



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA**



Bruno Alvarez Scapin

Eficiência energética em sistemas de irrigação por bombeamento

Porto Alegre

Dezembro de 2019

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO
HÍDRICO.

Orientador: Mauricio Dai Prá

Porto Alegre

Dezembro de 2019

Eficiência energética em sistemas de irrigação por bombeamento

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 16/12/2019 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá - Orientador

.....

Prof. Dr. Daniela Guzzon Sanagiotto – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia

.....

Prof. Dr. Nilza Maria dos Reis Castro – Departamento de Obras Hidráulicas

Conceito:.....

CIP - Catalogação na Publicação

Scapin, A, Bruno
Eficiência energética em sistemas de irrigação por
bombeamento / Bruno Scapin, A. -- 2019.
85 f.
Orientador: Mauricio Dai Prá.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. bombas. 2. irrigação por aspersão. 3. projetos
de irrigação. 4. dimensionamento. 5. análise de
custos. I. Dai Prá, Mauricio, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à toda minha família, por estar sempre ao meu lado. Agradeço à minha mãe, minha irmã e ao meu pai, por me proporcionarem todo o apoio e incentivo para concluir meus objetivos; às minhas avós, pelo carinho que me deram e pela fé que sempre tiveram em minhas conquistas e aos meus queridos tios e primos pelos momentos felizes e descontraídos que me brindaram, seja em Porto Alegre ou em Montevideo.

Aos meus amigos, por compreenderem minhas ausências, e por sempre me permitirem compartilhar minhas vitórias e decepções; aos meus colegas, por tornarem esta etapa muito mais agradável e divertida e à Sheila pelo companheirismo ao longo desta jornada.

A todos os professores que até esta etapa de vida contribuíram para minha formação, especialmente à professora Ana Luiza, que me orientou com muito empenho ao longo de toda minha graduação e ao professor Mauricio, que investiu boa parte de seu tempo para me ajudar a concluir a última etapa deste processo.

Agradeço a todas as pessoas que intencionalmente me ajudaram a chegar até aqui.

*“Aprender é a única coisa de que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se
arrepende.”*

Leonardo da Vinci

RESUMO

SCAPIN, B. A. Eficiência energética em sistemas de irrigação por bombeamento. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019.

Resumo do Trabalho

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma ferramenta computacional, através da linguagem de programação Python 3, cuja finalidade é realizar de maneira rápida o processo de dimensionamento e implantação de sistemas de irrigação por aspersão, com ênfase em sua eficiência energética, visando os aspectos econômicos que envolvem o projeto de irrigação. Considerando que uma das falhas mais comuns em sistemas de irrigação é a má execução do projeto de dimensionamento, principalmente com relação às motobombas (TESTEZLAF, 2017), a ferramenta desenvolvida integra a metodologia de dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão proposta por GOMES (2013) e a metodologia de dimensionamento de motores e bombas centrífugas proposta por KURITZA (2017). O aplicativo realiza, através do uso de um conjunto de dados de fácil obtenção, inseridos pelo usuário, o dimensionamento de sistemas convencionais de aspersão e posteriormente possibilita a visualização dos resultados hierarquizados de acordo com o custo. Este trabalho aborda os fundamentos teóricos utilizados no equacionamento descrito no código, apresenta de maneira sucinta a lógica de funcionamento do *script* e, na sequência, mostra um exemplo de aplicação da ferramenta em uma situação hipotética. Com o uso deste aplicativo espera-se contribuir para maximizar os benefícios econômicos do agricultor, uma vez que permite a comparação de diferentes alternativas de dimensionamento avaliadas economicamente.

Palavras-chave: bombas; irrigação por aspersão, projetos de irrigação, dimensionamento, análise de custos.

ABSTRACT

SCAPIN, B. A. Energetic efficiency of sprinkling irrigation systems. Undergraduate thesis - (Degree in Hydraulic Engineering) – Hydraulic Research Institute. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019.

Abstract of the work

The present work consists about the development of a computational tool, through the computational language Python 3, which main objective is to solve in a fast way the equations related to the process of designing and implementation of irrigation systems by sprinkling, with focus on its energetic efficiency. Considering that one of the most common fails in irrigation systems is the wrong execution of the project of dimensioning mainly in relation of motor-pumps, the tool developed integrates the methodology of designing of sprinkling irrigation systems proposed by GOMES (2013) and the methodology of motors and pumps designing, developed by KURITZA (2017). The application realizes, through the use of a group of data of easy obtention inserted by the user, the sizing of conventional sprinkling irrigation systems and enables the visualization of the results arranged by its cost. This document introduces the theory fundamentals used on the equations included on the code, explains, in a short way, the logic of the running of the script and shows an example of application of the tool on a hypothetical problem. It's expected that the use of this application contributes to maximize the economic benefits of the user, since that it allows the comparison of different alternatives of designing evaluated economically.

Key-words: pumps; irrigation by sprinkling, irrigation projects, designing, cost analysis.

Sumário

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2: DIRETRIZES DA PESQUISA	19
2.1 Questão de estudo.....	19
2.2 Justificativa.....	19
2.3 Objetivo.....	19
2.4 Limitações	19
2.5 Delineamento	20
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 A energia elétrica no Brasil.....	21
3.1.1 Aspectos institucionais	22
3.1.2 Energia elétrica na irrigação	23
3.2 Sistemas de Irrigação	24
3.2.1 Métodos de irrigação.....	24
3.3 Dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação por aspersão	25
3.3.1 Aspersores.....	27
3.3.2 Sistema de distribuição	33
3.3.3 Estações de bombeamento	43
3.4 Eficiência energética de sistemas de irrigação por bombeamento	50
3.5 Custo do sistema.....	54
3.5.1 Tarifação da energia elétrica no Brasil	55
3.5.2 Tensão de fornecimento.....	56
3.5.3 Estrutura tarifária convencional.....	57
3.5.4 Custo final.....	58
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
4.1 Dados de entrada	62
4.2 Funcionamento da ferramenta	64
4.2.1 Leitura de dados.....	66
4.2.2 Processamento de dados	67
4.2.3 Organização e exportação de dados.....	72
4.3 Dados de saída.....	72
CAPÍTULO 5: ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
5.1 Condições de entrada.....	74
5.2 Resultados.....	78
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	82
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2018.	21
Figura 2: Áreas de abrangência das concessionárias de distribuição de energia elétrica.	22
Figura 3: Exemplo de aspersor de impacto.	27
Figura 4: Disposição quadrada de aspersores.	29
Figura 5: Distribuição da perda de carga ao longo de uma linha lateral.	42
Figura 6: Representação da transformação de energia no conjunto motobomba.	44
Figura 7: Curva da bomba, curva do sistema e ponto de operação.	49
Figura 8: Exemplo de curva de bomba.	50
Figura 9: Tipos de bombas centrífugas analisadas.	51
Figura 10: Características das bombas analisadas na pesquisa.	52
Figura 11: Curva de estrangulação adimensional.	52
Figura 12: Rendimentos das bombas centrífugas analisadas no estudo.	54
Figura 13: Custo da estação elevatória segundo diâmetro da adutora.	55
Figura 14: Componentes da tarifa.	56
Figura 15: Representação do fluxograma de leitura de dados.	64
Figura 16: Representação do fluxograma do processamento dos dados.	65
Figura 17: Representação do fluxograma da organização e exportação de dados.	66
Figura 18: Perfil transversal da precipitação de um aspersor em funcionamento adequado.	69
Figura 19: Layout do programa.	77
Figura 20: Gráfico de investimento em sistemas dimensionados.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do consumo de energia elétrica na irrigação Brasileira.	23
Tabela 2: Distâncias máximas recomendadas entre aspersores segundo suas disposições.	30
Tabela 3: Pressão de serviço mínima segundo o espaçamento dos aspersores.	30
Tabela 4: Intensidade máxima de precipitação de acordo com a textura do solo e características do terreno.	31
Tabela 5: Valores do índice simplificado de pulverização recomendados para distintos tipos de solos e culturas.	32
Tabela 6: Coeficiente m em função da fórmula empírica de perda de carga.	38
Tabela 7: Dimensões de tubulações de PVC/DEFoFo, PN 125 (NBR 5647, 1999).	40
Tabela 8: Espessura dos tubos de polietileno de baixa densidade (UNE 53-131-82)	41
Tabela 9: Tubulações de PVC - O	41
Tabela 10: Preços de motores de 2 e 4 polos.	48
Tabela 11: Tabela de aspersores utilizados como exemplo.	75
Tabela 12: Tabela de dose utilizada como exemplo.	75
Tabela 13: Tabela de tubulações utilizada como exemplo.	76
Tabela 14: Resultados da ferramenta: componentes e condições de operação.	78
Tabela 15: Resultados da ferramenta: custos.	78
Tabela 16: Sistema de aspersão dimensionado para o Aspersor 3: regras de operação.	79
Tabela 17: Sistema de aspersão dimensionado para o Aspersor 3.	79
Tabela 18: Resultados da segunda simulação: custos.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais materiais de fabricação para tubos de irrigação.	40
Quadro 2: Subgrupos do grupo tarifário.....	56
Quadro 3: Subgrupos do grupo tarifário B.	57
Quadro 4: Lista de bibliotecas implementadas no código.....	61

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

ONS: Operador Nacional do Sistema

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SIN: Sistema Interligado Nacional

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔZ	Diferença de carga estática devido ao desnível geométrico da linha lateral	[m]
A	Área da seção de fluxo	[m ²]
C	Coefficiente de rugosidade de Hazen-Willians	
$C_{aspersor}$	Custo por aspersor	[R\$]
$C_{componentes}$	Custo de outras componentes do sistema	[R\$]
$C_{energia}$	Custo da energia de bombeamento	[R\$]
$C_{energia}'$	Custo atualizado de energia elétrica	[R\$]
C_F	Valor futuro	[R\$]
$C_i(D)$	Custo unitário da tubulação	[R\$/m]
C_P	Valor presente	[R\$]
C_{total}	Custo total do sistema	[R\$]
d	Diâmetro do bocal do aspersor	[m]
D	Diâmetro da tubulação	[m]
D_e	Diâmetro econômico	[m]
f	Fator de perda de carga	
F	Fator de correção da equação da perda de carga	
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
h	Pressão de serviço do aspersor	[m]
H	Pressão requerida na entrada da linha lateral	[m]
$H_{1/1}$	Pressão nominal	[m]
h_a	Altura do tubo de subida	[m]
H_f	Perda de carga total	[m]
H_i	Perda de carga linear	[m]
H_o	Altura manométrica de operação do sistema	[m]
i	Taxa de juros	
I	Intensidade média de precipitação de um aspersor	[m/s]
I_e	Índice de eficiência	
I_p	Índice de pulverização	
K	Coefficiente de perda de carga	
k	Coefficiente de Bresse	
K_s	Coefficiente de atrito da formula de Scobey	
L	Extensão da tubulação	[m]
m	Constante específica determinada por formula empírica de perda de carga	
N	Número de aspersores	
n	Período de amortização	[anos]
N_b	Número de horas em funcionamento	[h]
N_s	Velocidade de rotação específica	
P	Pressão	[N/m ²]
P	Potência requerida pela estação de bombeamento	[kW]
p	Custo unitário da tarifa de energia elétrica	[R\$/kWh]
P_{hid}	Potência hidráulica	[W]
P_m	Potência motriz	[W]

Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
$Q_{1/1}$	Vazão nominal	[m ³ /s]
Q_o	Vazão de operação do sistema	[m ³ /s]
R	Raio de alcance do aspersor	[m]
Re	Número de Reynolds	
$S1$	Espaçamento entre aspersores em uma linha lateral	[m]
$S2$	Espaçamento entre linhas laterais em uma linha principal	[m]
v	Velocidade média do escoamento	[m/s]
Z	Cota	[m]
γ	Peso específico	[N/m ³]
ε	Rugosidade da tubulação	[m]
η	Rendimento da bomba	
$\eta_{máx}$	Rendimento máximo da bomba	
μ	Viscosidade dinâmica	[N.s/m ²]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A irrigação pode ser definida como um conjunto de técnicas, formas ou meios que podem ser utilizados para aplicar água artificialmente às plantas procurando satisfazer suas necessidades e visando a produção ideal para o seu usuário. A aplicação de água por meio destas técnicas deve ser realizada de maneira correta, evitando desperdício ou perdas e otimizando os possíveis impactos positivos e minimizando os negativos (TESTEZLAF, 2017).

As técnicas existentes de irrigação visam aperfeiçoar o uso dos recursos envolvidos nesta prática de acordo com as condições físicas impostas pelo ambiente. Por falta de conhecimento dos parâmetros envolvidos em sistemas de irrigação, muitos destes são dimensionados de maneira ineficiente, visando apenas cumprir a sua função principal, e, portanto, muitas vezes são ignorados aspectos que podem ser relevantes quanto à economia de recursos associados à prática.

Para que a água abasteça uma rede de tubulações, é necessário que esta possua suficiente energia potencial. Isto somente é verificado naturalmente (sem a necessidade de energia adicional) se o manancial estiver situado em uma cota topográfica suficientemente alta em relação à área a irrigar, o que, na prática, raramente ocorre. Por conta disto, sistemas pressurizados de irrigação recebem água impulsionada por uma estação de bombeamento, que é constituída por uma estrutura formada por bombas hidráulicas, motores, tubulações, casa de máquinas e dispositivos especiais de controle. Devido à alta eficiência, larga faixa de potência e praticidade, na irrigação predomina o uso do motor elétrico em conjunto com turbobombas rotativas centrífugas (GOMES, 2013).

De acordo com TESTEZLAF (2017), uma das falhas mais comuns em sistemas de irrigação é a má execução do projeto de dimensionamento, principalmente em relação às motobombas. Portanto, a prática de engenharia dentro desta área torna-se essencial. Segundo um estudo realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizadas; sendo 20% da energia economizada devido à aplicação desnecessária da água e 10% devido ao redimensionamento e otimização dos equipamentos utilizados para a irrigação (LIMA, 2019).

Através do estudo de grandezas hidráulicas e elétricas é possível estimar parâmetros que preveem o desempenho de sistemas utilizados para a irrigação. A avaliação destes aspectos representa uma técnica moderna que permite reflexão sobre sua performance, e para sua aplicação são definidos indicadores que têm como objetivo simplificar, quantificar, analisar e comunicar a seu respeito, fornecendo informações importantes para o planejamento e o gerenciamento dos processos (KOPP, 2016 apud DANTAS NETO & FARIAS, 2013).

TOLMASQUIM e PINGUELLI (1998) conceituam a eficiência energética como padrões de utilização de modo que esta atenda às necessidades humanas com um mínimo de desperdício, visando à manutenção de suas fontes para as gerações futuras, preservando o meio ambiente, sem que isso comprometa a segurança e o conforto das pessoas envolvidas (TONIAL, 2014).

CAPÍTULO 2: DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo tem como objetivo apresentar as diretrizes do presente trabalho, definindo a questão de estudo, especificando a justificativa, citando o objetivo principal e definindo as limitações da pesquisa. Posteriormente, no final do presente capítulo, será exibida a estrutura do trabalho.

2.1 Questão de estudo

O estudo tem como questão a implementação e sistematização de uma metodologia para otimizar a eficiência energética de sistemas de irrigação por bombeamento.

2.2 Justificativa

Apesar de as áreas irrigadas corresponderem a menos do que 20% da área total cultivada do planeta, a irrigação é responsável pela produção de mais de 40% dos alimentos, fibras e culturas bioenergéticas (FAO, 2017). Segundo estudos realizados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em torno de 10% da energia elétrica consumida na irrigação seria economizada com o redimensionamento e otimização de equipamentos utilizados para a irrigação.

2.3 Objetivo

Determinar uma rotina computacional para efficientização energética em sistemas de irrigação por bombeamento baseado em GOMES (2013) e KURITZA (2017).

2.4 Limitações

Considerando o grande número de parâmetros relevantes para o dimensionamento de sistemas de irrigação por bombeamento, o trabalho se limitará à análise de sistemas convencionais de irrigação por aspersão, aplicado a áreas irrigadas retangulares e operando com uma bomba centrífuga impulsionada por um motor elétrico. O traçado destes sistemas contará com linhas laterais simétricas e uma linha principal. A ferramenta não considera efeitos dos fenômenos de cavitação e transiente hidráulico.

2.5 Delineamento

O delineamento do trabalho segue a seguinte ordem:

1. Pesquisa bibliográfica: este tópico tem como objetivo apresentar os fundamentos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho. Nele serão abordados os assuntos referentes à energia elétrica no Brasil, fundamentos da hidráulica, sistemas de irrigação e estações de bombeamento.
2. Metodologia: neste tópico será descrita a metodologia adotada para atingir os objetivos deste trabalho, citando as ferramentas utilizadas e detalhando o funcionamento da metodologia.
3. Aplicação da metodologia: neste tópico será realizada a aplicação da ferramenta em um cenário hipotético com a finalidade de gerar resultados próprios para serem avaliados.
4. Conclusão: neste tópico, em linhas gerais, será apresentada a conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a pesquisa bibliográfica, com o objetivo de introduzir o leitor aos termos, princípios e conceitos básicos referentes ao tema abordado.

