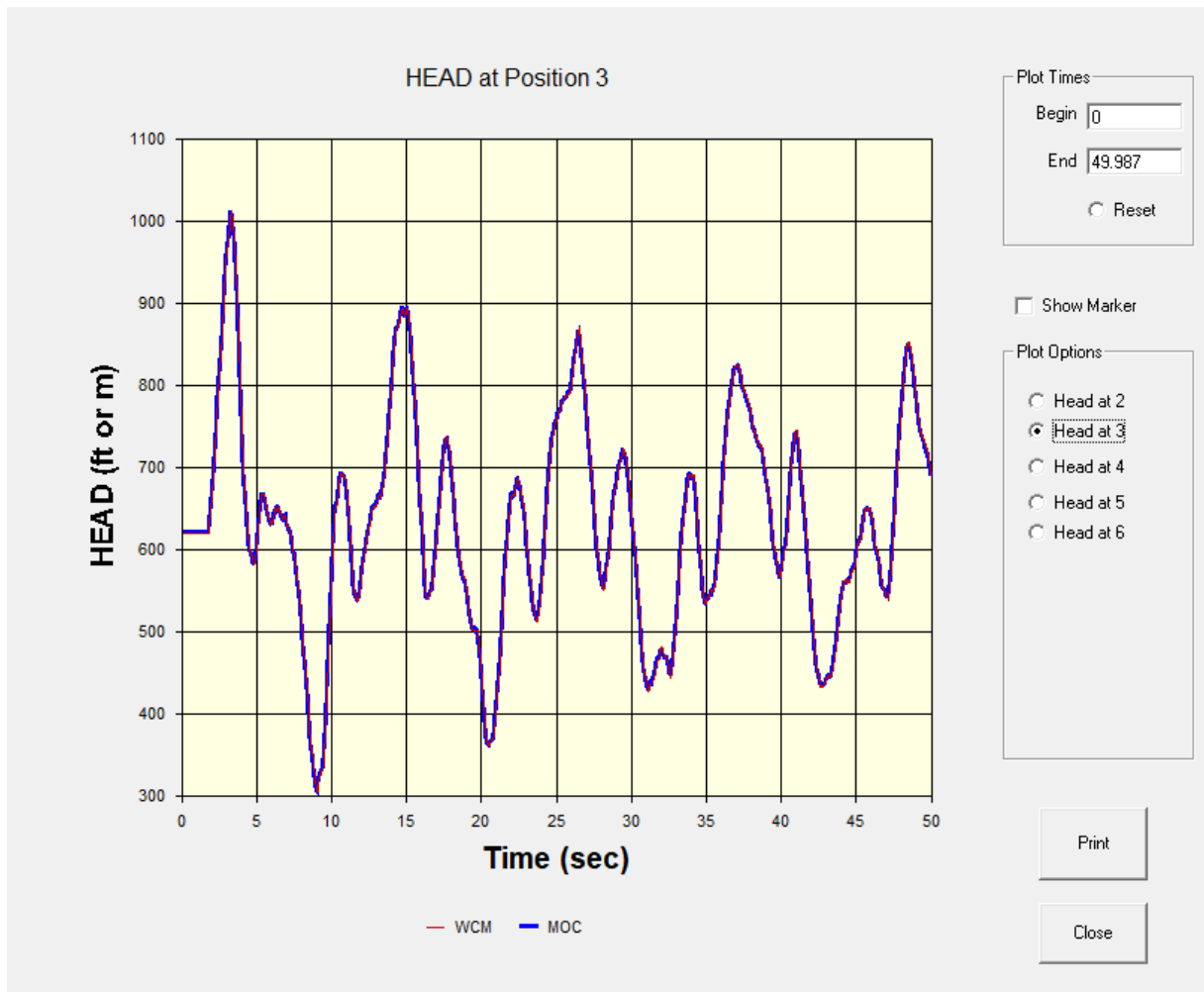
Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

Figura B2 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 3.

