

**VELOCIDADE ECONÔMICA DE
ESCOAMENTO E COMPOSIÇÃO DE
CUSTOS DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR
ASPERSÃO**

BRUNO LEITE TEIXEIRA PERRONI

2008

BRUNO LEITE TEIXEIRA PERRONI

**VELOCIDADE ECONÔMICA DE ESCOAMENTO E COMPOSIÇÃO DE
CUSTOS DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS
MINAS GERAIS-BRASIL
2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Perroni, Bruno Leite Teixeira.

Velocidade econômica de escoamento e composição de custos de sistemas de irrigação por aspersão / Bruno Leite Teixeira Perroni. -- Lavras : UFLA, 2008.

93 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Bibliografia.

1. Irrigação por aspersão. 2. Aspectos econômicos. 3. Consumo de energia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD - 631.587

BRUNO LEITE TEIXEIRA PERRONI

**VELOCIDADE ECONÔMICA DE ESCOAMENTO E COMPOSIÇÃO DE
CUSTOS DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 29 de fevereiro de 2008.

Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira (UFLA)

Dr. Paulo César de Melo (UFLA)

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, por toda a força e luz na minha vida.

Aos meus pais, Osmar Hipólito Perroni e Mary Leite Teixeira Perroni, pelo incentivo, educação e por sempre me mostrarem o caminho da verdade e honestidade.

Ao meu irmão, Luciano Teixeira Hipólito Perroni e minha querida Isa Maria da Penha Madeira, pelo carinho e dedicação.

OFEREÇO E DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, por intermédio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Jacinto de Assunção Carvalho, pelos ensinamentos e pela valiosa orientação na realização deste trabalho.

Aos Professores Luis Fernando Coutinho de Oliveira e Paulo César de Melo, membros da banca examinadora, pelas sugestões e observações.

Aos professores do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, pelos ensinamentos recebidos.

Ao Pesquisador Camilo de Lélis Teixeira de Andrade, da Embrapa, pelo profissionalismo, amizade e incentivo à realização deste curso.

Aos amigos Lessandro Coll Faria, Henrique Fonseca Elias de Oliveira e Luciano Geisenhoff, pela grande amizade e convivência em todos os momentos.

Aos colegas de curso Anselmo Custódio, Carolina Bilibio, Joaquim Alves Júnior, Léo Ávila, Marcelo Viola, Moisés Santiago Ribeiro, Samuel Beskow e demais colegas, pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica da UFLA; à secretária Daniela, do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos serviços prestados.

Aos amigos Adriano Alves da Silva, Alexandre Siqueira Araújo, Augusto César Lima da Silva, Bruno Henrique Mattiello, Flávio Castro da Silva e Leandro Rodrigues, pela grande amizade e convivência durante minha passagem por Lavras - MG.

A todos meus familiares e amigos, que mesmo à distância, de alguma forma contribuíram para concretização deste projeto.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Caracterização dos sistemas de irrigação.....	3
2.2 Composição dos custos de sistemas de irrigação.....	4
2.3 Dimensionamento econômico de tubulações.....	6
2.4 Consumo de energia no dimensionamento da irrigação	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Dimensionamento econômico da adutora.....	13
3.1.1 Custos fixos	15
3.1.1.1 Custos do sistema de recalque	15
3.1.1.1.1 Custo da sucção	16
3.1.1.1.2 Custos do motor elétrico	16
3.1.1.1.3 Custo da bomba hidráulica	17
3.1.1.2 Custo da tubulação.....	18
3.1.2 Custos fixos anuais	19
3.1.3 Custos variáveis anuais.....	20
3.1.3.1 Custos de manutenção	20
3.1.3.2 Custo da energia de bombeamento	21
3.1.3.2.1 Altura manométrica total	22
3.1.3.2.2 Potência do sistema.....	24
3.1.3.2.3 Consumo do motor elétrico.....	25
3.1.3.2.4 Tarifas e custo da energia	26
3.1.4 Diâmetros e velocidades econômicas	29

3.1.5 Influência do custo da energia e tubulação na velocidade	30
3.2 Parâmetros econômicos da irrigação	30
3.2.1 Relação entre a potência do sistema e a área irrigada.....	34
3.2.2 Relação custo por área irrigada.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Equações para determinação dos custos	39
4.1.1 Custo do motor elétrico.....	39
4.1.2 Custo da bomba	40
4.1.3 Custo da tubulação de aço galvanizado e PVC.....	41
4.1.4 Custo do sistema de recalque.....	42
4.2 Dimensionamento econômico.....	43
4.3 Variações da velocidade com o custo da energia e da tubulação.....	51
4.4 Parâmetros econômicos	59
4.4.1 Relação entre a potência demandada e a área irrigada.....	59
4.4.2 Custo do sistema de irrigação	70
5 CONCLUSÕES	82
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS	86

LISTA DE SÍMBOLOS

H_{man}	Altura manométrica
A_i	Área irrigada
C	Coefficiente de rugosidade
L	Comprimento
C_{ee}	Consumo de energia elétrica
C_{efp}	Consumo de energia fora de ponta
C_{iasp}	Custo da área irrigada com aspersão convencional
C_{iap}	Custo da área irrigada com autopropelido
C_{ipivo}	Custo da área irrigada com pivô central
C_{Dep}	Custo da depreciação
C_T	Custo da tubulação
C_{tag}	Custo da tubulação de aço galvanizado
$C_{\text{TPVC}_{125}}$	Custo da tubulação de PVC PN125
$C_{\text{TPVC}_{80}}$	Custo da tubulação de PVC PN80
CE	Custo de energia
C_{ma}	Custo de manutenção
C_{SR}	Custo do sistema de recalque
C_{FA}	Custo fixo anual
C_{TA}	Custo total anual
C_{VA}	Custo variável anual
D_c	Demanda contratada

H_g	Desnível geométrico
D	Diâmetro do tubo
L_{am}	Lâmina média diária aplicada
H_f	Perda de carga
H_{f_s}	Perda de carga na sucção
H_{f_r}	Perda de carga no recalque
Pot_a	Potência calculada
Pot	Potência comercial do motor
Pot_m	Potência do motor
CV/ha_{asp}	Potência unitária para irrigações com aspersão convencional
CV/ha_{ap}	Potência unitária para irrigações com autopropelido
CV/ha_{piv}	Potência unitária para irrigação com pivô central
P_{in}	Pressão no início da área
$P_{in_{as}}$	Pressão no início da área irrigada com aspersão convencional
$P_{in_{ap}}$	Pressão no início da área irrigada com autopropelido
$P_{in_{pi}}$	Pressão no início da área irrigada com pivô central
η_b	Rendimento da bomba
η_m	Rendimento do motor
η	Rendimento global do conjunto motobomba
T_d	Tarifa da demanda
T_e	Tarifa de energia
T_{efp}	Tarifa de energia fora de ponta
T_f	Tempo de funcionamento
Q	Vazão

