



VICTOR BUONO SILVA BAPTISTA

**USO DO EPANET 2.0 NA AVALIAÇÃO
HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO
POR PIVÔ CENTRAL**

LAVRAS – MG

2016

VICTOR BUONO SILVA BAPTISTA

**USO DO EPANET 2.0 NA AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Sistemas de Irrigação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. PhD Alberto Colombo
Orientador

**Lavras – MG
2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Baptista, Victor Buono da Silva.

Uso do EPANET 2.0 na Avaliação Hidráulica de Sistemas de
Irrigação por Pivô Central / Victor Buono da Silva Baptista. - 2016.
110 p. : il.

Orientador(a): Alberto Colombo.

.
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. EPANET 20. 2. Distribuição espacial de pressão. 3.
Simulação hidráulica. I. Colombo, Alberto . . II. Título.

VICTOR BUONO SILVA BAPTISTA

**USO DO EPANET 2.0 NA AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL**

**USE THE EPANET 2.0 ON OF HYDRAULIC EVALUATION OF
CENTRAL PIVOT IRRIGATION SYSTEMS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Engenharia e Manejo de Sistemas de Irrigação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 22 de dezembro de 2016

Prof. PhD Alberto Colombo

DEG/UFLA

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

DEG/UFLA

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria

CDTEC/UFPel

Prof. PhD Alberto Colombo
Orientador

**Lavras – MG
2016**

AGRADECIMENTOS

A minha família e aos meus pais, Rogério e Beth, e aos meus irmãos Fábio e Thais, pelo amor e apoio incondicional, em todas as minhas decisões nas diferentes etapas da minha vida.

À Universidade Federal de Lavras, desde 2009, responsável pela minha formação profissional e pessoal, especialmente ao Departamento de Engenharia, Núcleo Didático-Científico de Engenharia de Água e Solo, pela oportunidade.

Ao professor Alberto Colombo, pela confiança, orientação, amizade, paciência e disposição para ajudar.

Aos professores Jacinto de Assunção Carvalho e Lessandro Coll Faria pelas importantes contribuições para realização deste trabalho e disponibilidade em participar da banca de defesa.

Aos professores Fábio Ponciano de Deus e Lívia Alves Alvarenga pelas contribuições no exame de qualificação.

Aos amigos da República La Tutcha e K-Zona, pelos momentos de descontração e moradia na vida de Lavras.

Em especial, à Mariane, pelo companheirismo, amor, apoio e compreensão em todos os momentos.

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia; e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

A utilização do software EPANET 2.0 na análise hidráulica de sistemas de irrigação do tipo pivô central tem sido limitada pela falta de ferramentas computacionais que permitam acelerar o tedioso processo de edição dos dados de entrada requeridos pelo EPANET 2.0. Visando acelerar esse processo de edição dos dados de entrada do EPANET 2.0, foi desenvolvido um conjunto de planilhas do Microsoft Excel que, após agrupadas, compõem o arquivo texto de dados de entrada requerido pelo EPANET 2.0, para simulação da distribuição da vazão e da pressão ao longo das tubulações que compõem sistemas de irrigação do tipo pivô central. A eficácia da ferramenta de edição desenvolvida foi demonstrada na simulação de um pivô central de 434 m de comprimento, que cobre uma área de aproximadamente 60 ha com 190 conjuntos válvula reguladora de pressão-emissor. Neste caso particular, com apenas 130 dados de entrada nas planilhas desenvolvidas foi possível gerar os 3.884 dados de entrada requeridos pelo EPANET 2.0. A confiabilidade dos arquivos de entrada gerados pelo conjunto de planilhas desenvolvidas foi avaliada através da comparação de valores simulados com valores calculados analiticamente. Para o caso do pivô de 434 m de comprimento considerado neste estudo, a perda de carga total (13,27 m) calculada pelo EPANET 2.0 apresentou um desvio máximo de 0,35% em relação aos métodos analíticos. As frações da perda de carga total, calculadas pelo EPANET 2.0 para os primeiros 25, 50, 75 e 100 % do comprimento total da lateral, apresentaram um desvio máximo de 0,63 % em relação aos métodos analíticos. As simulações foram também avaliadas quanto ao posicionamento do ponto de mínima pressão ao longo do comprimento da linha lateral de 434 m. Foram considerados cinco valores de declividade uniforme da linha lateral, que, segundo o método analítico de cálculo, posicionariam o ponto de mínima pressão à distâncias de, respectivamente, 300, 250, 150, 100 e 0 m do ponto de entrada de água na linha lateral. Em razão da precisão dos valores de carga de pressão apresentados nos arquivos de saída do EPANET 2.0, estas simulações indicaram a ocorrência dos menores valores de pressão da linha lateral ao longo de trechos delimitados por distâncias do ponto de entrada de água na lateral que variavam entre, respectivamente, 291,9 m e 305,6 m, 239,4 m e 257,6 m, 140,8 m e 150 m, 78,9 m e 106,4 m e 0 m e 27,8m. Os arquivos de entrada foram ainda testados em outra linha lateral, de apenas 73 m de comprimento, dotada de um canhão final cuja vazão foi exageradamente alterada, de forma a atingir 30, 50 e 70 % da vazão de entrada da linha lateral. Neste caso, os valores de perda de carga total simulados pelo EPANET 2.0 apresentaram um desvio máximo de 0,048 % em relação ao método analítico considerado. Estes resultados demonstram a confiabilidade do uso do EPANET 2.0 em conjunto com as ferramentas de edição desenvolvidas

para a análise hidráulica de linhas laterais de sistemas de irrigação do tipo pivô central.

Palavras-chave: EPANET 2.0. Pivô central. Distribuição espacial de pressão. Simulação hidráulica.

ABSTRACT

The use of EPANET 2.0 software in hydraulic analysis of center pivot irrigation systems has been limited by the lack of computational tools to accelerate the tedious process of editing the input data required by EPANET 2.0. In order to speed up this process of editing EPANET 2.0 input data, a set of Microsoft Excel spreadsheets have been developed. These spreadsheets, after being grouped together, compose the input data text file required by EPANET 2.0 for simulating the flow and pressure distribution along the pipes that make up center pivot irrigation systems. The efficacy of the developed editing tool was demonstrated in the simulation of a 434m long center pivot lateral line, which covers an area of approximately 60 ha with 190 pressure regulator valve-emitter sets. In this particular case, with only 130 input data in the developed spreadsheets, it was possible to generate the 3,884 input data required by EPANET 2.0. The reliability of the input files generated by the set of developed worksheets was evaluated by comparing simulated values with analytically calculated values. For the 434 m long center pivot lateral line considered in this study, the total head loss (13.27 m) calculated by EPANET 2.0 showed a maximum deviation of 0.35% over the analytical methods. The fractions of the total head loss, calculated by EPANET 2.0 for the first 25, 50, 75 and 100% of the total lateral length, showed a maximum deviation of 0.63% over the analytical methods. The simulations were also evaluated for the location capacity of the minimum line pressure point of 434 m in length. The simulations were also evaluated for the positioning of the minimum pressure point along the length of the of 434 m long center pivot lateral line. Five uniform line slope values were considered, which, according to the analytical method of calculation, would position the point of minimum pressure at distances of 300, 250, 150, 100 and 0 m from the water inlet point on the lateral line. Due to the precision of the pressure load values presented in the EPANET 2.0 output files, these simulations indicated the occurrence of the lowest lateral line pressure values along stretches delimited by distances from the lateral water inlet point that varied between 291.9 m and 305.6 m, 239.4 m and 257.6 m, 140.8 m and 150 m, 78.9 m and 106.4 m and 0 m and 27.8 m respectively. The input files were also tested on another center pivot lateral line, 73 m in length, which was endowed with an end gun, whose flow was greatly increased, in order to reach values corresponding to 30, 50 and 70 % of the inflow of this lateral line. In this case, the total head loss values simulated by EPANET 2.0 showed a maximum deviation of 0.048 % in relation to the analytical method considered. These results demonstrate the reliability of using EPANET 2.0 in conjunction with the editing tools developed for the hydraulic analysis of lateral lines of center pivot irrigation systems.

Keywords: EPANET 2.0. Center Pivot. Spatial Pressure Distribution. Hydraulic Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de pivôs centrais no Brasil	20
Figura 2 - Esquema da área circular irrigada por um pivô central.....	23
Figura 3 - Representação da movimentação independente de cada torre de um sistema de pivô central.....	24
Figura 4 - Conjunto motorreductor de uma torre móvel de um sistema de irrigação por pivô central	25
Figura 5 - Efeito da inclinação do terreno no sistema Pivô Central.	27
Figura 6 - Rotina do VBA de cálculo da função hipergeométrica.....	33
Figura 7 - Valor do fator de correção da perda de carga $F(rs/Lh)$ em pivô central para diferentes frações do comprimento do raio irrigado e valores do expoente ev	35
Figura 8 - Curva de perda de carga total adimensional ao longo da linha lateral do pivô central	35
Figura 9 - Distribuição espacial da pressão de um pivô central em três posições distintas da linha lateral (aclive de 5%, em nível, e declive de 5%).	37
Figura 10 - Curvas de desempenho de uma válvula reguladora de pressão utilizada na base dos emissores de um pivô central. Para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, é indicada a faixa recomendável de pressões de entrada	39
Figura 11 - Exemplo de curvas de bombas no EPANET.....	45
Figura 12 - Imagem de satélite da Fazenda Invernada, Bom Sucesso – MG, local da área experimental do projeto.....	47
Figura 13 - Valores da taxa de perda de carga referentes ao ponto de pressão mínima do pivô central real	53
Figura 14 - Valores propostos de vazão no canhão final e de vazão total no pivô central teórico	53

Figura 15 - Planilha Menu do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0	56
Figura 16 - Planilha Sistema de Adução do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0	57
Figura 17 - Planilha Vãos do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0	58
Figura 18 - Planilha Bocais e Válvulas do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0	59
Figura 19 - Comparação da quantidade de dados de entrada necessário para simulação hidráulica do pivô central real no EPANET 2.0 e na ferramenta de edição desenvolvida.....	61
Figura 20 - Janela do EPANET 2.0 com a simulação do pivô central real, sem canhão final, município de Bom Sucesso/MG.....	62
Figura 21 - Janela do EPANET 2.0 com a simulação do pivô central teórico, com canhão final.....	62
Figura 22 - Comparação da distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central real	63
Figura 23 - Distribuição de vazão dos emissores com bocal comercial utilizados no campo e com bocal ideal.....	64
Figura 24 - Simulações hidráulicas no EPANET 2.0.....	66
Figura 25 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral arqueada, do pivô central real, com efeito da influência do pendural	67
Figura 26 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com efeito da influência do arqueamento da linha lateral	68

Figura 27 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com efeito da influência do arqueamento da linha lateral	70
Figura 28 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com escala reduzida	72
Figura 29 - Posição da mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central, com influência do arqueamento.	74
Figura 30 - Posição da mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central, sem influência do arqueamento	75
Figura 31 - Comparação da localização do ponto de mínima pressão do pivô central com e sem arqueamento da linha lateral, para diferentes declividades	75
Figura 32 - Localização do ponto de mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, sob diferentes declividades (continua na próxima página)	77
Figura 33 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô para diferentes vazões no canhão final comparado com o método analítico apresentado por Tabuada (2011).....	80
Figura 34 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 30% da vazão total	81
Figura 35 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 50% da vazão total	82
Figura 36 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 70% da vazão total	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da perda de carga e fator de correção da perda de carga para linha lateral do pivô central real	71
Tabela 2 - Valores de fração de perda de carga ao longo da linha lateral do pivô central no EPANET 2.0 comparados com diferentes métodos analíticos	71
Tabela 3 - Valores de perda de carga apresentados pelo EPANET 2.0 e pelo método analítico para diferentes frações de vazão do canhão final em relação à vazão na entrada do pivô central	84
Tabela 4- Métodos de determinação do fator de atrito, f , utilizado pelo EPANET.	92
Tabela 5 - Fórmulas utilizadas, no Sistema Internacional, para determinação das perdas de carga em condutos forçados, utilizadas pelo programa EPANET 2.0	93
Tabela 6 - Fórmulas utilizadas, no Sistema Inglês, para determinação das perdas de carga em condutos forçados, utilizadas pelo programa EPANET 2.0	93
Tabela 7 - Coeficiente de material para as fórmulas de perda de carga para tubulações novas	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Sistema mecanizado de irrigação do tipo pivô central	19
2.1.1	Funcionamento do pivô central	22
2.1.2	Características hidráulicas do pivô central	27
2.2	Simulação de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central	40
2.3	Utilização da ferramenta EPANET 2.0 para simulação do pivô central.....	41
2.3.1	Funcionamento dos principais componentes.....	43
3	MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1	Características técnicas do equipamento pivô central.....	47
3.2	Simulação de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central	49
3.3	Utilização da ferramenta Excel para simulação do pivô central	49
3.4	Utilização da ferramenta EPANET para simulação do pivô central	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Programa de edição de dados de entrada para EPANET 2.0	55
4.2	Utilização da ferramenta EPANET 2.0 para simulação hidráulica de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central	61
4.2.1	Pivô central real – vazão dos emissores.....	63
4.2.2	Pivô central real – distribuição de pressão	65

4.2.3	Pivô central real - Localização da posição do ponto de pressão mínima	73
4.2.4	Pivô central teórico	79
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
	APÊNDICES	90
	APÊNDICE A - Simulação hidráulica no EPANET 2.0 (Rossman, 2000)	90
	APÊNDICE B - Determinação da perda de carga no EPANET 2.0.....	92
	ANEXO	96

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização do sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo pivô central vem crescendo nos últimos anos. Esse crescimento deve-se às inúmeras vantagens desse sistema, que permite a irrigação de grandes áreas com pouca mão de obra. O crescimento da área irrigada por esse tipo de sistema torna ainda mais relevante o estudo do comportamento hidráulico. O detalhamento do comportamento hidráulico, ao longo de toda a rede de distribuição de água de um pivô central, permite o aprimoramento de seu dimensionamento.

De acordo com Lucena (2012), com o auxílio de modelos computacionais é possível analisar diferentes alternativas de dimensionamento. A análise dessas diferentes alternativas permite alcançar um desempenho hidráulico mais adequado com menores custos.

Existem no mercado diversos softwares para simulação hidráulica de sistemas de irrigação e redes de distribuição de água (AquaFlow, HydroCalq, IrriCAD, IRRIGATE plus, Irri-Maker, IRRIPRO, Land FX, Rain CAD, WCADI, USPA EPANET). Dentre as diversas alternativas disponíveis no mercado, o EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000) tem sido a opção escolhida por diversos pesquisadores e centros de pesquisa em hidráulica ao redor do mundo.

Além da sua larga utilização em universidades e institutos de pesquisa voltados ao estudo da hidráulica, destaca – se, entre as vantagens do EPANET 2.0, o fato de ser um software de relativamente fácil utilização, com livre distribuição e de código aberto.

A eficácia da utilização do EPANET 2.0 na simulação do comportamento de redes hidráulicas de abastecimento motivou o estudo de sua aplicação em sistemas de irrigação do tipo pivô central. A utilização desse software permite simplificar o processo de cálculo hidráulico.

O EPANET 2.0 permite a fácil visualização da distribuição espacial da pressão, da vazão, da velocidade média do fluxo e da taxa de perda de carga. Esse aplicativo também apresenta estes valores na forma de tabelas e gráficos, que permitem uma análise detalhada de parâmetros hidráulicos, ao longo de toda a rede hidráulica.

No entanto, o EPANET 2.0 requer uma trabalhosa edição de variáveis incluindo, entre outras,: a descrição de cada nó que compõe a rede de distribuição de água, e suas respectivas cotas geométricas; a descrição dos nós de início e fim de cada trecho de tubulação, e de seus respectivos valores de comprimento, diâmetro, rugosidade da parede; a descrição dos coeficientes da equação vazão pressão de cada um dos nós representativos dos emissores; descrição dos nós de início e fim de cada válvula reguladora de pressão, com seus respectivos valores de diâmetro e pressão de controle (setting); descrição dos nós de início e fim da bomba, com pares de valores de vazão e pressão representativos da curva vazão altura manométrica total; e descrição da cota do reservatório.

A utilização do EPANET 2.0 na análise hidráulica de projetos de sistemas de irrigação de aspersão do tipo pivô central tem sido limitada pela falta de ferramentas computacionais que permitam acelerar o tedioso processo de edição os dados de entrada requeridos nesse tipo de análise.

Dessa forma, objetivou-se, neste trabalho, desenvolver e avaliar um conjunto de rotinas, no Visual Basic for Applications (VBA) do Excel, para a edição dos dados de entrada requeridos para a análise hidráulica de projetos de sistemas de irrigação de aspersão do tipo pivô central com auxílio do software EPANET 2.0, considerando:

- i) A influência do arqueamento da linha lateral de um pivô central na análise da distribuição espacial de pressão;
- ii) A influência de tubos de descida (pendurais) na distribuição espacial de pressão;

- iii) A influência da declividade do terreno no posicionamento do ponto de mínima pressão, ao longo da linha lateral do pivô central;
- iv) A influência da fração da vazão total no final da linha (fração da vazão do canhão) na distribuição espacial da fração da perda de carga total, ao longo da linha lateral do pivô central.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

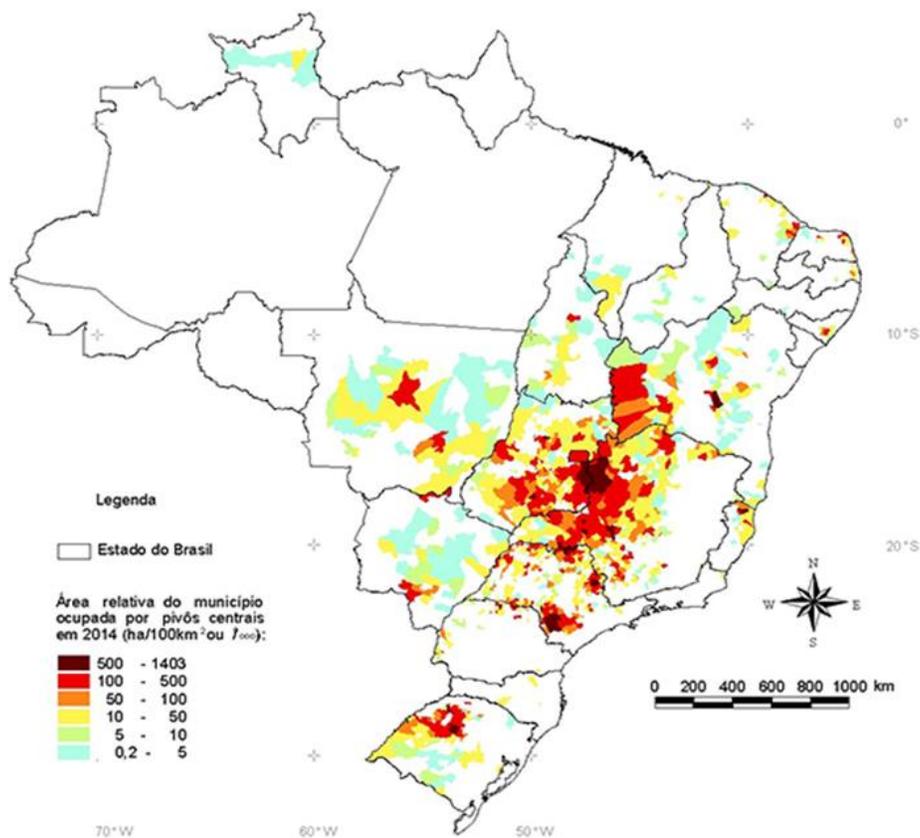
2.1 Sistema mecanizado de irrigação do tipo pivô central

Na irrigação por aspersão, a água é aplicada ao solo sob a forma de chuva artificial, por causa do fracionamento do jato de água em grande número de gotas, devido a sua passagem sob pressão, através de pequenos orifícios ou bocais. Destacam-se, nesse método, os sistemas: convencional, autopropelido, pivô central e linear móvel (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Neste trabalho, foi abordado o sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

De acordo com Paulino et al. (2011), o sistema mecanizado de irrigação por aspersão utilizando pivô central, representa uma parcela em torno de 20% da área irrigada no Brasil. No Levantamento de Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil, feito pela Agência Nacional de Águas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016), há maior concentração de pivôs centrais na região central do Brasil, destacando o oeste da Bahia e Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul, fato que está representado na Figura 1.

Figura 1 - Concentração de pivôs centrais no Brasil



Fonte: ANA, 2016

De acordo com Keller e Bliesner (1990), o sistema mecanizado de irrigação do tipo pivô central é mecanicamente confiável e simples de operar, embora, como qualquer maquinaria, a manutenção sistemática seja necessária. Além disso, foram desenvolvidos vários pacotes de injeção que proporcionam aplicações de água muito uniformes. Estão disponíveis emissores de baixa pressão onde a capacidade de infiltração do solo e/ou o armazenamento superficial são

suficientemente elevados. Para a topografia em declive ou terreno montanhoso, dispositivos de controle de fluxo ou de pressão estão disponíveis. Algumas das principais vantagens das máquinas de irrigação de pivô central são:

- A distribuição de água é simplificada, por meio da utilização da articulação da linha lateral em torno de um ponto fixo, o ponto pivô;
- Orientação e alinhamento são controlados a partir do ponto pivô;
- A uniformidade de aplicação de água relativamente elevada é alcançada sob os emissores de movimento contínuo;
- Após a conclusão de uma irrigação, o sistema está no ponto de partida da próxima irrigação;
- O gerenciamento da irrigação é simplificado, pois a aplicação de água é precisa;
- É possível a aplicação de fertilizantes e outros produtos químicos através da água de irrigação;
- A flexibilidade da operação torna possível o gerenciamento do consumo de energia elétrica.