3.1 A energia elétrica no Brasil

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), o Brasil é um país com cerca de 210 milhões de habitantes, destacando-se como a quinta nação mais populosa do mundo. Em 2008, cerca de 95% da população tinha acesso à rede elétrica. Segundo dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019), o país conta com mais de 61,5 milhões de unidades consumidoras em 99% dos municípios brasileiros, e o setor elétrico ainda está em constante crescimento, assim como a demanda deste recurso. A Figura 1 exibe o consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2018, realçando que 23% foi utilizada no setor Rural Irrigante.

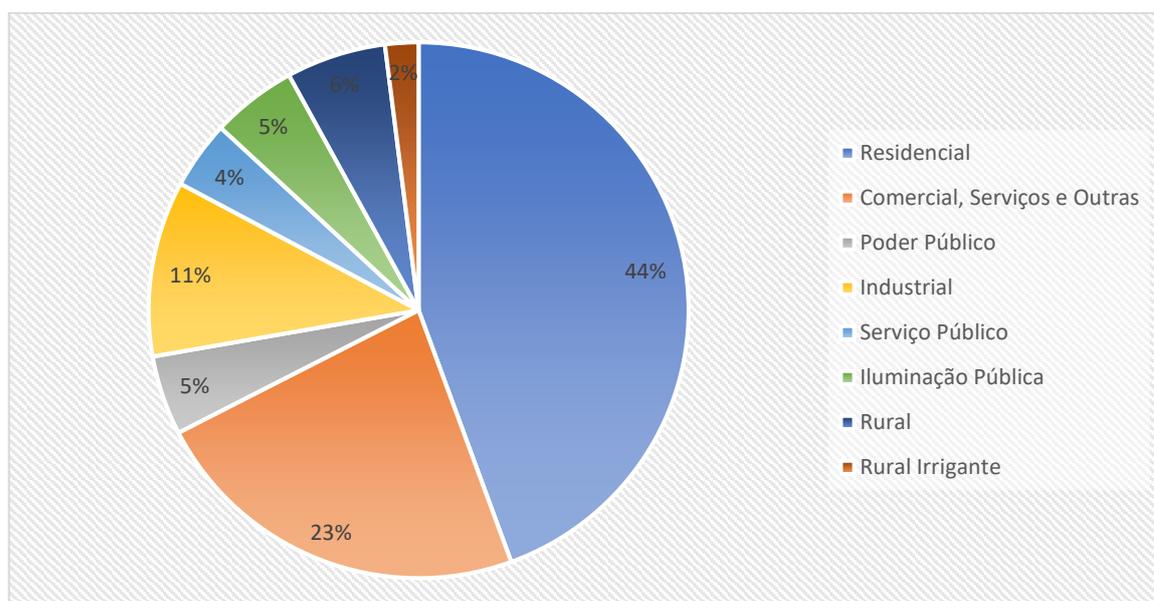


Figura 1: Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2018.

Fonte: adaptado de ANEEL, 2019.

3.1.1 Aspectos institucionais

Com a finalidade de gerenciar este recurso no âmbito nacional, em 2004 foi implantado o Novo Modelo do Setor Elétrico por meio das leis nº 10.847/2004 e nº 10.848/2004. Este novo modelo além de preservar agências reguladoras já existentes, criou novos agentes. O setor elétrico brasileiro é atualmente regulado pela ANEEL criada através da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997. Cabe a este órgão a atribuição de estabelecer tarifas pelo uso da energia elétrica (ANEEL, 2008).

Na maioria dos estados, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, a área de concessão ainda corresponde aos limites geográficos estaduais. Em outros, principalmente em São Paulo e Rio Grande do Sul, existem concessionárias com áreas de abrangência bem menores que a do estado. Há também áreas de concessão descontínuas, que ultrapassam os limites geográficos do estado-sede da concessionária. A Figura 2 ilustra as áreas de abrangência das concessionárias de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2005).



Figura 2: Áreas de abrangência das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil 2ª edição, (ANEEL, 2005).

Os contratos de concessão das empresas prestadoras dos serviços e distribuição de energia estabelecem regras a respeito de tarifa, regularidade, continuidade, segurança, atualidade e qualidade dos serviços e do atendimento prestado aos consumidores e usuários. Da mesma forma, definem penalidades para possíveis irregularidades (ANEEL, 2005).

3.1.2 Energia elétrica na irrigação

A Tabela 1 detalha anualmente o número de unidades consumidoras, o consumo de energia elétrica e a participação no consumo total da energia elétrica do setor rural irrigante desde o ano de 2003 até o ano de 2018.

Tabela 1: Características do consumo de energia elétrica na irrigação Brasileira.

Ano	Número de Unidades Consumidoras	Consumo de Energia Elétrica [MWh]	Participação no consumo da energia total do setor [%]
2003	340.205	2.404.551	0,90
2004	606.598	2.633.514	0,99
2005	407.381	2.813.281	1,11
2006	454.818	2.839.414	1,13
2007	523.691	3.602.343	1,37
2008	519.346	3.794.894	1,36
2009	557.799	3.329.339	1,16
2010	620.327	4.100.788	1,36
2011	685.959	4.106.475	1,32
2012	761.666	5.009.293	1,57
2013	865.794	5.244.826	1,59
2014	990.184	5.514.577	1,60
2015	1.162.825	5.534.522	1,62
2016	1.411.383	6.208.947	1,88
2017	2.456.935	6.373.269	2,03
2018	2.584.028	6.235.586	1,99

Fonte: adaptado de ANEEL, 2019.

O crescimento populacional acarreta no aumento na demanda de produção de alimentos, consecutivamente, ampliando a demanda de energia elétrica no setor de irrigação. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) a agricultura irrigável é responsável por cerca de 40% da produção mundial de alimentos, fibras e culturas bioenergéticas, e este número tende a aumentar. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), entre 1960 e 2015 a área irrigada no Brasil aumentou expressivamente, passando de 462 mil hectares para 6.95 milhões de hectares, e pode expandir mais 45% até 2030 atingindo 10 milhões de hectares. Considerando os fatos supracitados é possível concluir que haverá um aumento significativo na demanda de energia elétrica no setor de irrigação no Brasil.

3.2 Sistemas de Irrigação

A irrigação é uma prática agrícola que tem como finalidade o fornecimento de água às culturas onde e quando as dotações pluviométricas, ou qualquer outra forma natural de abastecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas. Esta é uma atividade imprescindível para qualquer agricultura tecnificada e rentável em quase todas as regiões e climas do nosso planeta (GOMES, 2013).

3.2.1 Métodos de irrigação

Os métodos de irrigação podem ser classificados segundo a forma de aplicação da água sobre as culturas, e cada um conta com suas vantagens e desvantagens, as quais devem ser mensuradas de acordo com as condições do local de irrigação e cultura. (GOMES, 2013).

Na irrigação por superfície, também conhecida como irrigação por gravidade, a água alcança as plantas de forma direta por escoamento superficial. Na irrigação pressurizada a água é conduzida por condutos forçados desde a fonte de abastecimento até a área cultivada, impulsionada por máquinas hidráulicas. Finalmente, a água é distribuída às plantas por meio de dispositivos especiais (GOMES, 2013).

Segundo GOMES (2013), a irrigação por superfície está limitada a zonas topograficamente favoráveis e sua aplicação tem diminuído em virtude da baixa eficiência, o que acarreta grande desperdício de água. Já a irrigação pressurizada, por sua vez, necessita de

menos mão de obra, apresentando maior uniformidade de distribuição da água sobre o terreno, melhor operacionalidade para o irrigante, maior eficiência e seus sistemas se adequam melhor aos diversos tipos de solo, cultura, clima e topografia do terreno. Por estes motivos, os sistemas de irrigação pressurizados estão se impondo no mundo, principalmente nas regiões onde se requer maior produtividade agrícola.

TESTEZLAF (2017) afirma que as características operacionais dos sistemas de irrigação por aspersão possuem vantagens importantes quando comparados aos sistemas por superfície, cujo conhecimento é essencial na escolha e na implantação do sistema, assim como na utilização racional do sistema de irrigação escolhido. A implantação deste tipo de sistema é vantajosa pois:

- não requer a sistematização do terreno, proporcionando economia nos custos de instalações e a utilização em áreas com topografia ondulada;
- dispensa a construção de canais de distribuição, diques ou sulcos, permitindo o melhor aproveitamento do terreno e reduzindo a perda de área com infraestrutura e de água por condição de solo nu;
- adequados para a maioria das culturas e solos pois possibilita o controle da precipitação dos aspersores e do grau de pulverização do jato, adaptando a vazão à capacidade de infiltração característica de cada solo, ou à fase de desenvolvimento da cultura;
- apresentam flexibilidade e mobilidade do sistema na aplicação de diferentes valores de lâminas de irrigação devido à disponibilidade de aspersores com características diferentes que configuram vazões distintas;
- facilita o controle de riscos de erosão, causado pela aplicação inadequada de água como ocorre nos casos de irrigação por superfície;
- apresenta menores perdas por evaporação e por infiltração quando comparado aos sistemas de irrigação por superfície;

3.3 Dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão é um método de aplicação de água às culturas de forma artificial, por meio de dispositivos abastecidos com água sob pressão, conhecidos como

aspersores, que tem a função de pulverizar os jatos d'água das tubulações às plantas (GOMES, 2013). As diferentes características dos componentes dos aspersores geram diferentes condições de irrigação, as quais podem ser mensuradas e associadas a índices que ajudam no estudo da eficiência do sistema.

Para o funcionamento da irrigação por meio de aspersores, é necessária a existência de uma ampla infraestrutura de distribuição de água, que começa na fonte de abastecimento. Esta fonte (que pode ser um rio, uma barragem, um reservatório, um poço ou um canal), quando está situada em um nível suficientemente alto em relação à área a irrigar, permite que a água seja distribuída com pressão natural sem a necessidade de utilizar sistemas de bombeamento, porém, isto nem sempre ocorre, e os sistemas de irrigação quase sempre dependem de algum mecanismo de impulsão de água, cujas magnitudes dependem das condições do sistema de irrigação (GOMES, 2013).

Um sistema de irrigação geralmente é composto por um sistema de bombeamento (cuja finalidade é proporcionar energia à água para que esta se mova desde a fonte de abastecimento até as plantações), por tubulações e acessórios (cuja finalidade é de escoar o fluido) e por aspersores.

Existem diferentes tipos de sistemas de irrigação que funcionam por aspersão. Segundo TESTEZLAF (2017) é possível classificar os sistemas em dois tipos: aqueles que operam a partir de uma tubulação com aspersores instalados ao longo do seu comprimento (linha lateral) e sistemas que operam a partir do funcionamento de somente um aspersor que opere a alta pressão e vazão. Baseando-se nisso, pode-se classificar os diversos tipos de sistemas em:

- Sistemas constituídos por linhas laterais:
 - Fixo ou permanente;
 - Móvel com movimento manual;
 - Móvel com movimento contínuo mecanizado:
 - Pivô central
 - Linear;
 - Lateral rolante.
- Sistemas constituídos por um aspersor canhão:
 - Fixo ou estacionário;

- Móvel com movimento autopropelido.

A partir deste ponto, o trabalho passará a descrever o sistema de irrigação por aspersão focando em sistemas de irrigação por aspersão constituídos por linhas laterais simétricas e uma linha principal.

3.3.1 Aspersores

Em geral, os aspersores podem ser rotativos os quais possuem um ou mais bocais que giram impulsionados pela pressão de água ou estacionários. De acordo com o mecanismo que produz a rotação eles podem ser de impacto, de engrenagem ou de reação. Os aspersores de impacto são os mais utilizados, operam em baixa rotação e podem possuir um ou dois bocais. O movimento de rotação do aspersor é produzido por meio de um braço oscilante que é impulsionado pelo jato d'água e posteriormente retorna à sua posição original através de uma força induzida por ação de uma mola ou de um contrapeso (GOMES (2013)). A Figura 3 ilustra um exemplo do aspersor supracitado.



Figura 3: Exemplo de aspersor de impacto.

Fonte: própria do autor.

Segundo GOMES (2013), outro método de classificação de aspersores está relacionado ao ângulo do jato de saída da água. O dispositivo é considerado de ângulo normal quando o jato d'água possui um ângulo de entre 25 e 45° com relação ao plano paralelo ao solo. Quando o

ângulo é menor que 25° o aspersor é considerado de ângulo baixo, sendo recomendado para irrigar áreas afetadas por ventos fortes para diminuir o efeito de arraste do jato gerado pela ação das correntes de ar. Os aspersores podem ser classificados também de acordo com a sua pressão de funcionamento (ou pressão de serviço), propriedade que condiciona muitas das características do jato d'água:

- Aspersores de baixa pressão: funcionam com pressões de serviço inferiores a 20 mca. São de baixa rotação e geralmente possuem um único bocal de diâmetro menor que 4 milímetros. As vazões proporcionadas por este tipo de aspersores não superam $1 \text{ m}^3/\text{h}$ e são empregados em espaçamentos menores do que 15 metros.
- Aspersores de média pressão: trabalham com pressões de serviço que variam de 20 a 40 mca e são os mais empregados em sistemas convencionais de irrigação por aspersão. São aspersores dotados de um ou dois bocais cujos diâmetros compreendem entre 4 e 7 milímetros. Quando este tipo de aspersor possui dois bocais, o bocal de diâmetro maior lança a chuva sobre a área contígua ao eixo do aspersor, enquanto que o menor molha a parte periférica do círculo. Este tipo de aspersor opera com vazões que variam entre 1 e $6 \text{ m}^3/\text{h}$ e são utilizados em espaçamentos compreendidos entre 12 e 36 metros.
- Aspersores de alta pressão: operam com pressões de serviço superiores a 40 mca, tendo alcances superiores a 30 metros e vazões superiores a $6 \text{ m}^3/\text{h}$.

A pressão de funcionamento de um aspersor, em conjunto com outras características das componentes deste tipo de dispositivo, determina a vazão, o alcance, o grau de pulverização das gotas e a intensidade de precipitação fornecida pelo dispositivo. Entender estas variáveis é de essencial importância para quantificar a eficiência de um sistema de irrigação. A vazão de operação de um aspersor pode ser calculada através da Equação 1.

$$Q = C_d \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{Equação 1}$$

Onde Q é a vazão do aspersor [m^3/s], C_d é o coeficiente de descarga do bocal do aspersor, d é o diâmetro do bocal [m] e h é a carga de pressão de funcionamento do aspersor [m], g é a

aceleração da gravidade [m/s^2]. O alcance do jato d'água de um aspersor pode ser calculado utilizando a Equação 2.

$$R = 2 \cdot h \cdot C_d^2 \cdot \sin(2\alpha) \quad \text{Equação 2}$$

Onde R é o raio de alcance do aspersor [m], α é o ângulo de inclinação do aspersor com relação ao plano horizontal [$^\circ$]. De acordo com GOMES (2013), em sistemas convencionais de irrigação por aspersão, os aspersores são normalmente dispostos de três formas distintas sobre as linhas laterais. Estas disposições são classificadas como triangular, retangular e quadrada. Na disposição quadrada os aspersores ocupam os vértices de um quadrado, sendo a distância entre linhas igual a separação dos aspersores dentro das laterais (Figura 4).

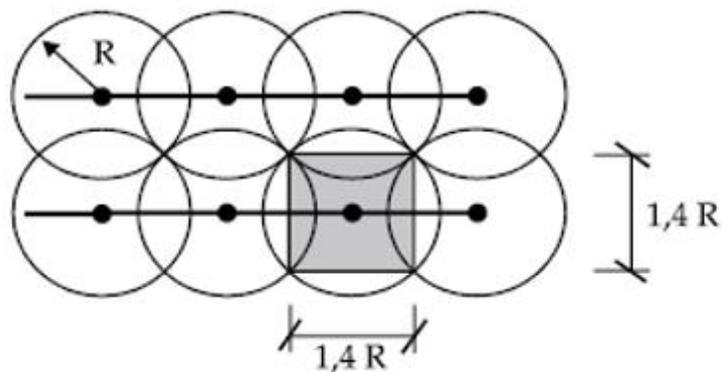


Figura 4: Disposição quadrada de aspersores.

Fonte: GOMES, 2013.

As frações das áreas dos círculos molhados que devem ser sobrepostas dependem de vários fatores, tais como a disposição dos aspersores, a forma dos perfis de precipitação, as condições de vento, a uniformidade de distribuição desejada e o aspecto econômico. Em termos econômicos é mais conveniente que os aspersores estejam mais espaçados para que seja menor o número de tubulações, de aspersores e de peças de conexão no sistema de irrigação, no entanto, a uniformidade de distribuição da precipitação sobre o terreno diminui ao se aumentar a distância entre os aspersores e/ou entre as linhas laterais (GOMES, 2013). As distâncias

máximas recomendadas entre os aspersores são função do raio de alcance do aspersor, e variam de acordo com a disposição dos mesmos (Tabela 2).

Tabela 2: Distâncias máximas recomendadas entre aspersores segundo suas disposições.

Disposição	Distância entre aspersores	Distância entre linhas
<i>Quadrada</i>	$\sqrt{2}R$	$\sqrt{2}R$
<i>Triangular</i>	$\sqrt{3}R$	1.5R
<i>Retangular</i>	R	1.3R

Fonte: adaptado de GOMES (2013, p. 55 apud Lozano, 1965).

Segundo GOMES (2013), do ponto de vista da superfície atendida pelos aspersores, a disposição triangular é melhor do que a disposição em quadrado, e esta por sua vez é melhor do que a disposição retangular. Este fato pode ser deduzido a partir da comparação da intersecção das áreas irrigadas dos aspersores ilustrados NA Figura 4, previamente destacada.