RESUMO

PERRONI, Bruno Leite Teixeira. **Velocidade econômica de escoamento e composição de custos de sistemas de irrigação por aspersão**. 2008. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola. Engenharia de Água e Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Diversos fatores podem atuar como limitantes para a atividade agrícola irrigada, dentre eles a energia utilizada no sistema de irrigação tem grande destaque. Neste trabalho foram feitas simulações para determinação do diâmetro mais econômico para adutoras de aço galvanizado e PVC, em que se constatou que para tubulações de aço galvanizado a velocidade econômica variou entre 0,67 e 1,63 m.s⁻¹ e para PVC variou entre 0,62 e 1,97 m.s⁻¹. Foram feitas, também, simulações sobre a influência da elevação do custo da energia e da tubulação sobre a velocidade econômica. Como resultado, foi possível observar que quando o aumento da energia elétrica é maior que o da tubulação, a velocidade econômica tende a diminuir, e tende a aumentar quando o aumento da tubulação é maior que o da energia. O aumento do custo da energia elétrica provoca uma redução maior na velocidade econômica em tubulações de menor comprimento quando comparado às de maior comprimento. Quando o aumento do custo da tubulação é maior que o da energia elétrica, percebe-se que a velocidade econômica aumenta mais em tubulações de maior comprimento quando comparado às de menor comprimento. Também foi parte deste trabalho determinar a potência necessária e o consumo de energia para as situações simuladas em áreas irrigadas com aspersão convencional, autopropelido e pivô central. Foi possível observar que a potência e o consumo variam bastante com as características locais e com o sistema, não sendo possível, então, a utilização de valores médios que os representem. Com base em simulações, também foram obtidos os custos totais e unitários para os sistemas aqui simulados, em que se constatou um aumento do custo com a área irrigada, enquanto o custo unitário diminuiu. Foi possível concluir também que não existe um custo médio para os sistemas, tendo em vista a grande variação apresentada em função das características locais e de funcionamento.

* Comitê Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho – UFLA (Orientador).

ABSTRACT

PERRONI, Bruno Leite Teixeira. **Economical flowage speed and cost composition of sprinkler irrigation systems.** 2008. 93 p. Dissertation (Master of Science in Agricultural Engineering. Engineering of Water and Soil) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.*

Several factors can act as limiting for the irrigated agricultural activity, including energy used in the systems. In this work simulations were made in order to determine the most economical diameter for galvanized steel and PVC pumped supply. It was found that, for galvanized steel pipes, the economical speed ranged from 0.67 to 1.63 ms^{-1} ; and, for PVC, ranged from 0.62 to 1.97 ms^{-1} . Based on simulations, it was evaluated the influence of raising the energy cost and the pipe cost on the economical flowage speed. It was observed that when the increment of the electricity cost is higher than the increment of the pipe's cost, the economical flowage speed tends to decrease. On the other hand, it tends to increase when the increment of the cost of the pipe is larger than the energy's increment. The increment of cost of electricity causes a further reduction on the economical flowage speed when the length of the pipelines is small. When the increment on the cost of the pipe is larger, the economical flowage speed increases more in pipelines of bigger lengths. It was also aim of this work to determine the required power and energy consumption for the simulated situations in areas irrigated with conventional sprinkler, traveler irrigation machine and central pivot. It can be observed that the power and consumption vary extensively with the local characteristics and the systems, making impossible the use of averages to represent them. Based on simulations were also obtained the total cost and unit cost for the considered systems. The total cost increases with the irrigated area, while the unit cost decreases. The average cost is not a good representation for those systems due to the wide variation presented, due to local and operational characteristics.

* Guidance Committee: Jacinto de Assunção Carvalho – UFLA (Supervisor)

1 INTRODUÇÃO

A ampla utilização da irrigação como acréscimo tecnológico ressalta a importância do uso racional de recursos como água e energia elétrica. Diversos estudos são realizados no Brasil visando uma maior eficiência nos projetos de irrigação, principalmente quando relacionados com a parte hidráulica do sistema. Estes estudos buscam um melhor aproveitamento da água e da energia utilizados durante a irrigação.

Contudo, ainda que o sistema esteja hidráulicamente correto este pode não estar sendo economicamente viável para o produtor. Fatores como custo da energia, cultura e época de produção podem atuar como limitantes na agricultura irrigada. Torna-se, então, extremamente necessário um estudo mais aprofundado das variáveis econômicas que envolvem o projeto, principalmente quando relacionadas ao consumo de energia.

A energia utilizada nos sistemas de irrigação pode representar, dependendo do sistema, mais da metade do custo variável, sendo então alvo de potenciais estudos na busca pela otimização e minimização dos custos de implantação e manutenção.

É de grande valia para os profissionais que atuam com irrigação o conhecimento de informações e variáveis que relacionam a energia consumida com uma possível área cultivada, permitindo, assim, a estimativa do custo de produção da área irrigada.

Os custos relacionados à irrigação variam com o método empregado, tamanho e topografia da área, tempo de funcionamento, dentre outros fatores. Tanto os custos de investimentos (custos fixos) para aquisição dos equipamentos de irrigação e sistema de pressurização, bem como os custos variáveis, representados pela energia e manutenção, irão variar grandemente em função de

condições locais.

É comum a utilização generalizada de relações potência por unidade de área irrigada e consumo por unidade de área irrigada. E estas características podem levar a interpretações e resultados bastante distorcidos da realidade. Há necessidade de se considerar as características físicas locais e de operação de cada método e sistema de irrigação.

Outro fator que chama a atenção nos projetos hidráulicos é a utilização de velocidade média de escoamento de água no dimensionamento de adutoras, sem que seja feita uma avaliação econômica. É importante a realização de estudos que visem obter os atuais valores de velocidade econômica, para que os dimensionamentos sejam econômicos também em longo prazo.

Com base nas atuais necessidades apresentadas, o presente trabalho teve como objetivos a obtenção de:

i) velocidade e diâmetro econômicos da adutora, em função do tempo de funcionamento do sistema, tarifas de energia elétrica, taxa de juros e custo das tubulações de aço galvanizado e PVC, considerando os custos atuais;

ii) valores de potência e consumo de energia por área irrigada para cada sistema em função das características locais;

iii) custo da irrigação por unidade de área com base nas características variáveis da mesma (área, tempo de funcionamento, desnível geométrico e comprimento da adutora).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização dos sistemas de irrigação

De acordo com Bernardo et al. (2006) a irrigação por aspersão é o método em que a água é aspergida sobre a superfície do terreno, assemelhando-se a uma chuva, por causa do fracionamento do jato de água em gotas, devido a sua passagem sob pressão através de pequenos orifícios ou bocais. Ainda segundo os autores os sistemas de irrigação por aspersão podem ser divididos entre sistemas móveis e fixos, com movimentação manual ou mecânica.

A aspersão convencional é o sistema básico de irrigação, do qual derivam todos os demais, e caracteriza-se pelo uso de tubulações móveis de engate rápido ou fixo enterrado, irrigando áreas pequenas ou médias. Os sistemas de irrigação do tipo aspersão convencional são compostos basicamente de sistema motobomba, tubulações, acessórios e aspersores (Mantovani et al., 2006).

Segundo Drumond & Fernandes (2001), a irrigação por aspersão convencional tem como principais vantagens o baixo custo unitário do sistema e o bom aproveitamento da área. Como desvantagens os autores apresentam o elevado custo com mão-de-obra e a grande influência dos fatores climáticos, tais como vento, umidade relativa e temperatura.

O sistema de irrigação por aspersão do tipo autopropelido é considerado um sistema móvel e sua movimentação se dá pela energia hidráulica. O sistema é composto por um canhão hidráulico montado sobre uma plataforma, que se desloca sobre o terreno, irrigando-o simultaneamente. Existem basicamente dois tipos de autopropelidos no mercado, sendo um com movimentação por cabo de aço e outro com movimentação por carretel enrolador, sendo mais utilizado

atualmente o último (Mantovani et al., 2006).