De acordo com Keller e Bliesner (1990), do ponto de vista da aplicação de água, os pivôs centrais têm as seguintes desvantagens:

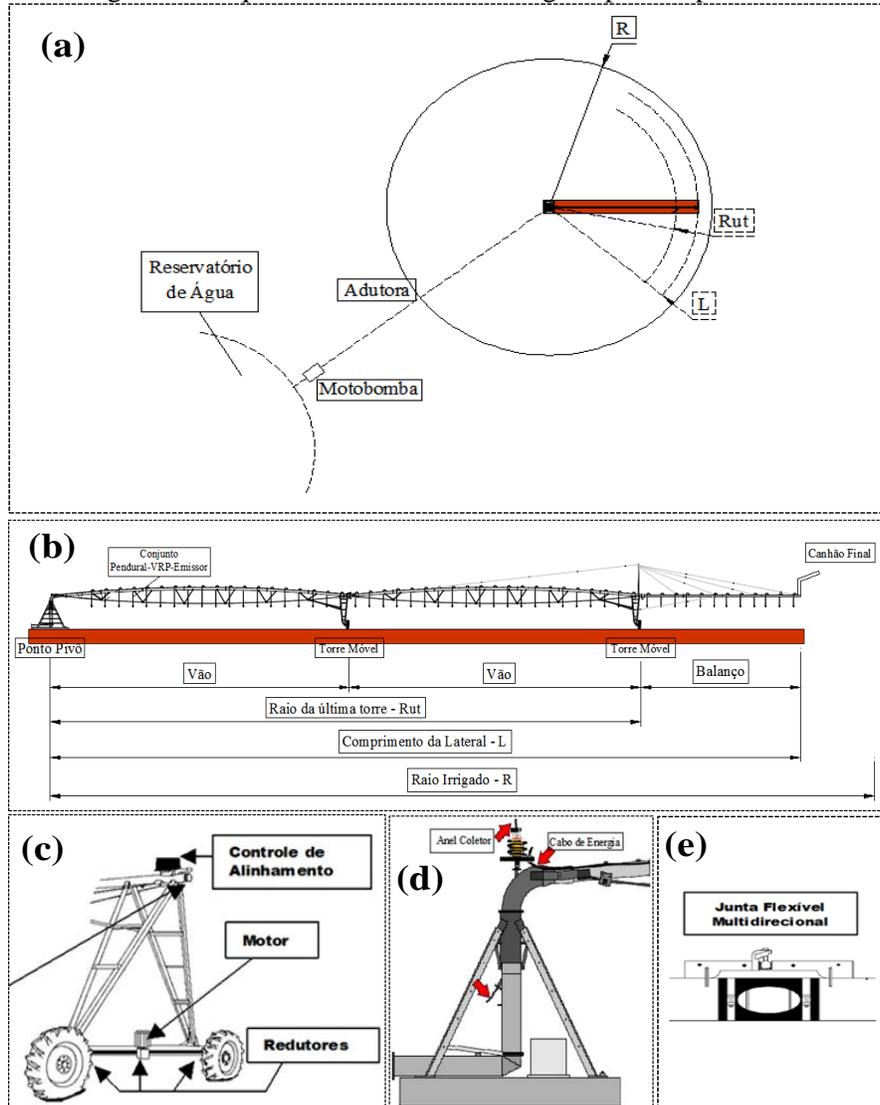
- Considerando o ponto pivô em uma área quadrada, cerca de 80% da área será irrigada, a menos que equipamentos especiais (canhão final) sejam instalados para irrigação dos cantos, porém isso aumenta consideravelmente o custo e a complexidade do sistema;
- A taxa de aplicação de água na extremidade do pivô central é muito elevada, em alguns sistemas podem ser superiores a 100 mm/h, dependendo da configuração dos bocais;

- Relativamente, aplicações leves e frequentes devem ser usadas em todos os solos, exceto os mais arenosos, para reduzir ou eliminar os problemas de escoamento associados com essas altas taxas de aplicação. Em casos extremos, para evitar o escoamento, pode até ser necessário ajustar a velocidade de deslocamento da linha lateral do pivô central, para que seja mais rápida do que uma volta por dia. Isso aumenta as perdas por evaporação e os custos de manutenção do pivô central e pode diminuir o rendimento da cultura;
- Porque cada tubulação adicional, aumenta o raio, irrigando uma grande área concêntrica, a maior parte da água deve ser levada para a extremidade da lateral. Isso resulta em altas perdas de carga na tubulação.
- Em terrenos inclinados, a pressão de operação ao longo da linha lateral variará, significativamente, dependendo se estiver em auge ou declive. Isso pode resultar em grandes variações na vazão, a menos que sejam usadas válvulas reguladoras de pressão.

2.1.1 Funcionamento do pivô central

O sistema mecanizado do tipo pivô central, conforme mostrado na Figura 2. O sistema é constituído de uma linha lateral móvel, com vários emissores, suspensa por torres sobre rodas, que irriga uma área circular por meio da rotação da linha lateral de aspersão em torno de um ponto fixo. Ao final da última torre, estende-se um lance de tubulação em balanço e que, em alguns casos, são dotadas de um canhão final. As torres são dotadas de motores elétricos que proporcionam a cada torre um movimento de giro independente, de modo a proporcionar um alinhamento da linha lateral. (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Figura 2 - Esquema da área circular irrigada por um pivô central.



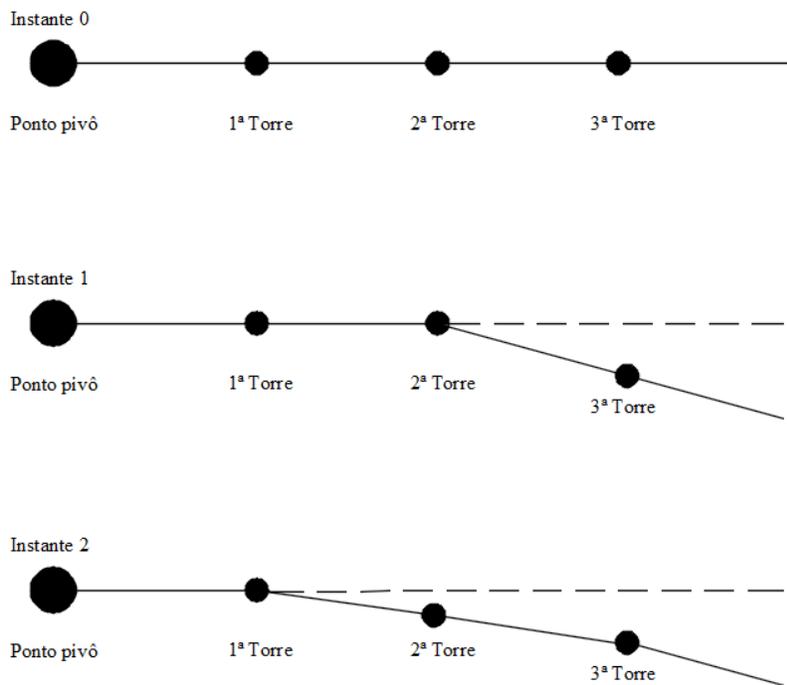
Legenda: (a) vista superior da área; (b) vista lateral de um pivô central de duas torres; (c) detalhe de uma torre móvel; (d) detalhe da parte superior do tubo de subida; (e) detalhe de uma junta móvel de união utilizada nas torres.

Fonte: Adaptado de Colombo (2003).

O movimento de cada torre deve ser independente, conforme mostrado na Figura 3, pois cada torre terá que descrever uma circunferência, que cresce, à medida que se distancia do ponto pivô. Os sistemas de irrigação precisam ser bem

projetados, principalmente em áreas de topografia acidentada, onde ocorre uma variação acentuada na pressão do sistema, causando diferenças de vazão, reduzindo a uniformidade de distribuição de água e a consequente diminuição da eficiência de aplicação, além de aumentar as perdas de água por escoamento superficial (MEDEIROS, 2005).

Figura 3 - Representação da movimentação independente de cada torre de um sistema de pivô central.



Fonte: Adaptado de Bernardo, Soares e Mantovani (2008)

De acordo com Colombo (2003), além dos componentes básicos descritos anteriormente, os equipamentos pivô central são dotados de mecanismos que asseguram o equipamento, são eles: sensores de pressão, (pressostatos), sensores de tempo (timers) e sensores de posicionamento.

Os sensores de pressão são importantes para detectar vazamentos no sistema, interromper o deslocamento do sistema na eventualidade de uma falha no sistema de bombeamento, ou mesmo, impedir o funcionamento da bomba booster sem o adequado suprimento de água. O sensor de tempo detecta o tempo transcorrido, desde o último deslocamento da última torre, impedem que, na ocorrência de uma falha do sistema, a lateral móvel permaneça parada no mesmo ponto por um período de tempo muito grande. E o sensor de posicionamento, além de facilitar o manejo da irrigação de diferentes culturas sob um mesmo equipamento, é utilizado para acionar mecanismos que possibilitam a irrigação de áreas não circulares. Em alguns sistemas são utilizados canhões finais, e utilizados em determinada posição, permitindo melhor utilização da área irrigada (COLOMBO, 2003).

Por meio do percentímetro, localizado no painel de comandos do pivô, é ajustada a velocidade de deslocamento da última torre. As torres internas se movem toda vez que a inclinação de uma torre em relação à anterior for superior a um valor pré-determinado (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

O sensor de posicionamento detecta a variação do ângulo e aciona uma chave elétrica, permitindo a passagem de corrente para um motor elétrico localizando junto à base de cada torre, conforme mostrado na Figura 4. Dessa forma, cada torre possui movimento independente e constante, parando somente quando o desalinhamento entre as torres estiver abaixo do valor pré-determinado (COLOMBO, 2003). Como o desalinhamento dos vãos é variável, a ligação entre as torres é feita através de uma junta flexível de borracha, mostrado na Figura 2e, permitindo um grau de liberdade nesse movimento.

Figura 4 - Conjunto motorreductor de uma torre móvel de um sistema de irrigação por pivô central



Fonte: Valley Brochures (2010).

Cada torre é uma armação metálica em forma de treliça, dotada de duas rodas, similares a pneus de trator, para movimentar a o sistema pela área irrigada. O diâmetro do rodado é de extrema importância, pois a partir do seu perímetro é possível determinar o tempo gasto para completar um giro completo do pivô.

A torre central do pivô é fixa, ou seja, a linha lateral gira em torno de um ponto, daí o nome, pivô central.

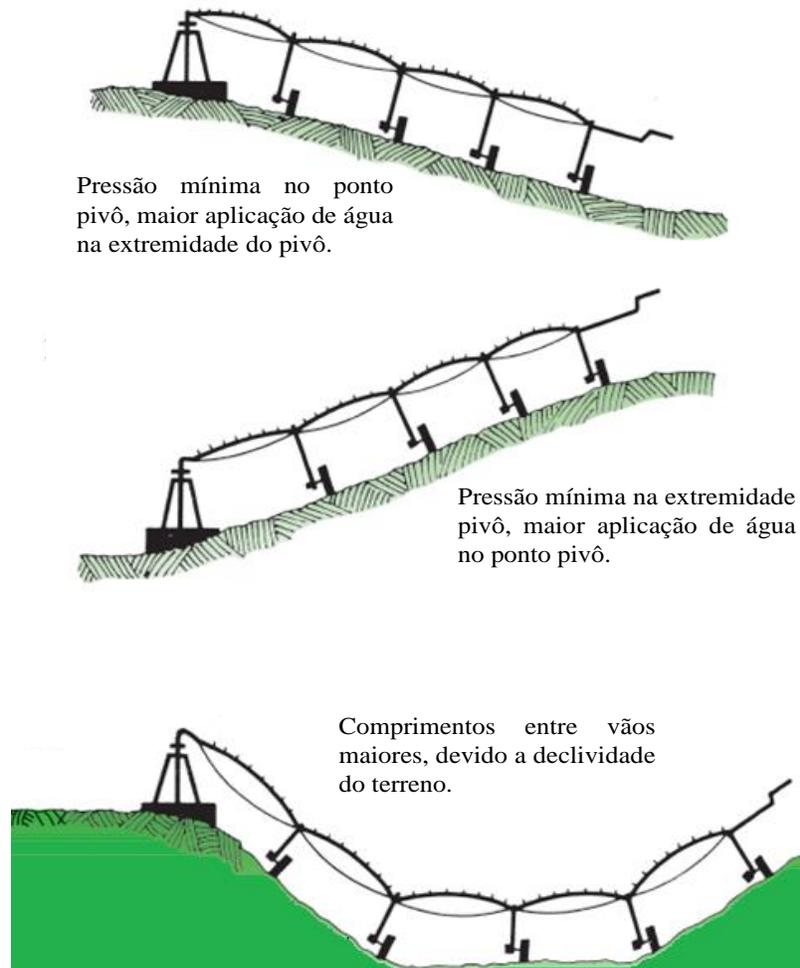
Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2008), os principais fatores a serem considerados na avaliação da área a ser irrigada por pivô central são: tamanho e forma da área, declividade, tipo de solo e cultura a ser implantada.

Quanto à área, os pivôs centrais irrigam áreas circulares ou quadradas com o auxílio de um canhão final e, ainda, a área não pode conter obstáculos, como edificações, linhas de alta tensão, dentre outros (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Deve-se avaliar a declividade do terreno para garantir a compatibilidade com o sistema de irrigação. Na Figura 5, é ilustrado o efeito da inclinação do

terreno no sistema pivô central. Ou seja, com terrenos com declividade mais acentuada o comprimento dos vãos devem ser menores, e para áreas mais planas, permite uma maior distância entre as torres (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Figura 5 - Efeito da inclinação do terreno no sistema Pivô Central.



Fonte: Adaptado de Kranz et al. (2007)

2.1.2 Características hidráulicas do pivô central

A vazão total necessária (Q_t) para a operação de um pivô central pode ser calculada, por meio da Equação 1, resultante da relação da lâmina bruta aplicada (L_b em mm), tempo de giro do pivô (T_g) e a área irrigada (A), apresentada por Colombo (2003).

$$Q_t = 10 \cdot A \cdot \frac{L_b}{T_g} \quad (1)$$

Onde:

Q_t = vazão total, $m^3 \cdot h^{-1}$

A = área irrigada, ha

L_b = lâmina bruta aplicada, mm

T_g = tempo de giro do pivô, h

10 = representa o fator de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$

A área irrigada é determinada pela seguinte equação 2:

$$A = \frac{\pi R^2}{10000} \quad (2)$$

Onde,

R = raio irrigado, m.

10000 = representa o fator de $10000 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$

O tempo de giro do sistema (T_g), é determinado relacionando o perímetro da última torre com a velocidade da última torre, conforme equação 3.

$$T_g = \frac{2\pi \times R_{ut}}{V_{ut}} \quad (3)$$

Baseado no tempo de giro (T_g), na vazão total do sistema (Q_t) e na área total irrigada (A), que é a soma da área circular irrigada com a área irrigada pelos dispositivos de canto, a lâmina bruta aplicada (L_b) é apresentada pela equação 4.

$$L_b = \frac{T_g \cdot Q_t}{10 \cdot A} \quad (4)$$

Onde:

10 = representa o fator de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$

É importante observar na equação 4 que os valores de área irrigada (A) e vazão total (Q_t) são constantes e característicos de cada equipamento considerado. Sendo assim, cada equipamento pode ser caracterizado por uma determinada razão L_b/T_g . Essa razão, que também é conhecida como taxa aparente de aplicação de água, determina a capacidade máxima de reposição de água do equipamento e tem grande influência na distribuição espacial da intensidade de aplicação de água ao longo do pivô (COLOMBO, 2003).

Em função de diferenças, tanto em termos de perdas superficiais de água como em termos de uniformidade de aplicação, que existem entre a área irrigada pela lateral móvel do pivô e a área irrigada pelo canhão final, o projetista tem dificuldade para estimar um único valor da razão L_b/T_g que possa caracterizar toda a área irrigada. Ou seja, a taxa aparente de aplicação de água no círculo básico é diferente para a faixa irrigada pelo canhão final. Essa dificuldade no cálculo da vazão é superada pela equação 5, que considera as diferenças entre a área que é irrigada pelos pequenos emissores ao longo da lateral móvel e a área do anel externo irrigado pelo canhão final (COLOMBO, 2003).

$$Q_t = Q_b + Q_c = \frac{\pi \cdot L^2}{1000} \cdot \left(\frac{L_b}{T_g} \right)_L + Q_c \quad (5)$$

Onde:

Q_t é a vazão total do pivô central com canhão final, em m^3/h ;

Q_b é a vazão aplicada pelos emissores, em m^3/h ;

Q_c é a vazão do canhão final, em m^3/h .

A vazão do canhão final (Q_c , em m^3/h), pode ser calculada pela equação 6.

$$Q_c = \frac{\pi \cdot (R^2 - L^2)}{10000} \cdot \left(\frac{Lb}{Tg}\right)_c \quad (6)$$

Onde:

R é o raio da área irrigada (m);

L é o comprimento da lateral móvel (m);

$(Lb/Tg)_c$ é a taxa aparente de aplicação de água (mm/h) selecionada pelo projetista com base nos valores típicos de perdas superficiais e uniformidade de aplicação de água na área do anel externo irrigado pelo canhão final;

10000 = representa o fator de 10000 $m^2 \cdot ha^{-1}$.

Para análise da perda de carga em qualquer distância do ponto do pivô, Colombo (2003), assume que a perda de carga unitária (J_{rs} em $mca \cdot m^{-1}$) pode ser calculado por meio da equação 7.

$$J_{rs} = \frac{K_J \times Q_{rs}^m}{D_{rs}^n} \quad (7)$$

Onde:

K_J , m , e n são parâmetros que dependem da fórmula de perda de carga considerada;

Q_{rs} é a vazão conduzida;

D_{rs} é o diâmetro da tubulação.

Quando se utiliza a equação de perda de carga de Hazen-Williams, o D_{rs} é expresso em m e Q_{rs} em $m^3 \cdot s^{-1}$, a equação 8 apresenta a seguinte forma:

$$J_{rs} = \frac{10,67 \times Q_{rs}^{1,852}}{D_{rs}^{4,871} \times C_{HW}^{1,852}} \quad (8)$$

Onde,

C_{HW} é o coeficiente de Hazen-Williams correspondente ao material de fabricação da tubulação;

$10,67 \text{ s}^{1,85} \cdot \text{m}^{-0,68}$ representa o fator corrigido para o sistema internacional.

Gomes (2013) e Rossman (2000) utilizam o fator de correção de unidade da equação de perda de carga de Hazen-Williams com o valor de $10,667 \text{ s}^{1,85} \cdot \text{m}^{-0,68}$

Considerando uma distribuição de água ideal, ou seja, uma linha lateral de um único diâmetro e dotada de infinitas saídas, conforme mostrado por Allen, Keller e Martin (2011) e por Keller e Bliesner (1990), a relação entre a vazão sendo conduzida na linha lateral (Q_{rs} em $m^3 \cdot h^{-1}$) e a distância desde o ponto do pivô (r_s) é dada por:

$$Q_{rs} = Qt \cdot \left[1 - \left(\frac{r_s}{L_h} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\text{Com, } L_h = L \cdot \sqrt{\frac{Q_b + Q_c}{Q_b}} \quad (10)$$

Onde:

L_h é comprimento hidráulico equivalente do pivô central, m;

Qt é a vazão total do sistema, $m^3 \cdot h^{-1}$;

Q_b é a vazão total dos emissores, $m^3.h^{-1}$;

Q_c é a vazão do canhão final, $m^3.h^{-1}$.

Relacionando as equações 7 e 9, foi proposta por Chu e Moe (1972) a equação que determina a perda de carga que ocorre desde o início da linha lateral até um ponto localizado a uma distância r_s (com $0 \leq r_s \leq L$) da torre central, conforme mostrado na equação 11.

$$hf_{rs} = \int_{s=0}^{s=r_s} \frac{k_j \cdot Q_{rs}^{ev}}{D_{rs}^{ed}} ds = \frac{k_j \cdot Q_t^{ev}}{D_{rs}^n} \int_{s=0}^{s=r_s} \left[1 - \left(\frac{s}{L_h} \right)^2 \right]^{ev} ds \quad (11)$$

Onde, s é a variável de integração correspondente à distância, desde o ponto do pivô; ev , o expoente da vazão; e ed o expoente do diâmetro.

Scaloppi e Allen (1993) apresentaram uma solução analítica (equação 12) aproximada para integral indicada na equação 11, onde é apresentado um fator de correção da perda de carga em pivô central ($F_{(rs/L_h)}$).

$$hf_{rs} = \frac{k_j \cdot Q_t^{ev} \cdot L_h}{D_{rs}^{ed}} \cdot F_{\left(\frac{rs}{L_h}\right)} \quad (12)$$

Onde,

$F_{(rs/L_h)}$ é o fator de correção da perda de carga, calculado a partir da equação 13:

$$F_{\left(\frac{rs}{L_h}\right)} = \left[\frac{r_s}{L_h} - \frac{ev}{3} \cdot \left(\frac{r_s}{L_h}\right)^3 + \frac{ev \cdot (ev-1)}{10} \cdot \left(\frac{r_s}{L_h}\right)^5 - \frac{ev \cdot (ev-1) \cdot (ev-2)}{42} \cdot \left(\frac{r_s}{L_h}\right)^7 + \dots \right] \quad (13)$$

Onde,

ev é o valor do expoente, de acordo com a fórmula de perda de carga utilizada, ev=2 para fórmula universal e ev=1,852 para fórmula de Hazen-Williams.

Valiantzas e Dercas (2005) também desenvolveram uma fórmula para cálculo do fator de correção $F_{(rs/Lh)}$, que, para o caso particular da Fórmula de Hazen-Williams, assume o seguinte formato:

$$F_{\left(\frac{rs}{Lh}\right)} = \left[\frac{rs}{Lh} - \frac{1.852}{3} \cdot \left(\frac{rs}{Lh}\right)^3 + \frac{0.852}{5.148} \cdot \left(\frac{rs}{Lh}\right)^{5.148} \right] \quad (14)$$

O fator $F(rs/Lh)$ corrige o cálculo para o comprimento de tubulação desejado e para o fato de haver variação de vazão entre o início da lateral e o ponto considerado.

Tabuada (2011) desenvolveu um método analítico (Equação 15) para a distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central, utilizando o comprimento da lateral e a fração da vazão do canhão final em relação a vazão total do sistema, por meio da distribuição hipergeométrica.

$$hf\left(\frac{x}{L_t}\right) = \frac{K_j}{D^{ed}} \cdot Q_t^{ev} \cdot L_t \cdot \left(\frac{x}{L_t}\right) \cdot F_{hipergeometrica} \left[0.5, -ev, 1.5, \left(1 - \frac{Q_c}{Q_t}\right) \cdot \left(\frac{x}{L_t}\right)^2 \right] \quad (15)$$

Onde, x é a distância do ponto pivô.

A função hipergeométrica pode ser utilizada como uma rotina no VBA, conforme descrito por Chandrupatla e Osler (2010) e mostrada na Figura 6.

