



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO
DIMENSIONAMENTO DE MOTORES E DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Tiago de Souza Teixeira

Uberlândia
2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO
DIMENSIONAMENTO DE MOTORES E DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO**

Dissertação de mestrado submetida à
Universidade Federal de Uberlândia por
Tiago de Souza Teixeira como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Roberto Camacho, PhD. (Orientador) – UFU
Delly Oliveira Filho, PhD. – UFV
Sebastião Camargo Guimarães Jr, Dr. – UFU

Prof. José Roberto Camacho, PhD.
Orientador

Prof. Edgar Lamounier, Dr.
**Coordenador do Curso de
Pós-Graduação**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

T266c
2014

Teixeira, Tiago de Souza, 1984-
Uma contribuição ao estudo do dimensionamento de motores e de um sistema de irrigação por gotejamento / Tiago de Souza Teixeira. - 2014.
90 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Motores elétricos - Teses. 3. Bombas hidráulicas - Teses. 4. Irrigação por gotejamento - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

DEDICATÓRIA

*Dedico a Milla Gabriela dos Santos, a grande
incentivadora deste projeto.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Milton Teixeira da Silva e Maria Ilza de Souza Silva, pelo apoio e carinho desmedidos.

Ao Prof. José Roberto Camacho pela orientação, sugestões, apoio, dedicação e amizade transmitidos durante todo o trabalho.

Aos meus irmãos, André de Souza Teixeira e Marina de Souza Teixeira, que mesmo distantes sempre se mostraram presentes.

A todos os colegas de laboratório por tornarem este projeto mais agradável. A todos os funcionários da UFU, em especial à Cinara Fagundes Matos, por desatarem os nós que porventura aparaceram em meu caminho.

À minha namorada, Milla Gabriela dos Santos, por sempre estar ao meu lado, na alegria e na dor, com palavras doces e sensatas.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Uma Contribuição ao Dimensionamento de Motores e de um Sistema de Irrigação por Gotejamento

Esta dissertação tem como objetivo estudar e desenvolver rotinas de cálculo para o dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento, com foco no conjunto motobomba. Para o desenvolvimento deste estudo optou-se por utilizar o software Octave, onde foram programadas as rotinas. O programa desenvolvido, a partir da cultura selecionada, é capaz de dimensionar toda a rede de tubulações, desde a linha lateral, onde são instalados os gotejadores até a linha de sucção. Também é determinada a potência que a motobomba deve fornecer ao sistema e a potência nominal do motor capaz de atender aos requisitos da instalação. Com o dimensionamento concluído, é possível fazer previsões de tempo de operação do sistema assim como os gastos com energia a serem dispendidos na operação.

Palavras chave: Motores Elétricos, Eficiência Energética, Bombeamento de Água, Racionalização no uso da Energia Elétrica.

ABSTRACT

A Contribution to Sizing of Motors and a Drip Irrigation System

This dissertation aims to study and develop routines for calculating the sizing of drip irrigation systems, focusing on the motor-pump set. To develop this study we chose to use of Octave software, where the routines were programmed. The program developed from the selected culture is capable of sizing the network of pipes, from the sideline, where drippers are installed to the suction line. It is estimated the power that the motor-pump set must provide to the system and the motor rated power able to meet the requirements of the installation is also determined. With the design complete, it is possible to forecast operating time of the system as well as energy costs to be expended in the operation.

Keywords: Electrical Motors, Energy Efficiency, Water pumping, Rational use of Energy.

SUMÁRIO

<i>DEDICATÓRIA</i>	<i>iii</i>
<i>AGRADECIMENTOS</i>	<i>iv</i>
<i>RESUMO</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vi</i>
<i>SUMÁRIO</i>	<i>vii</i>
<i>NOMENCLATURA</i>	<i>viii</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>xii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>ix</i>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 IRRIGAÇÃO	5
2.2 IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	7
2.2.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	9
2.3 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	12
2.3.1 QUANTIDADE DE ÁGUA	14
2.3.2 SELEÇÃO DE EMISSORES	23
2.3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES	27
2.3.3.1 LINHAS LATERAIS	33
2.3.4 BOMBA HIDRÁULICA	34
2.3.5 MOTORES	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	43
3.2 PROJETO AGRONÔMICO	43
3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES	45
3.3.1 LINHAS LATERAIS	45
3.3.2 TUBULAÇÃO DE DERIVAÇÃO	46
3.3.3 TUBULAÇÃO PRINCIPAL	46
3.4 CONJUNTO MOTOBOMBA	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO I	61
ANEXO II	66
ANEXO III	74

NOMENCLATURA

A – Área do Tanque;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

Af – Água Recebida pela Planta por Outras Fontes;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

ASAE – American Society of Agricultural Engineers;

C – Coeficiente de Rugosidade;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua;

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais;

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social;

CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição;

D – Diâmetro;

e^0 – pressão de saturação de vapor;

Ea – Eficiência de Aplicação;

e_a – pressão real de vapor, kPa;

Ee – Espaçamento entre emissores;

Ef – Espaçamento Linhas Laterais;

Ep – Espaçamento entre Plantas;

e_s – pressão de saturação de vapor, kPa;

ET_C – Evapotranspiração da Cultura;

ET_L – Evapotranspiração Corrigida para a Irrigação Localizada;

ET_{li} – Evapotranspiração obtida por meio de um lisímetro;

ET_o – Evapotranspiração de Referência;

F – Fator de Redução para Múltiplas Saídas;

f – frequência;

Fa – Fator de Redução Ajustado;

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura);

f_c – Coeficiente de Atrito;
 G – Fluxo de Calor no Solo, MJ m⁻²dia⁻¹;
 g – Aceleração da Gravidade;
 h – Pressão Nominal dos Gotejadores;
 hf – Perda de Carga Máxima Admitida;
 HL – Pressão Requerida na Entrada da Linha Lateral;
 H_m – Altura Manométrica;
 $IBGE$ – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
 IC – Índice de Cobertura do Solo;
 $ICMS$ – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços;
 IN – Lâmina de Irrigação a ser Aplicada;
 IN_B – Irrigação Bruta Necessária;
 IN_L – Irrigação Líquida Necessária;
 $INMET$ – Instituto Nacional de Meteorologia;
 IN_p – Lâmina de Água por Planta;
 J – Perda de Carga Total;
 j – Perda de Carga Unitária;
 j_l – Perda de Carga Localizada;
 K_C – Coeficiente de Cultivo;
 K_l – Coeficiente de perda de carga localizada;
 K_R – fator de redução;
 L – Comprimento;
 L_x – Água Necessária para Lixiviação;
 N – Número de Unidades de Irrigação;
 n – Velocidade de Rotação;
 N_e – Número de Emissores;
 N_s – Número de Saídas;
 P – Potência Absorvida;
 P_e – Precipitação Ocorrida;

P_a – Potência Absorvida pela Bomba;
 PAM – Percentagem de Área Molhada;
 $PASEP$ – Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público;
 PIS – Programa Integração Social;
 P_m – Potência Absorvida pelo Motor;
 P_u – Potência Útil da Bomba;
 PVC – Policloreto de Vinila;
 q – Vazão do Gotejador;
 Q – Vazão;
 R – Número de Reynolds;
 R_n – Saldo de Radiação à Superfície;
 T – Temperatura do Ar a 2 Metros de Altura;
 T_m – Intervalo entre Medições;
 T_h – Horas Diárias Disponíveis para a Irrigação;
 T_{max} – Média das Temperaturas Máximas;
 T_{med} – Temperatura Média;
 T_{min} – Média das Temperaturas Mínimas;
 T_o – Duração da Irrigação;
 T_{orv} – Temperatura de Ponto de Orvalho;
 TR – Turno de Rega;
 T_s – Temperatura de Bulbo Seco;
 T_u – Temperatura de Bulbo Úmido;
 U_2 – Velocidade do Vento a 2 Metros de Altura;
 UR_{max} – Umidade Relativa Máxima Média;
 UR_{med} – Umidade Relativa Média;
 UR_{min} – Umidade Relativa Mínima Média;
 V – Tensão;
 V_a – Volume de Água Aplicado;
 V_e – Velocidade Média de Circulação da Água;

V_p – Volume de Água Percolado;
 γ – Constante Psicrométrica;
 Δ – Declividade da Curva de Pressão de Vapor;
 ΔZ – Declividade do Terreno;
 ε – Rugosidade Absoluta da Tubulação;
 η – Rendimento;
 η_B – Rendimento da Bomba;
 η_M – Eficiência do Motor;
 ν – Viscosidade Cinemática do Líquido;

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema de irrigação por superfície: sulcos (esquerda) e inundação (direita). Fonte: TESTEZLAF (2011).....	5
Figura 2.2: Exemplos de sistemas por aspersão com linha lateral: fixas (esquerda) portáteis (centro) e pivô central (direita). Fonte: TESTEZLAF (2011).....	6
Figura 2.3: Sistemas de irrigação localizada: gotejamento (esquerda) e microaspersão (direita).....	6
Figura 2.4: Percentagem dos métodos de irrigação utilizados no Brasil em função da área irrigada. Fonte: IBGE, 2012	7
Figura 2.5: Componentes de um sistema de irrigação	10
Figura 2.6: Etapas de projeto.	13
Figura 2.7: Lisímetro de drenagem. Fonte (BUENO, 2012)	15
Figura 2.8: Curva típica do KC (coeficiente de cultivo) para culturas de ciclo anual.	19
Figura 2.9: Produção de acordo com a percentagem de área molha (PAM).	24
Figura 2.10: Diagrama de Moody. Fonte: (FENG, 2014).....	28
Figura 2.11: curvas características de uma bomba.	37
Figura 2.12: Ponto de operação de uma bomba.	38
Figura 2.13: Curvas características de um motor CC. Fonte: HONDA (2006)..	40
Figura 2.14: curvas características de um motor de indução. Fonte: WEG (2014)	41
Figura 4.1: Evapotranspiração para a cultura do café com irrigação localizada no município de Patos de Minas, MG.....	48
Figura 4.2: Evapotranspiração mensal média.	49
Figura 4.3: Características do tubo gotejador Amanco. Fonte: Catálogos Amanco.	50
Figura 4.4: resultado do dimensionamento.	51
Figura 4.5: Curvas características de um motor de 10 cv.	52
Figura 4.6: Primeira tela do programa.	54
Figura 4.7: Segunda tela do programa.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Coeficiente de cultura para diferentes estágios de desenvolvimento	20
Tabela 2.2: Fatores de redução calculados por diferentes autores.....	20
Tabela 2.3: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)	22
Tabela 2.4: Valores estimados de Percentagem de Área Molhada (PAM)	25
Tabela 2.5: Rugosidade absoluta dos materiais.	29
Tabela 2.6: Valores do coeficiente de rugosidade (c).....	31
Tabela 2.7: Valores do coeficiente K_1 para diversos acessórios.....	32
Tabela 2.8: Potências comerciais para motores elétricos (CV).	42
Tabela 4.1: Tarifas rurais CEMIG.	53

1 Introdução

O contínuo crescimento da população mundial exige uma agricultura competitiva e tecnificada, que possibilite a produção de alimentos de melhor qualidade e em maior quantidade, sendo a irrigação uma excelente estratégia para o alcance destes objetivos (OLIVEIRA FILHO; TEIXEIRA; RIBEIRO, 2004). Atualmente, quase a metade da população mundial depende de alimentos produzidos mediante a aplicação de irrigação.

Globalmente, a produtividade obtida com a prática da agricultura irrigada é 2,7 vezes maior do que a obtida pela agricultura tradicional – de sequeiro –, que é dependente das irregularidades próprias do regime de chuvas (CHRISTOFIDIS, 2013).

O Brasil possui cerca de 30 milhões de hectares com possibilidade de desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada (CHRISTOFIDIS, 2013).

O Brasil passa por problemas no abastecimento de água, sendo este recurso cada vez mais escasso. Além disto, o país tem em sua matriz energética mais de 65% de geração por meio de hidrelétricas (ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2014). Juntamente com esses fatos, há uma crescente preocupação mundial com os recursos hídricos tornando necessárias a adoção de estratégias de manejo que possibilitem economia de água sem prejuízos da produtividade agrícola.

Pretende-se com a irrigação suprir as culturas agrícolas com a quantidade de água necessária às plantas no momento adequado para se obter, economicamente, a produção ótima e melhor qualidade do produto. A irrigação é uma ferramenta capaz de diminuir os riscos dos agricultores no que se refere às

produções a serem alcançadas, porém, a mesma não é capaz de impedir que ocorram riscos financeiros (SOUZA; FRIZZONE, 2003).

De acordo com Turco et al. (2009), os sistemas de bombeamento são responsáveis pela maior parte do consumo de energia na irrigação, motivo pelo qual há necessidade de um perfeito dimensionamento do sistema o que consequentemente acarreta um melhor rendimento do sistema e na redução do custo final da irrigação.

As tarifas de energia elétrica e a tarifação sobre a água para a irrigação vêm despertando preocupação aos irrigantes. Se a irrigação fosse de forma racional, cerca de 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizados, sendo 20% da energia economizada devido à aplicação desnecessária da água e 10% devido ao rendimento e à otimização dos equipamentos (TURCO et al, 2009).

As bombas centrífugas são utilizadas na maioria dos sistemas de irrigação e seu dimensionamento, tal como todos os outros componentes, devem atender à necessidade hídrica da cultura na situação mais crítica. Situação esta que ocorre nos meses de menor precipitação. O fato do dimensionamento ser feito para os meses de máxima demanda faz com que o sistema de irrigação fique superdimensionado nos demais meses do ano (MORAES et al. 2011).

Para que as bombas centrífugas possam atender a este menor volume de água com maior eficiência, Alves et al. (2002) recomendam a redução da velocidade de giro da motobomba até a obtenção da vazão necessária. O uso do inversor de frequência no controle de velocidade de motores que acionam bombas centrífugas permite o atendimento da demanda variável do sistema de irrigação e, consequentemente, a racionalização do uso da energia elétrica.

O emprego de inversores de frequência tem sido justificado no controle de tensão e de frequência (V/f), o que gera: (i) economia de energia; (ii) controle do processo em regime transiente, controle de corrente de partida e controle de tempo de partida; (iii) controle de fator de potência e controle de velocidade em regime permanente, durante a operação normal do processo; (iv) maximização do uso da

potência de transformadores e (v) controle da qualidade de energia pelo (vi) controle de nível do desequilíbrio de tensão (MORAES et al. 2011).

Segundo Bernardo et al. (2008), a energia elétrica pode representar até cerca de 25 % do custo de produção em sistemas de irrigação por aspersão. O uso do inversor de frequência em conjunto com o gerenciamento e a adequação tarifária, é de fundamental importância para a racionalização do uso de energia elétrica e da água, em perímetros irrigados.

Diante do exposto, o presente trabalho pretende contribuir para o correto dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento, visando economia de água e energia elétrica.

No Capítulo 2, é feita uma revisão de literatura a cerca das etapas de projeto de sistemas de irrigação. No início são apresentados os métodos utilizados para irrigação. Em seguida são discutidos os métodos utilizados para a determinação da quantidade de água a ser aplicada, a seleção do emissor para garantir a uniformidade de aplicação. Na sequência, são expostas as equações que auxiliam o dimensionamento da rede de tubulação responsável pelo transporte d'água. Finalmente, é feita uma discussão sobre bombas e motores utilizados em irrigação.

O Capítulo 3, Materiais e Métodos, trata do desenvolvimento de um projeto de irrigação. De acordo com o exposto no Capítulo 2 são selecionados os métodos que mais se adequam a realidade deste trabalho e é dimensionado todo o sistema de irrigação.

Com o dimensionamento concluído, no Capítulo 4 são apresentados os resultados deste dimensionamento assim como as características da operação do sistema. São analisados os custos esperados com energia, tempo de operação entre outros.

Por fim, no Capítulo 5, são exibidas as conclusões obtidas com este trabalho assim como sugestões para trabalhos futuros. Ao final do trabalho estão as referências bibliográficas utilizadas para desenvolver o presente trabalho.

Nos anexos está o artigo apresentado pelo autor no XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA 2014), o código fonte do programa desenvolvido e o banco de dados climatológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) utilizados para determinação da quantidade de água a ser aplicada.

2 Revisão de Literatura

2.1 IRRIGAÇÃO

Existem vários métodos de irrigação, sendo os principais a irrigação por superfície ou por gravidade, irrigação por aspersão e localizada.

A irrigação por superfície consiste em deixar a água escoar sobre o solo, cobrindo-o total (inundação) ou parcialmente (sulcos), utilizando a ação da gravidade e possibilitando a infiltração durante essa movimentação e após o seu represamento (TESTEZLAF, 2011). Na Figura 2.1, pode-se observar os sistemas de irrigação por sulcos (esquerda) e por inundação (direita).



Figura 2.1: Sistema de irrigação por superfície: sulcos (esquerda) e inundação (direita).
Fonte: TESTEZLAF (2011)

A irrigação por aspersão, representada na Figura 2.2, aplica a água criando uma chuva artificial, por meio de dispositivos abastecidos com água sob pressão. Estes dispositivos são chamados de aspersores. Os sistemas de irrigação por aspersão são divididos em sistemas fixos, onde as tubulações cobrem toda a área a ser irrigada e sistemas portáteis, onde a tubulação é movimentada ao longo da área a ser irrigada. Existe ainda o sistema de aspersão por pivô central que consiste basicamente de uma tubulação metálica, onde são instalados os aspersores, que gira continuamente ao redor de uma estrutura fixa (GOMES, 1999).



Figura 2.2: Exemplos de sistemas por aspersão com linha lateral: fixas (esquerda) portáteis (centro) e pivô central (direita).

Fonte: TESTEZLAF (2011)

A irrigação localizada é caracterizada pela aplicação de pequenas vazões de água, porém com uma alta frequência, diretamente sobre a zona radicular da planta, formando bulbos e faixas molhadas. A aplicação é feita por meio de gotejadores e microaspersores, denominados emissores, instalados em tubos de diâmetros reduzidos que são dispostos acompanhando as fileiras da cultura a ser irrigada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2002; GOMES 1999). A Figura 2.3 ilustra um sistema de gotejamento aplicado à cultura do café (à esquerda) e um sistema de microaspersão (à direita).



Figura 2.3: Sistemas de irrigação localizada: gotejamento (esquerda) e microaspersão (direita).

Fonte: FERNANDES (2013); TESTEZLAF (2011)

De acordo com Censo Agropecuário 2006 (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012) o Brasil possuía mais de 4,5 milhões de hectares irrigados. A utilização de cada método de irrigação em função da área irrigada é representada na Figura 2.4.

