UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

DECLIVIDADE E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES HIDRÁULICAS NO DIMENSIONAMENTO E CUSTO TOTAL DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

ÉLVIS DA SILVA ALVES

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP
Dezembro de 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

DECLIVIDADE E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES HIDRÁULICAS NO DIMENSIONAMENTO E CUSTO TOTAL DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

ÉLVIS DA SILVA ALVES

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP

Dezembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Alves, Élvis da Silva, 1990-
A474d Declividade e diferentes configurações hidráulicas no dimensionamento e custo total de sistema de irrigação por aspersão convencional / Élvis da Silva Alves. – Botucatu : [s.n.], 2016
xiv, 73 f. : grafs. color., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016
Orientador: João Carlos Cury Saad
Inclui bibliografia

1. Água de irrigação. 2. Irrigação por aspersores. 3. Energia - Custo. I. Saad, João Carlos Cury. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte."

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DECLIVIDADE E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES HIDRÁULICAS NO DIMENSIONAMENTO E CUSTO TOTAL DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

AUTOR: ÉLVIS DA SILVA ALVES
ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Prof. Dr. ENZO DAL PAI
Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR THOALDO ROMEIRO
Diretoria Técnica / CATI - Coordenadoria de Assistência Técnica Integral/ Botucatu

Botucatu, 09 de dezembro de 2016.

Aos meus pais
Edivaldo Alves Barbosa
Maria José da Silva Barbosa.

Minha esposa
Jesiele Silva da Divincula Alves.

Meus avós maternos
Domingo Aureliano da Silva (*In memória*)
e Maria do Carmo da Silva (*In memória*)

Meus avós paternos
José Barbosa da Silva,
e Josefa Alves da Silva (*In memória*).

A toda minha família.

D E D I C O

"CABE A CADA NOVA TURMA DE AGRÔNOMOS DAR MAIS UM PASSO NO CAMINHO DO CONHECIMENTO QUE UM DIA LEVARÁ O BRASIL A CUMPRIR O SEU DESTINO DE SUPERPOTÊNCIA AGROPECUÁRIA".

José Aprígio Brandão Vilela (In memória)

AGRADECIMENTOS

Ao grandioso e misericordioso Deus, por me permitir o dom da vida, e através dela vivenciar momentos ímpares e tão especiais, como este que vivo no momento atual.

Aos meus maravilhosos e amados pais: Edivaldo Alves Barbosa e Maria José da Silva Barbosa, pelos inúmeros dias de preocupação, se mostrando sempre presentes mesmo estando distantes, proporcionando-me carinho, amor e perseverança.

Aos meus avós maternos: Domingo Aureliano da Silva (*In memória*) e Maria do Carmo da Silva (*In memória*) e meus avós paternos José Barbosa da Silva, e Josefa Alves da Silva (*In memória*), meus maiores exemplos, responsáveis por quem sou hoje.

A minha esposa Jesiele Silva da Divincula Alves. Pelas inúmeras horas de paciência, dedicação, carinho, companheirismo. Por estar sempre ao meu lado, sendo parte ímpar na realização deste sonho.

A todos os meus familiares, tios e tias, primos e primas, pelas inúmeras palavras de conforto, estimulo e confiança. Pelos maravilhosos momentos vividos ao lado de vocês.

Ao meu orientador Professor Doutor João Carlos Cury Saad, pela permissão dada em termos não apenas uma relação acadêmica, mas também uma amizade verdadeira, baseada no respeito, amizade e confiança. Pelas inúmeras horas de dedicação e atenção, cumprindo o papel de orientador com maestria, estimulando os que estão a sua volta a serem sempre melhores.

A todo corpo docente do programa de pós-graduação em Agronomia: Irrigação e Drenagem da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Faculdade de Ciências Agronômicas – Botucatu/SP, agradeço pelo conhecimento compartilhado e pelas horas de dedicação na complementação deste conhecimento.

Aos amigos da graduação e pós-graduação que fiz no decorrer destes dois anos. Foi ao lado deles que pude compartilhar os momentos de alegria, conquista, e porque não falar em momentos de tristeza. Tenho certeza que teria sido impossível a realização desta pós-graduação sem a ajuda de vocês.

A todos os funcionários da FCA/UNESP, em especial da Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos e do Departamento de Engenharia Rural, pelo apoio nas

pesquisas e na realização das diversas atividades, sendo peças fundamentais para concretização desta pós-graduação.

Aos companheiros da república Alagoas, Lucas Almeida de Holanda, Anderson Ravany, Marcos Liodorio dos Santos, Henrique Tenório, David Victor, Jannaylton Éverton, Esteban Choque e Thalyson Medeiros pelo inestimado companheirismo e convivência.

Ao programa de Pós-graduação em Irrigação e Drenagem da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu pelo excelente ensino, com qualidade inquestionável.

A Empresa Hidrolençóis pela disponibilização do orçamento para realização dos cálculos do custo total do sistema.

A Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelo fornecimento da bolsa de estudo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS V
SUMÁRIO VII
LISTA DE FIGURAS IX
LISTA DE TABELAS XI
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS XIII
RESUMO 1
SUMMARY 3
1. INTRODUÇÃO 5
2. REVISÃO DE LITERATURA 8
2.1. Irrigação no Brasil 8
2.2. Sistema de irrigação por aspersão 10
2.3. Dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional. 12
2.3.1. Dimensionamento da Linha Lateral 12
2.3.2. Dimensionamento da linha principal e secundária para irrigação por aspersão convencional 13
2.4. Perdas de carga nas tubulações 14
2.4.1. Perda de carga em tubulações com várias saídas 16
2.5. Dimensionamento em condições de declividade. 17
2.6. Interferência da declividade no desempenho de sistemas de irrigação. 17
2.7. Relação entre perda de carga e consumo de energia em sistemas de irrigação. 18
2.8. Custo total de sistema de irrigação. 19
2.8.1. Custo de implantação 19
2.8.2. Custo de energia elétrica 19
3. MATERIAL E MÉTODOS 21
3.1. Informações da área do estudo 21
3.2. Características avaliadas 23
3.2.1. Configurações da rede hidráulica 24
3.2.2. Vazão 25
3.2.3. Declividade 26
3.2.4. Critério de dimensionamento 28
3.3. Construção das planilhas 28
3.4. Custos do sistema de irrigação 29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 30

4.1. Influência da configuração da rede hidráulica no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional. 30

4.2. Efeito da vazão do projeto no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional. 33

4.2.1. Vazões econômica e prática na configuração A 34

4.2.2. Vazões econômica e prática na configuração B 36

4.2.3. Efeito da declividade no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional 37

4.2.4. Influência da variação de vazão no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional 40

4.3. Custo total do sistema de irrigação nas condições estudadas 42

4.3.1. Custo de implantação 43

4.3.2. Custo anual de energia elétrica (R$) 44

4.3.3. Custo total anual (R$) 47

5. CONCLUSÕES 49

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 50

REFERÊNCIAS 51

ANEXO 54

APÊNDICE 56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução da área irrigada no Brasil (ANA, 2009; IBGE, 1995/96; 2006)..... 8

Figura 2. Evolução da área irrigada no Brasil nos dois últimos levantamentos do Censo Agropecuário (IBGE, 1995/96; 2006)..... 9

Figura 3. Participação dos sistemas de irrigação na agricultura irrigada brasileira dos anos 2000 até 2015 (ABIMAQ, 2016)..... 10

Figura 4. Sistema de irrigação por aspersão: A) Portátil; B) Semiportátil; C) Semipermanente; e D) Permanente..... 11

Figura 5. Dimensões da área onde foi realizada a simulação do estudo..... 23

Figura 6. Esquematização das variáveis estudadas neste trabalho..... 24

Figura 7. Configurações utilizadas: A) uma linha principal no meio, e; B) duas linhas secundárias ao centro do terreno..... 25

Figura 8. Suplemento utilizado para determinação dos trechos em aclive e declive..... 27

Figura 9. Fluxograma dos dados de entrada para início do dimensionamento..... 29

Figura 10. Características do sistema de irrigação quando submetido a diferentes critérios de dimensionamento (variações de vazão - Δq) e diferentes vazões, na configuração A..... 41

Figura 11. Características do sistema de irrigação quando submetido a diferentes critérios de dimensionamento (variações de vazão - Δq) e diferentes vazões, na configuração B..... 42

Figura 12. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração A, obtido com potência teórica. 45

Figura 13. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração A, obtido com potência comercial..... 46

Figura 14. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração B, obtido com potência teórica. 46

Figura 15. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração B, obtido com potência comercial..... 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações utilizadas no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional..... 22

Tabela 2. Características e especificações dos aspersores utilizados, conforme o tipo de vazão..... 22

Tabela 3. Caracterização da aplicação de lâminas de irrigação de acordo com os dados do projeto deste trabalho para configuração A..... 26

Tabela 4. Caracterização da aplicação das lâminas de irrigação de acordo com a proposta da vazão prática para configuração A..... 26

Tabela 5. Quantidade de materiais nas configurações A e B..... 31

Tabela 6. Potência teórica requerida do conjunto motobomba de acordo com as configurações estudadas..... 32

Tabela 7. Potência comercial requerida do conjunto motobomba, de acordo com as configurações estudadas..... 32

Tabela 8. Potência teórica requerida do conjunto motobomba de acordo com as configurações estudadas..... 33

Tabela 9. Potência comercial requerida do conjunto motobomba, de acordo com as configurações estudadas..... 33

Tabela 10. Características do sistema de irrigação nas diferentes vazões, para a configuração A..... 34

Tabela 11. Características do sistema de irrigação nas diferentes vazões, para a configuração B..... 36

Tabela 12. Características do sistema de irrigação nas diferentes declividades, com vazão econômica na configuração A..... 37

Tabela 13. Características do sistema de irrigação nas diferentes declividades, com vazão prática na configuração A..... 39

Tabela 14. Características do sistema de irrigação nas diferentes declividades, com vazão econômica na configuração B..... 39

Tabela 15. Características do sistema de irrigação nas diferentes declividades, com vazão prática na configuração B..... 40

Tabela 16. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas as configurações, na condição em nível 43

Tabela 17. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas as configurações, na declividade de 2%..... 44

Tabela 18. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas as configurações, na declividade de 4%..... 44

Tabela 19. Custo total anual (R$ ha^{-1}) de sistema de irrigação por aspersão para as variáveis estudadas, na configuração A..... 47

Tabela 20. Custo total anual (R$ ha^{-1}) de sistema de irrigação por aspersão para as variáveis estudadas, na configuração B..... 48

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CA	Configuração A
CB	Configuração B
CC	Capacidade de campo (%)
CI	Custo de implantação do sistema (R$)
D	Diâmetro interno do tubo (mm)
Ds	Densidade do solo (g dm^{-3})
e	Rugosidade absoluta do tubo
ET_0	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})
F	Fator de ajuste de Christiansen
f	Fator de atrito
f	Fator de disponibilidade de água (decimal)
Fa	Fator de ajuste para tubulação com múltiplas saídas
FRC	Fator de recuperação de capital
g	Força gravitacional (m s^{-2})
hf	Perda de carga na linha (mca)
hf’	Perda de carga ajustada (mca)
H_{max}	Pressão máxima (mca)
H_{med}	Pressão média, equivalente à pressão de serviço do aspersor (mca)
$H_{mín}$	Pressão mínima (mca)
i	Taxa de juros anual (decimal)
K	Coeficiente adimensional obtido experimentalmente para cada peça
Kc	Coeficiente de cultivo (decimal)
L	Comprimento da tubulação (m)
Ln	Logaritmo natural
LT	Comprimento total, equivalente à soma dos trechos em aclive e declive (m)
m	Expoente da vazão na equação de perda de carga
n	Número de anos correspondente à vida útil das instalações

N	Número de aspersores na linha lateral
Nb	Número de horas de bombeamento, em um determinado intervalo de tempo
NR	Número de Reynolds
P	Potência requerida pelo sistema de bombeamento
p	Custo unitário da tarifa de energia elétrica (R$/kWh)
PM	Ponto de murchamento permanente (%)
Q	Vazão ($m^3\ h^{-1}$ ou $m^3\ s^{-1}$)
q_{max}	Vazão máxima do aspersor ($m^3\ h^{-1}$)
$q_{mín}$	Vazão mínima do aspersor ($m^3\ h^{-1}$)
S_0	Gradiente de declividade do terreno ($m\ m^{-1}$)
V	Velocidade na tubulação ($m\ s^{-1}$)
VE	Vazão Econômica ($m^3\ h^{-1}$)
VIB	Velocidade de Infiltração Básica ($mm\ h^{-1}$)
VP	Vazão Prática ($m^3\ h^{-1}$)
X	Razão entre a distância da primeira derivação ao início da tubulação
Y	Fração do comprimento total - L_T, equivalente ao trecho em declive
Z	Profundidade efetiva do sistema radicular (cm)
Δq	Variação de vazão (%)
ΔH	Variação de pressão (%)

DECLIVIDADE E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES HIDRÁULICAS NO DIMENSIONAMENTO E CUSTO TOTAL DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL.

Botucatu, 2016. 73p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Autor: ÉLVIS DA SILVA ALVES

Orientador: PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

RESUMO

Para que as áreas irrigadas com sistemas de irrigação por aspersão convencional se tornem eficientes e lucrativas é necessário que projetistas e usuários sejam orientados sobre as diferentes variáveis e critérios que interferem no dimensionamento destes sistemas, principalmente por estes possibilitarem a disposição da instalação em diferentes configurações de tubulação. Objetivou-se com esse trabalho verificar o efeito de diferentes vazões, configurações hidráulicas e declividades do terreno no dimensionamento da rede hidráulica e no custo total de sistema de irrigação por aspersão convencional. Para a realização dos cálculos foram construídas planilhas eletrônicas e as equações de dimensionamento foram aplicadas utilizando dados reais de uma área do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, *campus* de Botucatu. As características estudadas foram: configuração hidráulica do sistema (A ou B); vazão do projeto (econômica ou prática); declividade do terreno (0, 2 ou 4%); modificação do critério de variação de vazão (10 ou 15%) e; o custo total do sistema (implantação e energia elétrica). A vazão econômica resultou em menor custo total que a vazão prática em todas as declividades avaliadas, nos dois critérios de dimensionamento baseados na variação máxima de vazão na linha lateral e nas duas configurações hidráulicas analisadas. A configuração A, com uma única linha principal e duas linhas laterais de maior comprimento com aspersores de menor vazão, apresentou menor custo que a configuração B, com uma linha principal, duas linhas secundárias e 4 linhas laterais de menor comprimento com aspersores de maior vazão, em todas as declividades avaliadas, nos dois critérios de dimensionamento baseados na variação máxima de vazão na linha lateral e nas duas vazões totais analisadas. Verificou-se efeito da declividade no custo total do sistema de irrigação por aspersão convencional apenas na Configuração B, com 15% de Δq, com a vazão prática, tendo as declividades 2 e

4% apresentado custo total anual idêntico de R$3019,50 , superior ao obtido na condição em nível (R$2687,00). Estas configurações são as de maior variação dos critérios de dimensionamento, indicando que há necessidade de amplitude de variação para passar para o diâmetro comercial superior ou para um motor de potência acima e consequentemente gerar maior custo total.

Palavras-chave: Perda de carga, custo de energia, aspersores, tubulação.

DIFFERENT HYDRAULIC SETTINGS AND SLOPE IN THE DESIGN AND TOTAL COST OF SPRINKLER IRRIGATION SYSTEM.

Botucatu, 2016. 73p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Autor: ÉLVIS DA SILVA ALVES

Orientador: PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

SUMMARY

For irrigated areas with conventional sprinkler irrigation systems to become efficient and profitable, it is necessary for designers and users to be guided by the different variables and criteria that interfere in the design of these systems, mainly because they allow the layout of the installation in various configurations of the pipeline. The objective of this work was to verify the effect of different flow rates, hydraulic configurations and terrain slopes in the hydraulic network design and the total cost of a conventional sprinkler irrigation system. Spreadsheets were constructed to perform the calculations, and the design equations were applied using real data from an area of the Department of Rural Engineering of the Faculty of Agronomic Sciences of UNESP, Botucatu campus. The characteristics studied were: hydraulic system configuration (A or B); project flow (economic or practical); slope (0,2 or 4%); modification of the criterion of allowed flow variation (10 or 15%) and; the total cost of the system (fixed and variable costs). The economic flow resulted in a lower total cost than the practical in all slopes evaluated, in the two design criteria based on the maximum variation of lateral line flow and in the two hydraulic configurations analyzed. The A configuration with a single main line and two longer lateral lines with lower flow sprinklers, showed lower cost than the configuration B with the main line, two secondary lines and 4 lateral lines shorter with higher flow sprinklers, in all evaluated slopes, in the two design criteria based on the maximum variation in lateral line flow and in the two total flows analyzed. There was an effect of slope on the total cost of the conventional sprinkler irrigation system only in Configuration B, with 15% of Δq, with the practical flow, with slopes 2 and 4% showing the same annual total cost of R$ 3019.50 , higher than that obtained in the level condition (R$ 2687.00). These configurations are the ones with the greatest variation of the design criteria, indicating that there is a need for an amplitude of variation

to pass to the higher commercial diameter or a power motor above and consequently generate a higher total cost.

Keywords: Head loss, energy cost, sprinklers, piping.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação tem como principal objetivo a reposição da água necessária para o desenvolvimento das culturas, quando as chuvas não são suficientes para suprir esse requerimento. Essa reposição é feita através de sistema de irrigação, a saber: por superfície, localizada e aspersão.

Mantovani et al. (2009) afirmaram que a irrigação por aspersão é responsável pela maior parte das áreas irrigadas no Brasil, mostrando a importância deste sistema para a agricultura irrigada das áreas agrícolas brasileiras. Moreno et al. (2010) descreveram que os sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central são os mais utilizados atualmente no mundo.

Até o ano de 1996, a irrigação por aspersão convencional foi mais utilizada por produtores com áreas entre 20 e 50 ha. No decêndio posterior as propriedades agrícolas que irrigaram usando este método mantinham área entre 2 a 5 ha, reforçando a ideia que o sistema de irrigação por aspersão convencional é adotado por médios e pequenos irrigantes (IBGE, 1995/96; 2006).

Dada a grande variabilidade no formato e na declividade dessas pequenas áreas, o projeto de irrigação por aspersão convencional permite muitas configurações distintas (BERNARDO et al. 2006). Para Keller e Bliesner (1990) uma das exigências no dimensionamento de qualquer sistema de irrigação é a construção de um mapa topográfico mostrando os desníveis do terreno, bem como obstáculos e limites agrícolas.

Todo sistema de irrigação necessita ser bem dimensionado para que se tenha o uso racional de energia e água, remetendo ao rendimento máximo da cultura no que se refere ao quesito dimensionamento do sistema.

Muitos dos sistemas são implantados sem levar em consideração os critérios que permitem a obtenção do rendimento potencial dos insumos ligados às áreas irrigadas. Quando esses critérios não são levados em consideração, normalmente a quantidade de água é aplicada em excesso, pois o produtor teme que a cultura sofra estresse hídrico (TURCO et al. 2009).

No entanto, com o crescimento da agricultura irrigada diversas empresas vêm se especializando neste segmento, atuando desde o dimensionamento até o manejo hídrico no campo.

Em se tratando da aspersão convencional observa-se a ausência de grandes empresas realizando projetos. Esses projetos são realizados por empresas menores, que na grande maioria das vezes não levam em consideração o formato e a declividade das áreas. Entretanto, se faz necessário orientar projetistas e usuários, visando a minimização dos custos do sistema de irrigação.

Muitas são as características a serem estudadas em um sistema de irrigação para evitar que este seja mal dimensionado e se torne oneroso. A perda de carga é uma das variáveis específicas no momento do dimensionamento, isso porque ela depende de diversos outros fatores, como vazão e diâmetro da tubulação, dentre outros.

Uma variável muito importante no custo de sistemas de irrigação por aspersão é a declividade e deve ser considerada ao se dimensionar qualquer sistema de irrigação (KELLER; BLIESNER, 1990).

Sistemas de irrigação instalados em áreas com declividade são mais caros que em terrenos em nível. Marcuzzo et al. (2010) constataram essa condição ao simular a distribuição de água para irrigação na otimização de rede de irrigação de microaspersão, obtendo o menor custo, R$1816,45 ha^{-1} ano^{-1}, na condição de terreno em nível. O maior custo da rede hidráulica de irrigação, R$2312,13 ha^{-1} ano^{-1}, foi encontrado para área com 5% de declividade.

A partir do anteriormente exposto, foi proposta uma análise da influência da declividade no dimensionamento e nos custos dos sistemas de irrigação a partir das seguintes hipóteses: *a) o menor custo total do sistema é obtido com o pleno uso do tempo diário disponível para executar a irrigação; b) linhas laterais de maior comprimento com*

aspersores de menor vazão são mais econômicas que linhas laterais de menor comprimento com aspersores de maior vazão, considerando que a vazão total é a mesma para ambas as situações; c) quanto maior a declividade da área, maior o custo da rede hidráulica e maior o custo total do sistema de irrigação.

Este trabalho teve como objetivo verificar o efeito de diferentes vazões, configurações e declividades do terreno no dimensionamento da rede hidráulica e no custo total de sistema de irrigação por aspersão convencional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação no Brasil

No intervalo entre os anos 60 e 90 a área irrigada no Brasil apresentou aumento de aproximadamente 588%, saindo de 0,45 para 3,1 milhões de hectares (FIGURA 1). A região sul até o ano de 1996 se mostrou com a maior área irrigada, seguida pela região Sudeste, Nordeste, Centro-oeste e Norte (ANA, 2009). No decêndio posterior a região Sudeste apresentou maior crescimento, atingindo a maior área agrícola irrigada do Brasil.

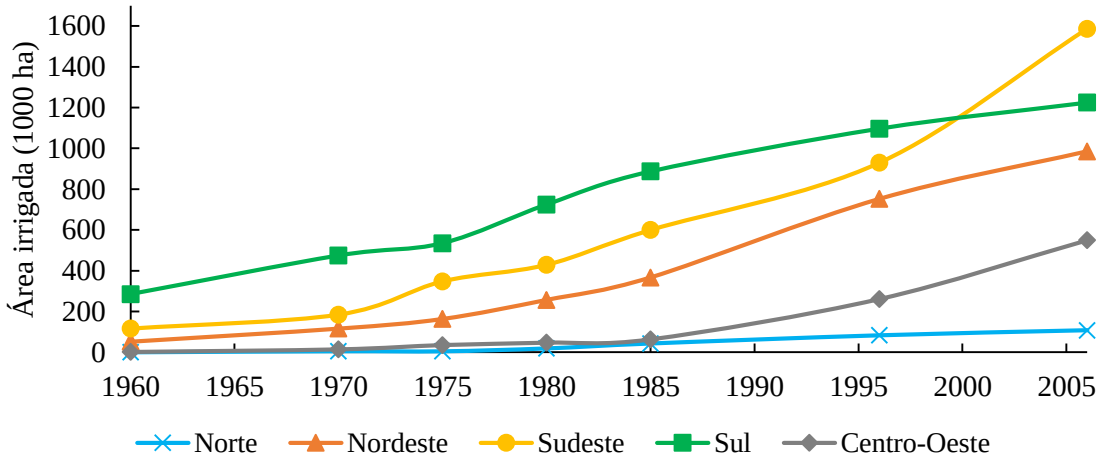


Figura 1. Evolução da área irrigada no Brasil (ANA, 2009; IBGE, 1995/96; 2006).

Comparando os dados obtidos pelo Censo Agropecuário de 1995/1996 com os obtidos em 2006, Paulino et. al. (2011) constataram que a área irrigada no Brasil aumentou de 3.121.642 para 4.453.925 ha, o que resultou num incremento de 1.332.281 de hectares, representando um aumento de 42% da área anterior. Esse incremento representou uma média de 134 mil hectares implantados a cada ano no intervalo de 10 anos. Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.