Figura 6 - Rotina do VBA de cálculo da função hipergeométrica.

```

Function hgs(a, b, c, z)
t = a * b / c * z
s = 1 + t
n = 1
Do
  a = a + 1: b = b + 1: c = c + 1: n = n + 1
  t = t * a / c * b / n * z
  s1 = s
  s = s + t
  If s <> 0 Then Delta = Abs(s - s1) / s
  If s = 0 Then Delta = Abs(s - s1)
Loop While Delta > 0.00001
hgs = s
End Function

```

Fonte: Adaptado de Chandrupatla e Osler (2010).

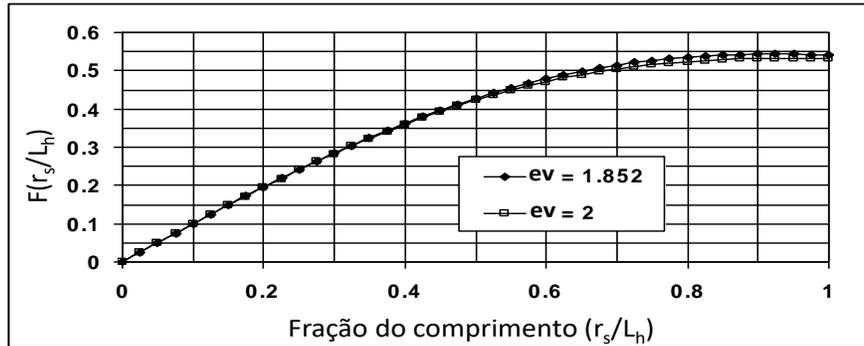
Tabuada (2011), assim como Valiantzas e Dercas (2005) utilizam o comprimento hidráulico (L_h) considerando a vazão total do sistema (Q_t) e a vazão do canhão (Q_c) (Equação 16), diferentemente de Scalopi e Allen (1993) que consideram a vazão dos emissores ou do círculo básico (Q_b) (Equação 10).

$$L_h = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{Q_c}{Q_t}}} \quad (16)$$

É importante ressaltar que as equações 10 e 16 apresentam o mesmo resultado, apesar de utilizarem valores diferentes.

A Figura 7, apresentada por Colombo (2003), por meio de análises de Allen, Keller e Martin (2011) que, para dois valores distintos do expoente ev ($ev = 1,852$ (Hazen-Williams) e $ev = 2,0$ (Darcy)), os valores assumidos pelo coeficiente $F(rs/L_h)$ em diferentes distâncias do ponto do pivô. Nesse gráfico, as distâncias (rs) desde o ponto do pivô foram expressas como fração (rs/L_h) do comprimento hidráulico equivalente.

Figura 7 - Valor do fator de correção da perda de carga $F(r_s/L_h)$ em pivô central para diferentes frações do comprimento do raio irrigado e valores do expoente ev

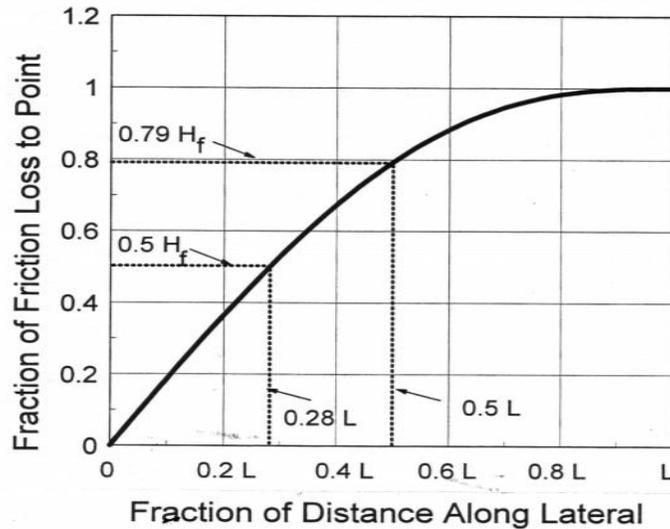


Fonte: Colombo (2003)

É possível observar, na Figura 7, que para frações do comprimento do raio molhado acima de 0,75, o valor do fator de correção da perda de carga se mantém próximo de 0,54. Considerando que, em grande parte dos equipamentos do tipo pivô central, a relação entre o comprimento da linha lateral (L) e o comprimento hidráulico equivalente (L_h) é maior que 0,9, pode-se afirmar que a perda de carga em um pivô central com uma linha lateral de um único diâmetro é da ordem de 54% daquela que ocorreria em uma tubulação, de mesmo diâmetro e comprimento igual ao o comprimento hidráulico equivalente (L_h), conduzindo uma vazão constante e igual à vazão total do pivô (COLOMBO, 2003).

Allen, Keller e Martin (2011) afirmam que metade da perda ocorre em cerca de 28% da linha lateral e que, cerca de 79% da perda de carga ocorre na metade da linha lateral (Figura 8).

Figura 8 - Curva de perda de carga total adimensional ao longo da linha lateral do pivô central



Fonte: Allen, Keller e Martin (2011)

De acordo com Colombo (2003), para o caso de um pivô central com uma linha lateral de comprimento total L , composta por dois trechos de diferentes diâmetros, a perda de carga, utilizando a equação de perda de carga de Hazen-Williams pode ser calculada pela seguinte equação:

$$hf_{r=L} = \frac{10,67 \times Q^{1,852} \times R}{(3600 \times C)^{1,852} \times D_1^{4,871}} \times F_{(L_1/R)} + \frac{10,67 \times Q^{1,852} \times R}{(3600 \times C)^{1,852} \times D_2^{4,871}} \times (F_{(L/R)} - F_{(L_1/R)}) \quad (17)$$

Onde,

L_1 é o comprimento inicial da linha lateral de diâmetro D_1 ;

L é o comprimento total da lateral;

D_2 é o diâmetro do trecho final da lateral que apresenta um comprimento igual a $L-L_1$

2.1.2.1 – Pressão necessária

Allen et al (2011) apresentaram uma proposta para a determinação da energia total no ponto pivô (equação 18).

$$H_I = H_a + h_f + \Delta H_e + H_r + H_{loc} \quad (18)$$

Onde:

H_I é a energia total necessária no ponto pivô, m;

H_a é a energia requerida no último aspersor ou no canhão final, m;

h_f é a perda de carga na linha lateral até o ponto de mínima pressão, m;

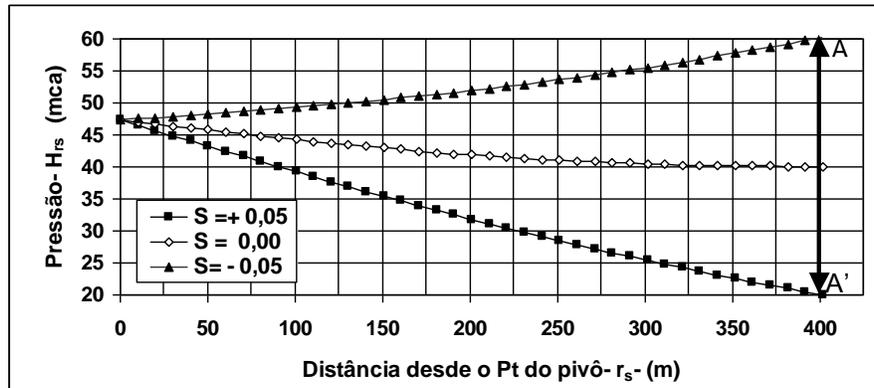
ΔH_e é o desnível entre o ponto pivô e o ponto de mínima pressão, m;

H_r é a diferença entre a altura da linha lateral e a altura do pendural, m;

H_{loc} é soma das perdas de carga localizadas ao longo da lateral, m.

Na Figura 9, apresenta-se a distribuição espacial da pressão ao longo da linha lateral de um pivô central determinada, por meio da equação 18. Três posições geométricas distintas foram consideradas nesta figura (aclive de 5%, em nível, e declive de 5%).

Figura 9 - Distribuição espacial da pressão de um pivô central em três posições distintas da linha lateral (aclive de 5%, em nível, e declive de 5%)



Fonte: Colombo (2003)

É possível verificar, na Figura 10, que a pressão mínima do pivô central muda conforme inclinação do terreno, para terrenos em aclive o ponto de mínima pressão tende a deslocar para a extremidade do pivô. Em terrenos em declive o ponto de mínima pressão tende a se deslocar para o ponto pivô.

2.1.2.2 – Válvula reguladora de pressão

De acordo com Kranz et al. (2007), as flutuações de pressão descontroladas resultam em desvios indesejáveis de vazão e excesso de aplicação de água. As causas mais comuns para a variação de pressão incluem alterações na elevação dos emissores ou terreno, alterações na demanda do sistema e no fornecimento de água. O uso correto de reguladores de pressão controla essas flutuações e ajuda a evitar o excesso de aplicação de água, mantendo a eficiência geral do sistema de irrigação, resultando assim um acréscimo de produção.

De acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008), quando ao longo da linha de irrigação existir uma variação de pressão que possa ocasionar uma

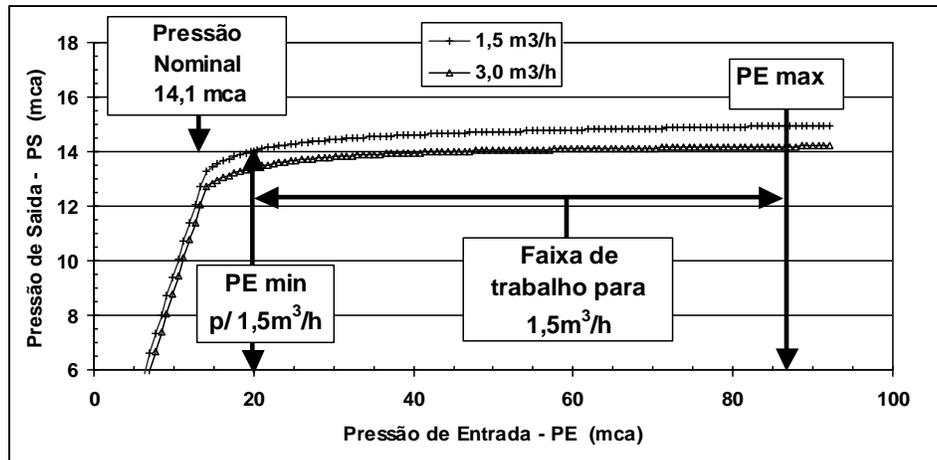
variação de vazão dos emissores superior a 10%, torna-se necessário a instalação de válvula reguladora de pressão na base dos emissores.

Segundo Zaggo, Colombo e Gil (1990), as válvulas reguladoras de pressão são dispositivos que reagem a um acréscimo de pressão de entrada, diminuindo a seção de passagem de água e aumentando a perda de carga localizada que ocorre na válvula, de forma a compensar o aumento da pressão de entrada, mantendo a pressão de saída dentro de certos limites.

Tarjuelo (2005) comenta que os reguladores mais comuns são os de mola, constituídos por uma carcaça que abriga um êmbolo. Esse êmbolo é empurrado por uma mola que tende a mantê-lo na posição de máxima abertura e, quando a pressão existente na água abaixo do regulador age sobre a superfície do fixador da mola e essa pressão é menor que a do regulador, a mola mantém aberto o êmbolo e a água passa apenas com uma pequena perda de carga. Mas, quando essa pressão atuante é maior, ela se transmite momentaneamente, criando uma força que vence a da mola e fazendo com que o êmbolo se feche parcialmente, ocorrendo um aumento da perda de carga até conseguir que a pressão fique próxima à do regulador.

Curvas de desempenho de uma válvula reguladora de pressão são mostradas na Figura 10, conforme apresentado por Colombo (2003). Essas curvas mostram que, dentro da faixa recomendada de pressões de trabalho de um dado modelo de válvula reguladora, a pressão de saída é praticamente constante e independente do valor da pressão de entrada.

Figura 10 - Curvas de desempenho de uma válvula reguladora de pressão utilizada na base dos emissores de um pivô central. Para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, é indicada a faixa recomendável de pressões de entrada



Fonte: Colombo (2003)

2.2 Simulação de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central

O EPANET não foi desenvolvido para a utilização em sistemas pressurizados de irrigação, sendo o seu objetivo principal as redes públicas de abastecimento de água.

Lucena (2012), desenvolveu uma versão do EPANET 2.0, chamada de EPANET-IRRIG, que permite dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento, microaspersão e aspersão.

Gomes (2013) utilizou o EPANET 2.0 para a modelagem hidráulica de sistemas de irrigação, aplicando em um sistema coletivo de irrigação. Neste trabalho, não foram utilizados aspersores, apenas a rede de distribuição de água para irrigantes e a simulação dinâmica, ou seja, a simulação da evolução das variáveis do sistema ao longo do tempo, por meio de uma sequência de soluções de equilíbrio hidráulico, obtidas para sucessivos instantes.

Além do software EPANET 2.0 para simulações hidráulicas de sistemas pressurizados de irrigação, alguns autores têm utilizado outras plataformas para a avaliação e dimensionamento desses sistemas. Um desses é o CPED, desenvolvido para dimensionamento e avaliação de pivô central e linear móvel, o CPED (Central Pivot Evaluation Design) foi desenvolvido por Dale Heerman no início dos anos 1970, escrito em Fortran IV. Vem recebendo atualizações por colaboradores, a última na data de 22 de fevereiro de 2016. O CPED permite a escolha de emissores de diferentes marcas ao longo da linha lateral, por meio da entrada das características dos vãos e torres e a análise da uniformidade de aplicação de água.

Costa e Castro (2006), desenvolveram o programa UFC2, um programa no ambiente do AutoCAD, em linguagens AutoLISP e VBA (incorporadas no AutoCAD), que permite, dentre outras coisas, realizar o traçado da rede no AutoCAD e exportá-la diretamente para o EPANET. Desse modo, minimizam-se os esforços e reduz-se satisfatoriamente o tempo de criação do modelo de simulação. Entre outras vantagens, além de redes de abastecimento de água, o programa também abrange redes de irrigação.

Silva e Klar (2010) apresentaram uma proposta de sistema computacional de código aberto (open source), desenvolvido em linguagem PHP para avaliar sistemas de irrigação por pivô central. O modelo realiza os cálculos dos parâmetros que expressam a uniformidade e eficiência do equipamento. O sistema foi desenvolvido com ferramentas gratuitas, conforme a proposta de trabalho Linux, Apache, Mysql, PHP (LAMP).

2.3 Utilização da ferramenta EPANET 2.0 para simulação do pivô central

O EPANET é um software com capacidade de simular o comportamento hidráulico de redes de tubulações de distribuição de água. Foi desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency's (EPA) Water Supply and Water Resources Division, em Cincinnati, Ohio. É um programa de domínio público, com código aberto, que pode ser livremente copiado e distribuído, conforme descrito por Rossman (2000).

A versão brasileira do EPANET 2.0, desenvolvida no LENHS UFPB apresenta um módulo de programação, denominado LENHSNET, que permite o dimensionamento hidráulico de uma rede de abastecimento de água, considerando o menor custo de investimento.

De acordo com Lucena (2012), as principais características do EPANET 2.0, são:

- i) Sem custo: é um software de grande confiabilidade conhecido e utilizado mundialmente, sendo disponibilizado gratuitamente pela EPA.
- ii) Código-fonte aberto: seu código-fonte é totalmente aberto, seja para a interface gráfica ou para o modelo matemático propriamente dito. Isso permite que o usuário realize modificações no programa para que ele atenda a suas eventuais necessidades, além de poder compilá-lo para a utilização em outros sistemas operacionais.
- iii) Modelagem hidráulica: ao contrário dos softwares existentes no mercado, cujos focos estão na geração de plantas e perspectivas, o EPANET é voltado para a modelagem da dispersão de constituintes na rede.
- iv) Interação com programas CAD: apesar conter algumas limitações, possui um sistema relativamente eficiente de importação e exportação de desenho da rede de programas de desenho como o AutoCAD. Esse recurso é de grande utilidade para projetistas que

podem apenas exportar o traçado da rede e realizar as simulações no EPANET.

Um dos programas utilizados para esse fim é o EPACAD, que é um software que tem a finalidade de converter os arquivos CAD, extensão .dxf, para EPANET 2.0, extensão .net, foi desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência – Espanha.

2.3.1 Funcionamento dos principais componentes.

De acordo com Rossman (2009), o funcionamento dos principais componentes que compõem uma rede de distribuição de água no EPANET 2.0, são os seguintes:

- (i) Nós e emissores: são pontos da rede de união dos trechos, onde a água entra e sai da rede. O principal dado de entrada para o nó são as cotas. Emissores, basicamente, são nós que possuem um valor de coeficiente de emissor (k), da equação $q = k \cdot h^x$. O valor do expoente do emissor (x) é pré-determinado para todo o sistema simulado.
- (ii) Tubulações: são trechos que transportam água entre os vários pontos da rede. O EPANET considera que o escoamento ocorre sob pressão em todas as tubulações. O escoamento ocorre dos pontos com carga hidráulica mais elevada (energia interna por unidade de peso de fluido) para os pontos com carga hidráulica mais baixa. Os principais parâmetros a serem inseridos nas propriedades das tubulações são: Nó inicial e final, diâmetro, comprimento e coeficiente de rugosidade.

(iii) Válvulas: são trechos que limitam a pressão ou a vazão num ponto particular da rede. Os principais dados de simulação a serem introduzidos são: nós inicial e final, diâmetro, parâmetro de controle da válvula e estado.

Os principais tipos de válvulas modelados pelo EPANET são:

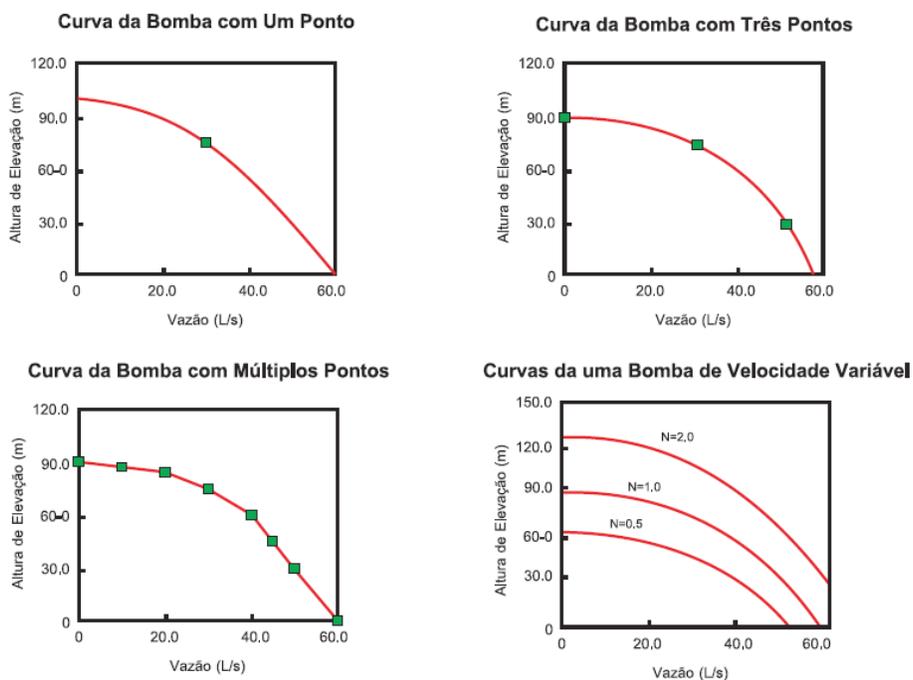
- Válvula de Controle da Pressão a jusante ou Válvula Redutora de Pressão, PRV (*Pressure Reducing Valve*)
- Válvula de Controle da Pressão a montante ou Válvula Sustentadora de Pressão, PSV (*Pressure Sustaining Valve*)
- Válvula de Perda de Carga Fixa, PBV (*Pressure Breaker Valve*)
- Válvula Reguladora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

As Válvulas Redutoras de Pressão (PRV), utilizadas no sistema de irrigação do tipo pivô central, limitam a pressão de saída na válvula num determinado ponto da rede. O EPANET simula as seguintes situações de funcionamento para esse tipo de válvula:

- Parcialmente aberta (i.e., ativa), para que a pressão a jusante seja igual a um valor pré-definido, quando a pressão a montante é superior a esse valor;
- Completamente aberta, se a pressão a montante está abaixo do valor pré-definido;
- Fechada, se a pressão a jusante excede a pressão a montante, não permitindo que o sentido do escoamento inverta (neste caso funciona como válvula de retenção).

(iv) Bombas e curvas: a curva da bomba representa uma relação entre a altura manométrica e a vazão, definindo as condições de funcionamento desta, para uma velocidade de rotação nominal. A altura manométrica representa a energia fornecida ao escoamento pela bomba e é representada no eixo das ordenadas da curva em metros (m). A vazão é representada no eixo das abscissas, nas unidades respectivas a esta grandeza. Uma curva da bomba valida deve apresentar alturas manométricas decrescentes com o aumento da vazão. O EPANET define uma forma diferente para a curva da bomba segundo o número de pontos fornecidos (Figura 11).

Figura 11 - Exemplo de curvas de bombas no EPANET.



Fonte: Traduzido de Manual do usuário EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000).

Curva com um ponto - Para se definir uma curva com um ponto basta fornecer um único par de valores de vazão - altura manométrica, referente ao ponto ótimo de funcionamento da bomba. O EPANET adiciona automaticamente dois pontos a curva, estabelecendo que a bomba é desligada para uma vazão nula, correspondente a uma carga que é 133% da carga nominal e que a vazão máxima, para uma altura manométrica nula, é o dobro da vazão nominal. Deste modo, a curva é traçada como uma curva com três pontos.

Curva com três pontos - Para se definir uma curva desse tipo é necessário fornecer três pontos de operação: ponto de Vazão Mínima (vazão e altura manométrica total para o ponto de vazão nula ou mínima), ponto de Vazão Nominal (vazão e altura manométrica total para o ponto ótimo de funcionamento), ponto de Vazão Máxima (vazão e a altura manométrica total para o ponto de vazão máxima). O EPANET 2.0 ajusta uma função contínua (Equação 19) aos três pontos fornecidos, de forma a definir a curva completa da bomba.

$$h_G = A - B \cdot q^C \quad (19)$$

Onde, h_G = altura manométrica (m), q = vazão e A, B e C são constantes.

Curva com múltiplos pontos - Uma curva desse tipo é definida se forem fornecidos quatro ou mais pontos com valores de vazão - altura manométrica. O EPANET cria uma curva completa ligando os vários pontos entre si por segmentos de reta.