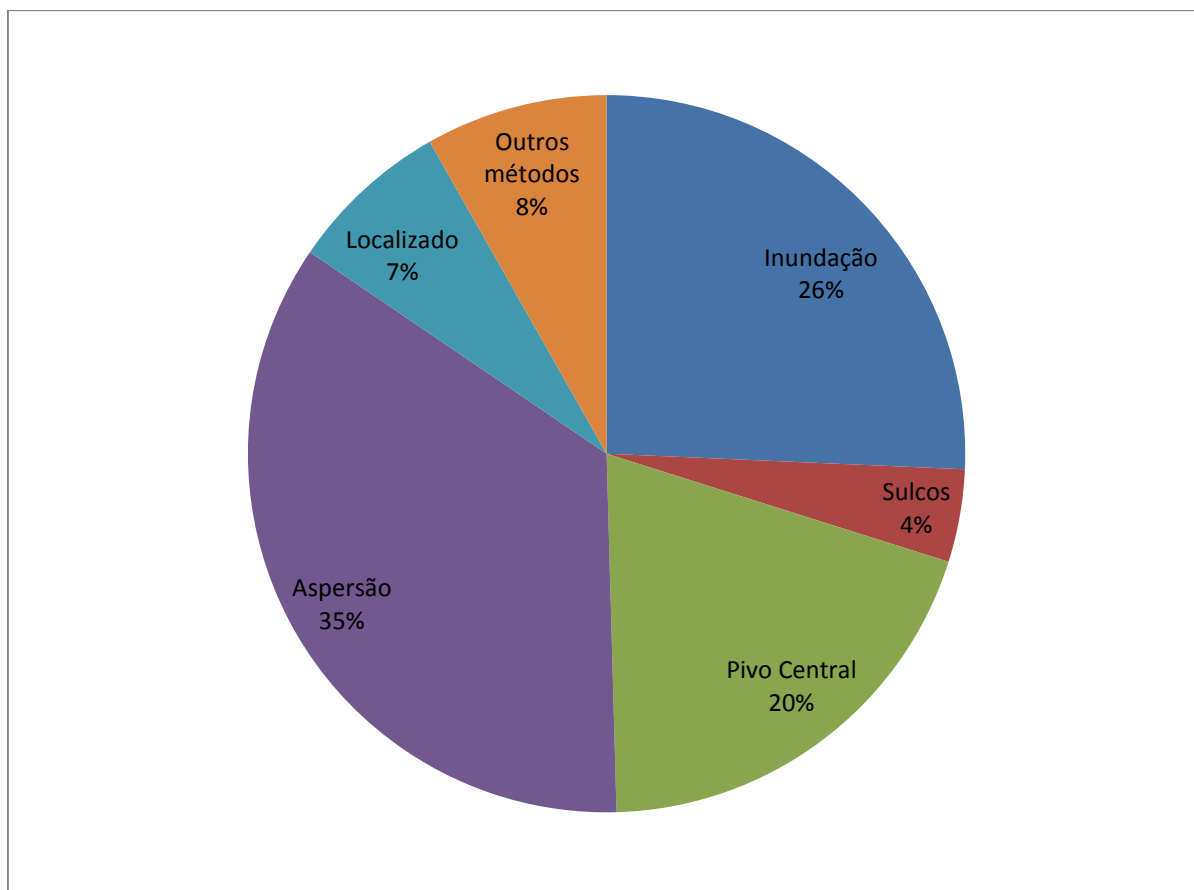


Figura 2.4: Percentagem dos métodos de irrigação utilizados no Brasil em função da área irrigada. Fonte: *IBGE, 2012*

Dentre os métodos supracitados, neste trabalho será dado enfoque ao método de irrigação por gotejamento.

2.2 IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Como já dito, a irrigação por gotejamento é um tipo de irrigação localizada, que como tal, é caracterizada pela aplicação de pequenas vazões de água, porém com uma alta frequência, diretamente sobre a zona radicular da planta, formando bulbos e faixas molhadas. A aplicação é feita por meio de gotejadores,

denominados emissores, instalados em tubos de diâmetros reduzidos que são dispostos acompanhando as fileiras da cultura a ser irrigada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; FAO, 2002; GOMES, 1999).

A irrigação por gotejamento apresenta vantagens e desvantagens quando comparado com os outros tipos. Para Bernardo, Soares e Mantovani (2008) as principais vantagens deste tipo de irrigação são:

- Melhor eficiência no uso da água: pelo fato de a água não ser aplicada em toda a superfície, as perdas por evaporação diminuem. As perdas por percolação são também reduzidas e praticamente não há perda por escoamento superficial;
- Eficiência na adubação: através da fertirrigação o fertilizante é aplicado diretamente sobre as raízes das plantas, que ficam concentrados no bulbo ou faixa molhada;
- Eficiência no controle fitossanitário: não molha a parte aérea das plantas e praticamente não irriga as plantas daninhas;
- Não interfere nas práticas culturais: como as laterais ficam posicionadas junto às fileiras de plantas e a faixa molhada se restringe a esta região, a irrigação localizada não interfere nas capinas, colheitas e outras práticas culturais;
- Adaptação a diferentes tipos de solos e topografia: devido à baixa taxa de aplicação de água, este método é o que melhor se adapta a diferentes tipos de solo e topografia;
- Permite a utilização de água salina ou solos salinos: neste tipo de sistema de irrigação, o intervalo entre irrigações ou turno de rega é pequeno, de 1 a 4 dias, de tal forma que a umidade do solo permaneça sempre alta, diminuindo a concentração de sais na zona radicular das plantas;
- Economia de mão de obra: por serem sistemas fixos, que permitem a fertirrigação e não favorecem o crescimento de ervas daninhas, a

mão de obra necessária para manter a cultura é inferior quando comparada com outros sistemas de irrigação; e

- Redução nos gastos com energia: devido às baixas pressões de operação dos sistemas de irrigação por gotejamento, são menores os custos com bombeamento de água.

Apesar das vantagens supracitadas, este tipo de sistema também apresenta suas desvantagens (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; FAO, 2002):

- Probabilidade de entupimento dos emissores: para aplicar as pequenas vazões que caracterizam os sistemas de irrigação por gotejamento. Os gotejadores possuem orifícios com diâmetros reduzidos, que são mais propensos a entupimentos. Para contornar este problema são necessários filtros;
- Distribuição do sistema radicular: o fato das raízes concentrarem no bulbo molhado pode diminuir a estabilidade de plantas de maior porte, como árvores frutíferas, podendo ocorrer tombamento em regiões sujeitas a ventos mais fortes;
- Alto custo inicial do sistema: por se tratarem de sistemas fixos o investimento inicial com toda a rede de tubulações e emissores, além dos filtros, torna o custo de instalação elevado. Para culturas muito adensadas a quantidade de laterais e emissores pode tornar o método economicamente inviável; e
- Salinização: há acúmulo de sais na periferia do bulbo molhado em regiões com baixa pluviosidade.

2.2.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Sistemas de irrigação por gotejamento são compostos basicamente por um conjunto motobomba, cabeçal de controle, rede de distribuição e gotejadores

(BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; FAO, 2002; GOMES, 1999), como pode ser visto na Figura 2.5.

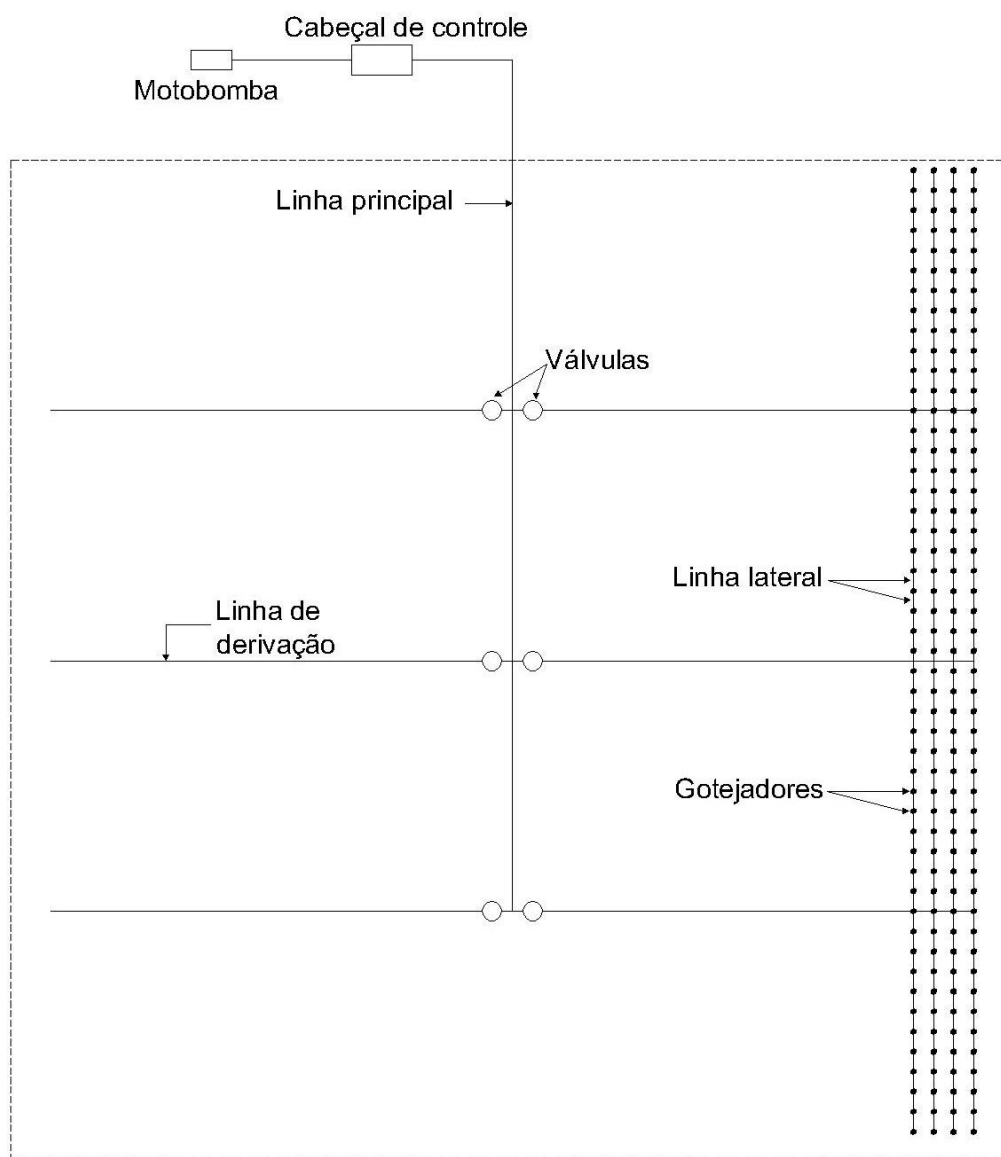


Figura 2.5: Componentes de um sistema de irrigação

Em irrigação se utiliza com mais frequência motores a diesel e elétricos sendo que estes, tradicionalmente, são alimentados pela rede da concessionária de energia (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

As bombas utilizadas geralmente são do tipo centrífuga de eixo horizontal (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

Após o conjunto motobomba é instalado o cabeçal de controle. Entre os principais componentes que podem estar presentes no cabeçal destacam-se os filtros, injetores de fertilizantes e peças especiais para regulagem, controle e automação do sistema. Os filtros são responsáveis por manter a água que chega aos gotejadores limpa, evitando assim problemas com entupimento. Os principais tipos de filtro são os de areia, de tela, de discos e os hidrociclones (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; GOMES 1999).

O injetor de fertilizantes é parte fundamental em um sistema de irrigação por gotejamento, sendo que as principais formas de realizar a injeção são através de tanque de fertilizantes, bomba de injeção dosificadora ou por sucção. Além de filtros e injetores, o cabeçal de controle de um sistema de irrigação pode contar com válvulas para controle de fluxo, manômetros, medidores de vazão e registros. Estes equipamentos permitem um maior controle sobre a lâmina de água aplicada e facilitam a automação do sistema (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; GOMES 1999).

Para transportar a água desde a fonte de abastecimento até os gotejadores são utilizados tubos de polietileno, policloreto de vinila (PVC) rígido ou flexível, tubos galvanizados ou de cimento. A linha principal, que conduz a água da motobomba até as linhas de derivação, é responsável por transportar toda a água requerida, por isso é na linha principal que se encontram as tubulações com maior diâmetro. Linhas de derivação alimentam os setores do projeto de irrigação. Podem conter válvulas em seus inícios e são constituídas de polietileno ou PVC. As linhas laterais, aquelas onde são instalados os gotejadores, são de polietileno e têm o diâmetro entre 12 e 32 mm, são instaladas em nível, acompanhando as fileiras das plantas (GOMES, 1999).

Os emissores (gotejadores) são dispositivos instalados em uma lateral de irrigação com o objetivo de descarregar água através de gotas ou fluxo contínuo a uma vazão que não exceda 24 L/h. Os emissores podem ser classificados quanto à regulação de pressão, podendo existir os regulados ou autocompensados que

mantêm uma vazão relativamente constante para uma variação de pressão estabelecida pelo fabricante e os não regulados onde a vazão varia com a pressão. Também existe a possibilidade instalação de válvulas reguladoras de pressão a fim de manter a pressão nos gotejadores em valores pré definidos.

Os gotejadores também são classificados quanto à operação em baixas pressões, sendo classificados como antidrenantes ou regulares. Os antidrenantes são aqueles que não permitem o escoamento de água quando estão submetidos a baixas pressões e os regulares são aqueles onde não há este controle de vazão.

De acordo como os emissores são instalados nas laterais eles são classificados em *in-line*, quando são instalados dentro dos tubos, ou, *on-line* quando a instalação é feita sobre a lateral. Existem ainda os tubos gotejadores, que são tubos contínuos, que em seu processo de fabricação são feitas perfurações ou são instalados dispositivos hidráulicos que propiciem uma vazão que não exceda 24 l/h (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005).

2.3 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Segundo Hernandez (1999), para o correto dimensionamento de um sistema de irrigação, seja de qual tipo for, deve-se seguir os seguintes passos.

- Definição da área e cultura a ser irrigada;
- Definição da lâmina de água a ser aplicada: é definida para o período mais crítico (maior evapotranspiração). Nesta etapa é definido qual gotejador utilizar e sua distribuição na área a ser irrigada e o tempo de operação do sistema;
- Dimensionamento de tubulações: de posse da vazão de cada gotejador é possível dimensionar toda a rede de tubulação partindo das laterais até a linha principal;

- Cabeçal de controle: devem ser definidas os equipamentos que comporão o cabeçal de controle, especificando a capacidade que é função da vazão do sistema e também as perdas que cada componente provoca; e
- Conjunto motobomba: definidas a vazão e altura manométrica total do sistema faz se o dimensionamento do conjunto motobomba;

A seguir será feito um detalhamento das etapas citadas anteriormente enunciando fórmulas, variáveis e técnicas utilizadas em projetos de sistemas de irrigação por gotejamento. O fluxograma da Figura 2.6 representa as etapas de projeto.

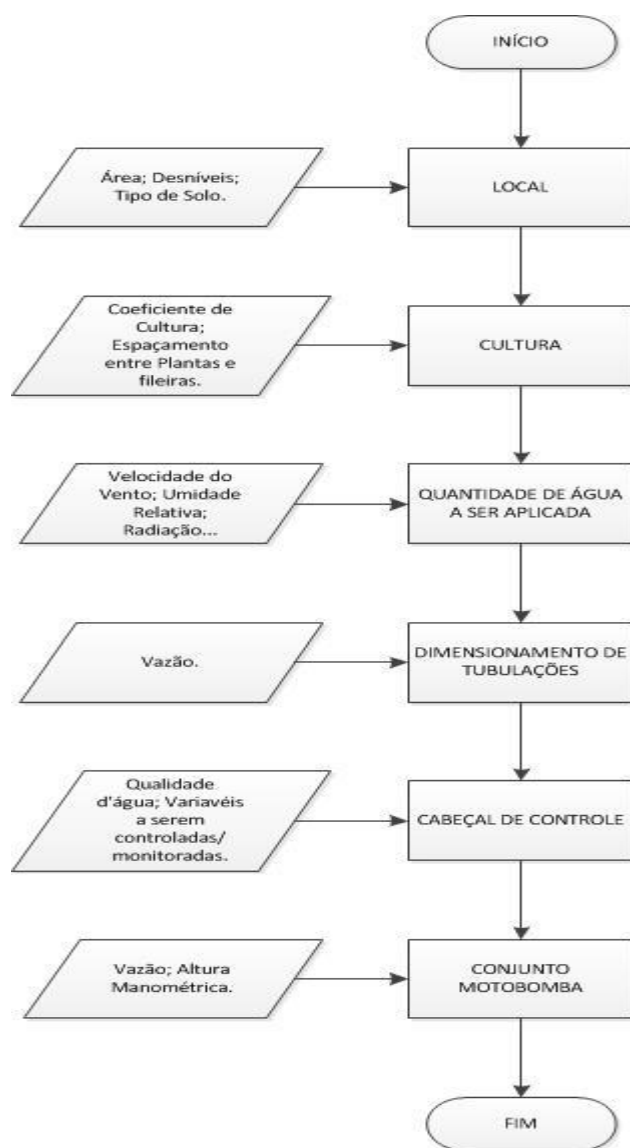


Figura 2.6: Etapas de projeto.

2.3.1 QUANTIDADE DE ÁGUA

Para determinar a quantidade de água a se aplicar em determinada área deve-se primeiro conhecer a Evapotranspiração de Referência (ET_o) para o local. A evapotranspiração é o processo pelo qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera envolvendo a evaporação da água da superfície do solo e a água interceptada e transpirada pelas plantas.

A ET_o é definida pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) como a evapotranspiração de uma superfície de referência. A superfície de referência é um cultivo hipotético de grama, com uma altura assumida de 0,12 m, com resistência superficial fixa de 70 s/m e um albedo de 0,23. A superfície de referência é muito similar a uma superfície extensa de pasto verde, bem regada, de altura uniforme, em pleno desenvolvimento vegetativo e cobrindo completamente a superfície do solo.

Existem diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração, constituindo-se basicamente dois grupos: o dos métodos diretos e o dos indiretos ou empíricos. Os métodos diretos caracterizam-se pela determinação da evapotranspiração diretamente na área, onde se destacam os diferentes tipos de lisímetros. Os indiretos são caracterizados pelo uso de equações empíricas ou modelos matemáticos, que se utilizam de dados climatológicos para a sua estimativa. Estes, por se tratarem de uma estimativa, são menos precisos, principalmente quando aplicados em condições climáticas diferentes das quais foram elaborados.

Os lisímetros são tanques enterrados contendo uma amostra representativa do solo e da vegetação que se deseja estudar. As plantas dentro do lisímetro têm que ser similares às que as rodeiam em todos os aspectos agronômicos: variedade, estágio de desenvolvimento, condições fitossanitárias, adubação, etc.

Existem diferentes tipos de lisímetros, sendo eles o de drenagem, o de pesagem e o de lençol freático constante.

O lisímetro de drenagem é composto por um tanque impermeável que possui no fundo um dreno que possibilita o escoamento da água percolada que é recolhida por um recipiente. A evapotranspiração é dada pela diferença entre a quantidade de água aplicada e a percolada. O esquema básico de instalação de um lisímetro de drenagem é apresentado na Figura 2.7. Matematicamente a evapotranspiração é obtida através da Equação 2.1.

$$ET_{li} = \frac{\frac{(Va - Vp)}{A} + P}{Tm} \quad 2.1$$

Onde:

Va – volume de água aplicado [L];

Vp – volume de água percolado [L];

A – área do tanque [m²];

Tm – intervalo entre medições [dia];

P – precipitação ocorrida no período considerado [mm].

