UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RONALDO DE SOUZA BARCALA

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA MULTIMÍDIA NA MODELAGEM DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COMO MOTIVAÇÃO PARA O ENSINO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

SANTOS/SP
2016

RONALDO DE SOUZA BARCALA

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA MULTIMÍDIA NA MODELAGEM DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COMO MOTIVAÇÃO PARA O ENSINO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Profª. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia.

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Barcala, Ronaldo de Souza.

Utilização de Ferramenta Multimídia na Modelagem de uma Rede de Distribuição de Água como Motivação para o Ensino de Mecânica dos Fluidos/Ronaldo de Souza Barcala, 2016.

85 p.

Orientadora: Profa. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. ensino. 2. modelagem. 3. Mecânica dos fluidos. 4. engenharia. I. Garcia, Dorotéa Vilanova. II. Utilização de Ferramenta Multimídia na Modelagem de uma Rede de Distribuição de Água como Motivação para o Ensino de Mecânica dos Fluidos

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a um grande homem, meu pai José Barcala (*in memoriam*), que passou por este mundo de forma anônima e realizou grandes feitos para a sociedade, sem ser reconhecido. Atuando em várias áreas de atividade profissional tornou-se professor, daqueles que ensinam com dedicação e comprometimento. Criativo, determinado, disciplinado, incansável na busca de soluções. Como um engenheiro nato, viveu sem ter a oportunidade de conseguir a formação acadêmica necessária, deixando-me a inspiração, como legado. Dedico também à minha incansável esposa Rosa, pelo carinho, dedicação e paciência ao longo de nossa jornada.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer às pessoas que contribuíram de maneira significativa para a conclusão deste trabalho.

Professora Dora, que foi muito mais que orientadora, amiga, incentivadora, desafiando-me com cobranças amenas e encorajando-me com palavras de ânimo.

Meu filho Giovanni, cujo conhecimento em *softwares* de engenharia e disposição em utilizá-lo em meu auxílio, foram cruciais.

Agradeço, ainda, aos professores doutores Deovaldo de Moraes Júnior, Marlene Silva de Moraes, Aldo Ramos Santos e João Inácio da Silva Filho, pelas sugestões visando o aperfeiçoamento do texto.

RESUMO

Buscando contribuir na linha de pesquisa sobre o desenvolvimento do ensino de engenharia, propôs-se trazer uma situação real de operação de rede de distribuição de água para análise teórica utilizando *softwares* de modelagem, como ferramenta. Relatando os métodos utilizados, destacou-se a dificuldade de obtenção de dados de cadastro das redes em operação, bem como as medidas adotadas no sentido de obter-se um modelo representativo. Apresentou-se uma breve explanação do processo de ensino/aprendizagem baseado nas teorias: psicogenética de Jean Piaget e sócio interacionista de Lev Semenovich Vygotski e no projeto liderado por Benjamim Bloom, denominado Taxonomia de Bloom, para discutir o emprego do modelo de rede construído como ferramenta auxiliar no ensino de mecânica dos fluidos. Os resultados da simulação de um pequeno trecho da rede em questão, foram utilizados como parâmetros para considerações didáticas do estudo proposto, e sugestões para empreitadas futuras.

Palavras Chave: ensino. modelagem. mecânica dos fluidos. engenharia.

ABSTRACT

Seeking to contribute in the line of research on the development of engineering education, it was proposed to bring a real situation of water distribution network operation for theoretical analysis using modeling software as a tool. Describing the methods used, it was highlighted the difficulty of obtaining registration data networks in operation, and the measures adopted to obtain a representative model. Presented a brief explanation of the teaching / learning process based on theories: psychogenetic Jean Piaget and socio-interactionist Lev Semenovich Vygotsky and design led by Benjamin Bloom called Bloom Taxonomy, to discuss the use of the network model built as a tool assist in the teaching of fluid mechanics. The results of the simulation of a small part of the network in question were used as parameters for didactic considerations of the proposed study, and suggestions for future endeavors.

Keywords: teaching. modeling. fluid mechanics. engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corte esquemático de um Barômetro adaptada 24
Figura 2. Corte esquempatico de um Piezômetro adaptada 25
Figura 3. Corte esquemático de um Manômetro em “U”. 25
Figura 4. Representação esquemática de um Manômetro metálico – adaptada 26
Figura 5. Representação esquemática do fluxo em uma seção constante. 27
Figura 6. Representação esquemática do fluxo em uma seção variável. 27
Figura 7. Representação esquemática de pontos em posições distintas. 28
Figura 8. Representação esquemática de máquina inserida no escoamento. 29
Figura 9. Representação esquemática de escoamento com bomba. 29
Figura 10. Representação esquemática de um Venturímetro 30
Figura 11. Representação esquemática de um tubo Pitot. 31
Figura 12. Representação esquemática de escoamento genérico. 33
Figura 13. Vista Aérea do bairro objeto de estudo 38
Figura 14. Traçado da rede 39
Figura 15. Locação da Estação Pressurizadora (“Booster”) 40
Figura 16. Projeto da Estação Pressurizadora (“Booster”) 40
Figura 17. Cruzamento de tubulações conforme registrado no cadastro 42
Figura 18. Interpretação feita pelo *software*, na conversão dos dados do cadastro para os dados parametrizados. 43
Figura 19. Vista geral da rede parametrizada no Plant3D. 43
Figura 20. Vista da aproximação do nó com erro de cadastro. 44
Figura 21. Cadastro da rede na região do booster. 44
Figura 22. Cadastro de ligações da rede na região do *booster* 45
Figura 23. Região selecionada para o projeto. 45
Figura 24. Comando “Dalton” acionando o aplicativo. 46
Figura 25. “Janela” para entrada de parâmetros hidráulicos. 46
Figura 26. “Janela” extendida. 47
Figura 27. Botão de comando “solve” disponibilizado. 47
Figura 28. Demonstração de distribuição de pressão no trecho estudado. 48
Figura 29. Vizualização da pressão em um ponto de saída da rede. 48
Figura 30. Comando PCF Export. 49

Figura 31. Comando Import do Project Dalton. 50
Figura 32. Arquivo extensão “json” aberto no Project Dalton. 50
Figura 33. Distribuição de Pressão. 51
Figura 34. Visão aproximada da distribuição de pressão. 51
Figura 35. Sentido do fluxo. 52
Figura 36. Histogramas de distribuição de frequências para 0:00h e 18:00h. 53
Figura 37. Intervalo de consumo com 95% de confiança para 24 horas. 55
Figura 38. Região de cota topográfica mais elevada 56
Figura 39. Pressão na rede na primeira simulação. 57
Figura 40. Nós que apresentaram baixa pressão numerados. 57
Figura 41. Modelo com a estação pressurizadora. 58
Figura 42. Detalhe da estação inserida no modelo. 58
Figura 43. Curva da bomba instalada conforme catálogo 59
Figura 44. Curva da bomba digitada no Project Dalton. 59
Figura 45. Pressões na rede considerando a estação pressurizadora. 60
Figura 46. Aproximação de pontos à montante da estação pressurizadora. 60
Figura 47. Elementos cotidianos 62
Figura 48. Elementos representados. 63
Figura 49. Representação de elementos específicos. 63
Figura 50. Representação de resultados matemáticos. 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de média, variância e desvio padrão para cada hora do dia.....54
Tabela 2. Intervalo para 95% de confiança.....54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Justificativa 13
1.2 Relevância do Tema 14
1.3 Objetivos 15
1.3.1 Objetivo geral 15
1.3.2 Objetivo específico 15
1.4 Método 15
1.5 Importância do Projeto 16
1.6 Limitações do Projeto 16
1.7 Estrutura da Dissertação 17
2 FERRAMENTA MULTIMÍDIA 18
2.1 Softwares Disponíveis 18
2.1.1 Identificação 18
2.1.2 Análise das características 20
2.2 Parâmetros para Modelagem 21
2.3 Escolha 21
2.4 Características de Hardware Utilizados 22
3 ABORDAGEM TEÓRICA 23
3.1 Tópicos de Mecânica dos Fluidos 23
3.1.1 Definição de fluidos – propriedades 23
3.1.2 Pressão 23
3.1.3 Equação da continuidade 26
3.1.4 Equação de Bernoulli 28
3.1.5 Aplicações da equação de Bernoulli 30
3.1.6 Análise Dimensional 32
3.1.7 Aplicação às instalações hidráulicas 33
3.2 Modelo em Estudo 35
3.2.1 Solução de redes hidráulicas pelo método dos nós 35
4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA REDE 38
4.1 Objeto Modelado 38
4.2 Procedimentos de Modelagem 41

4.2.1 Dados de cadastro da rede 41
4.2.2 A rede no Plant3D 42
4.2.3 A Rede no Project Dalton 49
4.3 Parâmetros para Simulação 52
4.4 Estudo de Casos 55
4.4.1 Simulação 1, sem a estação pressurizadora 56
4.4.2 Simulação 2, com a estação pressurizadora 58
5 UTILIZAÇÃO ACADÊMICA 61
5.1 Processo Ensino/Aprendizagem 61
5.2 Modelo como Ferramenta 62
5.3 Aplicação 64
5.4 Resultados e Discussão 65
6 CONCLUSÕES 67
6.1 Propostas Futuras 67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69
APÊNDICE 71
Apêndice 1.Planilha de dados de consumo utilizados para simulação da rede 71
Apêndice 2.Planilha de resultados obtidos na simulação sem a estação pressurizadora 74
Apêndice 3.Planilha de resultados obtidos na simulação com a estação pressurizadora 80

1 INTRODUÇÃO

O ensino de engenharia possui registro formal por volta do século dezoito com a abertura da primeira escola na Europa. Antes disto, “engenhar” significava solucionar problemas baseado na genialidade e experiência de alguns indivíduos “iluminados”. Ensinar engenharia consistia em desenvolver métodos e teorias, na grande maioria, empíricos, e transmiti-los pessoalmente a seus seguidores (TELLES, 1984).

A evolução do conhecimento da matemática, da física e da química, possibilitou que os problemas fossem sendo representados por modelos matemáticos, e, consequentemente, constituíssem teorias que, além de servirem para a solução destes problemas, pudessem ser escritas e transmitidas por qualquer indivíduo que passasse a entender este modelo.

Com o advento dos computadores pessoais, e da rede internacional entre eles, a divulgação do conhecimento existente e sua evolução, sofreu um salto que está provocando mudanças significativas na sociedade. Dentre elas, o processo de ensino/aprendizagem em todos os campos do conhecimento humano, tem sido um dos grandes afetados por estas mudanças.

1.1 Justificativa

O desenvolvimento tecnológico requer, cada vez mais, indivíduos capazes de identificar problemas, entendê-los, resolvê-los, e antever problemas futuros (BELHOT, NETO, 2006). Este é o perfil do engenheiro. Porém, pesquisas recentes indicam que o número de engenheiros, atualmente, é muito menor do que a necessidade da sociedade. Além disto, os profissionais que estão sendo formados pelas universidades encontram dificuldades para atender o que a sociedade espera deles (LAUDARES, RIBEIRO, 2001).

Vive-se atualmente num ambiente cercado de estímulos visuais em que, tudo muda numa velocidade muito acima da que ocorria quando foram implantadas as primeiras escolas de engenharia.

Por causa deste fato, apesar da evolução dos métodos de ensino/aprendizagem, enfrentam-se dificuldades para estimular o aluno a buscar o

conhecimento já desenvolvido nesta área, e dificuldades ainda maiores para estimulá-lo a desenvolver novos conhecimentos.

Como resultado, apesar do crescimento do número de alunos matriculados nos cursos de engenharia ser significativo, o mesmo acontece com os índices de desistência antes da graduação. Inverter este processo é um desafio da universidade, que tem papel fundamental numa sociedade que está sendo denominada “sociedade do conhecimento”.

Um aluno que tenha interesse no aprendizado certamente aprenderá, mesmo que o professor não tenha muito a ensinar, mas por mais que um professor seja capacitado e dedicado, um aluno desinteressado não adquirirá conhecimento. Por isto, despertar o interesse do aluno deve ser um objetivo do professor (CHAGAS, FERREIRA, 2013).

1.2 Relevância do Tema

O aluno de Engenharia precisa entender o mundo que o cerca e as leis físicas e químicas que o rodeiam, para poder solucionar os problemas à sua volta. Fazer cálculos, representar graficamente ou desenhar utilizando ferramentas manuais, passou a ter um papel secundário com a evolução tecnológica. Não são mais necessários profundos conhecimentos matemáticos para executar *softwares* de cálculos em diversas áreas (SILVEIRA, 2005). Apesar disto, para inserir dados em um *software* de cálculo e analisar os resultados que ele devolve, é necessário conhecimento ainda maior.

Vasconcelos (2007) afirma que “A falta de direcionamento estratégico prejudica a aprendizagem, levando a instituição universitária e aqueles que nela exercem a docência à inércia, à reprodução constante, à acomodação”.

Neste sentido, faz-se necessário encontrar uma forma de estimular o aluno a buscar o conhecimento num processo que começa no concreto e vai ao abstrato (FERRAZ, 2010), que começa com a identificação dos fenômenos envolvidos, para depois levá-lo e formular os modelos matemáticos para representá-los.

A utilização de *softwares,* que aliam capacidade de cálculos matemáticos com capacidade de representação gráfica, apresenta-se como uma das alternativas para se atingir este objetivo.

1.3 Objetivos

Muitas vertentes de pesquisadores estão trabalhando para melhorar o processo ensino/aprendizagem nos cursos de engenharia. Algumas buscam melhorar o conteúdo curricular, outras analisam o processo de avaliação e algumas focam suas pesquisas na utilização de recursos tecnológicos, para despertar o interesse dos alunos.

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho focou a utilização de ferramenta multimídia no ensino de alguns tópicos de mecânica dos fluidos, capaz de levar os alunos a visualizarem uma situação real de uma rede de distribuição de água e avaliarem alguns fatores que interferem em seu funcionamento.

1.3.2 Objetivo específico

O presente estudo teve por objetivo específico criar um modelo utilizando uma ferramenta que aproxime o aluno, usuário de aparelhos com grandes recursos visuais, da realidade diária de operação de uma rede de abastecimento de água, e levá-lo a entender alguns parâmetros que envolvem a decisão de engenheiros, que operam estas redes através da simulação de caso real registrado.

1.4 Método

Partindo-se da pesquisa efetuada em artigos científicos, identificou-se a iniciativa de alguns pesquisadores sobre o processo ensino/aprendizagem nos cursos de engenharia, além de ferramentas atualmente utilizadas para este fim.

Determinou-se como foco a corrente de pesquisa orientada para despertar de interesse dos alunos, definindo-se como tema o desenvolvimento de um modelo de rede de distribuição como ferramenta para o ensino de mecânica dos fluidos.

Com auxílio de profissionais da área de *softwares*, foram identificados os *softwares* citados nos artigos científicos pesquisados, analisando as vantagens e desvantagens de cada um no processo de desenvolvimento do modelo pretendido.

Tomando como base os conteúdos de “Mecânica dos Fluidos” ministrados pelo professor J. Gabriel F. Simões , no curso de engenharia na Universidade Santa Cecília, foram identificados aqueles utilizados como parâmetros relacionados ao funcionamento de uma rede de distribuição de água (SIMÕES, 2008).

Utilizando os dados de uma rede de distribuição de água existente em um bairro do litoral paulista, criou-se um modelo para simulação de funcionamento da rede.

Considerando uma situação específica ocorrida num período de funcionamento desta rede, foram simuladas duas alternativas de funcionamento, e analisados os resultados obtidos nestas duas simulações envolvendo os parâmetros de pressão mínima crítica.

Por fim, apresentou-se uma análise do uso do modelo, considerando as questões didáticas envolvidas no processo ensino/aprendizagem.

1.5 Importância do Projeto

A relevância do tema pode ser resumida em :

(a) Mostrar aos alunos a utilização de uma ferramenta que, utilizando os conceitos teóricos, possa ser utilizada para solucionar problemas enfrentados diariamente pelos operadores de uma rede de distribuição de água, com intuito de despertar neles o interesse, tanto pelo funcionamento da rede, quanto pela teoria envolvida neste processo.

(b) Oferecer aos professores oportunidades de melhoria de métodos de ensino através da utilização de simuladores semelhantes.

1.6 Limitações do Projeto

O desenvolvimento ocorreu focado apenas a um pequeno trecho da rede de distribuição de um bairro operando num determinado momento, evidente que este fator limita sua aplicação apenas a estes parâmetros.

Tendo em vista as dificuldades enfrentadas devido à falta de dados cadastrais da rede, bem como dos recursos despendidos para correção dos dados existentes, não foi possível avançar no estudo de outras variáveis além daquelas que influenciam diretamente nos resultados de pressões críticas.

O fator experimental do aplicativo Project Dalton impediu sua utilização em situações para as quais ainda não foi desenvolvida solução, como foi o caso de utilização de bombas para o incremento de energia no fluxo.

1.7 Estrutura da Dissertação

O capítulo 2 analisa os *softwares* indicados por profissionais de informática ou citados em artigos científicos relacionados com o tema, culminando com a escolha do *software* a ser utilizado no projeto, bem como os hardwares necessários.

No capítulo 3 são abordados os tópicos de Mecânica dos Fluidos envolvidos no processo de operação de uma rede de distribuição de água, descrevendo seus conceitos teóricos.

Todo o processo de modelagem de um trecho de rede de distribuição de um município paulista, é descrito no capítulo 4, citando as dificuldades enfrentadas e as soluções adotadas, apresentando os resultados obtidos por simulação de duas situações distintas envolvendo os dados reais deste trecho de rede.

O capítulo 5 analisa brevemente o processo de ensino/aprendizagem e propõe a utilização do modelo como ferramenta para o ensino de Mecânica dos Fluidos.

Todo o procedimento utilizado para construção do modelo é resumido no capítulo 6, com breve discussão sobre suas dificuldades e possibilidades, sugerindo a ampliação do modelo para ser utilizado não apenas como ferramenta de ensino, mas também como auxílio na tomada de decisão no controle de perdas de um sistema de abastecimento.

2 FERRAMENTA MULTIMÍDIA

O aprendizado através de interação com ferramentas multimídia, requer envolvimento cognitivo (TAROUCO et al, 2009). Porém, a exploração de ferramentas complexas pode levar a uma carga cognitiva pesada, dificultando o aprendizado.

Neste sentido, buscou-se uma ferramenta que proporcione bom recurso visual, mas possua telas de interatividade de baixa complexidade, executando cálculos parametrizados.

2.1 *Softwares* Disponíveis

Embora fosse possível desenvolver um *software* especificamente para utilização no processo de ensino/aprendizagem, demandaria recursos de programação que não faziam parte do escopo deste trabalho, consequentemente, foi necessário identificar, analisar e escolher dentro das disponibilidades do mercado.

2.1.1 Identificação

Tomando como parâmetros citação em artigos relacionados ao tema e indicações de profissionais ligados à área, foram relacionados *softwares* disponíveis para elaboração do modelo pretendido.

EPANET – Desenvolvido pela EPA (U.S. *Environmental Protection Agency*), foi criado para gerar modelos de simulação de redes de distribuição de água, considerando parâmetros hidráulicos (vazão e pressão), além de parâmetros realtivos à qualidade da água, trabalhando com desenhos esquemáticos em plataforma 2D. (ROSSMAN, 2000).

MATLAB – Criado na Universidade do Novo México por Cleve Moler, consiste em um *software* destinado a fazer cálculos matriciais. Como o próprio nome sugere (*Matrix Laboratory*), fornece muitas maneiras de se escreverem matrizes de várias dimensões, efetuar operações matemáticas entre elas, além de representação gráfica das operações realizadas.

BLENDER – Desenvolvido pela *Blender Foundation*, tem como objetivos a modelagem, animação, texturização, composição, reinderização, edição de vídeo e

criação de aplicações interativas em 3D. Possuindo poderosas ferramentas de simulação, modelagem e animação. (JAMES, 2006).

SOLIDWORKS – É um *software* de *CAD* (*Computer Aided Design*), criado pela *Solidworks Corporation*. Baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. A criação de um sólido ou superfície começa com a definição de topologia de um esboço, definindo a conectividade e certos relacionamentos geométricos entre vértices e curvas, no esboço e no exterior dele. Possui um aplicativo para análise estrutural em simulação de movimento de fluidos denominado *Floworks*. (DASSAULT, 2010).

WATERCAD – *Software* comercial de propriedade de *Bentley Systems*, desenvolvido para análise, modelagem e gerenciamento de redes pressurizadas. Produz soluções para projeto, construção e operação de diversos tipos de instalações hidráulicas. Permite a simulação hidráulica através de modelo computacional constituído de elementos lineares (trechos de tubulação), elementos pontuais (nós de consumo, tanques, reservatórios) e elementos mistos (válvulas), com desenhos em plataforma 2D.

EFDLAB – Desenvolvido pela *Nika Fuid Solucions*, com finalidade de análise estrutural de peças usando simulação da movimentação de fluidos em equipamentos hidráulicos, utiliza plataforma *CAD* (*Computer Aided Desing*).

INVENTOR - *Software* de *CAD* (*Computer Aided Desing*), criado pela *Autodesk* Inc, baseando-se em computação paramétrica, cria formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. A criação de um sólido ou superfície começa com a definição de topologia de um esboço, definindo a conectividade e certos relacionamentos geométricos entre vértices e curvas, no esboço e no exterior dele. Possui um aplicativo para análise estrutural utilizando simulação de movimento de fluídos denominado *CFD Simflow*. (SOLIDCAM, 2012).

HYSYS – *Software* comercial de propriedade da *Aspentech*, desenvolvido para simulação de processos de indústrias produtoras de óleo e gás, trabalhando com desenhos esquemáticos da tubulação em plataforma 2D. (ASPEN, 2015).