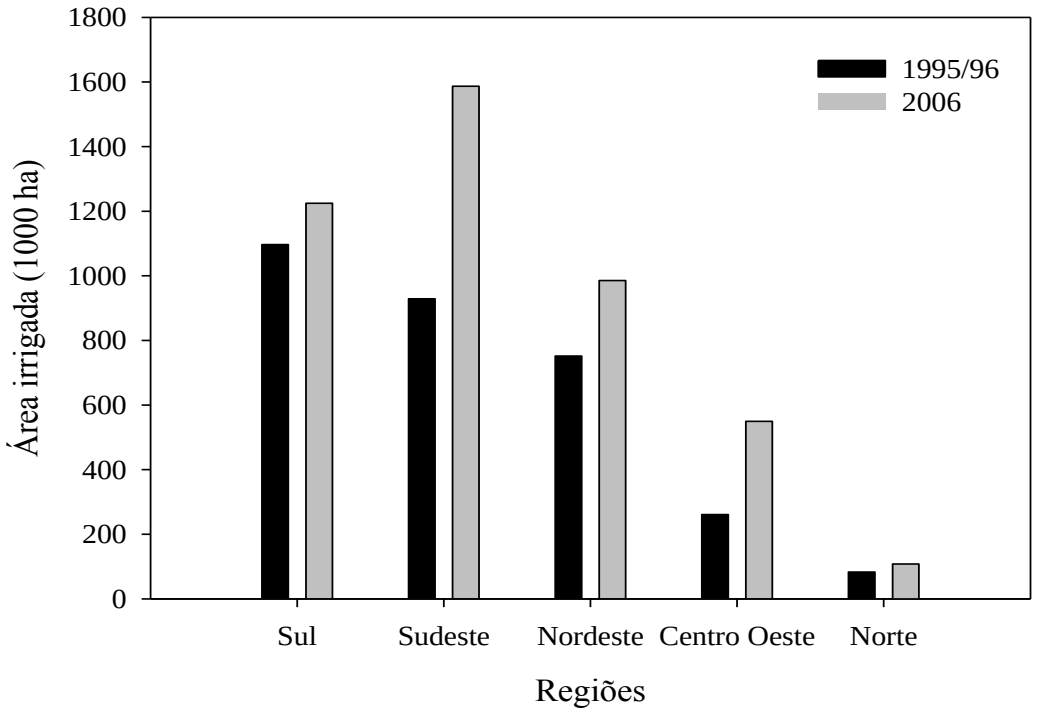


Figura 2. Evolução da área irrigada no Brasil nos dois últimos levantamentos do Censo Agropecuário (IBGE, 1995/96; 2006).

Ainda analisando a Figura 2, pode-se notar as regiões que obtiveram maiores crescimentos percentuais entre os dois censos agropecuários, sendo a região Centro Oeste a que obteve o maior crescimento (110,6%), seguida da Sudeste (70,8%), Nordeste (31,0), Norte (29,8) e Sul (11,7). De acordo a Agência Nacional da Águas (ANA, 2003), a região Centro Oeste caracteriza-se como região de expansão da fronteira Agrícola do Brasil, compreendendo 161 milhões ha, o que equivale aproximadamente 19% do território nacional.

Na Figura 3 tem-se o comportamento dos principais sistemas de irrigação utilizados no Brasil dos anos 2000 até 2015. A irrigação por aspersão convencional foi o método menos utilizado até o ano 2011, voltando a crescer nos quatros últimos anos da pesquisa, ficando atrás apenas do sistema carretel enrolador. Observa-se ainda a que o

sistema de irrigação por aspersão convencional não apresentou tendência de crescimento nos 10 primeiros anos, voltando a subir a partir de 2010 e diminuindo o crescimento a partir de 2013.

A justificava para esse comportamento está no custo da mão de obra. Para Vieira et al. (2011), o sistema de irrigação que apresentou maior custo de mão de obra foi o sistema por aspersão convencional, seguido da aspersão em malha, aspersão fixa e gotejamento.

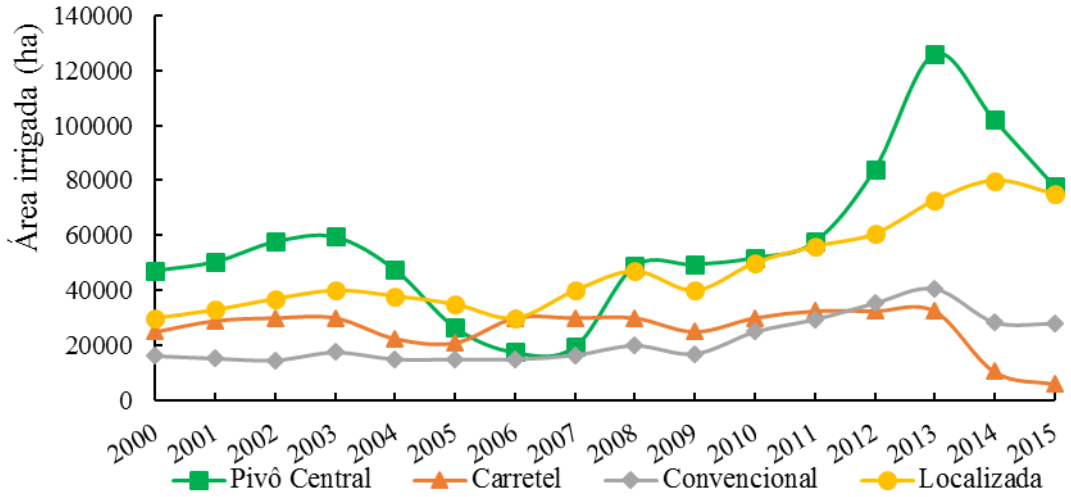


Figura 3. Participação dos sistemas de irrigação na agricultura irrigada brasileira dos anos 2000 até 2015 (ABIMAQ, 2016).

2.2. Sistema de irrigação por aspersão

A irrigação por aspersão é responsável pela maior parte das áreas irrigadas no Brasil (MANTOVANI et al. 2009). Como todos os métodos de irrigação utilizados, o método de irrigação por aspersão apresenta diversas vantagens e desvantagens. Como principais vantagens pode-se destacar a falta de necessidade da sistematização da área; a lâmina de irrigação pode ser bem controlada; dependendo do sistema possibilita economia de mão-de-obra; em determinados sistemas não há restrição quanto ao horário de aplicação (BERNARDO et al. 2006; FRIZZONE et al. 2011).

Por sua vez, como desvantagens tem-se o alto valor inicial de investimento, manutenção e operação; fatores climáticos interferindo diretamente na uniformidade da aplicação da água, principalmente o vento, umidade relativa e temperatura do ar; interferem em alguns tratos culturais (aplicação de defensivos – molhamento das folhas); o molhamento das folhas permite a formação de um microclima, favorecendo o

aparecimento de algumas doenças; pode causar compactação da superfície do solo e erosão dependendo do tamanho da gota; não permite que água salina seja aplicada (BERNARDO et al., 2006; BISCARO, 2009).

Bernardo et al. (2006) enfatizaram que a classificação do sistema de irrigação por aspersão dá-se de acordo com a tubulação utilizada, instalação do sistema no campo, conexões e engates utilizados entre os tubos, o manejo da irrigação e a manutenção das linhas de irrigação. James (1988) destaca que o sistema pode dividir-se em portátil, semiportátel, semipermanente e permanente, com movimentação manual ou mecânica.

Dentre os sistemas de irrigação por aspersão se destaca a aspersão convencional, que segundo Mantovani et al. (2009), é o sistema básico do qual originaram-se os demais. É o típico sistema encontrado nas pequenas e médias propriedades rurais, por atender as necessidades deste público, que na maioria das vezes usa mão-de-obra familiar, já que o sistema mais utilizado é o móvel de engate rápido, por necessitar de investimento inicial mais reduzido quando comparado ao sistema fixo e enterrado.

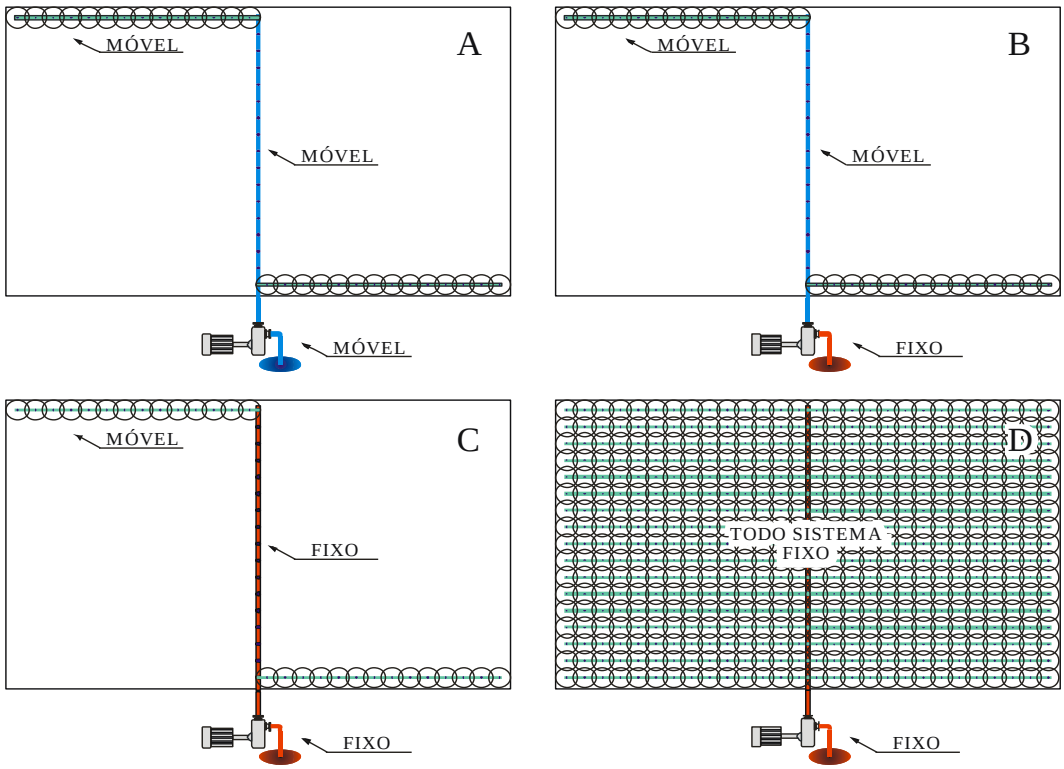


Figura 4. Sistema de irrigação por aspersão: A) Portátil; B) Semiportátel; C) Semipermanente; e D) Permanente.

O sistema portátil tem a linha principal e as linhas laterais móveis, bem como o sistema de bombeamento. Todo o sistema pode ser movido de uma área para

outra. Por sua vez, o sistema semiportátel é semelhante ao sistema inteiramente portátil, exceto o sistema de captação de água e bombeamento, que deve ser fixo. A diferença do sistema semiportátel para o semipermanente consiste na mobilidade da linha principal, que no sistema semipermanente é fixa, podendo ser enterrada ou não. Por fim, tem-se o sistema permanente, em que todos os componentes são fixos e enterrados (FIGURA 4), sendo mais caros e adequados para a automatização (JAMES, 1988).

Frizzone et al. (2011) afirmaram que os primeiros sistemas de irrigação por aspersão instalados foram os móveis, também conhecidos como portáteis. Em seguida surgiram os sistemas com laterais móveis. No entanto, os sistemas já citados eram muito onerosos em se tratando de mão-de-obra. Com a necessidade de diminuir o custo com mão-de-obra, surgiu o sistema fixo.

2.3. Dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional.

Mendonça e Rassini (2005) agruparam os principais dados necessários para a elaboração do projeto de irrigação, a saber: vazão mínima disponível; evapotranspiração de referência; déficit hídrico (mensal, semanal, diário); área máxima irrigável (dependente da vazão mínima); área do projeto; tipo de solo (textura e armazenamento de água) e cultura (s) a ser (em) irrigada (s).

Para os mesmos autores a elaboração de um projeto de irrigação divide-se basicamente em três etapas, consistindo na primeira o levantamento e obtenção dos dados necessários para os demais cálculos. A segunda etapa fundamenta-se na determinação da necessidade e período de aplicação de água, como a lâmina e o turno de irrigação (conhecido também como dimensionamento agronômico). A última etapa baseia-se no dimensionamento da rede hidráulica do sistema, com o objetivo de atender a as exigências das culturas implantadas na área a ser irrigada.

2.3.1. Dimensionamento da Linha Lateral

Testezlaf e Matsura (2015) afirmaram que a linha lateral também conhecida como linha de distribuição é a tubulação responsável pela conexão dos emissores, sendo os emissores para irrigação por aspersão convencional os aspersores.

Segundo Biscaro (2009), para se dimensionar uma linha lateral é necessário antes calcular a vazão horária requerida no projeto (normalmente em $m^3\ h^{-1}$), em função do número de horas disponíveis por dia para irrigação; demanda hídrica da cultura,

área irrigada e da eficiência do sistema de irrigação. Depois deve-se calcular a perda de carga com base nesta vazão e no comprimento da linha.

Em seguida, determina-se o número total de aspersores operando simultaneamente e a vazão unitária de cada emissor (BERNARDO et al. 2006). O número de aspersores em operação pode ser obtido em diferentes configurações hidráulicas, como por exemplo, uma única linha lateral com comprimento L ou duas linhas laterais de comprimento L/2, ou até mesmo quatro linhas com L/4 cada.

Para definir o diâmetro da linha lateral, uma vez que o comprimento e a vazão estão definidos pela configuração adotada e pelo aspersor selecionado, utiliza-se normalmente o critério de variação de vazão máxima de 10% entre os aspersores de maior e de menor descarga (BISCARO, 2009).

2.3.2. Dimensionamento da linha principal e secundária para irrigação por aspersão convencional

As linhas secundárias e principal têm como função a distribuição da água para as linhas laterais, em condições de pressão e quantidade necessárias para o funcionamento dos aspersores, independente das posições que estejam as linhas laterais na área. Antes de dimensionar a linha principal deverá ser decidido a necessidade de se usar linhas secundárias. Havendo necessidade do uso indica-se que seja determinada a sequência de operação destas, o que pode ser feito através de uma esquematização utilizando o desenho da área (BERNARDO et al. 2006; FRIZZONE et al. 2011).

Há grande variação nos tipos de linha principal, podendo ser simples e portátil, como mais complexas, nas quais as secundárias e principal são ramificadas e até enterradas (BERNARDO et al. 2006).

Bernardo et al. (2006) afirmaram que o diâmetro econômico é o principal objetivo do dimensionamento da linha principal.

Deve-se ainda atentar-se para a quantidade de linhas laterais que serão acionadas ao mesmo tempo, sendo necessário fazer uma análise detalhada para saber o requerimento máximo de pressão, interferindo diretamente no valor da perda de carga (OLLITA, 1977).

De acordo com Bernardo et al. (2006) vários são os métodos existentes para se fazer o dimensionamento da linha principal, sendo três os principais: o que leva em conta a análise econômica; o que usa a perda de carga como fator limitante; e o do limite de velocidade; sendo esse último o mais utilizado devido sua praticidade.

O método da velocidade consiste em limitar a velocidade de escoamento na tubulação num intervalo de 1 a 2 m s^{-1}. Fixada a velocidade o passo seguinte consiste na determinação do diâmetro da tubulação da linha principal através do uso da Equação da continuidade (BERNARDO et. al, 2006).

2.4. Perdas de carga nas tubulações

Quando a água se encontra em movimento no interior dos tubos, há um atrito entre esta e a parede dos tubos, originado assim a chamada perda de carga, que ainda pode ser denominada de perdas contínuas, ocorrendo quando as dimensões da tubulação são constantes.

Carvalho (2003) afirmou que existem diversas equações que permitem o cálculo da perda de carga em tubulações, destacando-se a Equação de Darcy-Weisbach, denominada de Equação Universal (Equações 1 e 2).

Haktanir e Ardiçlioğlu (2004) especificaram que a Equação de Darcy-Weisbach apresenta precisão maior que a Equação de Hazen-Williams, já que coeficiente de fricção é calculado em função da rugosidade do tubo e do número Reynolds, não ocorrendo essa abordagem na equação de Hazen-Williams, que não considera o número de Reynolds.

$$hf = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$hf = \frac{8\, f\, L\, Q^2}{\pi^2\, D^5\, g} \quad (2)$$

Em que:

hf – Perda de carga na linha (mca); f - fator de atrito ; L – comprimento da tubulação, (m); D – diâmetro do conduto, (m); g – força gravitacional, (m s^{-2}); V – velocidade na linha (m s^{-1}); Q – Vazão na linha (m^3 s^{-1}).

A velocidade da água na tubulação é obtida pela Equação 3.

$$V = \frac{4\, Q}{\pi\, D^2} \quad (3)$$

O fator (f), determinado pela Equação 4, depende do número de Reynolds (NR) e da rugosidade absoluta (e) da parede interna da tubulação (Equação 5).

Swamee (1993) desenvolveu uma equação para o cálculo de f para os mais variados regimes de escoamento (laminar ou turbulento).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{NR} \right)^{8} + 9{,}5 \left[\ln \left(\frac{e}{3{,}7\,D} + \frac{5{,}74}{NR^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{NR} \right)^{6} \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4)$$

O Número de Reynolds é determinado pela Equação 5, em que a vazão (Q) e o diâmetro (D) devem ser fornecidos no Sistema Internacional, ou seja, $m^3\ s^{-1}$ e m, respectivamente.

$$Re = 1{,}26 \times 10^{6} \frac{Q}{D} \quad (5)$$

Outra Equação utilizada para determinação da perda de carga é a desenvolvida por Hazen-Williams (1903) (Equação 6). Keller e Bliesner (1990) destacaram que a Equação de Hazen-Williams não deve ser empregada para cálculo da perda de carga em tubulações com diâmetros menores que 50 mm.

$$hf = 10{,}65 \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852}\, D^{4,87}} L \quad (6)$$

Em que:

hf – Perda de carga na linha (mca); Q – Vazão na linha ($m^3\ s^{-1}$); C – coeficiente relacionado à rugosidade interna do material da tubulação, (ad); L – Comprimento da linha (m); D – Diâmetro da tubulação (m).

Bernardo et al. (2006) consideraram para o plástico valores de coeficiente de rugosidade de 140 a 145.

2.4.1. Perda de carga em tubulações com várias saídas

Demir et al. (2007) afirmaram que em tubulações que apresentam várias saídas, a integração das perdas de cargas em todos os pontos resulta na perda de carga total.

O estudo da diminuição da perda de carga em tubulações de saídas múltiplas e equidistantes foi realizado por Christiansen (1942), permitindo-o desenvolver um fator (F), dado pela Equação 7:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2\,N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6\,N^2} \quad (7)$$

Em que:

F – Fator de ajuste de Christiansen; m – Expoente da vazão na equação de perda de carga; N – Número de emissores na linha lateral.

Ao observar que em muitos sistemas de irrigação por aspersão o primeiro emissor apresenta espaçamento diferente do espaçamento regular entre os demais emissores, Scaloppi (1988) desenvolveu uma Equação para ajuste do fator de Christiansen (Equação 8):

$$Fa = \frac{NF + x - 1}{N + x - 1} \quad (8)$$

Em que:

x – razão entre a distância da primeira derivação ao início da tubulação e o espaçamento regular entre derivações ($0 \leq x \leq 1$).

Assim, a perda de carga em tubulações com múltiplas saídas é dada pela Equação 9.

$$hf' = hf \,.\, Fa \quad (9)$$

Em que:

hf' – perda de carga ajustada, (mca).

Por fim, tem-se a perda de carga localizada que decorre das perdas provocadas pelos acessórios e demais componentes da tubulação. São mais representativas quando a tubulação for muito curta e/ou existirem muitas peças na tubulação (Equação 10).

$$hf = K\frac{V^2}{2\,g} \qquad (10)$$

Em que: K – coeficiente adimensional obtido experimentalmente para cada peça e situação (Valores Tabelados).

2.5. Dimensionamento em condições de declividade.

Lima et al. (2003) observaram que o adequado dimensionamento de sistemas de irrigação se faz necessário quando se objetiva o uso racional de energia e água, principalmente em áreas com aclives e declives, por ocorrer variação na pressão do sistema, originando diferentes vazões que interferirão diretamente na uniformidade de distribuição de água.

Keller e Bliesner (1990) destacaram que se faz necessário levar em consideração a declividade do terreno ao se dimensionar qualquer sistema de irrigação, utilizando para isso um levantamento planialtimétrico mostrando os desníveis do terreno, como também os obstáculos presentes neste e as divisas entre as demais áreas.

Biscaro (2009) destacou que linhas laterais em nível permitem maior uniformidade de aplicação da água no decorrer desta. Havendo declividade, a linha principal deverá se localizar no sentido da declividade.

De acordo com Keller e Bliesner (1990), ao planejar e dimensionar um sistema de irrigação, alguns critérios devem ser levados em consideração. A variação da vazão é um deles, e não deve exceder 10% na linha lateral, a menos que seja justificado economicamente.

2.6. Interferência da declividade no desempenho de sistemas de irrigação.

Saad et al. (2006) analisando a distribuição da carga hidráulica na linha de derivação com diferentes uniformidades de emissão e declividades do terreno em sistema de irrigação por microaspersão, constataram que em todas combinações uniformidade de emissão x declividade do terreno, a declividade foi determinante e definitiva na construção dos perfis de carga hidráulica na linha de derivação.

Marcuzzo et al. (2011), estudando distribuição de água para irrigação, sendo desta feita por simulação, constaram que o aumento da declividade do terreno permitiu ganho de carga total no sistema.

Os sistemas de irrigação quando implantados em áreas com declividade são mais onerosos que em terrenos em nível. Essa observação também foi feita por Marcuzzo et al. (2010), estudando distribuição de água para irrigação por simulação na otimização de rede de irrigação de microaspersão, tendo obtido custo menor da rede de irrigação, R$1816,45 ha^{-1} ano^{-1}, para o terreno em nível. O maior custo da rede de irrigação, R$2312,13 ha^{-1} ano^{-1}, foi encontrado para a declividade de 5%.

2.7. Relação entre perda de carga e consumo de energia em sistemas de irrigação.

Na prática da irrigação, os gastos com energia são responsáveis pela maior parte dos custos variáveis, chegando até o consumo de 70% do valor, a depender do método utilizado para irrigar (MELO, 1993).

Tubos com diâmetros menores apresentam comumente menor custo, entretanto, são responsáveis por maior perda de carga, o que gera de forma relativa ao diâmetro um maior consumo de energia. Já os tubos de maior diâmetro fornecem perdas de carga menores com menor consumo de energia, mas são mais onerosos (SAAD et al., 1994).

Lima et al. (2009) destacaram que quando se reduz o diâmetro da tubulação há acréscimo da perda de carga, o que aumenta a potência essencial ao funcionamento do conjunto motobomba, o que faz com que o custo de projeto aumente por causa dos custos com energia, ainda que promova economia na aquisição da tubulação. No entanto, ao aumentar o diâmetro da tubulação o custo operacional de energia elétrica e a potência do conjunto elevatório serão menores, o que permitirá uma economia ao longo da vida útil dos equipamentos.

Zocoler et al. (2006) destacam que, com a utilização de menores velocidades de escoamento em bombeamentos tende-se a obter maiores diâmetros, o que propicia tubulações mais onerosas e diminuição dos custos com bombas e motores, originado pela variação de perda de carga. Ainda de acordo com os mesmos autores, a utilização de uma tubulação com redução de diâmetro de 3,4 cm (25cm ao invés do diâmetro econômico de 28,4 cm), gerou um consumo a mais de energia elétrica de 30.800 kWh a cada ano.

