



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JEFFERSON DE SOUSA BRITO

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E MODELAGEM DE SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

CRATEÚS

2022

JEFFERSON DE SOUSA BRITO

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E MODELAGEM DE SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre

CRATEÚS

2022

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

- B876a Brito, Jefferson.
Análise de eficiência hidráulica e modelagem de sistema de irrigação por gotejamento / Jefferson Brito. – 2022.
53 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.
1. Escassez. 2. Recurso Hídrico. 3. Eficiência. 4. EPANET. 5. Rugosidade equivalente. I. Título.
CDD 620
-

JEFFERSON DE SOUSA BRITO

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E MODELAGEM DE SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Universidade Federal do Ceará, Campus
Crateús, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Tatiane Lima Batista
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Vicente e Isonete.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar coragem e sabedoria para enfrentar todos os desafios ao longo da vida.

A minha família, Vicente, Isonete, Valdeni e Jéssica, por sempre me apoiarem em minhas decisões.

Ao Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre, por aceitar ser meu orientador, me ajudar em tomadas de decisões, acadêmicas e pessoais, ao longo desse percurso e se disponibilizar em qualquer horário ou dia da semana.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Janine Brandão de Farias Mesquita e Prof. Me. Tatiane Lima Batista pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus professores e colegas de turma, em especial a minha amiga Juliana Farias por me apoiando durante a graduação.

“Se você quer chegar onde a maioria não chega,
faça aquilo que a maioria não faz.”

Bill Gates

RESUMO

Ao longo dos tempos a escassez hídrica tem se agravado tanto pela distribuição irregular, pelo o aumento populacional, expansão da indústria e agropecuária, sendo a última a principal usuária de recursos hídricos, representando cerca de 70% do consumo mundial. Para diminuir o desperdício do recurso no setor agrícola é necessário buscar formas de aumentar a eficiência da irrigação. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a eficiência hidráulica de uma rede existente de irrigação por gotejamento de pequeno porte no município de Pedro II – PI e sua modelagem computacional através simulador hidráulico. Consistindo em um levantamento de dados em campo e utilização de dados de entrada, como topografia, comprimento e constituição dos tubos e gotejadores, no software EPANET. A partir dos resultados, a rede foi considerada excelente no critério de eficiência em emissão e o método de coleta de vazões de Keller e Karmelli (1975) sugerido para redes de pequeno porte. Além disso, foi concluído que os efeitos causados pelos gotejadores podem ser representados pela rugosidade em simulação hidráulica no EPANET.

Palavras-chave: Escassez; Recursos hídricos; Eficiência; EPANET; Rugosidade equivalente.

ABSTRACT

Over time, water scarcity was exacerbated by irregular distribution, population growth, expansion of industry and agriculture, the latter being the main user of water resources, representing about 70% of world consumption. To reduce the waste of resources in the agricultural sector, it is necessary to look for ways to increase the efficiency of irrigation. Thus, the present work aims to analyze the hydraulic efficiency of a small drip irrigation network existing in the municipality of Pedro II - PI and its computational modeling through a hydraulic simulator. Consisting of a survey of data in the field and use of input data, such as topography, length and constitution of pipes and drippers, in the EPANET software. From the results, the network was considered excellent in the emission efficiency criterion and the flow collection method of Keller and Karmelli (1975) suggested for small networks. Furthermore, it was concluded that the effects caused by the drippers can be represented by the roughness in the hydraulic simulation in EPANET. Furthermore, it was concluded that the effects caused by the drippers can be represented by the roughness in the hydraulic simulation in EPANET.

Keywords: Scarcity; Water resources; Efficiency; EPANET; Equivalent roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de sistema de irrigação por gotejadores.....	21
Figura 2: Localização do emissor <i>in-line</i>	21
Figura 3: Localização do emissor <i>on-line</i>	22
Figura 4: Esquema da metodologia adotada por Keller e Karmeli.....	24
Figura 5: Esquema da metodologia adotada por Denículi <i>et al.</i>	24
Figura 6: Rede de irrigação existente em Pedro II-PI.....	33
Figura 7: Esquema da metodologia adotada por Denículi <i>et al.</i> (1980)	35
Figura 8: Pontos utilizados para dados de pressões.....	36
Figura 9: Rede inserida no UFC2.....	37
Figura 10: Rede simulada no EPANET.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comprimentos da linha lateral.....	34
Tabela 2: Vazão coletadas (L/h) pelo método de Deniculi <i>et al.</i> (1980)	40
Tabela 3: Vazão coletadas (L/h) pelo método de Keller e Karmeli (1975)	40
Tabela 4: Comprimentos da linha lateral.....	41
Tabela 5: Cota e declividade das linhas laterais.....	41
Tabela 6: Pressões calculadas no Cenário 1.....	44
Tabela 7: Pressões calculadas no Cenário 2.....	44
Tabela 8: Pressões calculadas no Cenário 3.....	45
Tabela 9: Pressões calculadas no Cenário 4.....	45
Tabela 10: Pressões calculadas no Cenário 5.....	46
Tabela 11: Pressões calculadas no Cenário 6.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CUC	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen
CUE	Coefficiente de Uniformidade Estatístico
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
DI	Diâmetro Interno
DN	Diâmetro Nominal
UE	Uniformidade de Emissão
MCA	Metros de Coluna D'água
NEB	Nordeste Brasileiro
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto De Vinila
MDE	Modelo Digital de Elevação

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>UE</i>	Uniformidade de emissão
<i>CUC</i>	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen
<i>CUE</i>	Coefficiente de Uniformidade Estatístico
\bar{q}	Média das Vazões
\bar{X}	Lâmina Média
<i>S</i>	Desvio-padrão
<i>j</i>	Perda de carga unitária (m/m)
<i>D</i>	Diâmetro interno da tubulação (m)
<i>Q</i>	Vazão (m ³ /s)
<i>C</i>	Coefficiente de atrito ou coefficiente de Hazen-Williams.
<i>f</i>	Coefficiente de atrito
<i>V</i>	Velocidade Média
<i>D</i>	Diâmetro interno da tubulação (m);
<i>g</i>	Gravidade
<i>A</i>	Área
ΔH	Diferença de pressão admissível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Problema.....	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos	17
1.4.1	Objetivo geral	17
1.4.2	Objetivo específico	17
1.5	Roteiro temático	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Sistema de irrigação localizada por gotejamento	19
2.2	Os sistemas de gotejamento e seus componentes	20
2.3	Análise da eficiência hidráulica	22
2.4	Dimensionamento hidráulico do sistema	24
2.4.1	Perda de carga.....	24
2.4.2	Velocidade máxima admissível.....	26
2.4.3	Pressão admissível nas tubulações.....	26
2.5	Rugosidade.....	27
2.6	Simulação hidráulica	29
2.7	Modelagem da rede	30
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	Área de estudo.....	33
3.2	Obtenção de Dados.....	35
3.3	Eficiência da rede.....	36
3.4	Modelagem.....	36
3.4.1	Nós.....	37
3.4.2	Rugosidade.....	38
3.4.3	Cenarização.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	Vazões coletadas em campo.....	40
4.2	Pressões coletadas.....	41
4.3	Altimetria.....	41
4.4	Eficiência da rede.....	42
4.4.1	Coefficiente de uniformidade de emissão.....	42

4.4.2	Coeficiente de uniformidade de Christiansen.....	42
4.4.3	Coeficiente de uniformidade estatístico.....	43
4.5	Modelagem da rede.....	43
4.5.1	Vazão média de uma linha lateral.....	43
4.5.2	Cenarização hidráulica.....	43
4.6	Análise Geral.....	48
5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A escassez de recursos hídricos está se agravando com o passar dos tempos. A ONU (Organização das Nações Unidas) estima que um bilhão de pessoas tem o abastecimento de água insuficiente. Isso pode ser explicado por dois fatores principais: a distribuição irregular das precipitações nos continentes e ao aumento populacional, expansão da indústria e agropecuária; sendo a última a principal usuária de recursos hídricos, representando cerca de 70% do consumo mundial (FAO, 2018).

De acordo com a ANA (2015), o Brasil possui uma área irrigada de 6,95 milhões de hectares, com potencial de expansão de 10,09 milhões de hectares até 2030, correspondendo a um aumento de 47%. Atualmente o consumo da irrigação é de 745 m³/s, representando 67% da vazão total consumida no país. Esse alto consumo se configura, principalmente, devido à baixa eficiência dos sistemas de irrigação utilizados, os quais podem apresentar até 34% de perda. Esse desperdício resulta significativamente de falhas nos sistemas de condução de água e da má distribuição das infraestruturas hidráulicas (IICA, 2008).

Moura *et al.* (2007) estimam que o Nordeste Brasileiro (NEB) apresenta precipitações médias anuais inferiores a 750 mm e evaporação média superior a 2000 mm/ano, o que representa um evidente déficit hídrico climatológico médio para região. O NEB também se apresenta como a região com menor disponibilidade de água, equivalente a cerca de 3% do total de água existente no país (Brito *et al.*, 2007). Diante dessas condições, é indispensável a utilização da irrigação na agricultura por meio do uso de sistemas que evitem perdas a partir da otimização dos cálculos da quantidade de água necessária para a manutenção da produtividade das culturas e a maximização da eficiência do sistema de irrigação, ou seja, utilizem menos recursos hídricos para irrigar uma maior área.

Segundo a ANA (2017) a área irrigada no NEB é de 1,17 milhões de hectares, sendo 21,1% por pivôs centrais, 28,6% para cana-de-açúcar irrigada, 3,9% de arroz por inundação e 46,5% de outras culturas e sistemas. Esta última parcela é representada pelos sistemas de aspersão convencional, de microaspersão e pelos sistemas localizados de irrigação.

Entre os métodos citados, os sistemas localizados de irrigação são os que apresentam maior eficiência em comparação aos demais, pois como a água é aplicada de forma pontual, no caule ou em uma pequena altura no entorno da planta, a possibilidade de perdas por evaporação, percolação profunda, escoamento superficial e ação do vento é bastante reduzida (CASTIBLANCO, 2013).

No entanto, nem sempre o critério de economia dos recursos hídricos é levado à pauta na implantação da irrigação, tanto no que tange a escolha do sistema, quanto no que se refere à redução das perdas. Para Coelho *et al.* (2005) se a eficiência da irrigação em regiões com clima semiárido ou árido, como é o caso do NEB, obtivesse uma melhora de 1% na eficiência, seria possível uma economia em torno de 200 mil litros de água, por agricultor, por hectare ao ano.

Assim, para diminuir o desperdício do recurso no setor agrícola é necessário buscar formas de aumentar a eficiência da irrigação. Um dos critérios de melhoria é o dimensionamento da rede, considerado no momento da concepção do projeto e com potencial de planejamento de um sistema que otimize a utilização da água, resultando na implantação de uma irrigação que promova ao produtor rural maior produtividade, redução de custos e diminuição do risco do investimento diante da maior disponibilidade hídrica, gerada pela economia do recurso.

1.1 Problema

O dimensionamento da rede de irrigação por gotejamento é um processo considerado complexo devido à metodologia de cálculo particular (GUIMARÃES, 1993). Segundo Provenzano e Pumo (2004), isso ocorre porque existem vários fatores que afetam esse tipo de irrigação, destacando-se a variação não linear da carga hidráulica, a possível complexidade da topografia, as perdas de carga não convencionais causadas pelos diferentes tipos de elementos gotejadores, os entupimentos frequentes destes elementos gotejadores por sedimentos de diferentes granulometrias, a manutenção da pressão operacional uniforme, entre outras.

Desse modo, essa pesquisa consiste na análise da uniformidade de um sistema de irrigação existente no município de Pedro II – PI e na modelagem computacional deste sistema, visando contornar a complexidade do dimensionamento do sistema hidráulico de irrigação, o que estimula a implantação de projetos de forma empírica e com reduzida eficiência, especialmente em pequenas propriedades rurais.