FLUENTE – Foi desenvolvido pela *Ansys Inc*, com finalidade de analisar estruturalmente componentes de equipamentos hidráulicos através de simulação de movimentação de fluidos, utilizando plataforma *CAD* (*Computer Aided Desing)*.(ANSYS,2013).

AUTOCAD PLANT 3D – *Software* de *CAD* (*Computer Aided Desing*), com plataforma BIM (*Building Information Modeling*), foi criado pela *Autodesk* com a finalidade de modelar plantas diversas, contendo parâmetros estáticos específicos para tubulações. Utilizando uma ferramenta ainda em desenvolvimento pela *Autodesk*, denominada *Project Dalton*, possibilita a simulação do funcionamento hidráulico das tubulações parametrizadas. (AUTODESK, 2015).

2.1.2 Análise das características

EPANET – *Software* de domínio público é utilizado como plataforma para outros diversos tipos de *softwares* comerciais destinados a cálculos hidráulicos. Embora possua boas ferramentas para análises, seus recursos visuais são muito limitados.

MATLAB – Indicado para cálculos que envolvem muitas variáveis, é um *software* poderoso para esta finalidade, apresentando bons recursos visuais, mas exigindo conhecimentos de programação na elaboração do modelo pretendido.

BLENDER – Excepcionalmente poderoso no tratamento visual, não apresenta ferramentas para parametrização e cálculos.

SOLIDWORKS – Possuindo bons recursos visuais, apresenta recursos de parametrização e cálculos suficientes para análises de movimentação de fluidos em equipamentos hidráulicos, mas devido aos parâmetros considerados, para grandes extensões de redes exige capacidade de processamento elevada.

WATERCAD – Desenvolvido para análise de redes de distribuição, possui as ferramentas necessárias para cálculo e análise dos parâmetros hidráulicos, mas poucos recursos visuais. (BENTLEY, 2005).

EFDLAB – Eficiente em cálculos hidráulicos para pequenos sistemas, com recursos visuais relativamente bons, em grandes extensões exige elevada capacidade de processamento.

INVENTOR – Bastante eficiente de parâmetros hidráulicos em movimentação de fluidos em equipamentos hidráulicos, apresentando bons recursos visuais, mas exige capacidade de processamento elevada quando utilizado em análise de redes de distribuição.

HYSYS – Possuindo bons recursos visuais, apresenta recursos de parametrização e cálculos suficientes para análises de movimentação de fluidos em

equipamentos hidráulicos, mas para grandes extensões de redes exige capacidade de processamento elevada.

FLUENTE – Apresenta bons resultados em cálculos hidráulicos para pequenos sistemas, com recursos visuais relativamente bons, em grandes extensões exige elevada capacidade de processamento.

AUTO CAD PLANT 3D – Com bons recursos visuais e parametrização dos dados inseridos no desenho, com o acréscimo do *Project Dalton*, apresenta ferramentas de cálculos específicos para análise de funcionamento de redes hidráulicas.

2.2 Parâmetros para Modelagem

Tratando-se de uma modelagem destinada a auxiliar o ensino de alguns tópicos de mecânica dos fluídos, há necessidade de apresentação de bons recursos visuais.

Além disto, é preciso que os resultados apresentados na simulação possam ser comparados aos verificados em campo, para que o aluno entenda a aplicação prática do conhecimento adquirido.

Por fim, como a finalidade principal é motivar o aluno, procura-se um *software* que apresente desafios futuros de desenvolvimento.

2.3 Escolha

Analisando as características de cada *software* e os parâmetros para modelagem conforme apresentado, conclui-se que os *softwares EPANET*, *BLENDER* e *WATERCAD*, não satisfazem as condições necessárias, enquanto *SOLIDWORKS*, *EFDLAB*, *INVENTOR*, *HYSYS*, FLUENTE, *MATLAB* e *AUTOCAD PLANT 3D* associado ao *Project Dalton*, satisfazem estas condições.

Em consulta ao site da *Autodesk*, foi constatado que a empresa concede gratuitamente licença para utilização do *software* AUTOCAD PLANT 3D, juntamente com o *Project Dalton*, a estudantes e professores que façam o cadastro.

O *Project Dalton* é um *software* ainda em fase de desenvolvimento, vislumbrando grandes avanços tecnológicos nesta área, o que vem de encontro ao caráter acadêmico e de pesquisa, objeto deste trabalho.

Diante destes fatores, escolheu-se o *software AUTOCAD PLANT 3D* em conjunto com o *software* experimental *Project Dalton*.

2.4 Características de Hardware Utilizados

Visando a elaboração do modelo e as simulações contempladas foi utilizado um *desktop* com processador Intel cor i7-2600, com 16*Gb* de memória *RAM* e placa de vídeo *NVIDIA GeForce* GTX480 com 2 *Gb* de memória.

Foi utilizando como aparelho auxiliar no desenvolvimento e relatórios um *notebook* com processador Intel cor i5-M480 cp, 4*Gb* de memória *RAM* com placa de vídeo *onboard* da Intel.

Ambos operaram com sistema operacional Windows 7 de 64 *bits*.

3 ABORDAGEM TEÓRICA

Faz-se necessário descrever e selecionar os conteúdos teóricos envolvidos no processo de gerenciamento de uma rede de distribuição de água, para que o aluno relacione a aplicação do modelo matemático aos fenômenos físicos que ocorrem diariamente neste sistema.

3.1 Tópicos de Mecânica dos Fluidos

Selecionou-se, com base no livro do professor J. Gabriel F. Simões alguns conceitos de mecânica dos fluidos, envolvendo definições e propriedades relacionadas às redes de distribuição de água (SIMÕES, 2008).

3.1.1 Definição de fluidos – propriedades

“Fluido é uma substância que deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento qualquer” (YONG, MUNSON, OKIISHI, 2005).

Esta é uma definição geral de fluido na qual está incluída a água, fluído transportado nas redes objeto deste estudo. Como particularidade, por ser um líquido, a água ainda possui outras características, como: admitir superfície livre, ser incompressível e indilatável.

Entre outras propriedades, define-se o peso específico como sendo o peso de um fluido dividido pelo volume que ele ocupa, este é um item que tem particular interesse quando se trata de cálculo da pressão em pontos do sistema.

3.1.2 Pressão

Controlar as pressões, máxima e mínima é tarefa diária na operação de redes de distribuição.

A pressão em um fluido pode ser definida como sendo o resultado da força normal à área da seção transversal considerada, dividida pela própria área desta seção.

Com estas definições, foram enunciadas algumas leis da estática dos fluidos:

Teorema de Stevin – “A diferença de pressões entre dois pontos de um fluido em repouso é produto do peso específico do fluido pela diferença de cotas entre os dois pontos considerados” (SIMÕES, BRUNETTI, 1972).

Lei de Pascal – “A pressão exercida em um ponto de fluido estático, ou em movimento uniforme ou em movimento acelerado sem atrito, é igual em todas as direções” (MORAES, SILVA, MORAES, 2011).

Sendo a água um fluido incompressível, a pressão será transmitida integralmente a todos os pontos da rede, quando esta estiver em repouso. Isto permite a confecção de aparelhos destinados a medir estas pressões.

Barômetro – Utilizado para medir a pressão atmosférica. Uma demonstração simples pode ser conseguida por um aparelho conhecido como barômetro de Torricelli (figura 1), constituído por um tubo comprido (1 metro) de vidro e uma cuba, também de vidro, que tenha contida nela mercúrio.

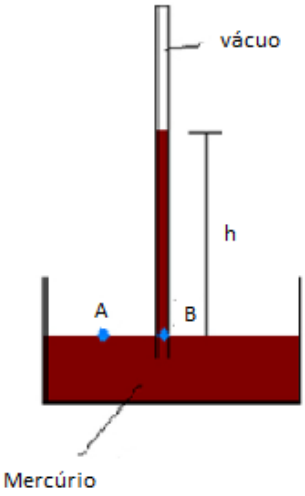


Figura 1. Corte esquemático de um Barômetro adaptada (MUNSON,YONG,OKIISHI,2008).

O tubo de vidro é totalmente cheio de mercúrio, sendo que a superfície aberta do tudo de vidro é bloqueada. A seguir, o tubo é invertido na cuba e o bloqueio é retirado. O nível do mercúrio desce até se estabilizar em uma altura h, acima da superfície do mercúrio na cuba. Na região do tubo, acima da coluna de mercúrio, tem-se a câmara barométrica, região de pressão muito baixa. De acordo com o teorema de Stevin, os pontos A e B, localizados no mesmo líquido e no mesmo plano horizontal, sofrem a mesma pressão. Stevin definiu que no ponto A a pressão

exercida corresponde à pressão atmosférica, enquanto que no ponto B é a pressão da coluna de mercúrio de altura h que atua.

Piezômetro – Equipamento bastante simples constituído de um tubo aberto e graduado, instalado onde se pretende conhecer a pressão de um líquido (Figura 2). Embora preciso, possui limitações como: a pressão a ser medida deve ser maior que a pressão atmosférica e relativamente baixa para provocar pequenas alturas no líquido, o diâmetro do tubo deve ser maior que 1 cm, para evitar-se os efeitos da capilaridade.

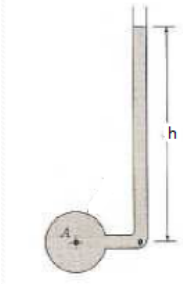


Figura 2. Corte esquempatico de um Piezômetro adaptada (MUNSON,YONG,OKIISHI,2008).

Manômetro com tubo em U - São utilizados na medição de pressões relativamente baixas, através do balanço/equilíbrio de pressão em uma coluna de um líquido, denominado líquido manométrico (Figura 3).

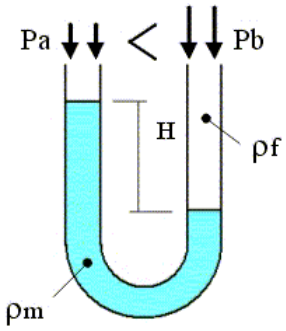


Figura 3. Corte esquemático de um Manômetro em "U".

A diferença de pressão entre Pa A e Pb, é dada pela multiplicação da diferença de cota dos pontos pelo peso específico do líquido manométrico utilizado.

Manômetro Metálico (Tipo Bourdon) – O funcionamento deste tipo de manômetro é baseado na alteração da curvatura originada num tubo de secção elíptica, pela pressão exercida no seu interior. A secção elíptica tende para uma secção circular com o aumento da pressão no interior do tubo, levando a que o tubo se desenrole. Este tubo tem a uma das extremidades fechadas e ligadas a um mecanismo (com rodas dentadas e mecanismos de alavanca) que permite transformar o seu movimento de "desenrolar" (originado pelo aumento de pressão no interior do tubo) no movimento do ponteiro do manômetro. A medida da pressão é relativa, uma vez que o interior do tubo está sujeito à pressão atmosférica, conforme figura 4.

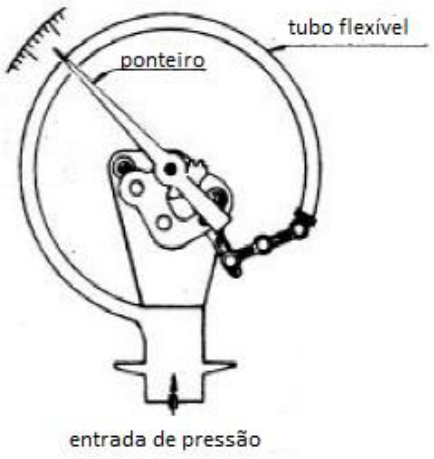


Figura 4. Representação esquemática de um Manômetro metálico – adaptada (MUNSON,YONG,OKIISHI,2008).

3.1.3 Equação da continuidade

Tão importante quanto o controle de pressão, o controle da vazão em uma rede precisa ser monitorado e gerenciado constantemente.

Tratando-se de escoamento permanente de fluidos, caso específico das redes de distribuição, caracterizado quando se fixa um ponto num sistema de referência, e neste ponto, com o decorrer do tempo, não mudam as propriedades, a vazão (Q) é o volume de fluido que atravessa uma seção de escoamento (A) numa unidade de tempo considerada. A velocidade média é uma velocidade fictícia (V) constante na seção que, multiplicada pela área, resulta na vazão do líquido. (Equação 1).

$$Q = V.A \qquad (1)$$

Considerando o escoamento de um fluido, num intervalo de tempo t, a massa de fluido que atravessa a seção (1) é a mesma que atravessa a seção (2), conforme apresentado na figura 5.

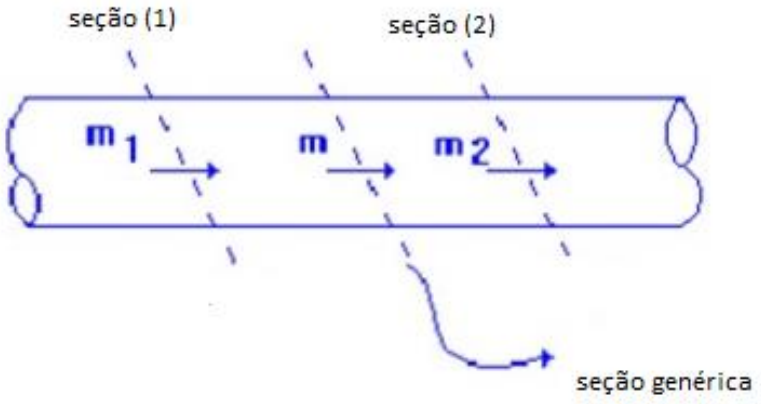


Figura 5. Representação esquemática do fluxo em uma seção constante.

$$m_1 = m_2 = m$$

Considerando a massa por unidade de tempo, em regime permanente, tem-se a vazão em massa no ponto 1 igual à vazão em massa no ponto 2 conforme equação 2

$$Q_{m1} = Q_{m2} = Q_m = \text{constante} \quad (2)$$

(equação da continuidade) (WHITE,2011).

Para o caso em estudo, redes de distribuição de água, o fluido é um líquido, incompressível, e em movimento permanente, portanto, a vazão de fluido que atravessa qualquer seção do escoamento é constante, conforme figura 6.

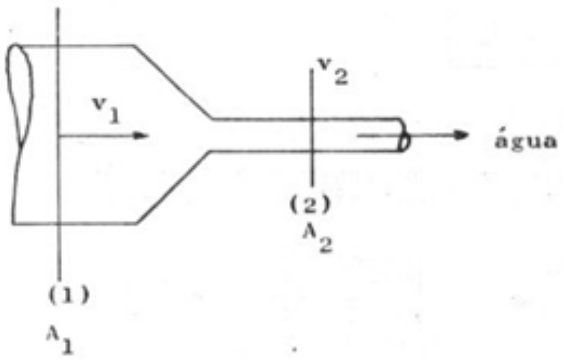


Figura 6. Representação esquemática do fluxo em uma seção variável.

Associando-se as equações 1 e 2, chega-se a equação 3

$$V_1 . A_1 = V_2 . A_2 \quad (3)$$

Vê-se na figura 6 que: aumentando o diâmetro da tubulação, mantendo a vazão constante neste trecho, a velocidade de escoamento do fluido diminuirá. Por outro lado, mantendo-se o diâmetro constante, só haverá aumento de vazão se houver aumento de velocidade.

3.1.4 Equação de Bernoulli

Num sistema de escoamento de um fluido perfeito, incompressível e em regime permanente, tendo-se definidos: Z (cota altimétrica entre um plano horizontal de referência e um ponto do sistema considerado), P (pressão estática do fluido neste ponto), V (velocidade de escoamento do fluido), γ (peso específico do fluido), e g (aceleração da gravidade).

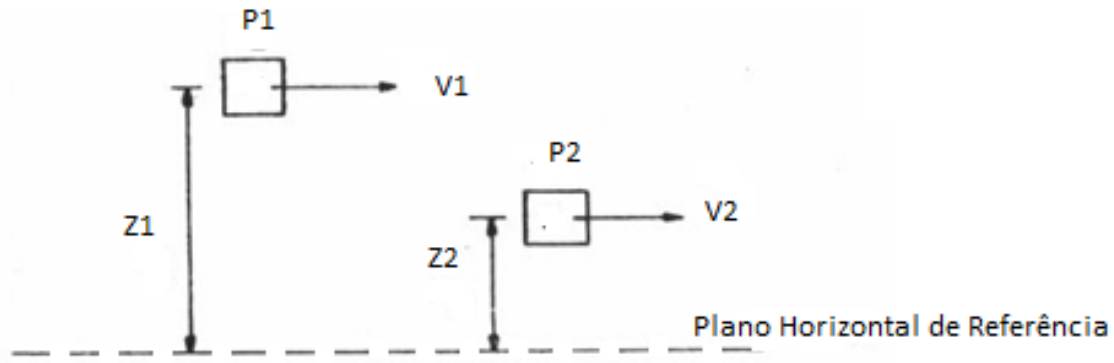


Figura 7. Representação esquemática de pontos em posições distintas.

Conclui-se que a energia hidráulica no ponto 1 (H_1) é igual à energia hidráulica no ponto 2 (H_2), conforme equação 4

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (4)$$

(Equação de Bernoulli), (POTTER,WIGGERT,2004).

Em alguns casos, faz-se necessário acréscimo de energia hidráulica ao sistema para que as condições mínimas de pressão e vazão sejam atendidas. Isto é realizado através de conjuntos de bombas hidráulicas. Figura 8

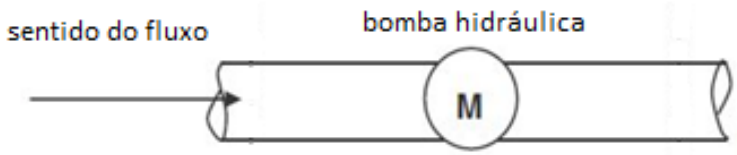


Figura 8. Representação esquemática de máquina inserida no escoamento.

Para estes casos, a equação de Bernoulli é representada pela equação 5:

$$H_1 + H_m = H_2 \quad (5)$$

Sendo H_m a energia requerida da máquina (bomba) pelo sistema, H_1 a energia hidráulica no ponto 1 e H_2 a energia hidráulica no ponto 2.

Nem toda a energia produzida pela máquina é transferida ao fluido. A quantidade transferida depende da configuração do equipamento e das condições da instalação.

Define-se, então, que a energia fornecida pela bomba ao fluido (H_m), é o resultado da potência útil da bomba (N), dividido pelo produto do peso específico do fluido (γ) pela vazão do sistema (Q).

A potência útil da bomba (N) é obtida multiplicando-se a potência nominal da bomba (N_B) pelo seu coeficiente de rendimento (η).

A figura 9 apresenta uma situação genérica de um sistema de distribuição de água, onde o escoamento de água é representado pela equação 6:

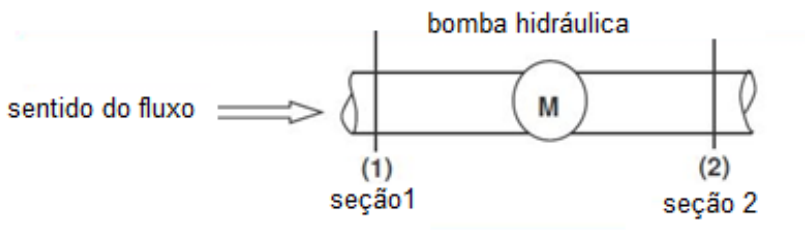


Figura 9. Representação esquemática de escoamento com bomba.

$$H_1 + H_m = H_2 + H_{P1,2} \quad (6)$$

Em que $H_{P1,2}$ representa as perdas de energia no trajeto entre a seção 1 e a seção 2.

3.1.5 Aplicações da equação de Bernoulli

Alguns aparelhos de medição podem ser elaborados com a aplicação da equação de Bernoulli.

a) Tubo Venturi : Aparelho medidor de vazão.

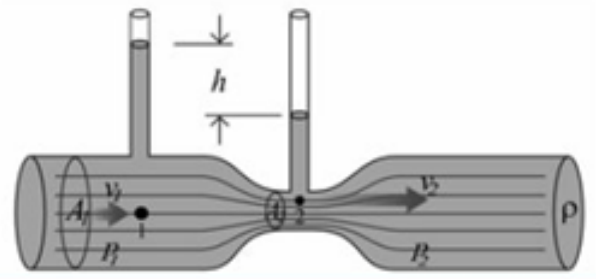


Figura 10. Representação esquemática de um Venturímetro.

Aplicando a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 resulta na equação 7

$$H_1 = H_2 + H_{P1,2} \quad (7)$$

As perdas devido ao movimento dos fluidos entre os pontos 1 e 2 são desprezíveis, obtendo-se a equação 8

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (8)$$

Como os pontos 1 e 2 estão na mesma cota, $Z_1=Z_2$ chega-se à equação 9

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (9)$$

Aplicando a equação da continuidade neste trecho ($Q_1 = Q_2$) obtém-se a equação 10

$$V_2 = V_1 . \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (10)$$

Fazendo a substituição da equação (10) na equação (9), chega-se à equação 11

$$V_1^2 \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] = 2g \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (11)$$

A equação 12, é obtida rearranjando-se a equação 11

$$V_1 = \sqrt{\frac{2g\frac{P_1 - P_2}{\gamma}}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}} \quad (12)$$

Como h = (P_1 – P_2) / γ tem-se a equação 13

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}} \quad (13)$$

Adotando K conforme a equação 14 , da equação 13 chega-se à equação 15

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}} \quad (14)$$

Pode-se calcular a vazão no tubo através da expressão:

$$Q = K \cdot A_1 \cdot \sqrt{2.g.h} \quad (15)$$

b) Tubo de Pitot: Aparelho medidor de velocidade (Figura 11).