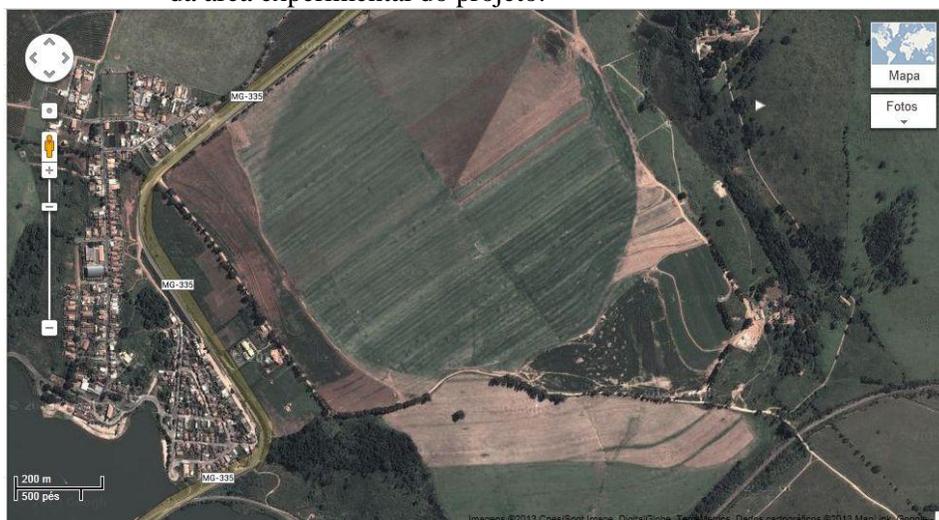
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características técnicas do equipamento pivô central

O estudo foi realizado em dois equipamentos mecanizados de irrigação do tipo pivô central, sendo um pivô central real e o outro um pivô teórico.

O pivô central real está situado na Fazenda Invernada, pertencente à Itogras Agrícola Alta Mogiana Ltda, no município de Bom Sucesso–MG, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Imagem de satélite da Fazenda Invernada, Bom Sucesso – MG, local da área experimental do projeto.



Fonte: Dados do autor (2016)

O pivô central real é da marca Valley, modelo 4871-8000-VSL/8-1060, com raio total irrigado de 432,57 m, composto de quatro vãos longos e quatro vãos médios com diâmetro 6 5/8”, e um lance em balanço de 20 m, sem canhão ou spray final.

O sistema é equipado com válvulas reguladoras de pressão de 68,9 kPa (10 psi) e emissores de água do tipo spray de placa oscilante, Senninger modelo I-Wob, espaçados entre si de 2,30 m, montados na extremidade de tubos de descida flexíveis (pendurais), a uma altura de 1,80 m da superfície do solo.

De acordo com as especificações técnicas do fabricante, o pivô central em questão apresenta vazão igual a $240,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sendo capaz de completar um giro de 360° em um tempo mínimo de 9,24 h, aplicando, em uma área irrigada de 58,78 ha, a lâmina bruta de 3,78 mm.

A adutora de 840 m de comprimento é composta de tubos de PVC, com diâmetro nominal de 200 mm, abastece o ponto do pivô com a água proveniente da unidade de bombeamento, que é composta por uma bomba KSB, modelo WKL 125/3, com rotores de 300 mm, acionada por um motor elétrico trifásico da marca WEG, de 380 volts, com valores nominais de potência e rotação iguais a 150 cv e 1785 rpm, respectivamente. O desnível entre o eixo da bomba e o ponto de pivô é de 56 m e entre o ponto do pivô e o ponto mais elevado da área irrigada é de 2 m.

Nesse pivô central, foi analisada a distribuição de pressão ao longo da linha lateral, a distribuição da pressão mínima em função da declividade do pivô e a vazão nos bocais dos emissores.

Para o pivô teórico foi analisada a distribuição de pressão para diferentes vazões no canhão final, com as seguintes características: pivô composto de dois vãos com comprimento de 34 m e balanço de 5 m, equipados com emissores Nelson 3000 serie 3TN com válvulas reguladoras de pressão de 10 psi. O sistema de adução utilizado foi o mesmo do pivô real, localizado no município de Bom Sucesso/MG, porém, para haver perda de carga considerável, o diâmetro interno da linha lateral utilizado foi de 60 mm. A vazão utilizada, na simulação hidráulica, no canhão final do pivô central teórico foi de 30%, 50% e 70% da vazão total do

sistema. Nesse pivô, foi analisada a influência do canhão final na distribuição de pressão.

3.2 Simulação de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central

A fim de tornar a utilização do EPANET 2.0 eficaz, para a simulação de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central, foi criada uma ferramenta de edição no Ms Excel para facilitar a entrada de dados no software. Na planilha desenvolvida são informadas as seguintes características:

- i) sistema de adução (cota do reservatório; diâmetro, comprimento e rugosidade da tubulação de sucção e adutora; e curva da bomba);
- ii) vãos (com ou sem pendural; com ou sem arqueamento da lateral móvel; com ou sem balanço; com ou sem canhão final; comprimento dos vãos; diâmetro da lateral móvel; número de saídas por vão; espaçamento entre saídas; altura das torres; altura máxima dos arcos; altura dos emissores em relação à superfície do solo; diâmetro dos pendurais; e cota das torres);
- iii) o fabricante e a pressão da válvula reguladora.

3.3 Utilização da ferramenta Excel para simulação do pivô central

Com o intuito de comparar os resultados obtidos na simulação hidráulica no EPANET 2.0, e validar a utilização do mesmo, foram simulados dois equipamentos de irrigação do tipo pivô central (um equipamento real e outro teórico) em planilhas do Excel. Os pontos analisados foram: a vazão no ponto pivô e de pontos ao longo da linha lateral móvel do pivô central, a fração da perda de carga ao longo da linha lateral e nos pendurais, distribuição espacial de pressão,

localização da posição do ponto de pressão mínima do pivô central e a influência de diferentes valores de vazão no canhão final na distribuição de pressão ao longo do pivô central.

i) Vazão total (Q_t)

A vazão total do pivô central foi determinada, a partir da soma das vazões de cada emissor, a partir da área irrigada por cada emissor (A) (que depende do espaçamento entre emissores), da lâmina bruta requerida (L_b) e do tempo de giro (T_g):

$$Q_t = A \cdot \frac{L_b}{T_g} \quad (20)$$

Onde:

Q_t = vazão total, $l \cdot h^{-1}$

A = área irrigada, m^2

L_b = lâmina bruta aplicada, mm

T_g = tempo de giro do pivô, h

A partir da vazão de cada emissor ou bocal ($l \cdot h^{-1}$) e carga de pressão da válvula reguladora escolhida (m), foi possível a determinação de uma constante do bocal:

$$K_{\text{bocal}} = \frac{Q_{\text{bocal}}}{1000 \times \left(\frac{P_{\text{VRP}}}{\gamma}\right)^{0.5}} \quad (21)$$

Onde:

K_{bocal} é a constante do bocal em $m^{2.5} h^{-1}$;

Q_{bocal} é a vazão do bocal, $l \cdot h^{-1}$;

P_{VRP}/γ é a carga de pressão da válvula reguladora (VRP), m ;

1000 representa o fator de $1000 l \cdot m^{-3}$.

ii) Perda de carga (hf)

Para determinação da perda de carga no pivô central, foi utilizada a equação de perda de carga de Hazen-Williams:

$$hf = 10.667 \cdot \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \frac{L}{D^{4.87}} \quad (22)$$

iii) Carga de pressão (P/γ)

A carga de pressão foi determinada em cada ponto do pivô central, de acordo com os emissores instalados. Para efeito de comparação com o EPANET 2.0, foi adotada uma estimativa inicial de carga de pressão no último emissor e por meio da equação de Bernoulli, foram determinadas as cargas de pressão ao longo da linha lateral do pivô central, conforme sugerido por Allen, Keller e Martin (2011), conforme mostrado na equação 23.

$$\frac{P_{n-1}}{\gamma} = \frac{P_n}{\gamma} + (Z_n - Z_{n-1}) + hf_{n-1-n} \quad (23)$$

Onde:

P/γ é a carga de pressão, m;

Z é a cota do ponto, m;

hf é a perda de carga na tubulação entre os pontos n-1 e n.

É importante ressaltar que, na determinação da carga de pressão em cada ponto da linha lateral do pivô central não foi considerada a carga cinética ($V^2/2g$), pois o EPANET 2.0 não considera essa parcela na determinação da pressão.

Os resultados da distribuição de pressão ao longo da linha lateral contendo, ou não, pendural (ou haste de descida), arqueamento da linha lateral do pivô central e canhão final, obtidos no EPANET 2.0, foram comparados com

métodos analíticos de Scalopi e Allen (1993), Tabuada (2011) e Valiantzas e Dercas (2005).

iv) Emissores e bocais

Para simulação hidráulica do sistema, foi criada uma biblioteca de emissores e bocais, com os seguintes modelos:

- Senninger Super Spray (10, 15 e 20 psi);
- Senninger I-Wob (10, 15 e 20 psi);
- Senninger UP3 (10,15 e 20 psi);
- Nelson 3000 serie 3TN (10, 15 e 20 psi);
- Valmont 20 psi;
- Fabrimar ASFLX (10, 15 e 20 psi);
- Bocais Ideais, utilizando a vazão ideal, com pressões de 10, 15 e 20 psi.

v) Localização da posição do ponto de pressão mínima do pivô

Os resultados obtidos com o software EPANET 2.0, da distribuição de pressão ao longo do pivô central real, serão comparados com o método analítico proposto por Tabuada (2011). Para este estudo, foram calculadas as declividades para pressão mínima em pontos ao longo da linha lateral. Foi utilizada, para este cálculo, a equação da taxa de perda de carga, considerando a vazão em cada ponto proposto por Tabuada (2011) (Equação 24), que determina que a distância do ponto de mínima pressão é igual à taxa de perda de carga.

$$J_{(x)} = - \left[\frac{10.667}{CHW^{1.852}} \cdot \left[Q_t \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{Q_c}{Q_t} \right) \cdot \left(\frac{x}{L_t} \right)^2 \right)^{1.852} \right] \cdot \frac{1}{D^{4.871}} \right] \quad (24)$$

Os valores utilizados para simulação estão contidos na Figura 13.

Figura 13 - Valores da taxa de perda de carga referentes ao ponto de pressão mínima do pivô central real

Distância do ponto pivô do ponto de Mínima Pressão	Declividade
m	(m.m⁻¹)
434	0
300	0,0135940
250	0,0214609
150	0,0357786
100	0,0409323
0	0,0452838

Fonte: Dados do autor (2016)

- vi) Influência de diferentes vazões no canhão final na distribuição de pressão ao longo do pivô central teórico.

A fim de analisar a influência de diferentes vazões no canhão final na distribuição pressão ao longo da linha lateral do pivô central, utilizando o pivô central teórico, foram definidos os valores de vazão, contidos na Figura 14. A distribuição pressão, obtidos com o software EPANET 2.0, foram comparados com o método analítico proposto por Tabuada (2011), conforme mostrado na Equação 15.

Figura 14 - Valores propostos de vazão no canhão final e de vazão total no pivô central teórico

Vazão do Canhão Final (Qc)	Vazão total (Qt)	Qc/Qt
m³.h⁻¹	m³.h⁻¹	%
5,61	18,69	30
13,08	26,06	50
30,52	43,60	70

Fonte: Dados do autor (2016)

3.4 Utilização da ferramenta EPANET para simulação do pivô central

Ao ser gerado o arquivo (formato texto) através do programa de edição, desenvolvido no Excel, foi possível converter o formato para a plataforma do EPANET 2.0 e proceder a simulação hidráulica dos sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central (real e teórico). Os métodos que o software EPANET 2.0 utiliza para a simulação hidráulica está contido nos Apêndices A e B, de acordo com o Manual do Usuário (ROSSMAN, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Programa de edição de dados de entrada para EPANET 2.0

Para permitir a entrada de dados no software EPANET 2.0 com maior rapidez, foi desenvolvido um programa no Ms Excel. Essa planilha eletrônica desenvolvida, tem a função de gerar o arquivo texto necessário para o software EPANET 2.0 simular os sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central utilizados neste trabalho.

O programa foi dividido em planilhas, são elas: *Menu* (Figura 15); *Sistema de Adução* (Figura 16); *Vãos* (Figura 17); *Bocais e Válvulas* (Figura 18); *Listar nós e tubos*; e *Gerar arquivo*.

Na planilha “Menu”, são apresentados os passos necessários para inserção de dados para simulação hidráulica do sistema de irrigação. Em cinco passos são gerados os nomes de cada elemento que compõe o projeto hidráulico no EPANET 2.0 e criado o arquivo texto com todos os dados de entrada, tornando a utilização do EPANET 2.0 para simulação de sistemas de irrigação do tipo pivô central mais dinâmica. Os dados gerados, nesse arquivo texto, são derivados das informações inseridas no Excel, e trabalhados, por meio de rotinas no Visual Basic for Applications (VBA). Nessa planilha que são acessadas as demais planilhas que fazem parte do programa.

Na planilha “Menu” são inseridas as informações necessárias para a simulação hidráulica, como:

- i) Equação de perda de carga utilizada;
- ii) Quantidade de torres e se haverá ou não, balanço, canhão final, pendural e arqueamento da linha lateral;
- iii) Taxa aparente do círculo básico (lâmina bruta e tempo de giro do pivô central) e vazão e carga de pressão no canhão final.

Figura 15 - Planilha Menu do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0

The screenshot shows a spreadsheet interface with a menu for EPANET 2.0 data entry. The menu is organized into five steps, each with a corresponding button and a flow arrow indicating the sequence.

1º PASSO - INSERIR SISTEMA DE ADUÇÃO
 Equação da Perda de Carga
 Darcy-Weisbach
 Hazen-Williams
 ADUÇÃO

2º PASSO - INSERIR CARACTERÍSTICAS DOS VÃOS
 Nº de Torres: 2
 Balanço: Sim
 Canhão final: Sim
 Pendural: Sim
 Arco: Sim
 Atualizar Vãos
 Visualizar Vãos

3º PASSO - INSERIR INFORMAÇÕES DA TAXA DE APLICAÇÃO PIVÔ E CANHÃO
 Taxa Aparente Círculo Básico
 Lâmina Bruta (mm): 16
 Tempo de giro (h): 21
 CANHÃO FINAL - CF
 Vazão do CF (m³.h⁻¹): 30.52
 Carga de Pressão do CF (mca): 14.061
 VRP no CF: Sim
 POSICIONAR SAÍDAS
 Visualizar Saídas

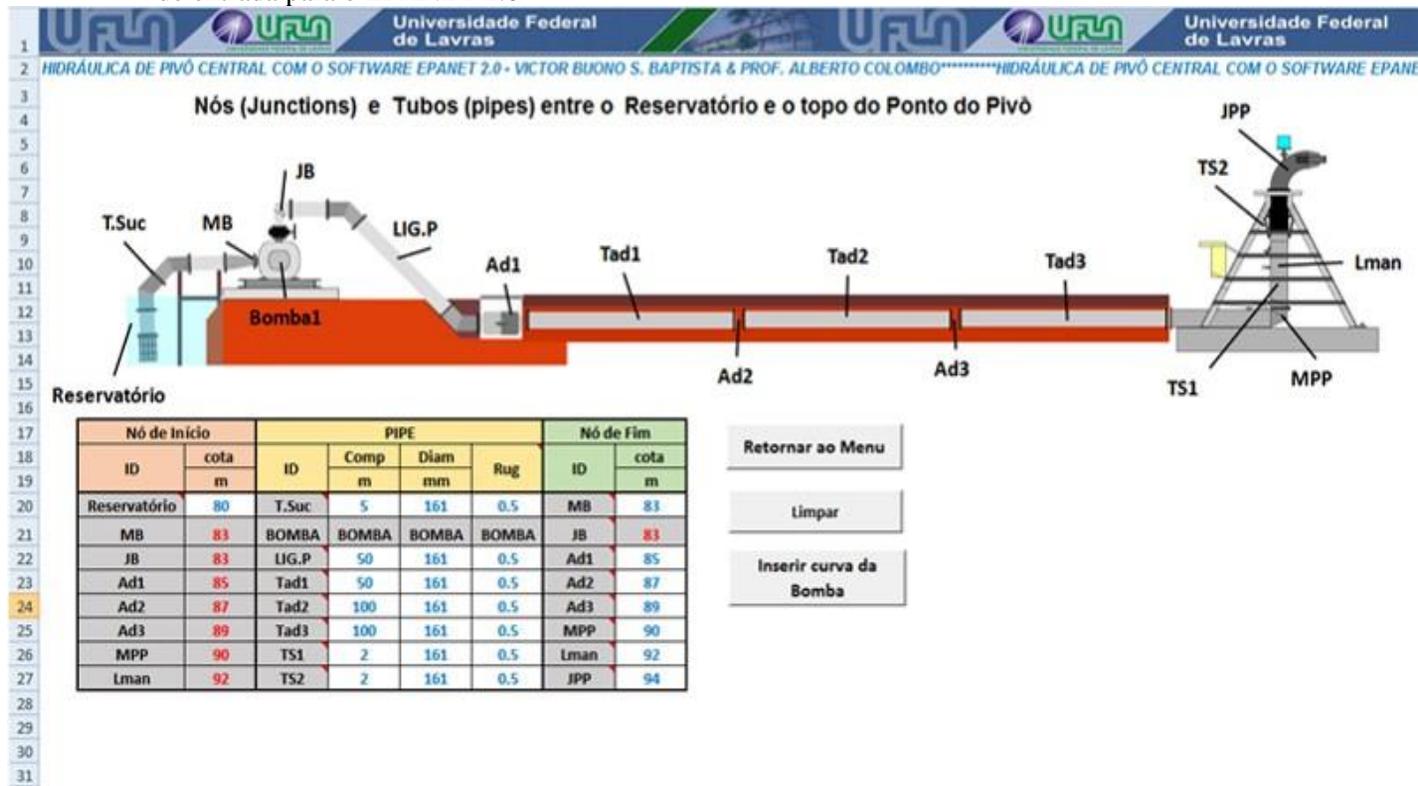
4º PASSO - LISTAR NÓS E PIPES DA LINHA LATERAL/PENDURAL
 Listar Nós e Pipes

5º PASSO - GERAR ARQUIVO TEXTO PARA EPANET2.0
 GERAR ARQUIVO

The spreadsheet interface includes a menu bar (ARQUIVO, PÁGINA INICIAL, INSERIR, LAYOUT DA PÁGINA, FÓRMULAS, DADOS, REVISÃO, EXIBIÇÃO, DESENVOLVEDOR), a search bar (529), and a worksheet grid with columns A-P and rows 1-24. The title bar reads 'HIDRÁULICA DE PIVÔ CENTRAL COM O SOFTWARE EPANET 2.0 - VICTOR BUONO S. BAPTISTA & PROF. ALBERTO COLOMBO'. The bottom status bar shows 'PRONTO' and a list of tabs: Menu, Adução, Vãos, Bocais, Pumps, Junctions, Linha Lateral, Pipes, Curves, Emitters.

Fonte: Dados do autor, 2016.

Figura 16 - Planilha Sistema de Adução do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0



Fonte: Dados do autor, 2016.

Figura 18 - Planilha Bocais e Válvulas do programa desenvolvido para utilização como ferramenta de edição dos dados de entrada para o EPANET 2.0

Universidade Federal de Lavras												
HIDRÁULICA DE PIVÔ CENTRAL COM O SOFTWARE EPANET 2.0 - VICTOR BUONO S. BAPTISTA & PROF. ALBERTO COLOMBO*****HIDRÁULICA DE PIVÔ CENTRAL COM O SOFTWARE EPANET 2.0 - VICTOR B												
Retornar ao Menu												
[EMITTERS]												
Junction Coefficient												
Vão	Bocal	Distância	Raio de Instalação	Área Irrigada	Vazão Desejada		Identificação		Vazão real		ID	k
		m	m	m²	l/h	gpm	Número	Cor	gpm	l/h	EPANET	m ^{2.5} .h ⁻¹
1	1	2.00	2.00	25.13	9.57	0.04	5	beige	0.55	124.92	V1E1	0.047110441
2	1	2.43	4.43	67.58	25.74	0.11	5	beige	0.55	124.92	V1E2	0.047110441
3	1	2.43	6.86	104.63	39.86	0.18	5	beige	0.55	124.92	V1E3	0.047110441
4	1	2.43	9.29	141.69	53.08	0.24	5	beige	0.55	124.92	V1E4	0.047110441
5	1	2.43	11.71	178.75	68.10	0.30	5	beige	0.55	124.92	V1E5	0.047110441
6	1	2.43	14.14	215.81	82.21	0.36	5	beige	0.55	124.92	V1E6	0.047110441
7	1	2.43	16.57	252.87	96.33	0.42	5	beige	0.55	124.92	V1E7	0.047110441
8	1	2.43	19.00	289.92	110.45	0.49	5	beige	0.55	124.92	V1E8	0.047110441
9	2	3.00	22.00	414.69	157.98	0.70	5.5	beige/gold	0.69	156.41	V2E1	0.058988695
10	2	2.43	24.43	372.76	142.00	0.63	5.5	beige/gold	0.69	156.41	V2E2	0.058988695
11	2	2.43	26.86	409.82	156.12	0.69	5.5	beige/gold	0.69	156.41	V2E3	0.058988695
12	2	2.43	29.29	446.88	170.24	0.75	5.5	beige/gold	0.69	156.41	V2E4	0.058988695
13	2	2.43	31.71	483.93	184.36	0.81	6	gold	0.82	186.24	V2E5	0.070237385
14	2	2.43	34.14	520.99	198.47	0.87	6	gold	0.82	186.24	V2E6	0.070237385
15	2	2.43	36.57	558.05	212.59	0.94	6.5	gold/lime	0.96	217.25	V2E7	0.08193075
16	2	2.43	39.00	595.11	226.71	1.00	6.5	gold/lime	0.96	217.25	V2E8	0.08193075
17	3	3.00	42.00	791.68	301.59	1.33	7.5	lime/lavendar	1.27	287.86	V3E1	0.108559292
18	3	2.43	44.43	677.94	258.26	1.14	7	lime	1.12	254.38	V3E2	0.095933989
19	3	2.43	46.86	715.00	272.38	1.20	7.5	lime/lavendar	1.27	287.86	V3E3	0.108559292
20	3	2.43	49.29	752.06	286.50	1.26	7.5	lime/lavendar	1.27	287.86	V3E4	0.108559292
21	3	2.43	51.71	789.12	300.62	1.32	7.5	lime/lavendar	1.27	287.86	V3E5	0.108559292
22	3	2.43	54.14	826.17	314.73	1.39	8	lavendar	1.45	329.33	V3E6	0.124200253
23	3	2.43	56.57	863.23	328.85	1.45	8	lavendar	1.45	329.33	V3E7	0.124200253
24	3	2.43	59.00	900.29	342.97	1.51	8	lavendar	1.45	329.33	V3E8	0.124200253
25	bal	1	3.00	62.00	1168.67	445.21	9.5	gray/turquoise	2.02	458.22	BalE1	0.17280757
26	bal	2	2.57	64.57	1043.27	397.43	9	gray	1.82	413.37	BalE2	0.155892732
27	bal	3	2.57	67.14	1084.81	413.26	9	gray	1.82	413.37	BalE3	0.155892732

SELECIONAR BOCAIS E VRP

Escolha de Emissores

- Senringer Super Spray (velho) 10 psi
- Senringer Super Spray (velho) 15 psi
- Senringer Super Spray (velho) 20 psi
- Senringer I-Wob 10 psi
- Senringer I-Wob 15 psi
- Senringer I-Wob 20 psi
- Senringer UPS 10 psi
- Senringer UPS 15 psi
- Senringer UPS 20 psi
- Nelson 3000 Serie 3TN 10 psi
- Nelson 3000 Serie 3TN 15 psi
- Nelson 3000 Serie 3TN 20 psi
- Valmont 20 psi
- Fabrimar ASFLX 10 psi
- Fabrimar ASFLX 15 psi

Fonte: Dados do autor, 2016.