Como principal vantagem dos autopropelidos do tipo carretel enrolador Bernardo et al. (2006) apresentam a economia de mão-de-obra. Como desvantagens os autores apontam o alto consumo de energia, a baixa vida útil das mangueiras e a alta sensibilidade à interferência dos ventos.

De acordo com Mantovani et al. (2006), o sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central é definido como um sistema de movimentação circular, movido por energia elétrica. Possui uma linha lateral de 200 a 800 metros, suspensa por uma estrutura formada por torres, dotadas de rodas, triângulos e treliças. O pivô se movimenta em torno de um ponto pivô, que lhe serve de tomada de água e ancoragem. Ainda segundo os autores, as principais vantagens deste sistema são a economia de mão-de-obra, boa uniformidade de aplicação e a manutenção do alinhamento e velocidade em todas as irrigações. Como desvantagens são apresentadas a alta intensidade na extremidade do pivô, o que pode acarretar escoamento superficial e a perda de aproximadamente 20 % da área irrigada no caso dessa ser um quadrado.

2.2 Composição dos custos de sistemas de irrigação

Quando se trabalha com análise econômica, o termo “custo” significa a compensação que o emprego de um determinado fator deve ter na produção de um determinado bem (Hoffmann et al., 1987).

De acordo com Favetta (1998), os custos fixos totais são aqueles que não variam com a quantidade produzida e os custos variáveis totais aqueles que variam de acordo com o nível de produção de determinada empresa. Ainda segundo o autor, para um sistema de irrigação, fazem parte dos custos fixos a sua depreciação e a remuneração do capital investido, sendo que os valores gastos com energia e manutenção do equipamento são incluídos nos custos

variáveis.

Segundo Hoffmann et al. (1987), o termo depreciação é descrito como o custo necessário para substituir os bens de capital quando tornados inúteis pelo desgaste físico, ou quando perdem valor com o decorrer dos anos devido às inovações tecnológicas. Os autores ainda ressaltam que os custos operacionais englobam os valores dos insumos consumidos, o custo de uso da máquina e implementos utilizados, sem considerar juros e o valor da mão-de-obra utilizada.

Os componentes dos custos anuais da irrigação são definidos pelo Programa Nacional de Irrigação, Proni (1987) como sendo:

- custo fixo anual para aquisição do sistema, contabilizando o investimento inicial, a depreciação e os juros sobre o capital investido;
- custos com manutenção e reparos;
- taxas e seguros;
- custos da produção agrícola despendidos na irrigação;
- custos com energia para operação do sistema.

Dentre os componentes do sistema de irrigação, os quatro últimos correspondem aos custos variáveis e, dentre eles, o custo da energia utilizada é o que tem a maior importância.

Favetta (1998) cita que a redução do consumo de energia de um sistema de irrigação implica em uma redução do custo financeiro, e apresenta três alternativas para a redução do consumo de energia:

- redução do volume de água bombeada;
- diminuição da pressão total exigida pelo sistema;
- melhoria do desempenho da estação de bombeamento.

De acordo com Zocoler (1998), os custos com reparos e manutenção correspondem ao custo anual necessário para manter o bem de capital em condições de uso. Os custos com manutenção são calculados a partir de valores médios anuais expressos em percentuais sobre o valor de compra do

equipamento (Próni, 1987).

A Tabela 1 apresenta alguns componentes do sistema com sua vida útil e percentual utilizado para manutenção adotado pelo Próni (1987). Lembrando sempre que a mesma foi desenvolvida para uma condição de funcionamento anual de 2000 horas, podendo a vida útil ser tanto maior quanto menor for o período de funcionamento de equipamento durante o ano.

TABELA 1 Vida útil e percentual utilizado para manutenção de alguns equipamentos de irrigação.

Componentes	Vida útil (anos)	Manutenção anual (%)
Bomba centrífuga	16 – 25	3,0 a 5,0
Motor elétrico	20 – 25	1,5 a 2,5
Tubo de aço galvanizado	10 – 20	1,0 a 2,0
Estação de bombeamento (estrutura)	20 – 40	0,5 a 1,5

Fonte: Próni (1987)

Um estudo econômico envolvendo sistemas de irrigação deve abranger análises de diâmetros econômicos para a condução da água. Nestes estudos devem ser considerados os custos fixos e variáveis. Devem-se considerar todas as variáveis que afetem o custo quando o diâmetro econômico for utilizado para tomadas de decisão (Rodrigues, 1999).

2.3 Dimensionamento econômico de tubulações

Com a globalização, a economia do país apresentou significativas modificações para acomodar-se às novas situações internacionais. Conseqüentemente, houve variações nos preços dos equipamentos, serviços e peças, bem como da energia. Hoje, qualquer tomada de decisão deve ser baseada em parâmetros econômicos atualizados, principalmente no mundo globalizado em que vivemos, no qual a eficiência e custos passam a ser os fatores de decisão.

Assim, a determinação da velocidade e diâmetro econômicos deve ser feita para as condições atuais da economia, com o objetivo de maximizar a eficiência de um sistema de recalque ao mesmo tempo em que se procura minimizar os custos (Carvalho & Reis, 2000).

De acordo com Favetta (1998), o diâmetro econômico é aquele que reduz ao mínimo a soma dos custos da tubulação e da energia. O autor ainda ressalta que é freqüente a necessidade de se estabelecer perdas de carga com base em diâmetros econômicos.

Segundo Paulino e Pereira (1986), o dimensionamento de um sistema de irrigação deve ocorrer buscando uma minimização do somatório do custo energético anual para seu funcionamento. Para que seja possível atender esta condição, os autores afirmam que é necessário conhecer a cultura a ser irrigada, a necessidade anual de água, o módulo de irrigação adotado, os custos da tubulação, o custo da energia elétrica e da rede elétrica.

A seleção econômica do diâmetro das tubulações de um sistema de irrigação deve receber tanta importância quanto a resolução do problema em seu aspecto hidráulico. Ainda segundo os autores, o dimensionamento econômico de uma tubulação é estabelecido quando, para cada condição, o diâmetro é determinado de forma a reduzir ao máximo o somatório do custo fixo com o custo anual variável. Os autores ainda citam que existem diversas formas de se dimensionar economicamente uma tubulação (Bernardo et al., 2006).

É de fundamental importância escolher o conjunto motobomba e a tubulação com base em critérios econômicos, e não somente critérios hidráulicos, devido ao elevado investimento e custo de operação de um sistema de irrigação (Carvalho et al., 2000).

A escolha de diâmetros maiores acarreta um maior investimento inicial com aquisição de tubulações, e uma redução das perdas de carga com conseqüente redução do conjunto motobomba. Isto implica em uma redução nos

custos com bomba e consumo de energia. Por outro lado, quanto menor for o diâmetro da tubulação, menor o custo de instalação da mesma, porém, conseqüentemente, traz maior perda de carga, elevando assim os custos com a aquisição da motobomba, rede elétrica e energia consumida (Paulino, 1986; Robaina, 1997).

De acordo com Magalhães et al. (2002), a fórmula de Bresse é uma equação muito simples para solucionar um problema complexo e com muitas variáveis econômicas, devendo ser aplicada apenas em pequenas instalações, com diâmetro máximo de 150 mm funcionando 24 horas por dia, ininterruptamente. Em instalações maiores, dará apenas uma primeira aproximação do valor do diâmetro ótimo, sendo prudente um estudo econômico em que sejam pesquisados valores de diâmetros mais próximos, inferiores e superiores.