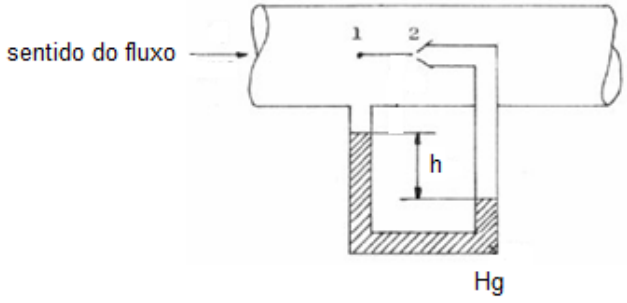


Figura 11. Representação esquemática de um tubo Pitot.

Aplicando a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 obtém-se a equação 16:

$$H_1 = H_2 + H_{P1,2} \quad (16)$$

As perdas devido ao movimento dos fluidos entre os pontos 1 e 2 são desprezíveis, ficando, então conforme a equação 17

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (17)$$

Como os pontos 1 e 2 estão na mesma cota, e V_2=0 velocidade de estagnação, rearranjando a equação 17 , chega-se à equação 18

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \quad (18)$$

Conforme a figura 11, h = (P_1 – P_2) / γ, obtém-se o valor de V_1 através da equação 19

$$V_1 = \sqrt{2.g.h} \quad (19)$$

3.1.6 Análise Dimensional

Dentro do gerenciamento de redes de distribuição de água, o número de Reynolds tem papel fundamental. Como é um número adimensional, para entendê-lo é preciso analisar seus componentes, assim definidos:

Grandezas Fundamentais – Tudo que pode ser medido e definido por si só, representado por um número e uma unidade.

Grandezas Derivadas – Tudo que pode ser medido e representado por um número e uma unidade, derivados de grandezas fundamentais.

Equação Dimensional – Expressão que relaciona as grandezas derivadas com produtos de grandezas fundamentais. Exemplo: $[X] = F^{\alpha}L^{\beta}T^{\gamma}$

Número Adimensional – Toda variável cuja equação adimensional apresenta as grandezas fundamentais com expoente nulo. Exemplo: $[\pi] = F^0L^0T^0$.

Número de Reynolds (Re) – Definido como sendo o produto entre a massa específica do fluido (ρ), sua velocidade média (v) e o diâmetro da tubulação (D),

divididos pela viscosidade dinâmica do fluido (μ). Conforme sequência da equação 20

$$[Re] = \frac{[\rho][V][L]}{\mu} = \frac{FL^{-4}T^{2}.LT^{-1}.L}{FL^{-2}\,T} \rightarrow [Re] = F^{\circ}L^{\circ}\,T^{\circ} \qquad (20)$$

O conhecimento do número de Reynolds permite definir o tipo de escoamento do sistema em estudo (LOPES,2010). Para Re menor que 2000, o escoamento é laminar, as partículas do fluido movem-se ao longo de trajetórias definidas, apresentando lâminas ou camadas preservando suas características. Para Re maior que 4000, o escoamento encontra-se em regime turbulento, as partículas do fluido descrevem trajetórias irregulares, com movimentos aleatórios, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida.

3.1.7 Aplicação às instalações hidráulicas

Considerando que conduto é toda estrutura sólida destinada ao transporte de um fluido, escoamento forçado ocorre quando toda a face interna do conduto está em contato com o fluido em movimento. Em redes de distribuição de água potável, toda a movimentação de fluido ocorre por dutos forçados.

A movimentação do fluido ao longo da tubulação de uma rede de distribuição, esquematizado conforme figura 12, provoca perdas de energia (MASSEY,2002).

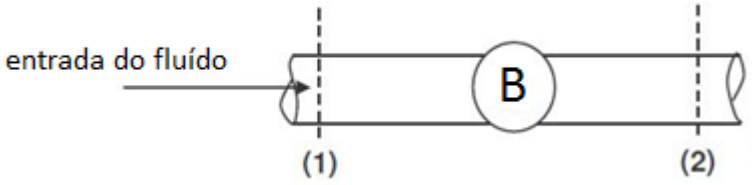


Figura 12. Representação esquemática de escoamento genérico.

Estas perdas classificadas como distribuída e singular, são definidas como:

DISTRIBUÍDA (h_f) – Perda de carga que ocorre em trechos retos de condutos devido ao atrito viscoso entre as partículas de fluido produzido pela tensão de cisalhamento.

SINGULAR (h_s) – Perda de carga que ocorre devido à mudança brusca no escoamento do fluido.

Conclui-se então que, para um escoamento forçado em um trecho compreendido entre as seções genéricas (1) e (2), conforme figura 12, a perda de carga total ($H_{p1,2}$) é dada pela equação 21

$$H_{p_{1.2}} = \sum_1^2 h_f + \sum_1^2 h_s \quad (21)$$

Sendo: h_f a perda de carga em um trecho reto de tubulação e h_s a perda singular em cada elemento conectado à tubulação, resulta a equação 22

$$H_1 + H_m = H_2 + H_{p1,2} \quad (22)$$

A determinação das perdas de carga, de um fluido incompressível, num trecho reto pode ser feita utilizando-se a fórmula universal desenvolvida por Darcy-Weisbach, equação 23

$$h_f = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} \quad (23)$$

(f) – Coeficiente de perda de carga distribuída ou coeficiente de atrito

(D_H) – Duas vezes o raio hidráulico (resultado da divisão da área da seção de escoamento pelo perímetro molhado da seção)

(L) – Distância entre os pontos: inicial e final do trecho considerado

(V) – Velocidade média do fluido – para escoamento laminar $V=V_{máx}/2$ – para escoamento turbulento $V = 49\ V_{máx} / 60$.

(g) – Aceleração da gravidade

O coeficiente de atrito (f) é função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade do material.

Para as perdas singulares, pode-se utilizar a fórmula universal para perda singular, equação 24

$$h_s = \mathrm{Ks} \frac{V^2}{2g} \quad (24)$$

Em que K_s é um coeficiente que depende do formato e diâmetro da peça considerada.

3.2 Modelo em Estudo

Para levar o aluno a identificar a aplicação dos conceitos de mecânica dos fluidos descritos no item 3.1, utilizados constantemente no gerenciamento diário de uma rede de distribuição de água, utilizaram-se dados reais para que fosse possível compará-los aos encontrados pelo modelo.

Com a modelagem da rede atendendo aos detalhes das ligações prediais, respeitando-se o relevo da região e o posicionamento geográfico destas ligações, é possível demonstrar teoricamente os resultados obtidos em pontos de saída da rede, a partir dos dados evidenciados na entrada.

Constantemente os operadores de uma rede de distribuição precisam checar e retificar dados de pressão e vazão para atender aos parâmetros estabelecidos pela agência reguladora do sistema.

3.2.1 Solução de redes hidráulicas pelo método dos nós

O cálculo de verificação de uma rede hidráulica supõe o conhecimento dos dados de geometria de rede, das vazões concentradas nos nós comuns, das cargas nos nós piezométricos, dos elementos característicos dos condutos (diâmetros, comprimentos, rugosidades), da massa especifica e da viscosidade cinemática do liquido, dos coeficientes de perda de carga singular das singularidades eventualmente existentes em cada tramo (trecho entre nós) e das constantes A, B e C das bombas. Como resultados, têm-se as cargas piezométricas nos nós comuns às vazões concentradas nos nós piezométricos, as vazões nos condutos e as cargas manométricas das bombas.

Levando em consideração o escoamento turbulento permanente de um fluido newtoniano, entre dois nós consecutivos da rede, compreendendo condutos e eventualmente equipamentos que insiram energia no fluxo, é aplicável a Equação de Bernoulli.

Aplicando a Equação da Continuidade para cada nó isoladamente, chega-se a um sistema de equações que depende do número de nós do sistema.

Como os sistemas de equações, que regem as redes hidráulicas, são não-lineares, o primeiro passo é tornar as equações envolvidas lineares.

Adotando uma distribuição de cargas piezométricas H_i, nos nós comuns, tem-se a equação 25

$$\Delta qi = \Sigma Q^{\circ}_{i,j} + Q_1 \neq 0 \quad \text{(lei dos nós)} \tag{25}$$

Em que os $Q^{\circ}_{j,i}$ são as vazões correspondentes à distribuição adotada das cargas piezométricas.

Utilizando-se o método proposto por Hardy Cross, faz-se necessário introduzir variações elementares ΔH_i de cargas piezométricas nos nós da rede, passando a carga em cada nó i de H_i para $H_i + \Delta H_i$ e consequentemente, passando a vazão em cada tramo de $Q_{i,j}$ para $Q'_{i,j} = Q^{\circ}_{i,j} + \Delta Q_{i,j}$, com a nova distribuição das vazões, tem-se as equações 26 e 27

$$\sum_j Q'_{i,j+} \; Q_{i=} \sum_j Q^{\circ}_{i,j+} \sum_j \Delta Q_{i,j+} \; Q_{i=} \sum_j \Delta Q_{i,j+} \Delta q_{i=} 0 \tag{26}$$

Sendo $$\Delta Q_{i,j} = \frac{\Delta H_{i-} \Delta H_j}{\left[\frac{dh}{dQ} - \frac{1}{n_b} \frac{dh_b}{dQ_b}\right]}$$

Portanto:

$$\sum_j \frac{\Delta H_{i-} \Delta H_j}{\left[\frac{dh}{dQ} - \frac{1}{n_b} \frac{dh_b}{dQ_b}\right]} + \Delta q_{i=0}$$

Ou seja,

$$\left[\sum_j \left(\frac{dH}{dQ} - \frac{1}{n_b} \frac{dH_b}{dQ_b}\right)^{1}_{i,}\right] \Delta H_i - \sum_j \left(\frac{dH}{dQ} - \frac{1}{n_b} \frac{dH_b}{dQ_b}\right)^{-1}_{i,j} \Delta H_j + \Delta q_i = 0 \tag{27}$$

Que é a lei nos nós na forma de um sistema linear. Este sistema pode ser resolvido por um método de aproximações sucessivas, adotando-se uma distribuição inicial dos H, com o que se obtêm as vazões Q, a derivada $\mathrm{dH_b/dQ}$ e os Δq. Na

prática, resultados satisfatórios têm sido alcançados com uma distribuição inicial das cargas piezométricas definidas por $H_i = z_i$ (cotas dos nós) juntamente com a velocidade média da ordem de 1m/s nos tramos, respeitando o sinal da vazão em cada nó.

Inicia-se um processo iterativo tal que, em cada iteração, tem-se uma nova distribuição dos ΔH e, portanto dos H, dos h, dos Q, das derivadas dH_b/dQ_b e dos Δq, concluindo-se o processo quando todos os resíduos em todos os nós forem tais que $|\Delta q| < \varepsilon$, em que ε é o erro admissível, previamente fixado (ASSY, 2012).

Nas redes de grande porte, o número de incógnitas torna-se elevado necessitando a utilização de *softwares* para sua solução.

4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA REDE

Um modelo para simulação de funcionamento hidráulico de uma rede hipotética pode ser criado em vários *softwares*, mostrando a aplicação dos conteúdos teóricos. Porém, continua sendo um conjunto de operações matemáticas gerando imagens correspondentes.

Para que o aluno relacione o modelo matemático ao fenômeno físico, buscou-se um modelo criado a partir de uma rede real em funcionamento.

4.1 Objeto Modelado

A rede utilizada na modelagem está em operação desde 1980, tendo passado por ampliações nos anos de 1995 e 2013, abastecendo atualmente a 1113 ligações em unidades residenciais e comerciais, como mostra a figura 13.

Figura 13. Vista Aérea do bairro objeto de estudo.
Fonte – Google Earth.

Localizada em região litorânea, apresenta picos sazonais de consumo durante o verão, férias e feriados prolongados, dificultando ainda mais o estabelecimento de um modelo eficiente.

Possuindo 26,45 Km de rede, sendo 164m tubulação com diâmetro de 200mm, 1.030m de diâmetro 150mm, 2.177m de diâmetro 100mm, 1.240m de diâmetro 75mm e o restante de diâmetro 50mm. É constituída por tubos de PVC, com alguns trechos em ferro fundido. Como pode ser observado na figura 14.

Realizou a distribuição de 31.000m^3 em janeiro de 2015, alta temporada, e 16.000m^3 em junho de 2014, baixa temporada. Operando com IPM mensal (Índice de Perdas Médio Mensal) na casa de 50%, muito superior à média do município que é de 30%.

Figura 14. Traçado da rede.
Fonte – Cadastro 2015 – propriedade da empresa operadora do sistema de abastecimento.

Para atender à necessidade de pressão mínima em dois pontos extremos da rede, foi instalada em 2005 uma estação pressurizadora constituída por dois conjuntos moto-bomba com as seguintes características: bomba centrífuga horizontal com diâmetro de sucção 100mm e diâmetro de descarga vertical 65mm acoplada a motor elétrico no sistema monobloco (7,5CV-3.500rpm-220/380V) com dados de operação projetados de 7,2m^3/h e altura manométrica 53 m.c.a.

Conforme mostra a figura 15, a estação pressurizadora foi instalada no início do trecho de cotas ascendentes.

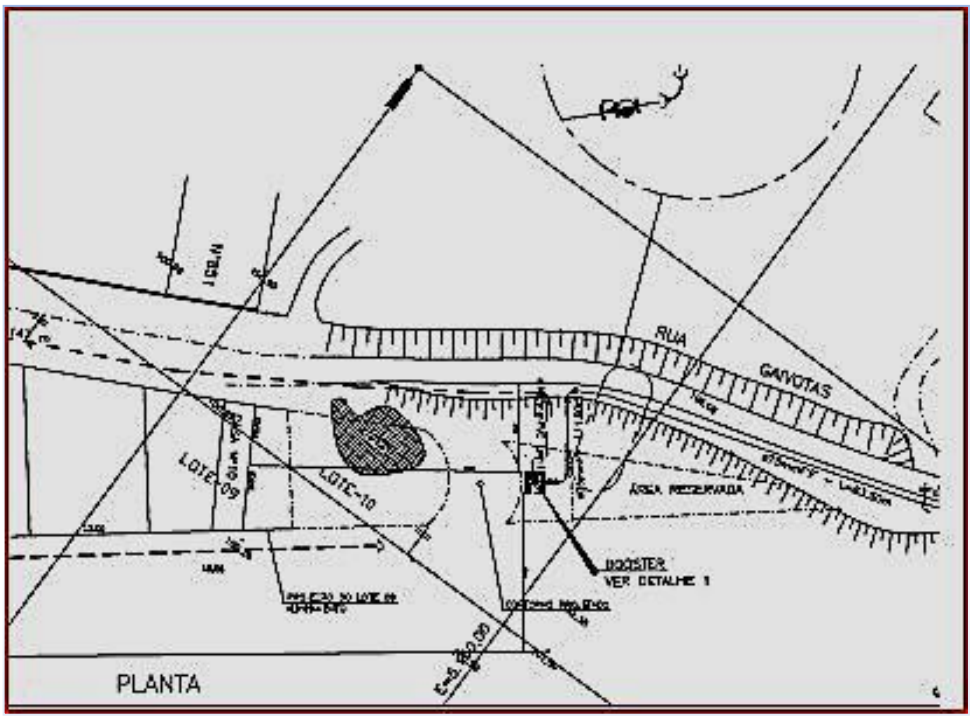


Figura 15. Locação da Estação Pressurizadora (“Booster”).
Fonte – Cadastro 2015 – propriedade da empresa operadora do sistema de abastecimento.

A Figura 16 mostra os detalhes da estação pressurizadora com uma bomba operacional e uma bomba reserva.

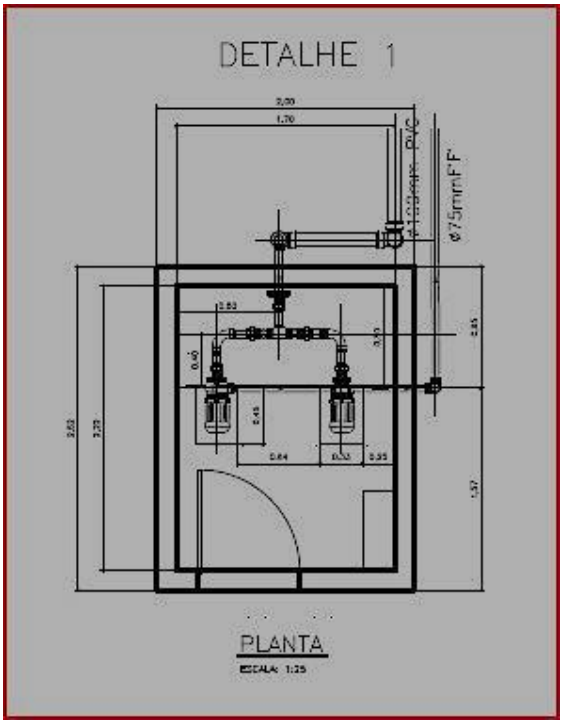


Figura 16. Projeto da Estação Pressurizadora (“Booster”).
Fonte – Cadastro 2015 – propriedade da empresa operadora do sistema de abastecimento.

4.2 Procedimentos de Modelagem

Modelos computacionais de sistemas de distribuição de água podem ser utilizados para resolver problemas em cenários de difícil operação (NEVES, 2007). Estes cenários tornam-se ainda mais complexos quando o objeto é uma rede antiga.

No caso em estudo, para solucionar os problemas de ordem hidráulica através de modelos computacionais, foi preciso, primeiro, solucionar os de cadastro da própria rede.

4.2.1 Dados de cadastro da rede

Iniciou-se a obtenção de dados pelo cadastro da rede em operação. Foram apresentadas várias plantas em Auto*CAD*, referentes à mesma rede, com informações incompletas e conflitantes. Não sendo possível utilizar estas informações diretamente, optou-se pela consulta ao pessoal envolvido em sua operação para confecção de um cadastro com maior credibilidade possível. Após reuniões com as equipes de campo, conseguiu-se um consenso sobre o traçado único da rede tomando-se como base, os arquivos existentes, e a memória dos trabalhadores que operam o sistema diariamente. Este traçado não apresentava cotas altimétricas.

Como a obtenção das cotas reais da rede demandaria um processo oneroso de sondagens e levantamentos topográficos de campo, foi necessário adotar um procedimento que possibilitasse obter valores altimétricos representativos. Através do site do projeto *Topodata*, que disponibiliza imagens de levantamentos feitos por satélite com informações sobre a altimetria do relevo brasileiro, e do *software AutoCAD* Civil 3D para a interpretação das imagens, foi possível gerar um modelo tridimensional do relevo da cidade.

Objetivando conciliar o cadastro, que estava sem referências de coordenadas, com a topografia, utilizou-se a ferramenta “*live maps*”, que utiliza as fotos aéreas da base de dados da *Bing* para mostrar imagens de satélite no ambiente de trabalho, disponibilizada pela *Autodesk* no *software AutoCAD* Civil 3D.

Admitindo-se uma profundidade de 1m para toda sua extensão, e utilizando-se as cotas do relevo como referência e, ainda, cruzando-se as informações de planimetria e altimetria, chegou-se às cotas representativas da rede de distribuição

em questão. Tendo o cadastro da rede definido em arquivo *CAD*, iniciou-se a transferência das informações deste cadastro para arquivo parametrizado do *PLANT* 3D através do comando de importação dos dados.

As dificuldades verificadas no processo de modelagem da rede em epígrafe são quase que na totalidade, decorrentes de erros de cadastro ou sua inexistência. Este é um dos entraves para utilização das ferramentas de simulação hidráulica (BARCALA,GARCIA,BARCALA,2015).

4.2.2 A rede no Plant3D

O *PLANT 3D* trabalha com arquivos *BIM* (*Building Information Modeling*), isto permite que às linhas de desenho do arquivo *CAD* sejam atribuídas características de material, transformando-as em peças sólidas. Nesta fase, as deficiências ou erros de desenho do cadastro dificultaram significativamente o processo.

Um primeiro exemplo característico destas distorções aparece no ponto específico do cadastro em que tubulações de diferentes diâmetros apareciam num cruzamento, impossível de ocorrer na prática (Figura 17).

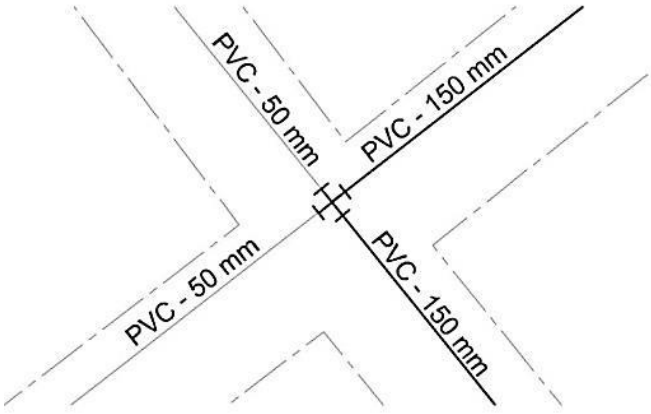


Figura 17. Cruzamento de tubulações conforme registrado no cadastro.
Fonte – Cadastro 2015 – propriedade da empresa operadora do sistema de abastecimento.

Esta distorção é “interpretada” de forma equivocada pelo *software*, na conversão de dados cadastrais para dados parametrizados, comprometendo a base de dados que seria utilizada na simulação (Figura 18).

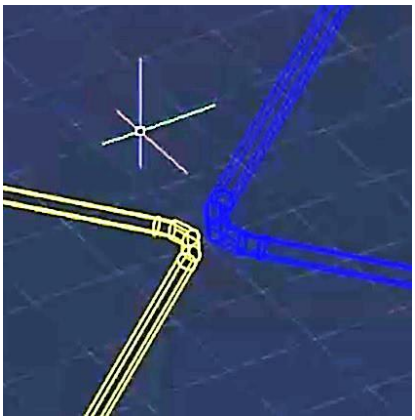


Figura 18. Interpretação feita pelo *software*, na conversão dos dados do cadastro para os dados parametrizados.

No primeiro exemplo, não havia no cadastro as reduções necessárias para que fosse possível a ligação desenhada. Porém, durante a verificação constatou-se que os diâmetros nas quatro pontas do nó eram iguais, não sendo necessário acrescentar as reduções e sim corrigir o diâmetro da tubulação.