Diâmetro econômico consiste naquele que minimiza ao limite a adição dos investimentos com energia e tubulação, evitando o máximo de perda de carga nesta relação (FAVETTA, 1998; BERNARDO et al., 2006).

2.8. Custo total de sistema de irrigação.

O custo de implantação de um sistema de irrigação, também tido como custo fixo, juntamente com o custo de energia são tidos como componentes principais para a origem do custo total destes sistemas (GOMES, 2013).

2.8.1. Custo de implantação

Segundo Gomes (2013), quando se deseja converter financeiramente custos fixos, assim como os investimentos ligados a instalações, em abatimentos anuais uniformes do capital, deve-se multiplicar o atual valor (CA) pelo fator de Recuperação de Capital (FRC), conforme a Equação 11.

$$FRC = \frac{i\,(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{11}$$

Em que: i – Taxa de juros anual, decimal e n – Número de anos correspondente à vida útil das instalações ou ao alcance do projeto.

2.8.2. Custo de energia elétrica

Na determinação do custo da energia necessária para realização do bombeamento da água (Equação 12), deve-se considerar a potência requerida pela estação de bombeamento, o número de horas as quais o sistema irá funcionar durante o tempo considerado e o custo unitário da energia (GOMES, 2013).

$$Custo_{energia} = P\ N_b\ p \tag{12}$$

Em que: $C_{energia}$ – Custo da energia, em unidades monetárias (R$), em um determinado intervalo de tempo; P – Potência requerida pelo sistema de bombeamento, em kW (1Cv = 0,7354 kW); N_b – Número de horas de bombeamento, em um determinado intervalo de tempo; e, p – Custo unitário da tarifa de energia elétrica, em R$/kWh.

Assim, o custo total do sistema é determinado através da Equação 13, onde o primeiro termo refere-se ao custo de implantação (componentes) e o segundo o valor atual do custo da energia requerida pelo sistema de bombeamento.

$$Custo_{total} = (CI \ . \ FRC) + (P. N_b .p) \quad (13)$$

Em que: CI – custo inicial do sistema, R$; FRC – fator de Recuperação de Capital.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Informações da área do estudo

O estudo foi realizado tomando como base características físico-hídricas de uma área localizada no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas, Câmpus de Botucatu, UNESP, nas coordenadas geográficas 23º 25' 16" S; 48º 43' 30" O e altitude de 770 metros.

As informações utilizadas no dimensionamento do sistema de irrigação foram obtidas na área citada acima. A curva de retenção da água no solo foi determinada no laboratório de Água-Solo, do Departamento de Engenharia Rural da FCA - UNESP. Já a densidade do solo (Ds) foi determinada no laboratório de Mecânica do Solo, no mesmo departamento. A velocidade de infiltração básica foi obtida de Gonçalves e Moraes (2012), também na Fazenda Experimental Lageado.

O estudo foi feito usando a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*). As demais informações se encontram na Tabela 1, seguidas de suas respectivas referências. O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférrico, textura argilosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

Tabela 1. Informações utilizadas no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional.

INFORMAÇÕES	VALORES	REFERÊNCIA
CC (%)	32	Laboratório Água-Solo
PM (%)	18	Laboratório Água-Solo
Ds (g dm^{-3})	1,20	Laboratório Mecânica do Solo
VIB (mm h^{-1})	17,88	GONÇALVES e MORAES (2012)
Z (cm)	0,30	WUTKE et al. (2000)
f	0,40	BRITO et al. (2015)
Kc	1,24	BIZARI et al. (2009)
ETo (mm dia^{-1})	4	PEREIRA et al. (2016)

CC – Capacidade de campo; PM – ponto de murchamento permamente; Ds – Densidade do solo; VIB – Velocidade de infiltração básica; Z – Profundidade efetiva do sistema radicular; f – Fator de depleção; Kc – Coeficiente de cultivo; ETo – Evapotranspiração de referência.

Na determinação do espaçamento em que os aspersores serão instalados levou-se em consideração fatores como formato da área e velocidade do vento, objetivando manter a uniformidade de distribuição da água. Neste trabalho foi utilizado o espaçamento 18 x 18 m, já que a área de estudo se localizada em uma região com ausência de ventos fortes nos períodos em que se utilizou da irrigação.

Na Tabela 2 encontram-se as características dos aspersores utilizados, sendo a menor vazão denominada de "Vazão Econômica" e a maior de "Vazão Prática". A vazão econômica é aquela que maximiza a operação considerando o tempo diário disponível para irrigar. Por sua vez, a vazão prática é aquela que permite tempo de operação submúltiplo do tempo diário disponível para irrigar, assegurando que a irrigação de determinada parcela da área total comece e termine no mesmo dia.

Tabela 2. Características e especificações dos aspersores utilizados, conforme o tipo de vazão.

Vazão	Pressão	Vazão	Diâmetro de Alcance	Espaçamento	Intensidade De Aplicação	Fabricante
	(mca)	(m^3h^{-1})	(m)		(mm h^{-1})	
Econômica	30	2,20	30,0	18x18	6,8	Fabrimar®
Prática	30	3,32	31,8	18x18	10,3	Agropolo®

Na escolha do aspersor optou-se por aquele em que a Intensidade de Aplicação (mm h^{-1}) se apresentou menor que a Velocidade de Infiltração Básica da água no solo (mm h^{-1}), evitando assim escoamento superficial. Outro fator levado em consideração foi a pressão, escolhendo sempre o aspersor que proporcione a vazão requerida com menor pressão de serviço. Os diâmetros comerciais foram escolhidos conforme o ANEXO A.

Na Figura 5 encontra-se o croqui com as medidas do terreno que se utilizou como base para realização do estudo.

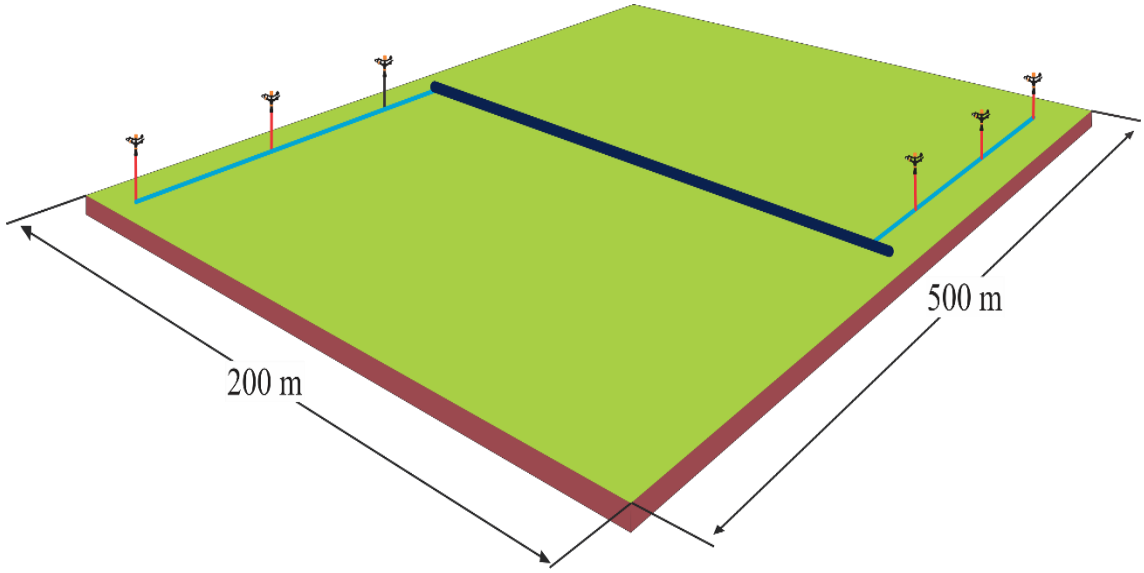


Figura 5. Dimensões da área onde foi realizada a simulação do estudo.

3.2. Características avaliadas

As características estudadas nesse trabalho foram: a) configuração do sistema (A ou B); b) vazão do projeto (econômica ou prática); c) declividade do terreno (0, 2 e 4%); d) modificação do critério de variação de vazão (10 e 15%) e; e) o custo total do sistema (implantação e energia elétrica).

Para realização dos cálculos foram construídas 8 planilhas eletrônicas com o objetivo de dimensionar cada sistema com as especificações descritas na Figura 6. A estrutura para construção de cada planilha está descrita nos APÊNDICES A e B (Tabelas 21 a 34).

No APÊNDICE B têm-se também as especificações usadas para construir a planilha com a vazão prática.

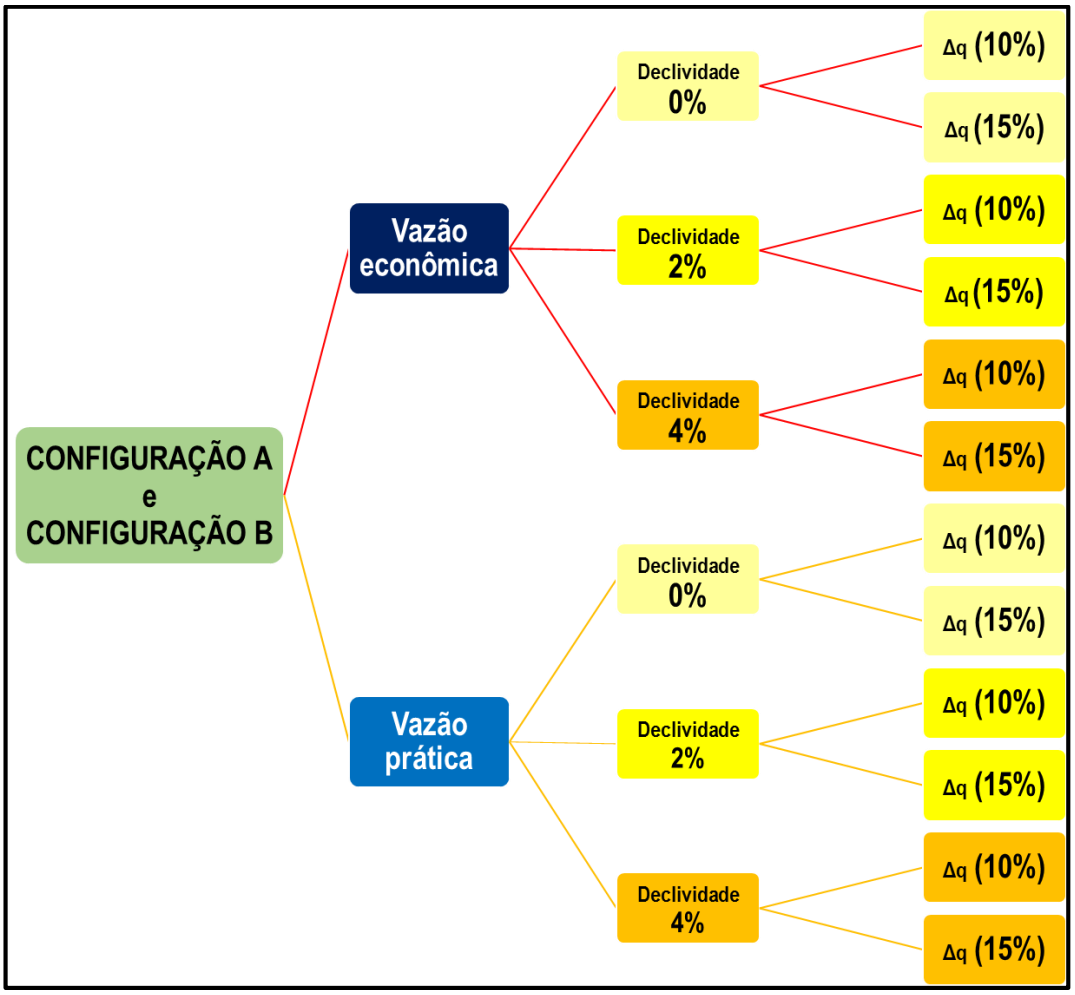


Figura 6. Esquematização das variáveis estudadas neste trabalho

3.2.1. Configurações da rede hidráulica

Foram utilizadas as principais configurações encontradas nas áreas com sistema de irrigação por aspersão convencional. Na Figura 7A tem-se a configuração mais utilizada, denominada de CONFIGURAÇÃO A, a qual adota apenas uma linha principal com uma linha lateral de cada lado. Na Figura 7B nota-se que a linha principal se divide em duas, originando quatro linhas laterais operando simultaneamente, sendo esta a CONFIGURAÇÃO B.

Os diâmetros tanto da linha principal, quanto da linha lateral tendem a ser maiores na Configuração A. Algo a ser evidenciado na Configuração B é a existência de linhas secundárias (Figura 7B), sendo a linha principal o trecho de tubulação entre a saída da bomba e o início da área irrigada, onde se tem fluxo com a vazão total.

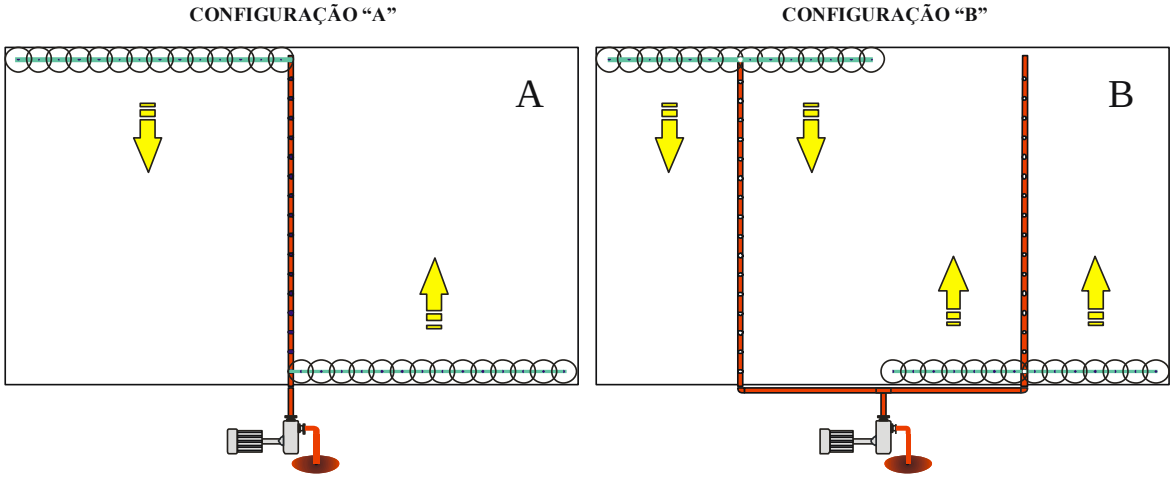


Figura 7. Configurações utilizadas: A) uma linha principal no meio, e; B) duas linhas secundárias ao centro do terreno.

3.2.2. Vazão

O sistema foi dimensionado com dois tipos de vazão: "econômica", que maximiza o número de horas disponível para irrigar e utiliza todo o armazenamento disponível no solo para irrigação; e a vazão "prática", que permite ao produtor um manejo com tempo de operação submúltiplo do número de horas disponíveis de trabalho por dia.

As Tabelas 3 e 4 demonstram o manejo de irrigação utilizando a vazão econômica e prática, respectivamente. O dimensionamento eficiente (vazão econômica) nem sempre permite ao agricultor irrigante um manejo satisfatório da sua área, isso porque o tempo de irrigação determinado nesses projetos nem sempre permitem a conclusão de números exatos de linhas laterais no período diário de irrigação, como se observa na Tabela 3.

Uma das soluções é modificar a vazão de projeto, denominada de econômica, tornando-a prática, surgindo daí a denominação de *vazão prática*. Na Tabela 4 exemplifica-se esse manejo, em que a cada dia quatro posições recebem a lâmina de irrigação em períodos de 2,5 horas. Isso só é possível por causa do aumento da vazão do aspersor e, consequentemente, do aumento da vazão total do projeto.

Tabela 3. Caracterização da aplicação de lâminas de irrigação de acordo com a Vazão Econômica, na Configuração A.

Dia	Posições											Soma diária
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**(horas)**
1	3,71	3,71	2,58	-	-	-	-	-	-	-	-	10
2	-	-	1,13	3,71	3,71	1,45	-	-	-	-	-	10
3	-	-	-	-	-	2,26	3,71	3,71	0,32	-	-	10
4	-	-	-	-	-				3,39	3,71	2,9	10
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,81
Duração por posição (horas)	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	3,71	**40,81**

Tabela 4. Caracterização da aplicação das lâminas de irrigação de acordo com a proposta da Vazão Prática, para configuração A.

Dia	Posições											Soma diária
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**(horas)**
1	2,5	2,5	2,5	2,5	-	-	-	-	-	-	-	10
2	-	-	-	-	2,5	2,5	2,5	2,5	-	-	-	10
3	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	2,5	2,5	7,5
Duração por posição (horas)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	**Total (27,50)**

Na situação da Tabela 4, apesar da grande facilidade no manejo tem-se o inconveniente do sistema ficar aproximadamente 1,25 dias parado, já que o aumento da vazão permitiu que a lâmina fosse aplicada mais rápido, levando 27,50 horas para finalizar toda a irrigação, sendo que na vazão econômica esse tempo foi de 40,81 horas.

3.2.3. Declividade

Os percentuais de declividade escolhidos para serem levados em consideração na simulação dos dimensionamentos foram: 0 (em nível), 2 e 4%.

Quando o terreno se encontra em declividade, é usual dividir a linha lateral em dois trechos: aclive e declive. Desta forma, o dimensionamento pode ser feito de duas formas: trechos em aclive e em declive com mesmo comprimento, porém com

diâmetros distintos; ou trechos em aclive e em declive com mesmo diâmetro, porém com diferentes comprimentos. Neste trabalho optou-se pela segunda opção, por ser a mais prática.

Para determinar os comprimentos dos trechos em aclive e declive para as declividades de 2 e 4% utilizou-se a Equação 14 (KELLER; BLIESNER, 1990).

$$\frac{S_0\ L_T}{hf_L} = \left[1 - \left(\frac{F_a\ S_0\ L_T}{hf_L}\right)^{0,5}\right] + \left(\frac{F_a\ S_0\ L_T}{hf_L}\right)^{1,5} = Y^3 - (1-Y)^3 \qquad (14)$$

Em que:
S_o –Gradiente de declividade do terreno, m m^{-1}; L_T – Comprimento total (soma dos trechos em aclive e declive), m; hf_L – Perda de carga total, mca; Fa – Fator de correção; Y – Fração do comprimento total L_T, equivalente ao trecho em declive ($0,5 \leq Y \leq 1$).

Na determinação do comprimento dos trechos em aclive e declive, através do uso da Equação 14, utilizou-se a opção "Solver" do pacote Microsoft office® / Excel® (FIGURA 8).

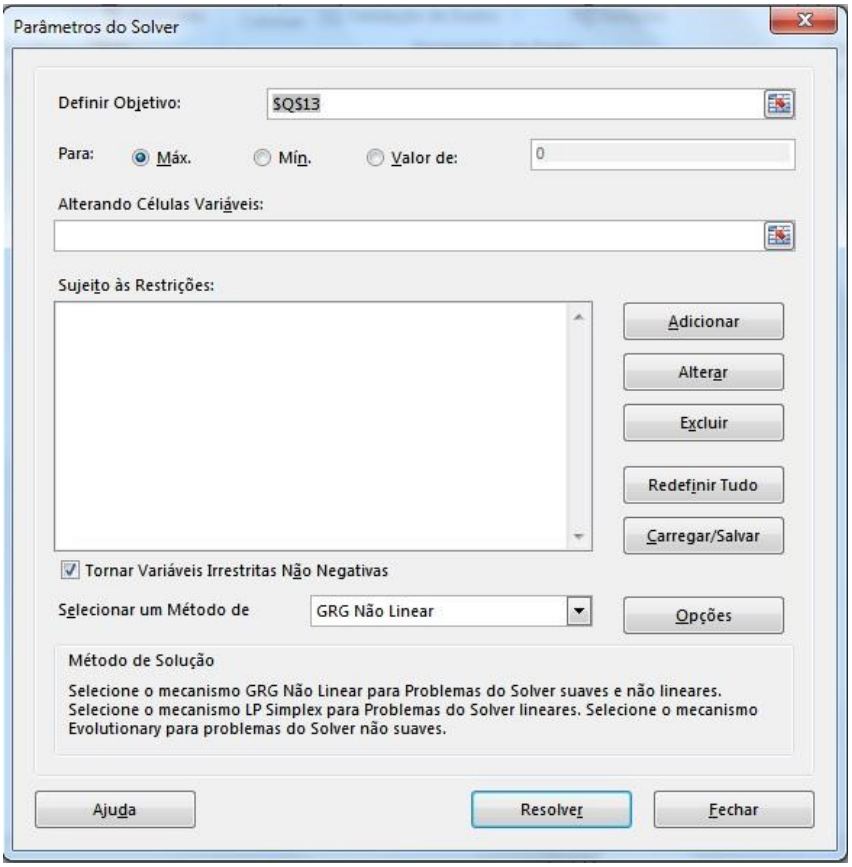


Figura 8. Suplemento utilizado para determinação dos trechos em aclive e declive.

3.2.4. Critério de dimensionamento

Keller e Bliesner (1990) afirmaram que é permissível na linha lateral apenas uma variação de pressão de 20% da pressão de serviço do aspersor, o que equivale a 10% da variação de vazão (10% de Δq = 20% de ΔH), podendo exceder se for viável economicamente. Assim, decidiu-se comparar os sistemas dimensionados com esse critério e com outros dimensionados com 15% da variação de vazão.

Para o critério de 20% da ΔH ou 10% de Δq, tem-se as equações 15 e 16.

$$hf_L = 0{,}2216H_{med} \quad \text{(em nível)} \tag{15}$$

$$hf_L = 0{,}2216H_{med} - 1{,}05\ S_0.L \quad \text{(em aclive)} \tag{16}$$

Em que:
H_{med} – Pressão de serviço do aspersor, mca; S_o – Gradiente de declividade do terreno, m m^{-1}, e L – Comprimento da linha lateral, m.

Para encontrar a equivalência das equações 15 e 16 para a situação de 15% de Δq foi necessário a realização de novos cálculos, como descrito nos APÊNDICES C e D.

As equações para a condição de 15% de Δq (equivalente a 28% de ΔH) são:

$$hf_L = 0{,}3544H_{med} \quad \text{(em nível)} \tag{17}$$

$$hf_L = 0{,}3544H_{med} - 1{,}10\ S_0.L \quad \text{(em aclive)} \tag{18}$$

3.3. Construção das planilhas

As características do solo, planta, clima, sistema de irrigação e dimensões da área foram consideradas como dados de entrada (FIGURA 9).

De posse de todos os dados necessários para o dimensionamento, foram construídas as planilhas com todas as situações que constam no objetivo deste trabalho, usando a equações de 1 a 18.