De acordo com Carvalho & Reis (2000), as velocidades econômicas encontradas na época do estudo situaram-se aproximadamente entre 0,7 e 2,2 m.s^{-1} , quando utilizados motores elétricos.

Em seu trabalho, Favetta (1998) concluiu que a maioria dos pivôs analisados apresentaram melhores resultados quanto à otimização do seu custo, quando utilizado um diâmetro logo acima ou logo abaixo do selecionado, ressaltando assim a importância do estudo do diâmetro econômico das tubulações.

De acordo com Coiado & Ravelli Júnior (1993), os estudos econômicos para o dimensionamento da tubulação são efetuados com base em critérios do valor presente de custo de aquisição da tubulação, dos equipamentos e da energia elétrica. Em seu trabalho os autores assumiram que teoricamente qualquer diâmetro pode ser utilizado em uma linha de recalque, ressaltando a adoção de valores mínimos para evitar deposições e valores de velocidades máximas, para evitar problemas de desgastes. Deve existir um ponto de

equilíbrio entre a velocidade máxima e mínima, sendo este a velocidade mais econômica.

2.4 Consumo de energia no dimensionamento da irrigação

Segundo Oliveira Filho et al. (2000), nos últimos anos, constatou-se um acréscimo substancial na demanda de energia elétrica. Dentre os fatores preponderantes para tal, citam-se o crescimento demográfico, a industrialização e as crescentes inovações tecnológicas. Racionalizar energia elétrica é de fundamental importância tanto para a sociedade, quanto para as concessionárias e consumidores. Ainda segundo os autores, para as concessionárias o uso racional de energia a nível de demanda implica, dentre outras: (i) na possibilidade do adiamento de investimentos em geração de energia, viabilizando a custo reduzido o fornecimento de energia a um número cada vez maior de consumidores; (ii) na maior competitividade da energia elétrica em relação a outros recursos energéticos e (iii) na conservação dos recursos naturais, colaborando para o desenvolvimento sustentado.

Segundo o Ministério das Minas e Energia (Brasil, 1996), no Brasil, até o ano de 2015 será necessário quase que triplicar a oferta de energia, o que acarretaria aos cofres públicos investimentos de cerca de 200 bilhões de reais.

Tem-se observado, no Brasil, sobretudo nas últimas décadas e em particular nas regiões Sul e Sudeste, um crescimento considerável dos índices de eletrificação rural. Estima-se que 25% das propriedades rurais brasileiras ainda não são eletrificadas (Oliveira Filho et al., 2004).

A disponibilidade e o custo da energia vêm sendo considerados fatores limitantes nos últimos anos para a expansão da agricultura irrigada, e, ganha, cada vez, maior importância no estudo econômico da irrigação (Favetta, 1998).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), os consumidores de energia elétrica pagam um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida, estabelecida em kWh e multiplicada por um valor unitário, denominada tarifa. Esta tarifa pode ser composta por uma demanda de potência e o consumo de energia. Entretanto, nem todos os consumidores pagam tarifas de demanda de potência. Isso depende da estrutura tarifária e da modalidade de fornecimento na qual o consumidor está enquadrado.

Segundo Melo (1993), a energia representa dentro dos custos variáveis a maior parcela e, dependendo do método de irrigação, pode chegar a 70 % do custo variável do sistema. Ainda segundo o autor, o custo da energia consumida na irrigação depende do tipo de combustível do motor, da potência instalada e da eficiência do conjunto motobomba.

Qualquer sistema de irrigação deve ser dimensionado com custo operacional energético anual minimizado. Para tornar isto possível, é preciso conhecer quais culturas serão irrigadas, a quantidade de água de irrigação, o custo da tubulação instalada e o custo da energia elétrica e da rede elétrica (Paulino, 1986).

De acordo com o Proni (1987), há uma correlação entre o tamanho da área irrigada e a potência do conjunto de bombeamento elétrico instalado, sendo considerado um valor médio de projeto em torno de $1,27 \text{ kVA} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Gilley & Supalla (1983) avaliaram a economia de energia em diferentes sistemas de irrigação pelas alterações no dimensionamento e aprimoramento do manejo do sistema. Com o trabalho, os autores concluíram que é possível uma economia de energia através do uso de bombas hidráulicas de alto rendimento, uso de tubulação com uma menor perda de carga, aumento na eficiência de aplicação, redução das pressões de trabalho e um melhor manejo da água aplicada.

Em seu trabalho, Scaloppi (1985) comparou o consumo de energia em diferentes sistemas de irrigação, tomando com base 70 % de eficiência para as bombas hidráulicas e de 88 % para o motor elétrico, na determinação da energia de bombeamento requerida, sendo o volume recalcado fixado em 1000 m³ e o desnível geométrico variando de 0 a 100 m. Pelos resultados foi possível concluir que o sistema de autopropelido é o de maior consumo energético; os sistemas de pivô central e aspersão convencional vêm em seguida, sendo estes com valores bem próximos.

Buscando uma racionalização da energia nas estações de pressurização de um perímetro irrigado, Oliveira Filho et al. (2004) avaliaram a adequação da bomba, do motor elétrico e a avaliação do conjunto motobomba. Os autores perceberam que quanto maior o índice de carregamento do motor, menor será o valor cobrado pela água, e que se deve considerar de forma integralizada os aspectos de adequação de força eletromotriz e dimensionamento hidráulico, quando se visa maior economia.

Em seu trabalho, Lima et al. (2006) desenvolveram indicadores de eficiência energética para avaliar o aproveitamento de água e energia na irrigação. Os autores perceberam a ampla necessidade de avaliação destes parâmetros, pois o seu acompanhamento na fase de projeto e de manutenção pode auxiliar o agricultor, tornando os equipamentos mais eficientes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para melhor compreensão do material e dos métodos utilizados neste trabalho foram feitos organogramas, que apresentam as etapas do trabalho e a sua seqüência.

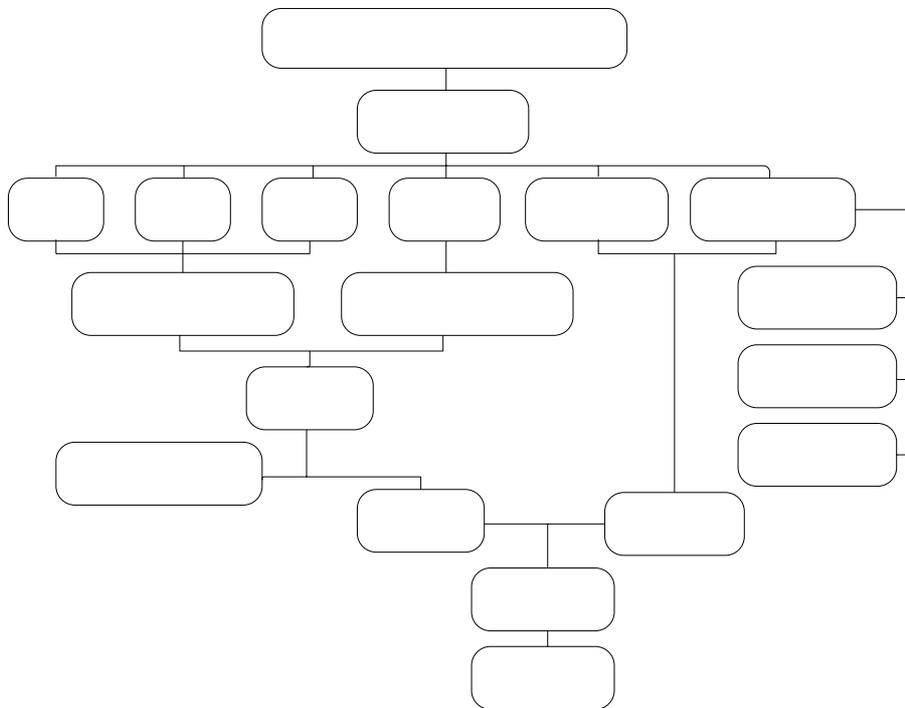


FIGURA 1 Organograma do dimensionamento econômico – 1ª etapa.