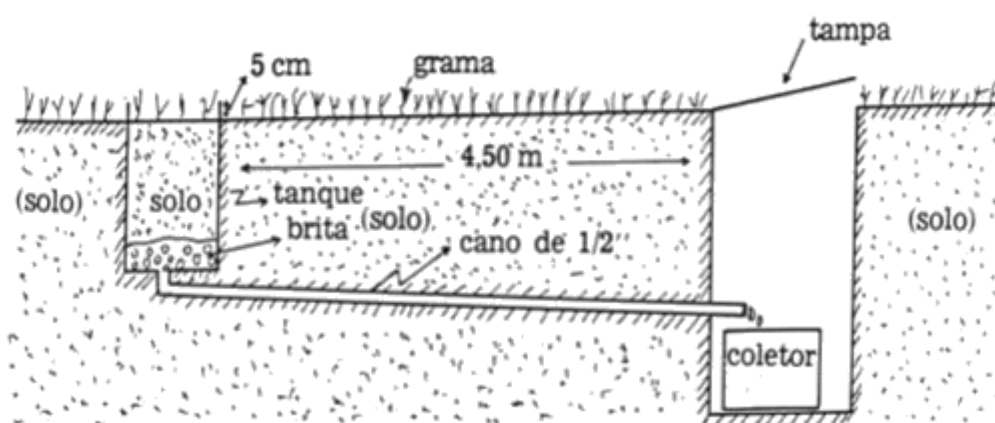


Figura 2.7: Lisímetro de drenagem. Fonte (BUENO, 2012)

A medida direta de evapotranspiração por lisimetria é difícil e onerosa, justificando sua utilização apenas em condições experimentais (BARBOZA JUNIOR, 2009).

Entre os métodos indiretos, pode-se citar o tanque classe A. O tanque classe A é circular, com 120,7 cm de diâmetro e 25 cm de profundidade. É construído

de ferro galvanizado ou de lâminas de metal (0,8 mm). O tanque deve ser posicionado sobre uma plataforma de madeira, nivelada, em forma de grade que se encontra a 15 cm acima do nível do solo. Uma vez instalado, se enche de água até 5 cm abaixo da borda, a água não deve ficar abaixo de 7,5cm da borda.

A evapotranspiração é dada pela evaporação do tanque, ou seja, pela diferença entre o nível de água entre as medições e o coeficiente do tanque, que depende das características geométricas e do material de que é feito o tanque.

Existem ainda várias equações para determinar a *ET_o*, dentre elas pode-se citar as equações de Valiantzas, Turc, Hargreaves-Samani, Hargreaves, Ritchie e a equação de Irmak (KISI, 2014).

Entretanto, o método considerado como referência pela FAO é a equação de Penman-Monteith, demonstrada na Equação 2.2 (ALLEN; PRUITT, 1991). Esta equação foi utilizada neste trabalho.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left[900 / (T + 273) \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U_2)} \quad 2.2$$

Onde,

ET_o – evapotranspiração de referência, mm.dia⁻¹

Δ – declividade da curva de pressão de vapor, kPa;

Rn – saldo de radiação à superfície, MJ.m⁻².dia⁻¹;

G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻².dia⁻¹;

γ – constante psicrométrica, kPa°.C⁻¹;

T – temperatura do ar a 2 metros de altura, °C;

U₂ – velocidade do vento a 2 metros de altura, m.s⁻¹;

e_s – pressão de saturação de vapor, kPa; e

e_a – pressão real de vapor, kPa.

A pressão real de vapor (e_a) pode ser calculada por meio da pressão de saturação de vapor (e^0) utilizando diferentes métodos que empregam dados de umidade relativa, temperatura e ponto de orvalho. Segundo YODER (2005) e ALLEN et al. (1998) os métodos para cálculo da pressão real de vapor são os apresentados nas equações 2.3 a 2.10:

$$e_a = e^0(T_{orv}) \quad 2.3$$

$$e_a = e^0(T_{min}) \quad 2.4$$

$$e_a = e^0(T_u - \gamma(T_s - T_u)) \quad 2.5$$

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{UR_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{UR_{min}}{100}}{2} \quad 2.6$$

$$e_a = e^0(T_{med}) \frac{UR_{med}}{100} \quad 2.7$$

$$e_a = e^0(T_{min}) \frac{UR_{max}}{100} \quad 2.8$$

$$e_a = e^0(T_{max}) \frac{UR_{min}}{100} \quad 2.9$$

$$e_a = \frac{UR_{med}}{100} \left[\frac{e^0(T_{min}) + e^0(T_{max})}{2} \right] \quad 2.10$$

$$e^0 = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \quad 2.11$$

Sendo,

T_{orv} – temperatura de ponto de orvalho, °C;

T_{min} – média das temperaturas mínimas, °C;

T_{max} – média das temperaturas máximas, °C;

T_{med} – temperatura média, °C;

T_s – temperatura de bulbo seco, °C;

T_u – temperatura de bulbo úmido, °C;

UR_{min} – umidade relativa mínima média, %;

UR_{\max} – umidade relativa máxima média, %; e

UR_{med} – umidade relativa média, %;

Os resultados obtidos através de cada uma das equações anteriores foram comparados com o fornecido pelo programa CROPWAT 8.0 da FAO. O método que utiliza dados psicrométricos apresentou o melhor resultado, porém, devido ao fato de estes dados nem sempre estarem disponíveis recomenda-se o emprego das equações que utilizam dados de temperaturas máximas e mínimas assim como umidade relativa média, Equações 2.7 e 2.10 que forneceram resultados satisfatórios.

A partir da ET_o obtém-se a evapotranspiração da cultura (ET_C) através da Equação 2.12:

$$ET_C = K_C ET_o \quad 2.12$$

Onde o coeficiente de cultivo (K_C) é definido para cada estágio de crescimento e para cada tipo de cultivo.

O coeficiente de cultivo varia durante o crescimento da planta, apresentando seu valor máximo quando a planta atinge cerca de 80% do seu desenvolvimento vegetativo, valor este que permanece até o início da maturação de frutos. A Figura 2.8 ilustra o comportamento do K_C durante o desenvolvimento da planta.

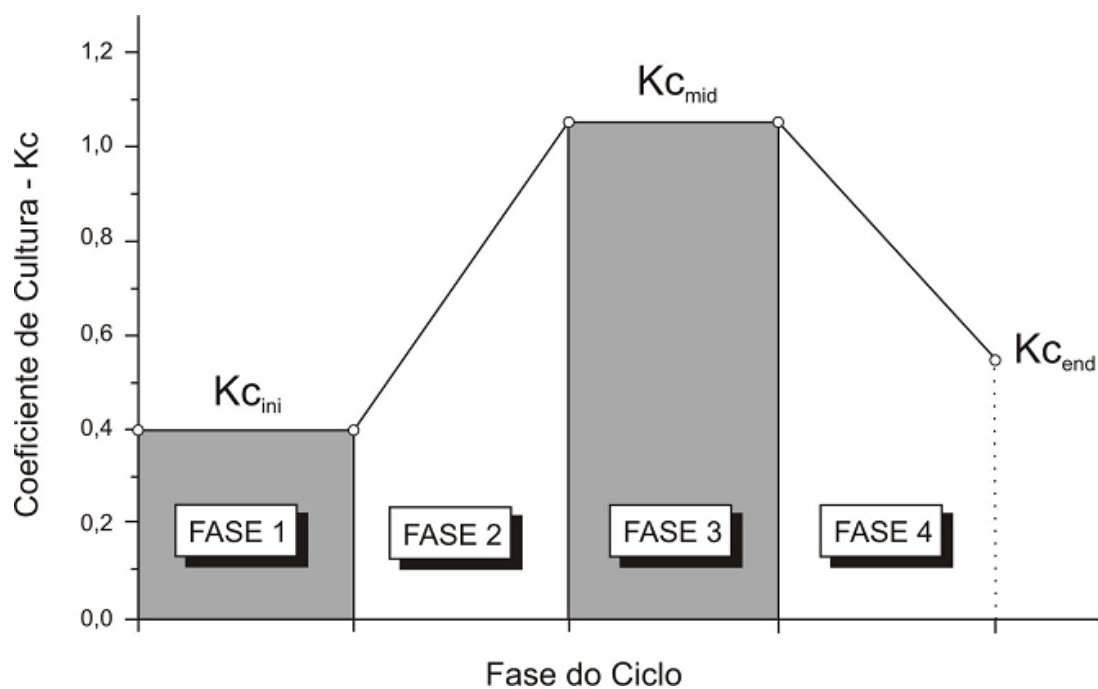


Figura 2.8: Curva típica do K_c (coeficiente de cultivo) para culturas de ciclo anual.
Fonte: ABID - Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (2014)

Na Tabela 2.1 estão apresentados os valores de K_c para diferentes culturas e estágios de desenvolvimento.

Tabela 2.1: Coeficiente de cultura para diferentes estágios de desenvolvimento da planta

Cultura	K_C		
	Inicial	Médio	Final
Feijão	0,5	1,15	0,55
Soja	0,5	1,15	0,50
Milho	0,3	1,20	0,35
Arroz	1,05	1,20	0,90 - 0,60
Cana de açúcar	0,40	1,25	0,35
Banana	0,50	1,10	1,10
Café	1,05	1,10	1,10
Cítricas	0,75	0,70	0,70

K_C = coeficiente de cultura.

Fonte: FAO (2002).

Como na irrigação localizada apenas parte da superfície é efetivamente irrigada, a ET_C deve ser corrigida utilizando um fator de redução (K_R). A FAO (2002) enumera os coeficientes de redução proposto por outros pesquisadores, sendo eles apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Fatores de redução calculados por diferentes autores.

Índice de cobertura do solo (IC) (%)	Keller/Karmeli	Freeman/Garzoli	Decroix
10	0,12	0,10	0,20
20	0,24	0,20	0,30
30	0,35	0,30	0,40
40	0,47	0,40	0,50
50	0,59	0,75	0,60
60	0,70	0,80	0,70
70	0,82	0,85	0,80
80	0,94	0,90	0,90
90	1,00	0,95	1,00
100	1,00	1,00	1,00

Segundo Keller e Karmeli (1974) o fator de redução pode ser estimado pela Equação 2.13:

$$K_R = 0,1\sqrt{IC} \quad 2.13$$

Onde IC é o índice de cobertura do solo em porcentagem.

A partir de K_R obtém-se a evapotranspiração corrigida para a irrigação localizada (ET_L), demonstrada na Equação 2.14.

$$ET_L = K_R ET_C = K_R K_C ET_O \quad 2.14$$

A irrigação deve compensar as perdas de água provocadas pela evapotranspiração, levando-se em conta as precipitações que ocorrem. Matematicamente a irrigação líquida necessária é estimada de acordo com a Equação 2.15 (FAO, 2002).

$$IN_L = ET_L - Af + Lx \quad 2.15$$

Onde:

IN_L = Irrigação líquida necessária, mm/dia;

ET_L = Evapotranspiração corrigida para a irrigação localizada, mm/dia;

Af = água recebida pela planta por outras fontes, por exemplo, chuva, mm/dia;

Lx = água necessária para lixiviação, mm/dia.

Sistemas de irrigação devem ser dimensionados para atender a máxima demanda por água que a cultura apresenta. A máxima demanda por água acontece nos períodos de estiagem. Em regiões com poucas chuvas deve ser previsto uma lâmina de água para lixiviação. Para regiões com estações chuvosas, como o sudeste brasileiro, não há necessidade de se aplicar uma lâmina extra para lixiviação. Portanto, a equação anterior resume-se a Equação 2.16:

$$IN_L = ET_L \quad 2.16$$

Todavia, não é toda água que é retirada da fonte que é absorvida pelas plantas. Durante a aplicação de água pode haver perdas por evaporação, vazamentos, percolação abaixo da zona de raiz ou escoamento do campo entre outros.

A eficiência de aplicação (Ea) é definida como a razão entre a quantidade de água requerida pela cultura e a água que lhe entregue. De acordo com (Howell, 2003) a Ea para irrigação localizada por gotejamento está entre 70 e 95%, com valor médio de 85%. Rainbird International 1980¹ apud (FAO, 2002) sugere diferentes valores de Ea de acordo com o clima, sendo igual a 0,85 para climas quentes e secos, 0,90 para climas moderados e para climas úmidos 0,95.

Considerando a eficiência de aplicação, a irrigação bruta necessária (IN_B) é dada pela Equação 2.17:

$$IN_B = \frac{ET_L}{Ea \ CUD} \quad 2.17$$

O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) têm seus valores recomendados pela (ASAE - American Society of Agricultural Engineers, 2003) e estão listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Tipo de emissor	Espaçamento (m)	Topografia	Declividade	CUD (%)
Pontual em culturas perenes	>4	Uniforme	<2	90 a 95
Pontual em culturas perenes ou semi perenes	<4	Ondulado	>2	85 a 90
Em linha nas culturas anuais ou perenes	todos	Uniforme	<2	85 a 90
		Ondulado	>2	80 a 90
				70 a 85

Fonte: ASAE - American Society of Agricultural Engineers (2003)

¹ Rain Bird International. 1980. *Design manual drip irrigation systems*.

A lâmina de água que cada planta deverá receber IN_p (L planta-1dia-1) é calculada pela Equação 2.18, onde E_p é o espaçamento entre plantas (m) e E_f é o espaçamento entre fileiras de plantas, ou linhas laterais (m) (BERNARDO et al., 2008).

$$IN_p = IN_B E_p E_f \quad 2.18$$

O turno de rega (TR), ou intervalo entre irrigações, para irrigação localizada varia entre um e quatro dias. Desta forma, a lâmina de irrigação a ser aplicada (IN) é dada pela Equação 2.19:

$$IN = TR IN_B \quad 2.19$$

2.3.2 SELEÇÃO DE EMISSORES

A seleção do número de emissores (N_e), do espaçamento entre eles (E_e) assim como da vazão de cada emissor está diretamente relacionada com a percentagem de área molhada (PAM). A Figura 2.9 apresenta a relação entre produção e área molhada.

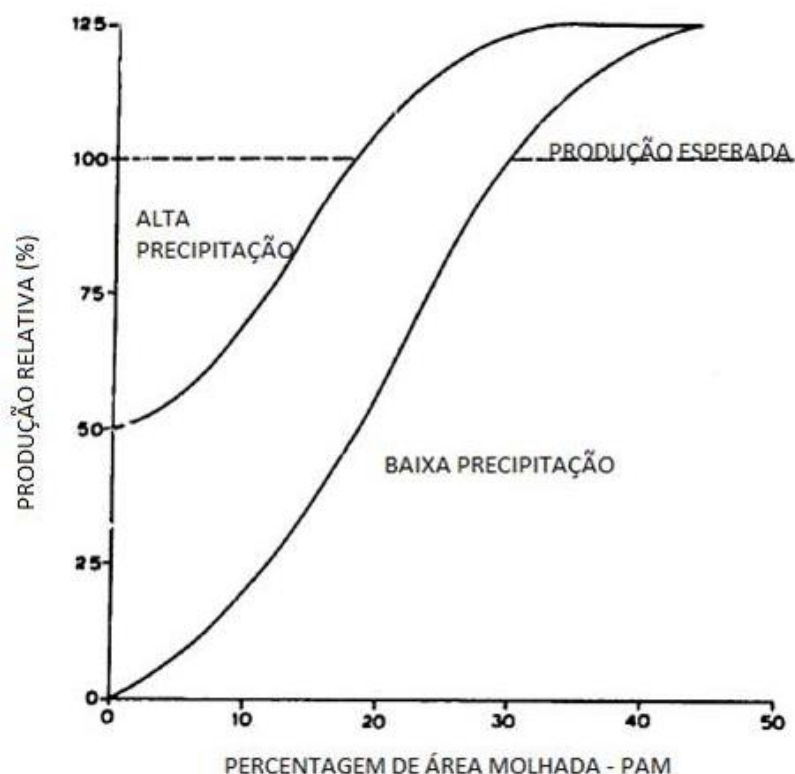


Figura 2.9: Produção de acordo com a percentagem de área molha (PAM).
Fonte: KELLER e KARMELI (1974)

A porcentagem de área molhada não deve ser inferior a 33% em regiões áridas e 20% em regiões úmidas, como forma de evitar tombamento de árvores em consequência da má distribuição das raízes (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008). Como sistemas de irrigação devem ser projetados para a época mais crítica, quando há baixos índices de precipitação, a PAM para questões de projeto deve ser estipulada em torno de 50%.

Souza et al. (2006) constataram que a cafeicultura irrigada na região do cerrado mineiro apresenta uma PAM ligeiramente inferior a 40%. Keller e Karmeli (1974) apresentaram a

Tabela 2.4 que relaciona espaçamento entre linhas laterais e gotejadores, vazão do gotejador, tipo de solo e PAM.

Para duas laterais por fileira de plantas, a PAM é estimada pela equação 2.20, já quando são necessários mais de um gotejador por planta utiliza-se a equação 2.21 (GOMES, 1999).

$$PAM = \frac{PAM_1 S_1 + PAM_2 S_2}{Ef} \quad 2.20$$

$$PAM = 100 \frac{Ne Ee l}{Ep Ef} \quad 2.21$$

Tabela 2.4: Valores estimados de percentagem de área molhada (PAM)

Tabela 1. Vazão do gotejador (L/h) e espaçamento recomendado Sg entre gotejadores (m)															
Espaçamento das linhas laterais (m) Sl	Vazão do gotejador (L/h)														
	<1,5			2,00			4,00			8,00			>12,0		
	Textura do solo e espaçamento recomendado Sg entre gotejadores (m)														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	0,20	0,50	0,90	0,30	0,70	1,00	0,60	1,00	1,30	1,00	1,30	1,70	1,30	1,60	2,00
0,80	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,00	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,20	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,50	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2,00	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,50	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3,00	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,50	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4,00	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,50	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5,00	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,00	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

G: solo com textura grossa; M: textura média e F: textura fina do solo.

Fonte: KELLER e KARMELI (1974)

Após escolhido o gotejador que garante uma PAM superior a 33%, define-se o tempo de operação do sistema para aplicar a quantidade de água requerida por planta (INp). A duração da irrigação é calculada pela Equação 2.22

$$T_o = \frac{INp}{Ne q} \quad 2.22$$

Sendo T_o a duração da irrigação (horas) e q a vazão do gotejador (litros/hora).

Para definição do tempo de operação deve-se avaliar os benefícios da tarifa de energia elétrica para irrigação noturna, que oferece em torno de 60% de desconto em relação à normal (CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, 2014).

Devido ao alto custo inicial para instalação de um sistema de irrigação por gotejamento, é interessante que a área a ser irrigada seja dividida em subunidades. Desta forma, o conjunto motobomba, cabeçal de controle, linha principal e adutora podem ter suas capacidades reduzidas, reduzindo o custo de instalação.

Na definição do número de subunidades de irrigação deve-se levar em conta as tarifas de energia elétrica da concessionária local. As tarifas de energia no horário de ponta, período composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico (ANEEL, 2010), são até cinco vezes mais caras do que fora do horário de ponta (CEMIG, 2014). Pode ser necessário um tempo para alternância entre as subunidades, quando o sistema de irrigação não for automatizado.

Feitas estas considerações o número de subunidades de irrigação é calculado pela equação 2.23 a seguir (GOMES, 1999):

$$N \leq \frac{TR Th}{T_o} \quad 2.23$$

Em que:

N = número inteiro de unidades de irrigação;

TR = turno de rega ou intervalo entre irrigações;

Th = número de horas diárias disponíveis para a irrigação; e

To = duração da irrigação.