Nas instalações dos sistemas de aspersão convencional, o espaçamento entre aspersores está condicionado, também, pelos comprimentos dos tubos disponíveis comercialmente. Geralmente, os tubos leves fabricados para os sistemas de irrigação possuem comprimentos normalizados de 6 metros, com peso, espessura e classe variáveis de acordo com o material de fabricação. Com base em uma eficiência aceitável dos aspersores, GOMES (2013, p. 58 apud Clément-Galant, 1986) recomenda valores mínimos da pressão de funcionamento para distintos espaçamentos dos emissores (Tabela 3).

Tabela 3: Pressão de serviço mínima segundo o espaçamento dos aspersores.

Espaçamento (m)	Pressão mínima (mca)
6 x 6	15
12 x 12	20
18 x 18	25
24 x 24	30
30 x 30	35
42 x 42	40

Fonte: adaptado de GOMES (2013, p. 58 apud Clément-Galant, 1986).

Para a distribuição retangular ou quadrada de aspersores pode-se estimar a intensidade média de precipitação de um aspersor isolado através da Equação 3.

$$I = \frac{Q}{S_1 \cdot S_2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde I é a intensidade média de precipitação do aspersor [m/s], Q é a vazão do aspersor [m³/s], S₁ é o espaçamento entre aspersores em uma mesma linha lateral [m] e S₂ é o espaçamento entre linhas laterais [m].

Para aspersores com distribuição triangular, a intensidade média pode ser estimada através da Equação 4.

$$I = \frac{\sqrt{3}Q}{1,5 \cdot S_1^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde I é a intensidade média de precipitação de dado aspersor [m/s], Q é a vazão do aspersor [m³/s] e S₁ é o espaçamento entre aspersores em uma mesma linha lateral [m].

É recomendada uma intensidade de precipitação máxima em dado sistema considerando a textura do solo e as condições topográficas do terreno. A Tabela 4 exibe valores de intensidade máxima de precipitação de acordo com o solo e as características pedológicas e topográficas do local. Os valores com asterisco representam situações onde não existe cobertura vegetal no solo.

Tabela 4: Intensidade máxima de precipitação de acordo com a textura do solo e características do terreno.

Textura do solo e condições do perfil	Intensidade de precipitação máxima (mm/h)							
	Declividade (%)							
	0 a 5		5 a 8		8 a 12		Maior que 12	
Areia grossa de textura uniforme até 1,8m	51	51*	51	38*	38	25*	25	13*
Areia grossa com subsolo compacto	44	38	32	25*	25	19*	19	10*
Franco arenoso de textura uniforme até 1,8m	44	25	32	20*	25	15*	19	10*
Franco arenoso com subsolo mais compacto	32	19	25	13*	19	10*	13	8*
Franco siltoso de textura uniforme até 1,8m	25	13	20	10*	15	8*	10	5*
Franco siltoso com subsolo mais compacto	15	8	13	6*	10	4*	8	2,5*
Argiloso ou franco argiloso	5	4	4	2,5*	3	2*	2,5	1,5*

Fonte: adaptado de Gomes, (2013, p. 52 apud SCS/USA, 1960).

De acordo com GOMES (2013), a qualidade da irrigação por aspersão depende, dentre outros fatores, do grau de pulverização das gotas da chuva artificial. A prática de irrigação com

gotas muito finas faz com que a água esteja sujeita a maiores perdas por evaporação, principalmente em áreas afetadas por ventos fortes. Ao contrário, uma irrigação com gotas grossas causa danos às plantas de folhas sensíveis e pode diminuir a capacidade de infiltração no solo, devido à compactação produzida pelo impacto das gotas. Para um aspersor de determinado diâmetro de bocal, quanto maior a pressão de serviço, menor será o diâmetro das gotas. Existe uma maneira simplificada de qualificar este fato, através do índice de pulverização, o qual pode ser calculado através da Equação 5.

$$I_p = \frac{d}{h} \quad \text{Equação 5}$$

Onde I_p é o índice de pulverização, d é o diâmetro do bocal do aspersor [m] e h é a pressão de serviço do aspersor [m]. A Tabela 5 exibe o valor do índice supracitado correlacionado com o tipo de gota, o tipo de cultura a ser irrigada e a textura do solo.

Tabela 5: Valores do índice simplificado de pulverização recomendados para distintos tipos de solos e culturas.

I_p	Tipos de gotas	Culturas	Solos
<0,3	Finas	Flores, hortaliças, algodão, fumo, etc.	Argilosos
0,3 a 0,5	Médias	Frutíferas, extensivas, herbáceas, etc.	Franco
> 0,5	Grossas	Molho, forragens, cana-de-açúcar, etc.	Arenosos

Fonte: adaptado de Gomes (2013, p. 49 apud Lozano, 1965).

Segundo GOMES (2013), em termos econômicos, é mais conveniente para o dimensionamento de um projeto de irrigação por aspersão que o aspersor, funcionando a uma determinada pressão, consiga o maior raio de alcance possível, buscando a menor densidade de linhas laterais e de aspersores, reduzindo custos de instalação. O parâmetro que representa a eficiência de um aspersor, com relação a seu alcance, é o índice de eficiência (I_e) proposto por Oelher (1964), que resulta na razão entre o raio de alcance do aspersor e a pressão de serviço (Equação 6). Os valores mais adequados deste índice, que compatibilizam o aspecto econômico com a qualidade da irrigação, estão compreendidos entre 0,70 e 0,80.

$$Ie = \frac{R}{h} \quad \text{Equação 6}$$

Onde Ie é o índice de eficiência, R é o raio de alcance do aspersor [m].

3.3.2 Sistema de distribuição

Os sistemas de irrigação abordados neste estudo funcionam através de princípios hidráulicos relacionados a condutos forçados, já que o uso dos dispositivos previamente citados para a irrigação por aspersão requer que as tubulações das redes de irrigação estejam sujeitas a pressões maiores do que a pressão atmosférica.

Segundo TESTEZLAF (2015), o objetivo do dimensionamento correto de tubulações é assegurar que a mesma fornecerá água para a cultura sem perda excessiva de pressão, atendendo, assim os critérios de projeto e possibilitando o escoamento da água em velocidades seguras e com mínimas perdas de carga. Na concepção do projeto de irrigação os projetistas devem se certificar tanto do local da fonte ou da origem da água de irrigação como da sua qualidade, realizando análises para conhecer características físicas, químicas e biológicas, já que estas características podem ser importantes durante a definição do material dos tubos e na fixação dos parâmetros utilizados nos cálculos. O primeiro parâmetro de projeto necessário para o dimensionamento de tubulações é a vazão do sistema, a qual é determinada a partir das necessidades da cultura. Posteriormente, é necessário conhecer os valores da pressão do sistema de irrigação para a vazão previamente determinada.

De acordo com GOMES (2013), as tubulações das redes hidráulicas de sistemas de irrigação são dimensionadas no sentido inverso do fluxo d'água. Após a definição do traçado das tubulações, dos espaçamentos, da vazão e da pressão de serviço dos aspersores, dimensionam-se as linhas laterais. Em seguida são calculadas as tubulações da rede de distribuição, e por último se dimensiona a estação elevatória.

Características como os diâmetros das tubulações, tipo de bomba, tipo de aspersor utilizado e custos de implantação e operação são inúmeras, resultando numa gama infinita de possibilidades de projetos com diferentes custos. As componentes dos sistemas hidráulicos devem seguir determinados critérios, muitas vezes estabelecidos por normas técnicas, para que

operem de maneira adequada, reduzindo assim seu desgaste ou até mesmo evitando o colapso de suas componentes.

3.3.2.1 Fundamentos de hidráulica

Segundo AZEVEDO NETTO (1976), considera-se forçado o conduto no qual o líquido flui com uma pressão diferente da pressão atmosférica e em tubulações onde a mesma encontra-se totalmente preenchida com água.

O escoamento de um fluido pode ser classificado de acordo com as características do próprio escoamento. Chama-se de escoamento permanente quando suas características físicas tais como a velocidade, pressão, temperatura e massa específica são constantes ao longo do tempo, do contrário o escoamento é dito como não permanente. O escoamento permanente, por sua vez, pode ser classificado como uniforme ou variado. No escoamento uniforme, as propriedades físicas do fluido são constantes ao longo do espaço enquanto que no escoamento variado estas variam espacialmente.

De acordo com GOMES (2013), nas condições práticas de funcionamento de sistemas de distribuição de água, não existe o escoamento permanente no sentido descrito anteriormente, no entanto, ao se analisarem valores médios das características físicas do fluido, alguns sistemas hidráulicos de distribuição podem ser considerados como permanentes e uniformes, no caso de sistemas com tubulações de seções constantes. Entretanto, em regiões do conduto onde ocorre a presença de singularidades, isto é, seções que possam alterar as características do escoamento (curvas, reduções, bifurcações, etc.) o escoamento passa a ser permanente e variado.

Em termos de regime do fluxo de água em uma tubulação, este pode ser laminar, crítico ou turbulento. No regime laminar, o fluxo se dá em lâminas paralelas entre as quais não existe o intercâmbio de partículas, enquanto que no regime turbulento as partículas escoam em trajetórias irregulares e aleatórias ao longo do conduto. A importância de caracterizar o escoamento seguindo estes critérios é que no escoamento turbulento ocorre uma maior dissipação de energia por conta do fenômeno da turbulência. O regime crítico é o regime de transição entre os regimes supracitados. Para poder classificar o fluxo de acordo com os regimes mencionados em condutos forçados é utilizada a Equação 7.

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \qquad \text{Equação 7}$$

Onde Re é o número de Reynolds, v é a velocidade média do escoamento [m/s], D é o diâmetro da tubulação [m], ρ é a massa específica do fluido [kg/m³] e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [N.s/m²].

De acordo com os resultados experimentais obtidos por Osborne Reynolds:

- Se $Re < 2000$ Regime Laminar;
- Se $2000 < Re < 4000$ Regime Crítico;
- Se $4000 < Re$ Regime Turbulento.

O transporte de água de condutos forçados pode ser representado matematicamente através de duas equações fundamentais:

- A equação da continuidade: válida para fluidos incompressíveis e aplicada para escoamento permanente, relaciona o fluxo de água dentro de um determinado volume de controle imaginário, representada na Equação 8.

$$Q = v \cdot A = cte \quad \text{Equação 8}$$

Onde Q é a vazão volumétrica do fluido [m³/s], v é a velocidade média do escoamento [m/s] e A é a área da seção de fluxo [m²].

- A equação da energia: caracteriza espacialmente a energia do fluido em parcelas de energia potencial, energia de pressão e energia cinética, considerando perdas de carga (Equação 9).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + H_f \quad \text{Equação 9}$$

Onde Z é a cota de um determinado ponto [m], P é a pressão [N/m²], v é a velocidade média do escoamento [m/s], γ é o peso específico do fluido [N/m³], g é a aceleração gravitacional [m/s²] e H_f é a perda de carga total do ponto 1 (montante) ao ponto 2 (jusante) [m].

Quantificar a parcela de energia do fluido perdida é de essencial importância para o dimensionamento correto de condutos forçados. Segundo AZEVEDO NETTO (1976), a resistência ao fluxo, provocada pelas tubulações, é:

- Diretamente proporcional à extensão das tubulações;
- Inversamente proporcional ao diâmetro das tubulações;
- Função potencial da velocidade média do escoamento;
- Varia em função do material da tubulação;
- Independe da posição da tubulação;
- Independe da pressão interna na qual o fluido esco.

Para condutos forçados, a perda de carga pode ser expressa através de diversas equações que descrevem a perda de energia do fluido de acordo com as condições de escoamento.

De acordo com GOMES (2013), uma equação amplamente utilizada no dimensionamento de tubulações de sistemas de irrigação pressurizados, que deve ser utilizada para tubulações com diâmetros maiores do que 75 mm e vazões superiores a 3 l/s, é a equação de Hazen-Williams (Equação 10).

$$H_l = 10,667 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \quad \text{Equação 10}$$

Onde H_l é a perda de carga linear [m], L é a extensão da tubulação [m], D é o diâmetro da tubulação [m], Q é a vazão volumétrica do fluido na tubulação [m³/s] e C é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams.

Para o cálculo da perda de carga em tubulações leves, tais como tubulações constituídas por polietileno, PVC e alumínio, por exemplo, deve ser utilizada a formula de Scobey (Equação 11).

$$H_l = \frac{K_s}{387} \cdot \frac{L}{D^{1,1}} \cdot v^{1,9} \quad \text{Equação 11}$$

Onde H_l é a perda de carga linear [m], L é a extensão da tubulação [m], D é o diâmetro da tubulação [m], Q é a vazão do fluido na tubulação [m³/s] e K_s é o coeficiente de atrito da formula

de Scobey. A perda de carga unitária representa a perda de energia do fluido por unidade de comprimento da tubulação (Equação 12).

$$J = \frac{H_l}{L} \quad \text{Equação 12}$$

Onde J é a perda de carga unitária [m/m], H_l é a perda de carga linear [m], L é a extensão da tubulação [m].

As singularidades presentes em condutos forçados, como já foi mencionado previamente, são responsáveis por variações de velocidade do fluxo de água ao longo de uma tubulação. Este fenômeno é responsável pela perda de uma nova parcela de energia, chamada de perda de carga singular (Equação 13):

$$H_s = \sum K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equação 13}$$

Onde H_s é a perda de carga singular [m], K é o coeficiente de perda de carga, v é a velocidade média do escoamento [m/s] e g é a aceleração gravitacional [m/s]. O coeficiente K é determinado experimentalmente, e depende das peças acopladas nas tubulações do sistema.

3.3.2.2 Hidráulica de sistemas de irrigação por aspersão

Tubulações que constituem a linha principal de sistemas de irrigação não possuem vazões constantes, por conta do decréscimo de vazão provocado pelas linhas laterais. Da mesma forma, as linhas laterais não possuem vazões constantes ao longo de suas extensões por conta da descarga de água provocada pelos aspersores. Isto influencia diretamente na perda de carga do sistema, por conta da redução da velocidade do escoamento, oriunda da diminuição da vazão ao longo do sistema, portanto, as equações tradicionais referentes à perda de carga devem ser corrigidas, adicionado um coeficiente “F”, conforme a Equação 14 (GOMES, 2013).

$$H_l = J \cdot L \cdot F \quad \text{Equação 14}$$

Onde H_l é a perda de carga linear [m], J é a perda de carga unitária, L é a extensão da tubulação [m] e F é o fator de correção da equação da perda de carga.

Para uma linha lateral, na qual o primeiro aspersor está situado a uma distância da entrada do conduto igual à metade do espaçamento entre aspersores, o coeficiente “F” pode ser calculado através da Equação 15.

$$F = \frac{\frac{\sum_{n=1}^N n^m}{N^{m+1}} \cdot \frac{1}{2 \cdot N}}{1 - \frac{1}{2 \cdot N}} \quad \text{Equação 15}$$

Onde N é o número de aspersores, n é um número inteiro utilizado para o cálculo iterativo da somatória o qual inicia em 1 e termina em N , e m é a constante específica de cada fórmula empírica utilizada para a estimativa da perda de carga.

Para uma linha lateral na qual o primeiro aspersor está situado a uma distância da entrada do conduto igual ao espaçamento entre aspersores, o coeficiente “F” pode ser calculado através da Equação 16.

$$F = \frac{\sum_{n=1}^N n^m}{N^{m+1}} \quad \text{Equação 16}$$

Os valores do coeficiente m de acordo com a equação utilizada estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Coeficiente m em função da fórmula empírica de perda de carga.

Formula	m
Hazen-Williams	1,85
Scobey	1,9

Fonte: adaptado de GOMES, 2013.

Durante o dimensionamento é importante analisar alguns critérios que consideram fatores que podem ser prejudiciais às componentes do sistema. O limite de velocidade no tubo

deve ficar entre 0,5 e 2m/s para evitar a deposição de partículas ou evitar excesso de perda de carga, sobre pressão nas tubulações ou até mesmo desgastes internos.

A determinação do diâmetro ótimo de tubulações pode ser feita por tentativa, ou aproximada por meio de alguma fórmula matemática que calcule o diâmetro ótimo em função de variáveis hidráulicas e econômicas. O método das tentativas consiste na obtenção do diâmetro ótimo a partir da determinação dos custos de implantação e de energia, calculados para os diversos diâmetros comerciais escolhidos em função da vazão de projeto. Alternativamente existem fórmulas para aproximar o diâmetro econômico, como, por exemplo, a fórmula de Bresse (Equação 17), a qual permite determinar um provável diâmetro econômico, segundo a vazão de projeto:

$$D_e = k \cdot \sqrt{Q} \quad \text{Equação 17}$$

Onde D_e é o diâmetro econômico [m], k é o coeficiente de Bresse que varia de 0,4 a 1,6 e Q é a vazão [m^3/s].

Os valores calculados por esta fórmula muitas vezes não coincidem com um diâmetro disponível nos mercados. Nestes casos é necessário escolher o diâmetro comercial imediatamente superior ao calculado. Para a determinação do diâmetro ótimo pelo método das tentativas, seleciona-se um elenco de diâmetros comerciais, cujos valores, em sequência, contêm o diâmetro nominal obtido por meio da fórmula de Bresse. É recomendável escolher uma sequência de 3 ou 5 diâmetros nominais, na qual o valor central coincida com o nominal determinado pela fórmula de Bresse. O diâmetro ótimo econômico será aquele que minimiza o custo total da estação elevatória, correspondente à soma dos custos de implantação e de energia (valor atual ou presente).