Num segundo caso, no cadastro da rede havia uma distância muito pequena no encontro das linhas que representava um dos tubos, fazendo com que o *software* interpretasse como desconectado e consequentemente adotasse um cotovelo para conexão do outro tubo. As dimensões dos diâmetros da tubulação são muito pequenas em comparação com a extensão da rede, portanto, as distorções só são perceptíveis quando se aproxima a imagem dos nós (Figuras 19 e 20).

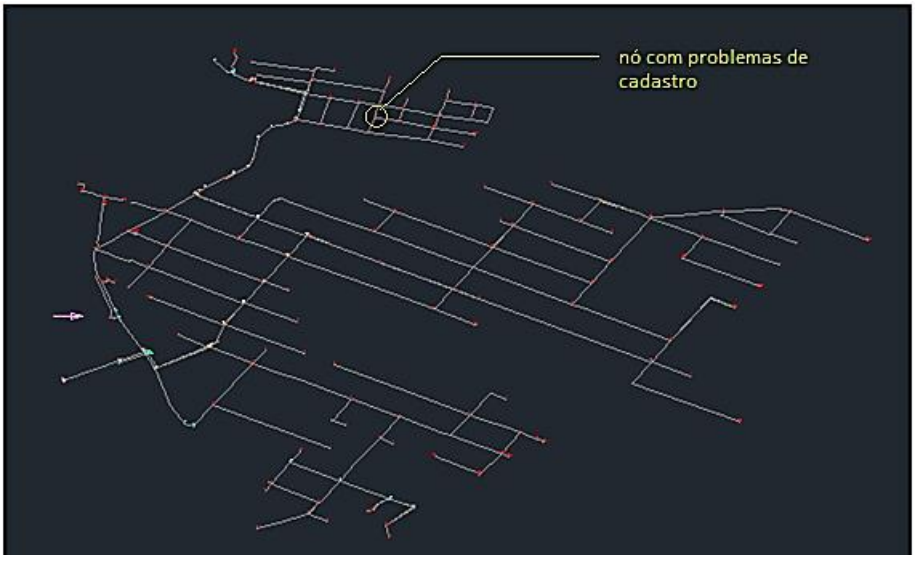


Figura 19. Vista geral da rede parametrizada no Plant3D.

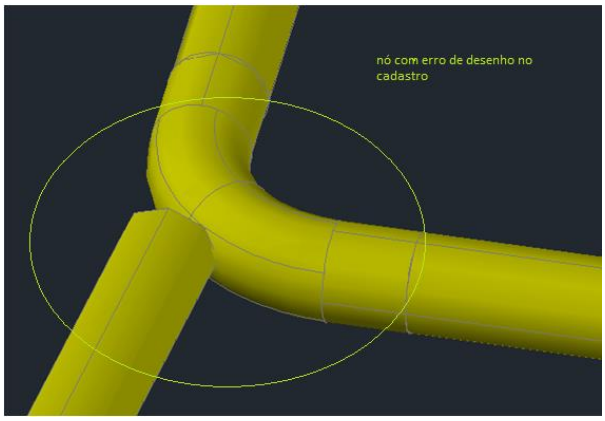


Figura 20. Vista da aproximação do nó com erro de cadastro.

Todas as ligações de nós tiveram que ser verificadas uma a uma, para correção das distorções decorrentes de falhas do desenho.

Em outro ponto, o cadastro mostrava abastecimento com auxílio de um sistema de bombeamento tipo *booster*, mas a cota altimétrica do ponto abastecido era menor que a cota da rede anterior a ele próprio (Figura 21), indicando, portanto, possíveis problemas de cadastro ou de instalação. Uma vistoria realizada em campo constatou erro no traçado sendo realizada a consequente revisão do cadastro.

Figura 21. Cadastro da rede na região do booster.

Corrigidas as distorções geradas pelos erros ou indefinições cadastrais, passou-se à fase de parametrização hidráulica da rede

Como o *Project Dalton* não trabalha com dados de consumo médio nos nós intermediários, sendo estes valores atribuídos diretamente em pontos de saída da

rede, optou-se pela definição dos pontos de ligação de cada unidade consumidora da rede para atribuição de seus respectivos consumos (figura 22).

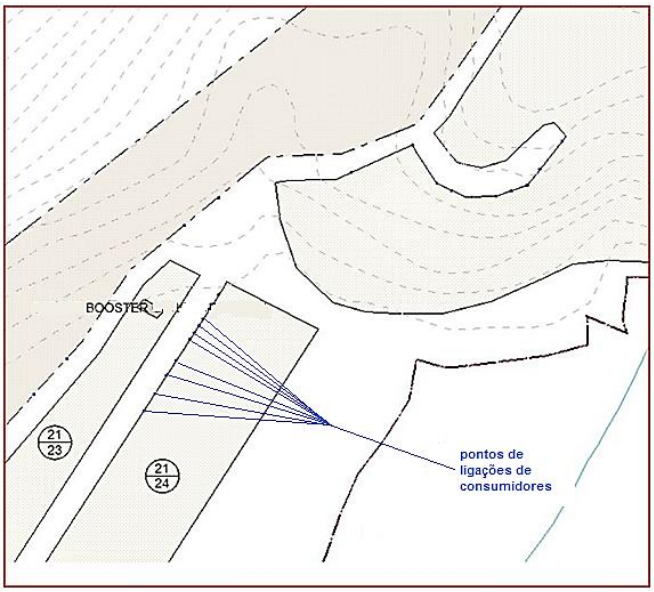


Figura 22. Cadastro de ligações da rede na região do *booster.*
Fonte – Cadastro 2015 – propriedade da empresa operadora do sistema de abastecimento.

Levando em consideração os recursos disponíveis, optou-se pelo procedimento apenas na região que contém o *booster*, limitando o projeto ao trecho da rede que, durante sua operação, envolve o maior número de parâmetros da mecânica dos fluidos. (Figura 23).

Figura 23. Região selecionada para o projeto.

Dentro do *PLANT 3D*, pode-se abrir o *Project Dalton*, que apresenta ferramentas para definição de parâmetros de funcionamento hidráulico.

Ao ser acionado o comando "*Dalton*" (figura 24), abre-se o aplicativo dentro do *software PLANT 3D.*

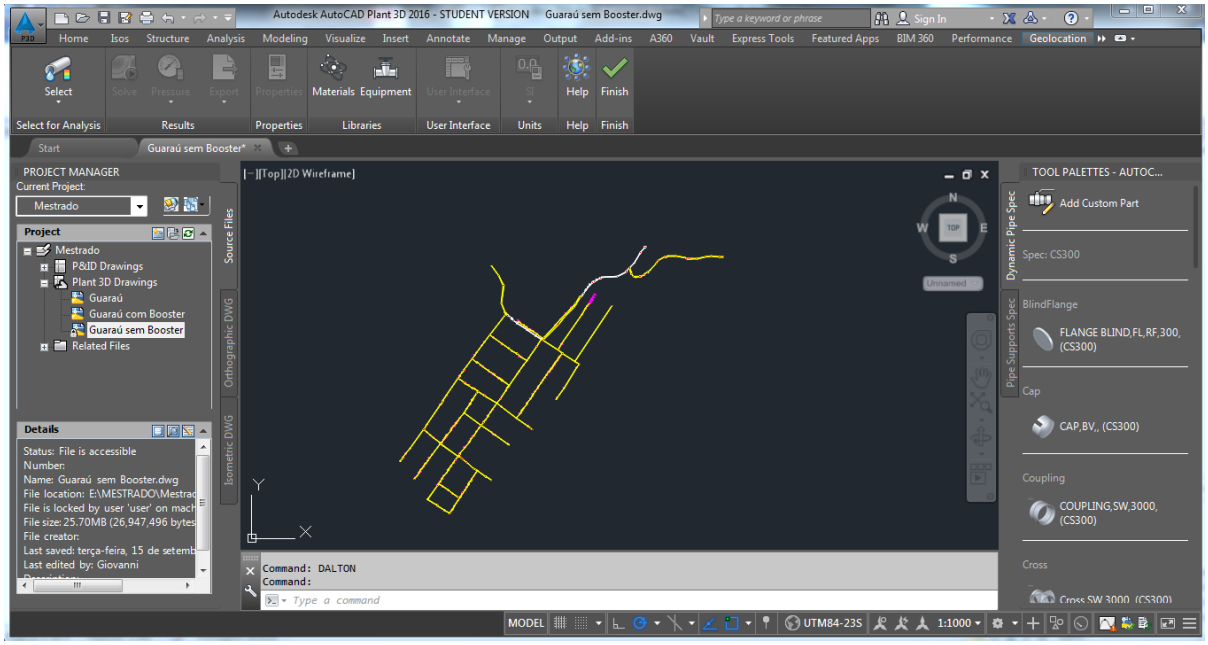


Figura 24. Comando "Dalton" acionando o aplicativo.

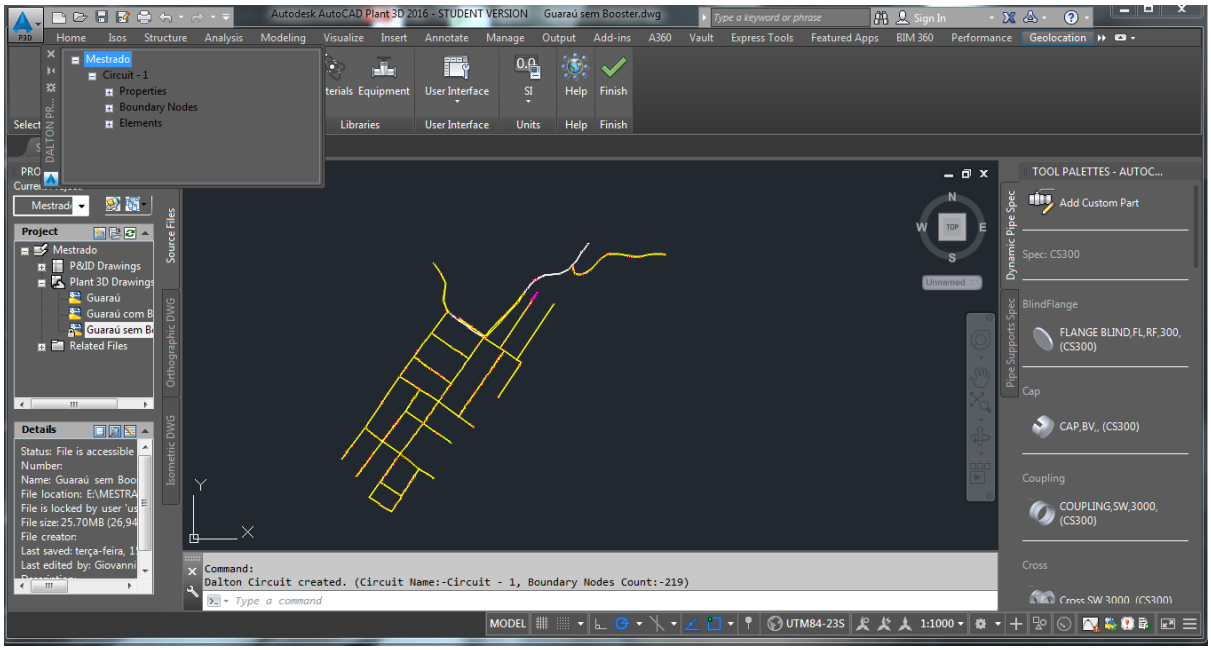


Figura 25. "Janela" para entrada de parâmetros hidráulicos.

Acionando o botão “*select*” (canto lateral esquerdo da tela), o aplicativo “lê” o desenho, interpretando os elementos como partes de um circuito hidráulico. Disponibilizando uma “janela”, que lista os “nós” de extremidade, os tubos, conexões e equipamentos que compõem o sistema, para que sejam atribuídos os devidos parâmetros (figuras 25 e 26).

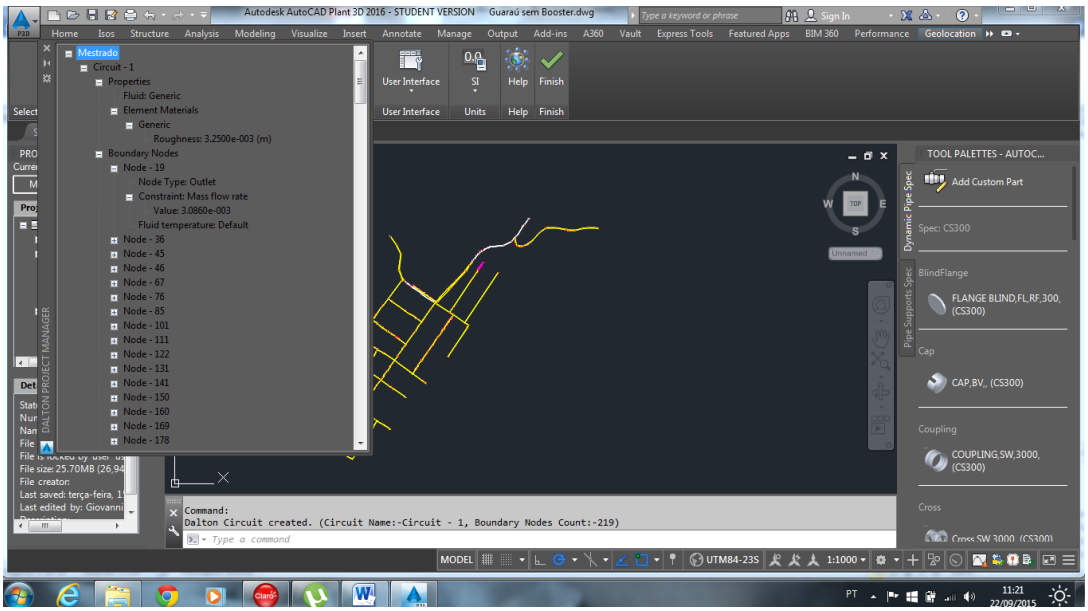


Figura 26. “Janela” extendida.

Definindo-se para o ponto de entrada uma pressão, para cada ponto de saída a vazão de consumo, e para cada trecho de tubulação a rugosidade do material.

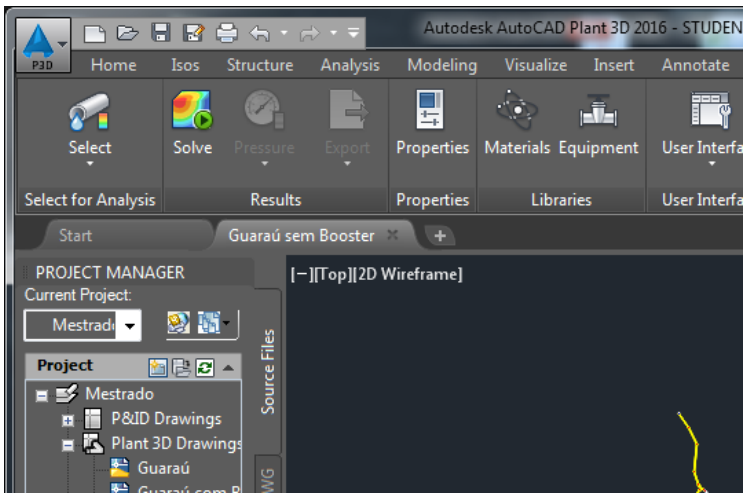


Figura 27. Botão de comando “solve” disponibilizado.

O aplicativo pode calcular a vazão, a velocidade, o número de *Reynolds* e a pressão em cada ponto do circuito acionando-se o comando "*solve*" (figura 27).

Os resultados são apresentados graficamente através de variação de cores no interior das peças do sistema. (Figuras 28 e 29).

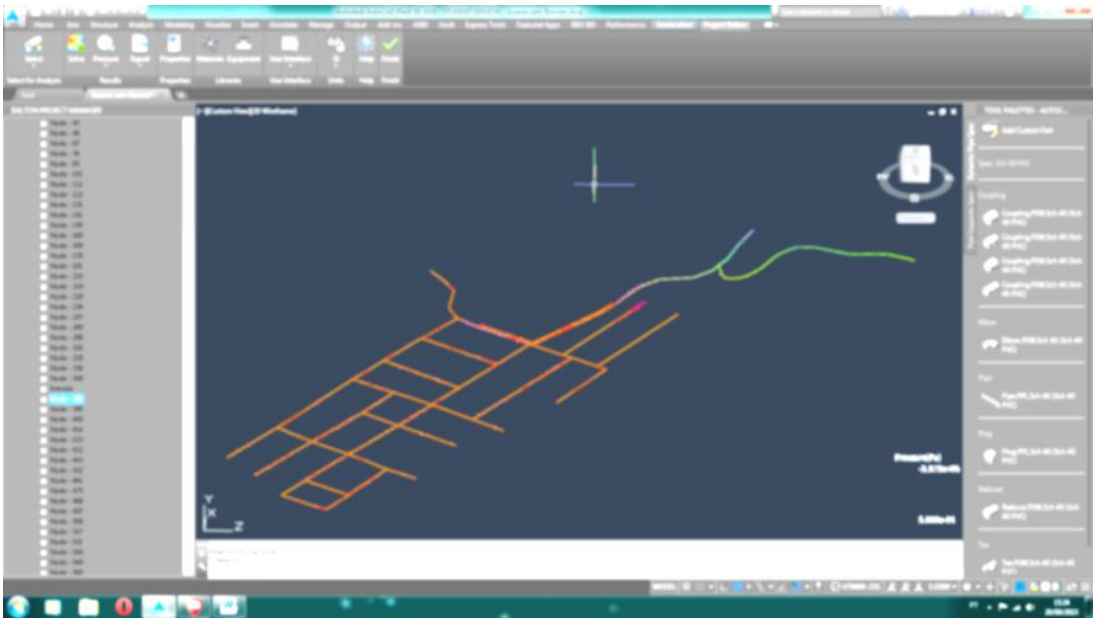


Figura 28. Demonstração de distribuição de pressão no trecho estudado.

Para análise numérica em cada ponto, eles podem ser disponibilizados em formato de tabela, exportada para o *excel* através de um comando disponível na ferramenta "*EXPORT*".

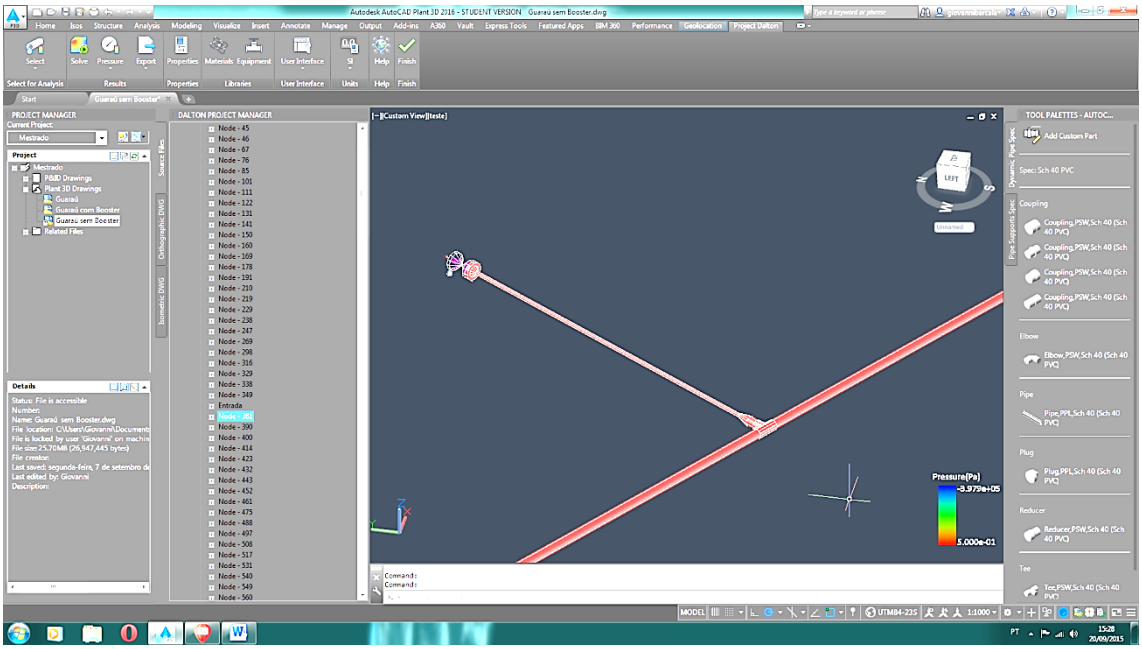


Figura 29. Vizualização da pressão em um ponto de saída da rede.

Após a execução dos cálculos, o arquivo pode ser gravado, porém sua gravação apresenta extensão DWG. Ao ser aberto novamente no *PLANT* 3D, serão preservados os dados de entrada parametrizados, mas os cálculos efetuados no *Project Dalton* terão que ser realizados novamente para obtenção dos resultados já apresentados.

Para análise numérica em cada ponto, eles podem ser disponibilizados em formato de tabela, exportada para o *excel* através de um comando disponível na ferramenta "*EXPORT*".

Após a execução dos cálculos, o arquivo pode ser gravado, porém sua gravação apresenta extensão DWG. Ao ser aberto novamente no *PLANT* 3D, serão preservados os dados de entrada parametrizados, mas os cálculos efetuados no *Project Dalton* terão que ser realizados novamente para obtenção dos resultados já apresentados.

4.2.3 A Rede no Project Dalton

Embora seja possível acionar o aplicativo *Project Dalton* dentro do *PLANT* 3D efetuando todos os cálculos hidráulicos necessários, após o ajuste da parametrização da rede no *PLANT* 3D, é possível exportar os dados, gerando um arquivo com extensão PCF através de um comando específico (Figura 30).