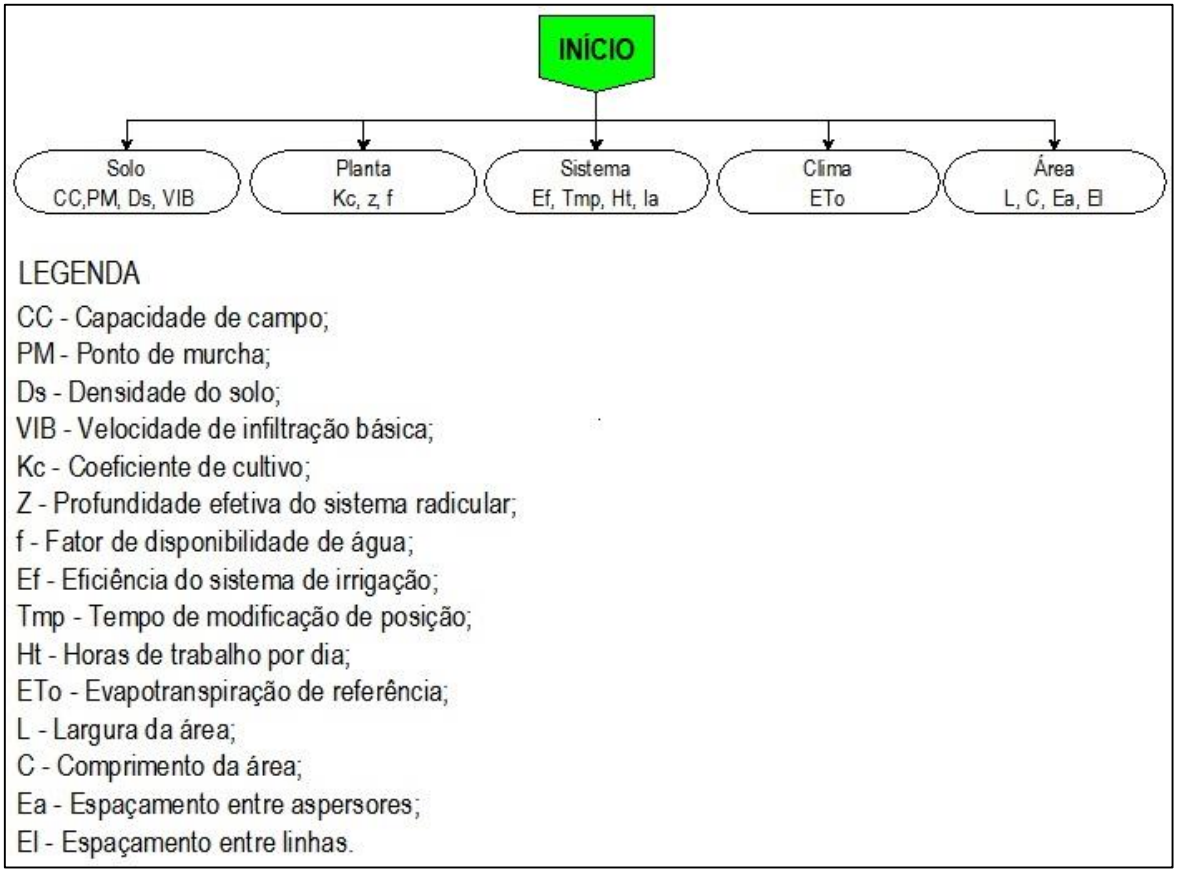


Figura 9. Fluxograma dos dados de entrada para início do dimensionamento.

3.4. Custos do sistema de irrigação

O custo total de um sistema de irrigação consiste da adição dos custos da energia requerida pelo sistema de bombeamento com o custo de implantação deste sistema, corrigido pelo fator de Recuperação de Capital (FRC). Utilizou-se as equações 11, 12 e 13 para determinar o custo total anual do sistema. Utilizou-se como taxa de juros para o corrente ano o percentual de 14,25%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Influência da configuração da rede hidráulica no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional.

A Tabela 5 apresenta as diferenças no quesito quantidade e dimensões de componentes nos sistemas de irrigação nas configurações “A” e “B” (FIGURA 7), quando dimensionados com: Vazão Econômica (VE) e Vazão Prática (VP). Observou-se que as características avaliadas declividade e variação de vazão não contribuíram para essas diferenças existentes, exceto, no sistema de bombeamento para algumas situações.

Nas duas configurações (CA e CB) foram utilizados tubos com diâmetro de 4” na linha principal para VE, aumentando para 5” na VP. A principal diferença entre as configurações para a linha principal consistiu na quantidade de tubos, sendo maior na CA.

Por sua vez, a menor quantidade de tubos na linha principal na CB justificou-se por uma particularidade, sendo esta a existência de linhas secundárias usadas com a função de distribuir a água para as linhas laterais, não podendo receber a nominação de linha principal por não passar a vazão total por elas (Tabela 5).

Outra particularidade da CB foi a substituição do recalque, passando este a ser a linha principal, já que a vazão total passa apenas no suposto recalque. Já na CA o recalque existe e apresenta comprimento igual para as duas vazões (VE e VP), diferindo apenas quanto ao diâmetro da tubulação, sendo maior na VP (Tabela 5).

Tabela 5. Quantidade de materiais nas configurações A e B.

COMPONENTES DO SISTEMA	Unidade	CA		CB	
		VE	VP	VE	VP
LINHA PRINCIPAL					
Tubulação aço zincado 4”	m	192	-	60	-
Tubulação aço zincado 5”	m	-	192	-	60
Válvula de derivações para ramais 3” > 2”	Unid	-	-	4	-
Válvula de derivações para ramais 3” > 3”	Unid	-	-	-	4
Válvula de derivações para ramais 4” > 3”	Unid	2	-	-	-
Válvula de derivações para ramais 5” > 3”	Unid	-	2	-	-
LINHA SECUNDÁRIA					
Tubulação aço zincado 3”	m	-	-	318	318
LINHA LATERAL					
Tubulação aço zincado 2”	m	-	-	468	0
Tubulação aço zincado 3”	m	492	-	-	468
Tubulação aço zincado 4”	m	-	492	-	-
Engate rápido com válvula automática para aspersos 1” rosca	Unid	28	28	28	28
Tubo de subida 1 m com 1” dupla rosca	Unid	28	28	28	28
Aspersor AGROP, MV-360 (Valor médio)	Unid	-	28	-	28
Aspersor FABRIMAR ECO232 (Valor médio)	Unid	28	-	28	-
RECALQUE					
Tubulação aço zincado 4”	m	60	-	-	-
Tubulação aço zincado 5”	m	-	60	-	-
ACESSÓRIOS					
Chave compressora de 380V	Unid	1	1	1	1
Cotovelo aço zincado 90° 3”	Unid	-	-	2	2
Redução aço zincado 4” > 3”	Unid	-	-	1	
Redução aço zincado 5” > 3”	Unid	-	-	-	1
Registro de gaveta 3”	Unid	-	-	2	2
Registro de gaveta 4”	Unid	1	-	-	-
Registro de gaveta 5”	Unid	-	1	-	-
Tampão final 2”	Unid	-	-	4	-
Tampão final 3”	Unid	2	2	1	5
Tampão final 4”	Unid	1	2	-	-
Tampão final 5”	Unid	-	1	-	-
Tê aço zincado 90° 3”	Unid	-	-	2	2
Válvula de retenção 3”	Unid	-	-	2	2
Válvula de retenção 4”	Unid	1	-	-	-
Válvula de retenção 5”	Unid	-	1	-	-

CA – Configuração A; CB – Configuração B; VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática.

Os diâmetros das linhas laterais diferiram com a modificação da vazão, declividade e critérios de dimensionamento para as duas configurações estudadas (Tabela 5).

A modificação da configuração acarretou no surgimento de novos componentes na CB, como: cotovelos de 90º, reduções e tês (Tabela 5).

Dos componentes do sistema o único que sofreu influência da declividade do terreno foi o conjunto motobomba. Nas Tabelas 6 e 7 tem-se a potência teórica e comercial do conjunto motobomba nas diversas situações de dimensionando estudadas para a CA. Vale salientar que a Tabela 6 foi inserida apenas para se entender a influência que os parâmetros estudados tiveram sobre o sistema de bombeamento. Nos cálculos de custo do sistema foram utilizados os dados da Tabela 7.

Tabela 6. Potência teórica do conjunto Motobomba, de acordo com as configurações estudadas.

COMPONENTE	Δq %	CONFIGURAÇÃO A					
		VE			VP		
		NÍVEL	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Potência do Conjunto Motobomba (CV)	10	22,10	21,76	21,47	24,70	25,70	24,64
	15	23,53	23,00	22,67	25,91	27,88	27,79

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão.

Tabela 7. Potência comercial do conjunto Motobomba, de acordo com as configurações estudadas.

COMPONENTE	Δq %	CONFIGURAÇÃO A					
		VE			VP		
		NÍVEL	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Potência do Conjunto Motobomba (CV)	10	25	25	25	25	30	25
	15	25	25	25	30	30	30

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão.

Para a VE não houve diferença da potência comercial requerida para os quesitos declividade e variação de vazão. No entanto, ao utilizar-se a VP notou-se a influência da declividade apenas para o desnível de 2%. A condição de declividade de 4% na VP mostrou que em algumas situações a declividade (declive) pode trazer benefícios no dimensionamento de sistemas de irrigação, reduzindo a potência comercial requerida pelo conjunto motobomba, sendo neste caso de 5CV, quando comparando a 2% (Tabela 7).

Scaloppi (1986) destaca a necessidade de se analisar de forma simultânea os custos que compõe os sistemas de irrigação por aspersão, inclusive com água e energia, gerando assim diferentes alternativas para o dimensionamento destes sistemas. Essa necessidade ocorre por estes sistemas apresentarem grande demanda de energia.

A potência dos conjuntos motobomba para a CB em todas as situações de dimensionando estudadas estão dispostas nas Tabelas 8 e 9, sendo respectivamente para as condições teórica e comercial. Como já citado, a Tabela 8 foi apresentada apenas com o objetivo de mostrar a variação da potência originada do dimensionamento. Nos cálculos de custo do sistema foi utilizada a Tabela 9.

Tabela 8. Potência teórica do conjunto Motobomba, de acordo com as configurações estudadas.

COMPONENTE	Δq %	CONFIGURAÇÃO B					
		VE			VP		
		NÍVEL	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Potência do Conjunto Motobomba (CV)	10	25,61	25,99	26,33	27,67	29,71	29,67
	15	25,70	26,76	27,79	27,67	31,57	31,53

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão

Tabela 9. Potência comercial do conjunto Motobomba, de acordo com as configurações estudadas.

COMPONENTE	Δq %	CONFIGURAÇÃO B					
		VE			VP		
		NÍVEL	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Potência do Conjunto Motobomba (CV)	10	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
	15	30,00	30,00	30,00	30,00	35,00	35,00

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão

A declividade e a Δq resultaram no aumento da potência do conjunto motobomba apenas para as declividades de 2 e 4%, quando se utilizou da VP. Para a VE o comportamento da potência requerida foi igual em todas as situações.

4.2. Efeito da vazão do projeto no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional.

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as principais características hidráulicas e de funcionamento do sistema quando dimensionado separadamente com VE e VP, ambos com 10 e 15% de Δq de permissividade, nas CA e CB. Na CA a irrigação é feita

em toda a área seguidamente, já na CB a área é dividida em duas partes iguais no sentido das linhas laterais, irrigando um lado e depois o outro (FIGURA 7).

4.2.1. Vazões econômica e prática na configuração A

Na Tabela 10 estão representadas as principais características hidráulicas e de funcionamento do sistema quando dimensionado nas condições de diferentes vazões e variação de vazão para a CA. Inicialmente observou-se que a característica "variação de vazão" não interferiu nas principais características hidráulicas e no funcionamento do sistema para as condições já citadas, exceto, para o diâmetro teórico da linha lateral.

Tabela 10. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes vazões para configuração A.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	TIPO DE VAZÃO			
	VE		VP	
Δq (%)	10	15	10	15
LINHA PRINCIPAL				
Diâmetro teórico da LP (mm)	104,60	104,60	127,17	127,17
Diâmetro comercial interno da LP (mm)	98	98	148	148
Comprimento da LP (m)	180	180	180	180
Perda de carga na LP (mca)	5,58	5,58	1,43	1,43
LINHA LATERAL				
Diâmetro teórico da LL (mm)	73,03	66,80	85,47	78,18
Diâmetro comercial interno da LL (mm)	73	73	98	98
Comprimento da LL (m)	243	243	243	243
Perda de carga na LL (mca)	6,29	6,29	3,14	3,14
Número de aspersores na LL	14,00	14,00	14,00	14,00
Variação de pressão na LL (%)	17,48	17,48	9,73	9,73
ASPERSOR				
Vazão do aspersor ($m^3\ h^{-1}$)	2,20	2,20	3,27	3,27
Intensidade de aplicação ($mm\ dia^{-1}$)	6,80	6,80	10,30	10,30
Pressão de serviço utilizada (mca)	30,26	30,26	28,89	28,89
DEMAIS INFORMAÇÕES				
Tempo de irrigação por dia (h)	10	10	10	10
Tempo para irrigar duas LL completas (h)	3,71	3,71	2,50	2,50
Tempo ocioso (horas)	0,00	0,00	13,31	13,31
Vazão horária do sistema ($m^3\ h^{-1}$)	62,00	62,00	91,45	91,45

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão; LP – Linha Principal; LD – Linha de Derivação; LL – Linha Lateral

Na linha principal observou-se a interferência do acréscimo da vazão (VP) principalmente no aumento do diâmetro e diminuição da perda de carga, mesmo sendo o comprimento igual para as duas situações (VE e VP). O aumento da vazão fez com que o diâmetro comercial interno da tubulação principal fosse maior 50 mm. Com o aumento do diâmetro interno da tubulação houve diminuição de 74,38% da perda de carga. A justificativa dessa modificação pode ser feita por Saad et al. (1994), que descreveram que tubos de diâmetros menores são responsáveis por maior perda de carga por permitir maior atrito entre a parede do tubo e a água, o que gera maior consumo de energia em relação ao tubo de maior diâmetro.

O tipo de vazão também interferiu na perda de carga da linha lateral, diminuindo em 100,32% quando utilizou-se a vazão prática. O diâmetro comercial da tubulação diferiu para VE e VP, sendo maior para a VP, já que esta apresenta vazão maior.

Sabe-se que no mercado não existem muitos diâmetros de tubo disponíveis, o que muitas vezes obriga ao projetista aumentar ou diminuir de forma significativa o diâmetro teórico para se encaixar no comercial, e assim ajustar o projeto aos critérios de dimensionamento. Para VE, com 10 e 15% de Δq foi necessário diminuir o diâmetro em 0,03mm e aumentar em 6,20 mm, respectivamente. Já para a VP, nas condições de 10 e 15% de Δq, foi preciso diminuir o diâmetro em 12,53 e 19,82 mm, respectivamente.

Na Tabela 10 notou-se diferença na variação de pressão (ΔP) entre os sistemas com vazão econômica e prática, decorrente do aumento da perda de carga e diminuição do diâmetro de tubulação. No entanto, ambos estão de acordo com o critério de dimensionamento exigidos.

Quando a vazão econômica foi aumentada em 32,22% com o objetivo de tornar o sistema mais prático, houve modificação nas características hidráulicas do sistema, como por exemplo o aumento da intensidade de aplicação do aspersor, necessitando de uma observação mais criteriosa na velocidade de infiltração básica de água no solo. Segundo Mantovani et al. (2009), a intensidade de aplicação do aspersor deverá sempre ser menor que a velocidade de infiltração básica do solo.

O tempo de irrigação é o componente que impulsiona todas essas diferenças. Para transformar o sistema em mais prático, permitindo a irrigação de quatro setores por dia (8 linhas laterais), foi necessário preestabelecer um tempo, sendo este 32,61% menor que o determinado no projeto. Esta modificação interferiu diretamente no tempo total de irrigação, já que o aumento da vazão do aspersor permite que a lâmina seja aplicada em

um menor tempo, tornando o sistema ocioso o equivalente a 13,31 horas ao usar a VP, já que o período de irrigação diário foi pré-estabelecido em 10 horas.

4.2.2. Vazões econômica e prática na configuração B

A Tabela 11 apresenta as mesmas informações da Tabela 10, sendo agora na CB.

Tabela 11. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes vazões, para configuração B.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	VAZÃO DO ASPERSOR			
	VE		VP	
Δq (%)	10	15	10	15
LINHA PRINCIPAL				
Diâmetro teórico da LP (mm)	104,60	104,60	127,17	127,17
Diâmetro (interno) comercial da LP (mm)	98	98	148	148
Comprimento da LP (m)	50	50	50	50
Perda de carga na LP (mca)	3,10	3,10	0,79	0,79
LINHA SECUNDÁRIA				
Diâmetro teórico da LD (mm)	73,96	73,96	63,58	63,58
Diâmetro (interno) comercial da LD (mm)	73	73	73	73
Comprimento da LD (m)	315	315	315	315
Perda de carga na LD (mca)	16,52	16,52	12,83	12,83
LINHA LATERAL				
Diâmetro teórico da LL (mm)	49,21	45,01	57,59	52,67
Diâmetro comercial interno da LL (mm)	48	48	73	73
Comprimento da LL (m)	117	117	117	117
Perda de carga na LL (mca)	6,49	6,49	1,75	1,75
Número de aspersores na LL	7,00	7,00	7,00	7,00
Variação de pressão na LL (%)	17,96	17,96	5,59	5,59
ASPERSOR				
Vazão do aspersor ($m^3\ h^{-1}$)	2,20	2,20	3,27	3,27
Intensidade de aplicação ($mm\ dia^{-1}$)	6,80	6,80	10,30	10,30
Pressão de serviço utilizada (mca)	30,26	30,26	28,89	28,89
DEMAIS INFORMAÇÕES				
Tempo de irrigação por dia (h)	10	10	10	10
Tempo para irrigar duas LL completas (h)	3,71	3,71	2,50	2,50
Tempo ocioso (horas)	0,00	0,00	13,31	13,31
Vazão horária do sistema ($m^3\ h^{-1}$)	62,00	62,00	91,45	91,45

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática; Δq – Variação de vazão; LP – Linha Principal; LD – Linha de Derivação; LL – Linha Lateral.

Nesta configuração a área foi dividida em 2 (duas) partes iguais, sendo necessária a inserção de duas linhas secundárias para conduzir a água até as linhas

laterais. Nas secundárias as únicas características que apresentaram variações com o uso das diferentes vazões foram o diâmetro teórico e a perda de carga.

Algumas características das linhas laterais apresentaram similaridade com os resultados da CA, como por exemplo a perda de carga e a variação de pressão. No entanto, outras características diferiram, como é o caso do diâmetro da tubulação que foi 25 mm menor para o critério de 10% de Δq.

4.2.3. Efeito da declividade no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional

Verificou-se pelos resultados apresentados nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 que há interferência direta da declividade nas características hidráulicas de sistemas de irrigação por aspersão convencional.

Tabela 12. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes declividades, com vazão econômica na configuração A.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	0%		2%		4%	
	Aclive	Declive	Aclive	Declive	Aclive	Declive
Comprimento da LL (m)	243	243	189	297	153	333
Diâmetro da LL (m)	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073
Número de aspersores	14	14	11	17	9	19
Vazão do aspersor (m^3h^{-1})	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
Vazão horário do sistema por LL	30,80	30,80	24,20	37,40	19,80	41,80
Perda de carga (mca)	18,19	22,43	7,83	37,68	0,79	60,43
F Christiansen	0,369	0,369	0,379	0,363	0,389	0,360
F Scaloppi	0,346	0,346	0,349	0,344	0,353	0,342
Perda de carga na linha lateral (mca)	6,29	6,29	2,74	12,94	0,28	20,69
Variação de vazão (%)	8,30	8,30	9,01	11,60	9,21	16,73
Variação de pressão (%)	15,91	15,91	17,21	21,85	17,56	30,66

LL – Linha Lateral

Na Tabela 12 estão representadas as características do sistema, quando dimensionado com VE, na CA, nas declividades de 0, 2 e 4%, e 10% de Δq. A única diferença existente quando o sistema foi dimensionado com 15% de Δq consistiu no aumento da perda de carga da linha lateral, o que aumentou a perda de carga total e as variações de pressão e vazão na linha lateral.

Quando o sistema é implantado em áreas regulares com topografia em nível, as características da linha lateral são iguais em ambos os lados. No entanto, quando o mesmo sistema é instalado em áreas com declividade, há modificação das características do sistema, principalmente quanto à perda de pressão (Tabela 12).

A primeira observação da interferência da declividade do terreno encontrada na Tabela 12 foi com relação ao comprimento da linha lateral. Essa diferença ocorreu pelo uso da metodologia de Keller e Bliesner (1990), permitindo que o diâmetro da linha lateral seja mantido e seja modificada a localização da linha principal, originando comprimentos diferentes nos trechos em "aclive" e "declive", sendo sempre o trecho em aclive menor.

Com comprimento menor no trecho em aclive e maior no trecho em em declive, surgem diversas variações nas linhas laterais, a saber: variação no número de aspersores; vazão horário do sistema por linhas lateral; perda de carga total; perda de carga permissível por linha lateral; variação de vazão (%) e variação de pressão (%).

Observou-se nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 que sempre nos trechos em declive a perda de carga (mca), perda de carga permissível (mca), variação de vazão (%) e variação de pressão (%) foram maiores que no trecho em aclive.

Até a declividade de 2% as variações de pressão e vazão foram aceitáveis pelo critério de dimensionamento proposto por Keller e Bliesner (1990). No entanto, quando a declividade aumentou para 4% é momento de rever o projeto, pois, a distribuição da lâmina torna-se menos uniforme a medida que a variação de vazão vai aumentando.

Na situação da Tabela 13 manteve-se a configuração, modificando apenas a vazão (aumento de 32,22%; vazão prática).

Nesta situação (Tabela 13), o aumento da vazão do aspersor com o objetivo de tornar o sistema mais prático, demandou mais pressão do sistema de bombeamento.

Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se as características do sistema dimensionado com VE e VP, respectivamente, na configuração B. Na CA existia apenas uma linha principal, o que originou duas linhas laterais operando simultaneamente. Na configuração B, têm-se duas linhas secundárias, originando quatro linhas laterais de comprimentos menores.

Tabela 13. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes declividades, com vazão prática na configuração A.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	0%		2%		4%	
	Aclive	Declive	Aclive	Declive	Aclive	Declive
Comprimento da LL (m)	243	243	153	333	81	405
Diâmetro da LL (m)	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
Número de aspersores	14	14	12	16	9	19
Vazão do aspersor (m^3h^{-1})	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Vazão horário do sistema por LL	46,59	46,59	39,94	53,25	29,95	63,23
Perda de carga (mca)	9,08	22,43	9,16	38,92	8,49	68,37
F Christiansen	0,369	0,369	0,375	0,365	0,389	0,360
F Scaloppi	0,346	0,346	0,348	0,344	0,353	0,342
Perda de carga permissível (mca)	3,14	3,14	3,19	13,40	3,00	23,41
Variação de vazão (%)	4,49	4,49	8,75	12,23	8,43	20,16
Variação de pressão (%)	8,78	8,78	16,73	22,96	16,15	36,26

LL – Linha Lateral

Comparando a Tabela 14 com a Tabela 12 constatou-se que o diâmetro da linha lateral diminuiu 25mm, o que ocasionou aumento da perda de carga nos trechos em aclive, mesmo sendo menor o comprimento da linha lateral. Apesar dessas modificações, ao se observar os valores de variação de vazão e pressão, pode-se afirmar que o sistema dimensionado com VE apresentou melhor desempenho na CB.

Tabela 14. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes declividades, com vazão econômica na configuração B.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	0%		2%		4%	
	Aclive	Declive	Aclive	Declive	Aclive	Declive
Comprimento da LL (m)	117	117	99	135	99	135
Diâmetro da LL (m)	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
Número de aspersores	7	7	6	8	6	8
Vazão do aspersor (m^3h^{-1})	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
Vazão horário do sistema por LL	15,40	15,40	13,20	17,60	13,20	17,60
Perda de carga (mca)	18,05	22,43	12,54	26,64	6,83	34,60
F Christiansen	0,405	0,405	0,417	0,396	0,417	0,396
F Scaloppi	0,360	0,360	0,364	0,356	0,364	0,356
Perda de carga permissível (mca)	6,49	6,49	4,57	9,48	2,49	12,32
Variação de vazão (%)	7,64	7,64	7,93	8,44	8,36	9,28
Variação de pressão (%)	14,69	14,69	15,23	16,17	16,03	17,70

LL – Linha Lateral

Ao analisar as Tabela 14 e 15 notou-se comportamento semelhante entre as vazões econômica e prática, em todas as declividades avaliadas, ficando dentro do limite de variação de vazão de 10%. Como na configuração A isso ocorreu apenas para a condição em nível e para 2% de declividade, a configuração B mostrou-se mais adequada para a condição em declive.