3.3.2.3 Tipos de tubulação

De acordo com TESTEZLAF (2015) na área de irrigação se utilizam materiais metálicos e não metálicos (Quadro 1). A escolha deste material depende principalmente do atendimento das demandas hidráulicas do sistema (vazão e pressão de trabalho), qualidade da água transportada, avaliação econômica do projeto, dentre outros.

Quadro 1: Principais materiais de fabricação para tubos de irrigação.

Material	Classificação	Tubos
Metálico	Ferrosos	Aço-carbono Aço inoxidável Ferro fundido
	Não ferrosos	Alumínio
Não Metálico	<i>Plásticos</i>	Cloreto de polivinila (PVC) Polietileno (PE)

Fonte: adaptado de TESTEZLAF, 2015.

De acordo com GOMES (2013), para redes de tubulações fixas, de maior porte, empregam-se tubulações de PVC DEFoFo, de cor azul, com diâmetros externos equivalentes aos tubos de ferro fundido. A Tabela 7 exhibe as dimensões das tubulações supracitadas de acordo com a NBR 5647/1999.

Tabela 7: Dimensões de tubulações de PVC/DEFoFo, PN 125 (NBR 5647, 1999).

<i>DN (N°)</i>	<i>Bitolas</i>		<i>Dimensões</i>		<i>Massa (kg/m)</i>
	<i>DE (mm)</i>	<i>DI (mm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Comprimento (m)</i>	
100	118	108.4	4.8	6	2.67
150	170	156.4	6.8	6	5.5
200	222	204.2	8.9	6	10.96
250	274	252	11	6	13.92
300	326	299.8	13.1	6	19.85
350	378	347.6	15.2	6	
400	429.9	395.5	17.2	6	
500	532	489.4	21.3	6	

Fonte: adaptado de GOMES, 2013.

As tubulações de polietileno de baixa densidade possuem algumas vantagens consideráveis com relação aos tubos de PVC por conta de sua resistência contra as intempéries, flexibilidade, facilidade de instalação e resistência mecânica. Em contrapartida, são mais caras do que as de PVC e, na atualidade, só economicamente viáveis para diâmetros menores do que 50 mm (GOMES, 2013) A Tabela 8 exibe os diâmetros nominais e espessura dos tubos de polietileno de baixa densidade.

Tabela 8: Espessura dos tubos de polietileno de baixa densidade (UNE 53-131-82)

Diâmetro Nominal (mm)	Pressão nominal (kg/cm ²)		
	4	6	10
10	-	-	2.0
12	-	-	2.0
16	-	2.0	2.8
20	-	2.0	3.5
25	2.0	2.3	4.4
32	2.0	2.9	5.5
40	2.4	3.7	6.9
50	3.0	4.6	8.6
63	3.8	5.8	10.3
75	4.5	6.8	12.3
90	5.4	8.2	15.1

Fonte: adaptado de GOMES, 2013.

Outra alternativa com relação a tubulações são as de PVC – O (PVC orientado), as quais oferecem vantagens quanto à sua resistência.

Tabela 9: Tubulações de PVC - O

Diâmetro Nominal (mm)	Dem (mm)	Pressão nominal (kg/cm ²)	
		PN 60 e (mm)	PN 80 e (mm)
20	20.0	1.2	1.5
25	25.0	1.2	1.7
32	32.0	1.5	-
40	40.0	1.9	-

Fonte: AMANCO, 2017.

3.3.2.4 Linhas de distribuição

Segundo GOMES (2013), para o dimensionamento das linhas laterais, geralmente se considera que a perda de carga ao longo da tubulação deve ser distribuída de acordo com a curva B descrita na Figura 5.

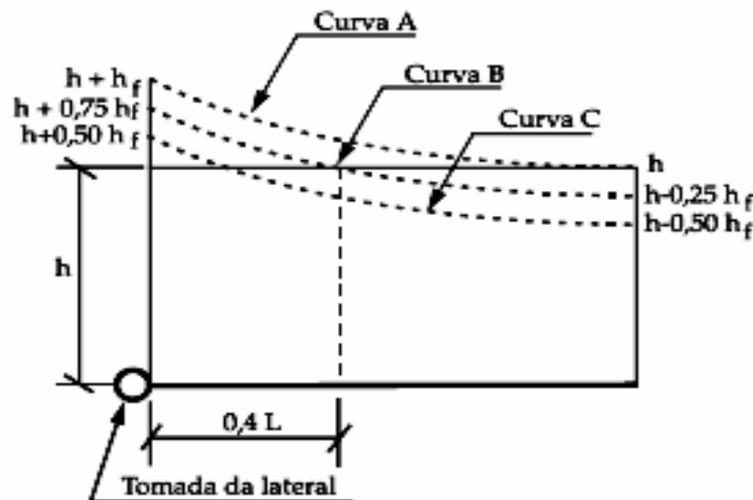


Figura 5: Distribuição da perda de carga ao longo de uma linha lateral.

Fonte: GOMES, 2013.

Esta distribuição de perdas garante o equilíbrio das pressões aplicadas aos aspersores ao longo da lateral. Nesta situação, a pressão média de funcionamento ao longo da linha lateral, que se considera igual à pressão nominal do aspersor, se localiza a aproximadamente $0,4L$ a partir da origem da linha lateral. Porém, a posição desse ponto varia de acordo com as irregularidades do relevo do terreno onde foi instalado o sistema. De acordo com Gomes (2013), para o cálculo da carga requerida na entrada da tubulação, deve ser utilizada a Equação 18.

$$H = h + 0.75H_f + h_a + \frac{\Delta Z}{2} \quad \text{Equação 18}$$

Onde H é a carga requerida na entrada da linha lateral [m], h é a carga de serviço do aspersor [m], H_f é a perda de carga ao longo da linha lateral [m], h_a é a altura do tubo de subida [m] e ΔZ é a diferença de carga estática devido ao desnível geométrico da linha lateral [m].

De acordo com Gomes (2013) uma variação relativa de 10% na vazão do aspersor, corresponde a aproximadamente uma variação de 20% na pressão de funcionamento. Conseqüentemente, pode-se garantir uma uniformidade aceitável da irrigação sempre que se cumprir a condição empírica de que a diferença máxima de carga entre dois aspersores quaisquer da linha lateral não ultrapasse 20% da pressão nominal adotada para os mesmos. Esta condição é conhecida como a regra dos 20% e se aplica sempre à diferença máxima de pressão entre as duas extremidades da linha lateral, estando essa em declividade ou nível uniforme (Equação 19).

$$H_f + \Delta Z \leq 0.2h \quad \text{Equação 19}$$

3.3.2.5 Adução

As adutoras são condutos encarregados do transporte de água entre unidades do sistema. O traçado desta componente é geralmente definido com base em critérios técnicos e econômicos e por isso, a sua concepção deve ser realizada com o auxílio de levantamentos topográficos, geotécnicos e inspeções de campo, evitando-se regiões que dificultem os trabalhos de implantação, operação e manutenção tais como áreas pantanosas, declividades elevadas, vias de tráfego intenso, etc. (HELLER & PÁDUA, 2006). Em sistemas de irrigação, entende-se como sendo o trecho de recalque deste a bomba hidráulica até as linhas de distribuição.

3.3.3 Estações de bombeamento

Para fornecer à água a energia suficiente para que ela se desloque de um dado manancial até as plantações, devem ser dimensionadas estruturas cuja função é bombear o fluido de forma adequada. Para isto, a correta escolha de um conjunto motobomba é imprescindível para que este processo seja realizado de maneira adequada, respeitando as condições da rede elétrica do usuário e garantir o funcionamento eficiente do sistema.

De acordo com BAPTISTA & LARA (2014), uma instalação de bombeamento típica, normalmente, é constituída dos seguintes elementos:

- Válvula de pé com crivo: localizada na extremidade inferior da canalização da aspiração. Esta peça impede o refluxo do fluido, quando a bomba cessa seu funcionamento. O crivo, acoplado na válvula, tem a finalidade de impedir que partículas sólidas entrem na tubulação.
- Redução excêntrica: os condutos possuem diâmetro maior que a bomba, portanto, é necessária a ligação destas duas componentes através de uma peça.
- Válvula de retenção: esta componente impede o fluxo da água no sentido da fonte à zona de abastecimento.
- Registros: instalados, normalmente, após a válvula de retenção, permitindo que haja manutenção na válvula além de controle da vazão.
- Bomba: as bombas são responsáveis pela conversão da energia mecânica em hidráulica.
- Motor: fornecedor de energia ao sistema.

A rede elétrica fornece a potência elétrica ao motor elétrico, responsável pela transformação desta em potência de eixo ou potência mecânica. Embora os motores elétricos sejam máquinas eficientes, parte da potência elétrica por ele recebida é perdida na transformação. A potência no eixo por sua vez é transferida à bomba para a sua conversão em potência hidráulica (GOMES, 2013). A Figura 6 esquematiza o processo supracitado.

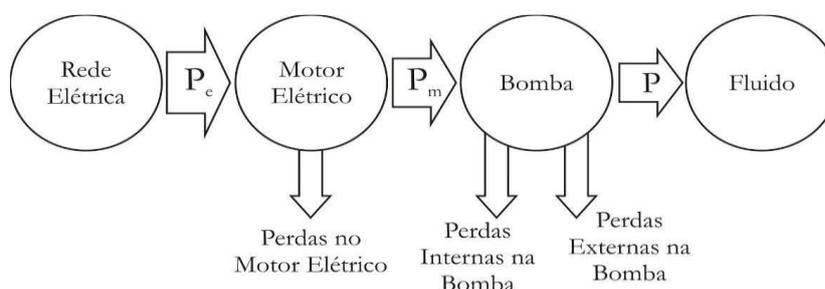


Figura 6: Representação da transformação de energia no conjunto motobomba.

Fonte: GOMES, 2013.

Segundo Gomes (2013) o consumo de energia das componentes de um conjunto motobomba pode ser quantificado através do cálculo da potência de cada uma das componentes. A razão entre as potências resulta no rendimento, e quantifica o percentual de energia que foi devidamente convertido de uma determinada natureza a outra.

- Potência hidráulica (P_{hid}): representa a energia por unidade de tempo devidamente recebida pelo fluido (Equação 20)

$$P_{hid} = \gamma \cdot Q_o \cdot H_o \quad \text{Equação 20}$$

Onde P_{hid} é a potência hidráulica [W], γ é o peso específico do fluido [N/m^3], Q_o é a vazão de operação do sistema [m^3/s], H_o é a altura manométrica de operação do sistema [m].

- Potência motriz (P_m): é a potência medida no eixo do rotor (Equação 21).

$$P_m = \frac{\gamma \cdot Q_o \cdot H_o}{\eta} \quad \text{Equação 21}$$

Onde P_m é a potência motriz [W], γ é o peso específico do fluido [N/m^3], Q_o é a vazão de operação do sistema [m^3/s], H_o é a altura manométrica de operação do sistema [m] e η é ao rendimento da bomba.

- Perda de energia (P_p): é a diferença entre a potência motriz e a potência hidráulica.

3.3.3.1 Bombas hidráulicas

As bombas são máquinas hidráulicas classificadas como máquinas geratrizes. Isto quer dizer que elas recebem trabalho mecânico, geralmente fornecido por uma máquina motriz, e o transforma em energia hidráulica, abastecendo um determinado fluido com um acréscimo em energia sob as formas de energia de pressão e cinética. Portanto, a função de uma bomba em um sistema hidráulico é a de deslocar um líquido por escoamento (MACINTYRE, 1997).

Este tipo de máquinas pode ser classificado de acordo com distintos critérios. Quando classificadas de acordo com o posicionamento do eixo da bomba com a posição do rotor:

- Bombas de eixo vertical: quando o eixo que interliga a bomba ao motor se encontra na posição vertical;
- Bombas de eixo horizontal: quando o eixo que interliga a bomba ao motor se encontra na posição horizontal.

Segundo MACINTYRE (1997), o modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e/ou velocidade permitem classificar as bombas em:

- Bombas de deslocamento positivo ou volumógenas;
- Turbobombas chamadas também hidrodinâmicas ou rotodinâmicas ou simplesmente dinâmicas;
- Bombas especiais.

De acordo com GOMES (2013), nas estações elevatórias de água para sistemas de irrigação, as turbobombas rotativas, particularmente as centrífugas predominam de forma absoluta. Além de cobrirem grandes faixas de vazão e pressão, possuem ótimos rendimentos e baixos custos de instalação, operação e manutenção.

Para que o líquido receba a potência requerida para ser elevado devidamente, a bomba deve receber uma potência superior à potência hidráulica, pois normalmente há perdas no seu interior resultantes da:

- Rugosidade da superfície interna das paredes da bomba;
- Recirculação do líquido no interior da bomba;
- Vazamentos através das juntas;
- Energia dissipada no atrito entre partes da bomba;
- Energia dissipada entre o fluido e a bomba.

De acordo com MACINTYRE (1997) bombas centrífugas pequenas podem ter rendimentos máximos inferiores a 40% enquanto que grandes bombas podem ter rendimentos máximos superiores a 85%.

3.3.3.2 Motores elétricos

Os motores são máquinas que convertem algum tipo de energia em trabalho de eixo ou trabalho mecânico. Este tipo de energia pode ser da forma de energia térmica para motores de combustão interna, hidráulica para turbinas hidráulicas, elétrica para o acionamento de motores elétricos. Estes últimos são os mais utilizados devido a sua simplicidade, confiabilidade e relativos baixo custo de aquisição, manutenção e operação (TONIAL, 2014 apud MATOS, 1982). De acordo com IRGA (2006) estima-se que 79% das estações de bombeamento no Rio Grande do Sul sejam acionadas por motores elétricos, 6,7% por motores a combustão e 14,3% dos sistemas utilizam o desnível natural do terreno.

Os motores assíncronos são o tipo mais difundido devido às suas características operacionais que permitem o acionamento da grande maioria de máquinas e equipamentos, além de sua robustez, menor custo e longa vida útil. A classe mais utilizada dos motores assíncronos são os motores de indução trifásicos e monofásicos que juntos representam 95% do total de motores elétricos instalados no setor industrial, rural, comercial e residencial (TONIAL, 2014).

Embora os motores elétricos sejam máquinas bastante eficientes, cujos rendimentos estão normalmente acima dos 90%, parte da potência elétrica por ele recebida é perdida (GOMES, 2013). Os motores são caracterizados pela sua potência, o qual é um parâmetro preestabelecido pelo fabricante e estabelece o limite de operação de um determinado motor. A Tabela 10 exhibe distintas potências nominais e seus respectivos preços para motores elétricos de 2 e 4 polos.

Tabela 10: Preços de motores de 2 e 4 polos.

Potência nominal (cv)	Preço do motor de 2 polos [R\$]	Preço do motor de 4 polos [R\$]
1,0	183,36	197,85
1,5	207,15	223,87
2,0	230,84	273,75
3,0	274,34	332,35
4,0	369,44	433,44
5,0	433,24	464,78
6,0	520,55	555,32
7,5	584,20	601,92
10	720,64	760,81
12,5	869,75	899,38
15,0	952,22	1.010,99
20,0	1.131,57	1.206,98
25,0	1.586,35	1.627,49
30,0	1.692,81	2.047,60
40,0	2.546,66	2.607,64
50,0	2.754,26	2.867,93
60,0	4.762,56	4.665,24
75,0	5.136,80	5.304,51
100,0	6.728,35	6.284,28
125,0	9.514,82	8.968,73
150,0	10.761,69	10.627,42
175,0	13.407,21	12.920,23
200,0	13.692,90	12.784,25
250,0	21.005,02	16.057,62

Fonte: adaptado de OLIVEIRA FILHO, 2010.

3.3.3.3 Dimensionamento do conjunto motobomba

Para o dimensionamento de bombas, é importante conhecer o ponto de operação do sistema. Segundo TONIAL (2014) apud HELLER e PÁDUA (2006), o ponto de operação de uma bomba é dependente das condições do sistema em que está instalada, ou seja, da posição e pressão que a bomba é submetida, bem como das velocidades e perdas de carga na tubulação.

O ponto de operação resulta na intersecção entre a função que representa a perda de carga do sistema por vazão (curva do sistema) e a função que representa a carga e vazão fornecidas pelo conjunto motobomba (curva da bomba), conforme a Figura 7.

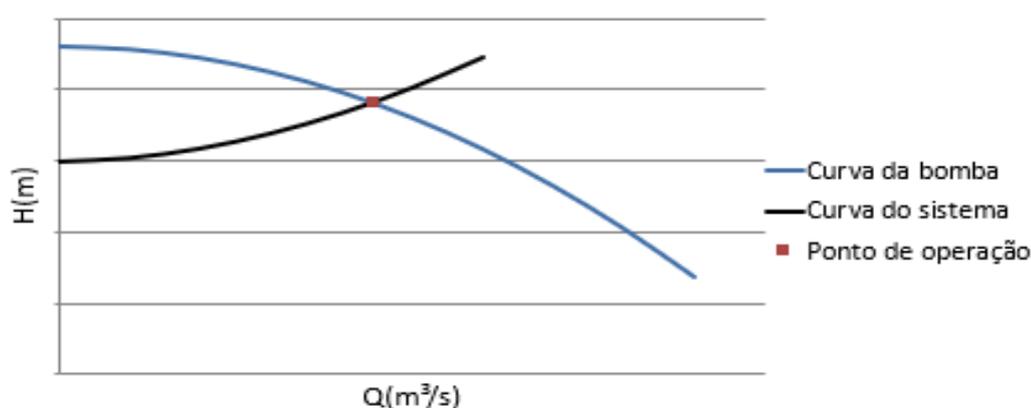


Figura 7: Curva da bomba, curva do sistema e ponto de operação.