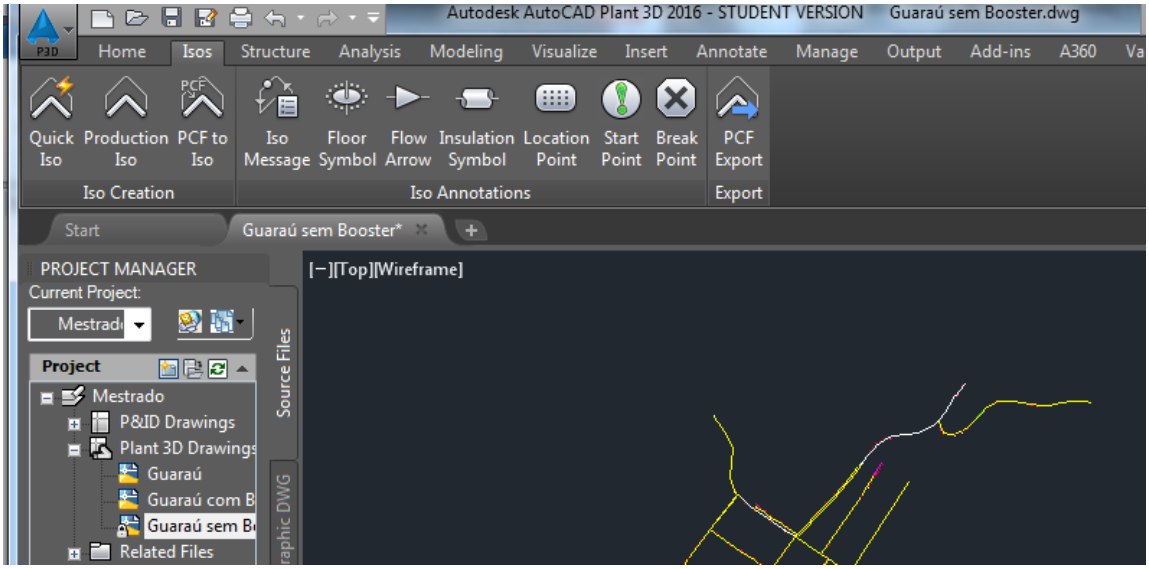


Figura 30. Comando PCF *Export*.

O *Project Dalton* pode importar os arquivos extensão PCF, através do comando "*Import*" (Figura 31), transformando-os em extensão "json".

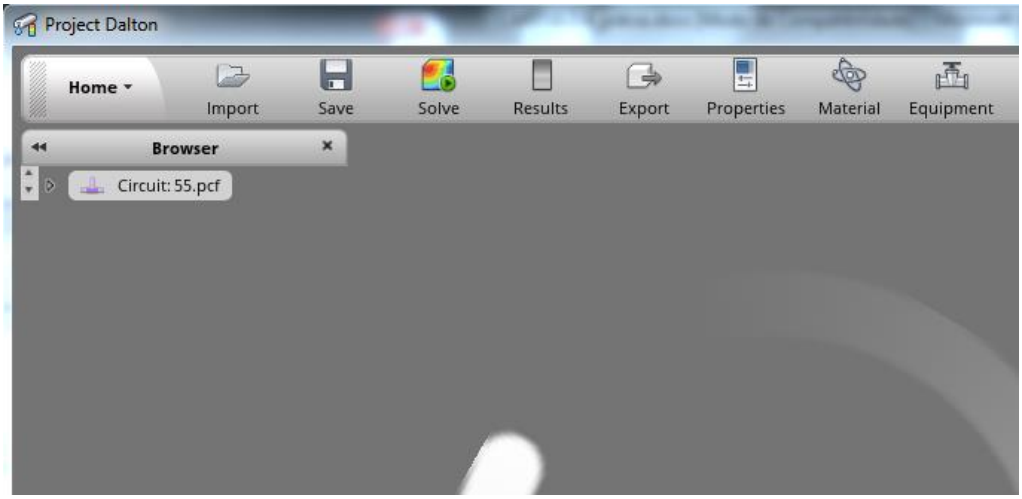
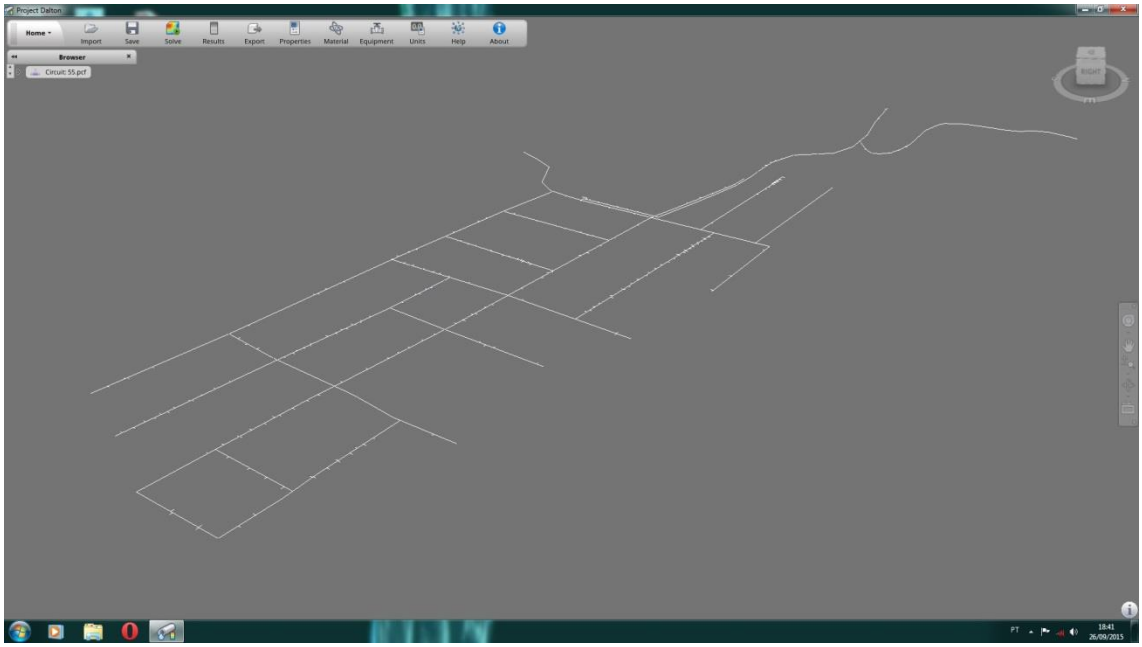


Figura 31. Comando *Import* do *Project Dalton*.

Os arquivos extensão "json" (Figura 32) são muito mais "leves", demandando menor tempo para processamento, além disto, podem ser processados utilizando apenas o aplicativo, não sendo necessário o *PLANT 3D*.



Figua 32. Arquivo extensão "json" aberto no *Project Dalton*.

Neste novo ambiente, é possível fazer os cálculos hidráulicos em menor tempo, com os resultados apresentados em tabela exportada para o *excel*, ou

graficamente através de variação de cores para pressão (Figura 33), velocidade e número de Reynolds.

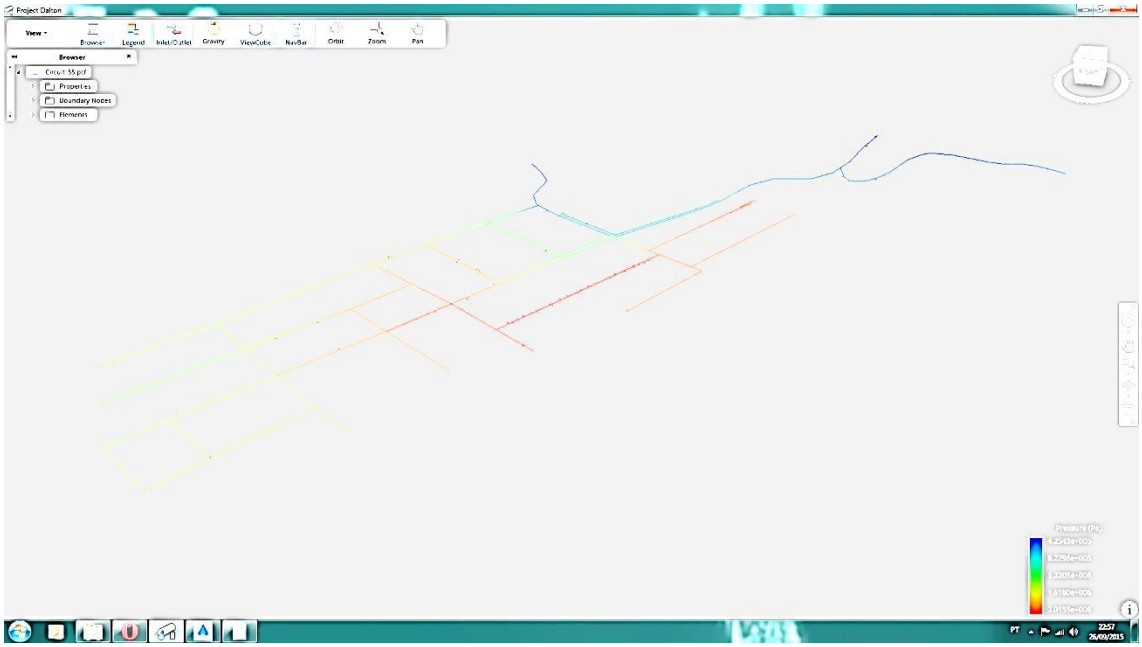


Figura 33. Distribuição de Pressão.

Também é possível visualização de pontos específicos considerando a aproximação da imagem (Figura 34)

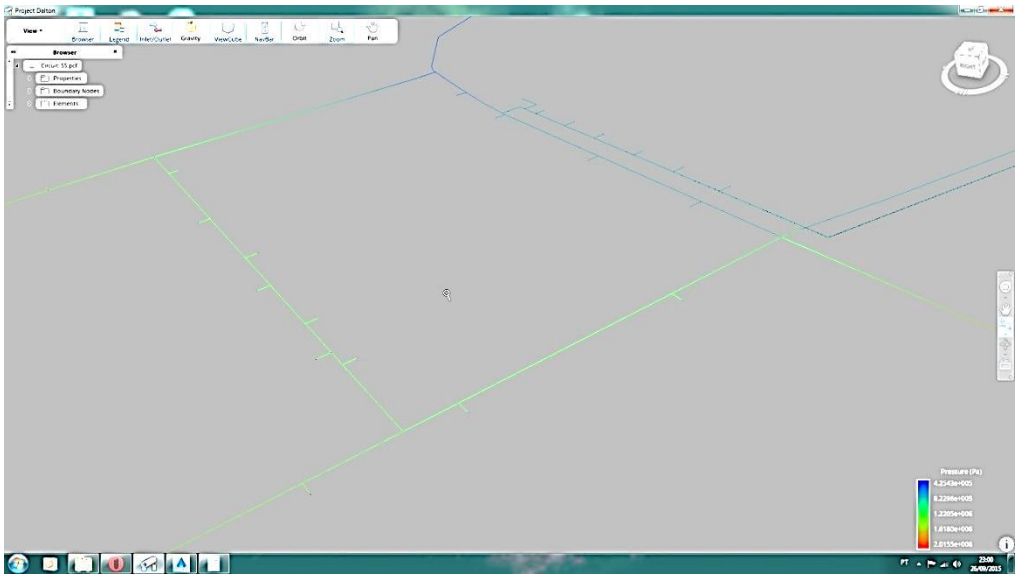


Figura 34. Visão aproximada da distribuição de pressão.

Aproximando ainda mais a imagem é possível identificar o sentido do fluxo hidráulico (Figura 35), o que não é possível no PLANT 3D.

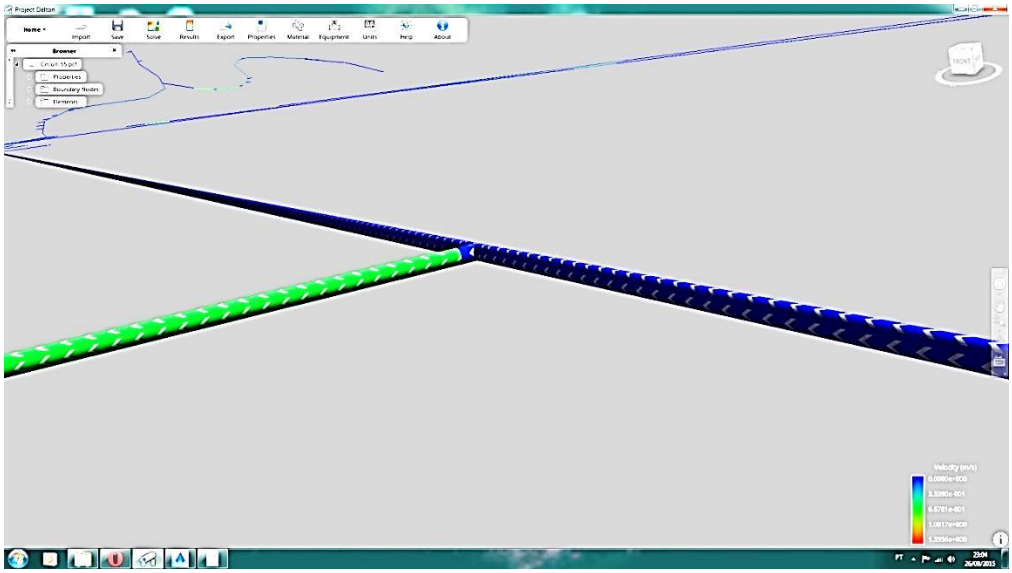


Figura 35. Sentido do fluxo.

Como o *Project Dalton* ainda é experimental apresentou alguns problemas que limitaram sua utilização neste trabalho.

Para visualização detalhada de um nó, como as dimensões de comprimento da tubulação são proporcionalmente muito maiores que seus diâmetros, é preciso grande aproximação, mas a partir de um determinado ponto de aproximação, a imagem se desfaz aparecendo apenas o fundo vazio. Isto torna muito difícil a visualização dos resultados apresentados graficamente.

A utilização da estação pressurizadora não foi possível neste ambiente, porque o aplicativo não conseguiu “ler” o equipamento exportado para o PCF.

4.3 Parâmetros para Simulação

Os parâmetros de pressão, vazão de consumo, material e sua rugosidade, utilizados para simulação são provenientes do banco de dados da rede em estudos.

A pressão de entrada foi obtida através de medição local efetuadas em data e horários conforme cada caso especificado.

Para obtenção dos dados de consumo dos pontos de saída da rede, foram utilizados valores médios de cada ponto obedecendo a proporcionalidade com a entrada da rede nos momentos de máximo e de mínimo conforme estudo estatístico.

Os dados de vazão de entrada do sistema são registrados de hora em hora, por um macro medidor automático instalado junto à válvula reguladora de pressão.

Transmitidos a uma central de comando, através de ondas de rádio, fincando armazenados num banco de dados eletrônicos.

Utilizou-se para este estudo, os dados de vazão registrados no período de 10 de julho de 2014 a 09 de novembro de 2014. Verificou-se que neste período houve falhas de transmissão ou de registro em alguns pontos, com os valores permanecendo “congelados” ou nulos nestes registros.

Visando estabelecer um caráter aleatório à amostra, relacionou-se os 123 dias de coletas correspondentes ao período, em ordem cronológica e crescente. Eliminou-se desta relação, os dias que apresentaram qualquer um dos valores registrados de hora em hora, nulos ou “congelados”.

Através da função “ALEATÓRIOENTRE”, do Excel, estabeleceu-se uma relação de 30 números aleatórios entre 1 e 123.

Tomando-se cada número aleatório como a posição do dia de coleta, selecionou-se 30 valores de vazão coletados do sistema para cada hora do dia, relativos ao dia selecionado.

Estabelecendo-se faixas de frequências entre estes trinta dados, verificou-se que sua distribuição se aproximou da normal ou gaussiana.

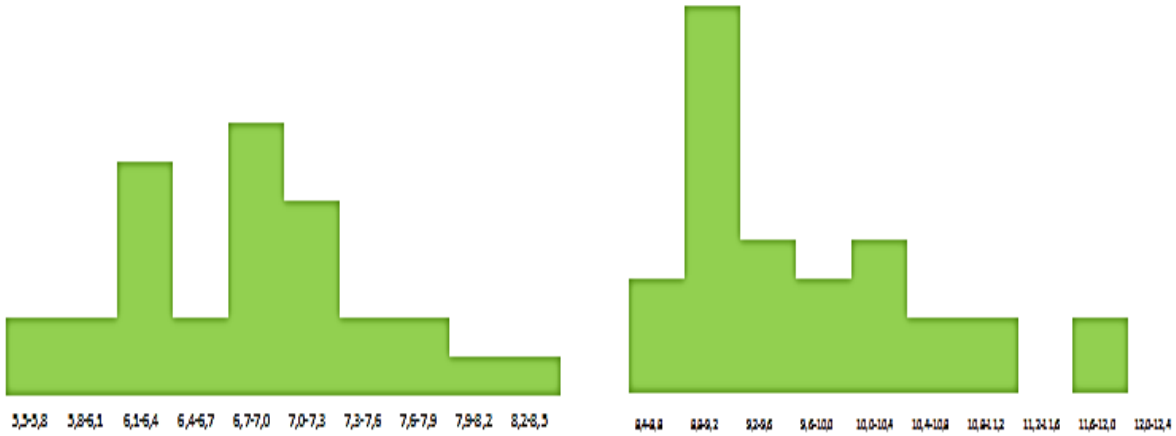


Figura 36. Histogramas de distribuição de frequências para 0:00h e 18:00h.

Foram calculadas, para cada hora do dia, conforme a Tabela1, a média, a variância e o desvio padrão dos dados da amostra.

Tabela 1. Valores de média, variância e desvio padrão para cada hora do dia.

Horário	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
Média	6,7	6,0	5,5	5,2	5,0	4,9	5,4	6,8	9,2	10,1	10,9	10,9
Variância	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4	0,7	0,7	1,5	3,6	2,0	1,7	1,1
Desvio padrão	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	1,2	1,9	1,1	1,3	1,0

Horário	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Média	10,6	10,3	10,3	9,9	9,8	9,4	9,6	9,2	8,6	8,3	7,7	7,3
Variância	1,6	0,9	1,2	1,1	1,4	1,2	0,9	0,8	1,3	0,6	0,6	0,6
Desvio padrão	1,3	1,0	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	0,9	1,1	0,8	0,8	0,8

Considerand0-se 95% de probabilidade de ocorrência (Tabela 2), tem-se os intervalos para cada horário do dia, definidos como sendo:

$$X - 1{,}96.\sigma < \mu < X + 1{,}96.\sigma$$

Sendo: X a média da amostra, σ o desvio padrão e μ a média provável

Tabela 2. Intervalo para 95% de confiança.

Horário	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00
Mínimo	5,5	4,9	4,6	4,0	3,8	3,3	3,8	4,4	5,5	7,9	8,4	8,9
Máximo	7,9	7,1	6,4	6,4	6,2	6,5	7,0	9,2	12,9	12,3	13,4	12,9

Horário	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Mínimo	8,1	8,4	8,1	7,9	7,5	7,3	7,7	7,4	6,4	6,8	6,2	5,8
Máximo	13,1	12,2	12,5	11,9	12,1	11,5	11,5	11,0	10,8	9,8	9,2	8,8

Os dados demonstram uma variação de vazão com valores máximos entre 8 e 12 horas e vazão mínima entre 4 e 6 horas, como pode ser observado no gráfico 4.2 a seguir

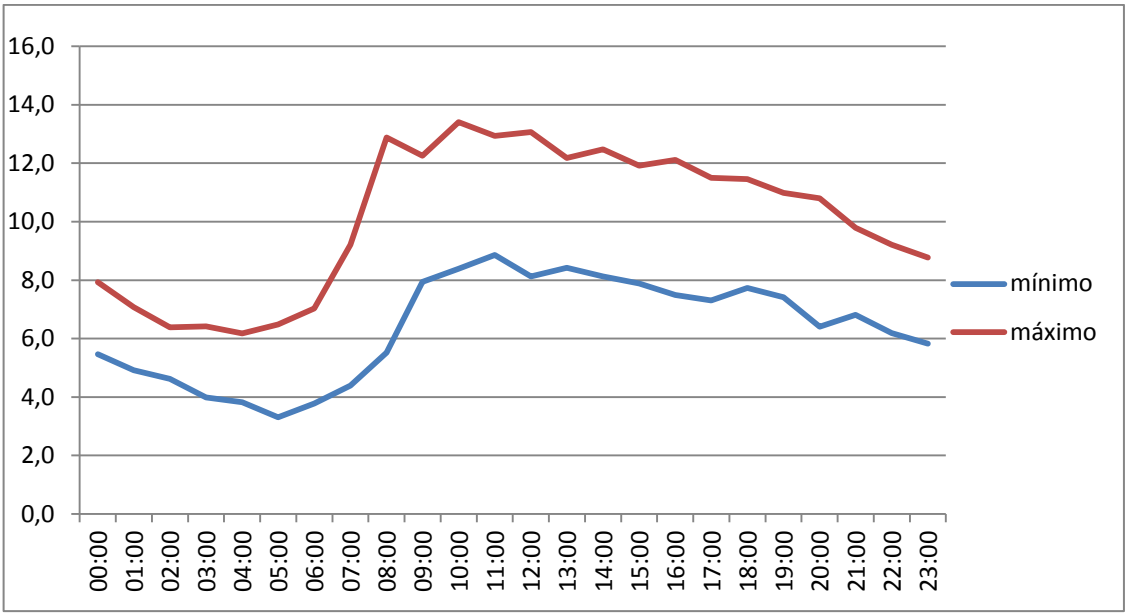


Figura 37. Intervalo de consumo com 95% de confiança para 24 horas.

Considerando-se o consumo em horário de máximo, soma-se os valores máximos previstos entre 8:00h e 12:00h, e divide-se a média deste valor pela soma dos vinte quatro valores diários correspondentes ao máximo consumo previsto. Encontrando para o período de consumo máximo unitário, o valor de 5,49% do consumo total diário.