Tabela 15. Características do sistema de irrigação nas condições de diferentes declividades, com vazão prática na configuração B.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	Nível		2%		4%	
	Aclive	Declive	Aclive	Declive	Aclive	Declive
Comprimento da LL (m)	117,00	117	81	153	45	189
Diâmetro da LL (m)	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073
Número de aspersores	7	7	6	8	6	8
Vazão do aspersor (m^3h^{-1})	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Vazão horário do sistema por LL	23,30	23,30	19,97	26,62	19,97	26,62
Perda de carga (mca)	4,85	22,43	13,57	27,70	13,05	40,97
F Christiansen	0,405	0,405	0,417	0,396	0,417	0,396
F Scaloppi	0,360	0,360	0,364	0,356	0,364	0,356
Perda de carga permissível (mca)	1,75	1,75	4,95	9,86	4,76	14,59
Variação de vazão (%)	2,25	2,25	7,81	9,54	6,32	12,07
Variação de pressão (%)	4,45	4,45	15,00	18,17	12,24	22,68

LL – Linha Lateral

4.2.4. Influência da variação de vazão no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão convencional

Keller e Bliesner (1990) indicaram que a variação de vazão e pressão em projeto, como critério de dimensionamento, não deve ultrapassar 10 e 20%, respectivamente, justificando-se valores superiores apenas se forem economicamente viáveis.

Nas Figuras 10 e 11 encontram-se as características do sistema quando dimensionado com os critérios de 10 e 15% de variação de vazão, respectivamente), combinados com VE e VP, nas configurações A e B. As características mais afetadas com a modificação do critério para a VE foram: variação de vazão, pressão na linha lateral e altura manométrica.

Diante da Figura 10A observa-se que a mudança do critério de dimensionamento não interferiu na performance do sistema, tanto para VE quanto para VP.

Esse comportamento permite afirmar que a distribuição da lâmina de irrigação torna-se uniforme de forma igualitária.

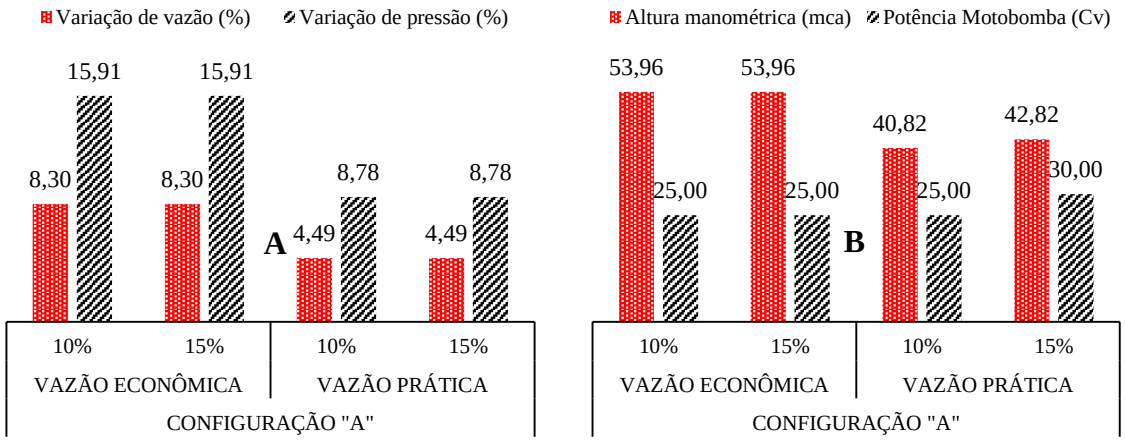


Figura 10. Características do sistema de irrigação quando submetido a diferentes critérios de dimensionamento (variações de vazão - Δq) e diferentes vazões do sistema de irrigação, na configuração A.

Quando se comparou a VE com a VP na Figura 10A, para Δq de 10 e 15%, notou-se que em ambas as situações a VP originou variações de vazão e pressão menores que na VE. Isto justifica-se pelo diâmetro da tubulação, já que a perda de carga diminui significativamente ao utilizar-se um sistema com diâmetro acima do indicado por causa dos diâmetros encontrados no mercado.

Na figura 10B tem-se a informação da influência da modificação de critério na altura manométrica do sistema, o que interfere diretamente na potência do conjunto motobomba. Nas condições de variação de pressão de 10 e 15% para a VE, a altura manométrica não apresentou diferença.

Por sua, ao utilizar-se da VP, notou-se um aumento de 2mca na altura manométrica, influenciado pelo aumento da perda de carga na tubulação decorrente do diâmetro desta. Esse pequeno aumento resultou na necessidade da aquisição de um sistema de bombeamento com 5CV a mais nesta condição. Essa situação obriga o produtor a adquirir bombas mais potentes e onerosas.

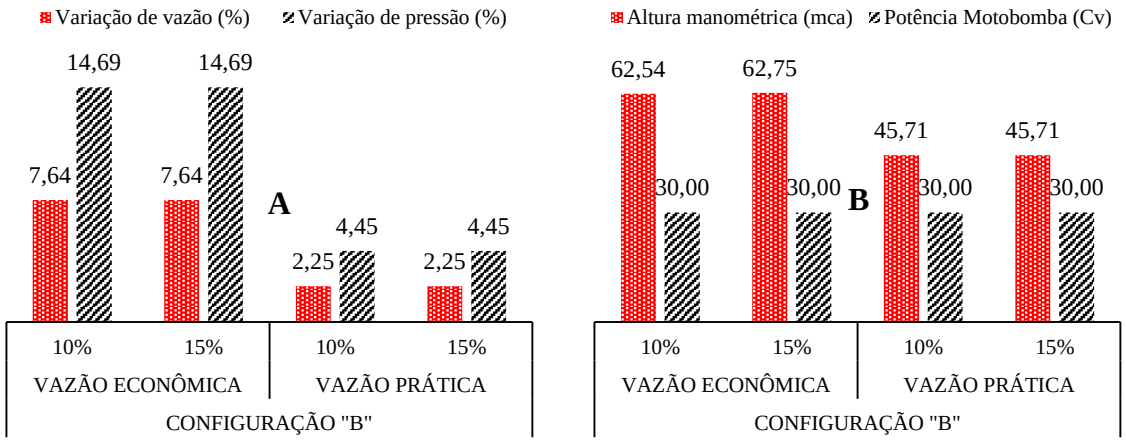


Figura 11. Características do sistema de irrigação quando submetido a diferentes critérios de dimensionamento (variações de vazão - Δq) e diferentes vazões, na configuração B.

Na Figura 11A a modificação do critério da variação de vazão (Δq) não apresentou diferença em nenhuma das características na VE, assim como na VP.

Na figura 11B tem-se a influência da modificação de critério na altura manométrica do sistema e, consequentemente, na potência do conjunto motobomba. A altura manométrica na condição de vazão econômica sobressaiu-se a todas outras, justificando esse comportamento a pressão requerida pela linha lateral, que foi a maior de todas as situações. Ao usar-se 15% da Δq, a perda de carga na linha lateral aumentou, aumentando assim a altura manométrica.

Sabe-se que a altura manométrica influi diretamente na potência do conjunto motobomba, no entanto, na situação da Figura 11B o aumento da vazão do aspersor e consequentemente da vazão total do sistema sobressaiu-se, aumentando também a potência requerida pelo conjunto motobomba.

Carvalho e Oliveira (2008) descreveram que a altura manométrica necessária no sistema de bombeamento está em função do desnível geométrico total, da pressão requerida das unidades para aplicação da água e das perdas de pressão resultante da condução da água pelos tubos, assim como dos acessórios que compõem o sistema.

4.3. Custo total do sistema de irrigação nas condições estudadas

4.3.1. Custo de implantação

Nas Tabelas 16, 17 e 18 encontram-se os custos de implantação (custo fixo anual) do sistema de irrigação por aspersão convencional para a vazão econômica e prática, nas diferentes configurações e nos diferentes critérios de dimensionamento, quando: em nível, e com declividade de 2 e 4%.

Tabela 16. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas condições estudas, na condição em nível.

Δq (%)	VALOR TOTAL (R$)			
	CONFIGURAÇÃO "A"		CONFIGURAÇÃO "B"	
	VE	**VP**	**VE**	**VP**
10	7278,51	7988,78	8229,60	9052,35
15	7278,51	8378,86	8229,60	9052,35

VE – Vazão econômica; VP - Vazão prática

Constatou-se na Tabela 16 que o critério da variação de vazão (Δq) quando modificado de 10 para 15% interferiu no custo fixo do sistema apenas na CA, condição de VP. Ao comparar a influência da VE e VP no custo fixo anual do sistema na CA notou-se que houve um aumento de 9,76 e 15,12% quando usou a VP, nas condições de 10 e 15% de Δq, respectivamente. Esse aumento justificou-se pela modificação do diâmetro das tubulações e outros componentes. Sabe-se que diâmetros maiores apresentam custos maiores.

Nas mesmas condições, sendo desta feita na CB, a VP aumentou em 10% o custo fixo, quando comparado a VE, nas duas condições de Δq.

Ao comparar o custo da VE e VP dentro das configurações, notou-se que o uso da VP resultou num custo fixo maior, sendo esse aumento de 13,07 na configuração A e 13,31% na configuração B, para 10% de Δq; para 15% de Δq os incrementos foram de 13,07 e 8,04% nas configurações A e B, respectivamente.

Na Tabela 17 o custo fixo anual do sistema na declividade de 2% apresentou aumento quando se comparou a influência da VE e VP, na CA e 10% de Δq, sendo esse aumento de 15,12%. Esse aumento se deu por causa do sistema bombeamento, que foi maior na VP.

Na CB, a VP aumentou o custo em 10% e 14,32%, para as Δq de 10 e 15%, respectivamente. Ao comparar a variação do custo dentro das configurações,

observou-se que a VE resultou em um sistema 13,07% mais oneroso na CB, já a VP proporcionou 8,04% de aumento do custo na mesma configuração, para Δq de 10%.

Tabela 17. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas condições estudas, com declividade de 2%.

Δq (%)	VALOR TOTAL (R$)			
	CONFIGURAÇÃO "A"		CONFIGURAÇÃO "B"	
	VE	**VP**	**VE**	**VP**
10	7278,51	8378,86	8229,60	9052,35
15	7278,51	8378,86	8229,60	9407,78

VE – Vazão econômica; VP - Vazão prática

Por fim, tem-se o sistema implantado na área com 4% de declividade do terreno (Tabela 18).

Tabela 18. Custo fixo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional para todas condições estudas, com declividade de 4%.

Δq (%)	VALOR TOTAL (R$)			
	CONFIGURAÇÃO "A"		CONFIGURAÇÃO "B"	
	VE	**VP**	**VE**	**VP**
10	7278,51	7988,78	8229,60	9052,35
15	7278,51	8378,86	8229,60	9407,78

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática

Na CA a variação de vazão não interferiu no custo fixo do sistema para VE, comportamento diferente na VP, que foi 4,90% maior para Δq de 15%. Houve interferência direta das vazões, com a VP aumentando o custo em 9,76% na CA, e 10% na CB.

Os maiores custos fixos foram encontrados na CB, para VP nas declividades de 2 e 4% e Δq de 15%.

4.3.2. Custo anual de energia elétrica (R$)

Nas Figuras 12 e 13 encontram-se os custos anuais de energia elétrica para todas as situações estudadas. Utilizou-se como base de cálculo para o número de dias irrigados o equivalente a três ciclos da cultura do feijão, que é de 90 dias (irrigando 60 dias), sendo o total de 180 dias de irrigação. O número de horas de irrigação por dia foi

o mesmo utilizado no dimensionamento de todos os projetos, sendo ele de 10 horas. Assim, o número de total de horas de irrigação neste estudo foi de 1800 h ano^{-1}.

O valor do kW hora (R$ kWh^{-1}) foi retirado das bases de cálculo da Empresa AES ELETROPAULO (www.aeseletropaulo.com.br/para-sua-casa/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica). As variáveis citadas foram fixadas na equação, usando a potência comercial da bomba referente a cada situação de estudo.

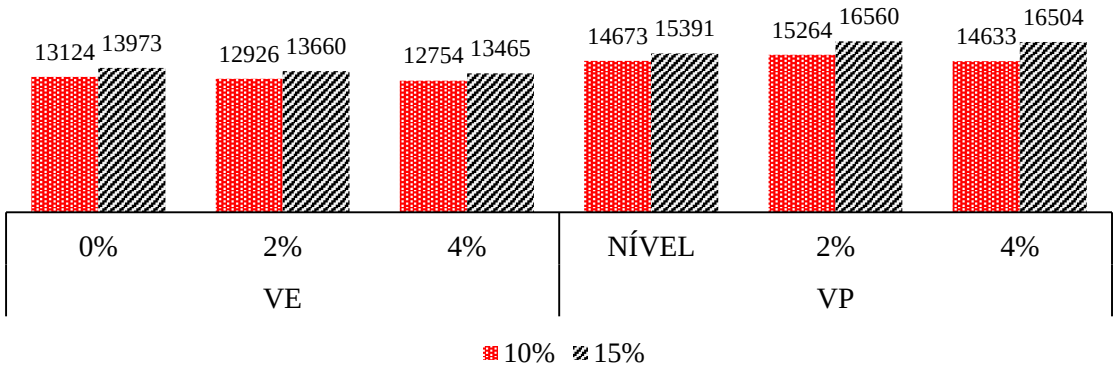


Figura 12. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração A, obtido com potência teórica.

Na Figura 12, tem-se o custo de energia elétrica (R$) calculado com a potência teórica do conjunto motobomba. Vale salientar que não é essa a potência utilizada para calcular o custo da energia elétrica inserido no custo total, sendo apresentado apenas para contextualizar a influência da declividade e do critério da variação de vazão no consumo da energia por causa do sistema de bombeamento. No entanto, ao se utilizar um regulador de amperagem no sistema de bombeamento pode ser utilizada a potência teórica.

Como neste trabalho utilizou-se a potência comercial dos sistemas de bombeamento, a Figura 13 caracterizou o custo real da energia elétrica para o período de 1800 horas de irrigação.

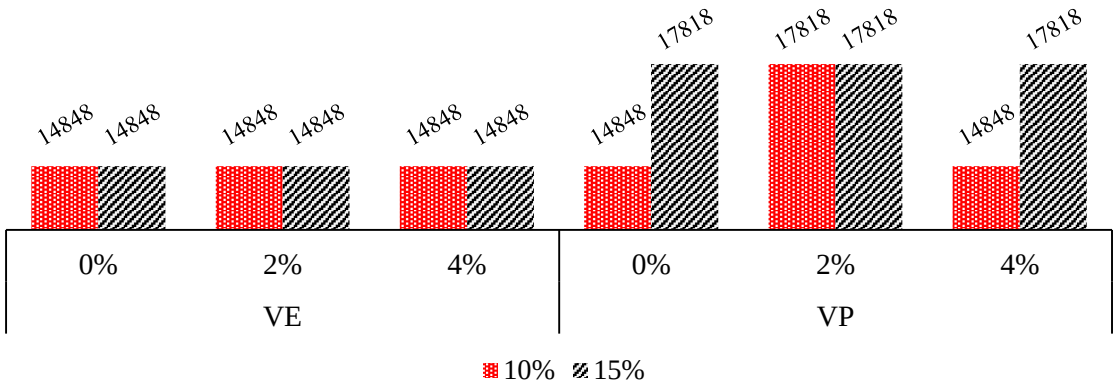


Figura 13. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração A, obtido com potência comercial.

Na Figura 13 pode ser observado que na VE, para todas as situações encontrou-se o mesmo custo anual de energia. Na VP por sua vez, foram encontrados os maiores custos, preponderantemente na Δq de 15%. O conjunto motobomba o principal motivo para esse decréscimo, já que se utilizou 5Cv de potência a menos quando comparado as demais situações.

Na declividade de 4% e Δq de 10%, observou-se o benefício gerado pela declividade (declive), onde o ganho de pressão originou altura manométrica menor, que requereu sistema de bombeamento menos potente, o que permitiu uma economia de energia de R$ 2.970,00 no ano (Figura 13).

A Figura 14 também foi inserida com o objetivo de mostrar a influência da declividade e do critério da variação de vazão no consumo da energia por causa do sistema de bombeamento, sendo desta feita para a CB. No entanto, o custo real da energia elétrica para o período de1800 horas de irrigação na CB é encontrado na Figura 15.

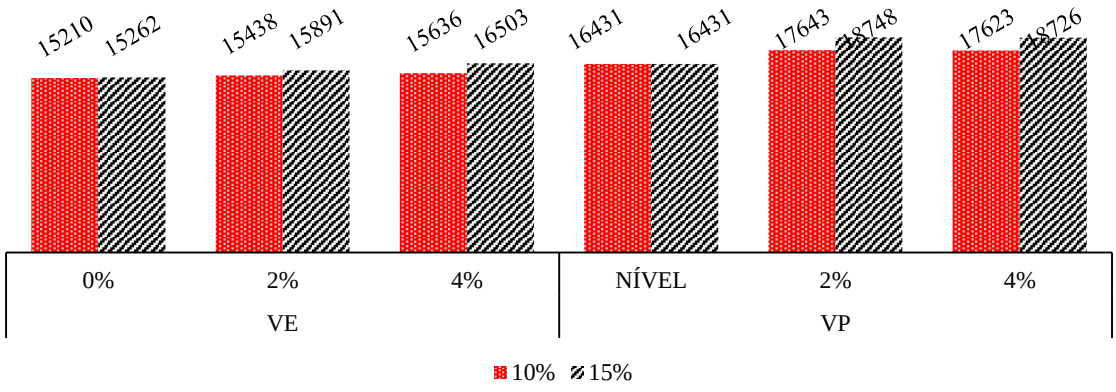


Figura 14. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração B, obtido com potência teórica.

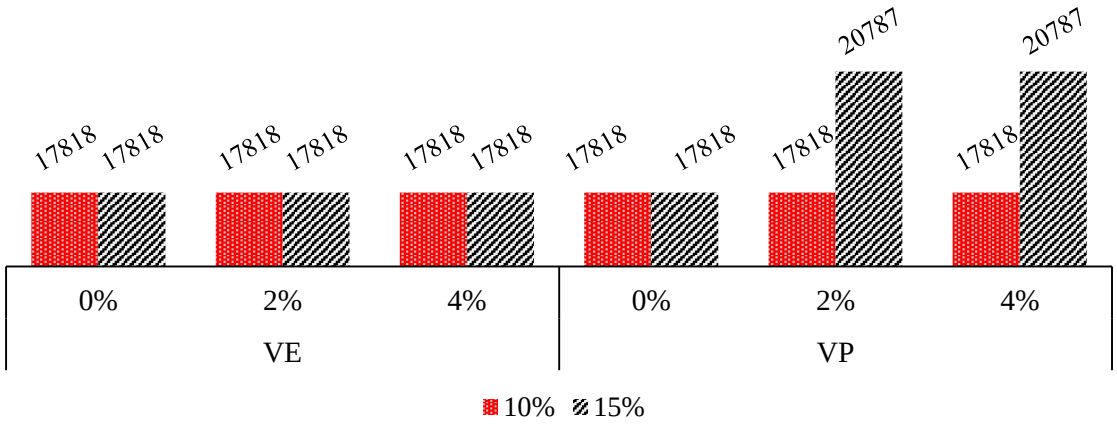


Figura 15. Custo anual (R$) do sistema de irrigação por aspersão convencional nas condições de estudo para a configuração B, obtido com potência comercial.

Na CB os maiores custos foram encontrados na VP para as declividades de 2 e 4%, na Δq de 15%, impulsionado também pelo aumento da altura manométrica e consequentemente da necessidade de bombas maiores (FIGURA 15).

4.3.3. Custo total anual (R$)

Considerou-se como custo total a adição do custo de implantação com o custo de energia elétrica. O custo total refere-se a uma área de 10 ha, utilizando 270 dias de cultivo (3 ciclos), sendo 180 dias com irrigação.

Nas Tabelas 19 e 20 encontram-se os custos totais (R$ ha^{-1}) para todas as variáveis estudadas, nas configurações A e B, respectivamente.

Tabela 19. Custo total anual (R$ ha^{-1}) de sistema de irrigação por aspersão para as variáveis estudadas, na configuração A.

COMPONENTE	Δq	CONFIGURAÇÃO A					
		VE			VP		
		0%	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Custo total (R$)	10%	2212,65	2212,65	2212,65	2283,68	2619,65	2283,68
	15%	2212,65	2212,65	2212,65	2619,65	2619,65	2619,65

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática

Em todas as opções consideradas, a VE foi responsável pelos sistemas com custos totais menores. O custo menor na VE está diretamente ligado a

tubulação do recalque e linha principal, requeridas em diâmetros menores, assim também de sistemas de bombeamento com menos potências (Tabela 19).

Na Tabela 19 encontra-se uma situação em que a declividade influenciou na diminuição do custo total anual do sistema (VP, 4% declividade e 10% de Δq), pois o ganho de pressão fez com que diminuísse a altura manométrica, com redução da potência requerida pelo conjunto motobomba.

O maior custo total anual (R$) do sistema foi encontrado na CB, especificamente para a VP, na declividade de 4% para Δq de 15%, destacando mais uma vez a influência da declividade e do critério variação de vazão no custo total destes sistemas (Tabela 20). Marcuzzo et al. (2010) constataram que o custo menor da rede de irrigação, R$1816,45 ha^{-1} ano^{-1} foi verificado em terreno em nível. Já o maior custo da rede de irrigação, R$2312,13 ha^{-1} ano^{-1}, foi encontrado para áreas com 4% de declividade.

Tabela 20. Custo total anual (R$ ha^{-1}) de sistema de irrigação por aspersão para as variáveis estudadas, na configuração B.

COMPONENTE	Δq	CONFIGURAÇÃO B					
		VE			VP		
		0%	2%	4%	NÍVEL	2%	4%
Custo total (R$)	10%	2604,73	2604,73	2604,73	2687,00	2687,00	2687,00
	15%	2604,73	2604,73	2604,73	2687,00	3019,50	3019,50

VE – Vazão econômica; VP – Vazão prática

Para Marouelli e Silva (1998), o desnível que há entre a área de captação e a distribuição da água, como também o diâmetro, dimensões e material da tubulação, rendimento do sistema de bombeamento e o uso do tempo diário disponível para executar a irrigação, influenciam no maior ou menor consumo de energia.

5. CONCLUSÕES

A vazão econômica resultou em menor custo total que a vazão prática em todas as declividades avaliadas (em nível, 2 e 4%), nos dois critérios de dimensionamento baseados na variação máxima de vazão na linha lateral (10 e 15%) e nas duas configurações hidráulicas analisadas (A e B).

A configuração A, com uma única linha principal e duas linhas laterais de maior comprimento com aspersores de menor vazão, apresentou menor custo que a configuração B, com uma linha principal, duas linhas secundárias e 4 linhas laterais de menor comprimento com aspersores de maior vazão, em todas as declividades avaliadas (em nível, 2 e 4%), nos dois critérios de dimensionamento baseados na variação máxima de vazão na linha lateral (10 e 15%) e nas duas vazões totais analisadas (econômica e prática).

Verificou-se efeito da declividade no custo total do sistema de irrigação por aspersão convencional apenas na Configuração B, com 15% de Δq, com a vazão prática, tendo as declividades 2 e 4% apresentado custo total anual idêntico de R$3019,50, superior ao obtido na condição em nível (R$2687,00). Estas configurações são as de maior variação dos critérios de dimensionamento, indicando que há necessidade de amplitude de variação para passar para o diâmetro comercial superior ou para um motor de potência acima e consequentemente gerar maior custo total.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Caberá ao agricultor analisar todas as opções e definir qual melhor situação para sua necessidade. O dimensionamento nunca deverá ser feito visando apenas atender aos critérios, mas deverá basear-se nas necessidade e características existentes na área.