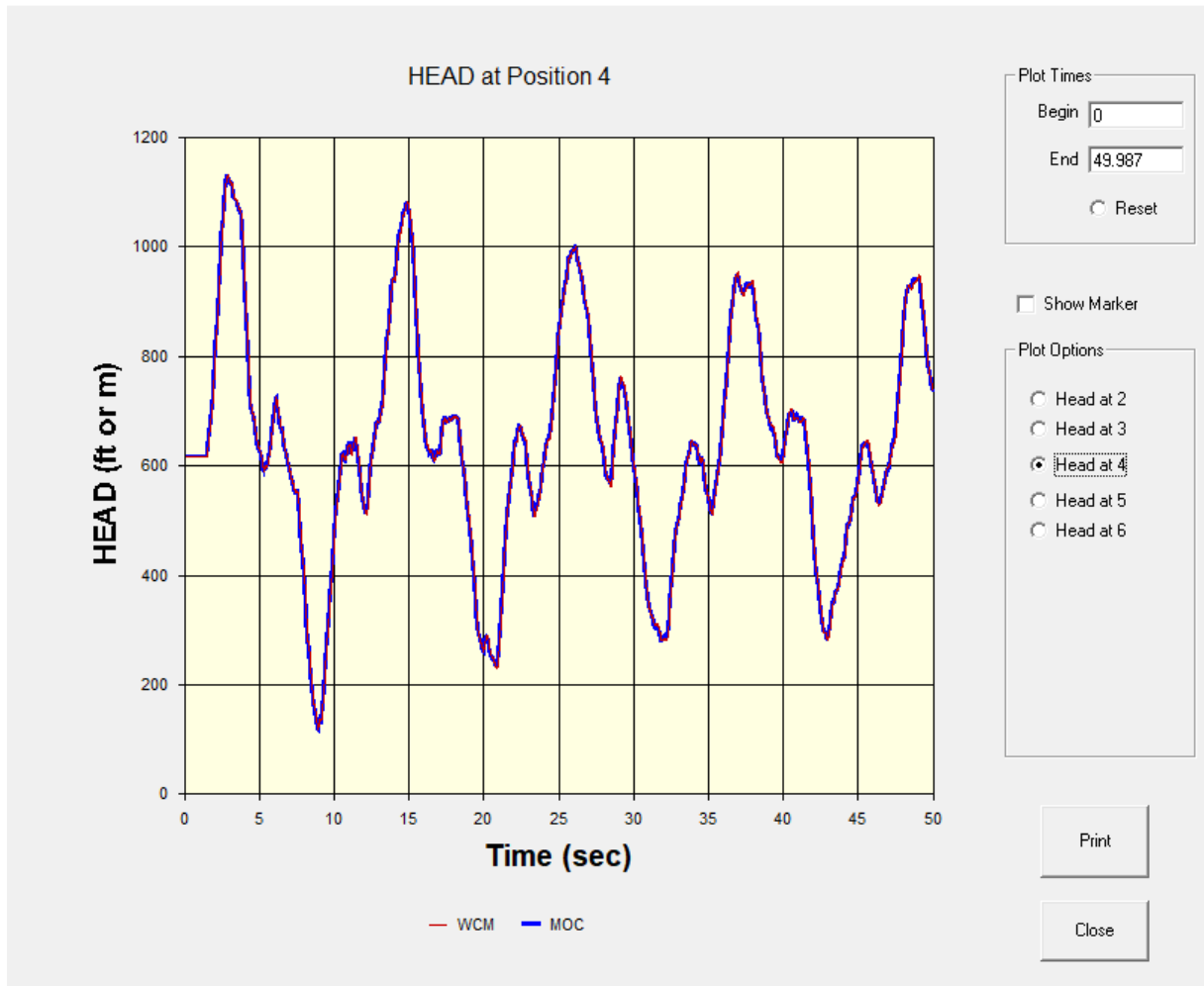
Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

Figura B3 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 4.