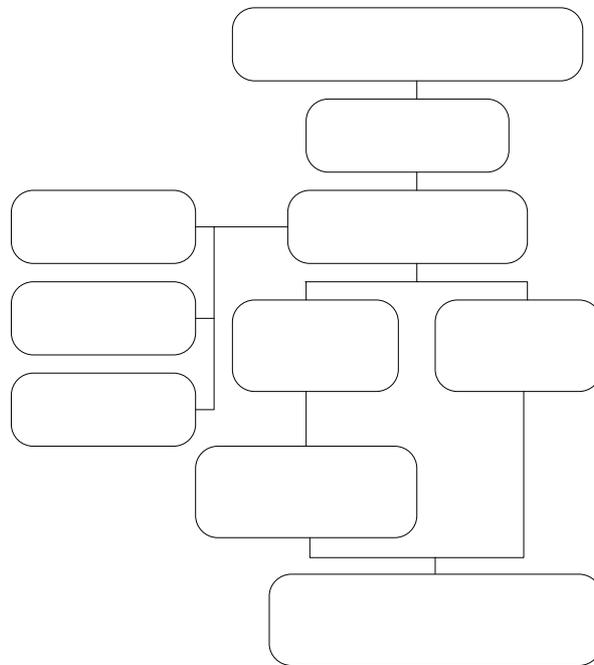


FIGURA 2 Organograma da determinação dos parâmetros econômicos – 2ª etapa.

3.1 Dimensionamento econômico da adutora

A fim de realizar este estudo foi feito um levantamento, junto a diversos estabelecimentos comerciais, dos preços de cada componente do sistema de recalque, visando gerar um preço médio para os mesmos. Neste levantamento foi considerado o preço na condição de pagamento à vista e com impostos incluídos. Visando minimizar a influência dos impostos estaduais, foram coletados preços em diferentes estados da federação, incluindo todos da região sudeste.

Foram pesquisados os preços de reduções excêntricas e concêntricas, mangotes flexíveis com 6 metros de comprimento, curva dupla, registro de gaveta, curva de saída com bujão de escorva, válvula de pé, acoplamentos elástico para motores, chave de proteção e partida, tubulações de aço galvanizado e PVC, bombas hidráulicas, motores elétricos e base de ferro para motor elétrico. A coleta dos dados ocorreu no período entre 4 de junho e 31 de agosto de 2007, e neste período o dólar apresentou uma cotação média de R\$ 1,94.

Foi definido um sistema de recalque padrão, composto de uma tubulação de sucção com válvula de pé, motor, bomba com vazão máxima de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e pressão máxima de 150 m.c.a, entrada e saída da bomba, acoplamento e sistemas de partida e proteção, conforme a figura 3.

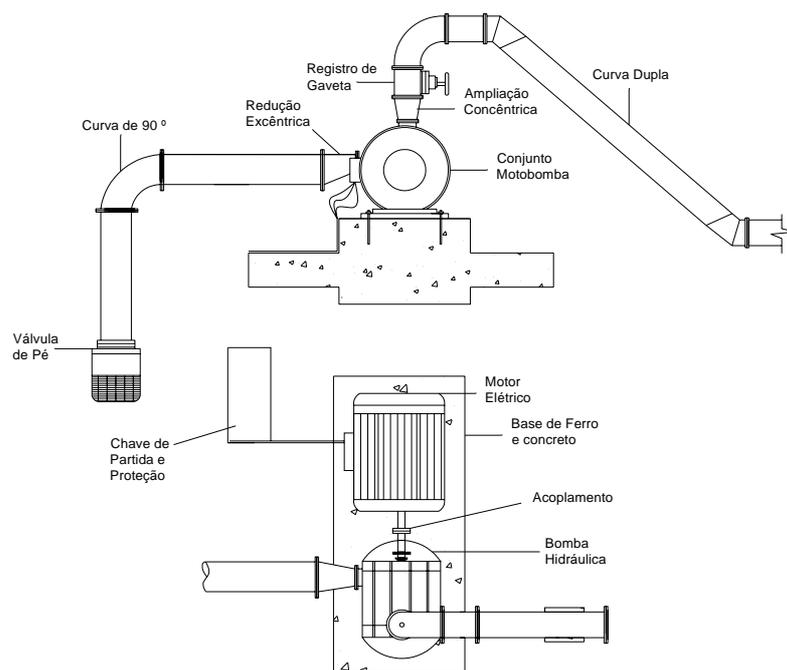


FIGURA 3 Vistas lateral e superior do conjunto motobomba adotado neste estudo.

Foram adotadas, para o estudo, as tubulações de aço galvanizado para pressões de até 1500 kPa e tubulações de PVC onde a pressão de operação simulada foi menor que 125 kPa.

O dimensionamento econômico da adutora foi feito com base no estudo dos custos totais da adutora. Estes foram definidos como sendo o somatório dos custos fixos e dos custos variáveis.

$$CTA = CFA + CVA \quad (1)$$

em que:

CTA = custo total anual;

CFA = custo fixo anual;

CVA = custo variável anual.

3.1.1 Custos fixos

Os custos fixos (CF) foram definidos como sendo aqueles representados pelo custo de aquisição do sistema de recalque (C_{SR}), tubulação (C_T) e a depreciação (C_{Dep}) dos mesmos durante a sua vida útil.

$$CF = C_{SR} + C_T + C_{Dep} \quad (2)$$

3.1.1.1 Custos do sistema de recalque

O custo do sistema de recalque foi dado pelo somatório dos valores do custo da sucção, motor elétrico com chaves de proteção/partida e bomba hidráulica. Com interações entre diferentes valores de vazão e pressão, obteve-se o custo total do sistema de recalque.

3.1.1.1.1 Custo da sucção

O custo da tubulação de sucção foi dado pelo somatório dos custos de um mangote flexível de 6 metros, uma válvula de pé e uma redução excêntrica. A Tabela 2 apresenta as velocidades e vazões utilizadas para a escolha do diâmetro da tubulação de sucção.

TABELA 2 Velocidades adotadas para dimensionamento da tubulação de sucção.

Diâmetro (mm)	Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
50	0 – 0,0033	até 1,64
75	0,0033 – 0,0069	1 a 1,5
100	0,0069 – 0,0125	0,9 a 1,55
125	0,0125 – 0,01944	1 a 1,54
150	0,01944 – 0,02777	1,1 a 1,53
200	0,02777 – 0,04861	0,86 a 1,5
250	0,04861 – 0,07638	0,96 a 1,51
300	0,07638 – 0,11111	1,05 a 1,52

Foram adotadas essas faixas de velocidades para se evitar o problema de cavitação da bomba durante o funcionamento e também para evitar grandes perdas de carga na tubulação de sucção.