REFERÊNCIAS

ABMAQ - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Disponível em: <http://www.abimaq.org.br/revistaInformaq/Ed199/files/assets/basic-html/page12.html>. Acesso em: 22 Dez 2016.

BERNARDO, S et al. **Manual de irrigação.** Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BISCARO, G. A. **Sistemas de irrigação por aspersão.** Editora UFGD. Dourados – MG, 2009, 134p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/>. Acesso em:15 jun 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Plano Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília, DF, 2003.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

BRITO, R. R et al. Produtividade do feijoeiro sob diferentes potenciais matriciais e fatores de depleção da água no solo. **Nativa**, Sinop, v. 03, n. 02, p. 109-114, 2015.

CARVALHO, J. de A. **Instalação de Bombeamento para Irrigação.** Ed. - UFLA/FAEPE. 2003. 230p.

CARVALHO, J. de A.; OLIVEIRA L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**, Lavras: UFLA, 2008. 354 p.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling.** Berkley: University of California, 1942. 124 p.

DEMIR, V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**, London, v. 96, n. 4, p. 617-631, Apr. 2007.

FAVETTA, G.M. **Estudo Econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central.** 1998. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FRIZZONE, J. A et al. **Irrigação por Aspersão.** Maringá: EDUEM, 271 p, 2011.

GOMES, H.; P. **Sistemas de Irrigação**: Eficiência Energética. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013, 281p.

GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. Irriga, **Botucatu**, v. 17, n. 3, p. 337 - 345, 2012.

HAKTANIR, T.; ARDIÇLIOĞLU, M. Numerical modeling of Darcy–Weisbach friction factor and branching pipes problem. **Advances in Engineering Software**, v. 35, n. 12, p. 773-779, 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 1995-1996.** Rio de Janeiro. 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006.** Rio de Janeiro. 2009.

JAMES, L. G. **Principles of farm irrigation systems design**. New York, Wiley. 543p, 1988.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. Van Nostrand Reinold, New York, 1990. 652p

LIMA, A.C et al. Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas de pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v.13, n.4, 2009.

LIMA, S. C. R. V. et al. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p. 201-209, 2003.

MANTOVANI, E. C et al. **Irrigação: princípios e métodos.** 2. ed., atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.

MARCUZZO, F.F.N; WENDLAND, E. Distribuição de pressão em rede de irrigação localizada otimizada por algoritmos genéticos. **Engenharia. Agrícola.** Jaboticabal, v.31, n.3, p.497-505, 2011.

MARCUZZO, F.F.N; WENDLAND, E. Otimização de rede de irrigação de microaspersão usando algoritmos genéticos sob diferentes declividades e tarifação de água e energia elétrica. **Engenharia na agricultura.** Viçosa, v.18 n.1, 2010.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças.** Brasília: Embrapa-CNPH, 1998. 15 p. (Embrapa-CNPH. Circular Técnica, 11).

MELLO, C. R. et al. Economia de Energia e instalação de bombeamento para irrigação com uso de inversor de frequência**. Engenharia Agricola**, Jaboticabal, v. 18, n. 4, p. 78-88, 1999.

MELO, J. L. **Custo da irrigação por aspersão em Minas Gerais.** 2001. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1993.

MENDONÇA, F. C.; RASSINI, J. B. **Curso teórico-prático de manejo e projetos de irrigação em pastagens.** Apostila. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 59 p.

MORENO, M. A et al. Energy efficiency of pressurized irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. **Biosystems Engineering**, London, p. 349-363, 2010.

OLLITA, A.F.L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo, Nobel, 1977. 267p.

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

PEREIRA, F. F. S et al. Estudo comparativo da evapotranspiração de referência entre localidades no estado de são Paulo e na província de Habana. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p.395-408, 2016.

SAAD, J.C.C et al. Otimização da rede hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando programação linear. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 29, n. 5, p. 797-805, 1994.

SAAD, J.C.C.; MARCUZZO, F.F.N. Distribuição da carga hidráulica em linhas de derivação otimizadas por programação linear. **Revista Engenharia Agricola.** Jaboticabal, v. 26, n.2, p. 406-414, 2006.

SAAD, J.C.C.; MARIÑO, M. A. Optimum design of microirrigation systems in sloping lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 128, n. 2, p. 116-124, 2002.

SCALLOPI, E. J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário – EPAMIG**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 54-63. 1986.

SCALOPPI, E.J. Adjusted F factor for multipleoutlet pipes. **Journal of irrigation and drainage engineering.** ASCE, New York. v. 114, n. 1, 169-174 p.1988.

SWAMEE, P. Design of a Submarine Oil Pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Engenharia de irrigação [recurso eletrônico]: tubos e acessórios.** Campinas, SP. Unicamp, 153p. 2015.

TURCO, J. E. P et al. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 311-320, 2009.

VIEIRA, G. H. S et al. Custo da irrigação do cafeeiro em diferentes tipos de equipamento e tamanhos de área. **Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v.19, n.1, p. 53-61, 2011.

WUTKE, E.B et al. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.24, n.3, p. 621-33, 2000.

ZOCOLER, J.L et al. Model for determining flow diameter and economic velocity in water elevating systems. **Mathematical Problems in Engineering,** Nasr City, v.2006, p.1-17, 2006.

ANEXO

ANEXO A – Diâmetros comerciais utilizados no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional deste trabalho.

Peças Especiais - Confeccionamos Sob Encomenda

KREBS

Lista no.: 003- Atualização: abril 2009 - Impostos conforme legislação vigente

Tubo de Aço Zincado - Engate Rápido



3" x 6 m	11.21.0031
4" x 6 m	11.21.0041
5" x 6 m	11.21.0051
6" x 6 m	11.21.0061
7" x 6 m	11.21.0071
8" x 6 m	11.21.0081
3" x 6 m com saída de 1"	11.21.0231
4" x 6 m com saída de 1"	11.21.0241

Tubo de Aço Zincado - Flangeado



3" x 6 m	11.22.0011
4" x 6 m	11.22.0021
5" x 6 m	11.22.0031
6" x 6 m	11.22.0041
7" x 6 m	11.22.0051
8" x 6 m	11.22.0061
10" x 6 m	11.22.0071
12" x 6 m	11.22.0081
14" x 6 m	11.22.0091
16" x 6 m	11.22.0101
20" x 6 m	11.22.0111

Tubo de Aço Zincado - Engate KR 20



5" x 6 m	11.23.0051
6" x 6 m	11.23.0061
7" x 6 m	11.23.0071
8" x 6 m	11.23.0081
10" x 6 m	11.23.0091
12" x 6 m	**11.23.0101**

Inicial Fêmea - Engate Rápido



3" x 2"	11.41.0211
3" x 2 ½"	11.41.0221
3" x 3"	11.41.0231
4" x 2 ½"	11.41.0301
4" x 3"	11.41.0311
5" x 3"	11.41.0351
5" x 4"	11.41.0361
6" x 4"	11.41.0401

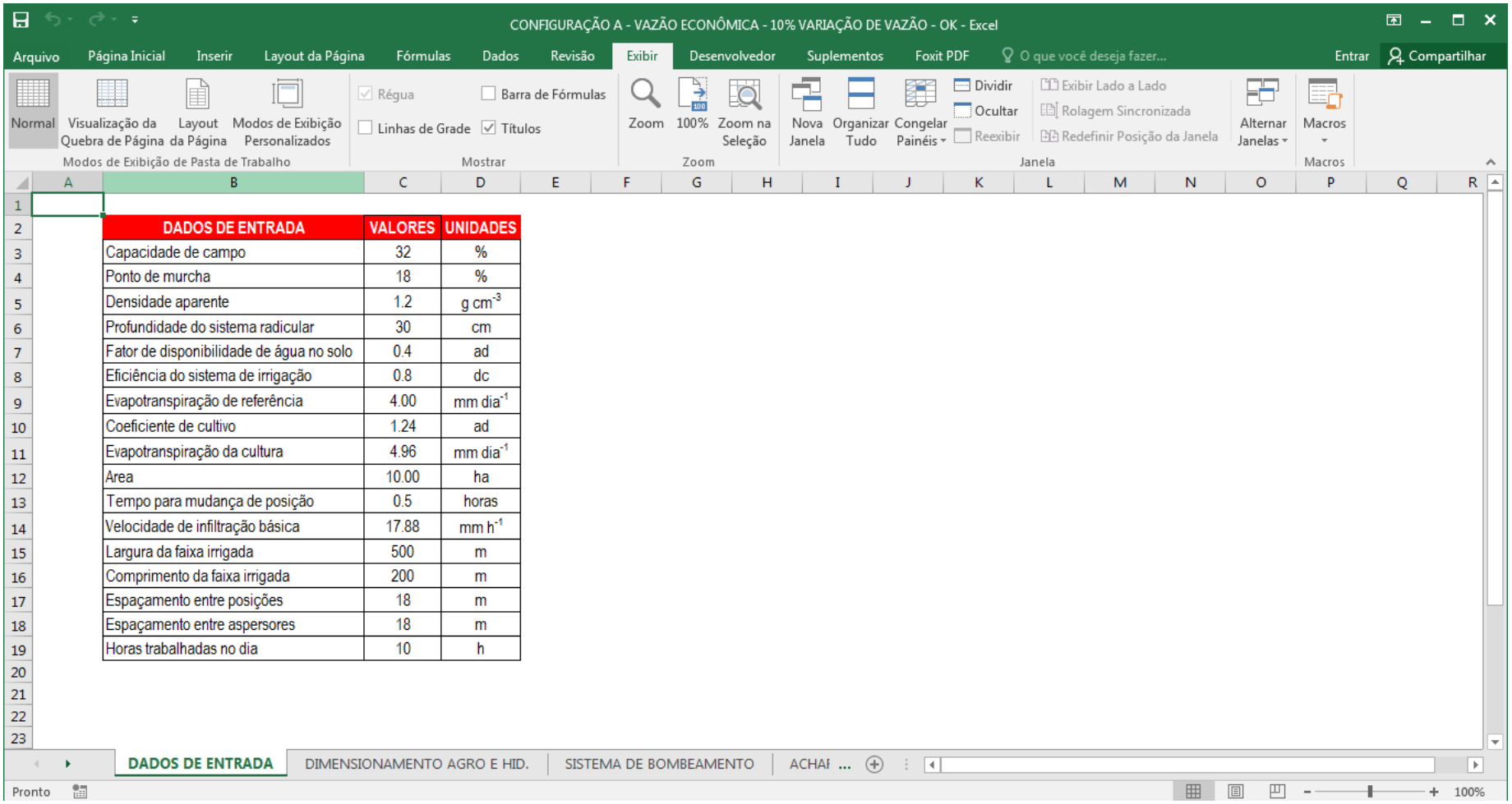
Curva Dupla - Engate Rápido



3" x 1 m	11.41.0561
4" x 1,20 m	11.41.0571
5" x 1,40 m	11.41.0581
6" x 1,40 m	11.41.0591
7" x 1,40 m	11.41.0601

APÊNDICE

APÊNDICE A – Esquematização da planilha utilizada no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional na Vazão "econômica", para diferentes declividades (0, 2 e 4%) e diferentes critérios de variação de vazão (10 e 15%), na configuração "A".



DADOS DE ENTRADA	VALORES	UNIDADES
Capacidade de campo	32	%
Ponto de murcha	18	%
Densidade aparente	1.2	g cm^{-3}
Profundidade do sistema radicular	30	cm
Fator de disponibilidade de água no solo	0.4	ad
Eficiência do sistema de irrigação	0.8	dc
Evapotranspiração de referência	4.00	mm dia^{-1}
Coeficiente de cultivo	1.24	ad
Evapotranspiração da cultura	4.96	mm dia^{-1}
Area	10.00	ha
Tempo para mudança de posição	0.5	horas
Velocidade de infiltração básica	17.88	mm h^{-1}
Largura da faixa irrigada	500	m
Comprimento da faixa irrigada	200	m
Espaçamento entre posições	18	m
Espaçamento entre aspersores	18	m
Horas trabalhadas no dia	10	h

Figura 21. Dados utilizados no dimensionamento do sistema de irrigação.

APÊNDICE A – Continuação...

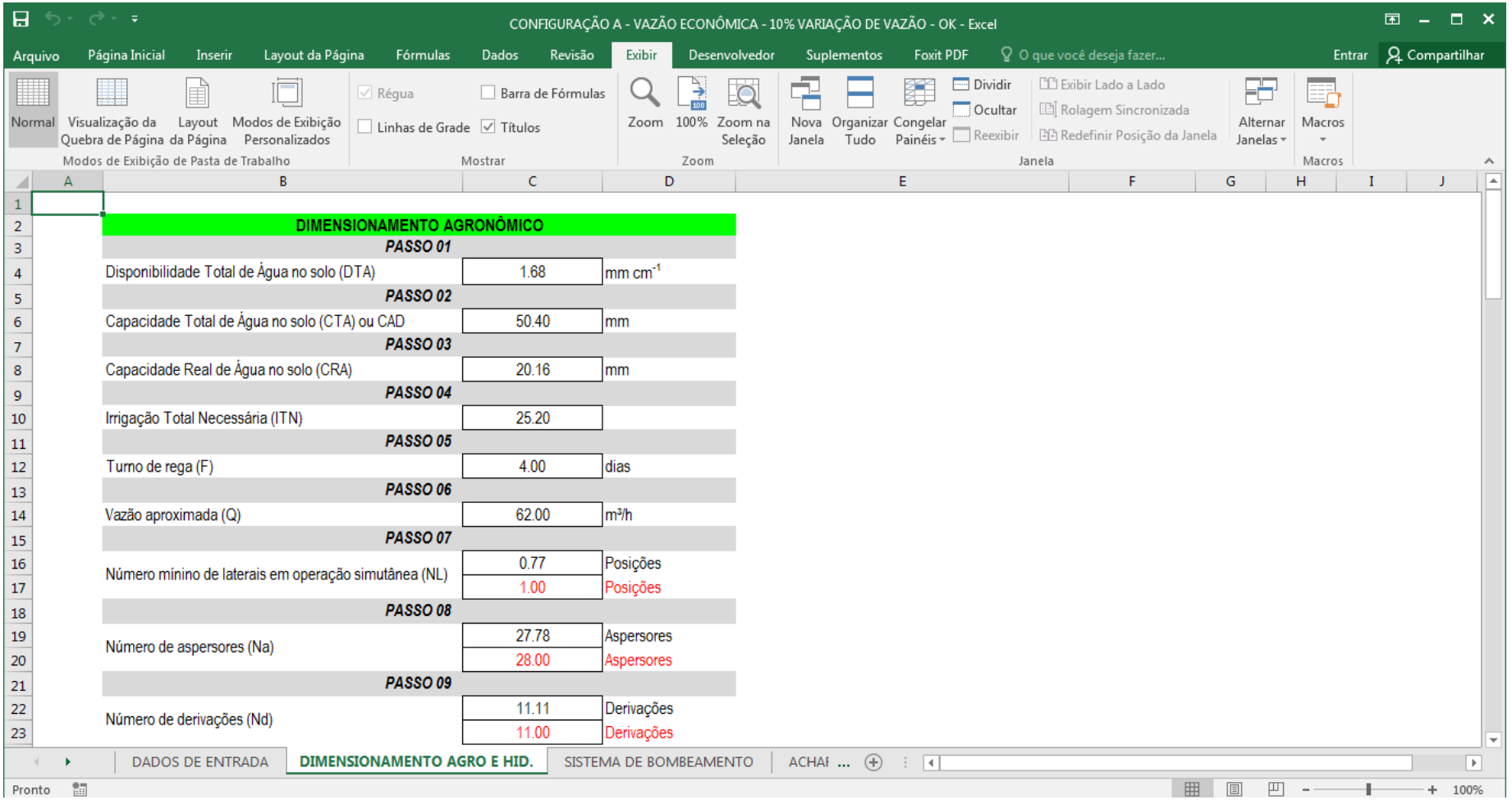


Figura 22. Determinação das características do solo quanto ao armazenamento e disponibilidade hídrica, vazão horária requerida e características hidráulicas do sistema.

APÊNDICE A – Continuação...

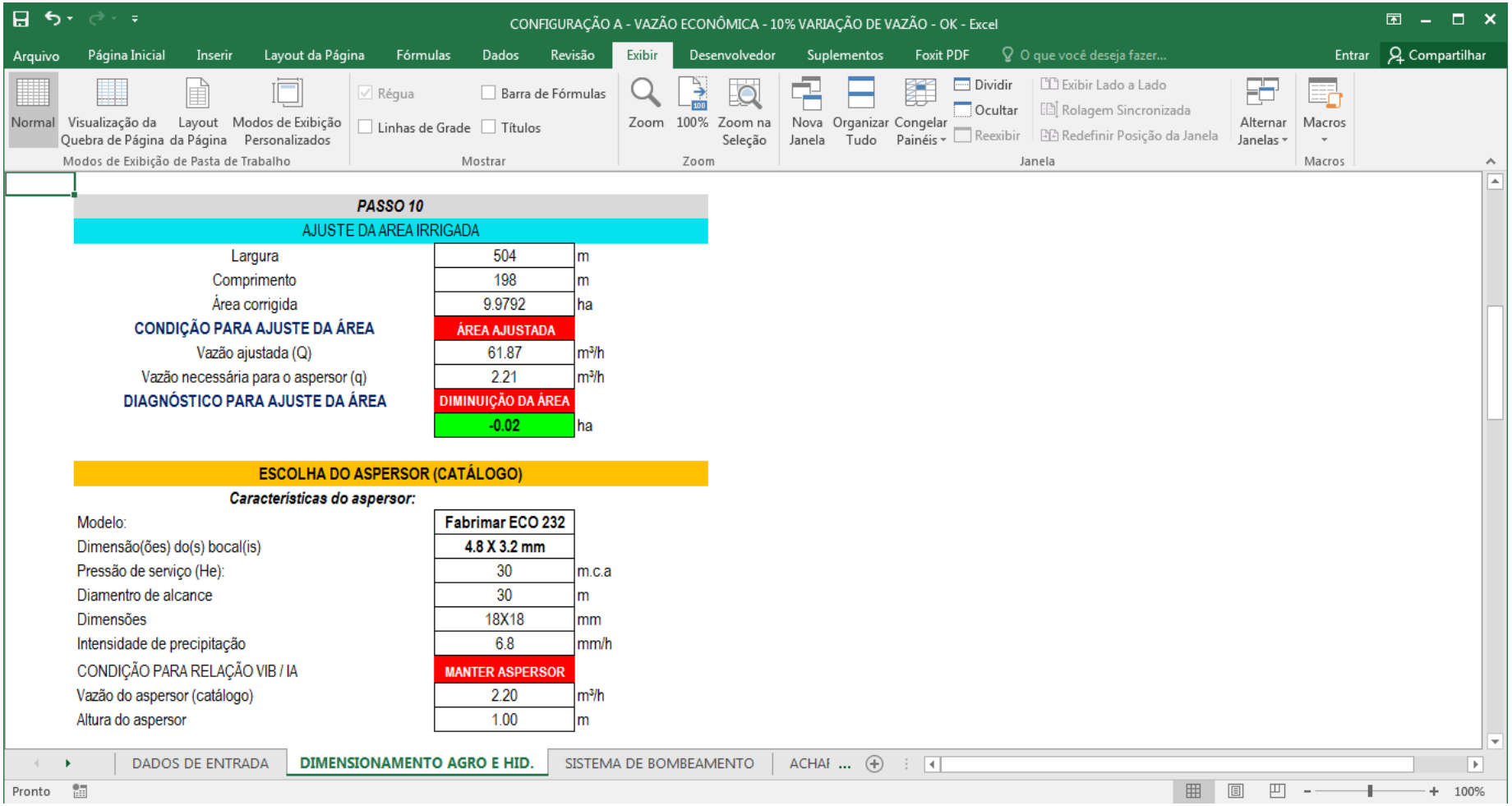


Figura 23. Ajuste da área irrigada de acordo com o espaçamento utilizado entre derivações; e caraterísticas do aspersor escolhido.

APÊNDICE A – Continuação...

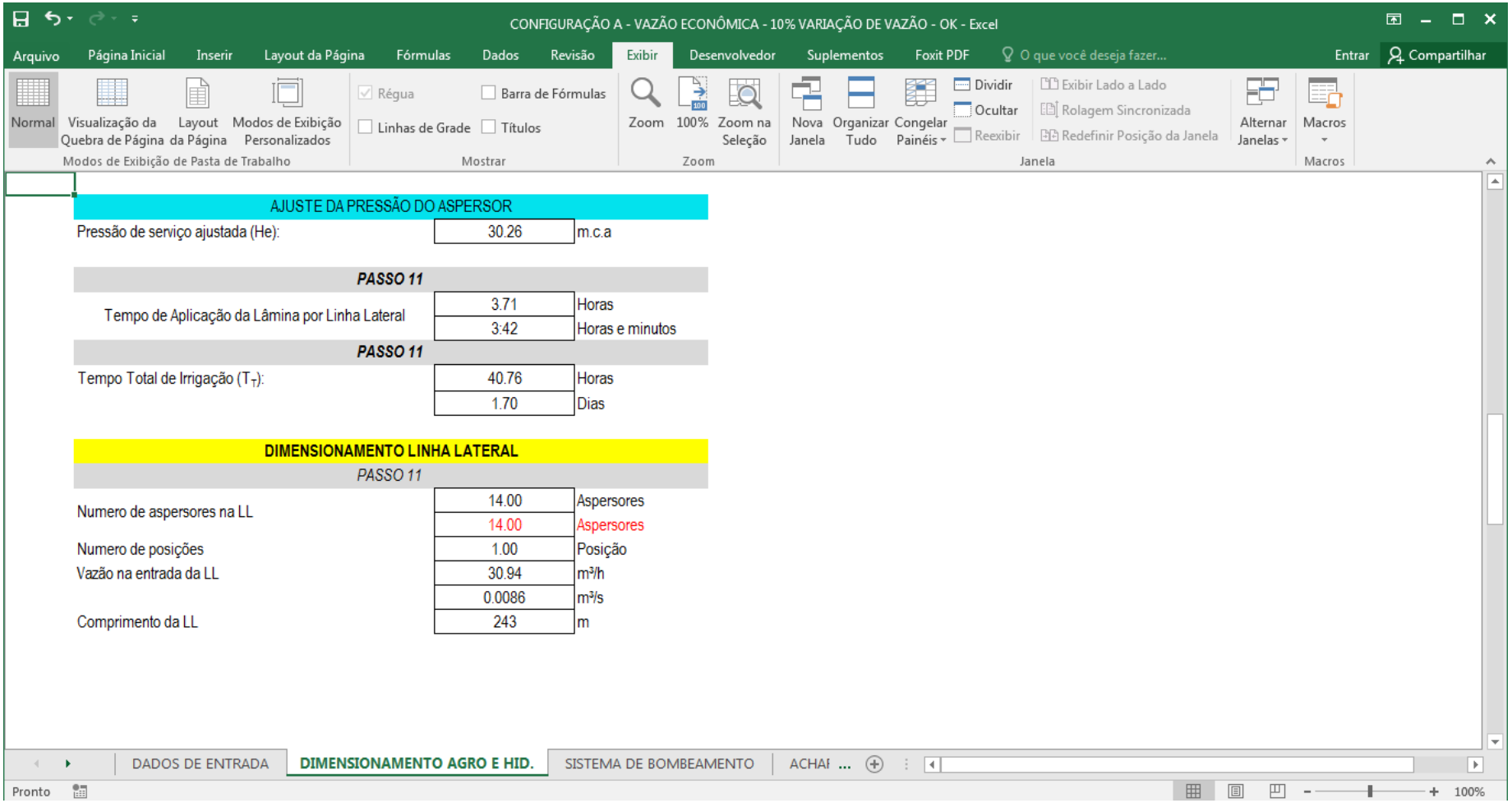


Figura 24. Correção da pressão de serviço necessária para aplicar a lâmina requerida em projeto; informações do tempo de aplicação da lâmina e inicio do dimensionamento hidráulico.