Na planilha “Sistema de Adução” (Figura 16), são inseridas as cotas dos nós que compõem sistema de adução, são eles: reservatório, montante e jusante da bomba, ligação de pressão, adutora e montante e jusante do ponto pivô. E também, são inseridas as informações de comprimento equivalente, diâmetro e rugosidade das tubulações.

Na planilha “Vãos” (Figura 17), são inseridas as informações construtivas do pivô central, como: comprimento do vão, diâmetro da linha lateral, número de saídas de cada vão, espaçamento entre saídas, altura das torres, altura do arqueamento da linha lateral, altura do emissor em relação ao solo, diâmetro do pendural e a cota de cada torre.

Na planilha “Bocais e Válvulas” (Figura 18), é selecionado, dentro de uma biblioteca, o fabricante do emissor desejado e a pressão de serviço. O programa indica, através da vazão desejada para cada posição da saída, o emissor com diâmetro de bocal que proporciona a vazão mais próxima a desejada, para cada posição de saída ao longo da linha lateral do pivô central.

O desenvolvimento dessa ferramenta de edição, permitiu gerar o arquivo texto com maior rapidez, pois o número de dados de entrada solicitados é menor do que se fosse informada diretamente no EPANET 2.0. Para exemplificar, na Figura 19, é ilustrada uma comparação da quantidade de informações solicitadas pelo EPANET 2.0 e pela ferramenta de edição de dados de entrada desenvolvida, para a situação do pivô central real, situado no distrito de Macaia, município de Bom Sucesso/MG.

É importante ressaltar que na ferramenta Excel, há maior facilidade na entrada de informações nas células, com as diferentes edições permitidas pelo programa, diferentemente do EPANET 2.0, que permite a edição de cada componente por vez.

Figura 19 - Comparação da quantidade de dados de entrada necessário para simulação hidráulica do pivô central real no EPANET 2.0 e na ferramenta de edição desenvolvida

EPANET 2.0				Ferramenta de Edição	
Componentes Hidráulicos	Quantidade	Nº de dados de entrada para cada componente	Total Parcial	Planilhas	Nº Total de dados de entrada
Nós	578	1	578	Menu	11
Tubos	387	5	1935	Sist. Adução	29
Válvulas	190	5	950	Vãos	89
Emissores	190	2	380	Bocais	1
Reservatório	1	1	1		
Total			3844	Total	130

Fonte: Dados do autor (2016)

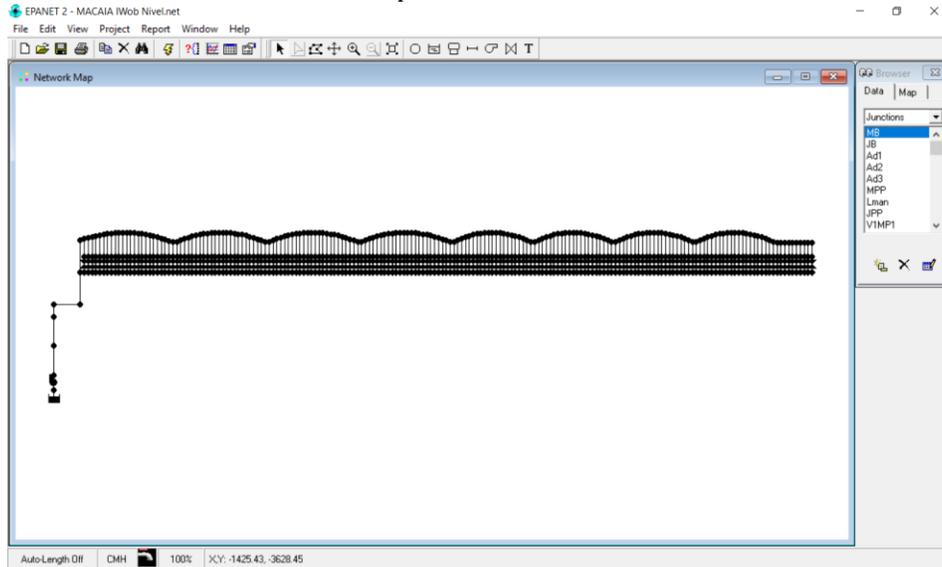
Pode-se notar que, com o desenvolvimento da ferramenta de edição, o número de dados de entrada reduziu consideravelmente, sendo 3,4 % do que seria necessário se utilizado somente o software EPANET 2.0.

4.2 Utilização da ferramenta EPANET 2.0 para simulação hidráulica de sistemas mecanizados de irrigação do tipo pivô central

Na validação do software EPANET 2.0 para a simulação hidráulica de sistemas mecanizados de irrigação por aspersão do tipo pivô central, foram utilizados dois sistemas, o pivô central real, sem canhão final, situado no município de Bom Sucesso/MG e um pivô central teórico, com canhão final.

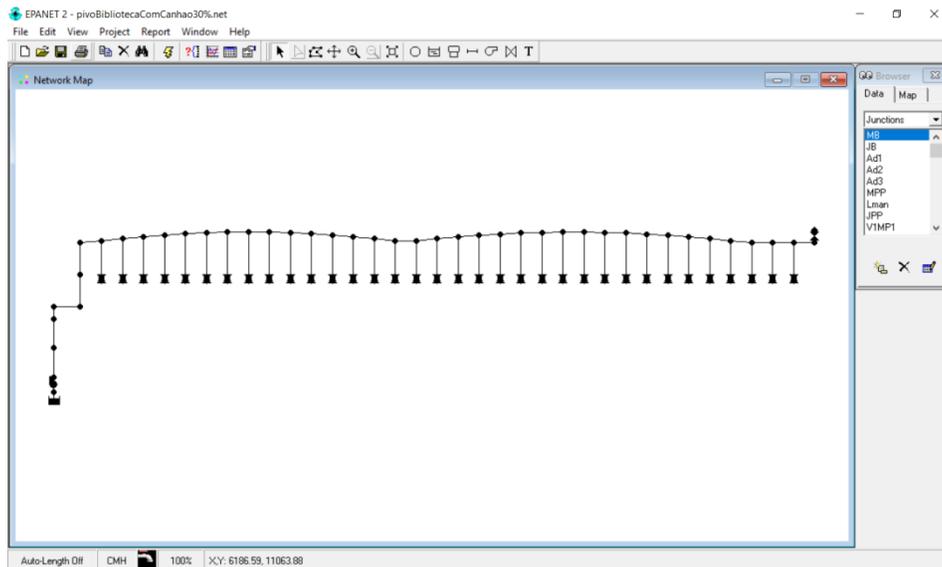
Nas Figuras 20 e 21, ilustram-se a disposição dos pivôs centrais no EPANET 2.0, após a geração do arquivo texto, através da ferramenta de edição desenvolvida.

Figura 20 - Janela do EPANET 2.0 com a simulação do pivô central real, sem canhão final, município de Bom Sucesso/MG



Fonte: Dados do autor (2016)

Figura 21 - Janela do EPANET 2.0 com a simulação do pivô central teórico, com canhão final



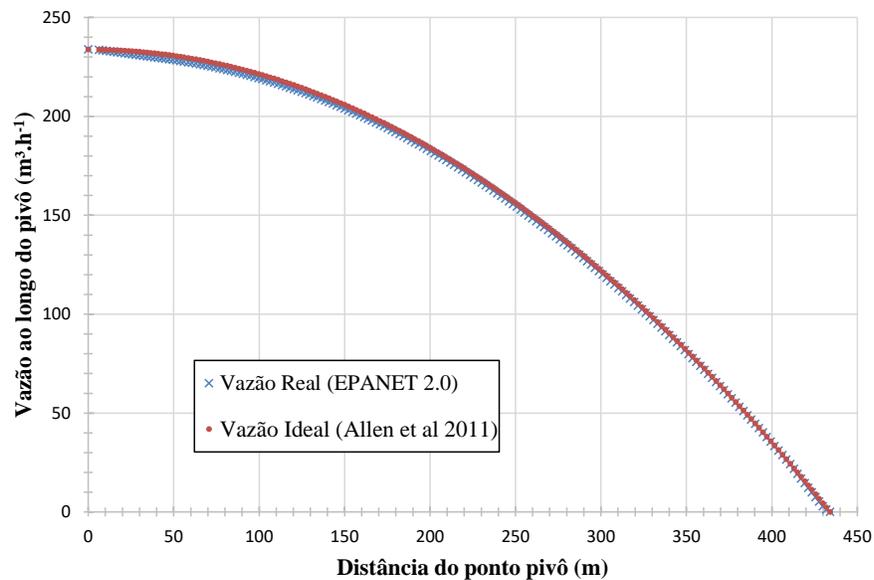
Fonte: Dados do autor (2016)

Pode-se notar, nas Figuras 20 e 21, que os arquivos texto gerados pela ferramenta de edição, funcionaram corretamente, apresentando layouts de acordo com o desejado, validando a utilização da ferramenta de edição como auxiliar ao software EPANET 2.0.

4.2.1 Pivô central real – vazão dos emissores

A distribuição de vazão, ao longo da linha lateral (Figura 22), foi um dos resultados obtidos com o software EPANET 2.0, esses resultados foram comparados com valores obtidos, por meio da Equação 9, apresentada por Allen, Keller e Martin (2011).

Figura 22 - Comparação da distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central real



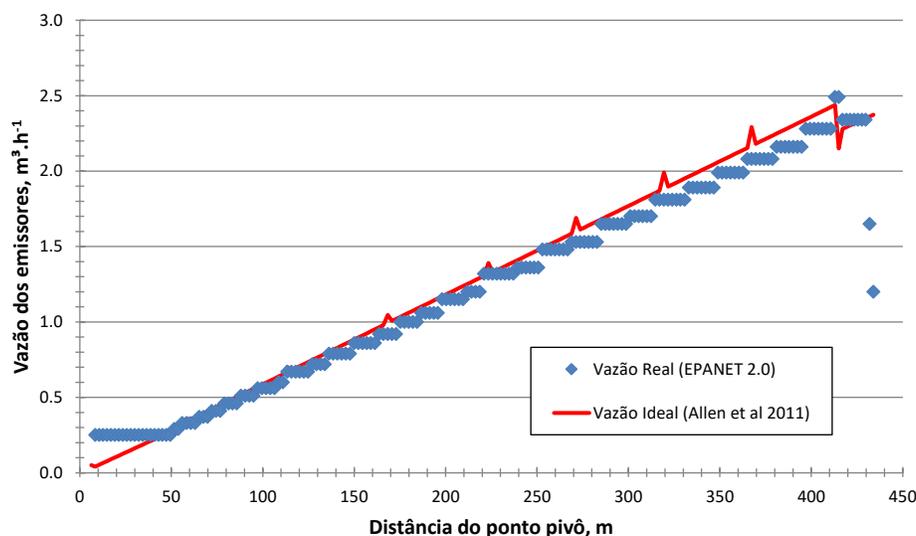
Fonte: EPANET 2.0 (2016).

A vazão total (Q_t) do pivô central foi de $233,8 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, e com o distanciamento do ponto pivô, a vazão foi decaindo até chegar no último emissor, pois não há canhão final.

É possível notar, na Figura 22, que os resultados obtidos com o software EPANET 2.0 mantém o mesmo comportamento que os resultados obtidos pro meio do método analítico proposto por Allen, Keller e Martin (2011) e por Scaloppi e Allen (1993), confirmando a utilização do EPANET 2.0, nesse tipo de análise hidráulica.

Para o pivô central real (localizado no município de Bom Sucesso/MG), foram utilizados, na simulação hidráulica, os diâmetros de bocais, conforme instalação no campo. A comparação da vazão de cada emissor instalado no campo com a distribuição ideal é mostrada na Figura 23.

Figura 23 - Distribuição de vazão dos emissores com bocal comercial utilizados no campo e com bocal ideal



Fonte: Dados do autor (2016)

Os bocais considerados ideais, são os que possuem o coeficiente k calculados a partir da vazão e pressão de serviço do modelo do emissor. A vazão foi determinada, a partir da taxa de aplicação aparente de água (L_b/T_g) e a área irrigada por cada emissor.

É possível notar que, em razão do fato do primeiro vão utilizar bocais menores, os bocais comerciais mantêm uma vazão maior no início da linha lateral e no final da linha lateral, menor que a vazão do bocal ideal. Pelo fato de os bocais comerciais utilizados em campo serem diferentes dos bocais considerados como ideais, há uma diferença na distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central, porém a vazão total (Q_t) é a mesma.

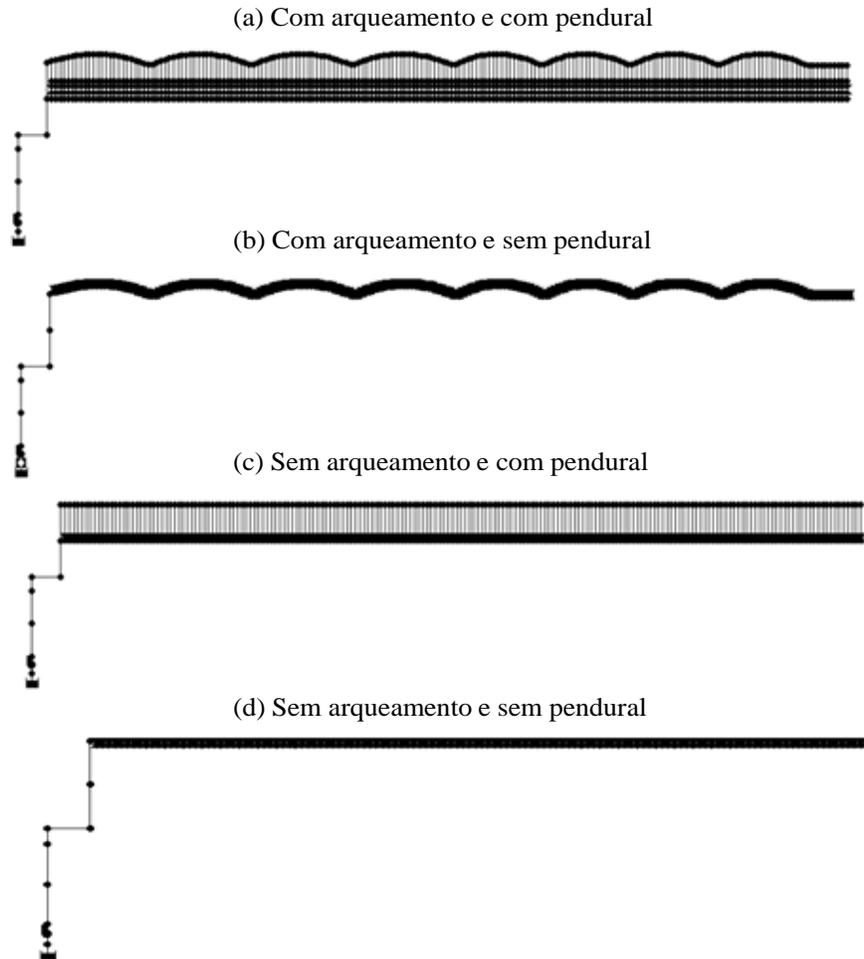
4.2.2 Pivô central real – distribuição de pressão

Para esse pivô central, foram realizadas as seguintes simulações hidráulicas:

- i) Pivô central com arqueamento da linha lateral, com e sem pendural;
- ii) Pivô central com e sem arqueamento da linha lateral, sem pendural;

Na Figura 24, ilustra-se o resultado do layout proposto nas simulações hidráulicas para o pivô central real.

Figura 24 - Simulações hidráulicas no EPANET 2.0.

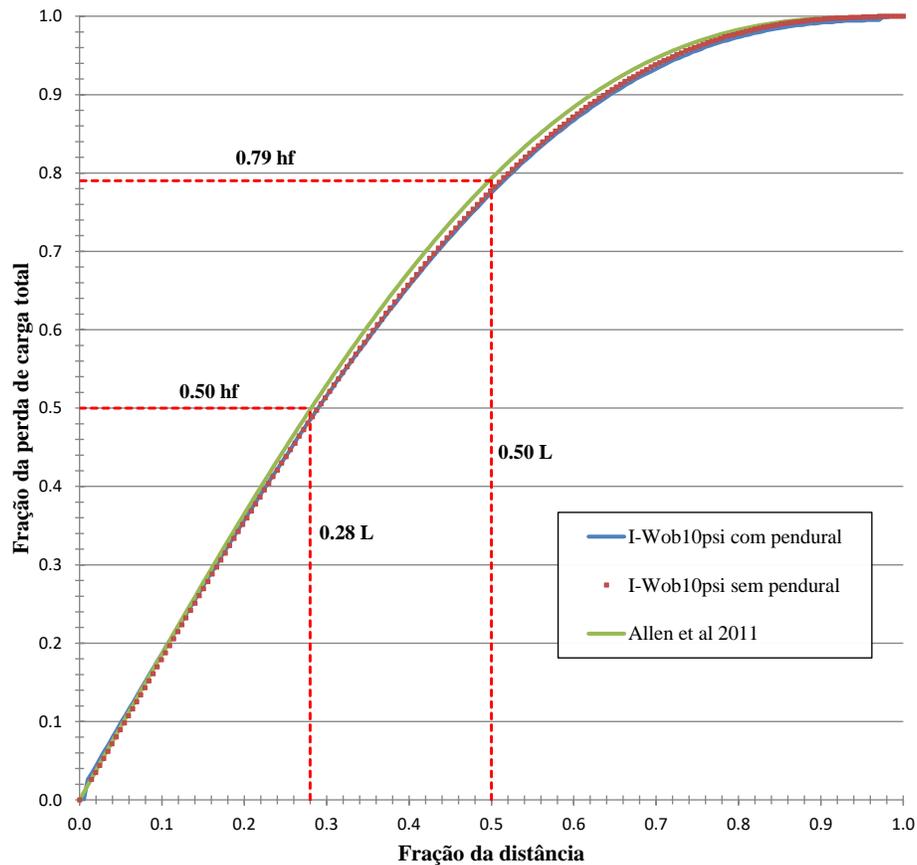


(a) Pivô com arqueamento e com pendural; (b) Pivô com arqueamento e sem pendural; (c) Pivô sem arqueamento e com pendural; (d) Pivô sem arqueamento e sem pendural.

Fonte: Dados do autor (2016)

Utilizando o EPANET 2.0, é possível considerar o arqueamento da linha lateral do pivô central, na Figura 25 é possível comparar o efeito do pendural na distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, utilizando bocais Senninger I-Wob de 10 psi.

Figura 25 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral arqueada, do pivô central real, com efeito da influência do pendural



Fonte: Dados do autor, 2016.

Foram comparados os valores de distribuição de pressão, ao longo da linha lateral do pivô central, da simulação realizada no EPANET 2.0, com o método analítico proposto por Allen, Keller e Martin (2011).

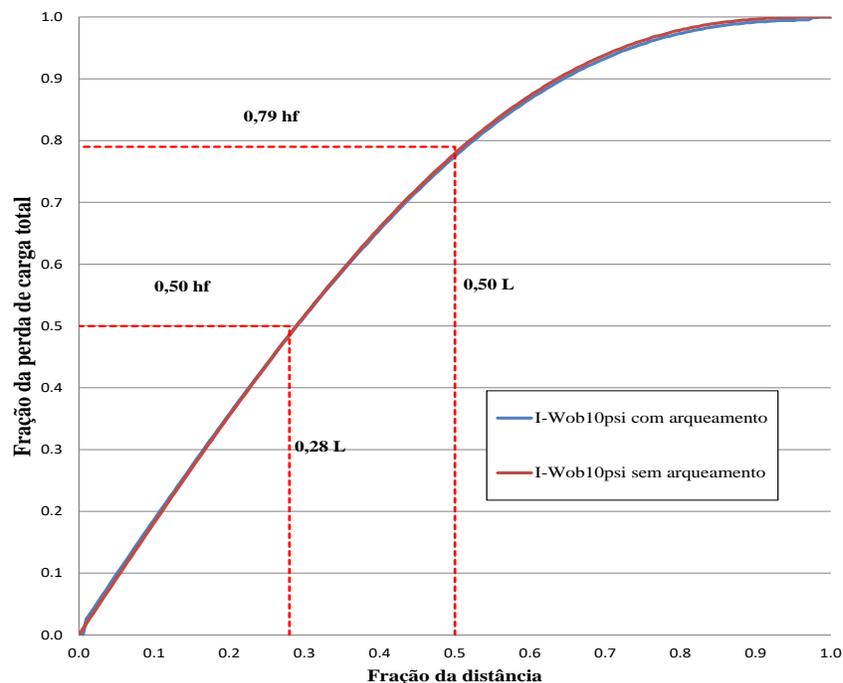
O pivô central simulado com pendural apresentou energia total ($P/\gamma + z$) máxima e mínima de 150,44 m e 139,73 mca, respectivamente, com uma diferença de 10,71 mca, ao longo da linha lateral. Para a simulação hidráulica,

sem a influência do pendural, os respectivos valores de energia total máxima e mínima, foram de 144,12 mca e 129,58 mca, com uma diferença de 14,54 mca.