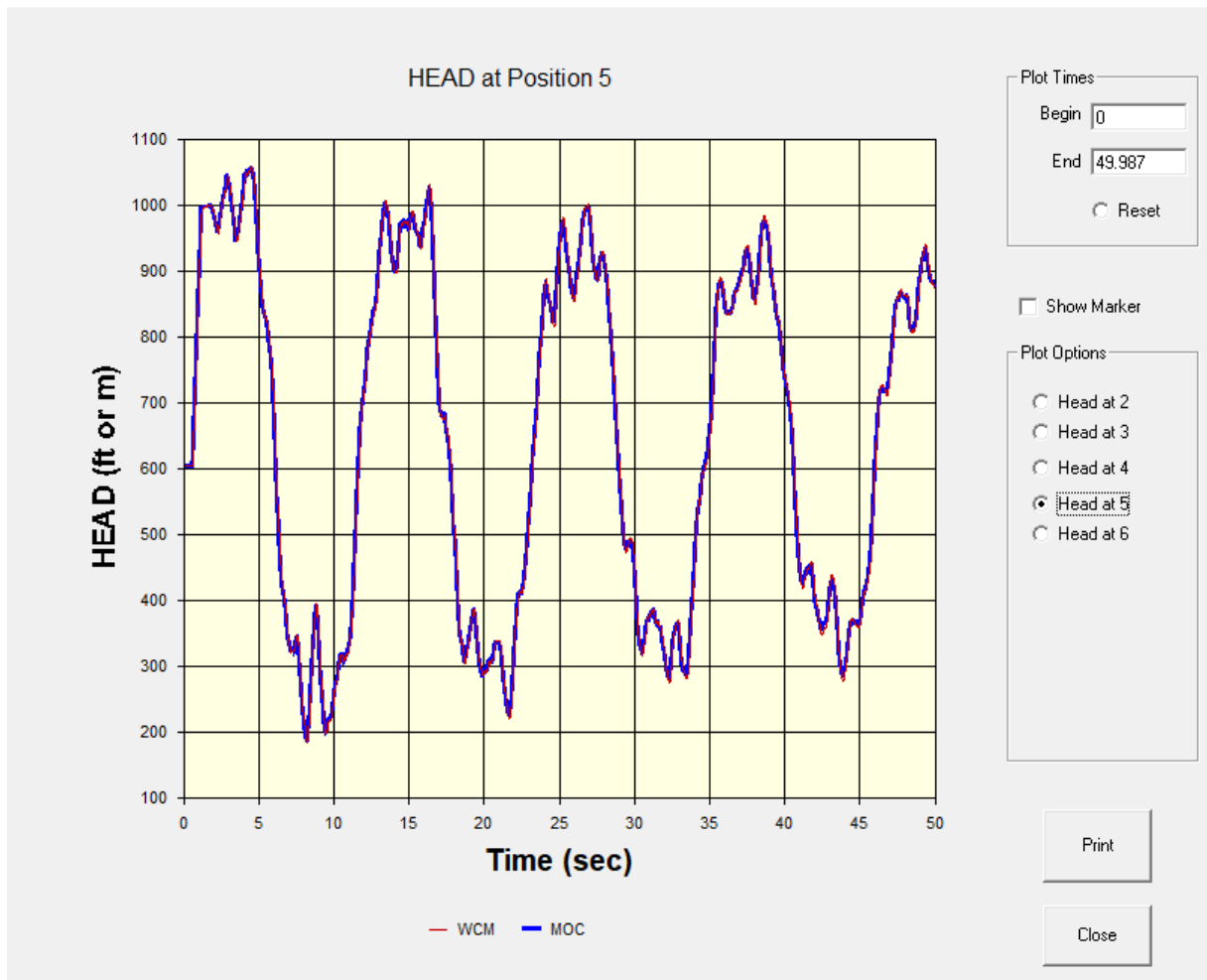
Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

Figura B4 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 5.