APÊNDICE A – Continuação...

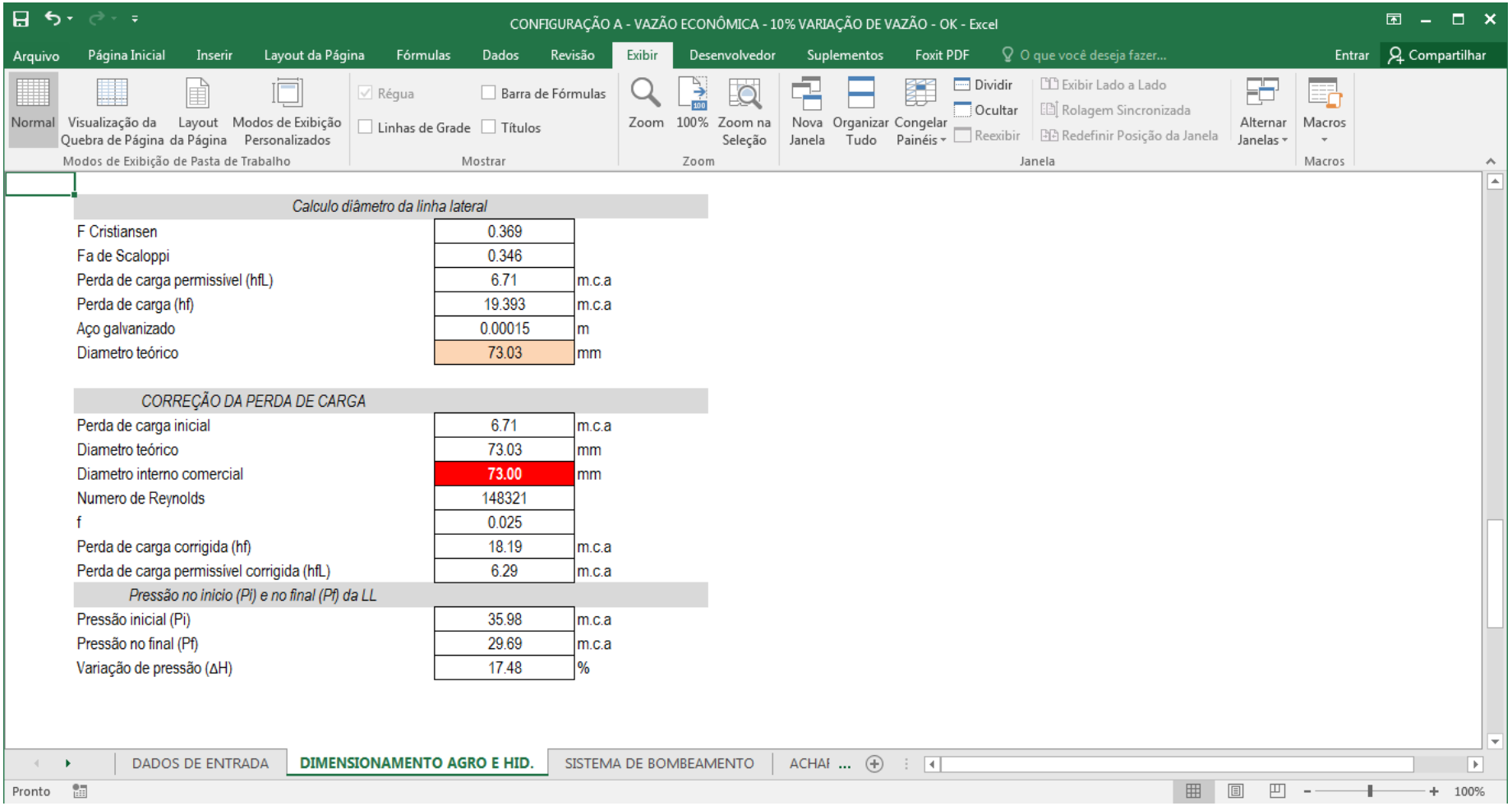


Figura 25. Continuação do dimensionamento hidráulico do projeto.

APÊNDICE A – Continuação...

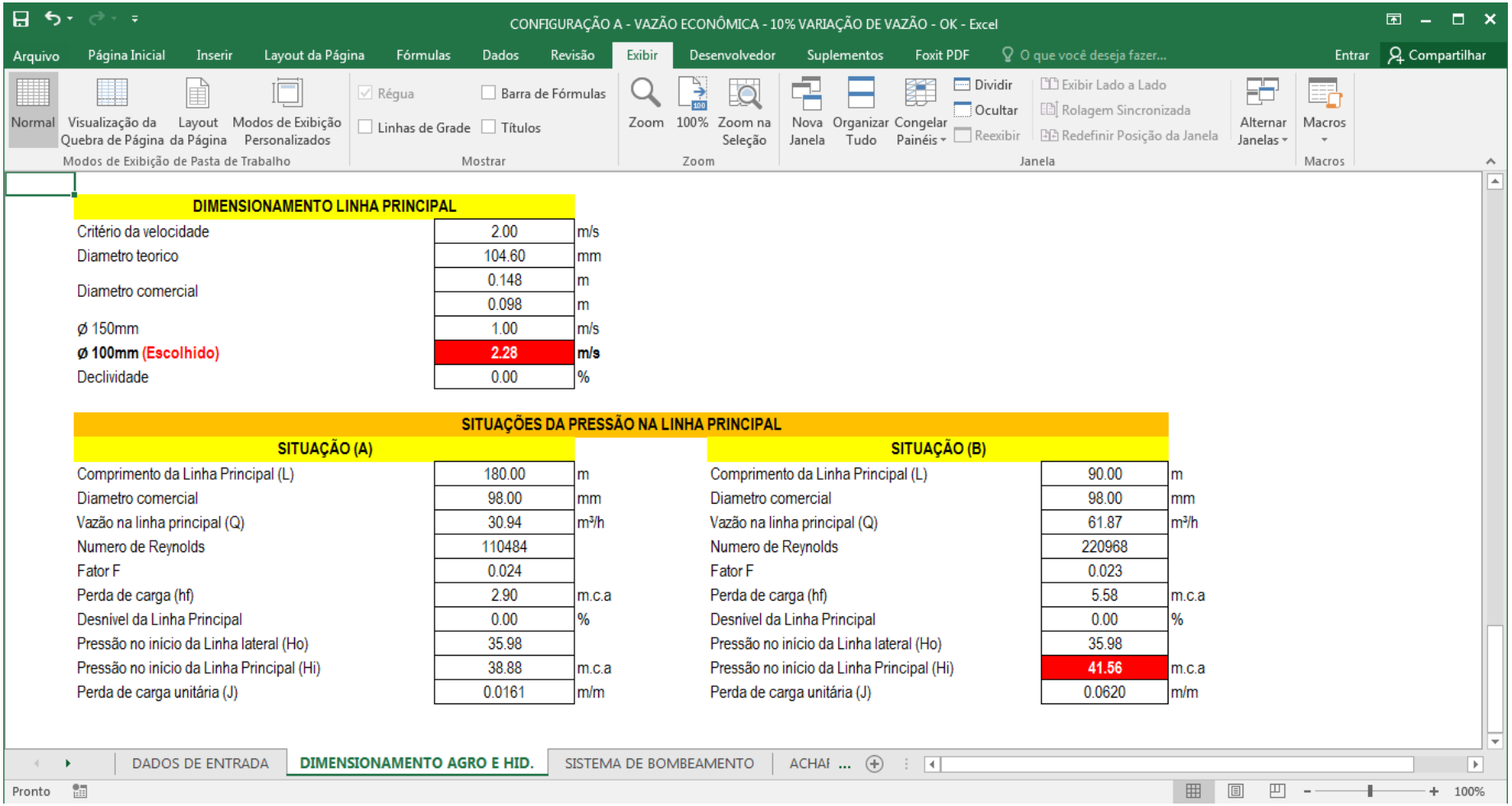


Figura 26. Dimensionamento da linha principal do projeto, mostrando a opção em que a pressão na entrada da linha principal é maior, decorrente do aumento da vazão que passará pela tubulação.

APÊNDICE A – Continuação...

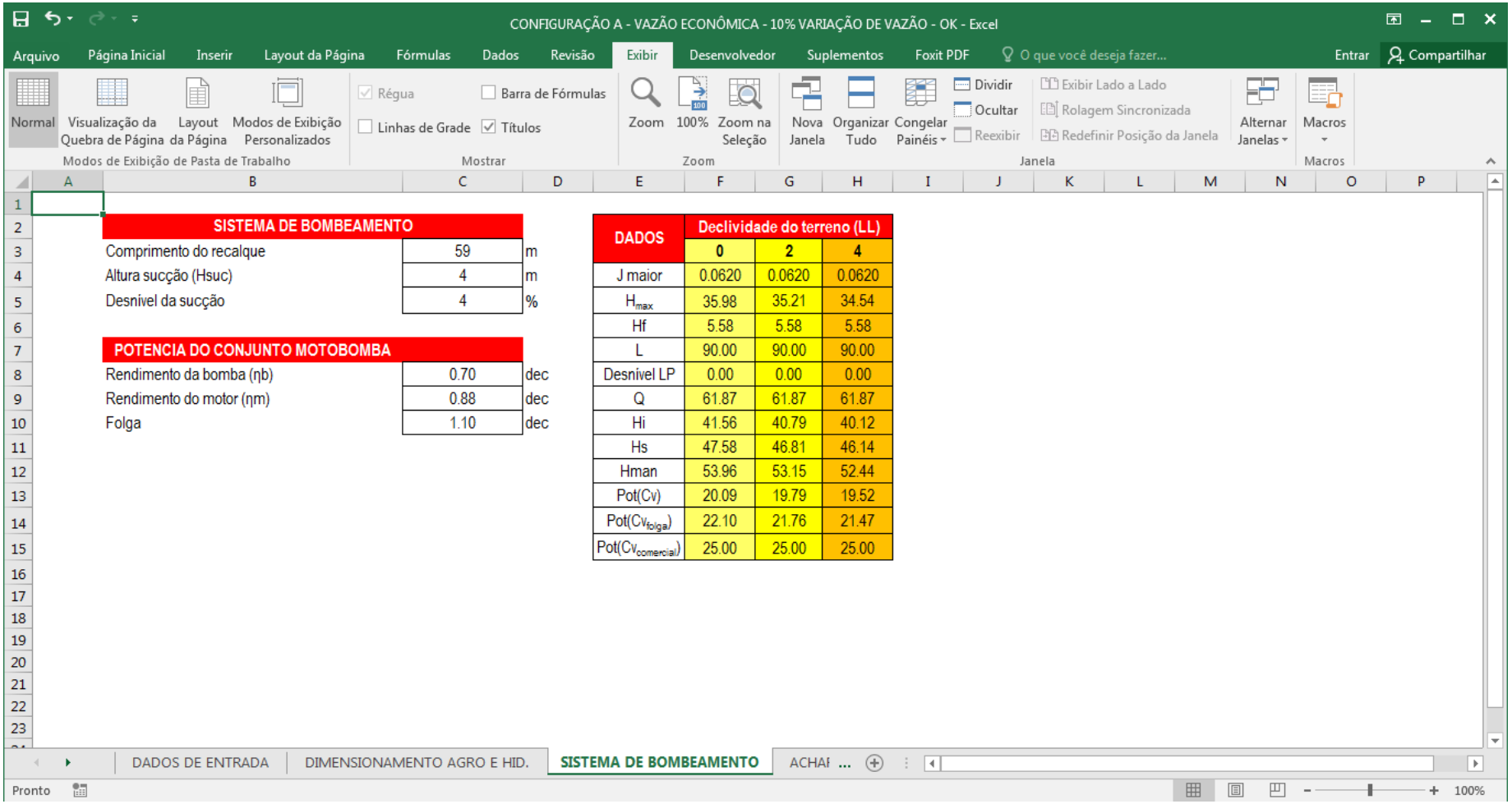
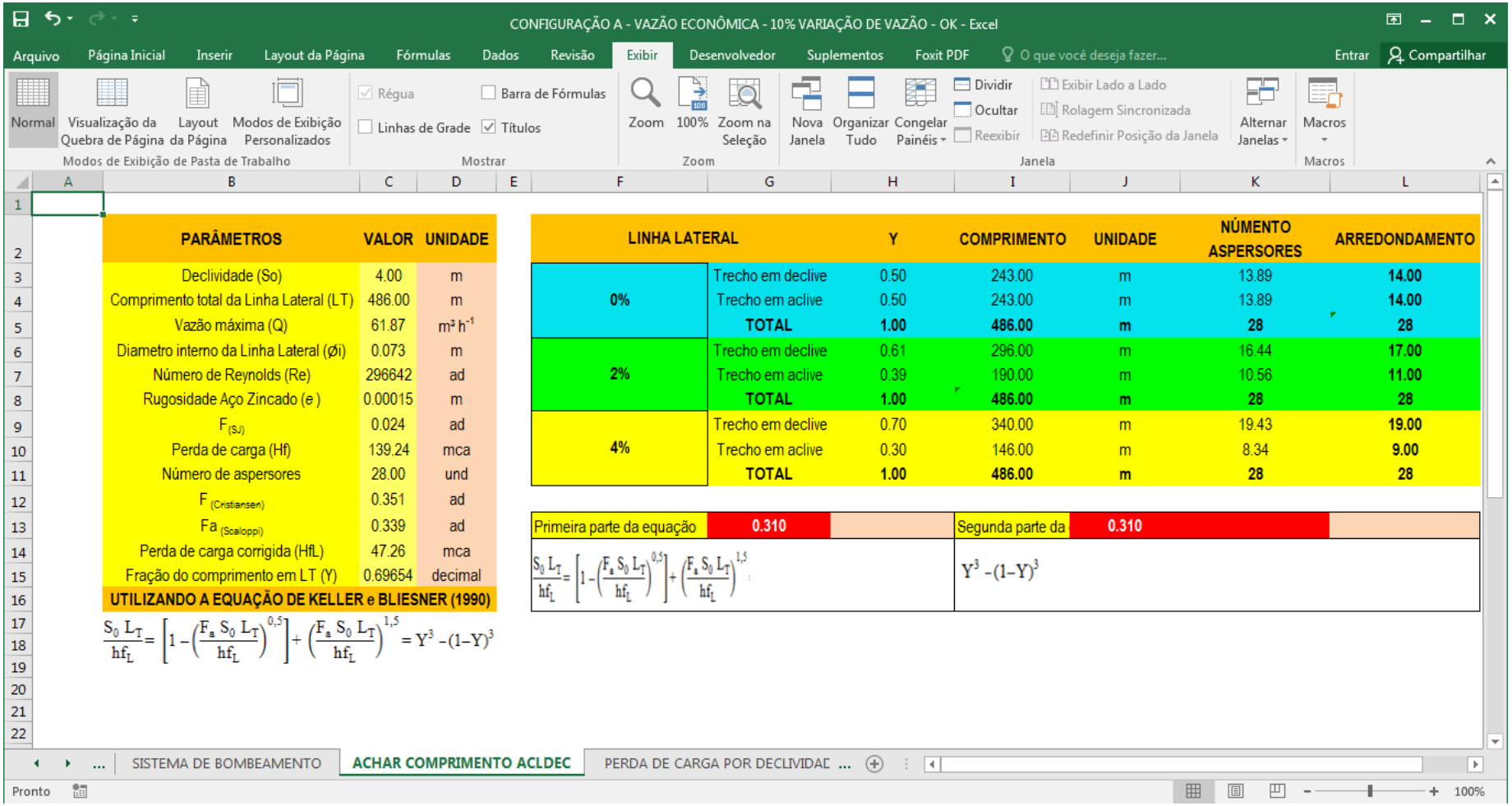


Figura 27. Informações relacionadas ao recalque, potência do sistema moto-bomba; e sistema de bombeamento necessário para atender a demanda do projeto dimensionado nos declives de 0, 2 e 4% (dados para cálculos da bomba para área em declive serão encontrados a baixo).

APÊNDICE A – Continuação...



PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Declividade (So)	4.00	m
Comprimento total da Linha Lateral (LT)	486.00	m
Vazão máxima (Q)	61.87	$m^3 h^{-1}$
Diametro interno da Linha Lateral (Øi)	0.073	m
Número de Reynolds (Re)	296642	ad
Rugosidade Aço Zincado (*e*)	0.00015	m
$F_{(SJ)}$	0.024	ad
Perda de carga (Hf)	139.24	mca
Número de aspersores	28.00	und
$F_{(Cristiansen)}$	0.351	ad
$Fa_{(Scaloppi)}$	0.339	ad
Perda de carga corrigida (HfL)	47.26	mca
Fração do comprimento em LT (Y)	0.69654	decimal

UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE KELLER e BLIESNER (1990)

$$\frac{S_0 L_T}{hf_L} = \left[1 - \left(\frac{F_a S_0 L_T}{hf_L}\right)^{0,5}\right] + \left(\frac{F_a S_0 L_T}{hf_L}\right)^{1,5} = Y^3 - (1-Y)^3$$

LINHA LATERAL		Y	COMPRIMENTO	UNIDADE	NÚMENTO ASPERSORES	ARREDONDAMENTO
0%	Trecho em declive	0.50	243.00	m	13.89	**14.00**
	Trecho em aclive	0.50	243.00	m	13.89	**14.00**
	TOTAL	**1.00**	**486.00**	**m**	**28**	**28**
2%	Trecho em declive	0.61	296.00	m	16.44	**17.00**
	Trecho em aclive	0.39	190.00	m	10.56	**11.00**
	TOTAL	**1.00**	**486.00**	**m**	**28**	**28**
4%	Trecho em declive	0.70	340.00	m	19.43	**19.00**
	Trecho em aclive	0.30	146.00	m	8.34	**9.00**
	TOTAL	**1.00**	**486.00**	**m**	**28**	**28**

Primeira parte da equação	0.310	Segunda parte da	0.310
$\frac{S_0 L_T}{hf_L} = \left[1 - \left(\frac{F_a S_0 L_T}{hf_L}\right)^{0,5}\right] + \left(\frac{F_a S_0 L_T}{hf_L}\right)^{1,5}$		$Y^3 - (1-Y)^3$	

Figura 28. Determinação dos comprimentos dos trechos de aclive e declive através da Equação exposta, com o uso do Suplemento Solver do Microsoft Office Excel ®

APÊNDICE A – Continuação...

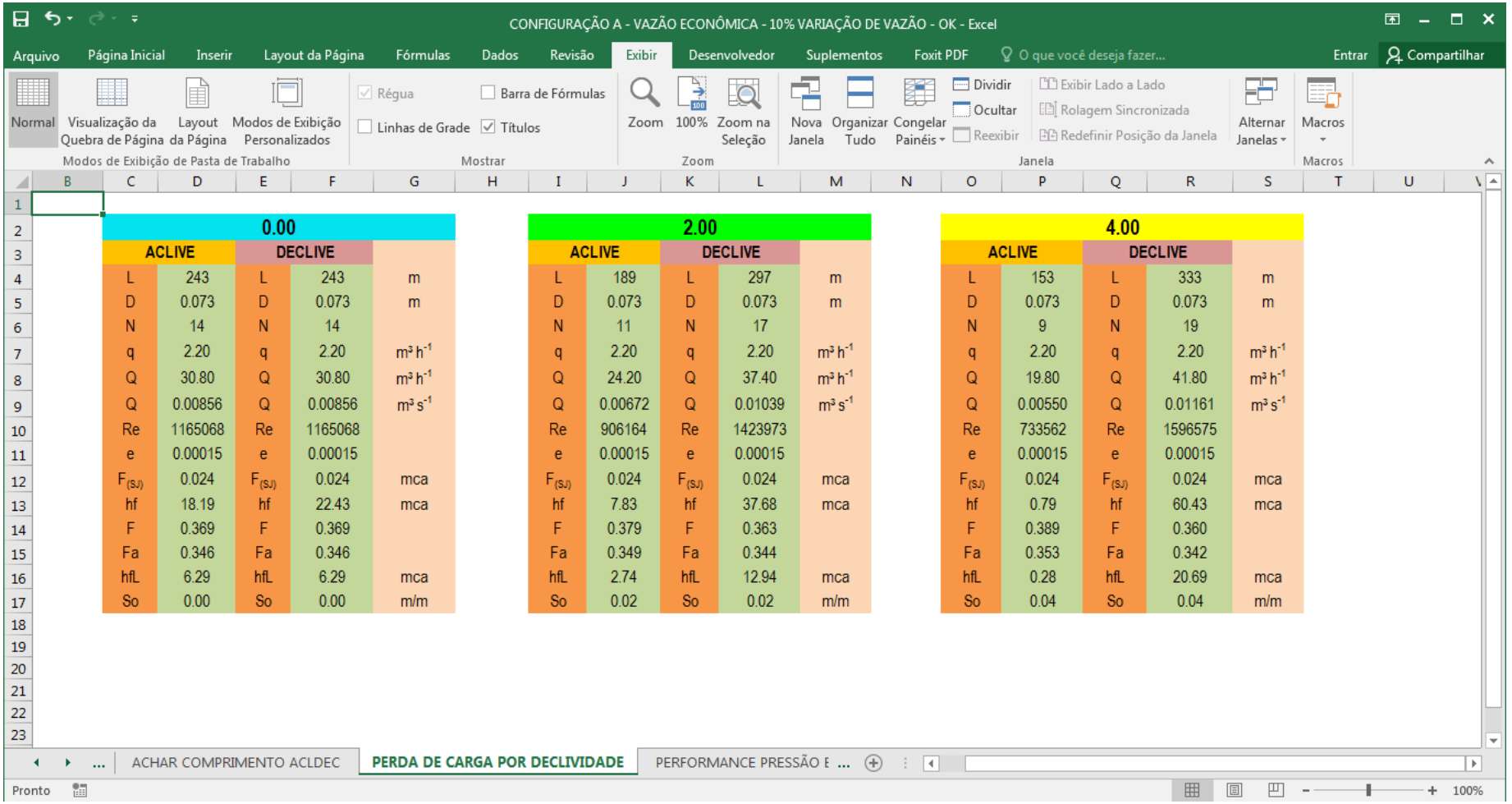
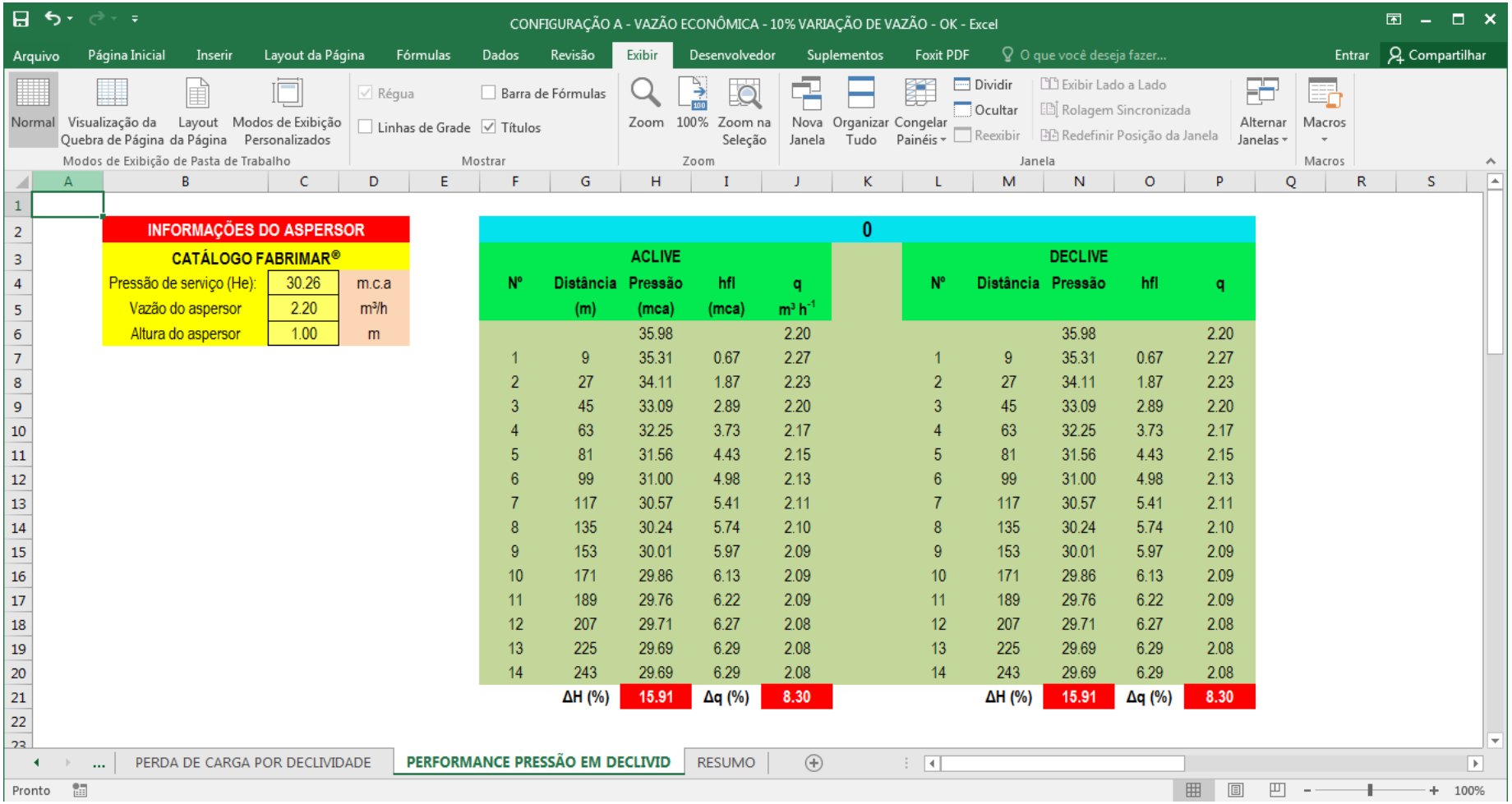


Figura 29. Caracterização hidráulica do sistema para os trechos em aclive e declive, para 0, 2 e 4%.