Nota-se, na Figura 25, que há uma pequena diferença quando se considera o pendural na distribuição de pressão, o que valida a proposta de Allen, Keller e Martin (2011) em desconsiderar a influência do pendural na distribuição de pressão, ao longo da linha lateral do sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

Para mostrar o efeito da consideração do arqueamento da linha lateral do pivô central na distribuição de pressão (Figura 26), foi realizada a simulação do pivô central sem pendural, porém com arqueamento e sem arqueamento, utilizando os bocais Senniger I-Wob de 10 psi.

Figura 26 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com efeito da influência do arqueamento da linha lateral



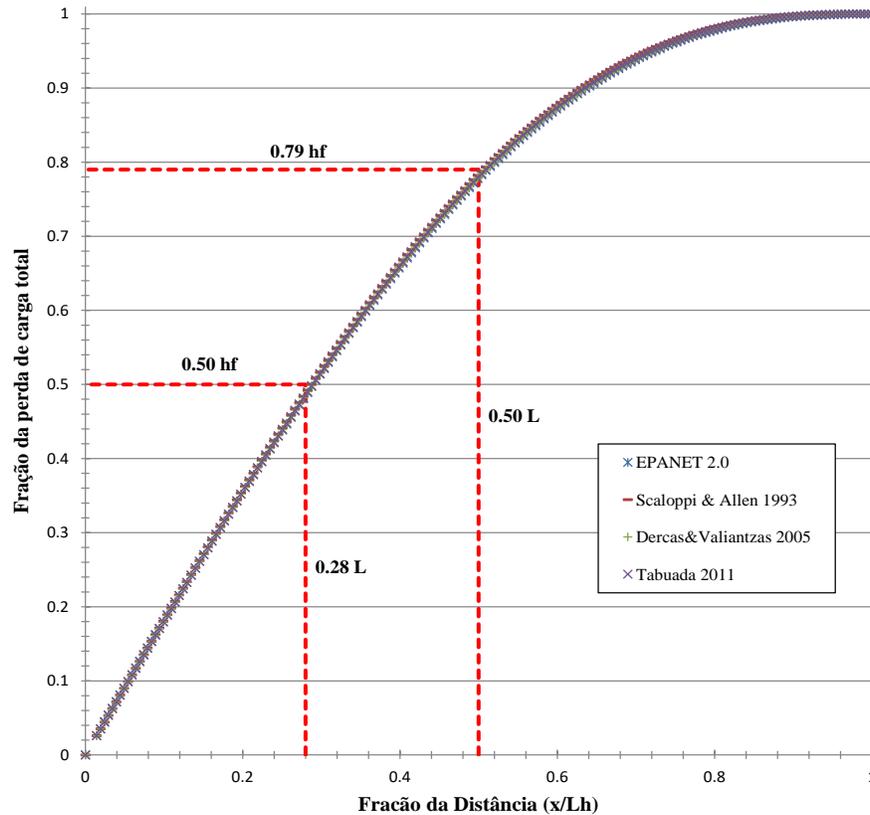
Fonte: Dados do autor (2016)

Segundo Allen, Keller e Martin (2011), o arqueamento da tubulação de cada vão são em cerca de 70 cm de altura e resulta em um erro de pressão de 1 psi (0,7 mca), o que pode ser considerado, de acordo com os autores, como admissível, visto a dificuldade que teria essa consideração no dimensionamento.

Nessa simulação (Figura 26), os valores de energia total ($P/\gamma + z$) máxima e mínima para o pivô central com arqueamento da linha lateral, foram de 150,44 mca e 139,73 mca, respectivamente, com uma diferença de 10,71 mca ao longo da linha lateral. Para o pivô central sem arqueamento da linha lateral, os respectivos valores de energia total máxima e mínima, foram de 141,70 mca e 131,03 mca, com uma diferença de 10,67 mca. Nota-se que a diferença na distribuição de pressão ao longo da linha lateral é mínima, corroborando a proposta de Allen, Keller e Martin (2011) que desconsidera a presença de arqueamento na linha lateral, visto a dificuldade para cálculo da mesma e a pequena diferença na distribuição de pressão.

Para validar o software EPANET 2.0 com uma ferramenta de auxílio a análise hidráulica de sistemas de irrigação por aspersão do tipo pivô central, os resultados de distribuição de pressão, ao longo da linha lateral do pivô central, nesse caso sem arqueamento, sem pendural e equipados com emissores Senninger i-Wob 10 psi, foram comparados com métodos analíticos propostos por Scaloppi e Allen (1993), Tabuada (2011) e Valiantzas e Dercas (2005), conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com efeito da influência do arqueamento da linha lateral



É possível notar que os resultados de distribuição de pressão, obtidos no software EPANET 2.0, são muito próximos aos métodos analíticos propostos por Scaloppi e Allen (1993), Valiantzas e Dercas (2005) e Tabuada (2011), validando a utilização do software como uma ferramenta de simulação hidráulica de sistemas de irrigação do tipo pivô central.

A Tabela 1 ilustra os valores de perda de carga (hf) e do fator de correção (F) da perda de carga apresentados pelo EPANET 2.0 e pelos métodos analíticos.

Tabela 1 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da perda de carga e fator de correção da perda de carga para linha lateral do pivô central real

Método	F	hf (m)	Erro (%)
EPANET 2.0	0,5662	13,270	-
Scaloppi & Allen (1993)	0,5460	13,265	-0,0358
Valiantzas & Dercas (2005)	0,5482	13,317	0,3579
Tabuada (2011)	0,5481	13,317	0,3536

É possível observar, na Tabela 1, que a perda de carga total (13,27 m) calculada pelo EPANET 2.0 apresentou um desvio máximo de 0,35% em relação aos métodos analíticos

As curvas dos métodos analíticos e do resultado obtido no software EPANET 2.0 mantém o mesmo comportamento. E também confirma o proposto por Allen, Keller e Martin (2011), que afirma que em 28% do comprimento da linha lateral ocorrem 50% da perda de carga, e em 50% do comprimento da linha lateral ocorrem 79% da perda de carga.

Na Tabela 2, são apresentados os valores da fração de perda de carga para diferentes pontos da linha lateral do pivô central em estudo (25, 50, 75 e 100% do comprimento).

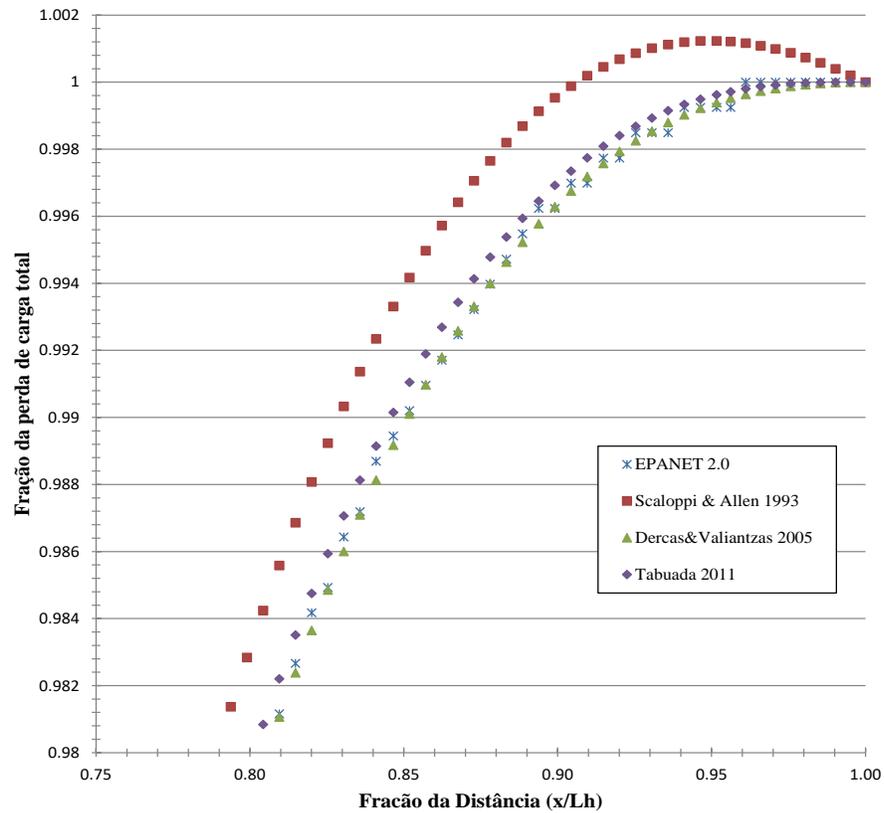
Tabela 2 - Valores de fração de perda de carga ao longo da linha lateral do pivô central no EPANET 2.0 comparados com diferentes métodos analíticos

% L	EPANET 2.0	Scaloppi & Allen	Erro	Valiantzas & Dercas	Erro	Tabuada	Erro
	% hf	% hf	%	% hf	%	% hf	%
0.25	0,447	0,450	0,628	0,448	0,131	0,448	0,190
0.5	0,775	0,780	0,622	0,776	0,122	0,776	0,213
0.75	0,959	0,963	0,454	0,959	0,051	0,960	0,135
1	1,000	1,002	0,140	0,999	-0,080	1,000	-0,020

Para este pivô central, as frações da perda de carga total, calculadas pelo EPANET 2.0 para os primeiros 25, 50, 75 e 100 % do comprimento total da lateral, apresentaram um desvio máximo de 0,63 % em relação aos métodos analíticos, contidos na Tabela 2.

Para ilustrar a diferença da solução proposta por Scaloppi e Allen (1993) das demais soluções analíticas e dos resultados obtidos no software EPANET 2.0, na Figura 28, com a diminuição da escala, é possível observar essa diferença.

Figura 28 - Comparação entre resultado do EPANET 2.0 com métodos analíticos da distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, com escala reduzida



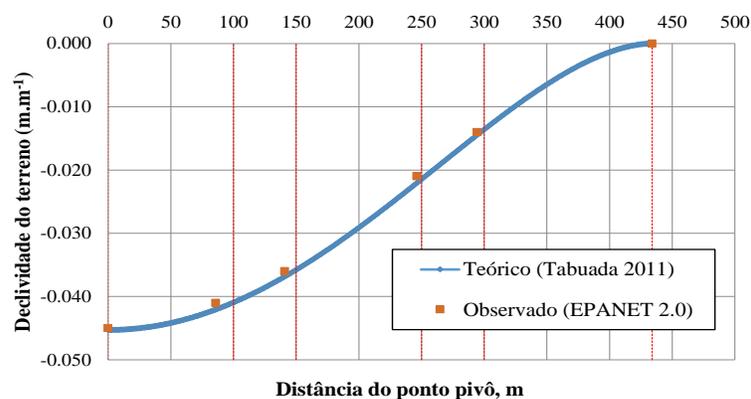
Em razão da redução da escala, nota-se a diferença entre o método analítico proposto por Scaloppi e Allen (1993) e os demais métodos e o EPANET 2.0. Para essa solução, foi utilizada até a terceira parte da série infinita da equação, se utilizando mais termos da série infinita, essa diferença tende a diminuir.

4.2.3 Pivô central real - Localização da posição do ponto de pressão mínima

Os resultados obtidos com o software EPANET 2.0, da distribuição de pressão ao longo do pivô central, foram comparados com o método analítico proposto por Tabuada (2011), pois esse método analítico foi validado na simulação anterior. Para este estudo, foram calculadas as declividades para pressão mínima em pontos ao longo da linha lateral do pivô real.

Nas Figuras 29 e 30, são mostradas as posições dos pontos de mínima pressão obtidos com o EPANET 2.0 para o pivô central real com arqueamento da linha lateral e sem arqueamento da linha lateral, respectivamente.

Figura 29 - Posição da mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central, com influência do arqueamento.

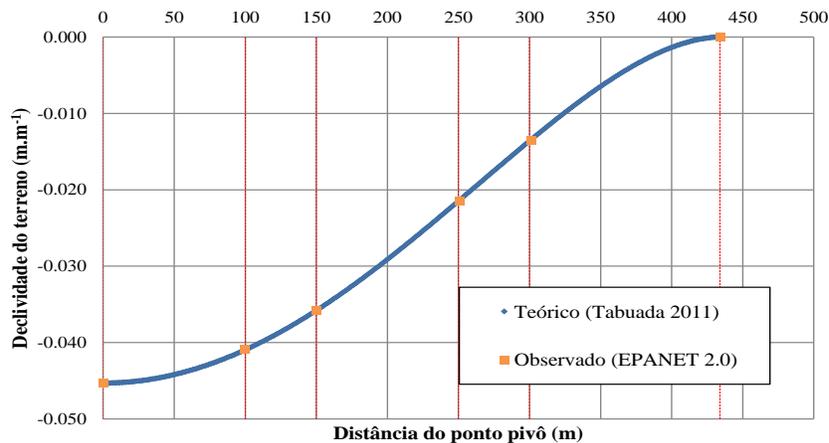


Fonte: Dados do autor (2016)

Nota-se, na Figura 29, que os pontos observados, obtidos com o software EPANET 2.0, estão deslocados em relação à curva obtida, pro meio do método analítico. Essa diferença é observada comparando os pontos do EPANET 2.0 com as retas de distanciamento do pivô central (0, 100, 150, 250, 300 e 434 m) e pode ser explicada, em razão da presença do arqueamento da linha lateral do pivô central, que deslocou o ponto de mínima pressão.

Foi realizada a mesma simulação hidráulica, mas retirando o arqueamento da linha lateral do pivô central, mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Posição da mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central, sem influência do arqueamento

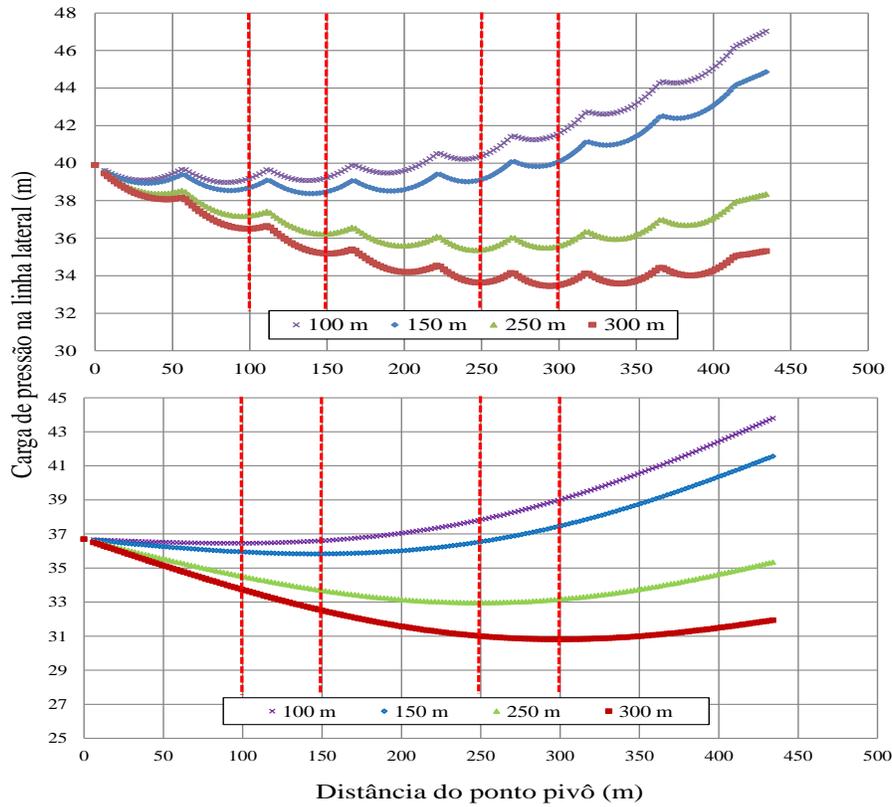


Fonte: Dados do autor (2016)

Pode-se observar que utilizando o arqueamento da linha lateral do pivô central, influencia na determinação do ponto de mínima pressão. Na Figura 30, nota-se que os pontos de mínima pressão observados com o software EPANET 2.0 foram os mesmos que os calculados utilizando o modelo teórico proposto por Tabuada (2011), e confirma a proposta de Allen, Keller e Martin (2011) que não utiliza o arqueamento da linha lateral do pivô central nas simulações hidráulicas.

Na Figura 31, é apresentada uma comparação da localização dos pontos de mínima pressão (100, 150, 250 e 300 m) para o pivô central com arqueamento e sem arqueamento da linha lateral

Figura 31 - Comparação da localização do ponto de mínima pressão do pivô central com e sem arqueamento da linha lateral, para diferentes declividades

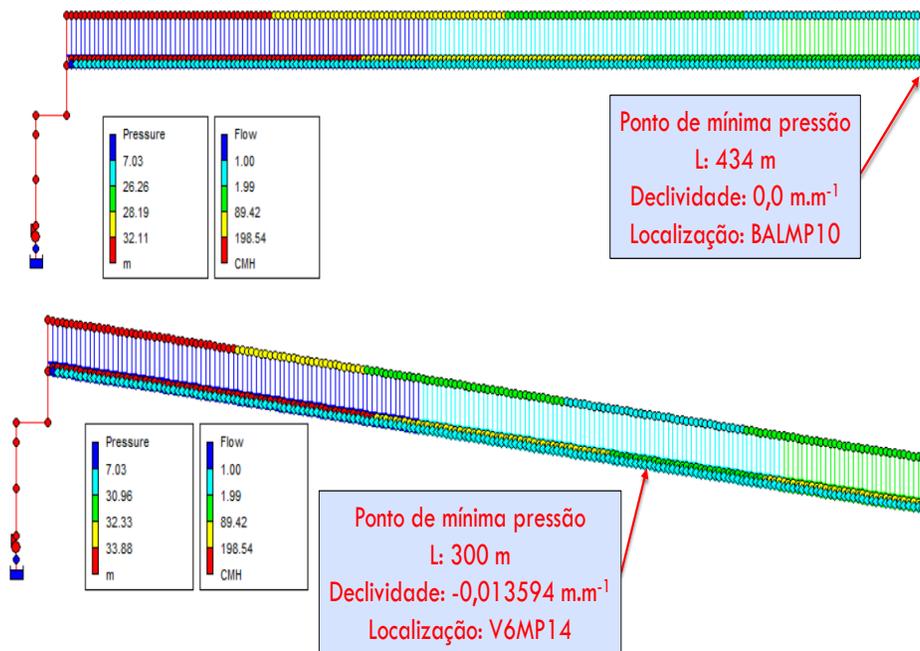


É possível observar, na Figura 31, que o ponto de mínima pressão para o pivô central considerando o arqueamento da linha lateral, é de difícil localização. Diferentemente do pivô central não considerando o arqueamento da linha lateral, em que a localização do ponto de mínima pressão é facilmente visualizada. Para os cinco valores de declividade uniforme da linha lateral, que, segundo o método analítico de cálculo, posicionariam o ponto de mínima pressão à distâncias de, respectivamente, 300, 250, 150, 100 e 0 m do ponto de entrada de água na linha lateral. Em razão da precisão dos valores de carga de pressão apresentados nos arquivos de saída do EPANET 2.0, estas simulações indicaram a ocorrência dos menores valores de pressão da linha lateral ao longo de trechos delimitados por distâncias do ponto de entrada de água na lateral que variavam entre,

respectivamente, 291,9 m e 305,6 m, 239,4 m e 257,6 m, 140,8 m e 150 m, 78,9 m e 106,4 m e 0 m e 27,8m.

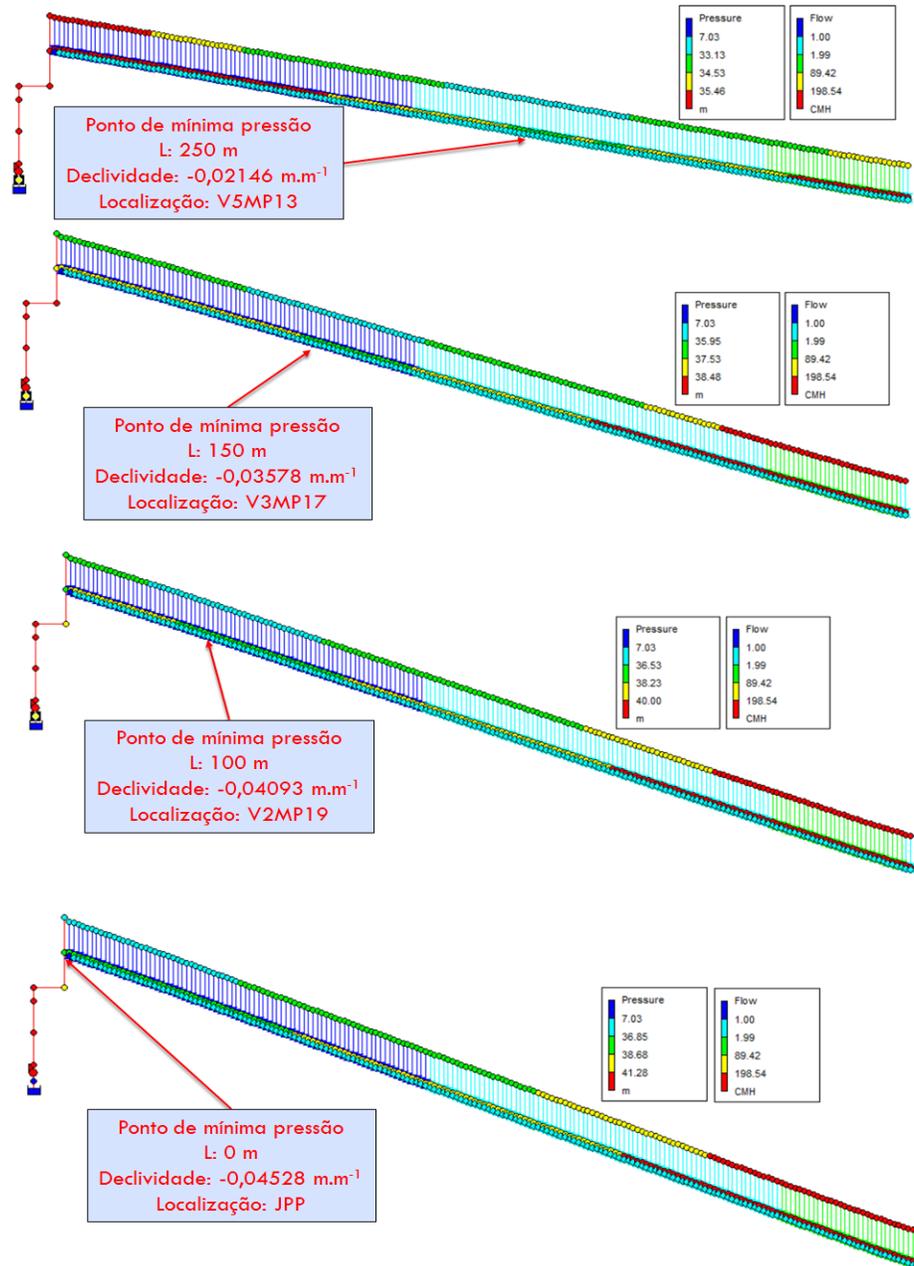
A fim de ilustrar o deslocamento do ponto de mínima pressão da extremidade da linha lateral do pivô central para o ponto pivô, quando este está em declive, foi simulado o pivô central real sem arqueamento da linha lateral, com pendural. Na Figura 32, é mostrada a simulação desse pivô central, a partir do arquivo texto gerado pela ferramenta de edição desenvolvida para auxiliar na entrada de dados no EPANET 2.0, com as opções de visualização da carga de pressão e da vazão (*pressure* e *flow*).