4.4 Estudo de Casos

Considerando a operação da rede, há necessidade de atendimento de parâmetros estabelecidos pela Arsesp (Agência Reguladora de Saneamento do Estado de São Paulo), dentre eles o valor de pressão dinâmica nos pontos de abastecimento da rede, que não deve ser menor que 10 m.c.a.

Utilizando a situação crítica para a região de cota topográfica mais alta do trecho da rede em estudo (Figura 38), simulou-se e foi analisado os resultados considerando, no caso 1 o abastecimento sem a estação pressurizadora, e no caso 2 com a utilização da estação citada.

Figura 38. Região de cota topográfica mais elevada.
Fonte – Google Earth.

4.4.1 Simulação 1, sem a estação pressurizadora

Como a situação crítica a ser verificada é a pressão dinâmica mínima, a simulação contempla a situação de vazão de consumo máximo da rede considerada em 25 de janeiro de 2015, as 9:00h.

A pressão de entrada da rede foi medida em campo nesta data e horário, apresentando o valor de 42 m.c.a, como a entrada de pressão no *software* é em *Pascal*, tem-se a pressão da entrada da rede em 411.879 Pa.

Para o mês de janeiro de 2015, ocorreram os consumos mensais nos pontos de saída da rede medidos (anexo 1). Os dados registrados estão em m³/mês (coluna 2), o consumo diário médio de cada ponto de consumo é calculado dividindo-se o conteúdo da coluna 2 por 31(coluna 3). Considerando o estudo efetuado para o pico de consumo, que é de 5,49% do volume diário durante 1 hora. Chegou-se ao consumo em m³/s multiplicando o valor da coluna 3 por 5,49% e dividindo o resultado por 3600 (coluna4). O consumo é considerado pelo *software* em kg/s, então multiplicou-se o valor da coluna 4 por 1000, para alimentar o *software*.

Toda a tubulação do trecho analisado é de PVC, com coeficiente de rugosidade absoluta 0,05mm.

A estação pressurizadora já estava em operação nesta data, os valores de vazão coletados em pontos à montante da estação não foram modificados para esta simulação, desprezando os efeitos prováveis de queda do consumo em caso da falta de pressão na rede pela ausência da estação.

O modelo desenhado no *PLANT 3D*, através do aplicativo *Project Dalton*, foi alimentado com os dados descritos para uma primeira simulação.

Processando os dados, verificou-se que alguns pontos da rede apresentavam baixa pressão (Figura 39).

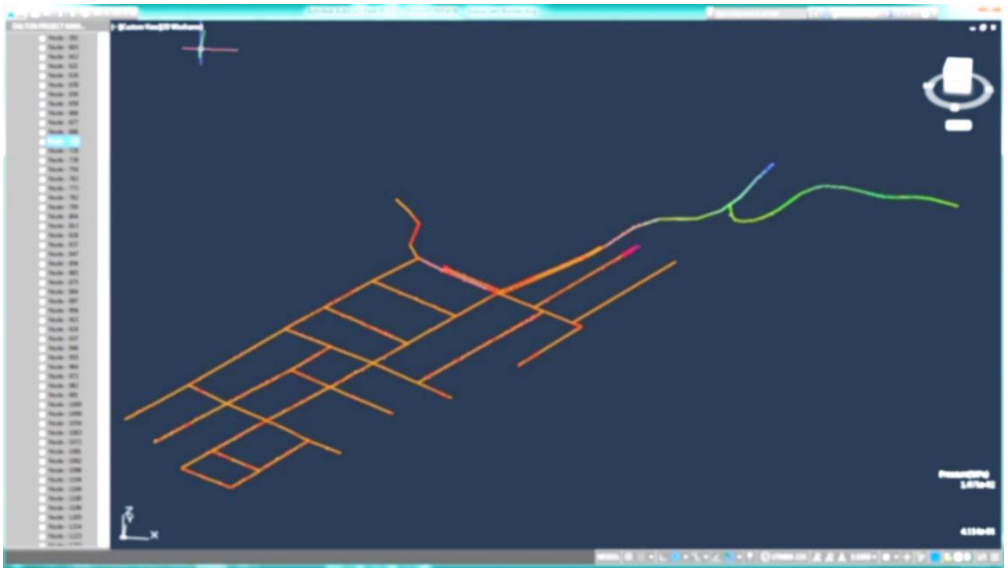


Figura 39. Pressão na rede na primeira simulação.

É possível visualizar outros dados da rede como vazão, número de Reynolds e velocidade, não mostrados aqui, tendo em vista que o foco é a pressão crítica.

Numerando os pontos que apresentaram baixa pressão, verificou-se que estão nas cotas mais altas da região à montante do nó 720 (Figura 40).

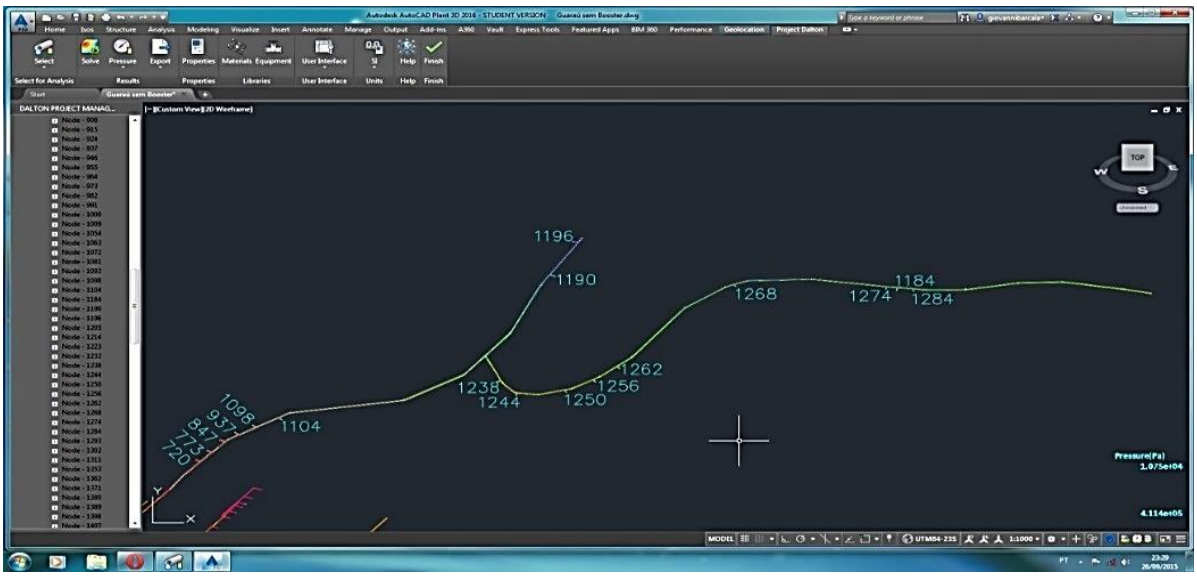


Figura 40. Nós que apresentaram baixa pressão numerados.

Estes pontos são identificados por números de nós que aparecem na tabela de valores que pode ser exportada do *Project Dalton* para o *Excel* (Anexo 2).

Verificou-se que para atender às pressões mínimas exigidas pela Arsesp nos nós de cota mais alta, seria preciso injetar energia no fluxo a partir do nó 720.

4.4.2 Simulação 2, com a estação pressurizadora

Alterando-se o modelo do trecho de rede e considerando-se agora a situação real incluindo a estação pressurizadora instalada, tem-se acréscimo da energia fornecida pela bomba incrementada ao fluxo de água à montante da estação (figura 41).

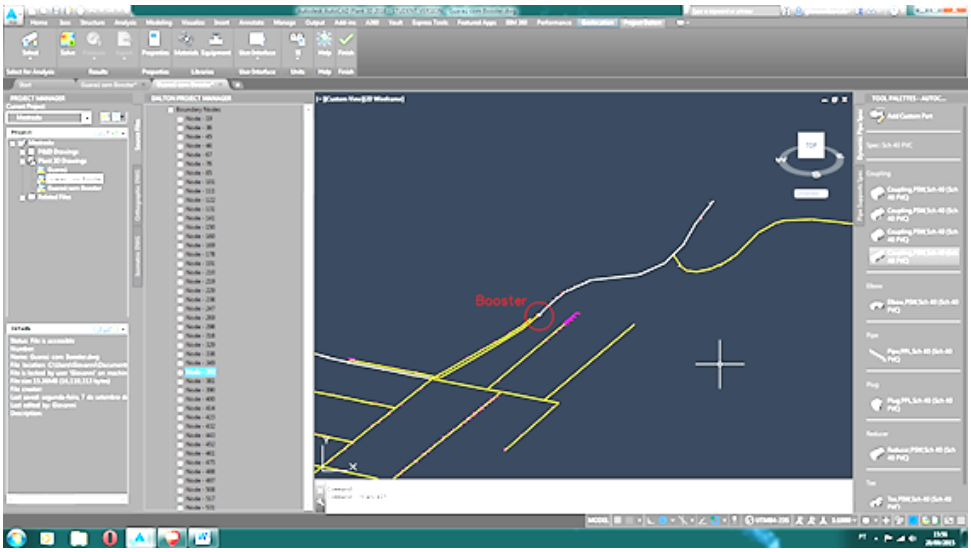


Figura 41. Modelo com a estação pressurizadora.

A figura 42 mostra os detalhes da estação de pressurização considerada nesta simulação.

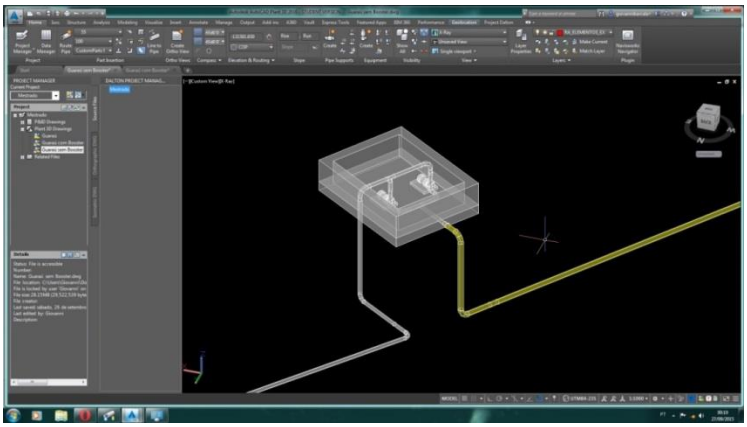
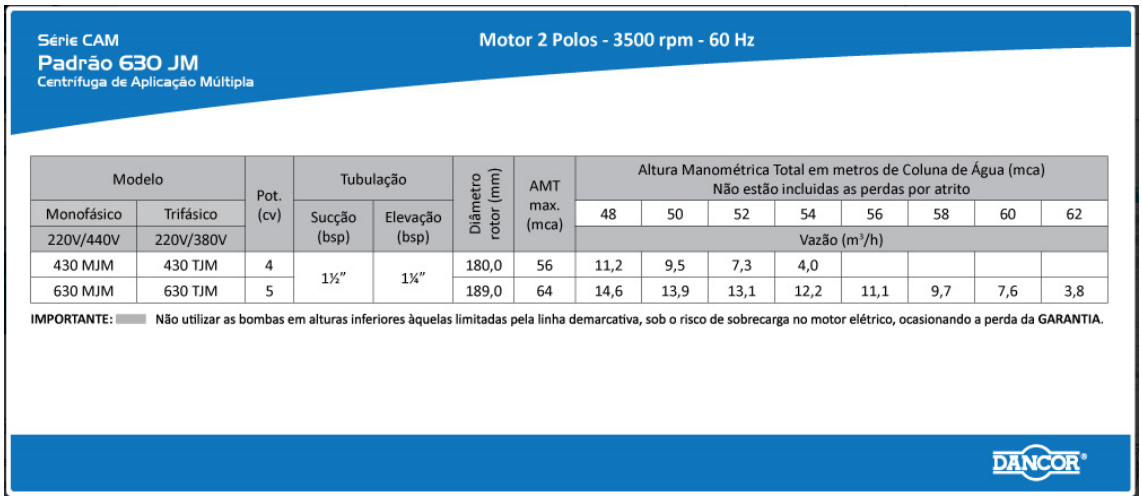


Figura 42. Detalhe da estação inserida no modelo.

Considerando-se os mesmos dados de pressão de entrada na rede (42 m.c.a.), e os mesmos dados de consumo em cada ponto de saída (anexo 1), acrescentou-se os dados da curva da bomba fornecida pelo fabricante (Figura 43).



Série CAM
Padrão 630 JM
Centrífuga de Aplicação Múltipla

Motor 2 Polos - 3500 rpm - 60 Hz

Modelo		Pot. (cv)	Tubulação		Diâmetro rotor (mm)	AMT max. (mca)	Altura Manométrica Total em metros de Coluna de Água (mca) Não estão incluidas as perdas por atrito							
Monofásico	Trifásico		Sucção (bsp)	Elevação (bsp)			48	50	52	54	56	58	60	62
220V/440V	220V/380V						Vazão (m³/h)							
430 MJM	430 TJM	4	1½"	1¼"	180,0	56	11,2	9,5	7,3	4,0				
630 MJM	630 TJM	5			189,0	64	14,6	13,9	13,1	12,2	11,1	9,7	7,6	3,8

IMPORTANTE: Não utilizar as bombas em alturas inferiores àquelas limitadas pela linha demarcativa, sob o risco de sobrecarga no motor elétrico, ocasionando a perda da GARANTIA.

DANCOR

Figura 43. Curva da bomba instalada conforme catálogo.
Fonte – Catálogo técnico DANCOR,2014.

Os dados são inseridos em um campo específico em formato de planilha clicando na janela "*Equipament Library*" (figura 44).

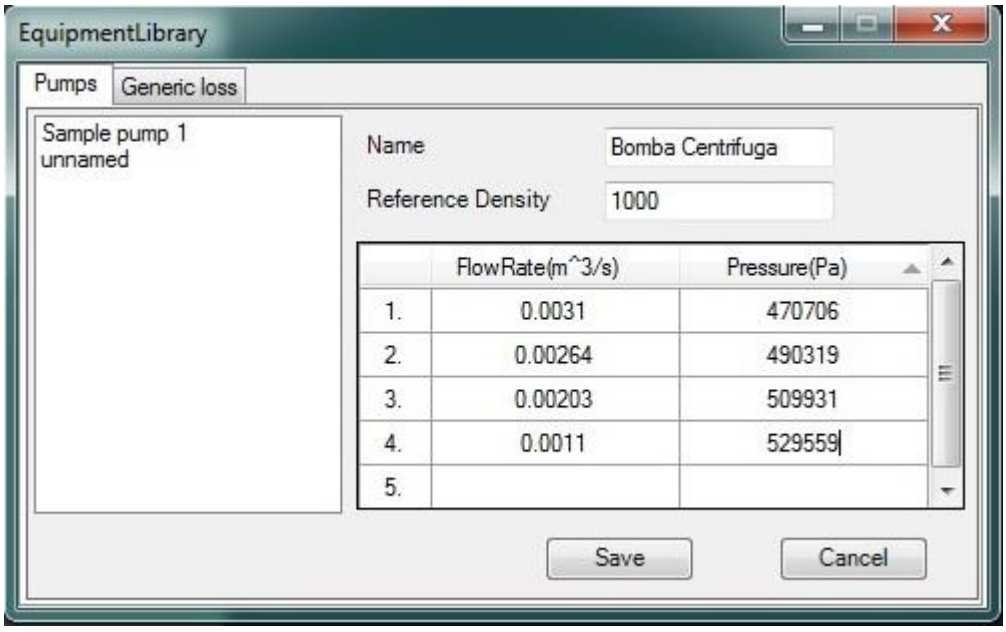


Figura 44. Curva da bomba digitada no Project Dalton.

Os resultados obtidos (Figura 45) demonstram que a energia injetada no fluxo é suficiente para atender à demanda de pressão nos pontos críticos do trecho da rede. Além disto, pode-se verificar que não houve alteração significativa à jusante da estação pressurizadora.

Figura 45. Pressões na rede considerando a estação pressurizadora.

Aproximando a imagem da rede com foco nos pontos à montante do nó 720, é possível visualizar a mudança nas pressões dos pontos críticos comparadas à simulação 1 (Figura 46).

Figura 46. Aproximação de pontos à montante da estação pressurizadora.

Na tabela de resultados exportada para o *excel*, pode-se conferir e precisar os valores das pressões em cada um dos pontos críticos (apêndice 3).

Os resultados demonstram que as pressões nos pontos críticos agora estão satisfatórias.

5 UTILIZAÇÃO ACADÊMICA

O aluno do século XXI recebe tantos estímulos visuais em aparelhos celulares, video-games, cinema e televisão, que se abstrair para entender um conceito teórico exige muito esforço.

Porém, por melhor que seja a intenção, não é possível transmitir visualmente todos os conhecimentos de física, química e matemática, necessários para a formação de um profissional de engenharia.

Conciliar os *softwares* de cálculo e desenho que possuem grandes recursos visuais, com os conteúdos teóricos necessários para o entendimento das diversas disciplinas que envolvem o ensino de engenharia, é o grande desafio.

5.1 Processo Ensino/Aprendizagem

Aprender é um processo contínuo que acompanha o ser humano desde sua concepção até sua morte.

Jean Piaget estudou este processo sob a ótica do desenvolvimento cognitivo, partindo do nascimento até a maturidade. Segundo ele, cada fase de desenvolvimento cognitivo está relacionada com o desenvolvimento mental característico do crescimento de um ser humano. O aprendizado ocorre partindo da absorção de informações através do tato, do olfato, da gustação, da audição e da visão, passando pela fase de formatação de modelos absorvidos, evoluindo para a correlação entre modelos formatados e novos modelos assimilados, culminando com o desenvolvimento de novos conhecimentos a partir dos modelos absorvidos, formatados e assimilados (GOMES, GHEDIN, 2011).

Para *Vygotski*, que estudou este processo sob a ótica relacional, o que foi assimilado cria uma demanda por novos conhecimentos de mesmo nível cognitivo, até que haja um “salto” para um nível superior, passando a gerar demandas neste novo patamar até que ocorra novo “salto”. Para ele, a passagem de um patamar de desenvolvimento cognitivo a outro superior, só é possível se houver saturação de conhecimento ao nível do que está sendo demandado (NEVES, DAMIANI, 2006).

Na década de 50, uma comissão multidisciplinar de especialistas de várias universidades americanas liderada por *Benjamim S. Bloom*, publicou um estudo sobre o processo de ensino/aprendizagem que ficou conhecido como “Taxonomia de

Bloom”. Este estudo classifica o processo em seis níveis de objetivos no domínio cognitivo. Segundo os especialistas, as capacidades e conhecimentos são adquiridos através de um processo de aprendizagem e podem ser descritas pelos verbos, conhecer, compreender, aplicar, analisar, sintetizar e avaliar, iniciando no mais simples e seguindo numa sequência lógica até o mais complexo.

No primeiro nível, apenas é reproduzida uma informação recebida. No segundo nível, ocorre a modificação da informação recebida em novos modelos. No terceiro nível, há a utilização de informações recebidas e modificadas para uma situação nova, mas idêntica às conhecidas. No quarto nível, as informações são decodificadas em elementos componentes que possuem uma relação entre si. No quinto nível estes elementos são recombinados para situações diversas. No sexto nível, os elementos constituintes e suas relações são confrontados com novos conceitos (FERRAZ, 2010).

5.2 Modelo como Ferramenta

Vislumbrando a sequência indicada pelos estudos do processo de ensino/aprendizagem, a utilização de um modelo representativo de uma situação real pode levar o aluno a “cumprir” os objetivos descritos por *Bloon*, iniciando no concreto (mais simples) e terminando no abstrato (mais complexo).

O primeiro contato visual com o local a ser estudado (figura 47), relaciona as imagens de casas, ruas, e elementos comuns, ao seu próprio dia-a-dia.

Figura 47. Elementos cotidianos.
Fonte – Google Earth Agosto 2015.

A visualização da rede de distribuição lançada sobre uma representação do relevo, leva a uma ligação do que é concreto e visível diariamente, ao que embora seja concreto, não esteja disponível diariamente para visualização (Figura 48).

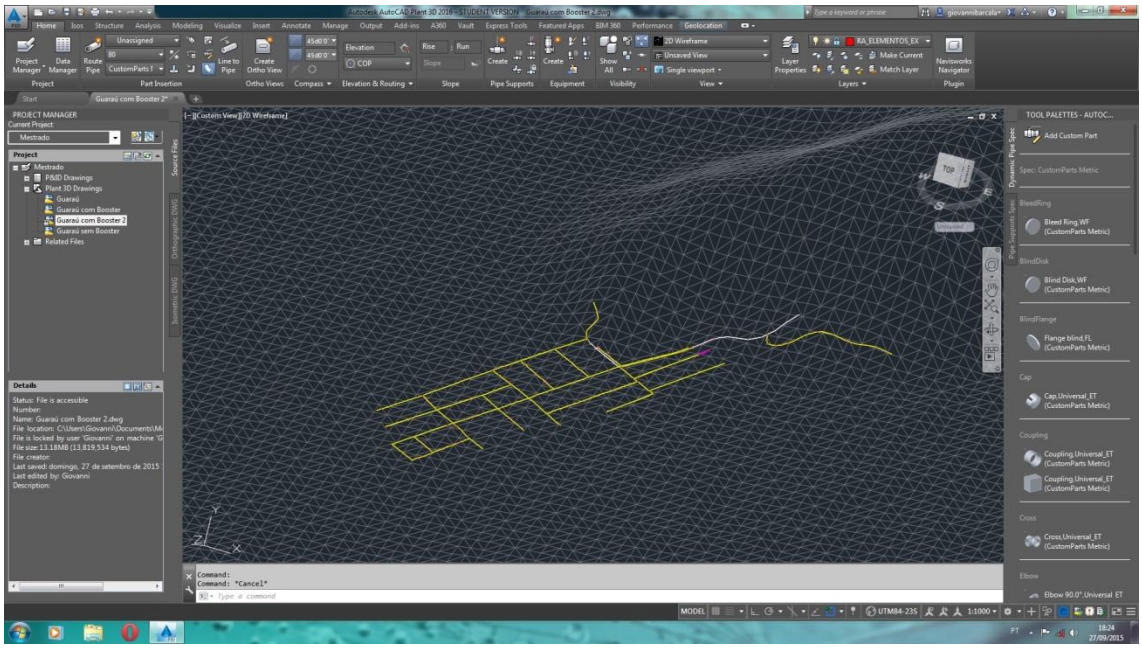


Figura 48. Elementos representados.