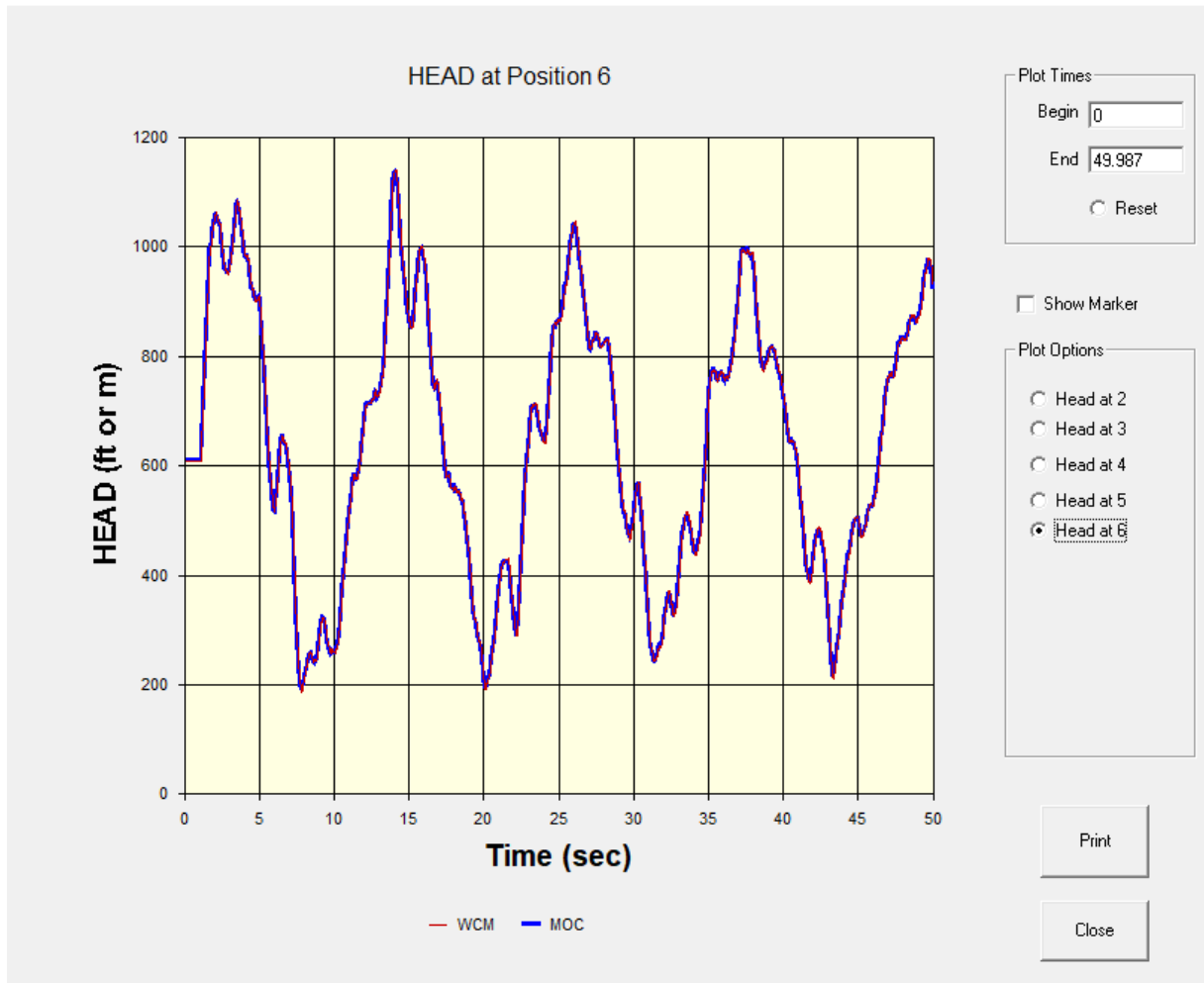
Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

Figura B5 - Simulação da variação da carga piezométrica no nó 6.

Plot Time vs. Head/Flow



Fonte: Autor (2019).

## APÊNDICE C - ARQUIVOS REDE BOULOS (2005) GERADOS NO EPANET®

### *REDE\_BOULOS.inp*

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
2	0	0	;
3	0	0	;
4	0	0	;
5	0	0	;
6	0	0	;
7	0	850	;
8	0	0	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	191	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter
	MinVol	VolCurve			

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	
	MinorLoss	Status				
1	1	3	609.60	914.4	92	0
	Open	;				
2	3	4	914.40	762	107	0
	Open	;				
3	3	2	609.60	609.60	98	0
	Open	;				
4	4	6	457.20	457.20	105	0
	Open	;				
5	4	2	548.64	457.20	100	0
	Open	;				
6	2	5	670.56	762	93	0
	Open	;				
7	5	7	606.60	914.4	105	0
	Open	;				
8	6	5	457.20	609.60	105	0
	Open	;				
9	6	2	487.68	457.20	140	0
	Open	;				