Figura 32 - Localização do ponto de mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, sob diferentes declividades (continua na próxima página)



Fonte: Dados do autor (2016)

Figura 32 - Localização do ponto de mínima pressão ao longo da linha lateral do pivô central real, sob diferentes declividades (continuação da página anterior)



Fonte: Dados do autor (2016)

Na Figura 32, é possível observar que, quando a linha lateral do pivô central está em nível, o ponto de mínima pressão se localiza na extremidade da linha lateral, à medida que o terreno apresenta declividade, o ponto de mínima pressão migra da extremidade da linha lateral para o ponto pivô. Com a utilização do EPANET 2.0, fica muito claro esse fenômeno, corroborando a afirmação de Colombo (2003) e Allen, Keller e Martin (2011).

4.2.4 Pivô central teórico

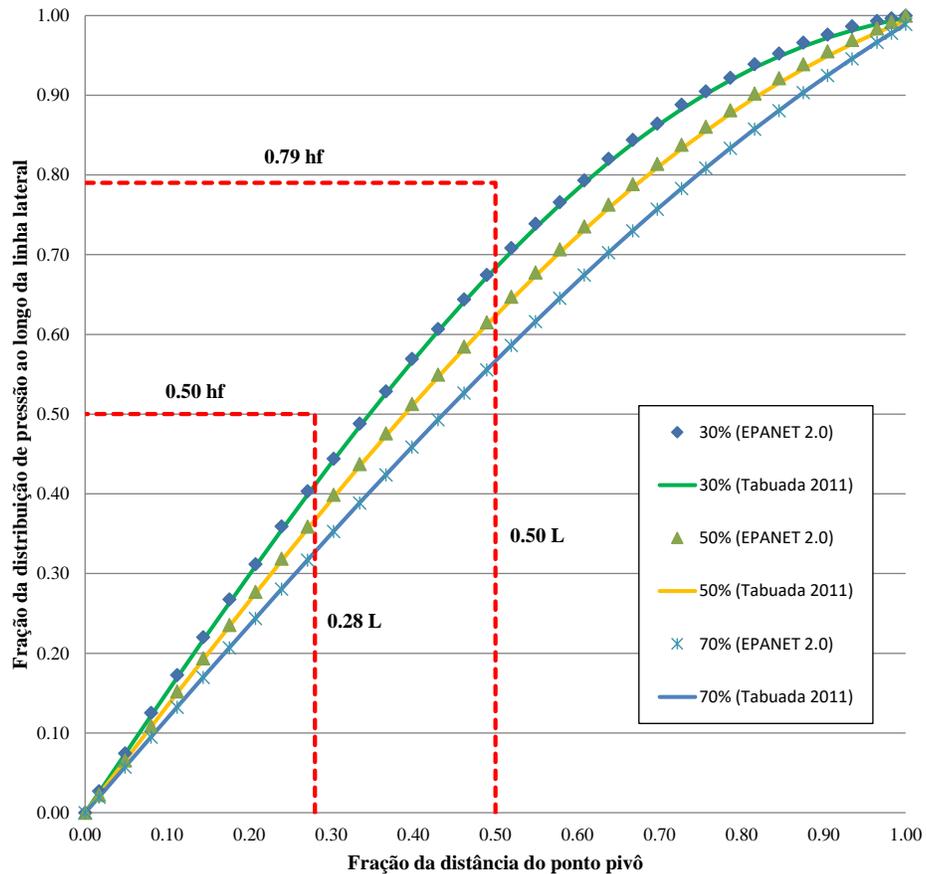
Para analisar a influência do canhão final na distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central, foi utilizado o pivô central teórico, onde foi adotado um número menor de componentes hidráulicos.

Para este pivô central, foram feitas as seguintes simulações:

- pivô sem canhão final;
- pivô com canhão final com diferentes vazões (30%, 50% e 70% da vazão total do sistema).

A simulação hidráulica deste pivô central, no EPANET 2.0, obteve-se os resultados de distribuição da pressão ao longo da linha lateral do pivô central, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô para diferentes vazões no canhão final comparado com o método analítico apresentado por Tabuada (2011)



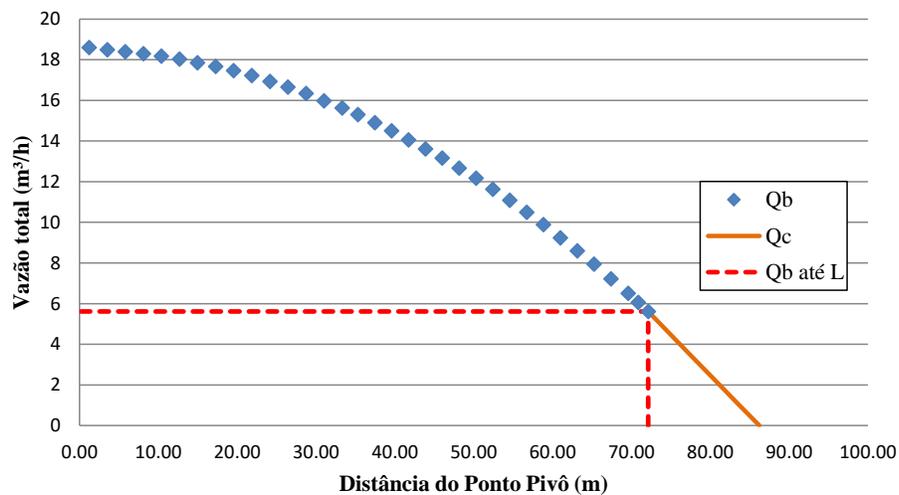
É possível observar que, com o aumento da porcentagem da vazão do canhão final em relação à vazão total do sistema, a curva da distribuição de pressão ao longo da linha lateral do pivô central tende a linearidade, validando os resultados obtidos no EPANET 2.0.

Nessa simulação, os resultados obtidos com o software EPANET 2.0 apresentaram o mesmo comportamento dos resultados obtidos com o método

analítico proposto por Tabuada (2011), validando a utilização do software, e ainda, confirmando o estudo de Scaloppi e Allen (1993).

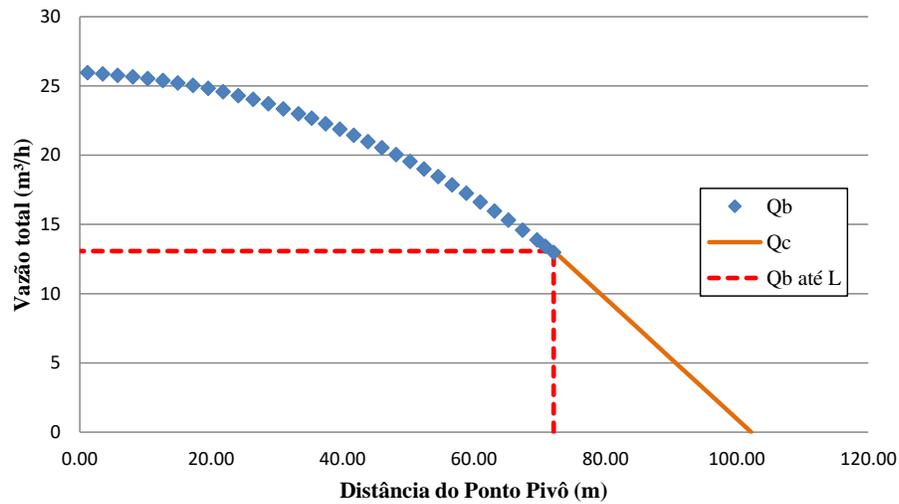
Nas Figuras 34 a 36, ilustra-se a distribuição da vazão ao longo da linha lateral do pivô central e as parcelas da vazão do círculo básico (Q_b) e da vazão do canhão final (Q_c).

Figura 34 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 30% da vazão total



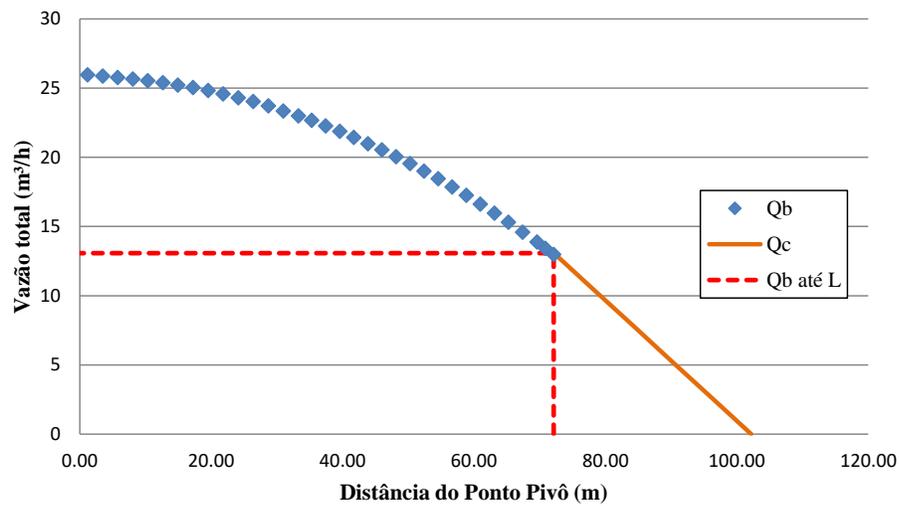
Fonte: Dados do autor (2016)

Figura 35 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 50% da vazão total



Fonte: Dados do autor (2016)

Figura 36 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô central teórico com vazão de 70% da vazão total



Fonte: Dados do autor (2016)

É importante ressaltar que, em razão da presença do canhão final, a vazão do pivô central até o comprimento total da linha lateral (L) é a vazão dos emissores ou vazão do círculo básico (Qb), o comprimento da linha lateral do pivô central que compreende a vazão do canhão é a figura matemática comprimento hidráulico (Lh) que é a relação entre a vazão total do pivô central com a vazão do canhão final, conforme proposto por Tabuada (2011) e Valiantzas e Dercas (2005).

Os valores obtidos com o software EPANET 2.0, de perda de carga total do sistema, para as vazões no canhão final de 30%, 50% e 70% da vazão total foram 2,96 m, 6,20 m e 18,20 m respectivamente. Aplicando o método analítico de Tabuada (2011) (Equações 25 a 27), utilizando o software *MathCad*, pode-se observar a igualdade dos resultados.

- Pivô central com canhão final com vazão de 30% da vazão total

$$\frac{10,67}{135^{1,852} \cdot 0,06^{ed}} \cdot \left(\frac{18,69}{3600}\right)^{ev} \cdot 72,13 \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right) \cdot \text{fhyper} \left[0,5; -ev; 1,5; \left(1 - \frac{5,61}{18,69}\right) \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right)^2\right] = 2,96 \quad (25)$$

- Pivô central com canhão final com vazão de 50% da vazão total

$$\frac{10,67}{135^{1,852} \cdot 0,06^{ed}} \cdot \left(\frac{26,06}{3600}\right)^{ev} \cdot 72,13 \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right) \cdot \text{fhyper} \left[0,5; -ev; 1,5; \left(1 - \frac{13,08}{26,06}\right) \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right)^2\right] = 6,197 \quad (26)$$

- Pivô central com canhão final com vazão de 50% da vazão total

$$\frac{10,67}{135^{1,852} \cdot 0,06^{ed}} \cdot \left(\frac{43,6}{3600}\right)^{ev} \cdot 72,13 \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right) \cdot \text{fhyper} \left[0,5; -ev; 1,5; \left(1 - \frac{30,52}{43,6}\right) \cdot \left(\frac{72,13}{72,13}\right)^2 \right] = 18,197 \quad (27)$$

Neste caso, os valores de perda de carga total simulados pelo EPANET 2.0 apresentaram um desvio máximo de 0,048 % em relação ao método analítico considerado, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de perda de carga apresentados pelo EPANET 2.0 e pelo método analítico para diferentes frações de vazão do canhão final em relação à vazão na entrada do pivô central

Qc/Qt	EPANET 2.0	Tabuada (2011)	Erro
	hf (m)	hf (m)	%
0,30	2,960	2,960	0,000
0,50	6,200	6,197	0,048
0,70	18,200	18,197	0,016

No anexo 1, são apresentados os resultados que o EPANET retorna ao usuário, para essa simulação, quando solicitado o resultado completo. Na plataforma do programa, é possível visualizar os resultados em formatos de tabelas e gráficos, porém com inconveniente de não ser possível transportar para o Ms Excel.

5 CONCLUSÃO

É possível utilizar o EPANET 2.0 para simulações hidráulicas de sistemas de irrigação do tipo pivô central, desde que haja uma ferramenta de edição dos dados de entrada, pois o processo de edição é muito lento, tornando inviável a utilização do programa para essa situação.

O arqueamento da linha lateral do pivô central não apresentou diferença significativa nos resultados obtidos, podendo ser desconsiderado em análises hidráulicas de sistemas mecanizados de irrigação por aspersão do tipo pivô central.

Houve mínima diferença nos resultados obtidos na comparação do pivô central com e sem presença de pendural, na distribuição espacial de pressão ao longo da linha lateral.

A migração do ponto de mínima pressão da extremidade da linha lateral para o ponto pivô, com a mudança de declividade do terreno, foi confirmada e o software EPANET 2.0 facilita a visualização dessa movimentação do ponto de mínima pressão.

Para simplificar a utilização do EPANET 2.0, na descrição da rede hidráulica, o arqueamento do pivô e os pendurais podem ser desconsiderados, permitindo uma redução sensível do número de nós e tubos que compõem a rede.

A redução no número de componentes, que são necessários para descrever a rede de distribuição de água dos sistemas de irrigação do tipo pivô central, pode contribuir para evitar, durante as simulações do EPANET 2.0, problemas de alteração indevida no modo de operação das inúmeras válvulas reguladoras de pressão (PRV) instaladas ao longo da linha lateral.

Em razão da facilidade na visualização dos resultados, e pela sua facilidade de edição, proporcionada pelo aplicativo desenvolvido para descrever a rede de distribuição os mais diversos tipos de sistemas de irrigação do tipo pivô

central, o EPANET 2.0 também pode ser utilizado como uma ferramenta didática para o ensino da hidráulica de pivôs centrais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**: relatório síntese. Brasília: ANA, 2016. 33 p.
- ALLEN, R. G.; KELLER, J.; MARTIN, D. **Irrigation association**: center pivot design. 2. ed. Saint Joseph: ASAE, 2011. 304 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2008. 625 p.
- BHAVE, P. R. **Analysis of flow in water distribution networks**. Lancaster: Technomic Publishing, 1991. 536 p.
- CHANDRUPATLA, R. T.; OSLER, J. T. The perimeter of an ellipse. **Math Scientist**, Oxford, v. 35, p. 122-131, 2010.
- CHU, S. T.; MOE, D. L. Hydraulics of a center pivot system. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 15, n. 5, p. 894-896, 1972.
- COLOMBO, A. Pivô Central. In: MIRANDA, J. H. de; PIRES, R. C. de M. (Org.). **Irrigação**: volume 2. Piracicaba: Funep, 2003. p. 209-258.
- COSTA, M. G.; CASTRO, M. A. H. Uma interface de pré-processamento para o EPANET utilizando o AutoCAD: o programa UFC2. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SEREA, 2006. p. 1-9.
- DUNLOP, E. J. **WADI users manual**. Dublin: Government Computer Services Board, 1991.
- GEORGE, A.; LIU, J. W.-H. **Computer solution of large sparse positive definite systems**. New York: Prentice-Hall, 1981. 208 p.
- GOMES, H. P. **Sistemas de irrigação**: eficiência energética. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 281 p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: The Blackburn Press, 1990. 652 p.

KRANZ, W. L. et al. Flow control devices for center pivot irrigation systems. **NebGuide G888**, Nebraska, p. 1-3, 2007.

LUCENA, K. F. M. EPANET-IRRIG: aperfeiçoamento do EPANET para aplicações em sistemas de irrigação. **Revista Principia**, Paraíba, n. 20, p. 1-13, 2012.

MEDEIROS, A. M. M. **Potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central com uso de inversor de frequência no estado de Goiás**. 2005. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

PAULINO, J. et al. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abr./jun. 2011.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2.0 Brasil**: manual do usuário. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009. 200 p.
ROSSMAN, L. EPANET 2 users manual. **Technical Report EPA/600/R-00/057**, United States, p. 1-200, Sept. 2000.

SALGADO, R.; TODINI, E.; O'CONNELL, P. E. Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER MODELING OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS, 1988, Kentucky. **Proceedings...** Kentucky: [s.n.], 1988.

SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of center-pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Elmsford, v. 119, n. 3, p. 554-567, 1993.

SILVA, G. J.; KLAR, A. E. Modelo de software livre para avaliação de sistema de irrigação por pivô central. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 70-84, 2010.

TABUADA, M. A. Friction head loss in center-pivot laterals with the lateral divided into several reaches. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Elmsford, v. 2, p. 107, July 2013.

TABUADA, M. A. Hydraulics of center-pivot laterals: a complete analysis of friction head loss. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Elmsford, v. 137, n. 8, p. 513- 523, Aug. 2011.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología**. 3. ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2005. 581 p.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient method for the analysis of pipe networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATIONS FOR WATER SUPPLY AND DISTRIBUTION, 1987, Leicester. **Proceedings...** Leicester: [s.n.], 1987. p. 1-20.

VALIANTZAS, J. D.; DERCAS, N. Hydraulic analysis of the multidiameter center-pivot sprinkler laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Elmsford, v. 131, n. 2, p. 137-146, Apr. 2005.

VALLEY BROCHURES. **Valley corner pivots**. [S.l.: s.n.], 2010.

ZAGGO, S. P.; COLOMBO, A.; GIL, O. F. Desempenho de válvulas reguladoras de pressão utilizadas em sistemas pivô central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19. 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 1990. v. 1, p. 360-379.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Simulação hidráulica no EPANET 2.0 (Rossman, 2000)

O EPANET 2.0 permite a resolução de equações da continuidade e da conservação de energia e a relação entre a vazão e a perda de carga, que caracterizam o equilíbrio hidráulico da rede. São resolvidos por meio do Método Híbrido Nó-Malha, conforme Todini e Pilati (1987), chamado Método do Gradiente por Salgado et al (1988), em virtude desse método ser o mais simples. Este foi escolhido para obter valores de vazão e cota piezométrica na rede.

Considerando os nós com cota piezométrica fixa, a relação vazão-perda de carga numa tubulação entre os nós i e j pode ser traduzida pela Equação 28.

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (28)$$

Onde, H é a cota piezométrica no nó ($P/\gamma+Z$);

h é a perda de carga total;

r é o termo de perda de carga (depende da equação de perda de carga adotada);

Q a vazão;

n o expoente da vazão;

m é o coeficiente de perda de carga localizada.

O segundo conjunto de equações refere-se à conservação das vazões nos nós, conforme Equação 29.

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad (29)$$

Onde,

D_i é o consumo no nó “i” e, por convenção, a vazão que chega ao nó é positiva. Assim, conhecendo a cota piezométrica em determinados nós (nós de cota piezométrica fixa), pretende-se obter os valores de cota piezométrica, H_i , e de vazão, Q_{ij} .

O Método do gradiente arbitra uma primeira distribuição nas tubulações que não têm necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz, conforme Equação 30.

$$(A \times H = F) = \begin{pmatrix} \frac{d}{dx_1} f_1 & \frac{d}{dx_2} f_1 & \dots & \frac{d}{dx_n} f_1 \\ \frac{d}{dx_1} f_2 & \frac{d}{dx_2} f_2 & \dots & \frac{d}{dx_n} f_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{d}{dx_1} f_n & \frac{d}{dx_2} f_n & \dots & \frac{d}{dx_n} f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \cdot \\ \Delta x_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ -f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \cdot \\ -f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix} \quad (30)$$

Onde,

A é a matriz jacobiana, H é o vetor de incógnitas em termos de cota piezométrica e F é o vetor dos termos do lado direito da equação.

Esse sistema linear é resolvido, utilizando o *sparse matrix method* baseado na reordenação dos nós por George e Liu, 1981. Após a reordenação dos nós, apenas os elementos não nulos da matriz jacobiana, tridiagonal, são armazenados e operados em memória.

Para a primeira iteração, a vazão numa tubulação e o correspondente a velocidade de 1 ft.s^{-1} , enquanto que a vazão, através da bomba e igual à vazão de dimensionamento especificada para a bomba. (Todos os cálculos são efetuados com a cota piezométrica em pés e a vazão em pés cúbicos por segundo).

APÊNDICE B - Determinação da perda de carga no EPANET 2.0

No programa EPANET, pode-se escolher entre três métodos para a determinação da perda de carga. As fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning, como citados anteriormente. Na Equação 31, mostra-se o formato da fórmula geral.

$$hf = A \times q^B \quad (31)$$

Onde,

hf é a perda de carga, q a vazão, A é o termo de perda de carga e B é o expoente a vazão.

Caso seja escolhida a fórmula de Darcy-Weisbach, são definidos diferentes métodos para determinação do fator de atrito, f , de acordo com os intervalos do número de Reynolds, Re , conforme mostrados na Tabela 4.

Tabela 4- Métodos de determinação do fator de atrito, f , utilizado pelo EPANET.