A representação pode ser trabalhada, levando a evoluir a relação entre o que é real e concreto para o que o representa (Figura 49).

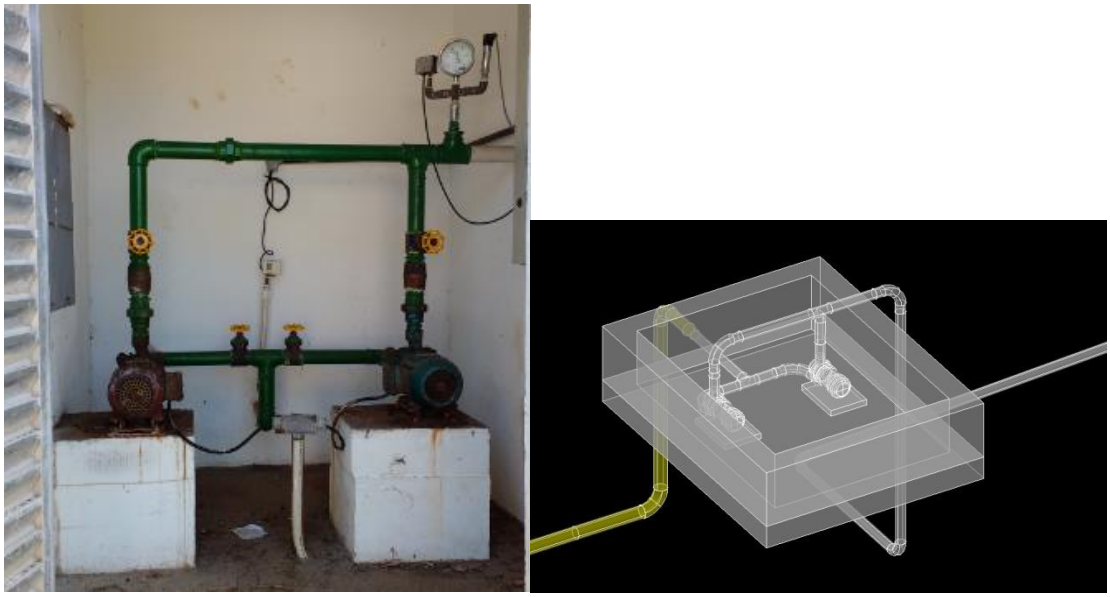


Figura 49. Representação de elementos específicos.

O modelo leva, por fim, a visualização do que pode ou não ser real. A representação da distribuição das pressões na rede (Figura 50), permite visualizar uma situação possível considerando os parâmetros utilizados. Estes resultados são obtidos através de cálculos matemáticos que embora não sejam visíveis podem ser explicados, analisados e comparados a dados extraídos da realidade da operação da rede.

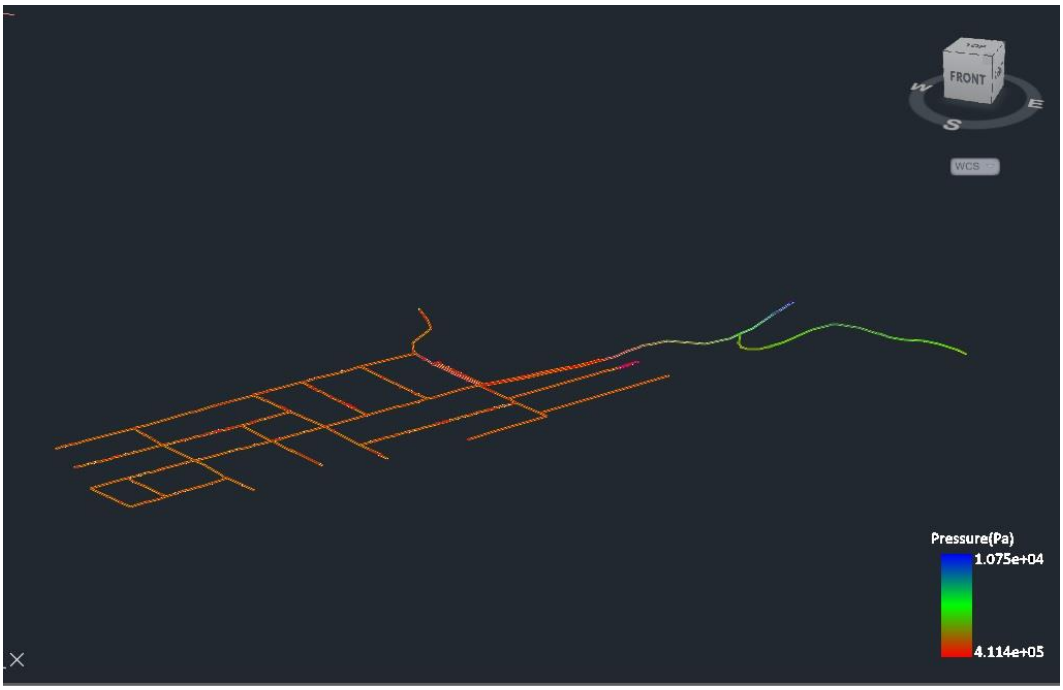


Figura 50. Representação de resultados matemáticos.

A compreensão e domínio destes cálculos matemáticos requer a abstração do que pode ser visto, para o que pode ser explicado, completando o ciclo de aprendizado.

5.3 Aplicação

Tendo o modelo construído, sua apresentação em sala de aula servirá para auxiliar a transição do que é concreto para o abstrato.

Demonstrando inicialmente o que é uma rede de distribuição e como ela funciona, é possível instigar o aluno a pensar em variações dos parâmetros apresentados.

Variando-se, por exemplo a curva da bomba, alteram-se as pressões a montante da estação pressurizadora.

Visualizado o fenômeno, o próximo passo é instigar o aluno a pensar como o *software* faz para obter os resultados apresentados, levando-o aos conceitos teóricos e cálculos matemáticos.

Para alteração de diâmetros e configurações da rede ou inserção de novos componentes, faz-se necessário um novo modelo que pode ser construído a partir do existente.

5.4 Resultados e Discussão

Como primeiro passo, buscou-se uma rede em operação e deparou-se com enormes dificuldades para definir os parâmetros que caracterizam a rede física. Informações como diâmetro, material da tubulação e cotas altimétricas estavam desatualizadas ou eram desconhecidas, com o gerenciamento da rede acontecendo intuitivamente no dia-a-dia de operação. Embora estes fatores sejam um obstáculo a utilização de *softwares* de simulação, oferecem grandes oportunidades para desenvolvimento e melhoria.

Com os *softwares* já disponíveis foi possível encontrar alternativas para adequação da rede cadastrada adequando o cadastro aos parâmetros mínimos necessários para utilização em simulação. Após esta etapa, surgiram outros problemas relacionados à transformação das linhas de cadastro em desenho parametrizado representativo de tubulações e conexões. Estes problemas nem sempre foram gerados por erro cadastral. Em alguns casos os desencontros surgiram porque o cadastro foi desenhado em um plano enquanto a parametrização envolvia a rede em ambiente tridimensional. Esta transição gerou alguns pontos de difícil conexão, que apresentaram “vazamentos”, exigindo reparos no desenho parametrizado.

Embora não tenha sido o objetivo deste trabalho, os resultados da simulação apresentados em variação de cores ao longo da rede permitem análises visuais rápidas de parâmetros que precisam de monitoramento diário, como, baixa pressão e vazão, indicando a utilização do simulador como alternativa de ferramenta para a melhoria no processo de gestão da operação das redes de distribuição de água.

O *software* escolhido para a realização trabalho, conforme tratado no capítulo 2, apresentou alguns problemas em seu aplicativo (Project Dalton) conforme relatado no capítulo 4. Apesar deste fato, foi possível concluir a simulação utilizando o próprio aplicativo no ambiente do *software.* Tratando-se de um produto ainda experimental, espera-se que os problemas apresentados sejam corrigidos nas próximas versões do aplicativo, a serem colocadas no mercado.

6 CONCLUSÕES

A conclusão da modelagem da rede e sua simulação demonstrou que é possível transportar para dentro das salas de aula, casos reais de aplicação dos conteúdos programáticos de mecânica dos fluidos utilizando-se *softwares* de modelagem disponíveis no mercado.

A construção do modelo para simulação hidráulica de uma rede depende dos dados disponíveis em seu cadastro. Quanto mais detalhados e precisos os dados, menores as dificuldades para sua modelagem.

Um dado difícil de encontrar nos cadastros, as cotas altimétricas, foram obtidas indiretamente graças às ferramentas disponibilizadas nesta última década como: “projeto Topodata”, “live maps” e AutoCAD Civil 3D.

Apesar dos problemas encontrados com a falta de dados de cadastro, e da inconsistência dos dados existentes, a utilização de um *software* de desenho com plataforma BIM (AUTOCAD PLANT 3D), permitiu transformar os dados cadastrais em desenho parametrizado, com características dos materiais da rede real.

Apresentou-se uma proposta de utilização desta ferramenta, que embora precise ser testada em sala de aula, obedece aos preceitos didáticos propostos por *Jean Piaget* e *Lev Semenovich Vygotski* , que partindo da visão de elementos concretos, em associação a teorias matemáticas e físicas, cria zonas de desenvolvimento proximal (ZDP), proporcionando condições para o avanço do conhecimento.

Utilizando-se os estudos efetuados por *Benjamim S. Bloom*, relacionou-se fatores envolvidos no processo desde a obtenção dos dados para a modelagem até as simulações realizadas, que, ordenados do simples para o complexo, do concreto para o abstrato, obedece uma sequência lógica para o processo ensino/aprendizagem de mecânica dos fluidos.

6.1 Propostas Futuras

Duas linhas de pesquisa são sugeridas a partir deste trabalho.

A primeira na área de ensino de engenharia aponta para modificação do modelo já criado, variando diâmetro de tubulações para análise do impacto nas

vazões e pressões do sistema, verificando-se sua influência no ensino de mecânica dos fluidos através de comparação entre alunos que utilizaram o modelo e alunos que não utilizaram.

Uma segunda linha aponta para a utilização como ferramenta para melhoria da gestão e controle de redes de distribuição. A ampliação do modelo para todo o bairro que constitui um setor estanque, permitiria além das análises de pressão e vazão, a elaboração de um algoritmo representativo do funcionamento da rede com relação a perdas, monitorando ações mais efetivas no sentido de reduzi-las, atitude de grande importância levando-se em consideração a preocupação com a crise hídrica enfrentada nos últimos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS,Inc., ***Ansys Fluent User´s Guide***, 2013.

ASPEN, ***Tecnology Inc., Hysys 2004.2 User Guide*** , 2005.

ASSY, T.M. ***Mecânica dos Fluidos***. Editora LTC, 2004.

AUTODESK, ***Tailoring AutoCAD P&D and AutoCAD Plant 3D***, 2015.

BARCALA, R. de S.,GARCIA, D.V., BARCALA, G.R. ***Problemas na Modelagem de uma Rede de Distribuição de Água, em um Município Paulista***. Anais IV ENPG, UNISANTA, Santos 2015.

BELHOT,R.V.-NETO,J.D.O. ***A Solução de Problemas no Ensino de Engenharia***. USP São Carlos,2006.

BENTLEY, Systems Incorporated. ***WaterCAD 6.5 – Guía Rápida del Usuário***, 2005.

DANCOR – **Catálogo Geral de Produtos**, 2014.

CHAGAS, E.P., FERREIRA, F.L. ***Como Despertar o Interesse do Aluno Adulto nos Estudos***. Revista Eletrônica do Curso de Pedagogia das Faculdades OPET, ISSN 2175-1773, 2013.

DASSAULT, Systemes SolidWorks Corporation, ***Manual do Instrutor de Ensino do Software SoliWorks***, 2010.

FERRAZ, A.P. do C. M. ***Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais***. São Carlos, 2010.

GOMES, R.C.S., GHEDIN,E. ***O Desenvolvimento Cognitivo na visão de Jean Piaget e suas Implicações a Educação Científica***. *VIII Encontro Nacional de Pesquisa, ABRAPEC 2011.*

GOOGLE, URL:https://www.google.com.br/maps/place/Guaraú,+Peruíbe, acessado em agosto 2015.

JAMES, C. ***Blender Básico***, Livro de Classe e Tutoriais, 2006.

LAUDARES, J. B.; RIBEIRO, S. ***Trabalho e formação do engenheiro***. *In: XXIX* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2001, Porto Alegre. Anais.

MASSEY , B.S., ***Mecânica dos Fluidos***. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

MUNSOM, B.R., YONG, D.F., OKIISHI, T.H. ***Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.*** Editora Edgar Blücher, 2008.

MORAES JR. D, SILVA, E.L, MORAES, M.S. ***Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluidos I.*** Santos, 2011.

NEVES, R.de A., DAMIANI, M.F. ***Vygotsky e as Teorias da Aprendizagem****.* UNI revista vol 1 n° 2 ISSN 1809-4651, 2006.

OLIVEIRA, L.A., LOPES, A.G. ***Mecânica dos Fluidos.*** ETEP, 2010.

POTTER, M.C., WIGGERT, D.C. ***Mecânica dos Fluidos.*** Cengage Learnig, 2004.

ROSSMAN, L.A. ***EPANET 2 Users Manual***, 2000.

SILVEIRA, M.A. ***A Formação do Engenheiro Inovador: Uma Visão Internacional****.* Rio de Janeiro: PUC, 2005.

SOLIDCAM, ***InventorCAM 2013 Milling Training Course 2.5 Milling***, 2012.

SIMÕES, J.G.F., ***Mecânica dos Fluidos – Notas das Aulas.*** Editora independente, 2008.

SIMÕES, J.G.F., ***Elementos de Mecânica dos Fluidos.*** Publicações – FEI, 1972.

TAROUCO, L. M. R. e*t al*. **Multimídia Interativa: Princípios e Ferramentas, RENOTE.** Porto Alegre: CINTED/UFRGS, 2009.

TELLES, P.C.da S. ***História da Engenharia no Brasil****,* Editora S.A., 1984

VASCONCELOS, M.L.M.C*.* ***A Formação do Professor de Terceiro Grau*****.** São Paulo: Pioneira Educação, 2007.

WHITE, F.M. ***Mecânica dos Fluidos.*** Mc Graw Hill, 2011.

YONG,D.F., MUNSON, B.R., OKIISHI, T.H. ***Uma Introdução Concisa à Mecânica dos Fluidos*****.** Editora Edgard Blücher Ltda , 2005.

APÊNDICE

Apêndice 1. Planilha de dados de consumo utilizados para simulação da rede

Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m³)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m³/s	Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m³)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m³/s
19	21	0,6774	0,00001033	1274	34	1,0968	0,00001673
36	18	0,5806	0,00000885	1284	25	0,8065	0,0000123
45	52	1,6774	0,00002558	1293	18	0,5806	0,00000885
46	23	0,7419	0,00001131	1302	19	0,6129	0,00000935
67	14	0,4516	0,00000689	1311	10	0,3226	0,00000492
76	17	0,5484	0,00000836	1353	14	0,4516	0,00000689
85	18	0,5806	0,00000885	1362	10	0,3226	0,00000492
101	54	1,7419	0,00002656	1371	15	0,4839	0,00000738
111	23	0,7419	0,00001131	1380	16	0,5161	0,00000787
122	25	0,8065	0,0000123	1389	25	0,8065	0,0000123
131	32	1,0323	0,00001574	1398	24	0,7742	0,00001181
141	34	1,0968	0,00001673	1407	23	0,7419	0,00001131
150	89	2,871	0,00004378	1416	10	0,3226	0,00000492
160	12	0,3871	0,0000059	1425	14	0,4516	0,00000689
169	14	0,4516	0,00000689	1434	25	0,8065	0,0000123
178	20	0,6452	0,00000984	1443	26	0,8387	0,00001279
191	20	0,6452	0,00000984	1452	24	0,7742	0,00001181
210	32	1,0323	0,00001574	1461	25	0,8065	0,0000123
219	12	0,3871	0,0000059	1470	28	0,9032	0,00001377
229	14	0,4516	0,00000689	1479	19	0,6129	0,00000935
238	13	0,4194	0,0000064	1488	39	1,2581	0,00001919
247	26	0,8387	0,00001279	1497	36	1,1613	0,00001771
269	35	1,129	0,00001722	1506	37	1,1935	0,0000182
298	23	0,7419	0,00001131	1543	28	0,9032	0,00001377
316	24	0,7742	0,00001181	1552	36	1,1613	0,00001771
329	23	0,7419	0,00001131	1561	34	1,0968	0,00001673
338	45	1,4516	0,00002214	1570	29	0,9355	0,00001427
349	32	1,0323	0,00001574	1580	38	1,2258	0,00001869
381	57	1,8387	0,00002804	1589	33	1,0645	0,00001623
390	23	0,7419	0,00001131	1598	34	1,0968	0,00001673
400	17	0,5484	0,00000836	1607	25	0,8065	0,0000123
414	23	0,7419	0,00001131	1616	22	0,7097	0,00001082
423	25	0,8065	0,0000123	1625	26	0,8387	0,00001279
432	68	2,1935	0,00003345	1634	21	0,6774	0,00001033
443	68	2,1935	0,00003345	1644	11	0,3548	0,00000541
452	54	1,7419	0,00002656	1653	12	0,3871	0,0000059

continua

Planilha de dados de consumo utilizados para simulação da rede (continuação)

Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m^3)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m^3/s	Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m^3)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m^3/s
461	51	1,6452	0,00002509	1663	14	0,4516	0,00000689
475	57	1,8387	0,00002804	1673	19	0,6129	0,00000935
488	41	1,3226	0,00002017	1682	35	1,129	0,00001722
497	23	0,7419	0,00001131	1692	26	0,8387	0,00001279
508	25	0,8065	0,0000123	1701	28	0,9032	0,00001377
517	36	1,1613	0,00001771	1710	32	1,0323	0,00001574
531	33	1,0645	0,00001623	1719	21	0,6774	0,00001033
540	31	1	0,00001525	1728	15	0,4839	0,00000738
549	45	1,4516	0,00002214	1737	18	0,5806	0,00000885
560	51	1,6452	0,00002509	1746	19	0,6129	0,00000935
573	42	1,3548	0,00002066	1755	36	1,1613	0,00001771
583	78	2,5161	0,00003837	1764	37	1,1935	0,0000182
592	17	0,5484	0,00000836	1773	28	0,9032	0,00001377
603	58	1,871	0,00002853	1782	26	0,8387	0,00001279
612	62	2	0,0000305	1791	24	0,7742	0,00001181
621	35	1,129	0,00001722	1800	25	0,8065	0,0000123
630	23	0,7419	0,00001131	1809	33	1,0645	0,00001623
639	54	1,7419	0,00002656	1818	25	0,8065	0,0000123
650	52	1,6774	0,00002558	1827	24	0,7742	0,00001181
659	32	1,0323	0,00001574	1836	29	0,9355	0,00001427
668	12	0,3871	0,0000059	1849	18	0,5806	0,00000885
677	14	0,4516	0,00000689	1858	19	0,6129	0,00000935
686	18	0,5806	0,00000885	1867	28	0,9032	0,00001377
720	25	0,8065	0,0000123	1876	35	1,129	0,00001722
729	16	0,5161	0,00000787	1885	17	0,5484	0,00000836
739	34	1,0968	0,00001673	1894	28	0,9032	0,00001377
754	21	0,6774	0,00001033	1899	35	1,129	0,00001722
763	35	1,129	0,00001722	1908	46	1,4839	0,00002263
773	16	0,5161	0,00000787	1917	57	1,8387	0,00002804
782	24	0,7742	0,00001181	1926	85	2,7419	0,00004181
795	21	0,6774	0,00001033	1935	62	2	0,0000305
804	17	0,5484	0,00000836	1944	34	1,0968	0,00001673
813	19	0,6129	0,00000935	1953	26	0,8387	0,00001279
828	14	0,4516	0,00000689	1962	38	1,2258	0,00001869
837	14	0,4516	0,00000689	1971	10	0,3226	0,00000492
847	11	0,3548	0,00000541	1980	12	0,3871	0,0000059
856	10	0,3226	0,00000492	1989	14	0,4516	0,00000689
865	10	0,3226	0,00000492	2001	18	0,5806	0,00000885
875	12	0,3871	0,0000059	2010	25	0,8065	0,0000123
884	13	0,4194	0,0000064	2019	21	0,6774	0,00001033
897	24	0,7742	0,00001181	2028	65	2,0968	0,00003198

continua

Planilha de dados de consumo utilizados para simulação da rede (continuação)

Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m^3)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m^3/s	Nó de saída	Consumo mensal registrado em 25/01/2015 (m^3)	Consumo médio diário	Consumo de pico em m^3/s
906	18	0,5806	0,00000885	2037	32	1,0323	0,00001574
915	17	0,5484	0,00000836	2046	25	0,8065	0,0000123
924	26	0,8387	0,00001279	2055	18	0,5806	0,00000885
937	35	1,129	0,00001722	2064	19	0,6129	0,00000935
946	33	1,0645	0,00001623	2081	14	0,4516	0,00000689
955	35	1,129	0,00001722	2090	18	0,5806	0,00000885
964	24	0,7742	0,00001181	2099	32	1,0323	0,00001574
973	26	0,8387	0,00001279	2112	25	0,8065	0,0000123
982	28	0,9032	0,00001377	2126	18	0,5806	0,00000885
991	10	0,3226	0,00000492	2135	17	0,5484	0,00000836
1000	14	0,4516	0,00000689	2144	14	0,4516	0,00000689
1009	17	0,5484	0,00000836	2153	35	1,129	0,00001722
1054	25	0,8065	0,0000123	2162	36	1,1613	0,00001771
1063	28	0,9032	0,00001377	2171	25	0,8065	0,0000123
1072	26	0,8387	0,00001279	2180	14	0,4516	0,00000689
1081	32	1,0323	0,00001574	2192	19	0,6129	0,00000935
1092	12	0,3871	0,0000059	2201	17	0,5484	0,00000836
1098	15	0,4839	0,00000738	2215	18	0,5806	0,00000885
1104	17	0,5484	0,00000836	2224	28	0,9032	0,00001377
1184	18	0,5806	0,00000885	2233	14	0,4516	0,00000689
1190	14	0,4516	0,00000689	2242	21	0,6774	0,00001033
1196	14	0,4516	0,00000689	2251	32	1,0323	0,00001574
1205	15	0,4839	0,00000738	2260	14	0,4516	0,00000689
1214	13	0,4194	0,0000064	2269	19	0,6129	0,00000935
1223	25	0,8065	0,0000123	2278	17	0,5484	0,00000836
1232	56	1,8065	0,00002755	2287	21	0,6774	0,00001033
1238	52	1,6774	0,00002558	2296	30	0,9677	0,00001476
1244	13	0,4194	0,0000064	2305	32	1,0323	0,00001574
1250	34	1,0968	0,00001673	2314	14	0,4516	0,00000689
1256	25	0,8065	0,0000123	2323	19	0,6129	0,00000935
1262	35	1,129	0,00001722	2326	17	0,5484	0,00000836
1268	26	0,8387	0,00001279	2332	25	0,8065	0,0000123

Apêndice 2. Planilha de resultados obtidos na simulação sem a estação pressurizadora

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
19	-1.14e+003	-2.29	-1.19e-005	-1.58	0.407
36	-879	-1.76	-9.13e-006	-1.22	0.407
45	288	0.577	2.99e-006	0.399	0.407
46	-4.52e+003	-9.06	-4.7e-005	-6.27	0.407
67	2.87e+003	5.75	2.98e-005	3.98	0.408
76	-227	-0.454	-2.36e-006	-0.314	0.407
85	-1.53e+003	-3.06	-1.59e-005	-2.12	0.407
101	2.63e+004	52.7	0.000273	36.5	0.407
111	2.03e+004	25.5	0.000338	45.1	0.406
122	2.65e+003	5.32	2.76e-005	3.68	0.408
131	0	0	0	0	0.407
141	-2.6e+004	-52.1	-0.00027	-36.1	0.407
150	2.05e+004	25.7	0.000341	45.5	0.403
160	2.25e+003	4.52	2.34e-005	3.13	0.408
169	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.407
178	-2.49e+004	-49.9	-0.000259	-34.5	0.407
191	2.06e+004	25.8	0.000343	45.7	0.402
210	2.08e+003	4.16	2.16e-005	2.88	0.409
219	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.407
229	-2.59e+004	-51.9	-0.000269	-35.9	0.407
238	-1.24e+003	-2.49	-1.29e-005	-1.72	0.401
247	-5.72e+003	-7.16	-9.51e-005	-12.7	0.402
269	-2.66e+004	-33.3	-0.000442	-59	0.408
298	1.93e+003	3.86	2,00E-05	2.67	0.401
316	-5.95e-020	-1.19e-022	-6.18e-028	-8.25e-023	0.407
329	-1.57e+003	-3.14	-1.63e-005	-2.17	0.4
338	4.35e+003	4.36	9.05e-005	12.1	0.402
349	3.68e+004	36.9	0.000765	102	0.408
372	-4.66e+003	-9.34	-4.85e-005	-6.46	0.411
381	-2.61e+004	-52.4	-0.000272	-36.2	0.403
390	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.4
400	1.41e+003	2.83	1.47e-005	1.96	0.407
414	-2.54e+004	-51	-0.000264	-35.3	0.407
423	-2.13e+003	-4.27	-2.21e-005	-2.95	0.399
432	4.15e+003	4.16	8.64e-005	11.5	0.402
443	-3.95e+003	-7.91	-4.1e-005	-5.48	0.408
452	-2.58e+004	-51.8	-0.000269	-35.8	0.402
461	1.13e+003	2.26	1.17e-005	1.56	0.398
475	-2.51e+004	-50.3	-0.000261	-34.8	0.407
488	-2.98e+003	-5.98	-3.1e-005	-4.14	0.397
497	3.73e+003	3.74	7.75e-005	10.3	0.402

continua

Planilha de resultados obtidos na simulação sem estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
508	-3.27e+003	-6.56	-3.4e-005	-4.54	0.408
517	1.13e+003	5.65	4.69e-006	0.625	0.398
531	1.03e+003	5.17	4.29e-006	0.572	0.407
540	974	4.88	4.05e-006	0.54	0.397
549	1.41e+003	7.05	5.85e-006	0.78	0.397
560	1.6e+003	8.01	6.64e-006	0.886	0.408
573	1.32e+003	6.6	5.48e-006	0.731	0.395
583	2.44e+003	12.2	1.02e-005	1.36	0.396
592	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.397
603	1.81e+003	9.09	7.54e-006	1.01	0.408
612	1.94e+003	9.73	8.07e-006	1.08	0.397
621	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.395
630	719	3.6	2.99e-006	0.399	0.396
639	1.69e+003	8.48	7.04e-006	0.939	0.397
650	1.63e+003	8.17	6.78e-006	0.904	0.408
659	999	5.01	4.16e-006	0.554	0.397
668	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.395
677	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.394
686	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.397
720	783	3.92	3.26e-006	0.434	0.377
729	503	2.52	2.09e-006	0.279	0.397
739	1.06e+003	5.33	4.42e-006	0.59	0.394
754	656	3.29	2.73e-006	0.364	0.394
763	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.397
773	503	2.52	2.09e-006	0.279	0.366
782	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.397
795	656	3.29	2.73e-006	0.364	0.394
804	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
813	592	2.97	2.46e-006	0.328	0.393
828	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.393
837	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.397
847	344	1.72	1.43e-006	0.191	0.353
856	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.397
865	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.394
875	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.394
884	407	2.04	1.69e-006	0.226	0.393
897	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.393
906	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.394
915	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
924	815	4.08	3.39e-006	0.452	0.397
937	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.344
946	1.03e+003	5.17	4.29e-006	0.572	0.397
955	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.393
964	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.394

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação sem estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
973	815	4.08	3.39e-006	0.452	0.393
982	879	4.4	3.65e-006	0.487	0.393
991	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.393
1000	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.394
1009	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
1054	-783	-3.92	-3.26e-006	-0.434	0.393
1063	-879	-4.4	-3.65e-006	-0.487	0.394
1072	-815	-4.08	-3.39e-006	-0.452	0.393
1081	-999	-5.01	-4.16e-006	-0.554	0.393
1092	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.393
1098	377	1.51	1.96e-006	0.261	0.333
1104	428	1.71	2.22e-006	0.297	0.32
1184	453	1.82	2.36e-006	0.314	0.144
1190	351	1.41	1.83e-006	0.244	0.086
1196	351	1.41	1.83e-006	0.244	0.0209
1205	471	2.36	1.96e-006	0.261	0.393
1214	407	2.04	1.69e-006	0.226	0.393
1223	783	3.92	3.26e-006	0.434	0.392
1232	1.75e+003	8.77	7.28e-006	0.971	0.393
1238	1.3e+003	5.23	6.78e-006	0.904	0.273
1244	326	1.31	1.69e-006	0.226	0.293
1250	851	3.41	4.42e-006	0.59	0.288
1256	626	2.51	3.26e-006	0.434	0.271
1262	876	3.51	4.55e-006	0.607	0.25
1268	652	2.61	3.39e-006	0.452	0.114
1274	851	3.41	4.42e-006	0.59	0.139
1284	626	2.51	3.26e-006	0.434	0.151
1293	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.393
1302	592	2.97	2.46e-006	0.328	0.393
1311	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.392
1353	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1362	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1371	188	0.378	1.96e-006	0.261	0.392
1380	201	0.403	2.09e-006	0.279	0.393
1389	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.393
1398	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1407	288	0.577	2.99e-006	0.399	0.392
1416	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1425	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1434	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.393
1443	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1452	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1461	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1470	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação sem estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
1479	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1488	489	0.98	5.08e-006	0.678	0.393
1497	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1506	463	0.929	4.82e-006	0.643	0.392
1543	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1552	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1561	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1570	364	0.73	3.79e-006	0.505	0.393
1580	476	0.954	4.95e-006	0.66	0.392
1589	413	0.827	4.29e-006	0.572	0.392
1598	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1607	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1616	275	0.551	2.86e-006	0.381	0.392
1625	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1634	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.391
1644	138	0.276	1.43e-006	0.191	0.392
1653	150	0.301	1.56e-006	0.208	0.392
1663	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1673	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1682	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392
1692	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1701	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1710	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.391
1719	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.392
1728	188	0.378	1.96e-006	0.261	0.392
1737	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
1746	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1755	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1764	463	0.929	4.82e-006	0.643	0.391
1773	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1782	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1791	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1800	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1809	413	0.827	4.29e-006	0.572	0.392
1818	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
1827	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1836	364	0.73	3.79e-006	0.505	0.392
1849	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
1858	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1867	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1876	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.391
1885	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392
1894	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1899	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação sem estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
1908	576	1.15	5.98e-006	0.798	0.392
1917	713	1.43	7.41e-006	0.989	0.391
1926	1.06e+003	2.13	1.11e-005	1.48	0.391
1935	777	1.56	8.07e-006	1.08	0.392
1944	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1953	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.391
1962	476	0.954	4.95e-006	0.66	0.391
1971	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1980	150	0.301	1.56e-006	0.208	0.392
1989	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2001	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2010	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
2019	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.392
2028	815	1.63	8.47e-006	1.13	0.391
2037	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.391
2046	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
2055	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
2064	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.391
2081	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2090	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
2099	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.392
2112	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
2126	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2135	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.391
2144	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
2153	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392
2162	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.391
2171	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
2180	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2192	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.391
2201	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392
2215	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2224	-20.4	-0.0408	-2.12e-007	-0.0283	0.391
2233	-3.18e+003	-6.37	-3.31e-005	-4.41	0.392
2242	-593	-1.19	-6.17e-006	-0.823	0.391
2251	-3,00E+03	-6.02	-3.12e-005	-4.17	0.392
2260	2.43e+003	4.87	2.53e-005	3.37	0.392
2269	2.19e+003	4.39	2.28e-005	3.04	0.392
2278	-2.19e+003	-4.39	-2.28e-005	-3.04	0.392
2287	1.72e+003	3.44	1.78e-005	2.38	0.392
2296	-1.72e+003	-3.44	-1.78e-005	-2.38	0.392
2305	940	1.88	9.77e-006	1.3	0.392
2314	764	1.53	7.94e-006	1.06	0.392
2323	-764	-1.53	-7.94e-006	-1.06	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação sem estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
2326	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
2332	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392

Apêndice 3. Planilha de resultados obtidos na simulação com a estação pressurizadora

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
19	-1.14e+003	-2.29	-1.19e-005	-1.58	0.407
36	-879	-1.76	-9.13e-006	-1.22	0.407
45	288	0.577	2.99e-006	0.399	0.407
46	-4.52e+003	-9.06	-4.7e-005	-6.27	0.407
67	2.87e+003	5.75	2.98e-005	3.98	0.408
76	-227	-0.454	-2.36e-006	-0.314	0.407
85	-1.53e+003	-3.06	-1.59e-005	-2.12	0.407
101	2.63e+004	52.7	0.000273	36.5	0.407
111	2.03e+004	25.5	0.000338	45.1	0.406
122	2.65e+003	5.32	2.76e-005	3.68	0.408
131	0	0	0	0	0.407
141	-2.6e+004	-52.1	-0.00027	-36.1	0.407
150	2.05e+004	25.7	0.000341	45.5	0.403
160	2.25e+003	4.52	2.34e-005	3.13	0.408
169	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.407
178	-2.49e+004	-49.9	-0.000259	-34.5	0.407
191	2.06e+004	25.8	0.000343	45.7	0.402
210	2.08e+003	4.16	2.16e-005	2.88	0.409
219	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.407
229	-2.59e+004	-51.9	-0.000269	-35.9	0.407
238	-1.24e+003	-2.49	-1.29e-005	-1.72	0.401
247	-5.72e+003	-7.16	-9.51e-005	-12.7	0.402
269	-2.66e+004	-33.3	-0.000442	-59	0.408
298	1.93e+003	3.86	2,00E-05	2.67	0.401
316	-5.95e-020	-1.19e-022	-6.18e-028	-8.25e-023	0.407
329	-1.57e+003	-3.14	-1.63e-005	-2.17	0.4
338	4.35e+003	4.36	9.05e-005	12.1	0.402
349	3.68e+004	36.9	0.000765	102	0.408
372	-4.66e+003	-9.34	-4.85e-005	-6.46	0.411
381	-2.61e+004	-52.4	-0.000272	-36.2	0.403
390	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.4
400	1.41e+003	2.83	1.47e-005	1.96	0.407
414	-2.54e+004	-51	-0.000264	-35.3	0.407
423	-2.13e+003	-4.27	-2.21e-005	-2.95	0.399
432	4.15e+003	4.16	8.64e-005	11.5	0.402
443	-3.95e+003	-7.91	-4.1e-005	-5.48	0.408
452	-2.58e+004	-51.8	-0.000269	-35.8	0.402
461	1.13e+003	2.26	1.17e-005	1.56	0.398
475	-2.51e+004	-50.3	-0.000261	-34.8	0.407
488	-2.98e+003	-5.98	-3.1e-005	-4.14	0.397
497	3.73e+003	3.74	7.75e-005	10.3	0.402

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação com estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
508	-3.27e+003	-6.56	-3.4e-005	-4.54	0.408
517	1.13e+003	5.65	4.69e-006	0.625	0.398
531	1.03e+003	5.17	4.29e-006	0.572	0.407
540	974	4.88	4.05e-006	0.54	0.397
549	1.41e+003	7.05	5.85e-006	0.78	0.397
560	1.6e+003	8.01	6.64e-006	0.886	0.408
573	1.32e+003	6.6	5.48e-006	0.731	0.395
583	2.44e+003	12.2	1.02e-005	1.36	0.396
592	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.397
603	1.81e+003	9.09	7.54e-006	1.01	0.408
612	1.94e+003	9.73	8.07e-006	1.08	0.397
621	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.395
630	719	3.6	2.99e-006	0.399	0.396
639	1.69e+003	8.48	7.04e-006	0.939	0.397
650	1.63e+003	8.17	6.78e-006	0.904	0.408
659	999	5.01	4.16e-006	0.554	0.397
668	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.395
677	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.394
686	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.397
720	783	3.92	3.26e-006	0.434	0.377
729	503	2.52	2.09e-006	0.279	0.397
739	1.06e+003	5.33	4.42e-006	0.59	0.394
754	656	3.29	2.73e-006	0.364	0.394
763	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.397
773	503	2.52	2.09e-006	0.279	0.366
782	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.397
795	656	3.29	2.73e-006	0.364	0.394
804	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
813	592	2.97	2.46e-006	0.328	0.393
828	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.393
837	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.397
847	344	1.72	1.43e-006	0.191	0.353
856	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.397
865	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.394
875	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.394
884	407	2.04	1.69e-006	0.226	0.393
897	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.393
906	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.394
915	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
924	815	4.08	3.39e-006	0.452	0.397
937	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.344
946	1.03e+003	5.17	4.29e-006	0.572	0.397
955	1.09e+003	5.49	4.55e-006	0.607	0.393
964	751	3.76	3.12e-006	0.417	0.394

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação com estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
973	815	4.08	3.39e-006	0.452	0.393
982	879	4.4	3.65e-006	0.487	0.393
991	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.393
1000	439	2.2	1.83e-006	0.244	0.394
1009	535	2.68	2.22e-006	0.297	0.393
1054	-783	-3.92	-3.26e-006	-0.434	0.393
1063	-879	-4.4	-3.65e-006	-0.487	0.394
1072	-815	-4.08	-3.39e-006	-0.452	0.393
1081	-999	-5.01	-4.16e-006	-0.554	0.393
1092	376	1.88	1.56e-006	0.208	0.393
1098	377	1.51	1.96e-006	0.261	0.333
1104	428	1.71	2.22e-006	0.297	0.32
1184	453	1.82	2.36e-006	0.314	0.144
1190	351	1.41	1.83e-006	0.244	0.086
1196	351	1.41	1.83e-006	0.244	0.0209
1205	471	2.36	1.96e-006	0.261	0.393
1214	407	2.04	1.69e-006	0.226	0.393
1223	783	3.92	3.26e-006	0.434	0.392
1232	1.75e+003	8.77	7.28e-006	0.971	0.393
1238	1.3e+003	5.23	6.78e-006	0.904	0.273
1244	326	1.31	1.69e-006	0.226	0.293
1250	851	3.41	4.42e-006	0.59	0.288
1256	626	2.51	3.26e-006	0.434	0.271
1262	876	3.51	4.55e-006	0.607	0.25
1268	652	2.61	3.39e-006	0.452	0.114
1274	851	3.41	4.42e-006	0.59	0.139
1284	626	2.51	3.26e-006	0.434	0.151
1293	567	2.84	2.36e-006	0.314	0.393
1302	592	2.97	2.46e-006	0.328	0.393
1311	312	1.56	1.3e-006	0.173	0.392
1353	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1362	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1371	188	0.378	1.96e-006	0.261	0.392
1380	201	0.403	2.09e-006	0.279	0.393
1389	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.393
1398	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1407	288	0.577	2.99e-006	0.399	0.392
1416	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1425	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1434	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.393
1443	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1452	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1461	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1470	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação com estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m³/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
1479	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1488	489	0.98	5.08e-006	0.678	0.393
1497	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1506	463	0.929	4.82e-006	0.643	0.392
1543	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1552	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1561	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1570	364	0.73	3.79e-006	0.505	0.393
1580	476	0.954	4.95e-006	0.66	0.392
1589	413	0.827	4.29e-006	0.572	0.392
1598	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1607	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1616	275	0.551	2.86e-006	0.381	0.392
1625	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1634	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.391
1644	138	0.276	1.43e-006	0.191	0.392
1653	150	0.301	1.56e-006	0.208	0.392
1663	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
1673	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1682	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392
1692	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1701	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1710	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.391
1719	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.392
1728	188	0.378	1.96e-006	0.261	0.392
1737	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
1746	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1755	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.392
1764	463	0.929	4.82e-006	0.643	0.391
1773	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1782	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.392
1791	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1800	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
1809	413	0.827	4.29e-006	0.572	0.392
1818	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
1827	300	0.602	3.12e-006	0.417	0.392
1836	364	0.73	3.79e-006	0.505	0.392
1849	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
1858	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
1867	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1876	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.391
1885	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392
1894	351	0.704	3.65e-006	0.487	0.392
1899	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação com estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
1908	576	1.15	5.98e-006	0.798	0.392
1917	713	1.43	7.41e-006	0.989	0.391
1926	1.06e+003	2.13	1.11e-005	1.48	0.391
1935	777	1.56	8.07e-006	1.08	0.392
1944	425	0.852	4.42e-006	0.59	0.392
1953	326	0.653	3.39e-006	0.452	0.391
1962	476	0.954	4.95e-006	0.66	0.391
1971	125	0.25	1.3e-006	0.173	0.392
1980	150	0.301	1.56e-006	0.208	0.392
1989	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2001	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2010	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
2019	262	0.526	2.73e-006	0.364	0.392
2028	815	1.63	8.47e-006	1.13	0.391
2037	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.391
2046	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.392
2055	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
2064	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.391
2081	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2090	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.392
2099	400	0.801	4.16e-006	0.554	0.392
2112	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
2126	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2135	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.391
2144	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.392
2153	438	0.878	4.55e-006	0.607	0.392
2162	451	0.903	4.69e-006	0.625	0.391
2171	313	0.628	3.26e-006	0.434	0.391
2180	176	0.352	1.83e-006	0.244	0.391
2192	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.391
2201	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392
2215	227	0.454	2.36e-006	0.314	0.391
2224	-20.4	-0.0408	-2.12e-007	-0.0283	0.391
2233	-3.18e+003	-6.37	-3.31e-005	-4.41	0.392
2242	-593	-1.19	-6.17e-006	-0.823	0.391
2251	-3,00E+03	-6.02	-3.12e-005	-4.17	0.392
2260	2.43e+003	4.87	2.53e-005	3.37	0.392
2269	2.19e+003	4.39	2.28e-005	3.04	0.392
2278	-2.19e+003	-4.39	-2.28e-005	-3.04	0.392
2287	1.72e+003	3.44	1.78e-005	2.38	0.392
2296	-1.72e+003	-3.44	-1.78e-005	-2.38	0.392
2305	940	1.88	9.77e-006	1.3	0.392
2314	764	1.53	7.94e-006	1.06	0.392
2323	-764	-1.53	-7.94e-006	-1.06	0.392

Continua

Planilha de resultados obtidos na simulação com estação pressurizadora (continuação)

Elements	Reynolds Number	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/s)	Mass flow rate (kg/s)	Pressure (Mpa)
2326	237	0.475	2.46e-006	0.328	0.392
2332	214	0.429	2.22e-006	0.297	0.392