As ferramentas computacionais são utilizadas no dimensionamento do sistema a partir da simulação hidráulica de diversas configurações de rede e cenários em busca de um resultado ótimo. Nesse sentido, o Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA) desenvolveu o Sistema UFC, que possibilita a construção do modelo computacional de redes pressurizadas de água através do módulo UFC2,

que conta com a possibilidade de inserção dos gotejadores e aspersores para sistemas de irrigação (COSTA e CASTRO, 2006). O UFC2 tem o objetivo de facilitar a construção da rede que posteriormente será exportada para o *software* EPANET, que consiste em um simulador hidráulico que possibilita a verificação do funcionamento da rede, análise de falhas e otimização do sistema através da geração de dados de pressão, vazão, perdas de cargas, etc.

1.2 Justificativa

O município de Pedro II, situado no Estado do Piauí, pertence a uma região do país que sofre com os baixos índices de precipitação do semiárido nordestino. Desse modo, a produção agrícola depende fortemente do fornecimento artificial de água através de irrigação, a qual deve ser utilizada com parcimônia e eficiência diante da escassez do recurso. No entanto, a maioria dos projetos de irrigação de pequeno porte não possuem um dimensionamento ótimo, principalmente devido à falta de projeto realizado por especialistas e da conscientização da necessidade de um sistema mais eficiente na construção deste, fazendo com que o produtor utilize apenas a própria experiência para elaboração e implantação do sistema (SOUZA *et al.*, 2009). A baixa procura por profissionais que possam realizar um projeto atendendo a critérios técnicos e ambientais, pode ser explicada, em parte, pela facilidade que métodos tradicionais de dimensionamento promovem cumprindo o objetivo de irrigar, em um menor tempo e com menos recursos alocados no planejamento e execução.

Nesse sentido, analisar a eficiência hidráulica dos sistemas de irrigação por gotejamento através de métodos computacionais simplificados pode resultar na melhor utilização dos recursos hídricos, especialmente em regiões de pequenas propriedades e com escassez de água.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar a eficiência hidráulica de uma rede existente de irrigação por gotejamento de pequeno porte e sua modelagem computacional através simuladores hidráulicos.

1.3.2 Objetivo específico

Tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Verificar eficiência de diferentes metodologias de coleta de dados de vazão na rede existente;

- Analisar a uniformidade da vazão aplicada a série de gotejadores da rede existente através de diferentes índices;
- Modelar a rede existente no simulador hidráulico EPANET;
- Avaliar os resultados da perda de carga modelada a partir da determinação da rugosidade equivalente nas linhas laterais.

1.4 Roteiro temático

O presente trabalho está dividido em cinco seções. Sendo a primeira seção uma breve contextualização do tema, definição do problema estudado, objetivos e justificativa. Logo após, a seção dois, aborda o referencial teórico que será base de sustentação para análise da temática. Em seguida a metodologia de pesquisa, que aborda como será o procedimento de obtenção de dados em campo e análise da rede de irrigação.

A quarta seção expõe os resultados encontrados e as discussões cabíveis aos mesmos, desde os resultados de campo aos resultados computacionais. Na quinta e última seção é exposto as conclusões obtidas através dos resultados deste estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de irrigação localizada por gotejamento

O aumento do custo da terra, combinado com o grande capital necessário para o desenvolvimento agrícola, não permite mais que o rendimento da produção dependa de um regime pluviométrico. Portanto, a irrigação por localizada por gotejamento é uma tendência emergente no ambiente do agronegócio, que além de reduzir o risco, oferece outras vantagens significativas aos produtores (PEREIRA, 2015).

No Brasil, a produtividade com o uso da irrigação localizada continua crescendo, pois essa técnica reduz as perdas no plantio agrícola e aumenta a qualidade dos produtos oferecendo uma maior valorização. Dessa forma, os investimentos em tecnologia dos produtores agrícolas têm obtido resultados notáveis na redução de perdas, na melhoria da qualidade dos produtos colhidos e na obtenção de safras fora de época. Como resultado, um aumento relativo no lucro por área cultivada pode ser visto (ZOCOLER, 2015).

Para Silva *et al.* (2015) a irrigação é um método artificial de uso da água na agricultura, cujo principal objetivo é controlar a quantidade de água na área de cultivo, com o objetivo de reduzir as perdas na colheita. Segundo esses autores a irrigação foi uma das primeiras mudanças que o homem implementou no meio ambiente, pois seu manejo foi a base sobre a qual as tribos foram construídas. Portanto, o sistema de irrigação originou-se de civilizações antigas, como os egípcios que se estabeleceram próximo ao Nilo, por sua vez era uma rica fonte de água, e os chineses ao redor do Nilo na China.

Os métodos mais comumente utilizados em irrigação agrícola são: por aspersão, por superfície e irrigação localizada. O primeiro consiste na utilização de aspersores para simular o fenômeno da chuva, empregado principalmente em cultivos de grãos, cana-de-açúcar e pastos, tal sistema demanda menor mão-de-obra para implantação e permite o uso de fertilizantes misturados na água e de máquinas pesadas na área irrigada; por outro lado, a ação do vento influencia na eficiência da irrigação. O segundo tipo consiste na aplicação de água diretamente sobre o solo, empregada com frequência em cultivos de arroz, o método tem reduzido custo de implantação e alto consumo hídrico. Por fim, o tipo de irrigação localizada compreende aquela na qual a aplicação de água ocorre diretamente na raiz da planta, sendo utilizada em cultivos de hortaliças e fruteiras (SENAR, 2019). As principais vantagens desse sistema, citadas por Biscaro (2014, p.12), compreendem:

[...] economia de mão de obra; possibilidade de utilização ininterrupta do equipamento; distribuição mais uniforme de água e produtos químicos; adaptação a qualquer gradiente de declive do solo; apresentação de poucas perdas por percolação, evaporação e deriva (vento); possibilidade de economia na aplicação de água e fertilizantes, de energia elétrica ou combustível (motobombas); não há estímulo ao crescimento exagerado de plantas daninhas; e apresentação de elevada eficiência na aplicação de água (85% a 95%).

Ainda segundo o autor, as desvantagens do método incluem o elevado custo inicial e a necessidade de manutenção mais rigorosa, especialmente diante da possibilidade de entupimentos.

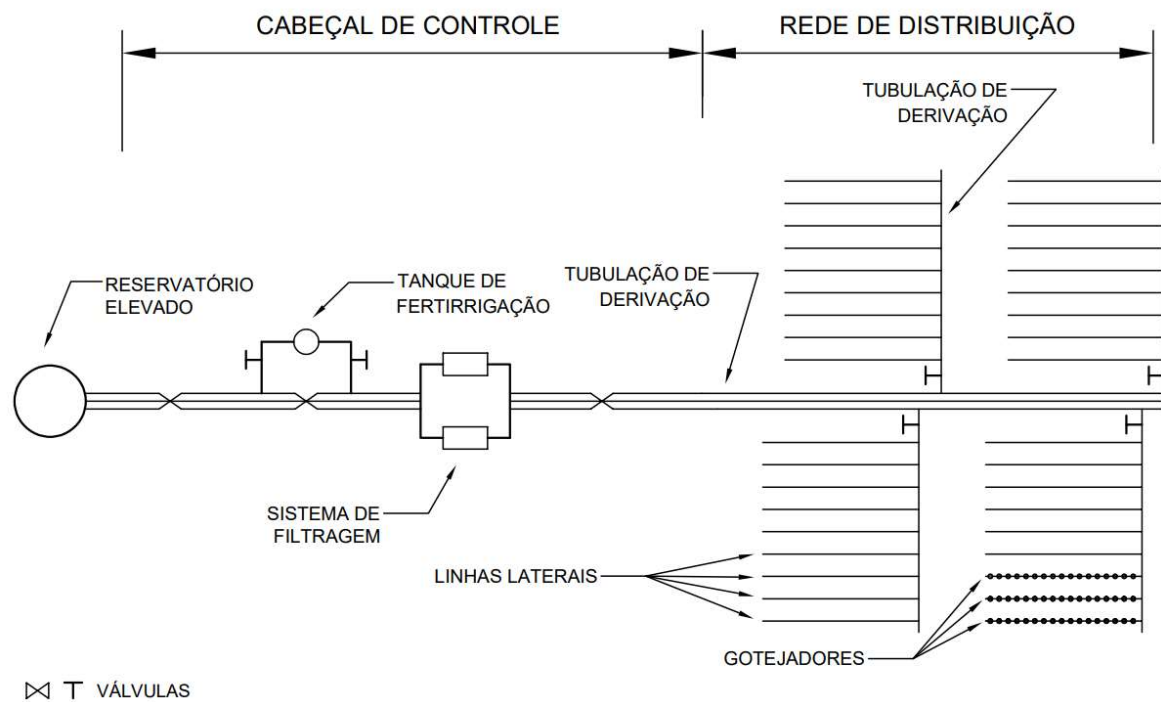
Segundo Batista (2001) os sistemas de irrigação localizada mais utilizados de forma comercial no Brasil são o gotejamento e a microaspersão. Ambos os métodos utilizam mangueiras de polietileno para distribuir a água, diferindo na vazão de emissão do recurso, que é menor no primeiro caso. Para Guimarães (1993), a irrigação por gotejamento é uma técnica que entrega água de forma pontual, garantindo uma distribuição uniforme na superfície do solo próxima a planta, pois umedece apenas o bulbo de alcance das raízes, o que diminui as perdas por evaporação se comparadas aos outros sistemas.

2.2 O sistema de gotejamento e seus componentes

Nesse sistema a água é aplicada em baixa intensidade e alta frequência nas raízes das plantas, entregue através de tubulações até ser aplicada por um transmissor. É usado para culturas perenes (culturas que não precisam ser replantadas ao final do ciclo de produção) e frutíferas. Tendo uma eficácia de em média 90% (BRITO; FONSECA, 2016).

A rede de irrigação por gotejamento normalmente é dividida em cabeçal de controle e rede de distribuição (Figura 1). O cabeçal de controle recebe água da tubulação de adução que está conectada a uma estação de bombeamento ou elevatória, onde acontece a filtração e adição de fertilizantes. Os tipos de filtros mais utilizados são os de areia, de tela ou de discos; sendo a escolha deste dependente do grau de limpeza desejado, da vazão requerida pelo sistema e o do tipo de gotejador utilizado. Nesse trecho também pode ocorrer a adição de fertilizantes à água através de equipamentos como bomba de injeção dosificadora ou injetor Venturi (Gomes, 1999).

Figura 1: Esquema de sistema de irrigação por gotejadores

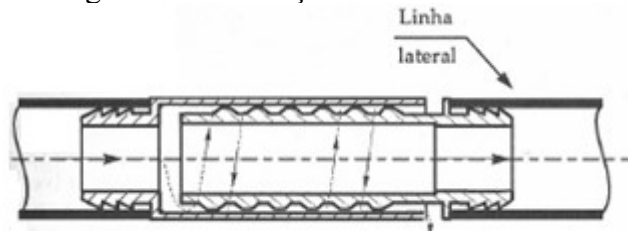


Fonte: Adaptado de Gomes (1999).

Já a rede de distribuição é composta pela tubulação de derivação, linhas laterais e gotejadores. A tubulação de derivação recebe a água do cabeçal de controle e distribui para as linhas laterais, o material usado nesses tubos pode ser polietileno ou PVC (Policloreto de Vinila), com diâmetro nominal (DN) variando de 35 até 150 (CASTIBLANCO, 2013).

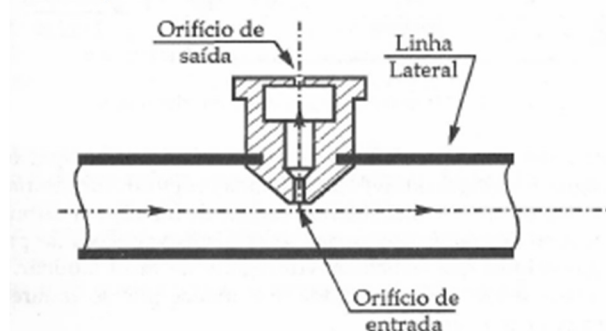
O material mais comumente empregado nas linhas laterais são os tubos de polietileno de pequenos diâmetros, onde são instalados os dispositivos que aplicam a água nas plantas, chamados gotejadores. Eles podem estar integrados as paredes internas, denominados emissores *in-line* (Figura 2), ou instalados nos tubos através de perfuração, caso em que se denomina *on-line* (Figura 3) (CASTIBLANCO, 2013).