Regime de Escoamento	Metodologia
Regime laminar ($Re < 2000$)	A fórmula de Hagen-Poiseuille
Turbulento de transição ($2000 < Re < 4000$)	Interpolação cúbica a partir do ábaco de Moody
Turbulento rugoso ($Re > 4000$)	A fórmula de Swamee e Jain, como aproximação da fórmula de Colebrook-White

Fonte: Traduzido de Manual do usuário EPANET 2.0, Rossman, 2000.

Nas tabelas 5 e 6, são apresentadas as equações utilizadas para cada método de determinação das perdas de carga, nos sistemas internacional e inglês, respectivamente.

Tabela 5 - Fórmulas utilizadas, no Sistema Internacional, para determinação das perdas de carga em condutos forçados, utilizadas pelo programa EPANET 2.0

Fórmula	Termo da Perda de Carga (A)	Expoente da Vazão (B)
Hazen-Williams	$10.667.C^{-1.852}.d^{-4.871}.L$	1.852
Darcy - Weisbach	$0.0827.f(\epsilon, d, q).d^{-5}.L$	2
Chezy - Manning	$10.29.n^2.d^{-5.33}.L$	2

Notas:

C = coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams

ϵ = rugosidade absoluta (ou rugosidade de Darcy-Weisbach) (mm)

f = fator de Darcy-Weisbach (depende de ϵ , d e q)

n = coeficiente de rugosidade de Manning

d = diâmetro da tubulação (m)

L = comprimento da tubulação (m)

q = vazão (m³/s)

Fonte: Traduzido de Manual do usuário EPANET 2.0, Rossman, 2000.

Tabela 6 - Fórmulas utilizadas, no Sistema Inglês, para determinação das perdas de carga em condutos forçados, utilizadas pelo programa EPANET 2.0

<i>Formula</i>	<i>Resistance Coefficient (A)</i>	<i>Flow Exponent (B)</i>
Hazen-Williams	$4.727 C^{-1.852} d^{-4.871} L$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.0252 f(\epsilon, d, q) d^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$4.66 n^2 d^{-5.33} L$	2

Notes: C = Hazen-Williams roughness coefficient

ϵ = Darcy-Weisbach roughness coefficient (ft)

f = friction factor (dependent on ϵ , d, and q)

n = Manning roughness coefficient

d = pipe diameter (ft)

L = pipe length (ft)

q = flow rate (cfs)

Fonte: Manual do usuário EPANET 2.0, Rossman, 2000.

Na Tabela 7, são apresentados os valores dos coeficientes do material para cada fórmula de perda de carga.

Tabela 7 - Coeficiente de material para as fórmulas de perda de carga para tubulações novas

Material	C, Hazen-Williams (adimensional)	ε, Darcy-Weisbach (mm)	n, Manning (adimensional)
Ferro Fundido	130 - 140	0.25	0.012 - 0.015
Concreto	120 - 140	0.3 - 3	0.015 - 0.017
Ferro Galvanizado	120	0.15	0.015 - 0.017
Plástico	140 - 150	0.0015	0.011 - 0.015
Aço	140 - 150	0.03	0.015 - 0.017

Fonte: Manual do usuário EPANET 2.0, Rossman, 2000.

Para a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach, o fator de perda de carga “f” é calculado por diferentes equações, dependendo do número de Reynolds (Re).

Para $Re < 2000$, é utilizada a fórmula de Hagen – Pouseuille, descrito por Bhave, 1991, conforme equação 32.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (32)$$

Para $Re > 4000$, é utilizada a fórmula explícita aproximada de Swamee e Jain para resolver a equação de Colebrook-White, descrito por Bhave, 1991, conforme Equação 33.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (33)$$

Para valores de Reynolds entre 2000 e 4000, situado na zona de transição entre regime laminar e turbulento, é utilizada uma interpolação cúbica do ábaco de Moody, de acordo com Dunlop, 1991, conforme equações 34 a 43.

$$Y2 = \frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \quad (34)$$

$$Y3 = -0.86859 \ln \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \quad (35)$$

$$FA = (Y3)^{-2} \quad (36)$$

$$FB = FA \left(2 - \frac{0.00514215}{(Y2)(Y3)} \right) \quad (37)$$

$$X1 = 7FA - FB \quad (38)$$

$$X2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB \quad (39)$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FB \quad (40)$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB) \quad (41)$$

$$R = \frac{Re}{2000} \quad (42)$$

$$f = (X1 + R(X2 + (R(X3 + X4)))) \quad (43)$$

ANEXO

Resultado gerado pelo EPANET 2.0, da simulação do pivô central teórico utilizando canhão final com vazão de 50% em relação a vazão total do sistema.

Page 1

20/12/2016 09:10:03

```

*****
*                               *
*               E P A N E T     *
*                               *
*           Hydraulic and Water Quality   *
*                               *
*           Analysis for Pipe Networks    *
*                               *
*               Version 2.0             *
*                               *
*****

```

Input File: pivoBibliotecaComCanhao50%.net

Link - Node Table:

Link	Start	End	Length	Diameter
ID	Node	Node	m	mm
T.Suc	Reserva	MB	15	200
LIG.P	JB	Ad1	50	200
Tad1	Ad1	Ad2	50	200
Tad2	Ad2	Ad3	50	200
Tad3	Ad3	MPP	50	200
TS1	MPP	Lman	1.5	161
TS2	Lman	JPP	1.5	161

V1L1	JPP	V1MP1	1.2	168
V1P1	V1MP1	V1JP1	2.29453204	19.05
V1L2	V1MP1	V1MP2	2.292857143	168
V1P2	V1MP2	V1JP2	2.456095553	19.05
V1L3	V1MP2	V1MP3	2.292857143	168
V1P3	V1MP3	V1JP3	2.592635236	19.05
V1L4	V1MP3	V1MP4	2.292857143	168
V1P4	V1MP4	V1JP4	2.704151089	19.05
V1L5	V1MP4	V1MP5	2.292857143	168
V1P5	V1MP5	V1JP5	2.790643112	19.05
V1L6	V1MP5	V1MP6	2.292857143	168
V1P6	V1MP6	V1JP6	2.852111304	19.05
V1L7	V1MP6	V1MP7	2.292857143	168
V1P7	V1MP7	V1JP7	2.888555667	19.05
V1L8	V1MP7	V1MP8	2.292857143	168
V1P8	V1MP8	V1JP8	2.8999762	19.05
V1L9	V1MP8	V1MP9	2.292857143	168
V1P9	V1MP9	V1JP9	2.886372903	19.05
V1L10	V1MP9	V1MP10	2.292857143	168
V1P10	V1MP10	V1JP10	2.847745776	19.05
V1L11	V1MP10	V1MP11	2.292857143	168
V1P11	V1MP11	V1JP11	2.78409482	19.05
V1L12	V1MP11	V1MP12	2.292857143	168
V1P12	V1MP12	V1JP12	2.695420033	19.05
V1L13	V1MP12	V1MP13	2.292857143	168
V1P13	V1MP13	V1JP13	2.581721416	19.05

V1L14	V1MP13	V1MP14	2.292857143	168
V1P14	V1MP14	V1JP14	2.442998969	19.05
V1L15	V1MP14	V1MP15	2.292857143	168
V1P15	V1MP15	V1JP15	2.279252692	19.05
V2L1	V1MP15	V2MP1	2	168
V2P1	V2MP1	V2JP1	2.279703477	19.05
V2L2	V2MP1	V2MP2	2.14	168
V2P2	V2MP2	V2JP2	2.434088389	19.05
V2L3	V2MP2	V2MP3	2.14	168
V2P3	V2MP3	V2JP3	2.566418314	19.05
V2L4	V2MP3	V2MP4	2.14	168
V2P4	V2MP4	V2JP4	2.676693252	19.05
V2L5	V2MP4	V2MP5	2.14	168
V2P5	V2MP5	V2JP5	2.764913202	19.05
V2L6	V2MP5	V2MP6	2.14	168
V2P6	V2MP6	V2JP6	2.831078164	19.05
V2L7	V2MP6	V2MP7	2.14	168
V2P7	V2MP7	V2JP7	2.875188139	19.05
V2L8	V2MP7	V2MP8	2.14	168
V2P8	V2MP8	V2JP8	2.897243127	19.05
V2L9	V2MP8	V2MP9	2.14	168
V2P9	V2MP9	V2JP9	2.897243127	19.05
V2L10	V2MP9	V2MP10	2.14	168
V2P10	V2MP10	V2JP10	2.875188139	19.05
V2L11	V2MP10	V2MP11	2.14	168
V2P11	V2MP11	V2JP11	2.831078164	19.05

V2L12	V2MP11	V2MP12	2.14	168
V2P12	V2MP12	V2JP12	2.764913202	19.05
V2L13	V2MP12	V2MP13	2.14	168
V2P13	V2MP13	V2JP13	2.676693252	19.05
V2L14	V2MP13	V2MP14	2.14	168
V2P14	V2MP14	V2JP14	2.566418314	19.05
V2L15	V2MP14	V2MP15	2.14	168
V2P15	V2MP15	V2JP15	2.434088389	19.05
V2L16	V2MP15	V2MP16	2.14	168
V2P16	V2MP16	V2JP16	2.279703477	19.05
BALL1	V2MP16	BALMP1	2.2	140
BALP1	BALMP1	BALJP1	2.2	19.05
BALL2	BALMP1	BALMP2	1.266666667	140
BALP2	BALMP2	BALJP2	2.2	19.05
BALL3	BALMP2	BALMP3	1.266666667	140
BALP3	BALMP3	BALJP3	2.2	19.05
BALL4	BALMP3	BALMCF	1.266666667	140

Link	Start	End	Length	Diameter
ID	Node	Node	m	mm
1	MB	JB	#N/A	#N/A Pump
V1VRP1	V1JP1	V1E1	#N/A	19.05 Valve
V1VRP2	V1JP2	V1E2	#N/A	19.05 Valve
V1VRP3	V1JP3	V1E3	#N/A	19.05 Valve
V1VRP4	V1JP4	V1E4	#N/A	19.05 Valve

V1VRP5	V1JP5	V1E5	#N/A	19.05 Valve
V1VRP6	V1JP6	V1E6	#N/A	19.05 Valve
V1VRP7	V1JP7	V1E7	#N/A	19.05 Valve
V1VRP8	V1JP8	V1E8	#N/A	19.05 Valve
V1VRP9	V1JP9	V1E9	#N/A	19.05 Valve
V1VRP10	V1JP10	V1E10	#N/A	19.05 Valve
V1VRP11	V1JP11	V1E11	#N/A	19.05 Valve
V1VRP12	V1JP12	V1E12	#N/A	19.05 Valve
V1VRP13	V1JP13	V1E13	#N/A	19.05 Valve
V1VRP14	V1JP14	V1E14	#N/A	19.05 Valve
V1VRP15	V1JP15	V1E15	#N/A	19.05 Valve
V2VRP1	V2JP1	V2E1	#N/A	19.05 Valve
V2VRP2	V2JP2	V2E2	#N/A	19.05 Valve
V2VRP3	V2JP3	V2E3	#N/A	19.05 Valve
V2VRP4	V2JP4	V2E4	#N/A	19.05 Valve
V2VRP5	V2JP5	V2E5	#N/A	19.05 Valve
V2VRP6	V2JP6	V2E6	#N/A	19.05 Valve
V2VRP7	V2JP7	V2E7	#N/A	19.05 Valve
V2VRP8	V2JP8	V2E8	#N/A	19.05 Valve
V2VRP9	V2JP9	V2E9	#N/A	19.05 Valve
V2VRP10	V2JP10	V2E10	#N/A	19.05 Valve
V2VRP11	V2JP11	V2E11	#N/A	19.05 Valve
V2VRP12	V2JP12	V2E12	#N/A	19.05 Valve
V2VRP13	V2JP13	V2E13	#N/A	19.05 Valve
V2VRP14	V2JP14	V2E14	#N/A	19.05 Valve
V2VRP15	V2JP15	V2E15	#N/A	19.05 Valve

V2VRP16	V2JP16	V2E16	#N/A	19.05 Valve
BalVRP1	BALJP1	BALE1	#N/A	19.05 Valve
BalVRP2	BALJP2	BALE2	#N/A	19.05 Valve
BalVRP3	BALJP3	BALE3	#N/A	19.05 Valve
VRPCF	BALMCF	CF	#N/A	19.05 Valve

Energy Usage:

	Usage	Avg. Factor	Kw-hr Effic.	Avg. /m3	Peak Kw	Cost Kw	/day
Pump							
1		100.00	75.00	0.51	4.15	4.15	0.00

Demand Charge: 0.00
 Total Cost: 0.00

Node ID	Demand	Head CMH	Pressure m	Quality m
MB	0.00	46.00	-5.00	0.00
JB	0.00	187.74	136.74	0.00
Ad1	0.00	187.74	123.74	0.00
Ad2	0.00	187.74	111.74	0.00
Ad3	0.00	187.74	89.74	0.00
MPP	0.00	187.73	85.73	0.00
Lman	0.00	187.73	84.23	0.00

JPP	0.00	187.73	82.73	0.00
V1MP1	0.00	187.73	82.64	0.00
V1JP1	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E1	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP2	0.00	187.73	82.48	0.00
V1JP2	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E2	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP3	0.00	187.73	82.34	0.00
V1JP3	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E3	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP4	0.00	187.73	82.23	0.00
V1JP4	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E4	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP5	0.00	187.73	82.14	0.00
V1JP5	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E5	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP6	0.00	187.73	82.08	0.00
V1JP6	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E6	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP7	0.00	187.73	82.04	0.00
V1JP7	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E7	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP8	0.00	187.73	82.03	0.00
V1JP8	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E8	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP9	0.00	187.73	82.05	0.00

V1JP9	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E9	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP10	0.00	187.73	82.08	0.00
V1JP10	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E10	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP11	0.00	187.73	82.15	0.00
V1JP11	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E11	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP12	0.00	187.73	82.24	0.00
V1JP12	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E12	0.10	109.63	7.03	0.00
V1MP13	0.00	187.73	82.35	0.00
V1JP13	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E13	0.12	109.63	7.03	0.00
V1MP14	0.00	187.73	82.49	0.00
V1JP14	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E14	0.12	109.63	7.03	0.00
V1MP15	0.00	187.73	82.65	0.00
V1JP15	0.00	187.73	84.93	0.00
V1E15	0.15	109.63	7.03	0.00
V2MP1	0.00	187.73	82.65	0.00
V2JP1	0.00	187.73	84.93	0.00
V2E1	0.12	109.63	7.03	0.00
V2MP2	0.00	187.73	82.50	0.00
V2JP2	0.00	187.73	84.93	0.00
V2E2	0.15	109.63	7.03	0.00

V2MP3	0.00	187.73	82.36	0.00
V2JP3	0.00	187.73	84.93	0.00
V2E3	0.15	109.63	7.03	0.00
V2MP4	0.00	187.73	82.25	0.00
V2JP4	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E4	0.15	109.63	7.03	0.00
V2MP5	0.00	187.73	82.17	0.00
V2JP5	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E5	0.18	109.63	7.03	0.00
V2MP6	0.00	187.73	82.10	0.00
V2JP6	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E6	0.18	109.63	7.03	0.00
V2MP7	0.00	187.73	82.05	0.00
V2JP7	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E7	0.18	109.63	7.03	0.00
V2MP8	0.00	187.73	82.03	0.00
V2JP8	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E8	0.18	109.63	7.03	0.00
V2MP9	0.00	187.73	82.03	0.00
V2JP9	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E9	0.21	109.63	7.03	0.00
V2MP10	0.00	187.73	82.05	0.00
V2JP10	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E10	0.21	109.63	7.03	0.00
V2MP11	0.00	187.73	82.10	0.00
V2JP11	0.00	187.72	84.92	0.00

V2E11	0.21	109.63	7.03	0.00
V2MP12	0.00	187.73	82.16	0.00
V2JP12	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E12	0.24	109.63	7.03	0.00
V2MP13	0.00	187.73	82.25	0.00
V2JP13	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E13	0.24	109.63	7.03	0.00
V2MP14	0.00	187.73	82.36	0.00
V2JP14	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E14	0.24	109.63	7.03	0.00
V2MP15	0.00	187.73	82.50	0.00
V2JP15	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E15	0.24	109.63	7.03	0.00
V2MP16	0.00	187.73	82.65	0.00
V2JP16	0.00	187.72	84.92	0.00
V2E16	0.24	109.63	7.03	0.00
BALMP1	0.00	187.73	82.73	0.00
BALJP1	0.00	187.71	84.91	0.00
BALE1	0.28	109.63	7.03	0.00
BALMP2	0.00	187.73	82.73	0.00
BALJP2	0.00	187.72	84.92	0.00
BALE2	0.15	109.63	7.03	0.00
BALMP3	0.00	187.73	82.73	0.00
BALJP3	0.00	187.72	84.92	0.00
BALE3	0.18	109.63	7.03	0.00
BALMCF	0.00	187.73	82.73	0.00

CF	2.75	112.23	7.03	0.00
Reserva	-8.06	46.00	0.00	0.00 Reservoir

Link Results:

Link	Flow	Velocity	Unit Headloss	Status
ID	CMH	m/s	m/km	
T.Suc	8.06	0.07	0.04	Open
LIG.P	8.06	0.07	0.04	Open
Tad1	8.06	0.07	0.04	Open
Tad2	8.06	0.07	0.04	Open
Tad3	8.06	0.07	0.04	Open
TS1	8.06	0.11	0.11	Open
TS2	8.06	0.11	0.10	Open
V1L1	8.06	0.10	0.09	Open
V1P1	0.10	0.10	0.98	Open
V1L2	7.96	0.10	0.08	Open
V1P2	0.10	0.10	0.98	Open
V1L3	7.86	0.10	0.09	Open
V1P3	0.10	0.10	0.98	Open
V1L4	7.76	0.10	0.08	Open
V1P4	0.10	0.10	0.98	Open
V1L5	7.66	0.10	0.08	Open
V1P5	0.10	0.10	0.99	Open
V1L6	7.56	0.09	0.08	Open

V1P6	0.10	0.10	0.98	Open
V1L7	7.46	0.09	0.07	Open
V1P7	0.10	0.10	0.99	Open
V1L8	7.36	0.09	0.07	Open
V1P8	0.10	0.10	0.99	Open
V1L9	7.26	0.09	0.07	Open
V1P9	0.10	0.10	0.99	Open
V1L10	7.16	0.09	0.07	Open
V1P10	0.10	0.10	0.99	Open
V1L11	7.06	0.09	0.07	Open
V1P11	0.10	0.10	0.98	Open
V1L12	6.96	0.09	0.06	Open
V1P12	0.10	0.10	0.99	Open
V1L13	6.86	0.09	0.06	Open
V1P13	0.12	0.12	1.44	Open
V1L14	6.74	0.08	0.06	Open
V1P14	0.12	0.12	1.44	Open
V1L15	6.61	0.08	0.06	Open
V1P15	0.15	0.14	2.02	Open
V2L1	6.47	0.08	0.06	Open
V2P1	0.12	0.12	1.44	Open
V2L2	6.34	0.08	0.05	Open
V2P2	0.15	0.14	2.03	Open
V2L3	6.20	0.08	0.06	Open
V2P3	0.15	0.14	2.03	Open
V2L4	6.05	0.08	0.05	Open

V2P4	0.15	0.14	2.03	Open
V2L5	5.90	0.07	0.04	Open
V2P5	0.18	0.17	2.91	Open
V2L6	5.72	0.07	0.05	Open
V2P6	0.18	0.17	2.91	Open
V2L7	5.54	0.07	0.04	Open
V2P7	0.18	0.17	2.91	Open
V2L8	5.36	0.07	0.04	Open
V2P8	0.18	0.17	2.91	Open
V2L9	5.18	0.06	0.03	Open
V2P9	0.21	0.20	3.86	Open
V2L10	4.97	0.06	0.03	Open
V2P10	0.21	0.20	3.86	Open
V2L11	4.76	0.06	0.03	Open
V2P11	0.21	0.20	3.86	Open
V2L12	4.56	0.06	0.03	Open
V2P12	0.24	0.23	5.02	Open
V2L13	4.31	0.05	0.03	Open
V2P13	0.24	0.23	5.02	Open
V2L14	4.07	0.05	0.03	Open
V2P14	0.24	0.23	5.02	Open
V2L15	3.83	0.05	0.03	Open
V2P15	0.24	0.23	5.01	Open
V2L16	3.59	0.05	0.02	Open
V2P16	0.24	0.23	5.02	Open
BALL1	3.35	0.06	0.04	Open

BALP1	0.28	0.27	6.60	Open
BALL2	3.07	0.06	0.03	Open
BALP2	0.15	0.14	2.03	Open
BALL3	2.92	0.05	0.04	Open
BALP3	0.18	0.17	2.91	Open
BALL4	2.75	0.05	0.03	Open

Link ID	Flow	Velocity	Unit Headloss	Status
	CMH	m/s	m/km	
1	8.06	0.00	-141.74	Open Pump
V1VRP1	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP2	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP3	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP4	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP5	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP6	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP7	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP8	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP9	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP10	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP11	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP12	0.10	0.10	78.10	Active Valve
V1VRP13	0.12	0.12	78.10	Active Valve
V1VRP14	0.12	0.12	78.10	Active Valve
V1VRP15	0.15	0.14	78.10	Active Valve

V2VRP1	0.12	0.12	78.10	Active Valve
V2VRP2	0.15	0.14	78.09	Active Valve
V2VRP3	0.15	0.14	78.09	Active Valve
V2VRP4	0.15	0.14	78.09	Active Valve
V2VRP5	0.18	0.17	78.09	Active Valve
V2VRP6	0.18	0.17	78.09	Active Valve
V2VRP7	0.18	0.17	78.09	Active Valve
V2VRP8	0.18	0.17	78.09	Active Valve
V2VRP9	0.21	0.20	78.09	Active Valve
V2VRP10	0.21	0.20	78.09	Active Valve
V2VRP11	0.21	0.20	78.09	Active Valve
V2VRP12	0.24	0.23	78.08	Active Valve
V2VRP13	0.24	0.23	78.08	Active Valve
V2VRP14	0.24	0.23	78.09	Active Valve
V2VRP15	0.24	0.23	78.09	Active Valve
V2VRP16	0.24	0.23	78.09	Active Valve
BalVRP1	0.28	0.27	78.08	Active Valve
BalVRP2	0.15	0.14	78.09	Active Valve
BalVRP3	0.18	0.17	78.09	Active Valve
VRPCF	2.75	2.68	75.50	Active Valve