Fonte: própria do autor.

Segundo FOX & MCDONALD (1998), as funções que relacionam altura manométrica com vazão são chamadas de curvas de estrangulamento ou curvas de estrangulação. Estas curvas expressam uma faixa de operação e são muito importantes para o dimensionamento da bomba.

A curva da bomba normalmente é fornecida pelo fabricante da bomba e nela estão incluídos outros parâmetros fundamentais para o dimensionamento de bombas. O equacionamento da curva de bombas pode ser realizado a partir da interpolação polinomial de segundo grau dos dados fornecidos pelo fabricante. A Figura 8 exibe um exemplo de curva característica de bomba.

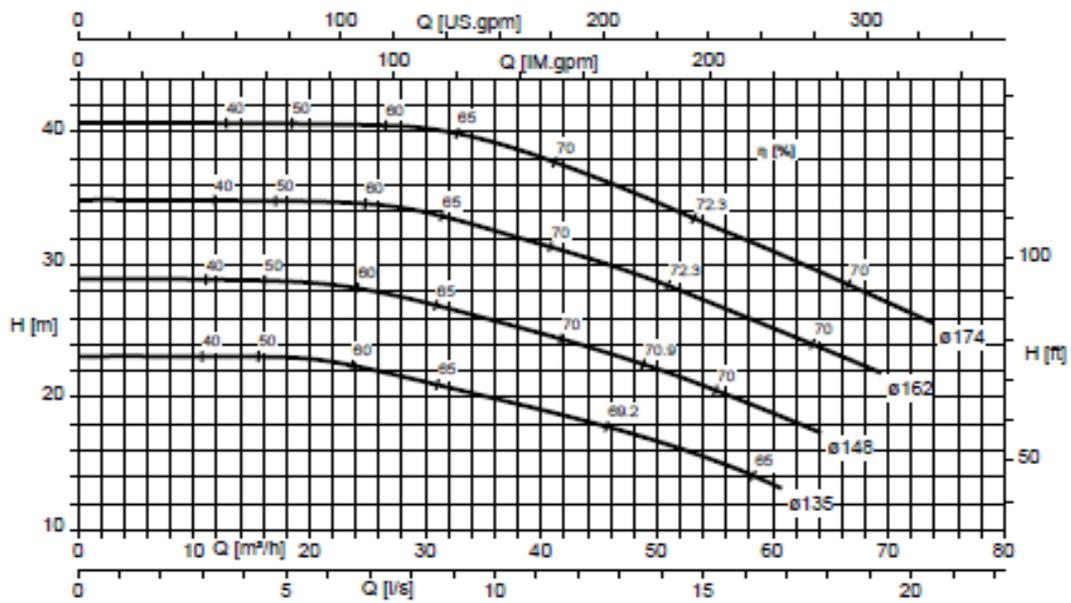


Figura 8: Exemplo de curva de bomba.

Fonte: KSB, 2014.

A curva do sistema pode ser obtida a partir do equacionamento descrito nos tópicos anteriores do trabalho, contabilizando a altura geométrica e as perdas de carga, desde o início da sucção ao final do recalque, calculadas para distintas vazões.

3.4 Eficiência energética de sistemas de irrigação por bombeamento

A energia e a água são dois dos recursos mais importantes utilizados em vários setores de produção. Se espera que haja um aumento no consumo de energia elétrica no mundo em cerca de 30%, entre 2016 e 2030. Os motores elétricos são os responsáveis pelo consumo de 46% de toda a energia total consumida, sendo que os sistemas de bombeamento são responsáveis por 20% do consumo (KURITZA, 2017).

De acordo com KÖPP (2016), as características particulares de estações de bombeamentos em plantações de arroz, associadas à quantidade de água e energia usada neste processo justificam o estudo de parâmetros que caracterizem o desempenho de um sistema de irrigação. Índices de desempenho são utilizados então para identificar o dimensionamento ótimo das estruturas presentes no sistema de irrigação. Estes índices são obtidos através da

associação de grandezas físicas, hidráulicas e elétricas que determinam o desempenho dos sistemas utilizados para a irrigação.

A escolha da bomba normalmente é realizada através de variáveis como a vazão (Q) e carga (H) do sistema, aplicados a gráficos fornecidos pelo fabricante da máquina, porém, o campo de aplicação dos diferentes tipos de bombas é amplo, o que pode causar dificuldades durante o dimensionamento de sistemas que dependam deste tipo de dispositivo. Durante o dimensionamento de estações de bombeamento, devem ser selecionadas bombas com alto rendimento para reduzir o consumo de energia, e para isto, o ponto de funcionamento do sistema deve coincidir com o ponto de máximo rendimento (PMY). Em alguns casos, o melhor rendimento possível pode ter baixos valores, o que não significa que a bomba é de má qualidade. Portanto, podem existir vários tipos de bombas que atendam às condições demandadas por um sistema dependendo da combinação da vazão e carga, porém a escolha mais eficiente é aquela que use a menor quantidade de energia (KURITZA, 2017).

KURITZA (2017) desenvolveu uma metodologia de escolha de bombas, baseada em análise dimensional das características de bombas centrífugas, através da informação de máquinas obtidas em catálogos de quatro diferentes fabricantes. A Figura 9 exibe os tipos de bombas analisadas no trabalho.

Fabricant	Quantity	Rotor
A – line1	107	Closed
A – line2	139	Closed
A – line3	131	Closed
B – line1	56	Closed
C – line1	24	Open
C – line2	27	Semi-open
D – line1	54	Closed
TOTAL	538	

Figura 9: Tipos de bombas centrífugas analisadas.

Fonte: KURITZA, 2017.

A Figura 10 exibe as características das bombas avaliadas no trabalho, de acordo com o fabricante e a linha.

Manufacturer	Q _{min} (m ³ /h)	Q _{máx} (m ³ /h)	H _{min} (m)	H _{máx} (m)
A – line1	5.9	1090	3.4	115
A – line2	2.75	1660	3.1	130
A – line3	2.74	1120	3.1	210
B – line1	10.3	1035	5.5	210
C – line1	87.0	2450	12.1	92
C – line2	13.5	195	8.51	162
D – line1	9.7	73	11.0	80

Figura 10: Características das bombas analisadas na pesquisa.

Fonte: KURITZA, 2017.

A Figura 11 exibe a curva de estrangulação adimensional gerada com os dados de carga e vazão para o ponto ótimo de operação identificado em cada uma das bombas avaliadas no trabalho.

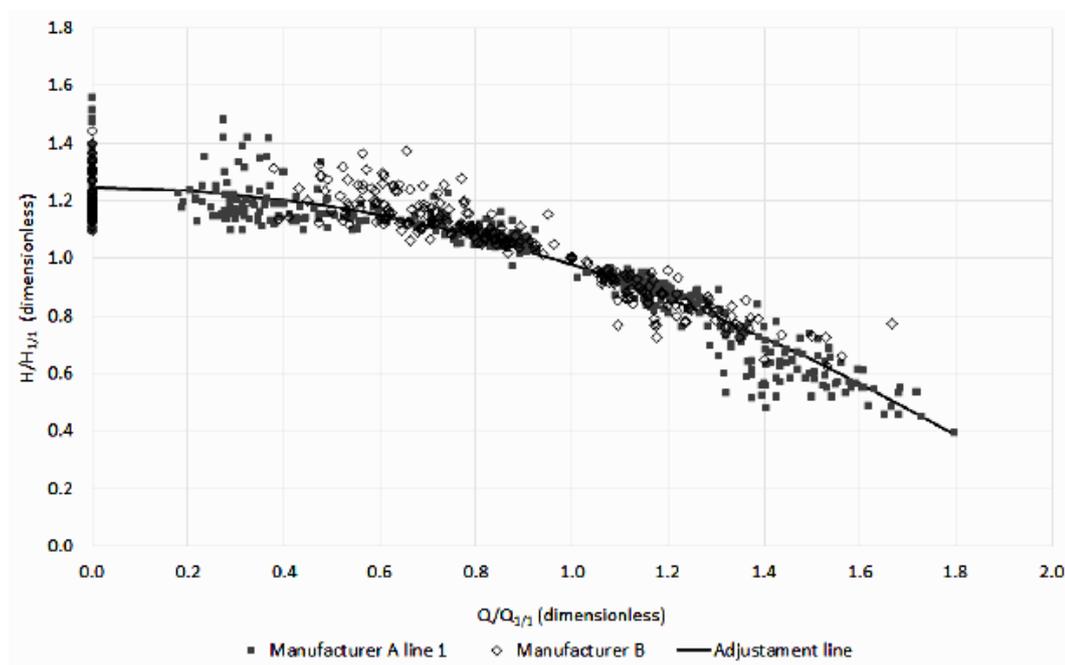


Figura 11: Curva de estrangulação adimensional.

Fonte: KURITZA, 2017.

Através de uma regressão polinomial, foi obtida a função que caracteriza a curva interpolada na imagem acima, a qual conta com um coeficiente de determinação de 0,9402 (Equação 22).

$$\frac{H}{H_{1/1}} = 1,245 - 0,265 \cdot \left(\frac{Q}{Q_{1/1}}\right)^2 \quad \text{Equação 22}$$

Onde H é a carga [m], $H_{1/1}$ é a carga nominal [m], Q é a vazão de bombeamento [m^3/s] e $Q_{1/1}$ é a vazão nominal [m^3/s].

De acordo com a metodologia, a velocidade específica de rotação de uma bomba centrífuga pode ser estimada através da Equação 23.

$$Ns = N \cdot \frac{\sqrt{Q_{1/1}}}{H_{1/1}^{3/4}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde Ns é a velocidade específica de rotação da bomba, N é rotação nominal, $Q_{1/1}$ é a vazão nominal [m^3/s] e $H_{1/1}$ é a carga nominal [m].

A Figura 12 apresenta os dados de rendimento máximo de cada bomba ajustados através de uma função da rotação específica de todas as bombas analisadas. Através da figura é possível visualizar a tendência do aumento no rendimento máximo com o aumento da rotação específica.

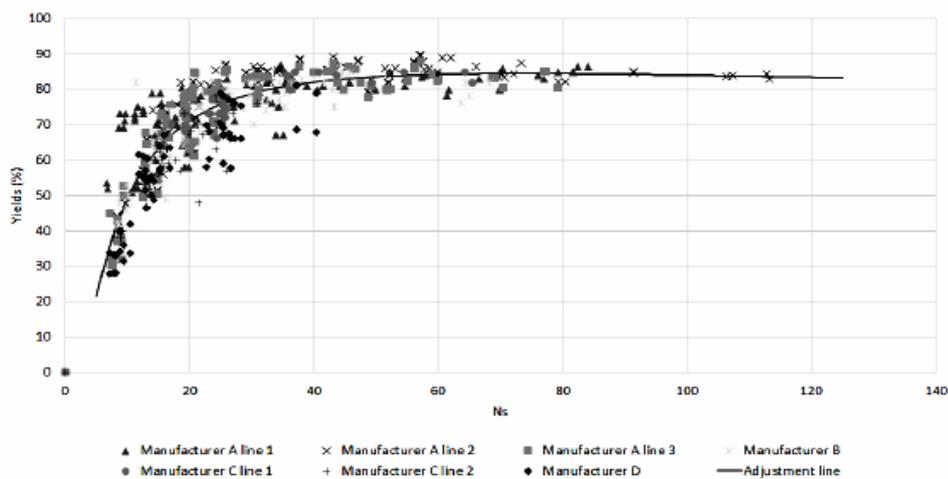


Figura 12: Rendimentos das bombas centrífugas analisadas no estudo.

Fonte: KURITZA, 2017.

A partir dos dados exibidos na Figura 12, o autor obteve uma equação de ajuste cujo coeficiente de determinação é igual a 0,8782, conforme a Equação 24.

$$\eta_{m\acute{a}x} = e^{5,092 - \frac{9,121}{N_s} - 0,124 \cdot \ln(N_s)} \quad \text{Equação 24}$$

Onde $\eta_{m\acute{a}x}$ é o rendimento máximo da bomba centrífuga [%] e N_s é a velocidade de rotação específica da bomba.

De acordo com a metodologia descrita, o máximo rendimento de um motor elétrico trifásico de dois polos pode ser estimado através da Equação 25.

$$\eta_{mot} = \frac{21,97 + 97,64 \cdot Pm^{0,4}}{0,53 + Pm^{0,4}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde η_{mot} é o rendimento máximo do motor [%] e Pm é a potência do motor [kW].

3.5 Custo do sistema

De acordo com GOMES (2013), o projeto de uma instalação de recalque compreende o dimensionamento de recalque e de sucção, com o conseqüente cálculo da potência do conjunto elevatório. Sob o ponto de vista técnico e econômico, o projeto está condicionado ao dimensionamento hidráulico da tubulação de recalque, já que esta é a componente mais importante por conta de sua magnitude. Os custos de implantação e de operação são antagônicos (quando um aumenta, o outro diminui). Por exemplo, ao se escolher um diâmetro menor para a adutora, haverá uma diminuição no seu custo de implantação, porém haverá um custo energético maior (Figura 13).

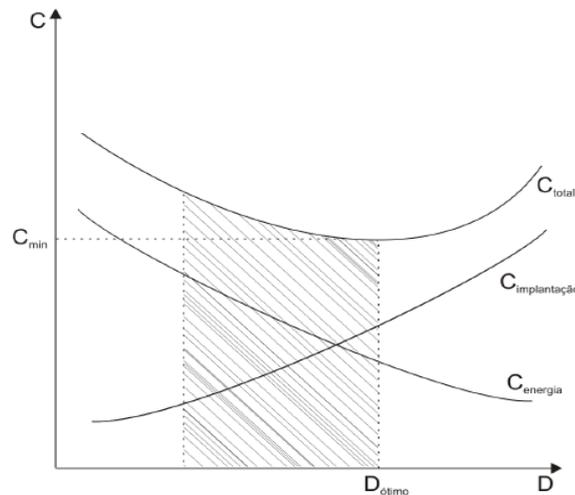


Figura 13: Custo da estação elevatória segundo diâmetro da adutora.

Fonte: GOMES, 2013.

3.5.1 Tarifação da energia elétrica no Brasil

Segundo a ANEEL, para o uso da energia elétrica, recurso essencial para diversos segmentos da sociedade, é necessária a aplicação de tarifas que remunerem o serviço de forma adequada, com a finalidade de manter o mesmo com qualidade, cobrir custos operacionais e remunerar investimentos necessários para expandir a capacidade e garantir o atendimento com qualidade. Assim, a agência desenvolve metodologias de cálculo tarifário para diferentes segmentos do setor elétrico (geração, transmissão, distribuição e comercialização), considerando fatores como a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição, bem como fatores econômicos de incentivos à modicidade tarifária e sinalização ao mercado. Os custos e investimentos são calculados pelo órgão regulador (ANEEL, 2008). Os distintos custos considerados na tarifa estão ilustrados na Figura 14.



Figura 14: Componentes da tarifa.

Fonte: Atlas de energia elétrica do Brasil 3ª edição (ANEEL, 2008).

3.5.2 Tensão de fornecimento

As Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica são estabelecidas pela Resolução ANEEL n° 456/2000. Neste documento, as unidades consumidoras são divididas em grupos, distinguindo-se uns dos outros pelo nível de tensão de fornecimento, apresentando cada um deles valores definidos de tarifa. Este nível de tensão está relacionado com a carga instalada na unidade consumidora. Para fins de faturamento, as unidades consumidoras são agrupadas em dois grupos tarifários, definidos em função da tensão de fornecimento e também como consequência em função da demanda (SANTOS, 2006). O grupo A (alta tensão) é composto por unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo. Este grupo é dividido nos subgrupos A1, A2, A3, A3a, A4, e A5 caracterizados na tabela do Quadro 2.

Quadro 2: Subgrupos do grupo tarifário.

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo

Fonte: adaptado de SANTOS, 2006.

O grupo B (baixa tensão) é composto por unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou inferior a 2,3 kV, ou, ainda atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo, nos termos definidos na Resolução ANEEL nº 456, caracterizado pela estruturação tarifária monômnia e subdividido nos subgrupos apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Subgrupos do grupo tarifário B.

Subgrupo	Classe
B1	<i>Residencial, Residencial de Baixa Renda</i>
B2	<i>Rural, Cooperativa de Eletrificação Rural, Serviço Público de Irrigação</i>
B3	<i>Demais Classes</i>
B4	<i>Iluminação Pública</i>

Fonte: adaptado de SANTOS, 2006.

3.5.3 Estrutura tarifária convencional

Segundo TONIAL (2014) compreender a estruturação do sistema tarifário é tão importante quanto saber como se comportam as variáveis hidráulicas de um determinado sistema de abastecimento de água, uma vez que a potência requerida para o bombeamento irá influenciar diretamente no custo final de toda operação do sistema. Este fato não deixa de ser diferente em sistemas de irrigação por bombeamento, devido a que as componentes de ambos sistemas são semelhantes. A estrutura tarifária é um conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou à demanda de potência ativa, de acordo com a modalidade de fornecimento de energia elétrica (SANTOS, 2006).