3.1.1.1.2 Custos do motor elétrico

O custo do motor elétrico trifásico com sistema de proteção e acoplamento foi obtido por meio de um ajuste, feito por regressão, em que os dados utilizados foram provenientes do levantamento de preços no mercado. Foi gerado um preço médio entre motores e acoplamentos com rotação de 1750 e 3500 rpm e um outro preço médio para os sistemas de proteção de diferentes tensões.

3.1.1.1.3 Custo da bomba hidráulica

Para determinação do custo das bombas utilizadas foram coletados os preços de algumas bombas existentes no mercado para atender às situações simuladas. Utilizou-se para isto bombas da marca KSB, modelos Meganorm e WKL e da marca Thebe. Utilizando os catálogos técnicos fornecidos pelos fabricantes selecionou-se, nas curvas características de cada bomba, o ponto de máximo rendimento (Figura 4) e desse foram extraídos os valores de pressão e vazão. Adotou-se o ponto de máximo rendimento como sendo o ponto de operação da bomba. Utilizando valores de vazão, pressão e custo, foi ajustado um modelo que representasse o custo da bomba em função dos valores de vazão e pressão.

$$C_B = f(Q, H_{\text{man}}) \quad (3)$$

em que:

C_B = custo da bomba hidráulica;

Q = vazão;

H_{man} = altura manométrica.

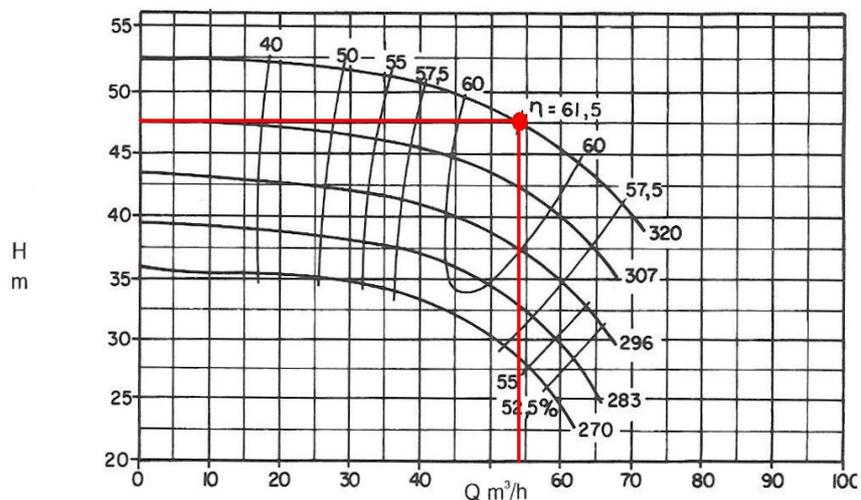


FIGURA 4 Ponto de máximo rendimento para Bomba Meganorm 50 – 315.

3.1.1.2 Custo da tubulação

Para determinação do custo da tubulação, foram analisadas separadamente as tubulações de aço galvanizado e de PVC.

O custo das tubulações de recalque foi determinado com base em diversas combinações simuladas de valores de comprimento e diâmetro de tubulação.

$$C_T = f(L, D) \quad (4)$$

em que:

L = comprimento da tubulação;

D = diâmetro da tubulação.

Foram utilizados, para determinação do custo da tubulação de aço galvanizado, neste estudo, diâmetros variando de 50 a 350 mm e comprimentos até 2000 metros. Com base em regressões com estas combinações de valores foi possível obter o custo da tubulação de aço galvanizado.

O custo das tubulações de PVC foi determinado da mesma forma, entretanto, os diâmetros analisados variaram entre 50 e 300 mm. Para tubulações de PVC foram geradas duas funções de custos, sendo uma para tubos com pressão nominal de 800 kPa e outra para tubos com pressão nominal de 1250 kPa.

3.1.2 Custos fixos anuais

Estes custos foram anualizados utilizando-se o fator de recuperação de capital (FRC) que leva em consideração a taxa de juros (i) e a vida útil ou tempo de amortização (n).

$$FRC = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

Foi considerada uma taxa de juros de 12 % a.a. Este valor se justifica pela atual estabilidade econômica do país nos últimos anos e a confiança do mercado financeiro na política econômica do país, além de representar um valor médio praticado ultimamente. A vida útil média dos componentes adotada para determinação do fator de recuperação foi de 15 anos, conforme o Proni (1987). O custo fixo anual foi dado por:

$$\text{CFA} = \text{CF} \cdot \text{FRC} \quad (6)$$

em que,

CFA = custo fixo anual, R\$;

CF = custo fixo total, R\$;

FRC = fator de recuperação de capital.

Não foram contabilizados aqui os valores de sucata dos equipamentos ao final do período analisado.

3.1.3 Custos variáveis anuais

Os custos variáveis foram definidos como sendo o somatório dos gastos com manutenção e energia elétrica utilizada para o funcionamento do sistema de irrigação.

$$\text{CVA} = C_{\text{ma}} + \text{CE} \quad (7)$$

em que:

CVA = custo variável anual;

C_{ma} = custo com manutenção;

CE = custo com energia.

3.1.3.1 Custos de manutenção

Os gastos com manutenção foram calculados conforme Proni (1987), onde estes representam até 2 % do custo fixo total.

$$C_{\text{ma}} = \left(\frac{\text{CF} \cdot \%_{\text{CF}}}{100} \right) \quad (8)$$

em que,

C_{ma} = custo com manutenção, R\$;

CF = custo fixo total, R\$;

$\%_{\text{CF}}$ = porcentagem do custo fixo total.

3.1.3.2 Custo da energia de bombeamento

Para determinação do custo da energia de bombeamento foram utilizadas diferentes situações de operação do sistema, envolvendo interações entre diferentes pressões de funcionamento, vazões, diâmetros e comprimentos de tubulação e tempos de funcionamento. O custo da energia pode ser representado pela seguinte relação:

$$\text{CE} = f(Q, H_{\text{man}}, T_f) \quad (9)$$

em que,

CE = custo da energia;

Q = vazão;

H_{man} = altura manométrica;

T_f = tempo de funcionamento.

Foram analisados diferentes valores de diâmetros e vazão, utilizando valores que atendessem as situações mais comumente encontradas nos projetos de irrigação. Analisaram-se diâmetros de 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300 e 350 mm e vazões de 0,00138 a 0,00833 m³.s⁻¹.

3.1.3.2.1 Altura manométrica total

A altura manométrica foi determinada pelo somatório do valor da pressão necessária no início da área irrigada, desnível geométrico total e perda total nas tubulações de sucção e recalque.

$$H_{\text{man}} = P_{\text{in}} + H_g + H_{f_s} + H_{f_r} \quad (10)$$

em que:

P_{in} = pressão no início da área;

H_g = desnível geométrico total;

H_{f_s} = perda de carga total na sucção;

H_{f_r} = perda de carga total no recalque.

Utilizou-se para representar a altura manométrica total das situações simuladas valores variando de 500 a 1500 kPa.

Foi considerado como P_{in} o valor de pressão registrado no início da área a ser irrigada para o funcionamento do sistema, sendo esta com diferença de nível igual a zero, ou seja, plana.

Para a perda de carga na sucção foi adotado um valor médio de 5 kPa. A perda de carga no recalque foi calculada utilizando a equação de Hazen-Williams.

$$Hf_r = f(Q, L, D) \quad (11)$$

em que:

Q = vazão;

L = comprimento da adutora;

D = diâmetro da adutora.