Figura 2: Localização do emissor *in-line*



Fonte: Gomes (1999).

Figura 3: Localização do emissor *on-line*



Fonte: Gomes (1999).

Os gotejadores in-line na maioria das vezes são dispositivos autocompensantes, que garantem melhor uniformidade na aplicação de água (DALRI et al, 2015).

2.3 Análise da eficiência hidráulica

A seca iniciada em 2012 impulsionou a necessidade de conservação da água, em virtude do recurso já ser limitado, e demandou a definição de um programa que propiciasse a ampliação da eficiência do uso da água na irrigação.

Em escala de campo ou fazenda, a eficiência de irrigação é a razão entre o volume de água de irrigação usada de forma benéfica (predominantemente para evapotranspiração da cultura e para a remoção de sais para manter a produtividade do solo) e o volume total de irrigação (PEREIRA e MARQUES, 2017).

A eficiência de irrigação é, geralmente, definida em termos de: 1) performance do sistema de irrigação; 2) uniformidade de aplicação de água; e 3) resposta da cultura à irrigação. Essas avaliações do desempenho estão relacionadas entre si e podem variar em escala, indo desde o desempenho de um único emissor ou linha lateral, até uma fazenda, um distrito de irrigação ou uma região hidrográfica. Podem também variar em termos do tempo, desde uma única irrigação até todo o ciclo da cultura, uma estação ou um ano.

Uma das principais vantagens do sistema de irrigação por gotejamento é a eficiência na aplicação de água, amplamente difundida na literatura. Entretanto, é de suma importância que tal eficiência seja analisada em cada caso, de acordo com as características específicas do sistema.

Para tal é calculado, por meio da Equação 1, o coeficiente de uniformidade de emissão (UE), que utiliza como parâmetro principal as vazões médias do sistema (SILVA e SILVA, 2005)

$$UE = \frac{q_{25}}{\bar{q}} \quad (01)$$

Em que: UE = uniformidade de emissão; q_{25} = vazão média de 25% dos gotejadores com menores vazões; \bar{q} = média das vazões, considerando todos os gotejadores.

Outros índices bastantes usados são o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), representados pela Equação 02 e Equação 03 respectivamente (Silva e Silva, 2005)

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Xi - \bar{X}|}{N \times \bar{X}} \right) \quad (02)$$

Em que: CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, em percentagem; Xi = lâmina de água aplicada no i -ésimo ponto sobre a superfície do solo; \bar{X} = lâmina média aplicada.

$$CUE = 100 \times \left(1 - \frac{S}{\bar{X}} \right)$$

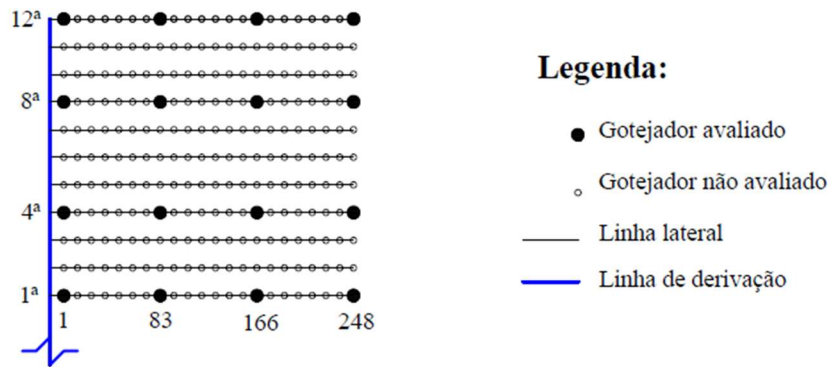
onde,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |Xi - \bar{X}|^2}{N}} \quad (03)$$

Em que: CUE = coeficiente de uniformidade estatístico, em percentagem; Xi = lâmina de água aplicada no i -ésimo ponto sobre a superfície do solo; \bar{X} = lâmina média aplicada; S = desvio-padrão dos dados de vazão.

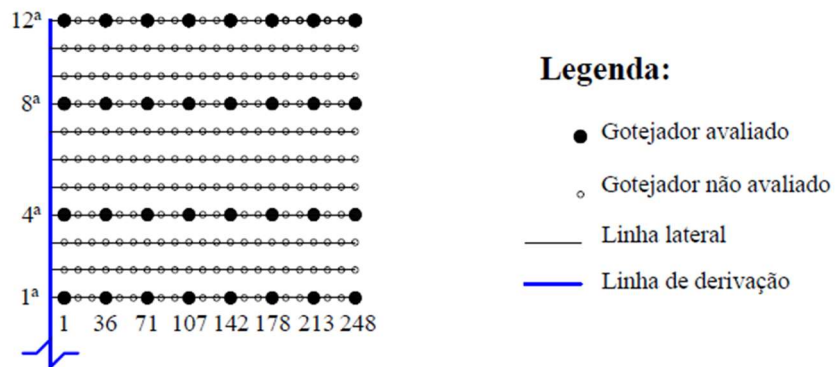
Para determinar os gotejadores a serem amostrados, pode-se usar a metodologia de Keller e Karmeli (1975, apud Silva e Silva, 2005), que analisa 4 linhas laterais e em cada linha 4 gotejadores, sendo a primeira linha, as situadas a 1/3 e 2/3 do comprimento e última, e os gotejadores seguem a mesma situação, o primeiro, os localizados a 1/3 e a 2/3 e o último (Figura 4). Entretanto, existe outro método que analisa um número maior de gotejadores em cada linha, o método de Denículi *et al.* (1980, apud Silva e Silva, 2005) propõe amostragem em 8 gotejadores por linha lateral, sendo o primeiro e os localizados a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e do último (Figura 5).

Figura 4: Esquema da metodologia adotada por Keller e Karmeli (1975)



Fonte: Autor (2021).

Figura 5: Esquema da metodologia adotada por Deniculi *et al* (1980)



Fonte: Autor (2021).

De acordo com Silva e Silva (2005), quanto maior o número de gotejadores analisados, mais condizente com a realidade será a pesquisa. Assim, o presente trabalho utilizou o método de Deniculi *et al.* (1980, apud Silva e Silva, 2005) na amostragem das vazões dos gotejadores.

2.4 Dimensionamento hidráulico do sistema

O dimensionamento da rede de irrigação por gotejamento acontece no sentido contrário do fluxo d'água. Primeiramente, faz-se o dimensionamento das linhas laterais; em seguida, faz-se o da tubulação de derivação; e, por último, os trechos da tubulação de distribuição (GOMES, 1999).

2.4.1 Perda de carga

Durante o escoamento do líquido acontece um processo irreversível de transformação de parte da energia do escoamento em calor, essa perda ocorre devido ao atrito do fluido e as paredes da tubulação ou viscosidade do líquido e denomina-se de perda de carga (PORTO, 2006). A perda de carga pode ser classificada em distribuída e localizada.

Para o cálculo da perda de carga distribuída pode-se usar equações empíricas, opções mais práticas, como é o caso da fórmula de Hazen-Williams, Manning, Scimeni e Scobey, e a equação teórica de Darcy-Weisbach (CASTIBLANCO, 2013). Para a utilização da fórmula de Hazen-Williams é recomendado que o diâmetro da tubulação seja superior ou igual a 4 polegadas (PORTO, 2006).

A Equação 04 expressa a fórmula de Hazen-Williams, essa foi determinada a partir de ensaios realizados com tubos de diâmetros superiores a 75mm e para vazões superiores a 3 litros por segundos.

$$j = 10,66 \frac{1}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (04)$$

Em que: j = perda de carga unitária (m/m); D = diâmetro interno da tubulação (m); Q = vazão (m³/s); C = Coeficiente de atrito ou coeficiente de Hazen-Williams.

A fórmula empírica de Manning é utilizada pela simplicidade de cálculo, nessa é utilizado como variáveis o coeficiente de atrito de Manning, diâmetro interno e velocidade. Já as fórmulas de Scimeni e Scobey são limitadas ao tipo de material que constituem o tubo, Scimeni se aplica somente a tubulações de cimento-amianto e Scobey a tubos de materiais leves como polietileno, PVC e alumínio.

Como os diâmetros das tubulações de irrigação por gotejamento são pequenos, é indicado usar a fórmula de Darcy-Weisbach, utilizada no presente trabalho, expressada pela Equação 05. Nessa fórmula se analisa todos os parâmetros básicos para se determinar a perda de carga contínua (GOMES, 1999).

$$j = \frac{f \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (05)$$

Em que: j = perda de carga unitária (m/m); f = coeficiente de atrito; V = velocidade média de circulação da água pela seção (m/s); D = diâmetro interno da tubulação (m); g = aceleração da gravidade (m/s²).

Na linha lateral do sistema de irrigação, a vazão diminui de forma gradativa, provocando uma perda de carga não linear (GOMES, 1999). É possível três situações de distribuição de perda de carga (h_f) ao longo das laterais. Na primeira a pressão de funcionamento é garantida em todos os pontos de distribuição de água, a segunda acontece uma

redução de 1/4 de h_f aplicada ao último gotejador e a terceira situação 1/2 de h_f na pressão aplicada ao último gotejador. Segundo Gomes (1999), para o dimensionamento da linha lateral se considera a segunda situação, pois devido a essa distribuição, obtém-se um equilíbrio de pressões nos gotejadores ao longo da lateral.

De acordo com Gomes (2010), a perda de carga localizada são perturbações bruscas no escoamento causadas por acessórios inseridos na tubulação. Assim, desconsiderar essa perda de energia dos emissores, resulta no dimensionamento superestimado das linhas laterais. A perda de carga localizada é expressada pela Equação 06.

$$j = K \frac{V^2}{2g} \quad (06)$$

Em que: j = perda de carga localizada (m); V = velocidade média de escoamento (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

2.4.2 Velocidade máxima admissível

A velocidade do fluido dentro da tubulação está diretamente ligada a vazão, como mostra a Equação 07. Assim, quanto maior for a velocidade menor será o diâmetro da tubulação para determinada vazão (GOMES, 1999).

$$Q = A \times V \quad (07)$$

Em que: Q = vazão (m^3/s); A = área da seção transversal da tubulação; V = velocidade média de escoamento (m/s).

Entretanto, quanto maior a velocidade maiores serão os desgastes na tubulação, pressão e perdas de carga, como mostra a Equação 5. Desse modo, para cada diâmetro de tubulação é adotado uma velocidade máxima.

De acordo com Torres (1998), a velocidade máxima na tubulação de sistemas de irrigação é de 2m/s, valor usado no presente trabalho.

2.4.3 Pressão admissível nas tubulações

Para análise de padrões relacionados a pressões admissíveis nas tubulações, os Faria e Kellner (2019) descrevem que é importante entender a diferença de pressão admissível na subunidade, ΔH , é proporcional a $(h_a - h_{ns})$. Dada pela formula: $\Delta H = M (h_a - h_{ns})$, onde, M igual a 4,3 representa o diâmetro constante; M igual 2,7 (2 diâmetros) e M igual a 2,0 (3 diâmetros). Os autores recomendam o valor de M igual a 2,5.

A diferença de pressão admissível se divide entre a lateral e a terciária (ou derivação).

$$\Delta H = \Delta H_l + \Delta H_t$$

Dessa forma, as variações de pressão incluem as perdas de carga, bem como os desníveis do terreno em que a irrigação é construída. Com base nisso, Lacerda (2017) comenta que em terrenos com pouco desnível deve-se adotar a seguinte fórmula:

$$\Delta H_l = \Delta H_t = \frac{\Delta H}{2}$$

Em terrenos com inclinações que favorecem às linhas terciárias, ΔH pode ser distribuído de outra forma, permitindo uma maior ΔH_l , e ao contrário se o maior declive estiver no sentido das laterais.