[PUMPS]

```

;ID      Node1      Node2      Parameters

[VALVES]
;ID      Node1      Node2      Diameter  Type  Setting  MinorLoss
10       7          8          900       TCV  0        0
;

[TAGS]
LINK 1      HIK7;0.0301;1005.8
LINK 2      HIK7;0.0248;1143.0
LINK 3      HIK7;0.0280;1219.2
LINK 4      HIK7;0.0262;1143.0
LINK 5      HIK7;0.0298;914.4
LINK 6      HIK7;0.0311;957.1
LINK 7      HIK7;0.0235;1005.8
LINK 8      HIK7;0.0256;914.4
LINK 9      HIK7;0.0171;975.4
LINK 10     8;2;900;0.00;0.00;0.00;0.70

[DEMANDS]
;Junction  Demand      Pattern      Category

[STATUS]
;ID      Status/Setting

[PATTERNS]
;ID      Multipliers

[CURVES]
;ID      X-Value      Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency  75
Global Price      0
Demand Charge     0

[EMITTERS]
;Junction  Coefficient

[QUALITY]
;Node      InitQual

[SOURCES]
;Node      Type      Quality      Pattern

```

[REACTIONS]  
;Type Pipe/Tank Coefficient

[REACTIONS]  
Order Bulk 1  
Order Tank 1  
Order Wall 1  
Global Bulk 0  
Global Wall 0  
Limiting Potential 0  
Roughness Correlation 0

[MIXING]  
;Tank Model

[TIMES]  
Duration 0:00  
Hydraulic Timestep 1:00  
Quality Timestep 0:05  
Pattern Timestep 1:00  
Pattern Start 0:00  
Report Timestep 1:00  
Report Start 0:00  
Start ClockTime 0:00  
Statistic NONE

[REPORT]  
Status No  
Summary No  
Page 0

[OPTIONS]  
Units LPS  
Headloss H-W  
Specific Gravity 1  
Viscosity 1  
Trials 40  
Accuracy 0.001  
CHECKFREQ 10  
MAXCHECK 10  
DAMPLIMIT 0  
Unbalanced Continue 10  
Pattern 1  
Demand Multiplier 1.0  
Emitter Exponent 0.5  
Quality None mg/L  
Diffusivity 1  
Tolerance 0.01



## [COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
2	2698.09	7759.56
3	1769.13	8620.22
4	3107.92	9098.36
5	4241.80	7554.64
6	4050.55	9071.04
7	5430.33	7554.64
8	5562.90	7553.89
1	1017.76	9508.20

## [VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
-------	---------	---------

## [LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
----------	---------	---------------------

## [BACKDROP]

DIMENSIONS	0.00	0.00	10000.00	10000.00
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]

**REDE\_BOULOS.rpt**

Página 1

12/21/2018 6:30:43 PM

```

*****
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*****

```

Arquivo de Rede: REDE\_BOULOS.net

Tabela de Trecho - Nó:

Trecho: ID	Início: Nó	Fim: Nó	Comprimento m	Diâmetro mm
1	1	3	609.60	914.4
2	3	4	914.40	762
3	3	2	609.60	609.60
4	4	6	457.20	457.20

5	4	2	548.64	457.20
6	2	5	670.56	762
7	5	7	606.60	914.4
8	6	5	457.20	609.60
9	6	2	487.68	457.20
10	7	8	#N/A	900 Válvula

## Resultados nos Nós:

Nó ID	Consumo LPS	Carga Hidráulica m	Pressão m	Qualidade
2	0.00	185.96	185.96	0.00
3	0.00	189.28	189.28	0.00
4	0.00	188.09	188.09	0.00
5	0.00	184.20	184.20	0.00
6	0.00	185.53	185.53	0.00
7	850.00	182.87	182.87	0.00
8	0.00	182.87	182.87	0.00
1	-850.00	191.00	0.00	0.00 RNF

## Resultados nos Trechos:

Trecho: ID	Vazão LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
1	850.00	1.29	2.82	Open
2	404.57	0.89	1.31	Open
3	445.43	1.53	5.46	Open
4	227.12	1.38	5.60	Open
5	177.45	1.08	3.88	Open
6	511.13	1.12	2.62	Open
7	850.00	1.29	2.20	Open

Página 2

## Resultados nos Trechos: (continuação)

Trecho: ID	Vazão LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km	Estado
8	338.87	1.16	2.89	Open
9	-111.75	0.68	0.88	Open
10	0.00	0.00	0.00	Active Válvula