A vazão total da instalação, para o período de máxima demanda, pode ser obtida pela equação 2.24:

$$Q = 2,778 \frac{Area \ q}{N \ Se \ Sl} \quad 2.24$$

Sendo:

Q = vazão do sistema em L/s; e

Area = área a ser irrigada em hectares;

2.3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES

A água quando flui por uma tubulação perde sua energia e pressão devido ao atrito interno com as paredes da tubulação. A essa perda dá-se o nome de perda de carga. A perda de carga em tubulações é dependente das características físicas do fluido (viscosidade e massa específica) e das características da tubulação (diâmetro interno e rugosidade absoluta das paredes internas do tubo).

A equação de Darcy-Weissbach, com bases teóricas, é a principal contribuição para o cálculo de perdas de carga (j) (BOMBARDELLI; GARCIA, 2003; CARDOSO; FRIZZONE; REZENDE, 2008; CHRISTENSEN, 2000; KAMAND, 1988), cuja forma é dada pela Equação 2.25:

$$j = f_c \frac{V_e^2}{2gD} \quad 2.25$$

Sendo:

V_e = velocidade média de circulação da água pela seção, [m/s];

g = aceleração da gravidade, [m/s²];

f_c = coeficiente de atrito, [adimensional]; e

D = diâmetro da tubulação [m].

A estimativa do coeficiente ou fator de atrito (f_c) é fundamental para o cálculo das perdas de carga na equação de Darcy-Weissbach. O cálculo do fator de atrito deve ser feito através da equação de Colebrook-White, Equação 2.26. O diagrama de Moody, Figura 2.10 também pode ser utilizado.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{R\sqrt{f_c}} \right) \quad 2.26$$

Sendo:

ε = rugosidade absoluta da tubulação;

R = número de Reynolds.

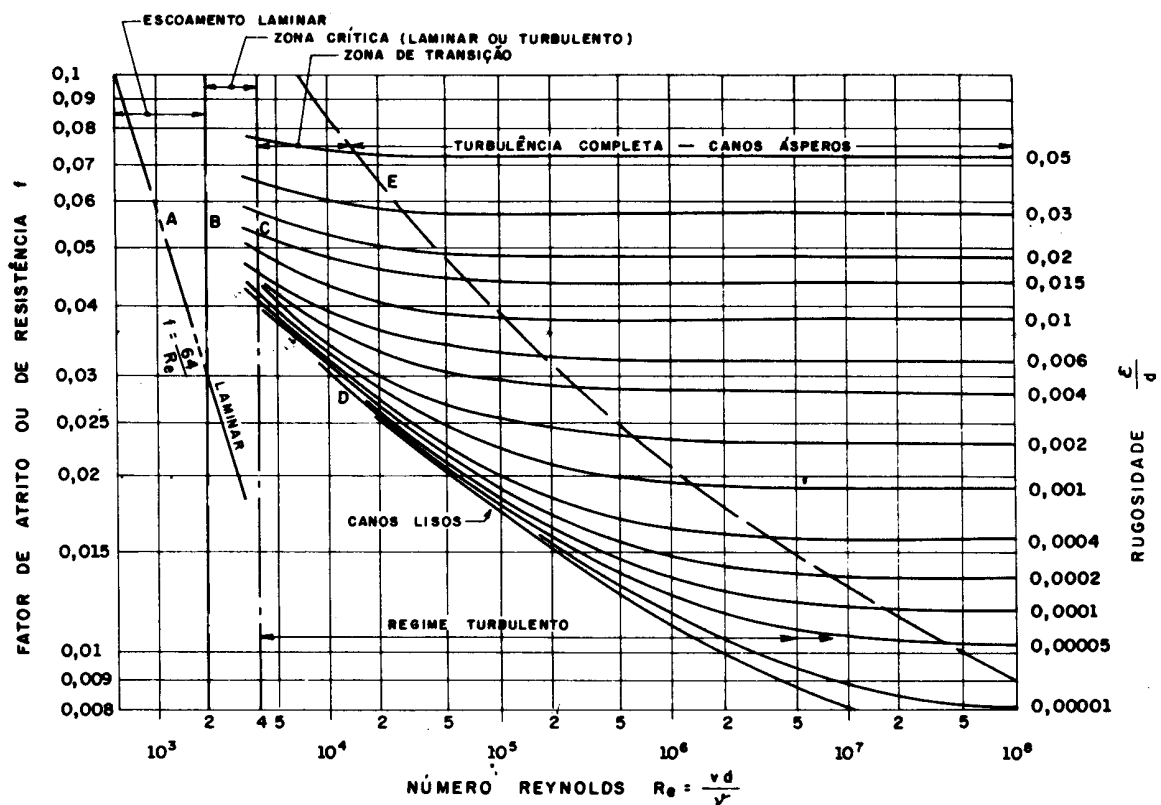


Figura 2.10: Diagrama de Moody. Fonte: (FENG, 2014)

A utilização da equação de Colebrook-White apresenta dificuldades computacionais pelo fato de não ser possível explicitar o valor do fator de atrito.

A fim de sanar esta dificuldade, formas explícitas e aproximadas para determinação do fator de atrito foram apresentadas, entre elas a de Swamme-Jain, Equação 2.29.

$$f_c = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad 2.27$$

A Tabela 2.5 apresenta valores médios para rugosidade absoluta para diferentes materiais.

Tabela 2.5: Rugosidade absoluta dos materiais.

Material	Rugosidade absoluta ε (mm)
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido velho	3 a 5
Concreto armado liso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
PVC e plásticos em geral	0,0015 a 0,010

Fonte: Porto (2006)

Para escoamento laminar, número de Reynolds (R) menor que 2000, o fator de atrito é determinado pela equação de Hagen-Poiseuille ($f_c=64/R$) sendo apenas função do número de Reynolds, Equação 2.28, o qual depende das propriedades do fluido (ν , viscosidade cinemática do líquido), do diâmetro do tubo (D) e da velocidade de escoamento (V_e) (CARDOSO; FRIZZONE; REZENDE, 2008).

$$R = \frac{V_e D}{\nu} \quad 2.28$$

Cardoso, Frizzone e Rezende (2008), propuseram o uso da equação de Blasius para escoamento turbulento, Equação 2.29, com $c=0,300$ e $m=0,25$ para

tubos de polietileno de com diâmetro entre 10,0mm e 19,7mm. Os coeficientes propostos por Blasius são $c=0,316$ e $m=0,25$.

$$f_c = \frac{c}{R^m} \quad 2.29$$

Hoje, com a evolução da computação, resolver equações implícitas não é mais um problema.

Existem algumas equações empíricas para determinação da perda de carga (j) em tubulações, que podem de maneira geral serem escritas conforme a Equação 2.34.

$$j = K \frac{Q^n}{D^m} \quad 2.30$$

Os parâmetros K , n e m são inerentes a cada formulação e faixa de aplicação, em geral com valores de k dependendo só do tipo de material da parede do conduto.

As principais equações empíricas são as de Hazen-Williams, Manning, Scimeni e Scobey (GOMES, 1999), com destaque para a equação de Hazen-Willimas.

A equação de Hazen-William, Equação 2.31, apesar de ser a mais utilizada (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008), não deve ser utilizada em todas as situações (CHRISTENSEN, 2000). Segundo Christensen (2000) a equação de Manning pode ser utilizada para determinar as perdas em canais abertos. Já a fórmula de Scimeni, de acordo com Gomes (1999) se aplica para tubos de cimento amianto e a equação de Scobey para tubulações leves.

$$j = 10,641 \frac{1}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad 2.31$$

Sendo:

j = perda de carga unitária, [mca/m];

Q = vazão, [m³/s]; e

C = coeficiente de rugosidade que depende da natureza da parede do tubo (material e estado)

Os valores indicativos médios para o coeficiente de rugosidade C da equação de Hazen-Willian são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Valores do coeficiente de rugosidade (C).

Material	Coeficiente C
Aço soldado novo	130
Aço soldado em uso	90
Cobre	130
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido usado	90
Tubos extrudados, PVC	150

Fonte: Porto (2006)

Apesar das limitações para o uso das equações empíricas, elas têm sido utilizadas com mais frequência pela facilidade de implementação. Porém, esta facilidade advém da escolha de um único fator de atrito para toda a tubulação, independente do diâmetro e velocidade de escoamento. Entretanto, a escolha de um único fator de atrito pode levar a erros na estimativa da perda de carga em uma tubulação quando comparada com a perda de carga calculada por meio da equação de Darcy-Weissbach, ou equação universal (KAMAND, 1988).

A discussão anterior sobre perda de carga é restrita ao caso de quando a água esta fluindo por uma tubulação retilínea. Porém, como se pode observar na Figura 2.5, em uma rede de distribuição de água além da tubulação são utilizados outros acessórios como registros, conexões, curvas, derivações, reduções de diâmetro entre outros.

A presença destes acessórios, necessários para operação do sistema, provoca alteração no módulo e direção da velocidade de escoamento e consequentemente da pressão no local da instalação do acessório. Esta alteração reflete num aumento da turbulência que produz perdas de carga que devem ser adicionadas as perdas que ocorrem nos trechos retilíneos. Estas perdas recebem o nome de perdas localizadas.

A perda localizada (j_l) que cada acessório provoca no sistema é estimada pela Equação 2.36

$$j_l = K_l \frac{V_e^2}{2g} \quad 2.32$$

Sendo K_l um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do material de que é feita e das condições do escoamento. A Tabela 2.7 apresenta valores médios para os valores de K_l . Vale ressaltar que estes valores podem variar de acordo com o fabricante.

Tabela 2.7: Valores do coeficiente K_l para diversos acessórios.

Acessório	K_l
Cotovelo de 90° raio curto	0,9
Cotovelo de 90° raio longo	0,6
Cotovelo de 45°	0,4
Tê passagem direta	0,9
Tê saída lateral	2,0
Válvula de gaveta aberta	0,2
Válvula globo aberta	10
Válvula de pé com crivo	10
Válvula de retenção	3
Válvula de bóia	6

Fonte: Porto (2006).

O trabalho para computar todas as perdas localizadas é árduo devido ao número elevado de acessórios presentes em tubulação. Para fins de projeto, as perdas menores causadas por curvas e derivações são estimadas em torno de 10% das perdas distribuídas. Mas as perdas causadas por peças como válvulas e filtros devem ser computadas.

2.3.3.1 LINHAS LATERAIS

Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2008) linha lateral é a linha na qual estão inseridos os emissores ou gotejadores. São constituídas de tubos de polietileno flexível, com diâmetros compreendidos entre 12 e 32 mm. Estas linhas devem ser instaladas em nível e são espaçadas ao longo da linha de derivação com distâncias determinadas em função do espaçamento entre as fileiras de plantas.

As equações citadas anteriormente para cálculo de perda de carga foram desenvolvidas para tubulações sem saídas laterais. Scaloppi (1988) definiu um fator de redução (F) para múltiplas saídas, onde a distância da primeira saída à linha de derivação é igual ao espaçamento entre as demais saídas. O fator de redução de Christiansen para múltiplas saídas é dado pela Equação 2.33.

$$F = \frac{1}{m + 1} + \frac{1}{2N_s} + \frac{(m - 1)^{0,5}}{6N_s^2} \quad 2.33$$

Sendo:

m = expoente da velocidade na fórmula para perda de carga;

N_s = número de saídas.

Scaloppi (1988) propôs um fator de correção semelhante ao de Christiansen, porém independente da distância da primeira saída ao início da linha. Sua forma é a da Equação 2.34

$$Fa = \frac{NF + x - 1}{N + x - 1} \quad 2.34$$

Sendo:

Fa = fator de redução ajustado; e

x = razão entre a distância entre a primeira saída e o espaçamento entre as demais saídas.

Desta forma, a perda de carga total (J) em uma linha lateral de comprimento L, diâmetro D, com N saídas é dada pela combinação das Equações (18) a (20), multiplicadas por L, conforme Equação 2.35.

$$J = \frac{c}{R^m} \frac{V^2}{2gD} \frac{NF + x - 1}{N + x - 1} L \quad 2.35$$

Não é comum a aquisição da bomba separada do motor. Ao contrário, no mercado encontra-se o equipamento já conectado. Entretanto, para melhor compreensão é apresentada na sequência uma descrição separada de ambos os equipamentos.

2.3.4 BOMBA HIDRÁULICA

Bombas hidráulicas são máquinas que recebem trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica, transferida ao líquido (DENÍCULI et al, 2005).

As bombas podem ser classificadas em bombas volumétricas ou de deslocamento positivo, onde a transferência de energia é resultado de variações de volume que ocorrem devido ao movimento da fronteira na qual o fluido está confinado (DENÍCULI et al., 2005; FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2006).

Existem ainda as bombas dinâmicas, onde a energia é transferida ao líquido por movimentos rotativos (DENÍCULI, 2005; FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2006). De acordo com Denículi et al (2005), estas podem ser classificadas quanto a:

- Trajetória do fluido: radiais ou centrífugas, axiais e diagonais ou de fluxo misto;
- Número de entradas para aspiração ou sucção: sucção simples ou entrada unilateral e de dupla sucção ou de entrada bilateral;
- Ao número de rotores dentro da carcaça: de simples estágio e de múltiplos estágios;
- Ao posicionamento do eixo: de eixo horizontal e de eixo vertical;
- Pressão desenvolvida: de baixa pressão (menor ou igual a 150 kPa), média pressão (entre 150 kPa e 500 kPa) e de alta pressão (maior ou igual a 500 kPa);
- Tipo de rotor: aberto, fechado e semifechado;
- Posição do eixo da bomba em relação ao nível de água: sucção positiva, quando o eixo da bomba se situa acima do nível do reservatório e de sucção negativa ou afogada.

De acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008) as principais bombas utilizadas em irrigação são as bombas dinâmicas do tipo centrífuga de eixo horizontal, que aqui serão tratadas simplesmente como bombas.

Uma bomba é caracterizada pela relação que mantém entre vazão (Q), altura manométrica (Hm), potência absorvida (P), velocidade de rotação (n) e rendimento (η). Estas grandezas associadas formam o conjunto de curvas características da bomba, conforme Figura 2.11.

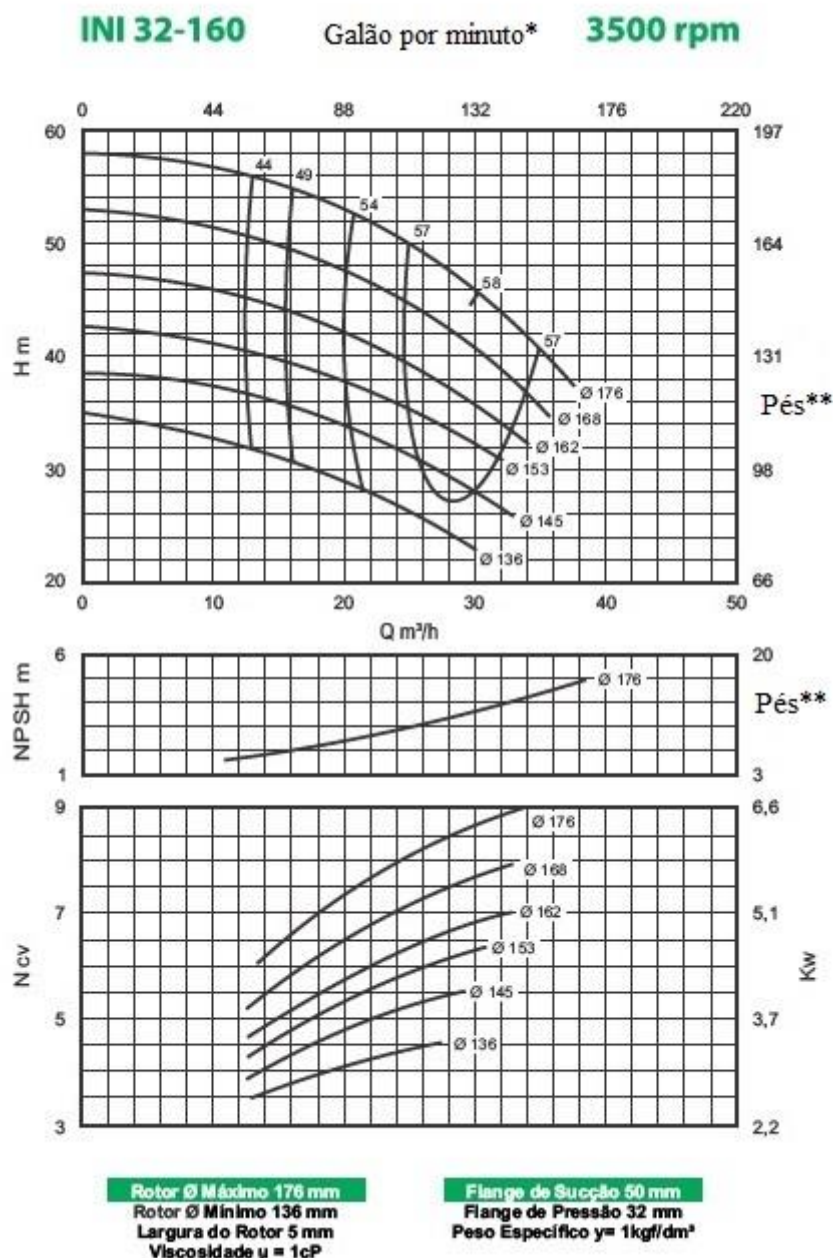
As curvas características de uma bomba podem ser alteradas em função da rotação e diâmetro do rotor conforme equações 2.36, para diâmetro (D) e rendimento constantes dentro de certos limites de variação da rotação e 2.37 para rotação e rendimento constantes (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008;

DENÍCULI et al., 2005). A relação seguinte é conhecida como relação de Rateaux.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \frac{H_{m1}}{H_{m2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad \mathbf{2.36}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}; \frac{H_{m1}}{H_{m2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2; \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad \mathbf{2.37}$$

As relações anteriores são válidas desde que as variações exercidas não excedam em 30% o valor nominal da grandeza alvo.



*1 Galão por minuto = 3,78 litros por minuto;

**1 pé = 0,30 metro

NPSH = *Net Positive Suction Head* (altura livre positiva de sucção)

Figura 2.11: curvas características de uma bomba.

Fonte: *IMBIL - Catálogo Eletrônico de Produtos (2014)*

Denículi et al. (2005) sugerem que variações de rotação não ultrapassem 30% da rotação específica e a redução do diâmetro não seja maior que 20% para que não haja reduções no rendimento e não haja problemas com cavitação.

Para seleccionar uma bomba é necessário que se se conheça a vazão a ser bombeada (Q) e a altura manométrica da instalação (H_m). Com estes dados obtém-se a curva $H_m(Q)$ da instalação, que é uma função que relaciona a altura manométrica e a vazão da instalação (AZEVEDO NETTO et al., 2000; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; DENÍCULI et al. 2005; PORTO 2006).

O ponto de funcionamento ou de operação da bomba será a intersecção da curva da instalação com a curva da bomba, conforme ilustra a Figura 2.12. (AZEVEDO NETTO et al., 2000; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; DENÍCULI et al. 2005; PORTO 2006).