Por outro lado, a distribuição de ΔH em ΔH_l e ΔH_t pode ser afetada por outros fatores, como a existência de elementos que limitem o comprimento.

2.5 Rugosidade

O dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação requer a quantificação da perda de carga distribuída ao longo da tubulação, parâmetro que depende da vazão e das características do sistema, e é fundamental para a diminuição das perdas dentro da produção agrícola. Assim, a rugosidade da superfície interna da tubulação é um parâmetro importante na estimativa da queda de pressão. Dessa forma, variações nos processos de tubulação e fabricação relacionadas à falta de dados atualizados de rugosidade podem levar a estimativas incorretas relacionadas à perda de pressão (ROCHA, et al. 2017).

Nesse contexto, a rugosidade (também conhecida como textura de uma superfície) é entendida como o estado rugoso da superfície, determinado pelo processo de fabricação, e caracterizado por saliências e irregularidades na superfície. Se essas divergências forem grandes e de alta frequência, a superfície é considerada rugosa se a divergência for pequena a superfície é considerada lisa (PIMENTA, et al. 2017).

No caso das tubulações, o tempo de uso afeta a queda de pressão devido ao acúmulo de substâncias em suspensão (como argilas) presentes no fluido que escoar, por exemplo, devido à suscetibilidade das tubulações metálicas à oxidação, ao desenvolvimento de biofilmes depositando partículas em baixas vazões ou desgastadas por partículas grossas (por exemplo, areia) dependendo do material da parede do tubo (ANDRINI; DE SOUZA; SAAD, 2019).

Pimenta et al (2017), ao longo do tempo, diversos métodos foram desenvolvidos

para medir a textura da superfície através de parametrizações específicas, e cada parâmetro se comporta como uma função matemática de acordo com o perfil analisado, através dos chamados equipamentos rugosímetros. No laudo emitido pelo rugosímetro diversos parâmetros podem ser utilizados para expressar a rugosidade da superfície, sendo que o parâmetro a ser utilizado depende da finalidade da peça que está sendo avaliada, bem como da configuração padrão e do sistema de medição utilizado (MELO, 2020).

Para aplicações envolvendo escoamento em tubulações de sistemas de irrigação não há um procedimento definido que permita identificar qual dos parâmetros deve ser adotado, sendo normalmente adotadas tabelas para obtenção da altura das asperezas da superfície interna dos tubos em função do tipo de material (ALMEIDA, 2016).

Rocha et al. (2017) discute que o produto de um projeto de sistema hidráulico é a seleção do conjunto motobomba, que requer uma estimativa correta da queda de pressão com base no tamanho da tubulação, na velocidade do fluido e no coeficiente de atrito do regime de vazão, que depende da taxa de fluxo e da rugosidade da superfície do tubo.

Geisenhoff et al. (2017) alerta que são necessárias medições reais de superfícies para garantir maior confiabilidade aos profissionais envolvidos na formulação de projetos de bombeamento. Além disso, questiona muitas das referências publicadas que, embora úteis nos cálculos de queda de pressão, merecem melhor atenção em metodologias e áreas aplicáveis, especialmente em termos de implicações técnicas e econômicas, e aponta os valores obtidos no comércio derivados de testes de rugosidade criados por fórmulas teóricas ou elementos artificiais.

A rugosidade, que é difícil de determinar na prática, deve ser fornecida pelo fabricante do tubo, mas para a maioria dos tubos comerciais, as informações técnicas sobre isso são escassas e, além disso, os valores de rugosidade nas bibliografias técnicas variam muito para o mesmo material. A faixa de valor é ampla, causando dúvidas e dificultando a tomada de decisões pelos técnicos de projeto (GEISENHOFF et al. 2017).

Com isso, algo que pode ajudar na tomada de decisões em projetos é a determinação dos valores de rugosidade de tubos de polietileno (PEAD), tendo em vista que o polietileno é o principal material de tubulação para as linhas laterais de irrigação por gotejamento devido à sua flexibilidade e resistência (CAMPOS *et al.*, 2013). Nessa perspectiva Moghazi (1998) desenvolveu experimentos de laboratório que foram conduzidos para determinar os valores adequados do coeficiente de atrito para tubos lisos de polietileno comumente usados em diferentes diâmetros. Os valores dos coeficientes comumente recomendados variam de 130 a 140, independentemente do diâmetro do tubo. Os resultados desta investigação mostraram que

os coeficientes médios de Hazen-Williams foram 129, 136, 144 e 148 para tubos com diâmetros de 13, 16, 19 e 22 mm, respectivamente. Assim, a diferença entre a perda de atrito medida e a perda de atrito calculada com base no coeficiente médio de Hazen-Williams é pequena, variando de 8% a 14% para as faixas de diâmetro de tubo de 13 e 22 mm, respectivamente. Para Campos *et al.* (2013), o valor da rugosidade do PEAD é por volta de 0,0041mm.

Dessa maneira, a qualidade da superfície interna do tubo é diferenciada pela rugosidade, que representa pequenas irregularidades deixadas na superfície pela ferramenta durante a produção, ondulações por reflexos de rugosidade sobrepostos, causados por vibração, tensão, deflexão e causas externas, além de erros de aspecto, como uma medida do desvio de uma superfície de sua forma cilíndrica ideal. Assim, a ondulação superficial está associada a desvios na escala intermediária entre rugosidade e erro de aspecto (BOMBADELLI, 2018).

2.6 Simulação hidráulica

A simulação hidráulica é uma etapa fundamental para um produtor que queira implantar a irrigação por gotejamento. Assim, com a utilização desse tipo de irrigação o agricultor obtém diversos benefícios, pois o sistema aplica água de forma pontual que proporciona maior eficiência quando comparado com outros métodos (COUTINHO, 2015).

Pesquisas como a de Batista *et al.* (2017) reafirmam as conclusões de Coutinho ao relatarem que a presença de água de forma constante nas raízes das plantas proporciona uma umidade ideal, evitando que as culturas sofram estresse hídrico e aumentando significativamente a produtividade.

A irrigação no momento certo e com a quantidade certa de água pode alcançar produtividade acima da média para uma cultura cultivada em condições ideais de irrigação, por isso o estudo e simulação correta dessa etapa é primordial para o sucesso do investimento.

No mercado existe vários programas computacionais que realizam simulações hidráulicas, como o EPANET, Hidrocad, Strumap e Watercad. Entretanto, a maioria desses *softwares* tem um preço elevado, dificultando a sua utilização por projetistas que trabalham com redes de pequeno porte. Assim, para as simulações desenvolvidas no presente trabalho escolheu-se o EPANET, que é gratuito e de domínio público. Ademais, o Sistema UFC é compatível com esse *software*.

A partir da simulação hidráulica pode-se estimar a melhor forma de dimensionamento da rede de irrigação, através da escolha de diâmetros e materiais (COELHO, 2006). Isso é alcançado a partir das ferramentas de cálculo que o EPANET, destacando-se

(ROSSMAN *et al.*, 2000):

- Número de componentes da rede analisada;
- Utilização das fórmulas de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams ou Chezy-Manning no cálculo da perda de carga;
- Consideração das perdas de cargas localizadas;
- Modelagem de reservatórios de nível variável, por meio de curvas de volume em função da altura;
- Modelagem da relação pressão e vazão efluentes de dispositivos emissores;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas.

Dessa forma, o EPANET é um programa de computador que permite a simulação estática e dinâmica do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de distribuição pressurizadas. A rede é composta por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável (MESQUITA *et al.*, 2016).

Mesquita *et al.* (2015) explica que o EPANET permite que valores de vazão em cada tubulação, pressão em cada nó, níveis de água em cada reservatório de nível variável e concentrações de produtos químicos sejam obtidos através da rede durante a simulação, subdivididos em intervalos de cálculo. Ademais, além das espécies químicas, o modelo simula o cálculo da idade da água e rastreia a origem da água em qualquer ponto da rede.

O EPANET é indiscutivelmente o programa de modelagem hidráulica e de qualidade da água mais utilizado no mundo; existe em versões nos principais idiomas e seu número de usuários cresceu exponencialmente devido à sua facilidade de uso e gratuidade (SILVA *et al.*, 2015).

2.7 Modelagem da rede

A modelagem é uma simplificação da realidade. Os modelos permitem planos detalhados e uma visão mais abrangente do sistema a ser aplicado. Uma boa modelagem inclui componentes de grande importância e esconde os elementos de menor relevância que não necessitam de amostragem dentro de um nível de abstração (VALENTE, 2016). Na modelagem, pode-se delinear o problema em que se está trabalhando, dividindo-o em vários problemas menores, confinando atenção a um aspecto de cada vez.

Devido à complexidade do dimensionamento da rede de irrigação por gotejamento, o uso de ferramentas computacionais é de suma importância. A simulação do comportamento hidráulico do sistema ajuda a determinar características da rede analisada, como funcionamento

e parâmetros de qualidade, com margem de erro estimável (COELHO, 2006).

Entretanto, para a determinação da simulação é necessário a inserção de dados de entrada que demandam tempo e esforço, esses dados são da modelagem de rede (Costa e Castro, 2006). Assim, o Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA) desenvolveu o Sistema UFC, que é voltado para criação de um arquivo de entrada para o *software* EPANET, programa de simulação hidráulica. No caso do sistema de irrigação os dados de entrada para simulação constituem:

- Levantamento planialtimétrico da região da região;
- Características do sistema, como curvas de bomba, informações do reservatório, comprimento da tubulação;
- Espaçamento entre gotejadores e comprimento das laterais;
- Informações das vazões necessária e de aplicação.

Simões *et al.* (2019), afirma que uma rede totalmente caracterizada (ou seja, incluindo todas as tubulações, sem simplificações) e modelagem hidráulica confiável são pré-requisitos necessários para a modelagem correta da qualidade da água. Assim, o autor destaca que o EPANET inclui um conjunto de ferramentas computacionais de apoio às simulações hidráulicas, cujas principais características são: Dimensão ilimitada do número de componentes de rede analisados; Cálculo da queda de pressão usando as equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning. Considera quedas de pressão singulares, alargamento, estreitamento etc.; modelo de bombas de velocidade constante ou variável e Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo.