APÊNDICE A – Continuação...



ACLIVE					DECLIVE				
Nº	Distância (m)	Pressão (mca)	hfl (mca)	q m³ h⁻¹	Nº	Distância	Pressão	hfl	q
		35.98		2.20			35.98		2.20
1	9	35.31	0.67	2.27	1	9	35.31	0.67	2.27
2	27	34.11	1.87	2.23	2	27	34.11	1.87	2.23
3	45	33.09	2.89	2.20	3	45	33.09	2.89	2.20
4	63	32.25	3.73	2.17	4	63	32.25	3.73	2.17
5	81	31.56	4.43	2.15	5	81	31.56	4.43	2.15
6	99	31.00	4.98	2.13	6	99	31.00	4.98	2.13
7	117	30.57	5.41	2.11	7	117	30.57	5.41	2.11
8	135	30.24	5.74	2.10	8	135	30.24	5.74	2.10
9	153	30.01	5.97	2.09	9	153	30.01	5.97	2.09
10	171	29.86	6.13	2.09	10	171	29.86	6.13	2.09
11	189	29.76	6.22	2.09	11	189	29.76	6.22	2.09
12	207	29.71	6.27	2.08	12	207	29.71	6.27	2.08
13	225	29.69	6.29	2.08	13	225	29.69	6.29	2.08
14	243	29.69	6.29	2.08	14	243	29.69	6.29	2.08
	ΔH (%)	15.91	Δq (%)	8.30		ΔH (%)	15.91	Δq (%)	8.30

Figura 30. Informação de pressão, vazão e número de aspersores para cada trecho de aclive e declive, como também variação de vazão e pressão da linha lateral onde se encontram esses aspersores, na declividade de 0%.

APÊNDICE A – Continuação...

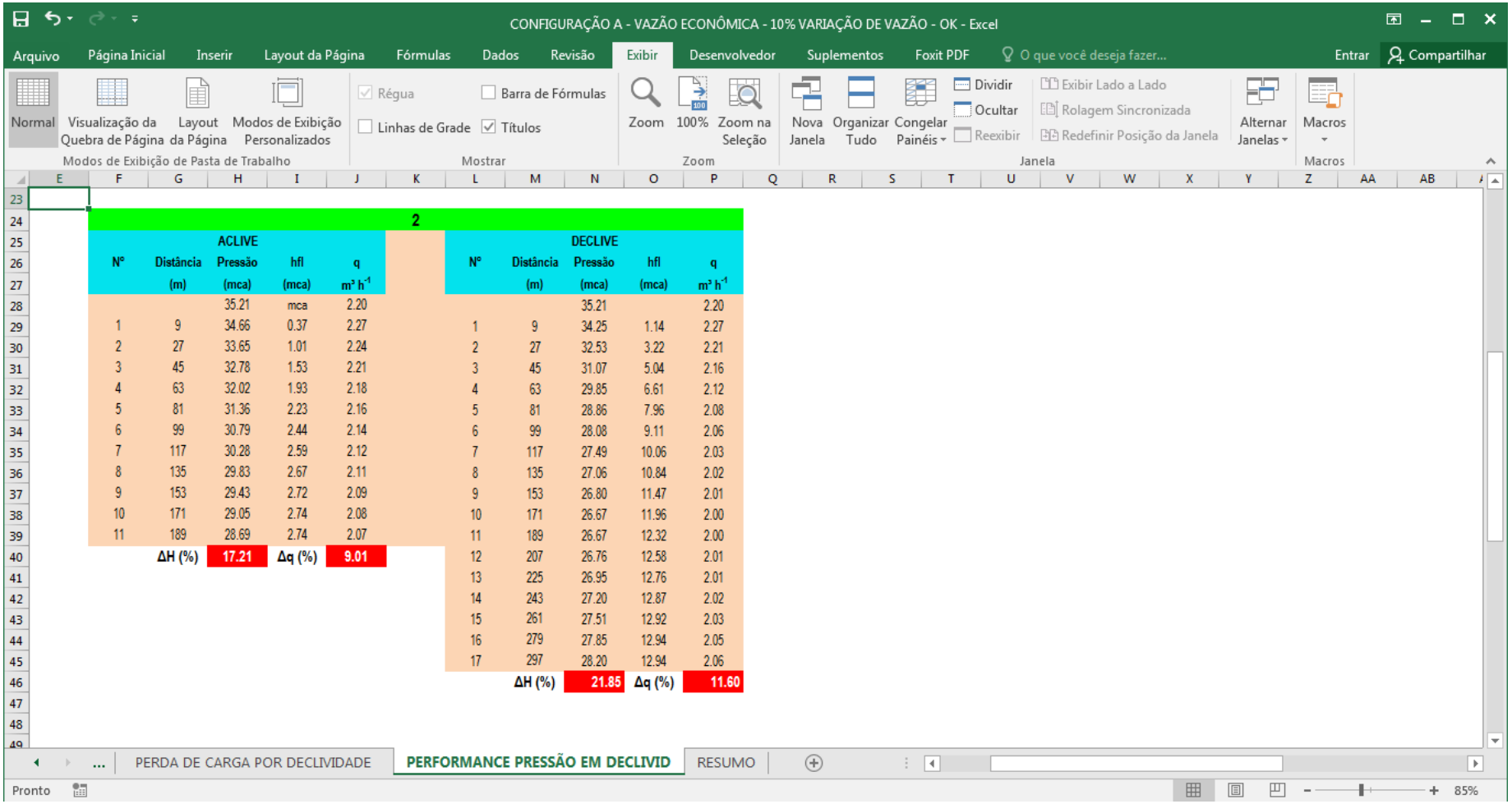


Figura 31. Informação de pressão, vazão e número de aspersores para cada trecho de aclive e declive, como também variação de vazão e pressão da linha lateral onde se encontram esses aspersores, na declividade de 2%.

APÊNDICE A – Continuação...

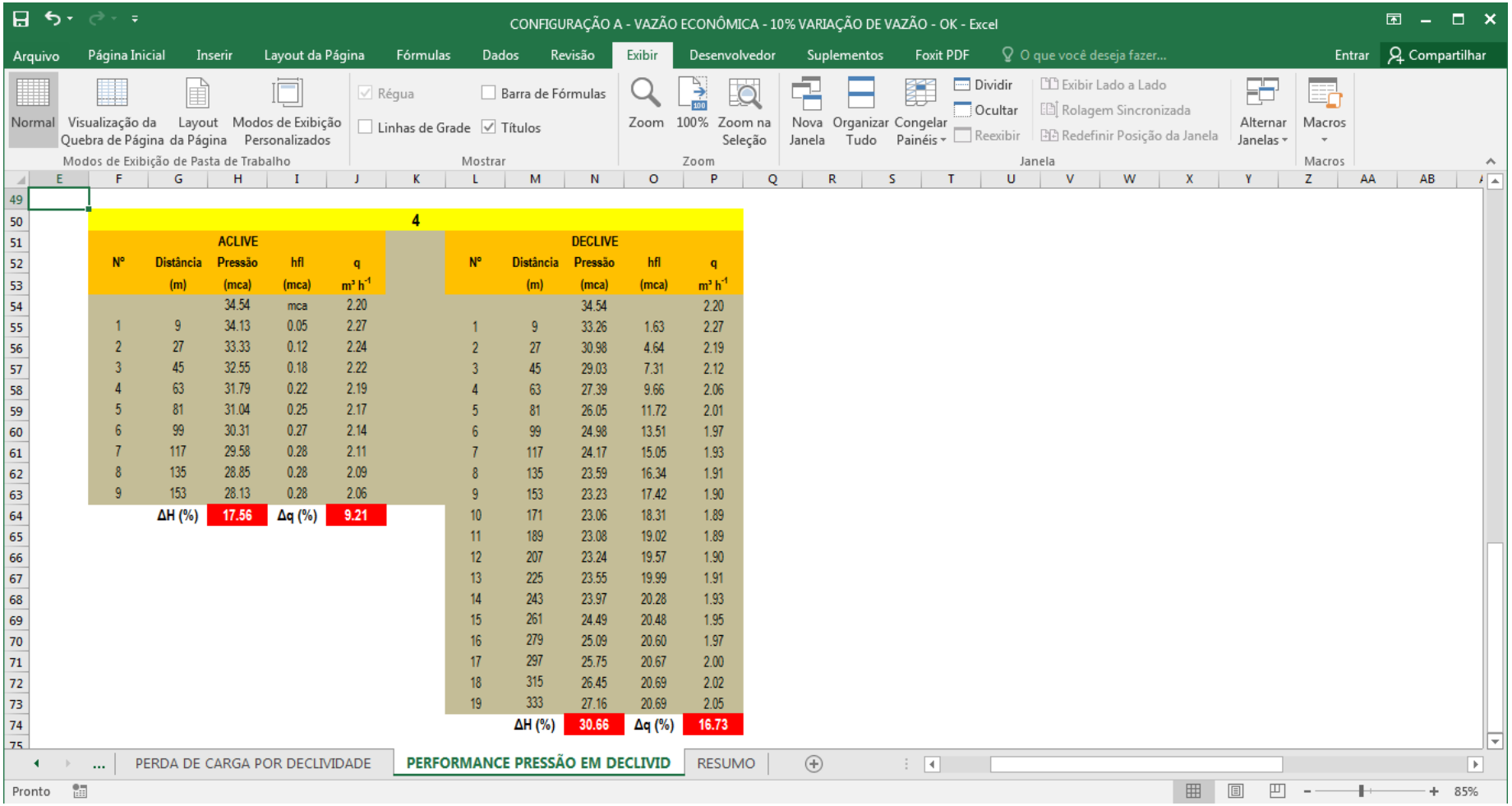


Figura 32. Informação de pressão, vazão e número de aspersores para cada trecho de aclive e declive, como também variação de vazão e pressão da linha lateral onde se encontram esses aspersores, na declividade de 4%.

APÊNDICE B – Esquematização da planilha utilizada no dimensionamento do sistema de irrigação por aspersão convencional na Vazão "prática", para diferentes declividades (0, 2 e 4%) e diferentes critérios de variação de vazão (10 e 15%), na configuração "A".

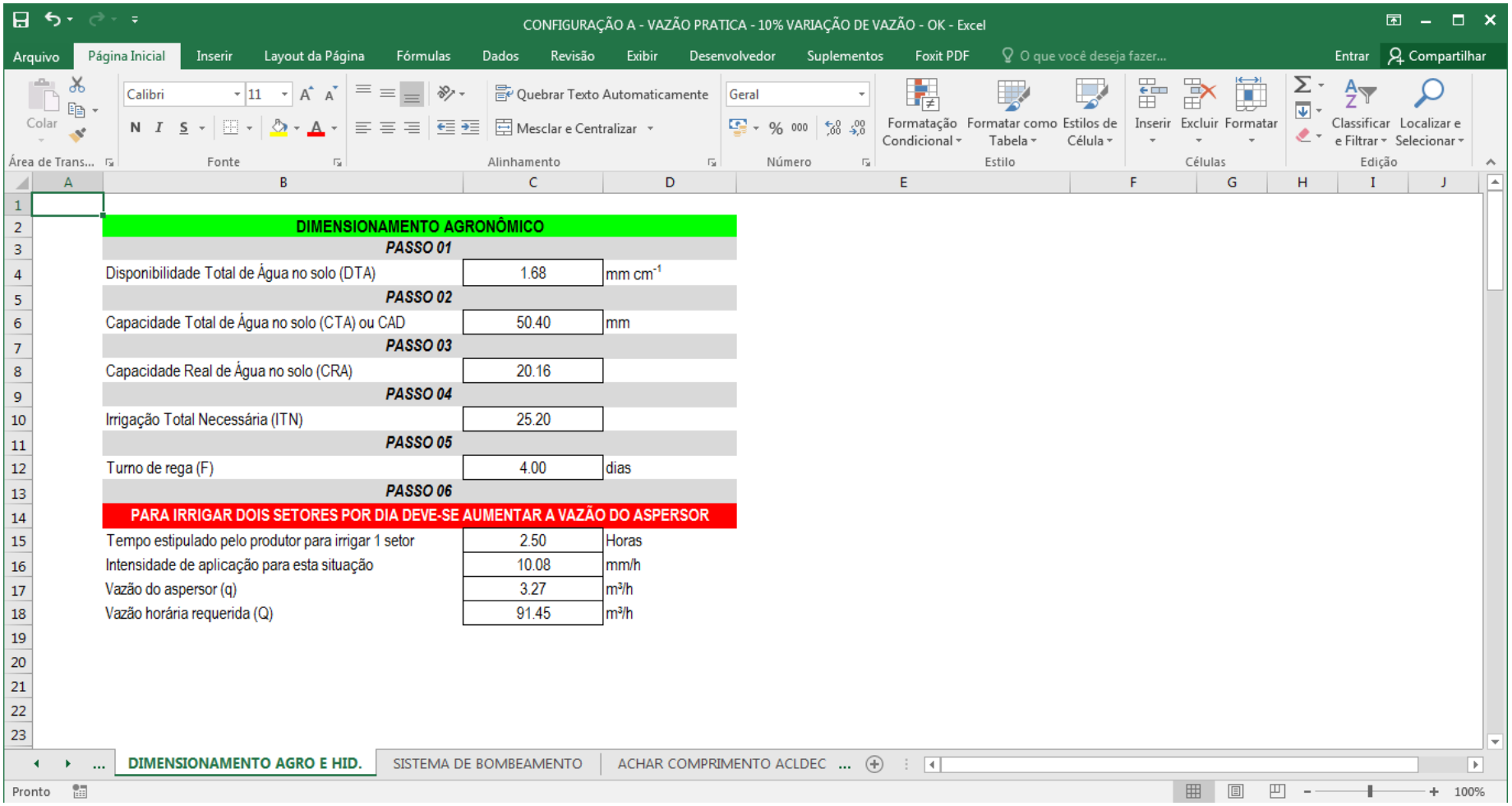


Figura 33. Diferença entre a planilha utilizada no dimensionamento com vazão "econômica" e "prática", mostrando o tempo de irrigação fixado pelo produtor, a intensidade de aplicação e vazão do aspersor para o tempo fixado; e a vazão total diária requerida para todos os aspersores.

APÊNDICE B – Continuação...

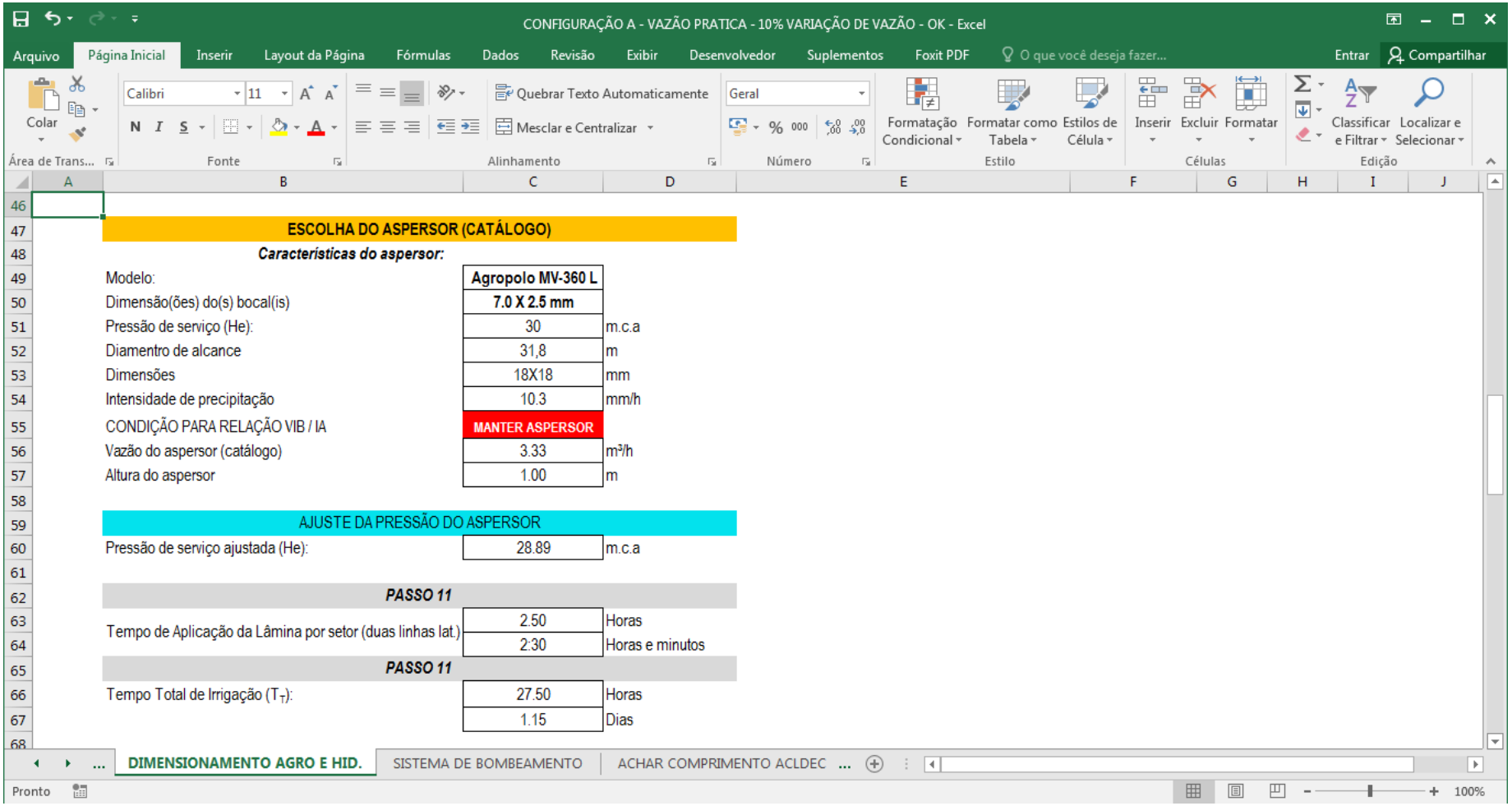


Figura 34. Caraterísticas do aspersor escolhido para a Vazão "prática" conforme o Catálogo Agropolo®.

APÊNDICE C – Determinação da equivalência da variação de pressão (ΔH) se a variação de vazão (Δq) for aumentada em 5% (10 para 15%).

SABENDO:

a) 10% de Δq = 20% de ΔH

b) $\frac{q_{max}}{q_{mín}} \rightarrow \left(\frac{H_{max}}{H_{mín}}\right)^{0,5}$

RESOLUÇÃO:

$$\Delta q = \frac{q_{max} - q_{mín}}{q_{max}}$$

$$0,15 = \frac{q_{max} - q_{mín}}{q_{max}}$$

$$0,15q_{max} = q_{max} - q_{mín}$$

$$q_{max} - 0,15q_{max} = q_{mín}$$

$$0,85q_{max} = q_{mín}$$

$$\frac{q_{max}}{q_{mín}} = \frac{1}{1,85}$$

$$\frac{q_{max}}{q_{mín}} = \mathbf{1,176}$$

IGUALANDO A PRESSÃO:

$$\left(\frac{H_{max}}{H_{mín}}\right)^{0,5} = 1,176$$

$$\frac{H_{max}}{H_{mín}} = 1,176^2$$

$$\frac{H_{max}}{H_{mín}} = 1,383$$

APLICANDO A EQUAÇÃO NA VARIAÇÃO DE PRESSÃO:

$$\Delta H = \frac{H_{max} - H_{mín}}{H_{max}}$$

$$\Delta H = \frac{1{,}383\ H_{min} - H_{max}}{H_{min}}$$

$$\Delta H = \frac{0{,}383\ H_{min}}{1{,}383\ H_{min}}$$

$\Delta H \approx 28\%$

RESULTADO:

15% de Δq = 28% de ΔH

APÊNDICE D – Determinação da Equação de perda de carga permissível (hf_L) na linha lateral para a variação de vazão de 15% e variação de pressão de 28%.

SABENDO:

a) $H_{med} = H_0 – 0{,}75hfL – 0{,}5\ S_0\ L$ (para 10% de Δq)
b) $H_{max} = H_{med} + 0{,}75hfL + 0{,}5\ S_0\ L$ (para 10% de Δq)
c) $H_{min} = H_{med} – 0{,}25hfL – 0{,}5\ S_0\ L$ (para 10% de Δq)

RESOLUÇÃO:

$$0{,}28 = \frac{(H_{med} + 0{,}75hfL + 0{,}5\ S_0\ L) – (H_{med} – 0{,}25hfL – 0{,}5\ S_0\ L)}{H_{med} + 0{,}75hfL + 0{,}5\ S_0\ L}$$

$$0{,}28 = \frac{hfL + S_0\ L}{H_{med} + 0{,}75hfL + 0{,}5\ S_0\ L}$$

$$0{,}28H_{med} + 0{,}21hf_L + 0{,}14\ S_0\ L = hf_L + S_0\ L$$

$$0{,}28H_{med} – 0{,}86S_0L = 0{,}79hf_L$$

$$hf_L = \frac{0{,}28}{0{,}79}H_{med} – \frac{0{,}28}{0{,}79}\ S_0\ L$$

RESULTADO:

$hf_L = 0{,}3544H_{med}$ (nível)
$hf_L = 0{,}3544H_{med} – 1{,}10\ S_0.L$ (aclive)