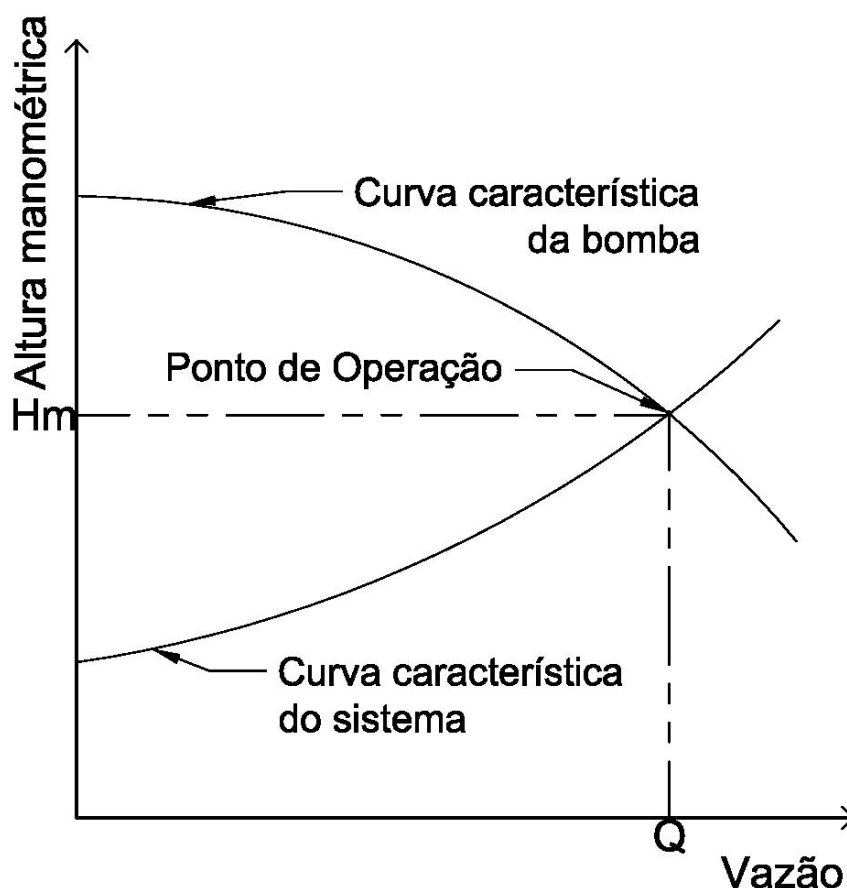


Figura 2.12: Ponto de operação de uma bomba.

As bombas devem ser seleccionadas de tal forma que operem próximo à zona de máximo rendimento (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008). Ao

selecionar uma bomba, deve-se também levar em consideração facilidade de aquisição e reposição de peças e custo (BIER; SOUZA; BOAS, 2004).

A potência útil da bomba (P_u) pode ser determinada pela equação 2.38 (DENÍCULI et al. 2005; OLIVEIRA FILHO et al., 2010).

$$P_u = \frac{Q H_m}{75} \quad 2.38$$

Sendo:

P_u = potência útil da bomba [cv];

Q = vazão bombeada [$L s^{-1}$]; e

H_m = altura manométrica [mca].

A potência absorvida pela bomba (P_a) leva em consideração seu rendimento (η_B), e é a potência necessária no seu eixo (DENÍCULI et al, 2005; OLIVEIRA FILHO et al., 2010).

$$P_a = \frac{Q H_m}{75 \eta_B} \quad 2.39$$

Andrade, Allen e Wells (2001) desenvolveram um modelo computacional para combinar curvas de bombas em série e em paralelo e para determinar o desempenho da estação de bombeamento e das bombas que a compõem.

Existem diversos trabalhos que objetivam o desenvolvimento de ferramentas para seleção de bombas para irrigação (ALANDI et al. 2005; BIER; SOUZA; BOAS, 2004; MAHAR; SINGH, 2014; MORADI-JALAL; MARIN; AFSHAR, 2003; SANTOS, 2001).

2.3.5 MOTORES

O motor é responsável por transformar energia elétrica em energia mecânica, que será utilizada pela bomba.

Os motores são divididos em dois tipos: de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA) (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003).

Os motores CC são divididos em imã permanente (com escova e sem escova) e rotor bobinado. Em um motor de corrente contínua de imã permanente, nenhuma energia é consumida nos enrolamentos de campo, o que leva a uma maior eficiência. A alta eficiência, aliada com sua simplicidade e baixa manutenção (para motores sem escova), torna deste tipo de motor atrativo para pequenas instalações fotovoltaicas (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003).

A Figura 2.13 mostra as curvas características de um motor CC.

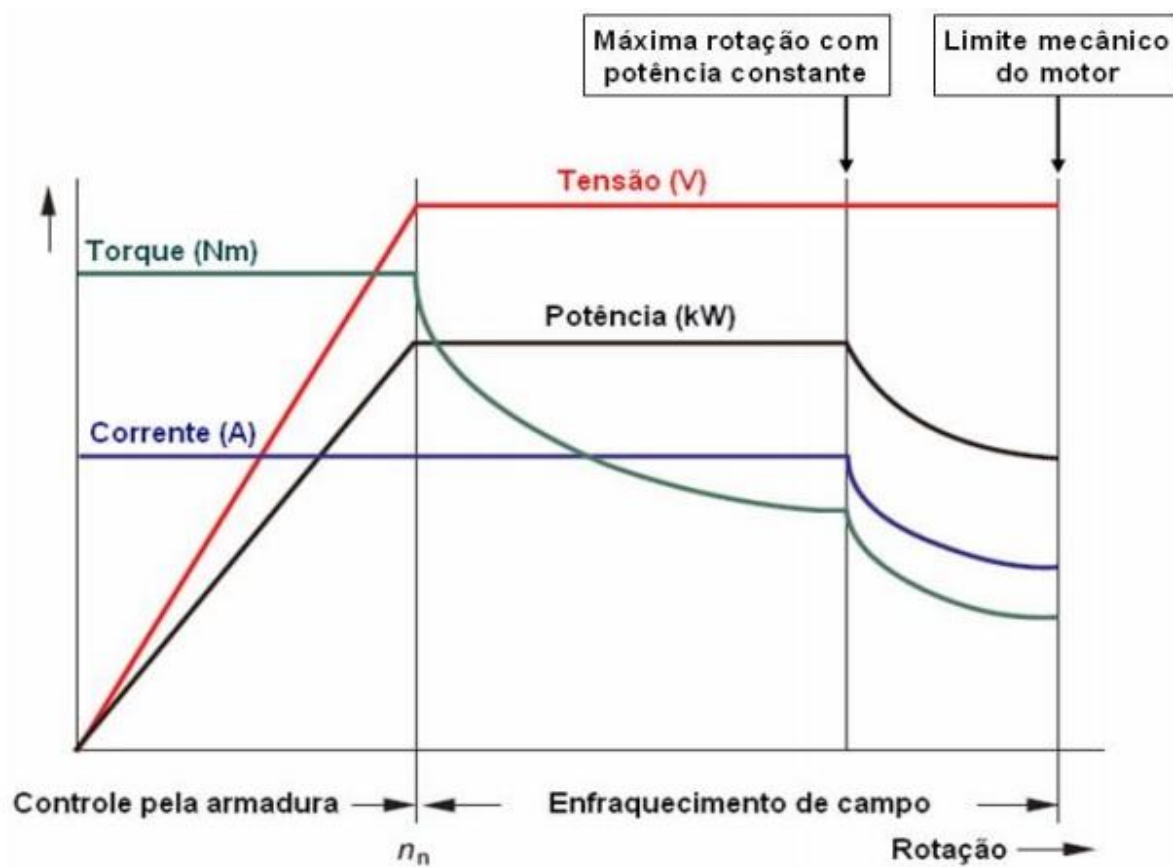


Figura 2.13: Curvas características de um motor CC. Fonte: HONDA (2006)

Os motores CA são concebidos para serem alimentados diretamente pela rede de energia convencional, além de serem mais baratos do que os motores de corrente contínua. Isto leva a uma grande faixa de potência e variedade de modelos disponíveis no mercado. No entanto, os motores CA são menos eficientes do que os motores de corrente contínua.

Os motores de indução podem ter seus rotores em dois tipos: gaiola de esquilo e rotor bobinado. O tipo mais simples e mais barato de motor CA é o motor de indução de gaiola de esquilo. Seu baixo custo e robustez o tornam o motor mais utilizado (ARGAW; FOSTER; ELLIS, 2003).

Motores CA são geralmente utilizados para aplicações que demandam média e alta potência. Os motores de indução com rotor de gaiola estão disponíveis em monofásico ou trifásico. A Figura 2.14 apresenta as curvas características de um motor de indução.

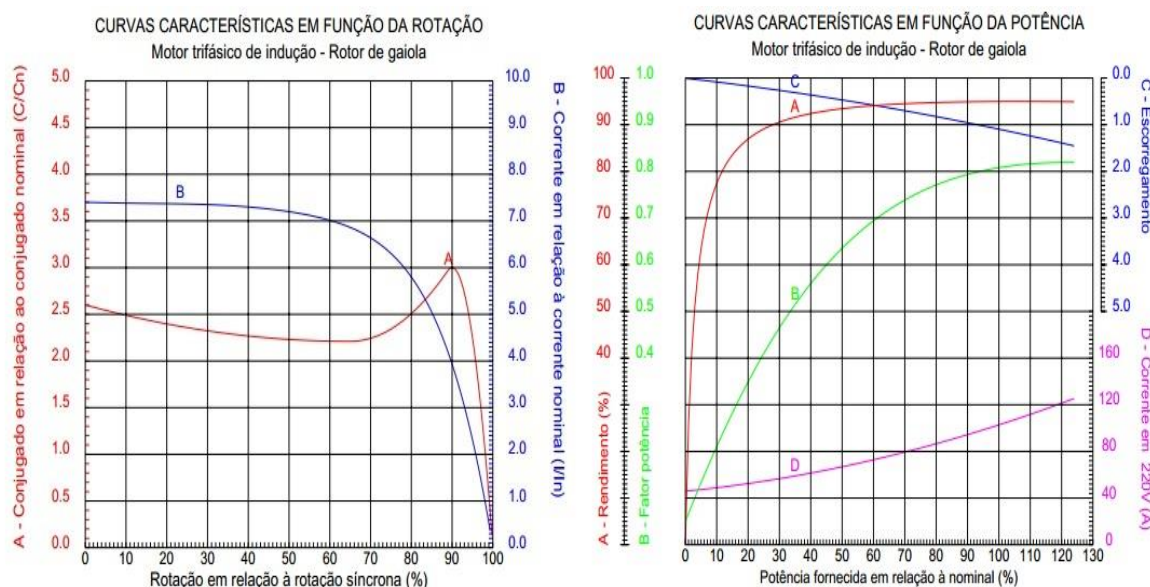


Figura 2.14: curvas características de um motor de indução. Fonte: WEG (2014)

Um motor de indução opera a uma velocidade quase constante. No entanto, a velocidade de um motor de indução pode ser controlada com inversores estáticos de frequência, ou simplesmente inversores (ARGAW; FOSTER; ELLIS 2003).

A utilização de inversores estáticos de frequência atualmente compreende o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis (WEG, 2014).

Para Campana et al. (2000) a utilização de inversores de frequência se apresenta como uma forte alternativa técnica para a racionalização de energia em sistemas de irrigação via adequação de força motriz.

A potência absorvida pelo motor é dada pela equação 2.40 (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008; OLIVEIRA FILHO et al. 2010):

$$P_m = \frac{Q H_m}{75 \eta_B \eta_M} \quad 2.40$$

Onde P_m é a potência absorvida pelo motor (CV) e η_M é a eficiência do motor em decimal. Deve-se escolher um motor com potência nominal imediatamente superior à potência dada pela Equação 2.40.

Segundo Denículi et al. (2005) os valores de potências nominais de motores disponíveis no mercado são os apresentados na Tabela 2.8 seguinte:

Tabela 2.8: Potências comerciais para motores elétricos (cv).

1/4	1/3	1/2	3/4	1	1 1/2	2
3	5	6	7 1/2	10	12	15
20	25	30	35	40	45	50
60	100	125	150	200	250	300

Fonte: Denículi et al. (2005)

No capítulo seguinte, Materiais e Métodos, dentre os métodos descritos anteriormente, serão aplicados os que melhor se adequam para o dimensionamento de um sistema de irrigação na região do Alto Paranaíba Mineiro.

3 Materiais e Métodos

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As rotinas de cálculo foram desenvolvidas no software Octave 3.8.1. Para seleção de gotejadores e bombas, utilizou-se de catálogos de fabricantes.

Durante a execução do programa o usuário deve escolher entre nove culturas pré-cadastradas, sendo elas: feijão, soja, milho, arroz, cana de açúcar, banana, café, cítricos e uva.

Para análise das rotinas desenvolvidas, foi dimensionado um sistema de irrigação para uma plantação de café em uma área de dez hectares, com dimensões de duzentos por quinhentos metros. O espaçamento entre plantas é de 0,60 metros e entre linhas de 3,7 metros. A área foi considerada como plana e a altura de recalque (desnível geométrico entre o bocal de sucção da bomba e o local a ser irrigado) como 40 metros, sendo que a tubulação de recalque possui 200 metros. A altura de sucção é de 5 metros.

3.2 PROJETO AGRONÔMICO

Para elaborar um projeto de irrigação, primeiramente é necessário que se conheça o local a ser irrigado. Suas dimensões, desníveis e tipo de solo devem ser conhecidos. A cultura e sua disposição no campo (espaçamento entre plantas) também devem ser conhecidas. De posse das informações anteriores, pode-se começar a desenvolver o projeto.

O primeiro passo é determinar quanto e como será aplicada a água. Neste primeiro momento é calculada a lâmina a ser aplicada, o turno de rega e é selecionado o emissor que atende as necessidades do projeto.

Para determinar a lâmina requerida é utilizada a Equação 2.17, aqui repetida.

$$IN_B = \frac{ET_L}{Ea\ CUD} \quad 2.17$$

Com a evapotranspiração da cultura corrigida para irrigação localizada dada pela Equação 2.14.

Para cálculo da ETo foi utilizada a equação de Penman-Monteith (Equação 2.2) com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes à estação meteorológica de Patos de Minas, MG. As coordenadas da estação são latitude 18.51°S e longitude 46.43°O. A altitude do local é 940.28 metros.

Os dados (Anexo III) são médias mensais e referem-se ao período de dez anos compreendidos entre 01/01/2004 e 31/12/2013.

Fixando o turno de rega em quatro dias, a irrigação real necessária é calculada através da Equação 2.19.

Para escolha da vazão do emissor, é utilizada a

Tabela 2.4, atentando para o fato que a PAM deve ser maior que 33% a fim de evitar tombamento de árvores devido à má distribuição das raízes.

Determinada a vazão do gotejador (emissor), calcula-se quanto tempo o sistema deve operar a fim de aplicar a lâmina de água real necessária. Para isto utiliza-se da combinação das equações 2.18 e 2.22.

O tempo disponível para irrigação (Th) será de 20 horas por dia (3 horas de pico mais 1 hora para manutenção, troca de setores). Desta forma, a fim de diminuir os custos com instalação, a área a ser irrigada é dividida em setores conforme Equação 2.23. Caso se opte apenas pela irrigação noturna, o Th seria de 9 horas por dia.

A vazão total do sistema foi definida utilizando a Equação 2.24.

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES

O dimensionamento das tubulações de um sistema de irrigação por gotejamento se executa no sentido inverso do fluxo d'água na rede de distribuição. A perda de carga ao longo das tubulações foi calculada por meio da equação de Hazen-Williams (Equação 2.31). As perdas localizadas causadas por curvas e derivações foram estipuladas como 10% das perdas obtidas para a tubulação retilínea.

3.3.1 LINHAS LATERAIS

Como regra empírica para dimensionamento de linhas laterais, utiliza-se a regra dos 20% que diz que a diferença máxima de carga entre dois gotejadores não ultrapasse 20% da pressão nominal adotada para os mesmos. Desta forma, a vazão entre os gotejadores não varia mais que 10%.

A regra dos 20% pode ser expressa de quatro formas distintas, em função do desnível geométrico.

Linha lateral sem declividade ($\Delta Z = 0$): $hf \leq 0,20h$.

Linha lateral ascendente ($\Delta Z > 0$): $hf + \Delta Z \leq 0,20h$.

Linha lateral descendente ($\Delta Z < hf$): $hf - \Delta Z \leq 0,20h$.

Linha lateral descendente ($\Delta Z > hf$): $\Delta Z - hf \leq 0,20h$.

Após definida a perda de carga máxima admitida na linha lateral (hf) o diâmetro da linha foi determinado pela Equação 3.1.

$$D = \left[10,641 \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85} \frac{LF}{h_f} \right]^{0,205} \quad 3.1$$

A pressão requerida na entrada da linha lateral é dada pela Equação 3.2.

$$H_L = h + 0,75 h_f \pm \frac{\Delta Z}{2} \quad 3.2$$

Em que:

HL = pressão requerida na entrada da linha lateral, em mca.

h = pressão nominal dos gotejadores, em mca.

hf = perda de carga ao longo da linha lateral, em mca.

$\pm\Delta Z/2$ = diferença de carga estática média devido ao desnível geométrico da linha lateral, em metros. Ascendente (+), descendente (-).

3.3.2 TUBULAÇÃO DE DERIVAÇÃO

A tubulação de derivação é onde são conectadas as linhas laterais. Seu comportamento hidráulico é semelhante ao da linha lateral. Portanto, deve-se utilizar a equação 3.2 anterior substituindo a pressão nominal dos gotejadores pela pressão requerida na entrada da linha lateral.

3.3.3 TUBULAÇÃO PRINCIPAL

A tubulação principal é responsável por conduzir toda a água para a irrigação. Definindo a velocidade (V_e) admissível entre 1,0 e 2,0 m/s, o diâmetro (D), em metros, da tubulação principal é dado pela Equação 3.3.

$$Q = AV_e \rightarrow D = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi V_e}} \quad 3.3$$

Sendo Q a vazão total da instalação dada pela equação (14) em metros cúbicos por segundo (m^3/s).

3.4 CONJUNTO MOTOBOMBA

A potência do conjunto motobomba foi determinada a partir das equações 2.38 e 2.39. Para seleção do conjunto que melhor atendesse os requisitos de projeto foram utilizados catálogos eletrônicos dos fabricantes (Franklin Electric e Imbil).

Os resultados obtidos com o programa desenvolvido são apresentados e discutidos no capítulo seguinte.

4 Resultados e Discussão

A execução do programa, para a cultura do café, forneceu os valores de evapotranspiração, os quais estão apresentados na Figura 4.1. Para o período considerado, a evapotranspiração máxima foi de 4,06 mm/dia. Este valor foi utilizado para dimensionamento do sistema de irrigação. A partir da Figura 4.1 pode-se perceber o comportamento cíclico da evapotranspiração.