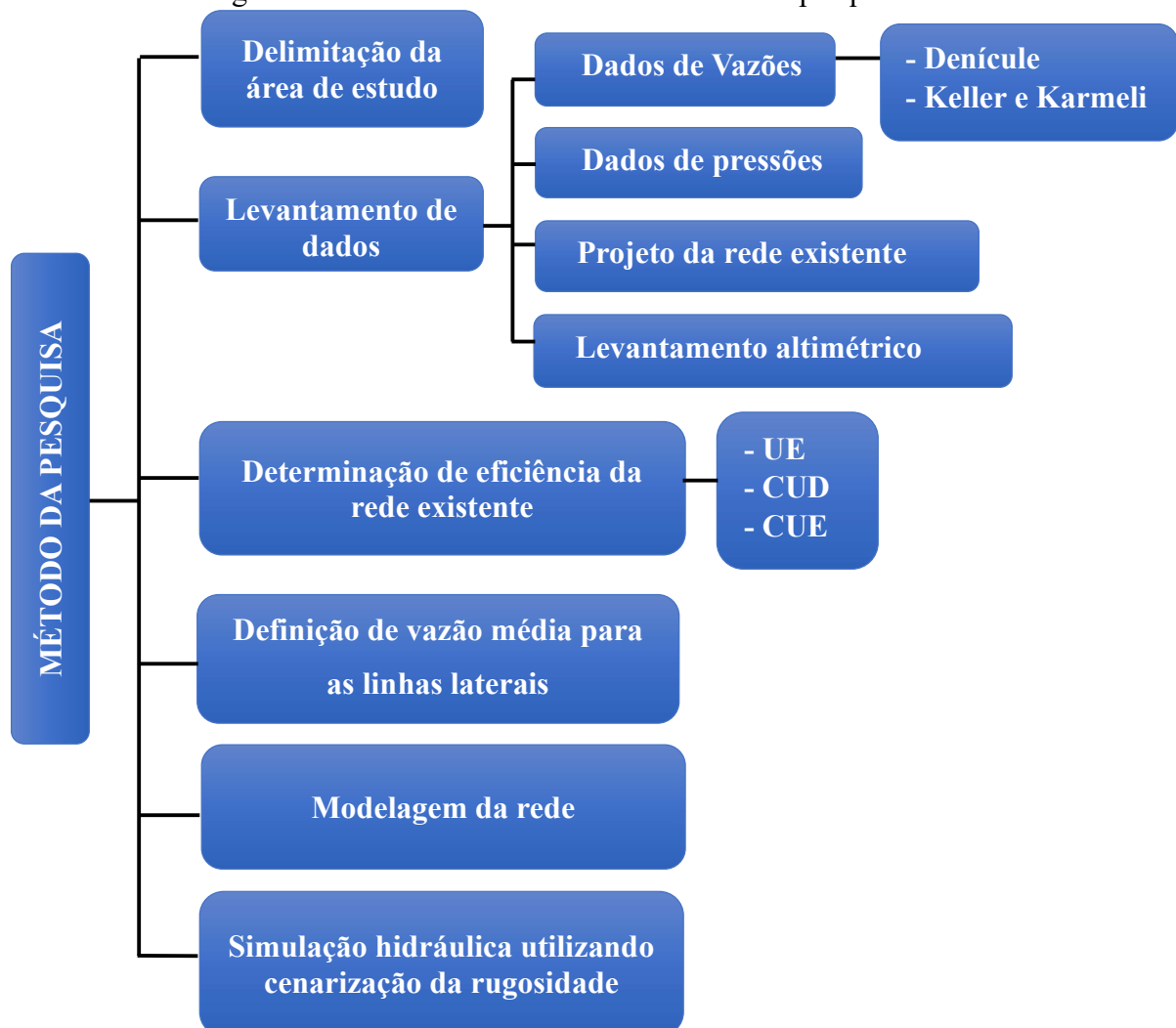
3 METODOLOGIA

Essa seção apresenta a metodologia adotada para se obter os objetivos propostos. No fluxograma abaixo é exposto de forma detalhada as atividades desenvolvidas no presente trabalho.

A metodologia do trabalho consistiu em um levantamento de dados em campo e a simulação no software EPANET, com dados de entrada, como topografia, comprimento e constituição dos tubos e gotejadores.

Esse método é fundamental, pois a uniformidade da distribuição de um sistema de irrigação afeta diretamente o manejo e a eficiência. Assim, afeta o desempenho das culturas no campo e o custo da irrigação. A distribuição desigual da água pode fazer com que algumas plantas irrigadas pelo sistema recebam mais água e fertilizantes do que outras, resultando em desenvolvimento desigual dentro da cultura.

Fluxograma 1: Atividades desenvolvidas durante a pesquisa



Fonte: Autor (2022).

3.1 Área de estudo

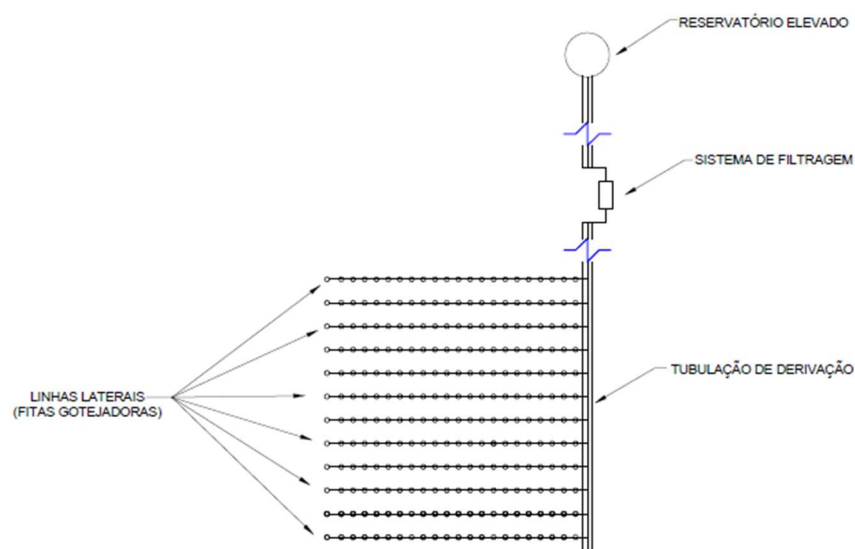
O local do estudo ocorreu em um sítio produtor de melancia, com área de 1800 metros quadrados e 600 plantas. A propriedade se localiza no município de Pedro II, situado na porção semiárida do Estado do Piauí.

A escolha correta do método de irrigação, ou seja, irrigação superficial, por aspersão ou localizada, dependerá de características locais como solo (capacidade de armazenamento de água, taxa de infiltração, drenagem, topografia, presença de lençol freático e salinidade), clima (vento, umidade relativa, temperatura, precipitação), água (disponibilidade e qualidade), cultura (grãos, frutas, café, forragem), fatores humanos (formação técnica, hábitos, preferências) e aspectos econômicos (COELHO *et al.*, 2020).

Nessa perspectiva, Coelho *et al.* (2020) afirma ainda que antes de escolher o sistema de irrigação mais adequado, é necessário a análise do custo-benefício de cada sistema. Além da construção e instalação, também devem ser adicionados ao cálculo os custos operacionais, custos de manutenção por hectare, eletricidade ou combustível.

Por isso, a rede de irrigação analisada tem comprimento total de 713,47 metros, sendo composta por tubulação de PVC, sistema de filtragem e tubos gotejadores (PEAD), como mostra a Figura 6. O abastecimento da tubulação é feito por um reservatório elevado que tem capacidade para 3.000 litros e a diferença do nível de água até o solo é de 4,87m.

Figura 6: Rede de irrigação existente em Pedro II-PI.



Fonte: Autor (2022).

O total de linhas laterais analisadas são 12, com comprimento de acordo com a Tabela 1, sendo que a média de todos os comprimentos é aproximadamente 49,3m.

Tabela 1: Comprimentos da linha lateral

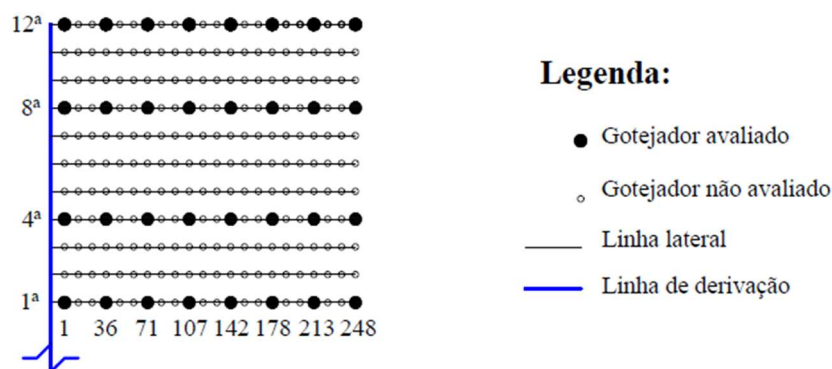
Linha lateral	Comprimento (m)
1	49,40
2	49,60
3	49,20
4	48,90
5	48,80
6	49,00
7	49,00
8	49,30
9	49,40
10	49,40
11	49,80
12	49,60

Fonte: Autor (2021).

Os tubos de PVC têm diâmetro nominal (DN) de 50 mm e são fabricados pela Amanco, já os tubos gotejadores de PEAD são produzidos pela Netafim e possuem diâmetro interno (DI) de 16,2 mm, com gotejadores in-line. A espessura da parede dos tubos gotejadores é de 0,2 mm e a vazão é de 1,6 L/h para pressão de 1 Bar.

Na linha lateral os gotejadores são espaçados a cada 20 cm, tendo cada linha aproximadamente 248 gotejadores, como mostra a Figura 8.

Figura 7: Esquema da metodologia adotada por Denículi *et al.* (1980)



Fonte: Autor (2021).

A pesquisa foi realizada de forma quantitativa, através de um estudo de caso da rede de irrigação. No início foi realizado o levantamento de dados em campo, como vazão dos emissores, pressão nas linhas laterais, comprimento das tubulações, acessórios e altura do reservatório.

A partir das simulações hidráulicas realizadas no EPANET e o módulo UFC2 que permite a inserção de dados com facilidade pelo usuário, a rede analisada passou por um processo de modelagem para calibração da rede. A partir desse processo pode estabelecer um modelo que está mais próximo do resultado em campo.

3.2 Obtenção de dados

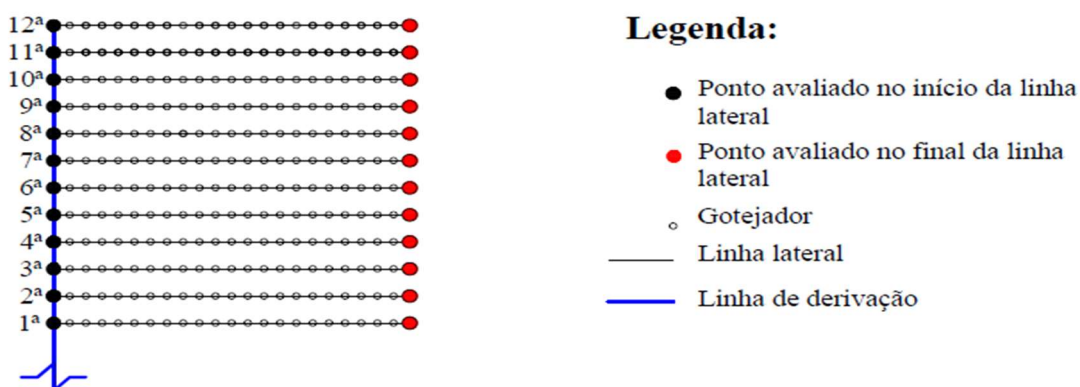
Os dados da rede de irrigação analisada foram obtidos através de medição em campo. Para os dados de vazão utilizou-se um recipiente de coleta de água, proveta e cronometro, e a aferição para cada gotejador selecionado tem duração de 120 segundos (Calgara e Braga, 2008). E também, os dados de vazão serão coletados utilizando dois métodos, o proposto por Keller & Karmeli (1975) e o de Denículi *et al.* (1980).

No método de Denículi *et al.* (1980) os gotejadores analisados das linhas laterais foram: 1, 36, 71, 107, 142, 178, 213, 248 e as linhas analisadas são a linha inicial, 4, 8 e a última. Já para o método de Keller e Karmeli (1975) os gotejadores analisados das linhas laterais foram: 1, 83, 166, 248 e as linhas analisadas são a linha inicial, 4, 8 e a última.

Foi levantado dados do tipo de tubulação da rede, comprimento, acessórios e altura do reservatório.

Para os dados de pressão, a aferição aconteceu no início e no fim de cada linha lateral. O equipamento utilizado foi um manômetro glicerinado graduado em metro de coluna de água (MCA), e a partir desse dado será obtido a perda de carga na linha lateral, como mostra a Figura 7.

Figura 8: Pontos utilizados para dados de pressões



Para os dados de topografia utilizou-se imagens de satélite no formato MDE (Modelo Digital de Elevação), imagens do satélite Topodata, extrai-se as curvas de nível metro a metro da região utilizando a ferramenta computacional Arcgis 10.5.

3.3 Eficiência da rede

A partir dos dados de vazão será estimado a eficiência da rede, através de coeficientes de uniformidade de distribuição, Christiens e coeficiente de uniformidade estatística. Essa análise será feita para os resultados das coletas proporcionadas pelos métodos de Keller & Karmeli (1975) e o de Deniculi *et al.* (1980).

3.4 Modelagem

Para a modelagem da rede de irrigação estudada, inseriu-se os dados levantados em campo no sistema UFC, como mostra a Figura 9 com curvas de nível a cada 25 cm de desnível. Em seguida buscou-se determinar os padrões de rugosidade em diferentes cenários dentro da análise. Dessa maneira, foi possível identificar qual o melhor padrão de rugosidade para que a rede simulada no EPANET tenha perda de carga semelhante a observada em campo.