A estrutura tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano (Santos, 2006).

Segundo TONIAL (2014), esta modalidade pode ser enquadrada como monômnia ou binômnia. A tarifa monômnia convencional é aplicada aos consumidores alimentados em baixa tensão e seu cálculo é feito com apenas uma parcela, conforme a Equação 26.

$$Faturamento = Consumo Mensal \cdot Tarifa Convencional$$

Equação 26

Já a tarifa convencional do tipo binômia é aplicada para os consumidores do grupo A, apresentando dois preços, um para a demanda e outro para o consumo, conforme exibido na Equação 27.

$$Faturamento = Demanda \text{ máxima Mensal} \cdot Tarifa \text{ de demanda} + Consumo \text{ Mensal} \cdot Tarifa \text{ de consumo}$$

Equação 27

3.5.4 Custo final

A fatura de energia elétrica é a nota fiscal que apresenta a quantia total que deve ser paga por prestação do serviço público de energia elétrica, referente a um período especificado. O valor em moeda corrente, resultante da aplicação das respectivas tarifas de fornecimento, sem incidência de imposto, sobre os componentes de consumo de energia elétrica ativa, de demanda de potência ativa, de uso do sistema, de consumo de energia elétrica e demanda de potência reativa excedente. Para as unidades consumidoras do Grupo B, tem-se um valor mínimo faturável referente ao custo de disponibilidade do sistema elétrico, de acordo com os limites fixados por tipo de ligação (Santos, 2006). Além da tarifa, incidem na conta de luz o PIS/COFINS, o ICMS e a Contribuição para Iluminação Pública, respectivamente. Para fins de cálculo tarifário, os custos da distribuidora são classificados em dois tipos:

- Parcela A: Compra de Energia, transmissão e Encargos Setoriais;
- Parcela B: Distribuição de Energia.

Segundo GOMES (2013) o custo da energia de bombeamento, para um determinado intervalo de tempo, pode ser determinado através da Equação 28.

$$C_{energia} = P \cdot N_b \cdot p$$

Equação 28

Onde $C_{energia}$ é o custo da energia de bombeamento [R\$], P é a potência requerida pela estação de bombeamento [kW], N_b é o número de horas em funcionamento [h] e p é o custo unitário da tarifa de energia elétrica [R\$/kWh].

O número de horas de bombeamento dependerá dos critérios de operação do sistema de irrigação. Deve-se limitar, quando possível, o número máximo de horas de operação, de forma a evitar bombear durante o horário de ponta do setor elétrico, pois neste período o custo unitário da tarifa da energia elétrica é maior.

Para determinar o custo de implantação do conjunto motobomba pode ser utilizada a Equação 29 (KURITZA, 2017 apud Maquimotor, 2016)

$$C_{bomba} = 3.1688 \cdot P_{inst}^2 + 388.55 \cdot P_{inst} + 9022.1 \quad \text{Equação 29}$$

Onde C_{bomba} é o custo de implantação do conjunto motobomba [R\$] e P_{inst} é a potência instalada [kW]

De acordo com GOMES (2013) para obter o custo total do sistema, na fase de projeto ou de exploração, devem ser somados o custo do investimento no sistema com os custos de energia elétrica. Como estes gastos incidem em tempos diferentes, é necessário converter gastos variáveis em gastos fixos, e isto pode ser realizado através de equações de aritmética financeira. Para converter financeiramente um custo fixo, ou de investimento das instalações em amortizações anuais uniformes do capital, é utilizada a Equação 30.

$$C_F = C_P \cdot \frac{((1+e)^n - (1+i)^n)}{(1+e) - (1+i)} \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \quad \text{Equação 30}$$

Onde C_F é o valor futuro [R\$], C_P é o valor presente [R\$], i é a taxa de juros anual, n é o número de anos correspondente à vida útil das instalações ou ao alcance do projeto.

Finalmente, o custo total do sistema, é dado pela Equação 31.

$$C_{total} = C_{energia} + \sum_{i=1}^n (C_i(D) \cdot L_i) + C_{aspersor} \cdot N + C_{componentes} \quad \text{Equação 31}$$

Onde C_{total} é o custo total do sistema [R\$], $C_i(D)$ é o custo unitário da tubulação [R\$/m], L é o comprimento da tubulação [m], $C_{aspersor}$ é o custo de cada aspersor [R\$], N é o número de aspersores e $C_{componentes}$ é o custo de outras componentes do sistema [R\$].

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consistiu em desenvolver um código em ambiente Python 3.7, o qual resolve uma série de equações com a finalidade de dimensionar sistemas de irrigação por aspersão, utilizando como base os critérios de dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão exibidos por GOMES (1994) e os critérios de dimensionamento de bombas centrífugas recomendados por KURITZA (2017).

Em linhas gerais, o objetivo desta ferramenta é resolver, a partir do conjunto de dados fornecidos pelo usuário, o equacionamento programado com a finalidade de facilitar a identificação da alternativa de sistema de irrigação com o menor custo, considerando os preços de operação e de implantação do mesmo e respeitando as condições de contorno definidas pelo usuário. Parte dos dados de entrada do usuário são colocados através de tabelas representadas computacionalmente por arquivos “*comma-separated values*” representados pela extensão “.csv”, e outra parte dos dados utilizados ao longo do script é solicitada através de uma interface gráfica. Os dados de saída, após a execução da ferramenta, podem ser consultados pelo usuário através de planilhas eletrônicas (arquivos no formato “.csv”).

O código foi desenvolvido através do uso do software livre de “Ambiente de desenvolvimento integrado” (IDE) *JetBrains PyCharm Community Edition 2019.1.1*, o qual auxilia o usuário no desenvolvimento do código através de diversas funcionalidades, por exemplo, destacando os erros de sintaxe cometidos ao longo do *script*. Também foram utilizadas uma série de bibliotecas, que são uma coleção de *scripts*, as quais facilitam a programação de determinados trechos do código quando este deve executar operações específicas. O Quadro 4 lista e descreve as bibliotecas utilizadas para gerar a ferramenta.

Quadro 4: Lista de bibliotecas implementadas no código.

Biblioteca	Descrição
csv	Utilizada para gerar a iteração do código com arquivos de extensão “.csv”.
math	Este módulo contém uma série de funções e operações matemáticas úteis para o equacionamento.
datetime	Esta biblioteca foi utilizada para interpretar os dados de entrada que envolvem datas.
operator	Este módulo foi implementado para realizar operações de hierarquização das variáveis calculadas.
numpy	Utilizado para facilitar e agilizar as operações numéricas programadas.
tkinter	Este pacote contém uma série de scripts utilizados para gerar a interface.
pyinstaller	Ferramenta utilizada para gerar um arquivo executável que roda o código.

Fonte: Própria do Autor.

Através do equacionamento, e dos dados definidos pelo usuário, a ferramenta dimensionará “n” número de sistemas de irrigação por aspersão, listando para cada sistemas características associadas ao:

- Tipo de tubulações;
- Número e tipo de aspersores;
- Potência do conjunto motobomba;
- Arranjo das linhas laterais e principal;
- Regras de operação da estação de bombeamento.

4.1 Dados de entrada

Como foi exibido em tópicos anteriores, são inúmeras as variáveis relevantes para o dimensionamento de estruturas de irrigação. Estas grandezas devem quantificar e qualificar as propriedades de cada componente presente no sistema a ser dimensionado e as características do ambiente de operação do sistema.

Os componentes que constituem os circuitos hidráulicos de sistemas de irrigação por aspersão podem possuir diferentes características, como as dimensões de suas partes e seu material. As medidas destes componentes, geralmente, são padronizadas para facilitar a produção das peças, o que limita a escolha do parâmetro ótimo. Dentro dos componentes de sistemas de irrigação, a ferramenta desenvolvida solicita como dados de entrada características que podem ser obtidas através de catálogos de diversos fabricantes as quais descrevem componentes como:

- Aspersores: os dados destas peças são obtidos em catálogos dos seus respectivos fabricantes. Dentro destes catálogos se encontram o código do produto, diâmetro dos bocais, pressão de serviço e preço unitário. Os dados relacionados com este componente devem ser inseridos através de arquivos com extensão “.csv”.
- Tubulações: devem ser consideradas as dimensões e o material dos condutos para o dimensionamento de sistemas de irrigação. Estas podem ser encontradas dispostas em tabelas comerciais e catálogos de fabricantes. As características que serão consideradas durante o equacionamento serão: o diâmetro interno, o coeficiente de atrito em função do material e o preço por unidade de

comprimento. Os dados de entrada deste componente também devem ser inseridos através de arquivos “.csv”.

Cabe salientar que todos arquivos supracitados podem ser modificados pelo usuário com o intuito de possibilitar a adição de componentes.

As variáveis referentes às condições do ambiente de irrigação envolvem as características de consumo de água das culturas, da área a ser irrigada, do desnível geométrico e da tarifação da energia. Dentro destas variáveis, o *script* solicita como dados de entrada grandezas associadas ao:

- Consumo de água: depende da demanda da cultura a ser irrigada e das características do solo e do relevo. Esta variável deve ser estabelecida pelo usuário através de uma planilha com extensão “.csv” contendo dados referentes ao período de consumo e quantidade de água (dose bruta).
- Variáveis associadas à adutora: o código solicita as dimensões de comprimento da tubulação adutora e desnível da estação de bombeamento com respeito à área de irrigação. Estas variáveis são solicitadas através da interface gráfica.
- Área irrigada: dados estabelecidos pelo usuário, devendo obrigatoriamente ser retangular. A área é decomposta em duas dimensões chamadas, ao longo do *script* e na interface, de Largura e Comprimento.
- Variáveis associadas ao sistema de aspersão: dentro destas grandezas, destacam-se o desnível médio da linha lateral e a altura dos aspersores com relação às tubulações.
- Tarifa da energia elétrica: variável estabelecida pelo usuário a qual varia de acordo com os padrões de cada concessionária de energia.
- Taxa de aumento de energia mensal: variável que caracteriza o aumento do custo da energia elétrica ao longo do tempo.
- Número de safras: referente ao número de safras que será considerado na simulação.
- Tempo entre safras: pode ser entendida como o período no qual o sistema simulado não operará.

- Tamanho máximo de gotas: solicitada para verificar a possibilidade de uso de um determinado tipo de aspersor em função do tamanho da gota originada pelo mesmo, considerando as exigências da cultura definida pelo usuário.
- Tipo de solo: variável estabelecida que no script é traduzida como a capacidade de infiltração do solo. Esta variável é também utilizada para verificar a possibilidade de uso de um determinado tipo de aspersor em função da vazão fornecida pelo mesmo, considerando a capacidade de absorção do solo.
- Tipo de sistema: pode ser móvel ou fixo. Esta característica é utilizada para realizar o cálculo mais preciso de perda de carga do sistema de aspersão em função de suas peças.

Para poder utilizar a ferramenta, os três arquivos “.csv” devem ser inseridos na pasta “input”, a qual deve estar presente na mesma localização do arquivo executável. Estes arquivos devem ser nomeados como: “in_Apersores”, “in_Dose” e “in_Tubulacoes”.

4.2 Funcionamento da ferramenta

Em linhas gerais, o funcionamento do script pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa é referente à leitura dos dados de entrada, os quais são condições estabelecidas pelo usuário (Figura 15).

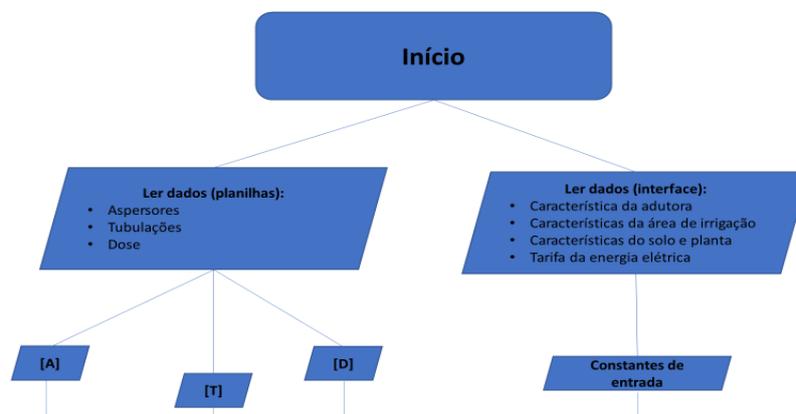


Figura 15: Representação do fluxograma de leitura de dados.

Fonte: própria do Autor.

O conjunto de dados [A], [T] e [D], exibidos na figura supracitada representam as matrizes que contém dados de aspersores, das tubulações e os dados de dose que serão considerados na simulação. Posteriormente, através do equacionamento programado, o *script* realiza sequencialmente: o cálculo das características hidráulicas dos aspersores considerados, o dimensionamento dos sistemas de aspersão para cada tipo de aspersor e finalmente o cálculo do custo e regras de operação de cada sistema de aspersão dimensionado (Figura 16).



Figura 16: Representação do fluxograma do processamento dos dados.

Fonte: própria do Autor.

Na última etapa o *script* realiza a filtragem de dados irrelevantes para o objetivo do usuário e posteriormente organiza os dados remanescentes de maneira adequada, com o intuito de possibilitar a visualização dos sistemas hierarquizados de acordo com o custo total estimado para o cenário delimitado. Finalmente, o *script* realiza a exportação dos resultados calculados para o computador em arquivos com extensão “.csv” (Figura 17).

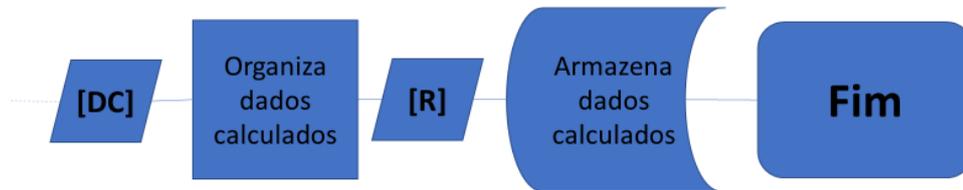


Figura 17: Representação do fluxograma da organização e exportação de dados.

Fonte: própria do Autor.

Os próximos subtópicos descrevem com detalhes cada uma destas etapas.

4.2.1 Leitura de dados

Após a inserção dos dados de entrada (dosagem, catálogo de aspersores, tubulações e demais variáveis) o código, através do uso dos *scripts* presentes na biblioteca *csv*, realiza a leitura dos arquivos onde se encontram estas variáveis. As variáveis carregadas são armazenadas em matrizes virtuais, as quais quantificam as diferentes grandezas necessárias para o dimensionamento dos sistemas de irrigação por aspersão.

- Matriz A: possui informações das variáveis extraídas do catálogo de aspersores disponíveis para o projeto, bem como as características referentes ao diâmetro dos bocais, pressão de serviço, vazão do aspersor e preço unitário do aspersor.
- Matriz T: possui as informações das características de tubulações disponíveis para o projeto, tais como o diâmetro da tubulação, os coeficientes de atrito da tubulação e o preço do material por metro.
- Matriz D: possui as informações da dosagem exigida pelo usuário, caracterizada pelo período de irrigação e dose bruta demandada em cada período (em milímetros por dia).

Assim como as variáveis matriciais previamente descritas, as variáveis colocadas na interface como dados de entrada também são armazenadas em estruturas virtuais para serem utilizadas ao longo do equacionamento do *script*.

4.2.2 Processamento de dados

Como pode ser visualizado na Figura 16, a etapa de processamento de dados pode ser dividida em três fases:

- Cálculo das características hidráulicas de aspersores: este procedimento está baseado na metodologia destacada no item 3.3.1.
- Dimensionamento de sistemas de aspersão: esta etapa da ferramenta está baseada nos itens 3.3.2, 3.3.3 e 3.4.
- Cálculo do custo e regras de operação: baseado no item 3.5.

4.2.2.1 Cálculo das características hidráulicas de aspersores

Após carregar e traduzir os dados de entrada para estruturas que facilitam o equacionamento das variáveis, o *script* começa a realizar a solução do equacionamento das características hidráulicas dos aspersores.

Para isto, primeiramente é gerada uma matriz identificada como “AC” através da ferramenta *numpy*. Cabe salientar que a rotina garante que o equacionamento que será descrito a seguir seja solucionado para cada um dos aspersores incluídos pelo usuário.

A primeira coluna da matriz “AC” possui a identificação do código do aspersor, posteriormente são recalculadas as dimensões dos diâmetros e área dos bocais em metros e metros quadrados respectivamente. Através da Equação 1 são calculadas as vazões de ambos bocais, e, posteriormente, estas são somadas para obter a vazão total de um determinado aspersor. Na coluna número 10 é calculado o raio de alcance do aspersor, através da Equação 2.

Posteriormente foi implementado um conjunto de condicionais o qual executa o cálculo do espaçamento dos aspersores e linhas laterais de acordo com a distribuição. Cabe salientar que para a presente versão do programa será apenas considerada a distribuição retangular. Para isto foram utilizadas as equações dispostas na Tabela 2. Posteriormente, os espaçamentos entre

aspersores e linhas laterais (S1 e S2 respectivamente) são arredondados para o múltiplo de 6 mais próximo ao resultado calculado previamente.