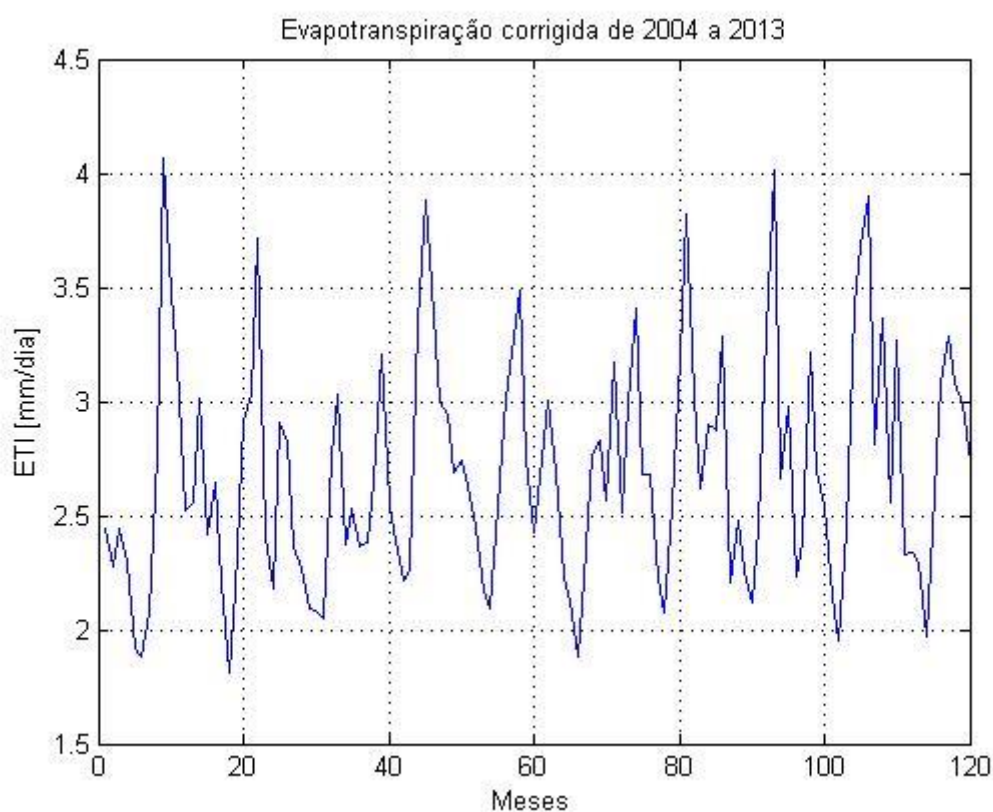


Figura 4.1: Evapotranspiração para a cultura do café com irrigação localizada no município de Patos de Minas, MG.

A Figura 4.2 apresenta a evapotranspiração média de cada mês para o período considerado. Pode-se ver que a máxima evapotranspiração ocorre no mês de setembro.

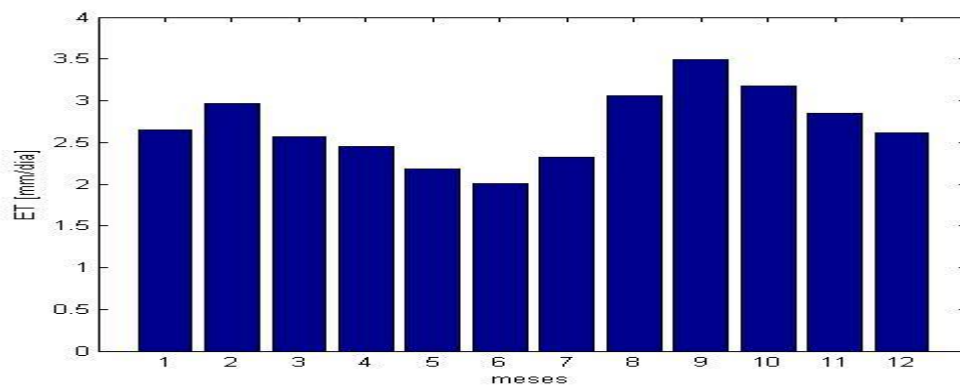
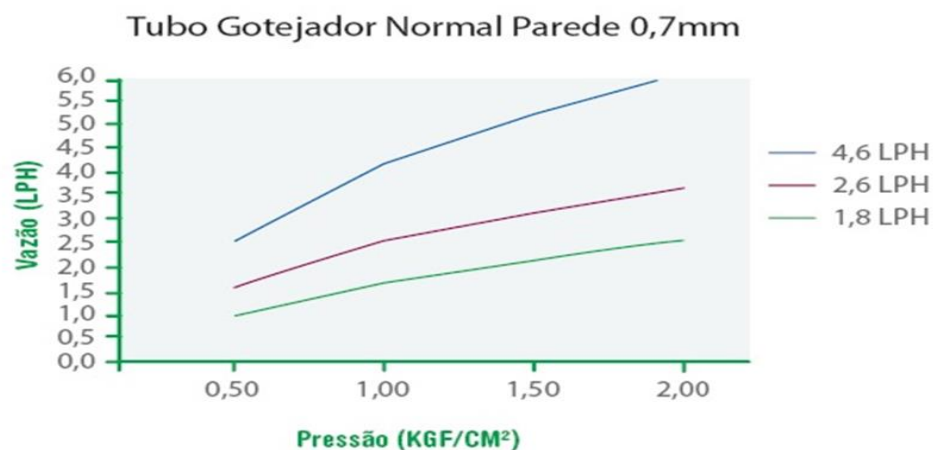


Figura 4.2: Evapotranspiração mensal média.

A quantidade de água requerida por planta foi de 5,7104 litros por dia. Com a irrigação necessária foi escolhido o gotejador que atendesse as necessidades do projeto. O gotejador escolhido foi o tubo gotejador da Amanco 15159. Suas características estão na Figura 4.3.



Código	Tipo AC ou N	DN	Q (vazão)	Parede	ESP
13514	N	16	2,6	0,7	0,30
15065	N	16	2,6	0,7	0,33
17401	N	16	2,6	0,7	0,35
15540	N	16	2,6	0,7	0,40
15544	N	16	2,6	0,7	0,45
15057	N	16	2,6	0,7	0,50
13963	N	16	2,6	0,7	0,55
15159	N	16	2,6	0,7	0,60
13964	N	16	2,6	0,7	0,65
13965	N	16	2,6	0,7	0,70
15058	N	16	2,6	0,7	0,75
15155	N	16	2,6	0,7	0,80
17402	N	16	2,6	0,7	0,85
15069	N	16	2,6	0,7	0,90
13967	N	16	2,6	0,7	0,95
13968	N	16	2,6	0,7	1,00
17403	N	16	2,6	0,7	1,05
17404	N	16	2,6	0,7	1,10
17405	N	16	2,6	0,7	1,15
17406	N	16	2,6	0,7	1,20
13973	N	16	2,6	0,7	1,25
17407	N	16	2,6	0,7	1,30
17408	N	16	2,6	0,7	1,35
17409	N	16	2,6	0,7	1,40
17410	N	16	2,6	0,7	1,45
17462	N	16	2,6	0,7	1,50

Figura 4.3: Características do tubo gotejador Amanco. Fonte: Catálogos Amanco.
AC: Auto Compensante; N: Normal; DN: Diametro Nominal; Q: Vazão em litros por hora; Parede: espessura da parede em milímetros; ESP: Espaçamento entre gotejadores.

Com o gotejador escolhido, definiu-se o tempo de operação por meio da Equação 2.22 e o número máximo de setores com a Equação 2.23. O programa permite que o número de setores seja escolhido pelo usuário como o máximo ou

outro valor. Neste caso, o número máximo de setores é 9, mas por maior facilidade em dividir a área em partes iguais, optou-se por 8 setores.

O tempo de operação por setor foi de 2,2 horas, ou 2 horas e 12 minutos. Desta forma, o sistema trabalha dezessete horas e trinta e seis minutos por dia.

A vazão total do sistema em litros por segundo é de 4,07 calculada utilizando a Equação 2.24. A altura manométrica total é de 95,87 mca. A Figura 4.4 apresenta o resumo dos dados gerados pelo programa para o dimensionamento do sistema em questão.

Tubulação		
	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
Linha Lateral	84	13.8
Linha de Derivação	100	63
Linha Principal	415	63
Linha de Recalque	200	63
Linha de Sucção	10	75

Motobomba		
Vazão	4.0669	l/s
Altura Manométrica Total	95.8737	mca
Potência Necessária para a Bomba	8.6646	cv
Potência Comercial do Motor	10	cv
Carregamento do Motor	94.1807	%

Manejo		
Turno de Rega	1	dia
Lâmina	4.0671	mm
Vazão do Gotejador	2.6	l/h
Tempo de Operação por Setor	2.1963	h
Tempo de Operação por dia	17.5704	h
Área por Setor	1.25	ha
Área Total	10	ha

Figura 4.4: resultado do dimensionamento.

Com o índice de carregamento alcançado (94,18%) o motor opera com fator de potência próximo a 0,85, conforme observa-se na Figura 4.5.

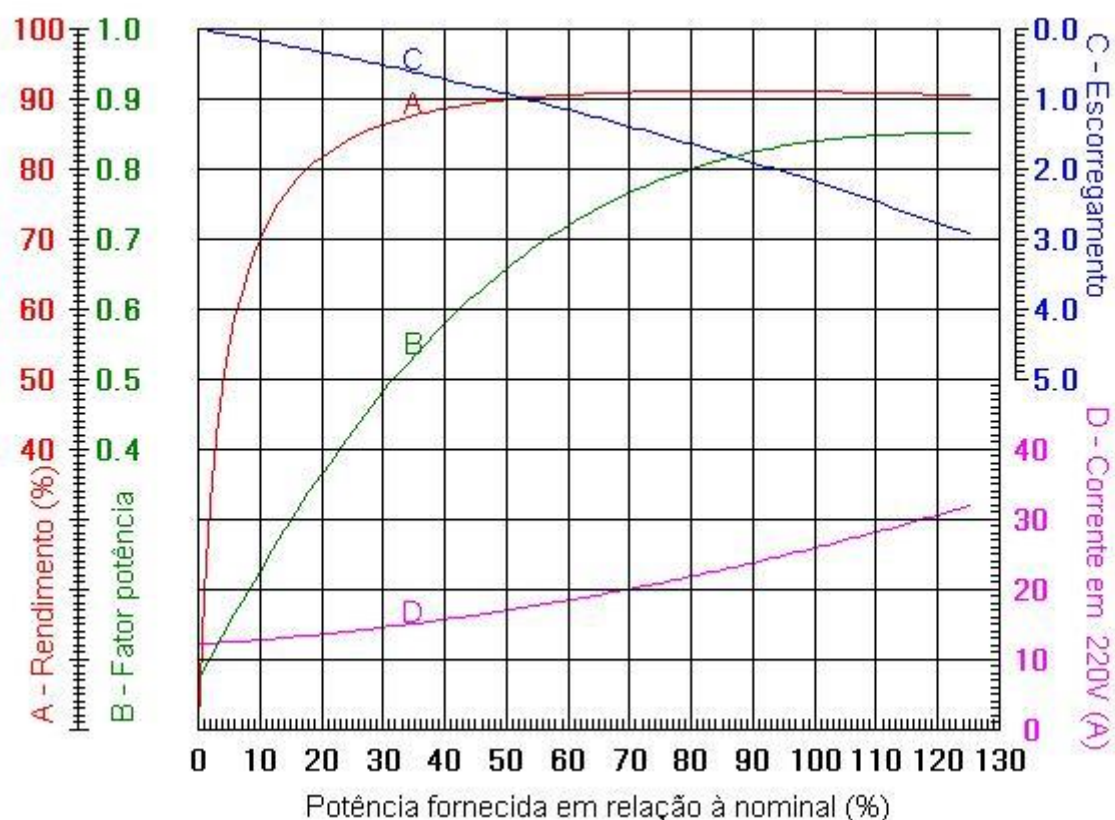


Figura 4.5: Curvas características de um motor de 10 cv.

Para este mesmo motor foi simulado um mês de operação. O mês escolhido foi o mês de setembro que apresentou a maior evapotranspiração para o período analisado. Utilizando as tarifas da Cemig disponíveis na Tabela 4.1, considerando que o consumidor opte pela tarifa de irrigante, os gastos com energia elétrica para o mês de setembro seriam de R\$ 375,54, desconsiderando gastos com energia reativa.

Foi analisado o uso de um motor com potência nominal imediatamente acima da potência determinada no projeto, ou seja, 12,5 cv. A escolha deste motor com potência superior causaria um aumento de gastos com energia ativa de quase R\$100,00 para o mês de setembro, elevando os gastos para R\$ 469,63. O motor também trabalharia com carregamento inferior (77%) o que provocaria uma queda no fator de potência para abaixo de 0,80 elevando desta forma os gastos com energia reativa e seu suprimento. Além dos gastos já citados, o custo de aquisição do motor também é maior quanto maior a potência nominal do mesmo.

Entretanto, o rendimento da máquina continuaria próximo a 90%. Portanto, o rendimento não é um bom indicativo para verificar se uma máquina está trabalhando próxima à sua capacidade nominal, sendo mais adequado o fator de potência.

Tabela 4.1: Tarifas Rurais Cemig. Fonte: Cemig (2014)

Tarifas praticadas				
Classe	Tarifa sem impostos	Tarifa com PASEP COFINS SEM o ICMS	Tarifa com PASEP COFINS COM o ICMS	Observações
Rural Normal	0,25272	0,265406	0,327273	-
Rural Vale Jequitinhonha (Irrigação noturna) 73% de desconto	0,06823	0,071655	-	Atenção - Sobre o consumo realizado no horário normal incide 18% de ICMS e para o consumo no horário noturno está isento de ICMS.
Rural Demais Regiões (Irrigação noturna) 67% de desconto	0,08339	0,087587	0,100639	Atenção - Sobre o consumo realizado no horário normal incide 18% de ICMS e para o consumo no horário noturno há incidência de 12% de ICMS.

A seguir, nas Figuras Figura 4.6 e Figura 4.7 são apresentadas as telas do programa em execução, onde pode-se ver o passo para o dimensionamento do sistema.

```
Digite o número correspondente à cultura.
1 = Feijão
2 = Soja
3 = Milho
4 = Arroz
5 = Cana de açúcar
6 = Banana
7 = Café
8 = Cítricas
9 = Uva
Cultura = 7
Turno de Rega:1
Lâmina: 4.0671
Espaçamento entre plantas:0.6
Espaçamento entre fileiras:3.7
Lâmina por planta: 5.7104 litros por dia
Vazão do gotejador:2.6
Horas disponíveis por dia para irrigação: 21
Número máximo de setores: 9
Utilizar o número máximo de setores ? 1 -Sim, 2 -Não2
Número de setores: 8
Tempo de operação: 2.1963 horas
Area em hectares:10
```

Figura 4.6: Primeira tela do programa.

```
Desnível em metros nas linhas laterais: 0
Comprimento máximo permitido: 94.8 metros
Qual o tamanho das linhas laterais? 84
Pressão requerida na entrada das linhas laterais: 11.0798 mca
Qual o tamanho das linhas de derivação? 100
Qual a declividade do terreno em % ? 0
Diâmetro nominal da linha principal: 63 mm
Comprimento da linha principal: 415
Desnível em metros na linha principal: 0
Comprimento da linha de recalque: 200|
Desnível em metros entre a bomba e a area a ser irrigada: 40
Comprimento da linha de sucção: 10
Desnível em metros na sucção: 5
Altura Manométrica Total (Hman): 95.8737 mca

Vazão de projeto: 4.0669 litros por segundo)
|
```

Figura 4.7:Segunda tela do programa.

Na sequência, são apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho desenvolvido assim como sugestões para trabalhos futuros.

5 Conclusões

O programa desenvolvido é uma ferramenta capaz de auxiliar projetistas a desenvolverem projetos de sistemas de irrigação com facilidade e acurácia satisfatória. Os dados são requeridos à medida que se desenvolve o projeto, possibilitando simular situações diferentes para determinadas variáveis.

O dimensionamento de sistemas de bombeamento de água deve ser executado por pessoal capacitado. No projeto simulado neste trabalho, a utilização de um motor de potência nominal imediatamente superior à projetada provocou aumento de gastos com energia elétrica de aproximadamente 25%.

Para trabalhos futuros pretende-se criar um banco de dados, com espaçamento e coeficiente de cultura dos cultivos mais praticados no Brasil.

Além das culturas, pretende-se desenvolver um banco de dados com bombas, emissores e outros equipamentos utilizados em irrigação.

Referências Bibliográficas

ABID - Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem. **Curva típica do Kc para culturas de ciclo anual**. Disponível em:

<http://www.abid.org.br/kc/curva.html>. Acesso em 17 de junho de 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Equipamentos de irrigação agrícola. Emissores e tubo emissores. Especificações e métodos de ensaio**. Brasil, 2005.

ALANDI, P. P. et al. Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p.273–281, 2005.

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. Evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.117, p.758–773, 1991.

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, L. F. C.; OLIVEIRA, A. M.. Verificação das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.523-525, 2002

ANDRADE, C. D. L. T. DE; ALLEN, R. G.; WELLS, R. D. PUMPCOM - um modelo para combinação de curvas e análise do desempenho de bombas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.403–410, 2001.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Estabele as condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada**. Resolução normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração**. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=37&idPerfil=2>. Acesso em 14 de setembro de 2014.

ARGAW, N.; FOSTER, R.; ELLIS, A. **Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Areas**, NREL/SR-500-30361, 2003.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. **Design and Installation of Microirrigation Systems**. EP405.1., USA: 2003.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Blucher, 2000. 669 p.

BARBOZA JÚNIOR, C. R. A.. **Evapotranspiração e sua medida por lisímetro de pesagem**. Piracicaba, 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.

BIER, V. A.; SOUZA, E. G. DE; BOAS, M. A. V. Programa computacional para seleção de conjuntos moto-bomba. **Irriga**, v.9, p.225–234, 2004.

BOMBARDELLI, A.; GARCIA, M. H. Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.129, p.839–846, 2003.

CAMPANA, S. et al. Inversores de frequência – uma alternativa para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação pivô central. In **3 Encontro de Energia no meio rural**. Campinas, 2000.

CARDOSO, G. G. G.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.299–305, 2008.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de Tarifas e Serviços**. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx. Acesso em 14 de julho de 2014.

CHRISTENSEN, B. A. Limitations and proper use of the Hazen-Williams Equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.126, p.167–170, 2000.

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, Ano XXII, p.115–127, 2013.

DENÍCULI, W. et al. **Bombas Hidráulicas**. Viçosa: Editora UFV, 2005. 270 p.

FAO - Food and Agriculture of the United Nations. **Irrigation Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation**. Harare, 2002.

FERNANDES, A. L. T. **Gotejamento enterrado em café**. Café Point 2013. Disponível em: <http://www.cafepoint.com.br/radares->

tecnicos/irrigacao/gotejamento-enterrado-em-cafe-86311n.aspx. Acesso em 12 de julho de 2014.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Mecânica dos Fluidos**. LTC, 2006. 798 p.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999. 412 p.

HERNANDEZ, F. B. T. **Noções da elaboração de projetos de irrigação**. UNESP 1999. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/projeto.htm>. Acesso 16 de julho de 2013.

HONDA, F. **Motores de corrente contínua: Guia rápido para uma especificação precisa**. *SIEMENS LTDA 2006*. Disponível em: www.siemens.com.br/motores. Acesso 7 de maio de 2014.