Figura 9: Rede inserida no UFC2

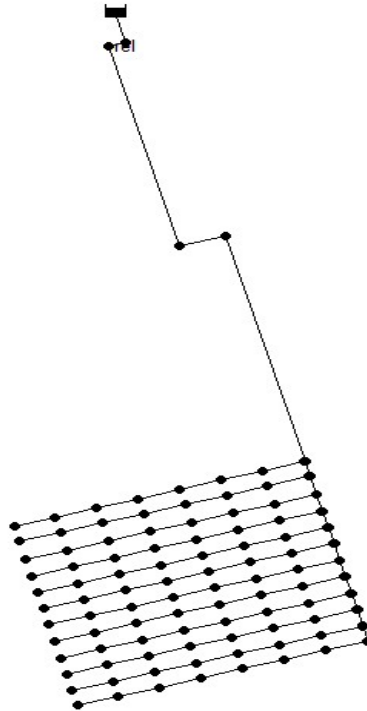


Fonte: Autor (2022).

3.4.1 Nós

Buscou-se adicionar o valor médio de vazão em nós espaçados igualmente dentro da rede de irrigação no setor onde os gotejadores estão, linha lateral. O total de nós emissores foram de 8 por linha lateral, como no método de Denículi *et al.* (1980). Na Figura 10 têm-se a rede simulada no EPANET.

Figura 10: Rede simulada no EPANET



Fonte: Autor (2022).

3.4.2 Rugosidade

Os sistemas de tubulações complexos podem apresentar diferenças significativas de perda de carga em pequenas diferenças em equações ou constantes (KELLNER; AKUTSU; REIS, 2016). Assim, para representar todas as perdas de carga que são exclusivas de sistemas de irrigação por gotejamento, adotou-se uma rugosidade equivalente.

Desse modo, o presente trabalho usou como método a alteração da rugosidade equivalente da fita gotejadora no software EPANET, buscando encontrar a perda de carga mais próxima da observada em campo.

3.4.3 Cenarização

Para se aproximar da perda de carga do campo, simulou-se a rede em diferentes cenários de rugosidade. Utilizando vários cenários exaustivamente com o intuito de encontrar um valor mais próximo da realidade. Cada cenário tem uma quantidade de zona de rugosidade distinta, essas zonas são espaçadas igualmente na rede estudada.

- Cenário 1

No primeiro cenário a rede possui apenas uma única zona de rugosidade, todas as linhas laterais têm apenas um valor de rugosidade. Nesse cenário uma área de variação foi usada a rugosidade para simular a rede e para comparar os resultados observados com os encontrados em campo.

- Cenário 2

No segundo cenário foi utilizado duas zonas de variação, essas zonas fornecem um maior conhecimento sobre a rugosidade definida em dois aspectos distintos. Dessa forma, as duas regiões de variação (rugosidade) foram utilizadas para simular a rede e os resultados observados foram comparados com os encontrados em campo.

- Cenário 3

O terceiro cenário foi constituído por três zonas de variação. Em cada zona foram utilizados níveis de rugosidade distintas, buscando estimar a perda de carga e compará-la com a observada em campo utilizando o EPANET.

- Cenário 4

No quarto cenário se encontra quatro zonas de variação, seguindo o mesmo intuito dos demais. Esse cenário se propõe a estimar a rugosidade em diferentes aspectos por quatro momentos diferentes. Isso revela uma estimativa relevante para que possa ser comparada com a análise realizada em campo.

- Cenário 5

No quinto cenário a rede foi dividida em seis zonas de rugosidade e simulada no EPANET. Cada zona de rugosidade com um valor diferente.

- Cenário 6

No cenário 6 a rede possui 12 zonas com rugosidades diferentes, uma rugosidade para cada linha lateral. A partir disso, foi utilizado o EPANET para encontrar a perda de carga mais próxima da perda de carga encontrada em campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vazões coletadas em campo

Tendo em vista que a uniformidade do uso da água nos sistemas de irrigação é responsável pela alta produtividade das culturas, reduzindo os custos de produção por meio das vazões coletadas em campo, é possível determinar características importantes para o sucesso da produção.

Os gotejadores analisados das linhas laterais foram: 1, 36, 71, 107, 142, 178, 213, 248 e as linhas analisadas são a linha inicial, 4, 8 e a última. O resultado para as vazões (L/h) pelo método de Denículi *et al.* (1980) está representado na Tabela 2. Cada linha lateral tem uma vazão média de 0,0788 L/s, sendo que cada linha tem 248 gotejadores.

Tabela 2: Vazão coletadas (L/h) pelo método de Denículi *et al.* (1980)

Gotejador	Vazão na linha inicial	Vazão na linha 4	Vazão na linha 8	Vazão na linha final
1	1,20	1,14	1,14	1,14
36	1,20	1,11	1,14	1,17
71	1,17	1,17	1,11	1,14
107	1,17	1,23	1,11	1,11
142	1,14	1,17	1,14	1,14
178	1,20	1,14	1,11	1,11
213	1,14	1,17	1,11	1,08
248	1,11	1,14	1,14	1,11

Fonte: Autor (2021).

Já para o método de Keller e Karmeli (1975) os valores de vazão está representado na Tabela 3. A vazão média para cada linha lateral é de 0,0787 L/s, sabendo que cada linha lateral tem 248 gotejadores.

Tabela 3: Vazão coletadas (L/h) pelo método de Keller e Karmeli (1975)

Gotejador	Vazão na linha inicial	Vazão na linha 4	Vazão na linha 8	Vazão na linha final
1	1,20	1,14	1,14	1,14
83	1,17	1,17	1,11	1,14
166	1,20	1,14	1,11	1,11
248	1,11	1,14	1,14	1,11

Fonte: Autor (2021).

Observando os valores de vazões para os dois métodos, percebe-se que não há uma diferença significativa.

4.2 Pressões coletadas

Como mencionado na metodologia a aferição de pressão ocorreu no início e no fim de cada linha lateral, o equipamento utilizado foi um manômetro glicerinado graduado em metro de coluna de água (mca), os valores de vazão estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Comprimentos da linha lateral

Linha lateral	Pressão inicial (mca)	Pressão final (mca)	Perda de carga (m/m)
1 ^a	5,00	4,95	0,10%
2 ^a	5,15	4,85	0,60%
3 ^a	5,15	4,65	1,02%
4 ^a	5,15	4,65	1,02%
5 ^a	5,40	4,65	1,54%
6 ^a	5,40	4,45	1,94%
7 ^a	5,40	4,45	1,94%
8 ^a	5,40	4,50	1,83%
9 ^a	5,50	4,45	2,13%
10 ^a	5,50	4,65	1,72%
11 ^a	5,50	4,45	2,11%
12 ^a	5,75	5,00	1,51%

Fonte: Autor (2021).

4.3 Altimetria

Com auxílio da ferramenta Arcgis 10.5 pode-se extrair curvas de nível da imagem de satélite no formato MDE, a partir das curvas de nível determinou-se as cotas de altitude dos pontos da rede de irrigação.

O ponto mais alto da rede fica localizado na região onde está instalado o reservatório elevado, a cota neste ponto é de 385,71 m. Já o ponto mais baixo tem cota de

379,75 m e está localizado ao final da 12ª linha lateral, última do sistema. Na Tabela 5, são apresentados os valores encontrados para cotas a montante, jusante e a declividade de cada linha lateral.

Tabela 5: Cota e declividade das linhas laterais

Linha lateral	Cota a montante	Cota a jusante	Declividade
1 ^a	381,25	380,05	2,43%
2 ^a	381,19	379,95	2,50%
3 ^a	381,10	379,82	2,60%
4 ^a	381,03	379,71	2,70%
5 ^a	380,96	379,59	2,81%
6 ^a	380,89	379,52	2,80%
7 ^a	380,81	379,45	2,78%
8 ^a	380,74	379,38	2,76%
9 ^a	380,66	379,32	2,71%
10 ^a	380,62	379,26	2,75%
11 ^a	380,58	379,19	2,79%
12 ^a	380,55	379,15	2,82%
Média	380,87	379,53	2,70%

Fonte: Autor (2022).

Como a declividade do terreno tem valor baixo, o terreno é considerado plano.

4.4 Eficiência da rede

A eficiência da irrigação é um conceito amplamente utilizado, tanto em projetos quanto na gestão de sistemas de irrigação. Segundo Rocha Neto (2015), o conceito de eficiência pode ser dividido em dois aspectos básicos: a uniformidade da aplicação e as perdas que podem ocorrer durante a operação do sistema.

4.4.1 Coeficiente de uniformidade de emissão

Pelo método de Denículi *et al.* (1980) o valor da lâmina média da rede de irrigação é de 1,1438 L/h e a vazão média de 25% dos gotejadores com menores vazões é de 1,1063 L/h. Assim, o coeficiente de emissão para esse método é de 97,72%.

Já para a metodologia de Keller e Karmeli (1975) o valor da vazão média da rede é de 1,1419 L/h e a vazão dos 25% menores é de 1,11 L/h. Desse modo, o coeficiente de emissão calculado é de 97,21%.

De acordo com Zocoler (2005), ambos os resultados são satisfatórios, sendo considerados como ótima uniformidade de emissão, pois o valor para o UE é superior aos 90%.

4.4.2 Coeficiente de uniformidade de Christiansen

Para o método de Denículi *et al.* (1980) o valor para o CUC é de 97,75%, já para o método de Keller e Karmeli (1975) o valor para o CUC é de 98,11%. Assim, com os valores tão próximo percebe-se que a diferença entre os métodos é insignificante para sistemas de irrigação de pequeno porte.

Para Zocoler (2005), o ideal para um sistema de gotejamento é o CUC superior a 90%, como é o caso da rede analisada.

Além disso, o valor do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) segundo Araújo *et al.* (2019), foram classificados como excelentes por serem superiores a 90%, sendo que a recomendação mínima é de 80% dentro das parcelas irrigadas.

4.4.3 Coeficiente de uniformidade estatístico

O resultado para do CUE para a metodologia de Denículi *et al.* (1980) foi de 97,04% e para a metodologia de Keller e Karmeli (1975) o resultado para o coeficiente de uniformidade estatístico é de 97,38%. Conforme resultados próximos e com uniformidade elevada, observasse que dependente do método, a rede tem ótima uniformidade de distribuição.

De acordo com a classificação proposta por Favetta e Brotel (2001), uma avaliação com valor CUE de 97,04% é classificada como excelente, onde o valor CUE é determinado como: excelente > 90%, muito bom, entre 80% e 90%, regular entre 70% e 79%, entre 60% e 69% é ruim, e abaixo de 60% inaceitável (VALNIR JÚNIOR *et al.*, 2012).

4.5 Modelagem da rede

4.5.1 Vazão média de uma linha lateral

A partir dos resultados dos coeficientes de uniformidade, que analisam como a vazão está se comportando na rede, obteve-se valores elevados. Representando que a vazão nos gotejadores é muito uniforme.

Assim, tornou-se condizente a utilização de um valor médio de vazão para as linhas laterais. Esse valor partiu da lâmina média para o método de Keller e Karmeli (1975), a vazão média para cada linha lateral teve um valor de 0,0787 L/s.

Quando inseridos todos os gotejadores no sistema UFC a rede sofria erros e não exportava para o EPANET. Cada linha lateral contém 248 gotejadores e o total de linhas estudadas

foram 12. A inserção manual dessa quantidade se tornaria exaustiva no EPANET.

Então, como proposto na metodologia, foram adicionados 8 nós em cada linha lateral, e espaçada a vazão média de forma uniforme em cada um deles, cada nó emite uma vazão de 0,00983 L/s.