A intensidade média de precipitação para o aspersor processado pela ferramenta é calculada através da Equação 3, e o resultado é comparado de acordo com a variável de Intensidade de precipitação máxima estabelecida de acordo com os dados de entrada do usuário. Os aspersores que tiverem um índice de precipitação superior ao definido pelo usuário, será filtrado e desconsiderado posteriormente no equacionamento.

O índice de pulverização é então calculado através da Equação 5 e o resultado é comparado com o limiar definido pelo usuário em termos de tamanho de gota. Os aspersores que irrigarem com índice superior a este limite também serão desconsiderados nas próximas etapas do script.

4.2.2.2 Dimensionamento de sistemas de aspersão

Após o equacionamento das características dos aspersores, o *script* começa a dimensionar os sistemas de irrigação, representada por uma nova matriz denominada de “*SD*”. A nova matriz é preenchida com dados obtidos através da solução de equações que usam como variáveis dados oriundos da matriz “*AC*” e os dados ingressados na interface.

Já nesta etapa foi estabelecida uma condicional para ignorar os aspersores que não satisfazem os critérios de escolha de aspersor supracitados (intensidade de precipitação máxima e índice de pulverização). Isto, além de filtrar os resultados inúteis, acelera a execução do *script*, o que pode poupar tempo caso os catálogos inseridos pelo usuário contiverem uma grande variedade de aspersores, ou até mesmo se o período de irrigação for extenso e discretizado em muitos intervalos de tempo. Os dados de aspersores filtrados serão preenchidos na matriz *SD* por zeros. Nesta matriz, são redeclaradas algumas variáveis previamente estabelecidas na matriz *AC*, para facilitar o desenvolvimento do programa.

Para cada sistema de irrigação a ser dimensionado em função do aspersor, o número de aspersores por linha lateral é estimado para dois casos de espaçamento: caso o primeiro aspersor estiver a uma distância igual a S1 da linha principal ou caso estiver a uma distância igual à metade de S1 da linha principal. Posteriormente, escolhe-se o tipo de espaçamento que melhor se acomode às dimensões da área de irrigação determinadas pelo usuário. Para isto, através de uma condicional é avaliada a separação que, arredondando a estimativa do número de

aspersores uma unidade acima, seja a mais próxima. O arredondamento do inteiro uma unidade superior à estimada garante que haja a irrigação em 100% ou mais da área delimitada pelo usuário, havendo sobreposição de precipitação para a maioria dos aspersores. Cabe salientar que o programa considera dimensão irrigada as regiões onde há sobreposição de precipitação e onde há um índice de precipitação superior à 60% (o que corresponde a uma distância de aproximadamente $R/2$) conforme a Figura 18.

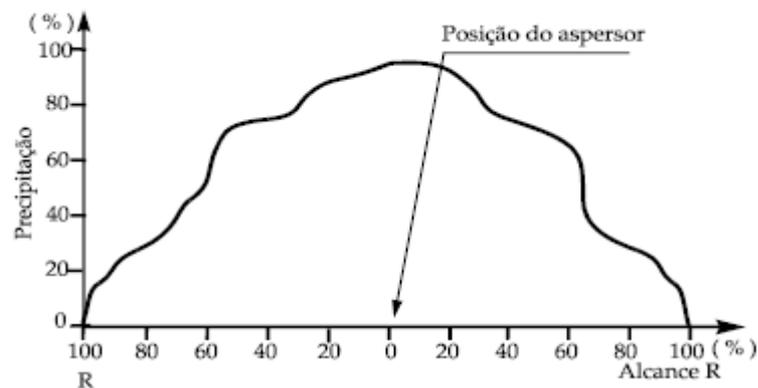


Figura 18: Perfil transversal da precipitação de um aspersor em funcionamento adequado.

Fonte: GOMES, 2013.

A partir deste passo, os cálculos programados utilizarão o espaçamento que satisfaz a condicional supracitada. A mesma metodologia é aplicada para o cálculo do número de linhas laterais.

De acordo com a metodologia adotada, através dos valores que representam as características de operação dos aspersores, e do número de aspersores é possível calcular a vazão da linha lateral e o diâmetro da tubulação da linha lateral necessário para que haja o escoamento a uma velocidade igual a 2 m/s (Equação 8). O diâmetro para a velocidade igual a 2 m/s é utilizado como limite para a escolha do diâmetro da tubulação a ser utilizada como linha lateral para um dado sistema irrigação por aspersão. Através de um novo comando é então determinado o diâmetro comercial levemente superior da tubulação, para que a velocidade do fluxo de água dentro desta seja inferior aos 2 m/s. O diâmetro e velocidade do fluxo de água determinarão coeficientes e as equações de perda de carga a serem utilizados em cada caso

(Equação 10 ou Equação 11). De acordo com a separação adotada para o sistema a ser dimensionado, é estimado o fator F através da Equação 15 ou da Equação 16, dependendo do espaçamento adotado em cada caso. Posteriormente, são estimados os coeficientes de perda de carga singular de acordo com o número de singularidades em função do número de linhas laterais e número de aspersores. O programa atribui um aumento de 25% destes valores no caso de sistemas com engate (sistemas fixos). Logo são calculadas a perda de carga linear (Equação 14) e singular (Equação 13) para a linha lateral, as quais são somadas e aplicadas na Equação 18 para obter a pressão no início da linha lateral. A expressão que descreve o coeficiente K da linha lateral é descrito na Equação 32, a qual considera o uso de um registro de globo aberto, um número de tês de saída lateral proporcional ao número de aspersores, uma redução e um cotovelo.

$$K_{LL} = 10 + 1,3 \cdot n_{asp} + 1 + 1,5 \quad \text{Equação 32}$$

Onde K_{LL} é igual ao coeficiente de perda de carga singular da linha lateral e n_{asp} é o número de aspersores por linha principal. A expressão que descreve o coeficiente K da linha principal é descrito na Equação 33, a qual considera o uso de um registro de globo aberto, um número de tês de passagem direta proporcional ao número de aspersores e uma redução.

$$K_{LP} = 10 + 1,3 \cdot n_{LL} + 1 \quad \text{Equação 33}$$

Onde K_{LP} é igual ao coeficiente de perda de carga singular da linha principal e n_{LL} é o número de linhas laterais.

Com a finalidade de garantir que o sistema tenha uma boa homogeneidade em termos de pressão hidrostática, é aplicada uma condicional para comprovar se o sistema satisfaz o critério dos 20% (Equação 19). Caso o sistema não satisfazer este critério, o mesmo será desconsiderado para as etapas posteriores. A mesma metodologia descrita é aplicada para a linha principal, obtendo os valores de vazão e pressão necessária no início da linha principal. Considerando que as características da tubulação da linha principal serão iguais às da linha adutora, é utilizada a mesma perda de carga unitária para a tubulação de adução. A perda de carga singular da adutora

é obtida através da Equação 13 onde o coeficiente K é igual a 7,25 considerando uma válvula de pé com crivo, duas curvas de 90°, uma válvula de retenção, um registro gaveta aberto e uma saída de canalização.

Através da carga e da vazão obtidas no equacionamento previamente descrito, aplicadas às equações recomendadas por KURITZA (2016) é obtida a velocidade de rotação específica (Equação 23) e o rendimento da bomba (Equação 24). O rendimento do motor é então aplicado à Equação 21 para obter a potência de operação da bomba. Posteriormente, através do catálogo de bombas implementado no código é selecionado motor cuja potência nominal é a superior à potência requerida pela bomba. Através da Equação 25 é então calculado o rendimento efetivo do motor e novamente é realizada a comparação de potências para checar se o motor pode ser utilizado para fornecer energia à bomba dimensionada.

4.2.2.3 Cálculo do custo e regras de operação

O último passo do processamento do equacionamento citado ao longo do tópico de revisão bibliográfica é referente ao cálculo do tempo de operação da bomba dimensionada em cada sistema de irrigação por período e posteriormente o cálculo do custo em implantação e operação do sistema.

Neste processo é gerada uma nova matriz (DC) a qual inclui dados gerais de cada um dos sistemas dimensionados, tais como o código do aspersor, o código das tubulações, o código da bomba, as dimensões irrigadas efetivamente pelo sistema de aspersão, o índice de precipitação, o número de linhas laterais, o número de aspersores por linha lateral, a vazão de operação do sistema, a carga requerida pelo sistema e as potências do motor e da bomba. Também, nesta matriz são incluídos os dados de período e dose bruta, e posteriormente são calculados o tempo do período em dias, a dose bruta por período. A estimativa do tempo de operação do sistema de bombeamento por período é realizada através da razão entre a dose bruta total no período e a taxa de precipitação do aspersor.

A energia gasta por período é calculada através do produto entre a potência instalada do motor e o tempo de uso do sistema. Finalmente, o custo em energia elétrica por período é calculado multiplicando a energia gasta por período pelo preço da energia elétrica. O custo de energia elétrica por período é então integrado para gerar o custo total em energia elétrica para os dados de entrada por sistema de irrigação dimensionado.

Considerando que o custo em energia elétrica obtido é uma aproximação do custo em energia elétrica gasta por safra, é então realizada a estimativa do valor presente dos custos de operação aplicando a Equação 30 ao número de safras solicitado pelo usuário, considerando o tempo de espera entre safras.

O custo de implantação do conjunto motobomba é estimado através da Equação 29, e posteriormente os custos de operação (Energia Elétrica) e implantação do sistema é obtido através da Equação 31.

Cabe salientar que o cálculo do custo em energia elétrica é relativo ao tempo de operação do sistema, desconsiderando eventos de precipitação, sendo este portanto um cálculo do custo máximo em energia elétrica.

4.2.3 Organização e exportação de dados

Como foi previamente destacado, o último módulo do *script* tem a função de organizar os dados presentes na matriz *DC*. Para isto são utilizadas ferramentas da livreria *operator*, as quais se encarregam de organizar os dados dos sistemas dimensionados em ordem de custo em energia elétrica. Finalmente, os dados das matrizes resultantes são exportados para arquivos com extensão “.csv”.

4.3 Dados de saída

Os dados de saída da ferramenta possuem todos as informações resultantes do equacionamento dos dados informados à ferramenta. Estes, ao serem exportados como arquivos “.csv”, podem ser visualizados em bloco de notas ou visualizadores de planilhas eletrônicas. Dentro dos arquivos de saída são destacados:

- Arquivo AC.csv: este arquivo contém as informações das características hidráulicas de cada um dos aspersores, calculadas e armazenadas na matriz *AC*.
- Arquivo SD.csv: assim como a matriz *SD*, este arquivo contém as informações das características de cada um dos sistemas de irrigação dimensionados pelo programa, e pode ser utilizado para revisar cálculos.

- Arquivos Sistema_i.csv: estes arquivos possuem os dados referentes à matriz *DC*. Cabe salientar que o *i* é o número do código do aspersor, organizado de acordo com o catalogo de entrada (arquivo in_Aspersores.csv).
- Arquivo Resultados.csv: possui a lista de sistemas de irrigação dimensionados pela execução do código, organizados de acordo com o custo em energia elétrica calculado para as condições de entrada.

CAPÍTULO 5: ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente tópico apresenta um exemplo de aplicação da ferramenta desenvolvida, em uma situação hipotética, na qual serão determinadas as variáveis de entrada do programa, com a finalidade de executar a ferramenta e, consecutivamente, avaliar os resultados gerados pela mesma.

A situação simulada terá como objetivo dimensionar um sistema fixo de irrigação para uma área de 165 metros de largura e 216 metros de comprimento na região de Cruz Alta. A cultura é o milho. A distância do corpo d'água até o local de irrigação é de aproximadamente 150 metros, e o desnível entre ambas localizações é de 10 metros. Neste caso, devido à sensibilidade da cultura, o sistema deve ser dimensionado para irrigar com gotas classificadas como médias ou finas, e os aspersores devem ser posicionados a um metro de altura das tubulações. De acordo com dados coletados em campo, o solo do local de projeto é classificado como franco siltoso de textura uniforme, e o terreno é plano. Para o projeto é informada também a dose por período que deve ser fornecida pelo sistema. O agricultor deseja saber, dentro de um determinado conjunto aspersores e tubulações, qual é o sistema mais econômico, considerando 5 safras e um tempo de descanso entre safras de 1 mês, considerando que o preço da energia elétrica é igual a 0.3 R\$/kWh, a taxa de juro anual prevista é de 10% e a taxa anual de aumento da energia elétrica é de 9%.

5.1 Condições de entrada

Para a aplicação da ferramenta nesta situação, primeiro foram determinados os dados que a ferramenta solicita nos arquivos: “in_Apersores.csv”, “in_Dose.csv”, “in_Tubulacoes.csv”.

Os dados referentes aos aspersores disponíveis para a simulação estão dispostos na Tabela 11, e exibem as características de 8 modelos diferentes de aspersores de um determinado fabricante. Como pode ser visualizado na tabela supracitada, esta conta com dados referentes ao diâmetro de bocais, pressão de serviço, um identificador do tipo e modelo do aspersor e o preço por unidade.

Tabela 11: Tabela de aspersores utilizados como exemplo.

ID	bocal menor (mm)	bocal maior (mm)	Pressão (mca)	Preço (R\$)	Modelo/Marca
1	3.2	4.4	20	33.51	Aspersor 1
2	4.4	5.6	25	34.00	Aspersor 2
3	3.6	5.8	30	37.63	Aspersor 3
4	4.8	7.3	35	40.88	Aspersor 4
5	5.2	8.4	35	45.43	Aspersor 5
6	7.3	9.2	25	49.98	Aspersor 6
7	7.3	9.2	30	55.67	Aspersor 7
8	9.2	12.4	35	63.18	Aspersor 8

Fonte: própria do autor.

As variáveis que detalham a quantidade de água solicitada pela área de cultivo foram disponibilizadas pelo agricultor da situação hipotética, e podem ser visualizadas na Tabela 12.

Tabela 12: Tabela de dose utilizada como exemplo.

Data		Dose bruta (mm/dia)
01/11/2019	10/11/2019	8.7
11/11/2019	20/11/2019	13.1
21/11/2019	30/11/2019	17.5
01/12/2019	10/12/2019	21.9
11/12/2019	20/12/2019	26.2
21/12/2019	30/12/2019	35.0
01/01/2020	10/01/2020	43.7
11/01/2020	20/01/2020	52.5
21/01/2020	30/01/2020	52.5
01/02/2020	10/02/2020	52.5
11/02/2020	20/02/2020	52.5
21/02/2020	28/02/2020	52.5
01/03/2020	10/03/2020	52.5
11/03/2020	20/03/2020	52.5
21/03/2020	30/03/2020	52.5
01/04/2020	10/04/2020	52.5
11/04/2020	20/04/2020	52.5
21/04/2020	30/04/2020	52.5

Fonte: própria do autor.

A lista de tubulações utilizadas para a simulação da presente situação é exibida na Tabela 13.

Tabela 13: Tabela de tubulações utilizada como exemplo.

<i>ID</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Preço (R\$/m)</i>	<i>Material</i>
1	63	16.31	PVC - U - 14 atm
2	75	20.86	PVC - U - 14 atm
3	90	27.22	PVC - U - 14 atm
4	110	28.57	PVC - O - 12.5 atm
5	140	39.67	PVC - O - 12.5 atm
6	160	49.34	PVC - O - 12.5 atm
7	200	71.23	PVC - O - 12.5 atm
8	250	96.46	PVC - O - 12.5 atm
9	300	483.69	Ferro Fundido
10	350	569.59	Ferro Fundido
11	400	644.5	Ferro Fundido
12	450	746.22	Ferro Fundido
13	500	847.94	Ferro Fundido
14	550	976.33	Ferro Fundido
15	600	1104.72	Ferro Fundido
16	650	1439.20	Ferro Fundido
17	700	1773.69	Ferro Fundido
18	750	1962.22	Ferro Fundido
19	800	2150.75	Ferro Fundido
20	850	2301.88	Ferro Fundido
21	900	2453.02	Ferro Fundido
22	950	2648.85	Ferro Fundido
23	1000	2844.68	Ferro Fundido

Fonte: KURITZA, 2017 e CYPE Ingenieros, S.A.

Finalmente, ao executar o código são determinados os dados relacionados às características do local de irrigação e às exigências da cultura. Os critérios de filtro dos aspersores serão estimados da seguinte maneira: O tamanho limite de gotas fornecidas pelos aspersores será “Médias” ($I_c < 0.5$), o tipo de solo determinado para o caso será “Franco arenoso com subsolo mais compacto” ($I < 19$ mm/h). O tipo de sistema de irrigação dimensionado será classificado como “Sistema Móvel”. Quanto às características da estação de bombeamento, esta contará com uma tubulação adutora igual a 150 m e terá um desnível médio, com relação à área irrigada, igual a 10 m. A área irrigada contará com um comprimento igual a 216 m e largura igual a 165 m. Os aspersores serão posicionados a 1 m de altura com relação às tubulações. O preço da energia elétrica será estabelecido como sendo igual a 0.3 R\$/kWh, a taxa de juro anual e a taxa anual de aumento de energia elétrica serão respectivamente iguais a 0.1 e 0.09 conforme o previsto na situação. A simulação realizada considerará 5 safras e um tempo entre safras igual a 1 mês (Figura 19).