HOWELL, T. A. Irrigation Efficiency. **Encyclopedia of Water Science**, p.467–472.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2012.

IMBIL - Soluções em bombeamento: Catálogo Eletrônico de Produtos. Disponível em: <http://www.imbil.com.br/Imbil/Portugues/>. Acesso em 21 de março de 2014.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **American Society of Agricultural Engineers**, v.17, p.678–684, 1974.

KISI, O. Comparison of Different Empirical Methods for Estimating Daily Reference Evapotranspiration in Mediterranean Climate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, p.1–8, 2014.

MAHAR, P. S.; SINGH, R. P. Optimal Design of Pumping Mains Considering Pump Characteristics. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v.5, p.1–6, 2014.

MORADI-JALAL, M.; MARIN, M. A.; AFSHAR, A. Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Stations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.129, p.149–154, 2003.

MORAES, M. J.; OLIVEIRA FILHO, D.; VIEIRA, G. H. S.; SCARCELLI, R. O. C.. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental [online]**. 2011, vol.15, p. 875-882.

OLIVEIRA FILHO, D. et al. Dimensionamento de motores para o bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.1012–1022, 2010.

OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; RIBEIRO, M. C. Racionalização energética de uma estação de pressurização de um perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental**, v.8, p.135–143, 2004.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.

SANTOS, W. L. Dos. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Representação Analítica de Curvas Características de Bombas Hidráulicas, Visando sua Seleção, seu Dimensionamento e a Simulação de sua Operação**. 2001. 69 f. (Doctor Scientiae). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SCALOPPI, E. J. Adjusted F Factor for Multiple-Outlet Pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, p.169–174, 1988.

SOUZA, L. O. C. et al. Porcentagem de área molhada em sistemas de irrigação por gotejamento, utilizados na cafeicultura irrigada. In SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL. **Anais**. 2006. p. 859–862.

SOUZA, J. L. M.; FRIZZONE, J. A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada. III Análise de risco econômico da cafeicultura em dois sistemas de irrigação. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, p. 399-408, 2003.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. S.; PAVANI, L. C.. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. **Engenharia Agrícola**. vol.29, p. 311-320, 2009.

WEG - Equipamentos Elétricos S.A. **Guia Técnico - Motores de indução alimentados por inversores de frequência**. Disponível em: www.weg.net. Acesso 9 de dezembro de 2013.

YODER R, ODHIAMBO L, WRIGHT W. Effects of vapor–pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized penman–monteith equation in a humid climate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p.228–37, 2005

ANEXO I

EFEITO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO DA PRESSÃO REAL DE VAPOR SOBRE A PRECISÃO DA EQUAÇÃO DE PENMAN-MONTEITH NA REGIÃO DO ALTO PARANAÍBA MINEIRO

T.S. Teixeira¹, J.R. Camacho²

¹ Engenheiro Eletricista, Pós-Graduando, UFU, tiago.steixeira@yahoo.com.br

² Engenheiro Eletricista, Professor Titular, UFU, jrcamacho@ufu.br

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental em projetos de irrigação, seja para implantação ou manejo. O método considerado referência para isto é a equação de Penman-Monteith. Entretanto, alguns dos parâmetros desta equação possuem mais de uma forma de serem estimados. Neste trabalho foram analisadas oito equações para cálculo da pressão real de vapor (e_a) e seus efeitos sobre a estimativa da ET_o. Foram avaliados o erro médio quadrático e o erro médio absoluto em relação ao valor fornecido pelo programa CROPWAT 8.0, utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes à estação meteorológica de Patos de Minas, MG. Os melhores resultados foram obtidos pela equação que utiliza dados psicrométricos, temperatura de bulbo seco e úmido, e dados médios de temperatura e umidade relativa. Os resultados mais discrepantes foram registrados com a equação que relaciona temperatura máxima e umidade relativa mínima.

PALAVRAS-CHAVE: EVAPOTRANSPIRAÇÃO, IRRIGAÇÃO, DADOS CLIMATOLÓGICOS

EFFECT OF THE CALCULATION METHODS OF REAL PRESSURE STEAM ON THE ACCURACY OF THE EQUATION OF PENMAN-MONTEITH IN THE REGION OF ALTO PARANAÍBA MINEIRO

ABSTRACT: The estimation of the reference evapotranspiration (ET_o) is crucial in irrigation projects, either for implementation or management. The reference method considered is the Penman-Monteith equation. However, some of the parameters of this equation have more than one way to be estimated. In this work eight equations for calculating the actual vapor pressure (e_a) and their effects on the estimation of ET_o were analyzed. The mean square error and mean absolute error were evaluated from the value provided by CROPWAT 8.0 software, using data from the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) regarding the weather station in Patos de Minas, MG. The best results were obtained by the equation that uses psychrometric data, temperature of dry and wet bulb, and average data of temperature and relative humidity. The most discrepant results were recorded with the equation relating maximum temperature and minimum relative humidity.

KEYWORDS: EVAPOTRANSPIRATION, IRRIGATION, CLIMATOLOGICAL DATA

INTRODUÇÃO: Para o correto funcionamento de um sistema de irrigação é fundamental que seja conhecida a quantidade de água que a cultura em questão necessita para seu completo crescimento.

Sistemas de irrigação superdimensionados se tornam mais onerosos, elevando o custo de produção além de aplicarem água em excesso trazendo problemas à cultura e ao solo. Já a subestimação da quantidade de água necessária pode levar a projetos que não atendem toda a área prevista inicialmente (BERNARDO, 2008).

Evapotranspiração (ET) refere-se à combinação de dois processos distintos de perda de água, sendo eles a evaporação de água pela superfície do solo e pela transpiração das plantas (ALLEN et al., 1998). Dá-se o nome de Evapotranspiração de Referência (ET_o) à ET de uma cultura de referência hipotética de 0,12m, com uma resistência superficial de 70 s.m⁻¹ e um albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998).

Existem várias equações para determinar a ET_o, dentre elas pode-se citar as equações de Valiantzas, Turc, Hargreaves-Samani, Hargreaves, Ritchie e a equação de Irmak (KISI, 2014). Entretanto, o método considerado como referência pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO) é a equação de Penman-Monteith (PM) (ALLEN et al., 1998).

A equação de PM estima a ET_o a partir de dados de velocidade do vento, horas de sol, temperatura do ar, umidade relativa, altitude e latitude. Uma das variáveis que são determinadas a partir desses dados é a pressão real de vapor (e_a). Os métodos mais comuns para cálculo da e_a são dados pelas equações (3) a (10) (YODER, 2005; ALLEN et al., 1998). Neste trabalho será feito um estudo dos valores de ET_o obtidos a partir dos valores de e_a calculados através dos oito métodos.

MATERIAL E MÉTODOS: A equação de PM para cálculo da ET_o é dada pela seguinte fórmula:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left[\frac{900}{(T + 273)} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

onde,

ET_o – evapotranspiração de referência, mm.dia⁻¹

Δ – declividade da curva de pressão de vapor, KPa;

Rn – saldo de radiação à superfície, MJm⁻²dia⁻¹;

G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻²dia⁻¹;

γ – constante psicrométrica, KPa°C⁻¹;

T – temperatura do ar a 2 metros de altura, °C;

U₂ – velocidade do vento a 2 metros de altura, ms⁻¹;

e_s – pressão de saturação de vapor, KPa;

e_a – pressão real de vapor, KPa.

A pressão de saturação de vapor é função da temperatura e sua relação é dada pela equação (2):

$$e^0 = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \quad (2)$$

A pressão real de vapor pode ser calculada utilizando diferentes métodos que empregam dados de umidade relativa, temperatura e ponto de orvalho. Segundo YODER (2005) e ALLEN et al. (1998) os métodos para cálculo da pressão real de vapor são os apresentados nas equações seguintes:

$$e_{a1} = e^o(T_{orv}) \quad (3)$$

$$e_{a2} = e^o(T_{min}) \quad (4)$$

$$e_{a3} = e^o(T_u) - \gamma(T_s - T_u) \quad (5)$$

$$e_{a4} = \frac{e^o(T_{\min}) \frac{UR_{\max}}{100} + e^o(T_{\max}) \frac{UR_{\min}}{100}}{2} \quad (6)$$

$$e_{a5} = e^o(T_{\text{med}}) \frac{UR_{\text{med}}}{100} \quad (7)$$

$$e_{a6} = e^o(T_{\min}) \frac{UR_{\max}}{100} \quad (8)$$

$$e_{a7} = e^o(T_{\max}) \frac{UR_{\min}}{100} \quad (9)$$

$$e_{a8} = \frac{UR_{\text{med}}}{100} \left[\frac{e^o(T_{\min}) + e^o(T_{\max})}{2} \right] \quad (10)$$

sendo,

T_{orv} - temperatura de ponto de orvalho, °C;

T_{\min} - média das temperaturas mínimas, °C;

T_{\max} - média das temperaturas máximas, °C;

T_{med} - temperatura média, °C;

T_s - temperatura de bulbo seco, °C;

T_u - temperatura de bulbo úmido, °C;

UR_{\min} - umidade relativa mínima média, %;

UR_{\max} - umidade relativa máxima média, %;

UR_{med} - umidade relativa média, %;

A temperatura de ponto de orvalho, de acordo com Howell and Dusek (1995), é dada por:

$$T_{\text{orv}} = \frac{237,3}{\frac{1}{\left[\frac{\ln\left(\frac{UR_{\text{med}}}{100}\right)}{17,27} + \left(\frac{T_{\text{med}}}{237,3 + T_{\text{med}}}\right) \right]} - 1} \quad (11)$$

Os dados utilizados são da estação meteorológica de Patos de Minas, MG, situada a 940 metros de altitude, com latitude de 18,51°S, longitude 46,43°O e utilizando como base o ano de 2012.

TABELA 1. Dados climatológicos. Fonte: Dados da Rede do INMET.

Mês	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	UR_{\min} (%)	UR_{\max} (%)	T_s (°C)	T_u (°C)
Janeiro	17.5935	26.8935	52.3333	98.3333	22.2066	19.8088
Fevereiro	17.3690	29.0655	45.6667	95.6667	23.7945	19.9275
Março	17.2871	29.0032	47.0000	93.3333	23.5385	19.9132
Abril	17.1667	28.9500	48.3333	96.0000	23.6681	20.1703
Maiο	14.2548	25.5968	44.6667	94.3333	20.4066	17.0857
Junho	14.4467	26.6267	42.6667	91.3333	21.2967	17.6066

Julho	12.5323	26.4129	35.6667	84.6667	20.6495	15.6571
Agosto	13.4871	26.6419	28.0000	77.6667	20.9560	14.9956
Setembro	16.2633	30.7100	23.3333	73.0000	24.8945	17.2209
Outubro	17.7452	31.7387	27.6667	90.0000	24.4659	17.8484
Novembro	18.4900	28.3067	42.6667	96.3333	24.5055	20.3077
Dezembro	18.6548	31.0548	45.3333	94.0000	25.3077	21.4593

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Para comparar os métodos expostos nas equações de (3) a (10) foram utilizados os erros médio quadrático e médio absoluto conforme equações (12) e (13) respectivamente. Os resultados encontram-se na figura 1, onde o método 1 refere-se à equação (3), o método 2 à equação (4) e assim sucessivamente.

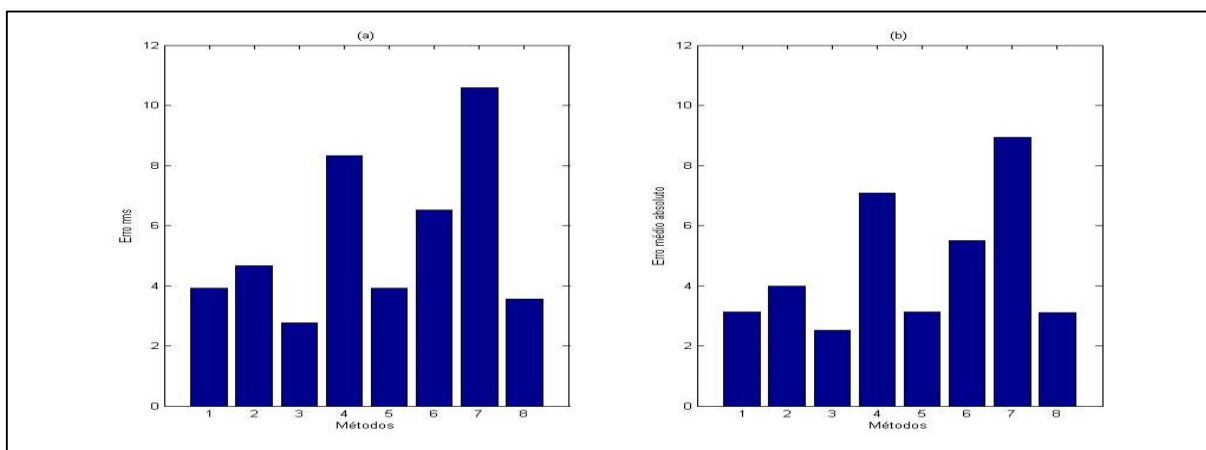


FIGURA 1: Desvios obtidos pelos diferentes métodos. (a) Erro rms, (b) erro médio absoluto.

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (12)$$

$$E_{abs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (13)$$

Nas equações (12) e (13) x_i e y_i referem-se respectivamente aos resultados obtidos pelas equações (3) a (10) e o resultado fornecido pelo programa da FAO, CROPWAT 8.0. A análise dos gráficos da figura 1 destaca o melhor desempenho do método 3 que utiliza dados psicrométricos para estimação da evapotranspiração. O método 3 apresentou um erro médio quadrático de 2.76 e erro médio absoluto de 2.52. O pior resultado foi para o método 7 que utiliza dados de temperatura máxima e umidade relativa mínima, obtendo desvio médio quadrático de 10.60 e erro médio de absoluto de 8.95.

CONCLUSÕES: Os diferentes métodos para cálculo da pressão real de vapor produzem resultados com diferenças significativas entre si. O método que utiliza dados psicrométricos apresentou o melhor resultado, porém, devido ao fato de estes dados nem sempre estarem disponíveis recomenda-se o emprego das equações (7) e (10) que utilizam dados mais comumente disponíveis como as temperaturas máximas e mínimas, bem como a umidade relativa média, equações que forneceram resultados não tão bons, mas bastante satisfatórios.

AGRADECIMENTOS: O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., and SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), FAO Irrigation and Drainage Paper n.56, Rome, 1998.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008.
- HOWEL, T. A., and DUSEK, D. A. Comparison of vapor-pressure-deficit calculation methods - southern high plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.121, n.2, 191–198, 1995.
- KISI, O. Comparison of Different Empirical Methods for Estimating Daily Reference Evapotranspiration in Mediterranean Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.140, n.1, 2014.
- YODER R, ODHIAMBO L, WRIGHT W. Effects of vapor–pressure deficit and net-irradiance calculation methods on accuracy of standardized penman–monteith equation in a humid climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, p.228–37, 2005.

ANEXO II

Código Fonte do Programa no Octave

```
% Programa mestre que coordena os demais.
% ALTITUDE
clc, clear all;
Alt = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','C7');
%LATITUDE
Lat = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','C5');
% TEMPERATURA
Tmax = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','I14:I133');
Tmin = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','J14:J133');
% UMIDADE
URmed = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','K14:K133');
% HORAS DE SOL 'n'
n = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','F14:F133');
% VELOCIDADE DO VENTO
VelVento = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','D14:D133');

% CONSTANTES
% Calor Latente de vaporização a 20°C em MJ/Kg.
Callat = 2.45;
% Calor específico a pressão constante em MJ/Kg°C.
Cp = 1.013*10^-3;
% Razão entre o peso molecular de vapor de água pelo ar seco.
eps = 0.622;
% Pressão atmosférica em KPa.
P = 101.3*((293-0.0065*Alt)/293)^5.26;
% Constante psicométrica em KPa/°C;
gama = (Cp*P)/(eps*Callat);
%Constante de Stefan-Boltzamn
sb = 4.903*10^-9;
%Latitude em radianos
lat = Lat*pi/180;

for i = 1:length(Tmax)
    % Temperatura média em °C.
    T(i) = (Tmax(i) + Tmin(i))/2;
    % Declividade da curva de pressão de saturação em KPa/°C.
    Delta(i) = (4098*(e0(T(i)))/(T(i)+237.3)^2);
    % Pressão de saturação de vapor.
    es(i) = (e0(Tmax(i))+ e0(Tmin(i)))/2;
    % Com dados de Umidade Relativa Média.
    ea(i) = (e0(T(i))*URmed(i))/100;
```



```

    %Será utilizado o 15° dia de cada mês.
    dia(i) = round(30.4*(i)-15);
    % distância relativa inversa Terra-Sol
    Dr(i) = 1 + 0.033*cos(2*pi*dia(i)/365);
    %Declinação Solar
    Ds(i) = 0.409*sin(2*pi*dia(i)/365 - 1.39);
    %Angulo de Radiação no pôr do sol
    Ws(i) = acos(-tan(lat)*tan(Ds(i)));
    Ra(i) =
24*60*0.082*Dr(i)*(Ws(i)*sin(lat)*sin(Ds(i))+cos(lat)*cos(Ds(i))*sin(Ws(i))
)/pi;
    N(i) = 24*Ws(i)/pi;
    Rs(i) = (0.25+0.50*n(i)/N(i))*Ra(i);
    Rso(i) = (0.75+2*Alt/100000)*Ra(i);
    Rnl(i) = sb*(((Tmax(i)+273.16)^4+(Tmin(i)+273.16)^4)/2)*(0.34-
0.14*sqrt(ea(i)))*(1.35*Rs(i)/Rso(i)-0.35);
    Rns(i) = (1-0.23)*Rs(i);
    Rn(i) = Rns(i) - Rnl(i);
end

G(1) = 0.14*(T(1) - T(12));
for k = 2:length(Tmax)
    G(k) = 0.14*(T(k) - T(k-1));
end

for j=1:length(Tmax)
    ETo(j) = (0.408*Delta(j)*(Rn(j)-G(j))+gama*900*VelVento(j)*(es(j)-
ea(j))/(T(j)+273))/(Delta(j)+gama*(1+0.34*VelVento(j)));
end
ETomax = max(ETo); % máxima ETo
ETomin = min(ETo); %ETo mínima
ETl = ETl(ETo); %Evapotranspiração corrigida para irrigação localizada
ETlmax = max(ETl); % máxima ETl
ETlmin = min(ETl); %ETl mínima
INb = ETlmax;/(Ea*CUD); %Lâmina requerida.
TR = input('Turno de Rega:'); % Turno de Rega de 4 dias.
IN = TR*INb; %Lâmina a ser aplicada
disp(['Lâmina: ', num2str(IN)])
Ep = input('Espaçamento entre plantas:');
Ef = input('Espaçamento entre fileiras:');
Kr = (0.1*sqrt(40)); % coeficiente de redução para irrigação localizada
INp = IN*Ep*Ef*Kr; % Lâmina por planta
disp(['Lâmina por planta: ', num2str(INp) , ' litros por dia']);
q = input('Vazão do gotejador:');
To = INp/q;
Tdis = input('Horas disponíveis por dia para irrigação: ');
Td = Tdis*TR; %20 horas disponíveis para irrigação
N = fix(Td/To);
disp(['Número máximo de setores: ', num2str(N)])
var = input('Utilizar o número máximo de setores ? 1 -Sim, 2 -Não');
if var == 1
    N = N;
else
    N = input('Número de setores: ');
end

disp(['Tempo de operação: ', num2str(To) , ' horas']);
Area = input('Area em hectares:');
Q = (2.778*Area*q)/(N*Ep*Ef);