4.5.2 Cenarização hidráulica

- Cenário 1

Como definido na metodologia, o cenário 1 possui uma única zona de variação da rugosidade para simular a rede e comparar os resultados com os encontrados em campos. Na Tabela 6 observa-se que o erro médio absoluto de perda de carga para esse caso é de 0,0159 m/m, erro aparentemente grande, mas observando-se o valor para os erros de pressão a jusante, os resultados estão bem próximos. Esse valor para a perda de carga acontece devido ao valor muito baixo de perda de carga no trajeto da tubulação de linha lateral encontrado em campo.

Tabela 6: Pressões calculadas no Cenário 1

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	5,03	0,06%	4,50	-0,0900	0,1800	-0,0054	0,0054
3 ^a	5,12	5,14	-0,04%	4,50	-0,0300	0,4900	-0,0106	0,0106
4 ^a	5,18	5,24	-0,12%	4,50	0,0300	0,5900	-0,0115	0,0115
5 ^a	5,24	5,34	-0,20%	4,50	-0,1600	0,6900	-0,0174	0,0174
6 ^a	5,30	5,40	-0,20%	4,50	-0,1000	0,9500	-0,0214	0,0214
7 ^a	5,37	5,47	-0,20%	4,50	-0,0300	1,0200	-0,0214	0,0214
8 ^a	5,44	5,52	-0,16%	4,50	0,0400	1,0200	-0,0199	0,0199
9 ^a	5,51	5,58	-0,14%	4,50	0,0100	1,1300	-0,0227	0,0227
10 ^a	5,55	5,64	-0,18%	4,50	0,0500	0,9900	-0,0190	0,0190
11 ^a	5,59	5,71	-0,24%	4,50	0,0900	1,2600	-0,0235	0,0235
12 ^a	5,62	5,75	-0,26%	4,50	-0,1300	0,7500	-0,0177	0,0177
Média	5,33	5,40	0,00%	4,50	-0,0258	0,7558	-0,0159	0,0159

*M – Montante, J – Jusante

Fonte: Autor (2022).

- Cenário 2

No cenário 2 a rede possui 2 zonas com rugosidades diferentes, a primeira zona é constituída da 1^a a 6^a linha lateral e segunda zona da 7^a a 12^a, e a partir dela foi possível determinar a perda de carga mais próxima da perda de carga encontrada em campo, como mostra a Tabela 7. O erro médio da perda de carga é de 0,0065 m/m.

Tabela 7: Pressões calculadas no Cenário 2

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro de Pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	5,03	0,06%	4,50	-0,0900	0,1800	-0,0054	0,0054
3 ^a	5,12	5,14	-0,04%	4,50	-0,0300	0,4900	-0,0106	0,0106
4 ^a	5,18	5,24	-0,12%	4,50	0,0300	0,5900	-0,0115	0,0115
5 ^a	5,24	5,34	-0,20%	4,50	-0,1600	0,6900	-0,0174	0,0174
6 ^a	5,30	5,40	-0,20%	4,50	-0,1000	0,9500	-0,0214	0,0214
7 ^a	5,37	4,47	1,84%	8,80	-0,0300	0,0200	-0,0010	0,0010
8 ^a	5,44	4,53	1,85%	8,80	0,0400	0,0300	0,0002	0,0002
9 ^a	5,51	4,59	1,86%	8,80	0,0100	0,1400	-0,0026	0,0026
10 ^a	5,55	4,64	1,84%	8,80	0,0500	-0,0100	0,0012	0,0012
11 ^a	5,59	4,71	1,77%	8,80	0,0900	0,2600	-0,0034	0,0034
12 ^a	5,62	4,75	1,75%	8,80	-0,1300	-0,2500	0,0024	0,0024
Média	5,3325	4,8992	0,88%	6,65	-0,0258	0,2575	-0,0058	0,0065

*M – Montante, J – Jusante

Fonte: Autor (2022).

- Cenário 3

No cenário 3 a rede possui 3 zonas com rugosidades diferentes. A partir dela foi possível utilizando o EPANET, encontrar a perda de carga mais próxima da encontrada em campo, como mostra a Tabela 8. Para esse cenário o erro médio absoluto de perda de carga é de 0,0036 m/m. A primeira zona corresponde da 1^a a 4^a linha lateral, da 5^a a 8^a linha tem-se a segunda zona e a da 9^a a 12^a a terceira zona de rugosidade.

Tabela 8: Pressões calculadas no Cenário 3

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro de Pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	5,03	0,06%	4,50	-0,0900	0,1800	-0,0054	0,0054
3 ^a	5,12	5,14	-0,04%	4,50	-0,0300	0,4900	-0,0106	0,0106
4 ^a	5,18	5,24	-0,12%	4,50	0,0300	0,5900	-0,0115	0,0115
5 ^a	5,24	4,34	1,84%	8,80	-0,1600	-0,3100	0,0031	0,0031
6 ^a	5,30	4,41	1,82%	8,80	-0,1000	-0,0400	-0,0012	0,0012
7 ^a	5,37	4,47	1,84%	8,80	-0,0300	0,0200	-0,0010	0,0010
8 ^a	5,44	4,53	1,85%	8,80	0,0400	0,0300	0,0002	0,0002
9 ^a	5,51	4,62	1,80%	8,70	0,0100	0,1700	-0,0032	0,0032
10 ^a	5,55	4,67	1,78%	8,70	0,0500	0,0200	0,0006	0,0006
11 ^a	5,59	4,74	1,71%	8,70	0,0900	0,2900	-0,0040	0,0040
12 ^a	5,62	4,78	1,69%	8,70	-0,1300	-0,2200	0,0018	0,0018
Média	5,3325	4,7433	0,01	7,33	-0,0258	0,1017	-0,0026	0,0036

*M – Montante, J – Jusante

Fonte: Autor (2022).

- Cenário 4

No cenário 4, a rede possui 4 zonas de rugosidades diferentes. A partir disso, foi possível utilizando o EPANET, encontrar a perda de carga mais próxima da perda de carga encontrada em campo, como mostra a Tabela 4.

A primeira zona de rugosidade compreende da 1^a a 3^a linha; da 4^a a 6^a tem-se a segunda; a terceira é da 7^a a 9^a e a última zona é da 10^a a 12^a linha lateral. Nessa configuração o erro médio absoluto de perda de carga é de 0,0029 m/m.

Tabela 9: Pressões calculadas no Cenário 4

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro de Pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	5,03	0,06%	4,50	-0,0900	0,1800	-0,0054	0,0054
3 ^a	5,12	5,14	-0,04%	4,50	-0,0300	0,4900	-0,0106	0,0106
4 ^a	5,18	4,40	1,60%	8,20	0,0300	-0,2500	0,0057	0,0057
5 ^a	5,24	4,50	1,52%	8,20	-0,1600	-0,1500	-0,0002	0,0002
6 ^a	5,30	4,56	1,51%	8,20	-0,1000	0,1100	-0,0043	0,0043
7 ^a	5,37	4,42	1,94%	9,00	-0,0300	-0,0300	0,0000	0,0000
8 ^a	5,44	4,48	1,95%	9,00	0,0400	-0,0200	0,0012	0,0012
9 ^a	5,51	4,54	1,96%	9,00	0,0100	0,0900	-0,0016	0,0016
10 ^a	5,55	4,70	1,72%	8,60	0,0500	0,0500	0,0000	0,0000
11 ^a	5,59	4,77	1,65%	8,60	0,0900	0,3200	-0,0046	0,0046
12 ^a	5,62	4,80	1,65%	8,60	-0,1300	-0,2000	0,0014	0,0014
Média	5,3325	4,6908	0,01	7,58	-0,0258	0,0492	-0,0015	0,0029

*M – Montante, J – Jusante
 Fonte: Autor (2022).

- Cenário 5

No cenário 5 a rede possui 6 zonas com rugosidades diferentes e a partir dela foi possível utilizando o EPANET para encontrar a perda de carga mais próxima da perda de carga encontrada em campo, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10: Pressões calculadas no Cenário 5

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro de Pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	5,03	0,06%	4,50	-0,0900	0,1800	-0,0054	0,0054
3 ^a	5,12	4,61	1,04%	6,90	-0,0300	-0,0400	0,0002	0,0002
4 ^a	5,18	4,71	0,96%	6,90	0,0300	0,0600	-0,0006	0,0006
5 ^a	5,24	4,39	1,74%	8,60	-0,1600	-0,2600	0,0020	0,0020
6 ^a	5,30	4,46	1,71%	8,60	-0,1000	0,0100	-0,0022	0,0022
7 ^a	5,37	4,42	1,94%	9,00	-0,0300	-0,0300	0,0000	0,0000
8 ^a	5,44	4,48	1,95%	9,00	0,0400	-0,0200	0,0012	0,0012
9 ^a	5,51	4,64	1,76%	8,60	0,0100	0,1900	-0,0036	0,0036
10 ^a	5,55	4,70	1,72%	8,60	0,0500	0,0500	0,0000	0,0000
11 ^a	5,59	4,74	1,71%	8,70	0,0900	0,2900	-0,0040	0,0040
12 ^a	5,62	4,78	1,69%	8,70	-0,1300	-0,2200	0,0018	0,0018
Média	5,3325	4,6592	0,01	7,72	-0,0258	0,0175	-0,0009	0,0018

*M – Montante, J – Jusante
 Fonte: Autor (2022).

Para esse cenário as zonas foram constituídas por pares de linha laterais, a primeira zona de rugosidade compreende a 1^a e 2^a linha, a 3^a e 4^a é a segunda, a terceira é a 5^a e 6^a, a quarta é a 7^a e 8^a, a quinta é a 9^a e 10^a e a última zona é constituída por 11^a e 12^a linha lateral. Nessa configuração o erro médio absoluto de perda de carga é de 0,0018.

- Cenário 6

No cenário 6 a rede possui 12 zonas com rugosidade diferentes. Adotou-se uma rugosidade para cada linha lateral e a partir dela foi possível utilizando o EPANET para encontrar a perda de carga mais próxima da perda de carga encontrada em campo, como mostra a tabela a baixo. Nesse cenário o erro médio absoluto de perda de carga é 0,0001 m/m.

Tabela 11: Pressões calculadas no Cenário 6

Linha lateral	Pressões (m)		Perda de carga (m/m)	Rugosidade (mm)	Erro de Pressão (m)		Erro perda de carga (m/m)	
	M*	J*			M*	J*	Real	Absoluta
1 ^a	5,01	4,95	0,12%	4,50	0,0100	0,0000	0,0002	0,0002
2 ^a	5,06	4,76	0,60%	5,80	-0,0900	-0,0900	0,0000	0,0000
3 ^a	5,12	4,61	1,04%	6,90	-0,0300	-0,0400	0,0002	0,0002
4 ^a	5,18	4,67	1,04%	7,10	0,0300	0,0200	0,0002	0,0002
5 ^a	5,24	4,50	1,52%	8,20	-0,1600	-0,1500	-0,0002	0,0002
6 ^a	5,30	4,35	1,94%	9,00	-0,1000	-0,1000	0,0000	0,0000
7 ^a	5,37	4,42	1,94%	9,00	-0,0300	-0,0300	0,0000	0,0000
8 ^a	5,44	4,53	1,85%	8,80	0,0400	0,0300	0,0002	0,0002
9 ^a	5,51	4,46	2,13%	9,30	0,0100	0,0100	0,0000	0,0000
10 ^a	5,55	4,70	1,72%	8,60	0,0500	0,0500	0,0000	0,0000
11 ^a	5,59	4,53	2,13%	9,50	0,0900	0,0800	0,0002	0,0002
12 ^a	5,62	4,88	1,49%	8,30	-0,1300	-0,1200	-0,0002	0,0002
Média	5,3325	4,6133	0,01	7,92	-0,0258	-0,0283	0,0001	0,0001

*M – Montante, J – Jusante

Fonte: Autor (2022).

Com a mudança do valor de rugosidade nas linhas laterais, calcula-se uma perda de carga próxima a encontrada em campo, como mostra as tabelas dos resultados de cada cenário. Isso ocorre através da simulação hidráulica no EPANET, inserindo valores de rugosidade de forma manual. Essa rugosidade equivalente representa as perdas de energia na linha lateral, devido a rugosidade natural do conduto e aos aspectos geométricos dos gotejadores.