DimAsp: Dimensionamento de sistemas de aspersão

Ajuda

Dados da área a irrigar

Defina o comprimento da área irrigada (m): 216

Defina o desnível da linha lateral (m): 0

Defina a largura da área irrigada (m): 165

Tipo de solo: Franco siltoso de textura uniforme até 1,8m

Dados da cultura

Defina o numero de safras: 5

Tamanho máximo de gotas: Médias

Defina o tempo entre de safras (meses): 1

Dados de instalação

Defina o comprimento da tubulação adutora (m): 150

Defina a altura dos aspersores (m): 1

Defina o desnível da estação de bombeamento (m): 10

Tipo de sistema: Sistema Fixo

Dados economicos

Defina o preço do kWh (R\$/kWh): 0.3

Defina a taxa anual de aumento da energia: 0.09

Defina a taxa de juro anual: 0.1

Calcula

Figura 19: Layout do programa.

Fonte: própria do autor.

5.2 Resultados

A Tabela 14 apresenta uma síntese geral dos resultados dos sistemas de irrigação dimensionados pela simulação, detalhando as componentes de cada sistema de irrigação e as condições de operação do mesmo.

Tabela 14: Resultados da ferramenta: componentes e condições de operação.

Modelo	D_{LL} (mm)	D_{LP} (mm)	D_{Adu} (mm)	$S1$ (m)	$S2$ (m)	N_{LL}	N_{asp}	Q (m^3/s)	H (m)	P_b (cv)	P_m (cv)
Aspersor 3	63	250	250	18	24	9	5	0.0775	48.91	60.32	75
Aspersor 4	63	250	250	24	30	8	4	0.0975	58.44	90.76	100
Aspersor 2	63	300	300	18	18	12	5	0.1027	43.15	70.08	100
Aspersor 5	75	300	300	24	30	8	4	0.1247	55.29	109.17	125
Aspersor 7	90	350	350	24	30	8	4	0.1631	48.86	126.06	150

Fonte: própria do autor.

A Tabela 15 apresenta os custos referentes à implantação e operação dos sistemas dimensionados na simulação, onde: D_{LL} é o diâmetro das tubulações das linhas laterais, D_{LP} é o diâmetro das tubulações da linha principal, $S1$ é o espaçamento dos aspersores, $S2$ é a distância entre linhas laterais, N_{LL} é o número de linhas laterais, N_{asp} é o número de aspersores por linha lateral, Q é a vazão do sistema de irrigação, H é a pressão de operação do sistema de irrigação, P_b é a potência da bomba e P_m .

Tabela 15: Resultados da ferramenta: custos.

Modelo	Custo Energia Elétrica (R\$)	Custo Aspersores (R\$)	Custo Tubulações (LL) (R\$)	Custo Tubulações (LP) (R\$)	Custo Tubulações (Adu) (R\$)	Custo CMB (R\$)	Custo Implantação (R\$)	Custo Energia Elétrica Total (R\$)	Valor presente total (R\$)
Aspersor 3	17,353.35	3,386.70	26,422.20	20,835.36	14,469.00	40,097.78	105,211.04	130,326.60	235,537.64
Aspersor 4	21,796.56	2,616.32	21,920.64	21,703.50	14,469.00	54,741.82	115,451.28	163,695.90	279,147.17
Aspersor 2	17,465.48	4,080.00	35,229.60	104,477.04	72,553.50	54,741.82	271,081.96	131,168.74	402,250.70
Aspersor 5	21,308.04	2,907.52	28,035.84	108,830.25	72,553.50	71,528.59	283,855.70	160,027.00	443,882.70
Aspersor 7	19,542.91	3,562.88	36,583.68	128,157.75	85,438.50	90,458.10	344,200.91	146,770.57	490,971.48

Fonte: própria do autor.

Na tabela previamente destacada é possível analisar que apesar do maior custo em energia elétrica do sistema dimensionado para o “Aspersor 4”, quando comparado com as outras alternativas, o sistema dimensionado com este componente é mais barato, considerando as variáveis econômicas determinadas, tempo do projeto e os custos em implantação.

Os detalhes do dimensionamento do sistema de irrigação previamente destacado, bem como, as regras de operação sugeridas podem ser consultadas na Tabela 16 e na Tabela 17.

Tabela 16: Sistema de aspersão dimensionado para o Aspersor 3: regras de operação.

Data		Dose bruta por período (mm)	Tempo de uso por período (h)	Energia gasta por período (kWh)	Custo em energia elétrica (R\$)
01/11/2019	10/11/2019	87.5	12.19	672.61	201.78
11/11/2019	20/11/2019	131.25	18.29	1008.92	302.67
21/11/2019	30/11/2019	175	24.39	1345.22	403.57
01/12/2019	10/12/2019	218.75	30.48	1681.53	504.46
11/12/2019	20/12/2019	262.5	36.58	2017.83	605.35
21/12/2019	30/12/2019	350	53.65	2959.49	887.85
01/01/2020	10/01/2020	437.5	60.97	3363.05	1008.92
11/01/2020	20/01/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
21/01/2020	30/01/2020	525	80.48	4439.23	1331.77
01/02/2020	10/02/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
11/02/2020	20/02/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
21/02/2020	28/02/2020	420	65.84	3632.1	1089.63
01/03/2020	10/03/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
11/03/2020	20/03/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
21/03/2020	30/03/2020	525	80.48	4439.23	1331.77
01/04/2020	10/04/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
11/04/2020	20/04/2020	525	73.16	4035.66	1210.70
21/04/2020	30/04/2020	525	73.16	4035.66	1210.70

Fonte: própria do autor.

Tabela 17: Sistema de aspersão dimensionado para o Aspersor 3.

Safra	Data	t (dias)	n	Custo (R\$)
1	30/04/2020	182	0.5	7884.28
2	28/11/2020	394	1.08	17023.02
3	28/06/2021	606	1.66	26113.41
4	26/01/2022	818	2.24	35155.71
5	26/08/2022	1030	2.82	44150.17

Fonte: própria do autor.

Com o intuito de realizar uma análise de sensibilidade da ferramenta, foi então realizada uma nova simulação, desta vez alterando o horizonte de projeto do agricultor e mantendo o restante das variáveis iguais à simulação anterior. Portanto, nesta simulação, foi adotado um tempo de descanso entre safras igual a 3 meses e foi realizada a simulação considerando 15 safras. A Tabela 18 exibe os resultados das variáveis relacionadas aos custos dos sistemas dimensionados para a segunda simulação.

Tabela 18: Resultados da segunda simulação: custos.

<i>Modelo</i>	<i>Custo Energia Elétrica (R\$)</i>	<i>Custo Aspersores (R\$)</i>	<i>Custo Tubulações (LL) (R\$)</i>	<i>Custo Tubulações (LP) (R\$)</i>	<i>Custo Tubulações (Adu) (R\$)</i>	<i>Custo CMB (R\$)</i>	<i>Custo Implantação (R\$)</i>	<i>Custo Energia Elétrica Total (R\$)</i>	<i>Valor presente total (R\$)</i>
<i>Aspersor 3</i>	17,353.35	3,386.70	26,422.20	20,835.36	14,469.00	40,097.78	105,211.04	1,313,052.26	1,418,263.30
<i>Aspersor 2</i>	17,465.48	4,080.00	35,229.60	104,477.04	72,553.50	54,741.82	271,081.96	1,321,536.94	1,592,618.89
<i>Aspersor 4</i>	21,796.56	2,616.32	21,920.64	21,703.50	14,469.00	54,741.82	115,451.28	1,649,251.00	1,764,702.28
<i>Aspersor 7</i>	19,542.91	3,562.88	36,583.68	128,157.75	85,438.50	90,458.10	344,200.91	1,478,726.78	1,822,927.69
<i>Aspersor 5</i>	21,308.04	2,907.52	28035.84	108,830.25	72,553.50	71,528.59	283,855.70	1,612,286.49	1,896,142.19

Fonte: própria do autor.

Na tabela previamente destacada é possível perceber que a ordem dos sistemas em termos de custo mudou, devido à mudança no tempo de operação do sistema de irrigação considerado na simulação. Para esta simulação, o sistema mais econômico para o caso é o referente ao “Aspersor 7”. A Figura 20 exibe o gráfico com o investimento ao longo do tempo em cada um dos sistemas dimensionados pela ferramenta plotado através dos resultados obtidos na simulação.

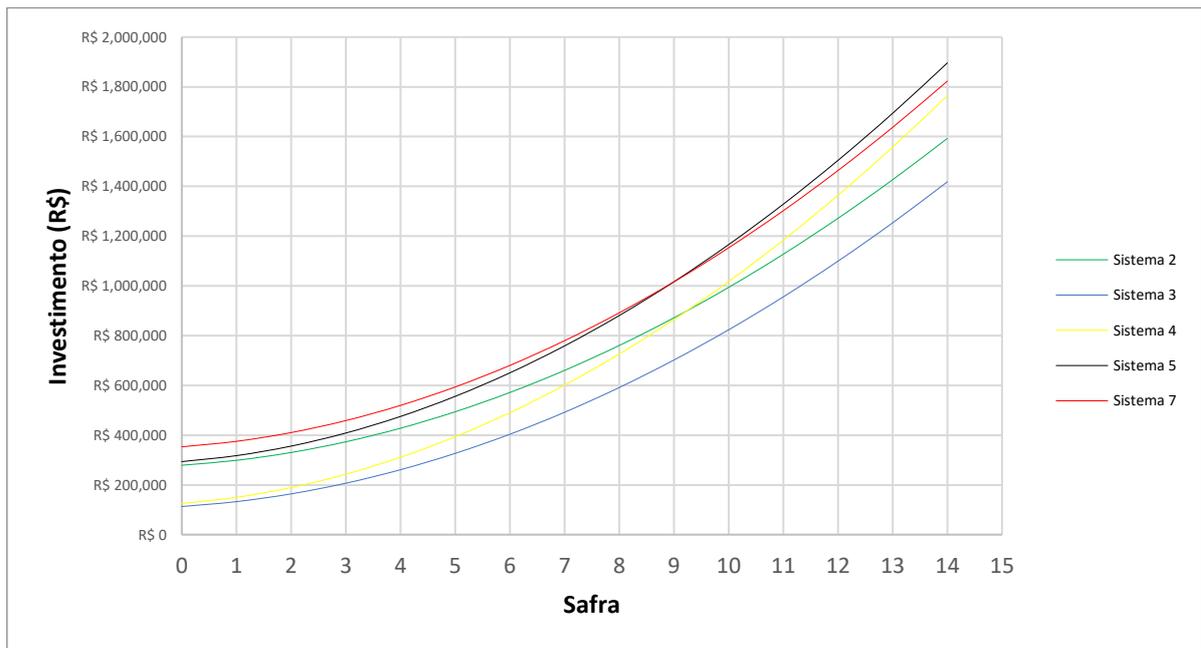


Figura 20: Gráfico de investimento em sistemas dimensionados.

Fonte: própria do autor.

O gráfico supracitado destaca que o investimento necessário para o dimensionamento de sistemas depende fortemente do tempo considerado para a simulação. No exemplo, pode-se observar que o sistema dimensionado com o aspersor 3 é o que possui menor custo de implantação e um menor custo total ao longo de todo o período. Quanto ao sistema dimensionado com o aspersor 4 ele possui menor custo inicial que o sistema com o aspersor 2, porém, a partir da 10ª safra, por conta do custo em energia elétrica esta ordem de custo inverte. O mesmo ocorre com os sistemas dimensionado com os aspersores 5 e 7.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Através do presente trabalho foi possível concluir que a linguagem de programação Python possibilitou, de maneira simples e eficiente, a integração de ferramentas utilizadas nas áreas de irrigação e hidráulica. A ferramenta desenvolvida pode ser utilizada para resolver o equacionamento de inúmeras variáveis com rapidez. Este fato destaca a eficiência da aplicação deste tipo de instrumento nas áreas de engenharia.

O aplicativo desenvolvido, apesar de suas simplificações, demonstrou eficiência e agilidade no dimensionamento do sistema de irrigação proposto no cenário hipotético, gerando resultados consistentes, organizados e de fácil acesso. Desta forma, é possível concluir que o uso desta ferramenta pode, dentro de suas limitações, contribuir para projetos de irrigação por aspersão, visando à eficiência energética e econômica da agricultura.

Considerando que o trabalho apresenta a etapa inicial do desenvolvimento de uma ferramenta voltada para o usuário com pouco conhecimento técnico, sugere-se, para uma próxima etapa do desenvolvimento da ferramenta, a simplificação de variáveis de entrada do programa, bem como o refinamento do equacionamento do *script* desenvolvido, ao longo da metodologia de dimensionamento dos sistemas:

- Cabe salientar que a metodologia não avalia, durante o dimensionamento das componentes de sistemas de irrigação, o cálculo de fenômenos prejudiciais ao sistema, como por exemplo, cavitação e golpe de aríete, portanto, sugere-se que para uma próxima etapa do desenvolvimento da ferramenta, seja acoplado um módulo que considere ditos fenômenos.
- Para o refinamento da estimativa de preços das componentes utilizadas durante o dimensionamento, sugere-se o desenvolvimento de um módulo integrado à ferramenta que contenha um banco de dados mais completo e com variáveis econômicas mais exatas.
- É sugerido o aprimoramento do equacionamento referente ao cálculo do custo da energia elétrica, considerando a dinâmica de impostos prevista para cada caso.
- Outra das recomendações é a de integrar a ferramenta a softwares CAD ou GIS, para poder espacializar dados de entrada e facilitar a estimativa de variáveis que

ainda não foram implantadas como, por exemplo, a evapotranspiração, a qual pode ser utilizada para estimar a dose bruta de maneira mais precisa.

CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS

ALEGRE, H et al. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**. Lisboa. IWA/Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2004.

AMANCO, **Linha Irrigação**. 2017. Disponível em: <http://amanco.com.br/>. Acessado em: 24/12/2019.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>. Acessado em: 24/12/2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatórios de consumo e receita de distribuição**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acessado em: 20/04/2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil. 2ª ed.** 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acessado em: 12/06/2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª ed.** 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acessado em: 12/06/2019.

AZEVEDO NETTO, J.M. et al. **Manual de hidráulica**. México: Harla, 1976 – 578 p. ISBN: 9968-6199-73-1.

BAPTISTA, M., LARA, M. **Fundamentos de engenharia Hidráulica**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 473p.

BORGHETTI, J.R.; SILVA, W.L.C.; NOCKO, H.R.; LOYOLA, L.N.; CHIANCA, G.K. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. FAO. 2017. ISBN: 978-92-5-709754-4

BURT, C.M. **Irrigation System Components and Potentials for Energy Conservation**. Irrigation Training & Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, USA. ITRC Report No. R 11-003. 35 pp. 2011. Disponível em: <http://www.itrc.org/>. Acessado em: 21/04/2019.

CYPE Ingenieros, S.A. **Gerador de preços para construção civil. Brasil.** Disponível em: <http://www.brasil.geradordeprecos.info/>. Acessado em: 22/11/2019.

DANTAS NETO, J., FARIAS, M.S.S. Indicadores de desempenho como instrumento de gestão em projetos de irrigação. In: AGUIAR NETO, A.O.; BASTOS, E.A. (Org.). **Princípios agrônômicos da irrigação.** Brasília: EMBRAPA, 2013. <http://www.procelinfo.com.br/>. Acessado em: 13/05/2019.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 4ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogans, 1998. 662 p.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento.** 3. ed. Campina Grande. UFPB. 1999. 421 p.

GOMES, H. P. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética.** 2013. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/>. Acessado em: 20/04/2019.

HELLER, L., PÁDUA, V.L. **Abastecimento de água para consumo humano.** Rio de Janeiro. Editora UFMG, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeções da População Brasil e Unidades da Federação.** 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acessado em: 01/07/2019.

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. **Censo da Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul – Safra 2004/05.** 2006.

KÖPP, L. M. **Performance indices for pumping stations in irrigated rice fields.** Ciência Rural, v.46, n.8, 2016.

KSB. **Folheto de curvas características.** Frankenthal: KSB Aktiengesellschaft. 2014.

KURITZA, J. C.; CAMPONOGARA, G.; MARQUES, M. G.; SANAGIOTTO, D. G.; BATTISTON, C. C. **Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: Development and case study.** RBRH. 22. 10.1590/2318-0331.0217170018. 2017.

KURITZA, J. C. **Metodologia para avaliação da eficiência energética de sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, J. E.; LIMA, W.; SCALIA, R.; FERREIRA, A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da Irrigação no Brasil**. 2019.

MACINTYRE, A.J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro. 1997.

OLIVEIRA FILHO, Delly et al. **Dimensionamento de motores para o bombeamento de água**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 30, n. 6, p.1012-1022. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/>. Acessado em: 17/07/2019.

RIGHES, A. A. **Eficiência do uso da água em Sistema de irrigação com inundação: o caso do arroz**. II Simpósio Nacional Sobre o Uso da Água na Agricultura. 2016.

SANTOS, A.H.M. et al. **Conservação de Energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. Itajubá. FUPAI. 2006.

TESTEZLAF, R. **Engenharia de Irrigação: Tubos e Acessórios**. Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI. 2015.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações**. Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI. 2017.

TONIAL, F. **Eficiência energética de estações de bombeamento: estudo de caso do campus do vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Tese de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

TRAVIS, E. **A guide to NumPy**, USA: Trelgol Publishing. 2006. Disponível em: <http://web.mit.edu/>. Acessado em: 17/11/2019.