A equação de Hazen-Williams foi utilizada devido ao fato de apresentar resultados consistentes quando utilizada com diâmetros maiores que 50 mm, e a sua grande utilização em cálculos desta natureza. A mesma se apresenta da seguinte forma:

$$Hf = 10,641 \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \quad (12)$$

em que,

Hf = perda de carga, m;

Q = vazão, $m^3 \cdot s^{-1}$;

C = coeficiente de rugosidade, adimensional;

L = comprimento da tubulação, m;

D = diâmetro da tubulação, m.

Adotou-se um coeficiente de rugosidade de 125 para tubulações de aço galvanizado e de 140 para tubulações de PVC.

3.1.3.2.2 Potência do sistema

A potência do motor necessária para a relação entre vazão e pressão, chamada de potência absorvida do motor elétrico, foi calculada pela equação 13.

$$\text{Pot}_a = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{\text{man}}}{75 \cdot \eta} \quad (13)$$

em que:

Pot_a = potência absorvida, cv;

γ = peso específico da água, kg.m^{-3} ;

Q = vazão, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$;

H_{man} = altura manométrica, m;

η = rendimento do conjunto motobomba, decimal ($\eta = \eta_m \cdot \eta_b$).

Para as bombas os rendimentos variaram entre 40 e 75 %, conforme os valores encontrados nas curvas características fornecidas pelos fabricantes, e para os motores elétricos de 80 a 95 %, o que resultou em um rendimento global médio de 60 % para o conjunto motobomba.

Foi utilizado um acréscimo de potência, sendo este uma margem de segurança para o funcionamento do motor elétrico. Este acréscimo foi obtido em função do tipo de motor e da própria potência, sendo expresso por:

$$\text{Pot}_m = \text{Pot}_a + A_c \quad (14)$$

em que,

Pot_m = potência do motor com o acréscimo, cv;

Pot_a = potência absorvida, cv;

A_c = acréscimo de potência.

Os percentuais de acréscimo utilizados no estudo estão apresentados na Tabela 3, conforme Carvalho e Reis (2000).

TABELA 3 Acréscimo de potência utilizada nos motores elétricos

Potência (cv)	Acréscimo (%)
< 2	30
2 a 5	25
5 a 10	20
10 a 20	15
> 20	10

Fonte: Carvalho & Reis (2000)

Como na maioria dos casos os valores de potências encontrados não coincidem com os comerciais disponíveis no mercado, considerou-se a potência comercial o valor imediatamente superior ao calculado pela equação 14.

3.1.3.2.3 Consumo do motor elétrico

O consumo de energia elétrica dos motores elétricos durante um ano foi obtido relacionando-se a potência absorvida já calculada e o tempo de funcionamento do sistema. Adotaram-se tempos de funcionamento de 720, 1440, 1680 e 2880 e 3600 horas por ano. O consumo dos motores foi determinado por:

$$C_{ee} = Pot_a \cdot T_f \quad (15)$$

em que,

C_{ee} = consumo de energia elétrica, kWh;

Pot_a = potência absorvida, kW;

T_f = tempo de funcionamento, horas.

3.1.3.2.4 Tarifas e custo da energia

A determinação do custo da energia elétrica obedeceu aos critérios utilizados pela concessionária de energia elétrica do estado de Minas Gerais (CEMIG), a qual divide os consumidores por potência instalada em, basicamente, dois grupos. Os consumidores do grupo B, com transformadores de até 75 kVA e consumidores do grupo A, com transformadores maiores que 75 kVA.

Foi utilizada para o cálculo dos consumidores do grupo B a tarifa convencional, sendo o custo com energia dos consumidores do grupo B determinado pela seguinte equação;

$$CE = C_{ee} \cdot T_e \cdot T_f \quad (16)$$

em que,

CE = custo da energia, R\$;

C_{ee} = consumo de energia elétrica, kWh;

T_e = tarifa de energia, R\$.kWh⁻¹;

T_f = tempo de funcionamento, horas.

Para os cálculos do custo de energia dos consumidores do grupo A, onde a tarifação possui estruturas com dois componentes básicos na definição do seu preço, ou seja, o consumo de energia (kWh) e a demanda de potência (kW), utilizou-se o sistema de tarifação Horó-Sazonal. Este sistema foi utilizado visando um melhor aproveitamento dos benefícios oferecidos pela concessionária. Dentre as tarifas Horó-Sazonais, adotou-se a tarifa verde, pois esta tarifa é destinada basicamente aos consumidores de médio porte, com demanda na faixa de 50 kW a 500 kW.

Adotou-se, neste estudo, o funcionamento no período seco, quando existe a necessidade de se irrigar e fora do período de ponta, evitando as tarifas elevadas dos horários de picos de consumo de energia.

O custo da energia para os consumidores do grupo A foi determinada por:

$$CE = D_c \cdot T_d + C_{efp} \cdot T_{efp} \cdot T_f \quad (17)$$

em que,

CE = custo da energia, R\$;

D_c = demanda contratada, kW;

T_d = tarifa de demanda, R\$.kW⁻¹;

C_{efp} = consumo de energia em horário fora de ponta, kWh;

T_{efp} = tarifa de consumo em horário fora de ponta, R\$.kWh⁻¹;

T_f = tempo de funcionamento, horas.

Para o valor de demanda contrata, necessária para tarifa verde, utilizou-se o valor de demanda encontrado com a equação 18.

$$D_c = \frac{\text{Pot}_m \cdot 0,736 \text{ kW/cv}}{\eta_m} \quad (18)$$

em que,

D_c = demanda consumida pelo motor, kW;

Pot_m = potência do motor com o acréscimo, cv;

η_m = rendimento do motor, decimal.

Foi adotada uma situação de funcionamento em que o valor de demanda não ultrapassasse a demanda contratada, evitando possíveis multas aplicadas pela concessionária.

Os valores atualmente aplicados pela CEMIG para tarifa convencional (grupo B) e da tarifa verde (grupo A) utilizados nas simulações deste estudo estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 Tarifas energéticas aplicadas pela CEMIG em outubro de 2007.

Tarifa Convencional – Outubro/2007	
Grupo B2 – Rural Normal	
Consumo	Tarifa c/ ICMS (R\$) 0,335873
Tarifa Verde – Outubro/2007	
Grupo A3a – 30 Kv a 44 Kv - Rural	
Demanda	Tarifa c/ ICMS (R\$) 16,231820
Consumo Fora de Ponta – P. Seca	0,212193

Fonte: CEMIG (2007)

3.1.4 Diâmetros e velocidades econômicas

Considerou-se diâmetro econômico aquele em que, para uma mesma situação, foram mínimos os custos provenientes do bombeamento (incluindo amortização e custos variáveis) e os custos da própria tubulação (incluindo também a amortização e a manutenção).

Foram gerados valores de velocidade econômica média, divididos por faixa de vazões para tempos de funcionamento de 720, 1440, 1680, 2880 e 3600 horas e comprimentos da tubulação de 100, 200, 500, 1000 e 2000 m.

Foi possível obter, com base nas velocidades econômicas, os valores do coeficiente K da equação de Bresse. Trabalhou-se a equação original e chegou-se a uma expressão que relaciona K com a velocidade.

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V} \quad (19)$$

$$V = \frac{4}{\pi \cdot K^2} \quad (20)$$

$$K = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot V}} \quad (21)$$

em que,

D = diâmetro;

K = coeficiente;

V = velocidade.