```

LinhasLaterais,
LinhaDerivacao,
LinhaPrincipal
potencias;

```
%Dimensionamento de Linhas laterais
h = 10; %Amanco 15159 [mca]
qsi = q*(2.78e-7); %Vazão por gotejador
Dl = 13.8e-3; % diâmetro nominal do tubo gotejador Amanco 15159
C = 145; %coeficiente de atrito PVC - Hazen-Williams
Dec = input('Desnível em metros nas linhas laterais: ');
temp = sign(Dec);
Fl = 1;

switch temp
case 0
    temp1 = 1;
    while HW(Dl,qsi*temp1,C,Ep*temp1)*Fl<0.2*h
        temp1 = temp1+1;
        somat = 0;
        for n=1:temp1
            aux = n^1.852;
            somat = somat+aux;
        end
        Fl = somat/(temp1^(1.852+1));
    end
    CompMax = Ep*temp1;
    disp(['Comprimento máximo permitido: ', num2str(CompMax), '
metros'])
case 1
    temp1 = 1;
    while HW(Dl,qsi*temp1,C,Ep*temp1)*Fl<(0.2*h-Dec)
        temp1 = temp1+1;
        somat = 0;
        for n=1:temp1
            aux = n^1.852;
            somat = somat+aux;
        end
        Fl = somat/(temp1^(1.852+1));
    end
    CompMax = Ep*temp1;
    disp(['Comprimento máximo permitido: ', num2str(CompMax), '
metros'])
case -1
    temp1 = 1;
    while HW(Dl,qsi*temp1,C,Ep*temp1)*Fl<(0.2*h-Dec)
        temp1 = temp1+1;
        somat = 0;
        for n=1:temp1
            aux = n^1.852;
            somat = somat+aux;
        end
        Fl = somat/(temp1^(1.852+1));
    end
    CompMax = Ep*temp1;
    disp(['Comprimento máximo permitido: ', num2str(CompMax), '
metros'])
end
Ll = input('Qual o tamanho das linhas laterais? ');
%Espaçamento entre gotejadores (Ep)
Ng = floor(Ll/Ep); %Quantidade de gotejadores

%Vazão por linha lateral
QL = qsi*Ng;
```

```
hf = HW(Dl,QL,C,Ll)*Fl;  
%Pressão requerida na entrada da linha lateral  
hl = h + 0.75*hf + Dec/2;  
HL = hl +Dec;  
disp(['Pressão requerida na entrada das linhas laterais: ', num2str(HL), '  
mca']);
```

%Dimensionamento de Linhas de Derivação

```
LD = input('Qual o tamanho das linhas de derivação? ');
Ef;%E espaçamento entre linhas laterais
Nl = floor(2*LD/Ef); %Quantidade de linhas laterais
%Vazão da linha de derivação
QD = QL*Nl; %%Vazão por linha lateral x Qntd de linhas laterais
C = 145; %Coeficiente de Hazen-Willians
Dd = [10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 140, 160, 180,
200]*10^-3;
dec = input('Qual a declividade do terreno em % ? ');
DecD = dec/100*LD;
somat = 0;
for n=1:Nl
    aux = n^1.852;
    somat = somat+aux;
end
Fd = somat/(Nl^(1.852+1)); %Coeficiente de redução
%Perda máxima aceitável
if dec == 0
    i = 1;
    while HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd > 0.2*h
        i = i+1;
    end
    hf = HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd;
else
    if dec > 0
        i = 1;
        while HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd + DecD > 0.2*h
            i = i+1;
        end
        hf = HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd;
    else dec < 0
        i = 1;
        if DecD < HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd
            while HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd - DecD > 0.2*h
                i = i+1;
            end
            hf = HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd;
        else
            i = 1;
            while DecD - HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd > 0.2*h
                i = i+1;
            end
            hf = HW(Dd(i),QD,C,LD)*Fd;
        end
    end
end

end

Dd = Dd(i);

%Pressão requerida na entrada da linha de derivação

hd = HL + 0.75*hf + DecD/2;
HD = hd + DecD;
```

```
% LINHA PRINCIPAL
% Q = AV = QD
% V <= 2 M/S

V = 2;
Dp = sqrt((4*QD)/(pi*V));
DP = [10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 125, 140, 160, 180,
200]*10^-3;
for n = 1:length(DP)
    if Dp <= DP(n)
        Dp = DP(n);
        break
    end
end
disp(['Diâmetro nominal da linha principal: ', num2str(Dp*1000), ' mm']);
Lp = input(' Comprimento da linha principal: ');
Desn = input('Desnível em metros na linha principal: ');
%Perdas na linha principal
Hfp = HW(Dp,QD,C,Lp);
%Pressão requerida na entrada da linha principal
HP = HD + Hfp + Desn;

% Recalque
%Diametro de recalque igual ao diâmetro da linha Principal
LR = input(' Comprimento da linha de recalque: ');
Hr = input('Desnível em metros entre a bomba e a area a ser irrigada: ');
HR = HW(Dp,QD,C,LR) + Hr;

% Sucção
%Diametro de sucção é um acima do diâmetro de recalque
Ds = DP(n+1);
LS = input(' Comprimento da linha de sucção: ');
Hs = input('Desnível em metros na sucção: ');
HS = HW(Ds,QD,C,LS) + Hs;

% Perdas adiconais (cabeçal de controle, válvulas)
% Had = 10;
% Altura Manométrica Total
Hman = HS + HP + HR;
Hman = Hman*1.1; %Acrescimo de 10% para perdas localizadas.
disp(['Altura Manométrica Total (Hman): ' num2str(Hman), ' mca'])
disp([' '])
disp(['Vazão de projeto: ', num2str(Q), ' litros por segundo'])
Qaux1 = linspace(0,2*QD,4);
Qaux2 = linspace(0,2*QL,4);

for i = 1:4
    HQ(i) = ((Hr+h+Desn+DecD+Dec+Hs) +
HW(Dl,Qaux2(i),C,Ll)*Fl*Nl+HW(Dd,Qaux1(i),C,LD)*Fd+HW(Dp,Qaux1(i),C,LR+Lp)+
HW(Ds,Qaux1(i),C,LS));
end
plot(Qaux1*1000,HQ)
```

```
% Determinação das potências necessárias
% Potencia da Bomba
RendB = 0.6;
Pbn=(Q*Hman)/75;
Pb=(Q)*Hman/(75*RendB);
Pcom =
[1/4,1/3,1/2,3/4,1,1+1/2,2,3,5,6,7+1/2,10,12.5,15,20,25,30,35,40,45,50,60,1
00,125,150,200,250,300];
for n = 1:length(Pcom)
    if Pb <= Pcom(n)
        Pcm = Pcom(n);
        break
    end
end
RendMotor = 0.9;
PotCons = Pb/RendMotor;
Carg =(PotCons/Pcm)*100;

% Custos com energia elétrica
for k =1:12
    j = 1;
    for i=k:12:120
        v(j) = ETl(i)
        j=j+1;
    end
    ET(:,k)=v'
end
bar(mean(ET));
xlabel('meses'),ylabel('ET [mm/dia]')
axis([0,13,0,4])
Prec = xlsread('Patos.xlsx','2004 2013','H14:H133');
for k =1:12
    j = 1;
    for i=k:12:120
        p(j) = Prec(i);
        j=j+1;
    end
    Pr(:,k)=p';
end
diames = [31;28;31;30;31;30;31;31;30;31;30;31];
IRNT = mean(ET(:,9))*diames(9)-mean(Pr(:,9))/0.9;
Volsaf = IRNT*Area*10;
Tempo = Volsaf/(Q*3.6);
Ch = (736*12.5)/(RendMotor*100);
Tnot = 9; %horário de funcionamento noturno
Tarifa = 0.087587;% Tarifa Cemig sem ICMS
Tarnot = Tarifa*1.12; % 12% de ICMS
Tardia = Tarifa*1.18; % 18% ICMS
% Cm = Ch*Tempo;
Gasto = (Tarnot*31*Tnot*Ch)+(Tardia*(Tempo-Tnot*31)*Ch)

% gasto = Cm*Tarifa;
disp(['Custo com energia R$: ', num2str(Gasto)])
```

ANEXO III

Dados climatológicos utilizados (Banco de dados do INMET).

BDMEP - INMET

Estação : PATOS DE MINAS - MG (OMM: 83531)

Latitude (graus) : -18,51

Longitude (graus) : -46,43

Altitude (metros): 940,28

Estação Operante

Início de operação: 23/10/1947

Período solicitado dos dados: 01/01/2004 a 31/12/2013

Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP

Data	Velocidade VentoMedia	Insolação dia	Insolacao Total	Precipitacao Total	Temp Maxima Media	Temp Minima Media	Umididade Relativa Media
31/01/2004	1,75	3,62	112,30	309,20	27,60	19,20	83,28
29/02/2004	1,11	3,55	103,00	318,70	27,15	18,56	85,61
31/03/2004	1,35	5,05	156,70	267,20	27,74	17,76	79,49
30/04/2004	1,09	6,56	196,70	156,90	27,64	17,11	78,43
31/05/2004	0,97	6,25	193,70	20,30	27,21	14,95	74,86
30/06/2004	1,19	7,22	216,50	0,70	25,51	12,78	68,28
31/07/2004	1,91	5,65	175,30	16,60	24,85	12,91	64,05
31/08/2004	1,90	5,81	180,00	0,00	28,39	13,87	48,00
30/09/2004	2,51	7,40	222,10	0,50	31,82	16,58	38,73
31/10/2004	2,06	6,25	193,60	39,40	31,28	18,39	60,35
30/11/2004	2,01	4,69	140,80	89,70	30,17	19,10	65,98
31/12/2004	0,96	4,06	125,90	292,80	27,82	18,15	82,28
31/01/2005	0,98	4,38	135,80	230,10	29,00	19,47	82,84
28/02/2005	1,53	6,14	172,00	129,70	29,36	18,30	74,44
31/03/2005	0,87	5,24	162,40	282,60	28,34	18,89	82,83

30/04/2005	0,95	8,25	247,60	18,80	29,55	17,36	68,83
31/05/2005	1,25	7,64	236,70	33,40	26,87	14,33	68,05
30/06/2005	1,24	6,07	182,20	6,20	26,01	13,37	69,16
31/07/2005	1,36	8,35	259,00	0,00	26,26	12,53	61,64
31/08/2005	1,63	9,21	285,60	5,80	29,04	13,64	50,94
30/09/2005	1,70	6,58	197,40	25,70	30,25	17,05	57,89
31/10/2005	1,67	6,59	204,40	37,80	33,64	18,97	46,02
30/11/2005	0,85	3,54	106,10	291,80	26,69	18,23	81,29
31/12/2005	0,90	2,71	83,90	506,20	26,32	17,54	83,21
31/01/2006	0,50	6,59	204,40	231,40	29,30	17,82	68,57
28/02/2006	0,40	6,37	178,30	161,00	30,35	18,50	75,79
31/03/2006	0,78	4,92	152,60	285,80	28,17	19,08	84,02
30/04/2006	0,61	6,75	202,40	78,70	27,67	17,60	80,18
31/05/2006	0,81	8,38	259,70	20,00	26,82	13,16	69,87
30/06/2006	1,66	8,26	247,90	0,00	25,35	11,87	67,59
31/07/2006	1,21	7,81	242,00	1,80	26,57	11,73	62,14
31/08/2006	1,46	9,05	280,70	5,00	29,25	14,47	55,72
30/09/2006	1,56	7,51	225,40	89,90	29,18	15,63	59,07
31/10/2006	1,26	4,11	127,30	243,20	26,90	17,81	79,21
30/11/2006	1,50	4,45	133,40	246,10	27,40	17,93	82,06
31/12/2006	1,36	3,47	107,70	456,70	28,09	18,56	85,27
31/01/2007	1,36	3,46	107,30	435,60	28,51	18,57	85,59
28/02/2007	1,20	5,36	150,00	245,60	28,23	17,96	83,13
31/03/2007	1,38	8,53	264,30	38,20	30,07	16,92	68,16
30/04/2007	1,23	7,39	221,80	46,60	29,14	16,13	74,33
31/05/2007	1,50	8,33	258,20	2,40	27,69	13,20	66,09
30/06/2007	1,39	9,04	271,20	0,80	27,43	11,59	60,98
31/07/2007	1,35	8,49	263,20	8,40	27,78	12,73	57,27
31/08/2007	2,12	10,14	314,40	0,00	28,68	13,21	44,74
30/09/2007	2,14	9,14	274,20	19,40	31,03	15,88	42,11
31/10/2007	1,49	7,02	217,70	40,60	31,90	18,25	49,90
30/11/2007	1,33	5,22	156,50	92,90	30,11	18,57	69,03
31/12/2007	1,21	5,57	172,80	168,90	29,24	18,20	74,45
31/01/2008	1,15	4,72	146,30	289,00	28,44	18,25	78,35
29/02/2008	1,14	5,42	157,20	230,60	29,07	18,05	78,43
31/03/2008	1,28	6,13	190,00	216,60	28,63	17,71	81,40
30/04/2008	1,16	7,15	214,40	112,70	29,01	16,97	77,84
31/05/2008	1,25	7,69	238,40	23,80	26,65	13,51	70,96
30/06/2008	1,47	8,41	252,20	27,80	26,70	13,63	66,77
31/07/2008	1,91	9,10	282,00	0,00	25,98	11,54	54,33
31/08/2008	1,90	9,28	287,60	4,60	28,95	14,43	51,40
30/09/2008	1,48	8,12	243,70	55,70	30,40	15,95	52,29
31/10/2008	1,57	7,15	221,60	26,00	31,55	18,32	54,33
30/11/2008	1,16	4,85	145,40	192,20	28,79	17,89	76,28
31/12/2008	1,20	3,72	115,30	516,20	27,35	17,98	83,15

Anexo III

31/01/2009	1,10	5,30	164,20	203,50	29,04	18,39	80,40
28/02/2009	1,24	6,69	187,30	188,00	29,59	18,05	78,21
31/03/2009	1,01	6,29	194,90	193,50	29,72	18,14	78,44
30/04/2009	1,17	5,79	173,60	106,80	27,26	16,56	78,80
31/05/2009	1,24	7,75	240,40	86,70	26,80	14,47	72,99
30/06/2009	1,27	7,69	230,70	55,60	25,61	12,76	73,13
31/07/2009	1,31	9,08	281,60	0,30	27,62	13,69	62,60
31/08/2009	1,94	8,04	249,30	28,90	27,47	14,30	58,81
30/09/2009	1,55	6,46	193,80	47,60	30,01	17,46	64,38
31/10/2009	1,31	4,41	136,60	85,20	29,11	18,21	76,26
30/11/2009	1,40	6,68	200,30	313,50	30,32	18,98	72,85
31/12/2009	1,27	3,85	119,30	367,50	27,85	18,44	82,43
31/01/2010	1,31	5,87	182,00	145,30	29,67	18,62	74,34
28/02/2010	1,23	8,10	226,70	146,90	30,77	18,40	68,71
31/03/2010	1,14	6,02	186,60	216,40	29,18	18,37	77,82
30/04/2010	1,31	8,08	242,50	87,90	28,21	15,91	69,78
31/05/2010	1,25	7,83	242,70	24,60	27,55	14,04	67,74
30/06/2010	1,36	8,25	247,50	15,50	25,80	11,39	62,85
31/07/2010	2,11	8,50	263,40	0,00	26,55	13,54	56,44
31/08/2010	1,86	9,80	303,80	0,00	28,67	12,67	42,04
30/09/2010	2,37	8,11	243,30	59,50	30,71	16,07	43,93
31/10/2010	1,32	6,17	191,30	134,80	30,79	17,68	67,31
30/11/2010	1,55	4,37	131,00	239,30	27,86	17,68	79,89
31/12/2010	1,42	5,46	169,30	483,10	29,64	18,98	76,88
31/01/2011	1,54	5,16	160,10	398,30	28,65	18,16	76,46
28/02/2011	1,21	7,37	206,30	82,10	30,71	18,28	66,40
31/03/2011	1,27	3,51	108,70	463,90	27,88	18,25	82,75
30/04/2011	0,96	7,56	226,80	72,70	28,11	16,58	73,51
31/05/2011	1,19	8,24	255,30	0,40	27,30	14,12	65,45
30/06/2011	1,48	8,35	250,60	24,20	26,09	12,69	64,14
31/07/2011	1,71	9,03	279,80	0,00	27,27	12,89	56,10
31/08/2011	1,98	9,55	295,90	0,00	30,43	14,81	44,61
30/09/2011	2,27	8,82	264,70	6,30	31,01	15,67	38,87
31/10/2011	1,85	4,24	131,40	133,90	28,02	17,17	72,75
30/11/2011	1,92	5,63	168,90	217,90	27,57	16,95	72,08
31/12/2011	1,62	2,72	84,40	416,40	27,06	17,94	84,62
31/01/2012	1,81	3,35	103,80	251,10	26,89	17,59	82,34
29/02/2012	1,90	6,97	202,10	153,00	29,07	17,37	71,71
31/03/2012	1,46	5,79	179,40	196,90	29,00	17,29	75,28
30/04/2012	1,46	6,93	207,90	73,70	28,95	17,17	74,65
31/05/2012	1,82	6,60	204,50	49,00	25,60	14,25	73,94
30/06/2012	1,41	7,65	229,60	51,40	26,63	14,45	71,28
31/07/2012	1,97	8,33	258,10	0,30	26,41	12,53	59,90
31/08/2012	3,25	8,75	271,40	0,00	26,64	13,49	51,10
30/09/2012	2,45	7,60	228,00	14,30	30,71	16,26	48,48

31/10/2012	2,23	7,47	231,60	35,60	31,74	17,75	52,07
30/11/2012	1,87	5,01	150,30	274,20	28,31	18,49	79,13
31/12/2012	1,59	7,00	217,00	146,50	31,05	18,65	71,47
31/01/2013	1,74	3,65	113,30	229,00	27,77	18,71	80,88
28/02/2013	1,48	7,28	203,90	77,90	30,51	18,03	71,40
31/03/2013	1,28	4,14	128,40	183,60	28,66	18,64	82,60
30/04/2013	1,60	5,82	174,60	134,80	27,25	16,10	77,38
31/05/2013	1,59	7,95	246,40	33,80	27,21	14,16	70,45
30/06/2013	1,66	7,32	219,70	6,60	26,32	14,43	73,48
31/07/2013	1,85	8,86	274,60	0,00	27,01	12,69	61,10
31/08/2013	2,10	8,95	277,50	1,40	28,44	13,40	50,85
30/09/2013	2,22	7,01	210,20	40,00	29,75	15,65	56,80
31/10/2013	1,79	6,36	197,30	130,30	29,00	17,08	67,52
30/11/2013	1,63	5,90	177,10	169,20	28,68	18,09	74,13
31/12/2013	1,34	4,98	154,40	292,80	28,75	18,74	81,11