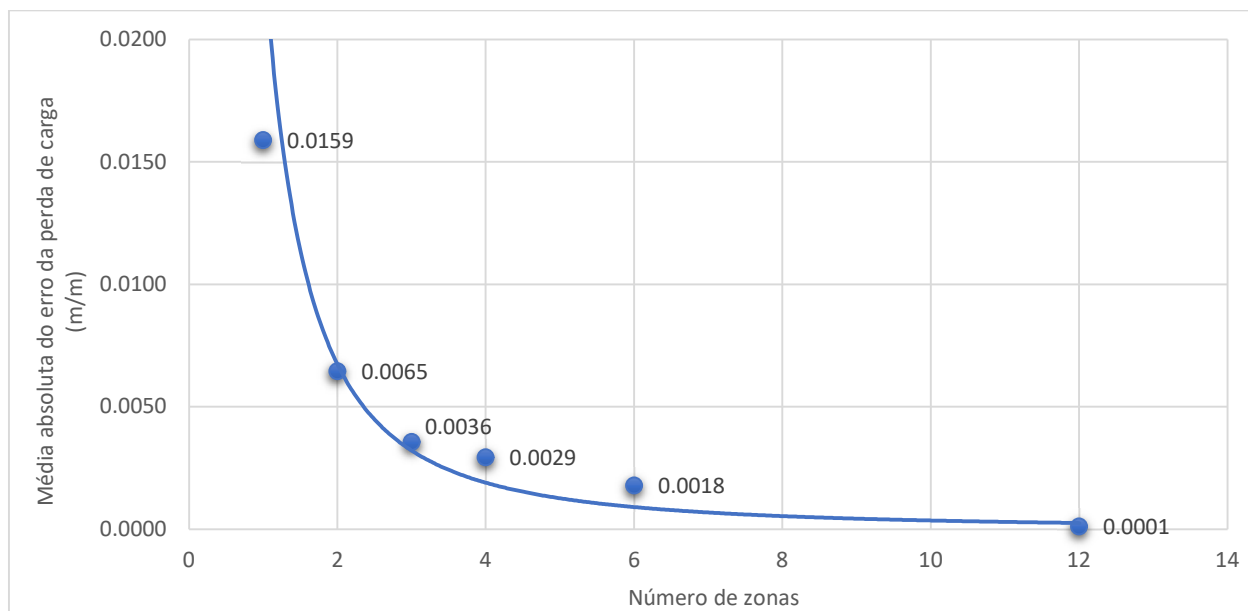
Entretanto, adicionar apenas uma rugosidade para todas as linhas laterais não é suficiente para se obter uma rede semelhante ao campo, como é observado no Cenário 1 que tem erro absoluto de 0,0159 m/m. Dessa forma, subdividir as linhas laterais em zonas é uma solução, em cada uma delas um valor de rugosidade diferente, para após a simulação da rede modelada no *software* EPANET a perda de carga ser semelhante da encontrada em campo. Assim, no Cenário 6 temos o modelo que mais se aproximou da rede estudada, com erro de apenas 0,0001 m/m, pois cada linha lateral se tornou uma zona de rugosidade modelada de forma individual.

Contudo, a modelagem se tornou exaustiva e demanda maior tempo com o aumento do número de zonas de rugosidade. Então, para tornar viável a modelagem se faz necessário adotar um cenário que demande menos tempo e represente bem os valores encontrados em campo.

4.6 Análise Geral

No Gráfico 1, é observado a média absoluta do erro da perda de carga correspondente ao número de zonas de rugosidade adotado.

Gráfico 1: Média do Erro Absoluto da Perda de Carga x Número de Zonas



Fonte: Autor (2022).

Através do gráfico, observa-se que o aumento no número de zonas de rugosidade corresponde um menor erro relativo entre as perdas de carga modeladas e a observada em campo. Além disso, houve uma grande variação do cenário 1 ao 4, utilização de 1 a 4 zonas de rugosidade; já nos cenários 5 e 6, respectivamente 6 ou 12 zonas, a variação é bem menor.

No entanto, quanto maior o número de zonas de rugosidade, mais exaustivo é a modelagem, pois a inserção dos dados de rugosidade acontece de forma manual. Então, para se tornar viável a modelagem foi necessário adotar um cenário que demande menos tempo e represente bem os valores encontrados em campo.

Dessa forma, com 4 zonas de rugosidade, Cenário 4, tem-se um valor de perda de carga bem próximo do encontrado em campo, o erro é de apenas 0,0029 m/m. Assim, como a modelagem se torna exaustiva com a inserção de mais zonas, esse cenário é o mais eficiente para representar a rede de irrigação estudada.

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados encontrados nesse estudo, a rede atual é considerada excelente na distribuição de água, para diferentes trabalhos como o de Zocoler (2005), Araújo *et al.* (2019) e Valnir Júnior *et al.* (2012). Para o método de Denículi *et al.* (1980) os resultados dos índices UE, CUC e CUE foram, respectivamente, 97,72%, 98,11% e 97,04%, e para o método de Keller e Karmeli (1975) são 97,21%, 98,11% e 97,38%. Dessa forma, como os resultados dos índices se aproximam de forma significativa para os dois métodos de coleta de vazões em campo, método de Denículi e método de Keller e Karmeli, pode-se utilizar o método mais simples, no caso o que analisa menos gotejadores, Keller e Karmeli (1975).

Assim, sabendo que analisar uma rede de irrigação é um processo complexo, buscou-se representar a rede em forma computacional, modelagem do sistema. Na simulação hidráulica da rede existente no *software* EPANET, a solução encontrada durante o processo para substituir o grande número de gotejadores foi a adoção de uma rugosidade equivalente às fitas gotejadora. Entretanto, adicionar apenas um valor de rugosidade para todas as linhas laterais não é suficiente para se obter uma rede semelhante ao campo. Então, como solução durante a modelagem, foi simular a rede em diferentes cenários, estes com quantidade de zonas de rugosidade diferente.

O cenário com maior quantidade de zonas de rugosidade, cenário 6 com 12 zonas, é o que mais se aproxima do resultado de campo, o erro para perda de carga é de 0,0001 m/m. Entretanto, não é o mais eficiente, pois demanda muito tempo para ser implementado. Assim, considerando que a partir do cenário 4 não houve grande variação e demanda menos tempo para adicionar valores de rugosidade, 4 zonas de rugosidade são satisfatórias, erro de apenas 0,0029 m/m, para se obter uma rede com pressões e perda de carga semelhantes aos encontrados em campo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Alex Nunes de. **Dimensionamento do sistema de Irrigação por Gotejamento Móvel (IRGMO): metodologia de cálculo e software**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ANDRINI, Marcelo; DE SOUZA, Camila Aparecida Nunes; SAAD, João Carlos Cury. Software SLIDE para dimensionamento de linhas laterais em irrigação por aspersão convencional. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 38-97, 2019.
- ARAÚJO, Wellington Farias et al. Dimensões de bulbo molhado em sistema de irrigação por gotejamento em área cultivada com atearas. **Embrapa Roraima-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2019.
- BATISTA, Pedro Henrique Dias *et al.* Simulação do comportamento hidráulico de microaspersores e microtubos ao longo da linha lateral. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 11, n. 1, p. 67-71, 2017.
- BISCARO, Guilherme Augusto. **Sistemas de irrigação localizada**. 2014. Ed. UFGD. Dourados, MS.
- BOMBARDELLI, Wagner Wilson Ávila. **Perda localizada de carga em conexões utilizadas em sistemas de microirrigação**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BORGHETTI, José Roberto; SILVA, Washington L. C.; NOCKO, Heitor Rafael; LOYOLA, Luís Nicolas; CHIANCA, Gustavo Kauark. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: Identificação de áreas prioritárias**. Brasília: FAO, 2017. 243p.
- BRASIL. Agência Nacional de Água. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de águas**. Brasília: ANA, 2017.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008. 132p.
- BRITO, Cleiton Fernando Barbosa; FONSECA, Varley Andrade; SANTOS, M. R. Desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento com aplicação da água salina. **Revista Agrotecnologia**, v. 7, n. 1, p. 10-17, 2016.
- BRITO, Luiza Teixeira de Lima; MOURA, Magna Soelma Beserra de; GAMA, Gislene Feitosa Brito. **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, 2007.
- CASTIBLANCO, José Mendoza. **Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada**. 2013. 120p. Tese (Doutorado). Irrigação e Drenagem. Universidade de São Paulo: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.
- COELHO, Eugênio Ferreira et al. Irrigação em citros nas condições do nordeste do Brasil. **Citrus Research & Technology**, v. 27, n. 2, p. 0-0, 2020.

COSTA, Magno Gonçalves da; Castro, Marco Aurélio Holanda de. Uma interface de pré-processamento para o EPANET utilizando o AutoCad: o programa UFC2. *In: IV SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de abastecimento Urbano de Água*, 4., 2006. João Pessoa, 2006.

COUTINHO, Marlon Marques. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina, ES**. 2015. Tese de Doutorado.

FARIA, Ítalo Meireles; KELLNER, Erich. Transiente Hidráulico em Adutoras–Análise comparativa de duas diferentes configurações da Soft-Starter. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 7, n. 51, 2019.

GOMES, Heber Pimentel. **Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. 3 ed. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999.

KELLNER, Erich; AKUTSU, Jorge; REIS, Luisa Fernanda Ribeiro. Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 347-355, 2016.

LACERDA, Bruna Ribeiro. Metodologia para cálculo das perdas de carga localizadas e sua influência sobre a pressão dinâmica nos pontos de tomada de água de uma instalação hidráulica predial de água fria. 2017.

MELO, Verônica Gaspar Martins Leite de. **Perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis para microirrigação**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MESQUITA, Francisco Oliveira et al. Uniformidade de aplicação de percolado de aterro sanitário diluído em unidades de irrigação por gotejamento. **Agropecuária científica no semiárido**, v. 11, n. 1, p. 145-156, 2015.

MOGHAZI, Hosam El-Din M. Estimativa do coeficiente de Hazen-Williams para tubos de polietileno. **Revista de engenharia de transportes**, v. 124, n. 2, pág. 197-199, 1998.

MOURA, Magna Soelma Beserra; GALVINCIO, Josiclêda Domiciano; BRITO, Luiza Teixeira de Lima; SOUZA, Luciana Sandra Bastos; SÁ, Ivan Ighour Silva; SILVA, Thieres George Freire. **Clima e água de chuva no Semi-Árido**. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, 2007. *

PEREIRA, Poliana de Caldas et al. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 184-195, 2015.

PIMENTA, Bruna et al. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE ABSOLUTA DE TUBULAÇÕES DE PVC. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 2017.

ROCHA NETO, ODÍLIO C. et al. Aplicação de redes neurais artificiais como alternativa ao balanço hídrico volumétrico no manejo de irrigação por gotejamento em melancia. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 266-279, 2015.

ROCHA, Hermes S. da et al. Rugosidade interna de tubos plásticos utilizados em irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 143-149, 2017.

SENAR 2019. Disponível em:

https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/250_irriga%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 10/02/2022

SILVA, César Antônio; SILVA, Cícero José. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista científica eletrônica de agronomia**, Garça, v. 4, n. 8, dez. 2005-. Semestral. ISSN 1677-0293.

SILVA, Samuel et al. Demanda hídrica da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 849-856, 2015.

SIMÕES, Welson Lima et al. Inoculação eficiente de bactérias diazotróficas via sistema de irrigação por gotejamento em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.

VALENTE, Vitor Tumelero. **Análise, simulação e controle de um sistema de compensação de movimento utilizando um manipulador plataforma de stewart acionado por atuadores hidráulicos**. 2016.

VALNIR JÚNIOR, M.; SOUSA, L. S. DE.; CARVALHO, C. M. DE; RAMOS, M. J. B.; LUNA, N. DE S.; ARAÚJO, O. P. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento gravitacional em campo com a cultura da abóbora. **I Inovagri, Fortaleza**, CE. 2012.

ZOCOLER, João Luiz et al. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 234-247, 2015.