3.1.5 Influência do custo da energia e tubulação na velocidade

Visando analisar a influência do custo da energia e da tubulação no comportamento da velocidade econômica foram simulados, com a ajuda de uma planilha eletrônica desenvolvida especificamente para este fim, algumas elevações nos custos desses parâmetros.

Para analisar a influência da energia sobre a velocidade econômica foi considerado que somente a energia apresentou variação de custo, permanecendo constantes as outras variáveis. Adotou-se como elevação da tarifa de energia valores de 10, 20, 50, 100, 150 e 200 % do valor atual.

A influência do custo da tubulação também foi feita considerando todos os parâmetros fixos, variando somente o custo da tubulação. Foram utilizados os mesmos acréscimos ao custo da tubulação que foram adotados para energia.

Foram feitas também algumas interações variando simultaneamente o custo da energia elétrica e da tubulação. Para tal empregaram-se acréscimos de 50 a 200 % do custo atual para ambos os fatores variados.

3.2 Parâmetros econômicos da irrigação

Para o estudo dos parâmetros econômicos que relacionam os diversos custos com as áreas irrigadas foram dimensionados, primeiramente, sistemas de irrigação em diferentes áreas, utilizando aspersão convencional, autopropelido e pivô central. Este dimensionamento visou obter parâmetros como a pressão no início da área, vazão, diâmetros, além de representar com maior fidelidade os custos dos sistemas. Posteriormente, foram coletados junto aos estabelecimentos comerciais os custos dos sistemas dimensionados. De posse do custo do sistema de recalque, da tubulação e do sistema de irrigação, foram feitas as interações de modo a se conhecer a influência dos parâmetros no custo total.

Para a aspersão convencional dimensionou-se diferentes áreas irrigadas, variando de 1 a 15 ha. Para isto padronizou-se uma lâmina bruta média diária de 6 mm e um sistema funcionando 8 horas por dia.

De modo a atender às condições adequadas para o funcionamento dos aspersores utilizou-se, para o dimensionamento da linha lateral, uma variação de pressão ao longo da linha lateral de no máximo de 20 % da pressão de serviço do aspersor e uma variação de vazão de no máximo 10 % da vazão nominal do aspersor, como apresentado por Bernardo et al. (2006).

As linhas laterais, secundárias e principais foram dimensionadas utilizando tubos de PVC. A Figura 5 apresenta, de forma esquemática, uma das áreas dimensionadas para este estudo. Todas as áreas foram dimensionadas de forma que os comprimentos e larguras fossem iguais. O número de linhas laterais e secundárias foi determinado de forma a otimizar o sistema de irrigação. Uma linha de espera foi utilizada nos dimensionamentos das áreas irrigadas com aspersão convencional.

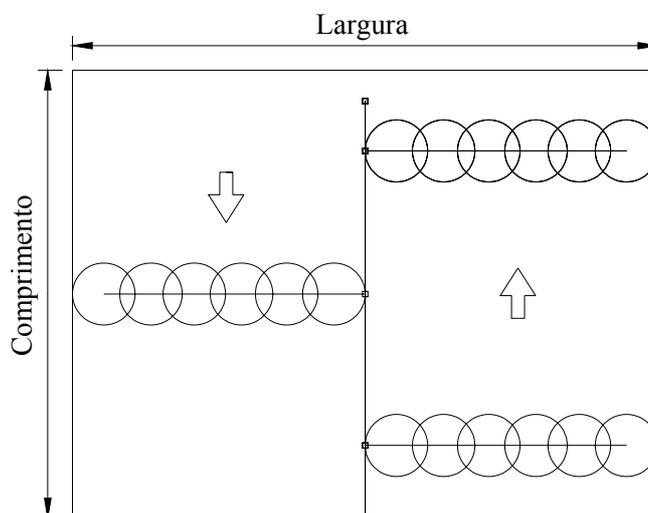


FIGURA 5 Representação esquemática de uma área com irrigação por aspersão convencional.

O dimensionamento para áreas irrigadas por autopropelido foi feito com base nos módulos pré-estabelecidos pelos fabricantes, que apresentavam áreas de 10 a 65 ha. A pressão no início da área foi obtida pela soma da perda de carga na tubulação da linha principal e nos hidrantes e a pressão necessária na entrada do autopropelido, que é proveniente do somatório da perda de carga na mangueira, pressão no bocal do aspersor, altura do aspersor sobre o solo e perdas na turbina. Na maioria dos casos os fabricantes forneceram o valor da pressão necessária na entrada do autopropelido. A Figura 6 representa, de forma esquemática, uma área irrigada com autopropelido. Da mesma forma da aspersão convencional, as áreas irrigadas com autopropelido foram dimensionadas visando à otimização do equipamento na área.

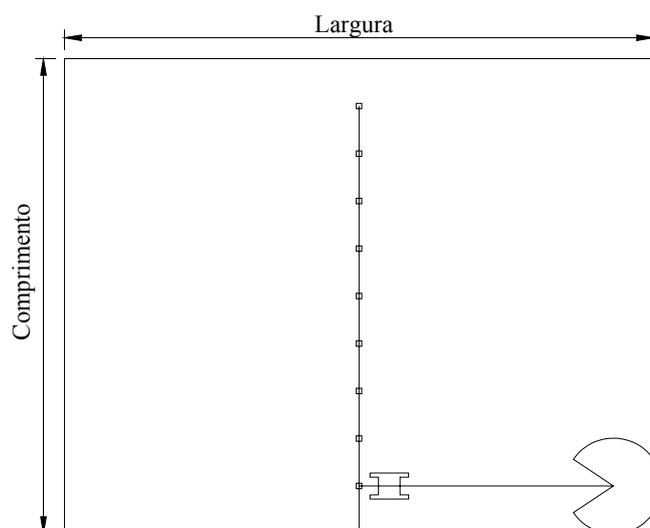


FIGURA 6 Representação esquemática de uma área com irrigação por autopropelido.

Considerou-se para o dimensionamento um sistema funcionando 16 horas por dia com uma lâmina bruta média diária de 6 mm. A tubulação da linha principal foi dimensionada como sendo de aço galvanizado.

Os pivôs centrais dimensionados para este trabalho visaram atender uma lâmina média diária de 6 mm, funcionando durante 20 horas por dia, considerando áreas entre 30 e 100 ha, o que representa bem a utilização desse sistema.

Foi considerada a pressão no início da área aquela obtida no ponto do pivô. Isto correspondeu à perda de carga na tubulação do pivô, altura dos aspersores e pressão de funcionamento dos aspersores. Foi considerado nulo o desnível entre o centro do pivô e a sua extremidade.

Na Tabela 5 estão apresentados alguns dados de dimensionamento dos pivôs centrais utilizados neste trabalho.

TABELA 5 Vazões dos pivôs dimensionados para o estudo.

Pivô	Área (ha)	Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	30	0,0257
2	47	0,0391
3	52	0,0433
4	63	0,0527
5	81	0,0677

Com base nos dados apresentados acima foi obtido, junto aos estabelecimentos comerciais, os preços de cada um dos sistemas avaliados. É importante ressaltar que o custo obtido no comércio especializado contabilizou, somente, componentes localizados dentro da área irrigada em nível, ficando de fora o conjunto motobomba e a adutora.

Os tempos de funcionamento de 8 horas por dia para aspersão convencional, 16 horas por dia para autopropelido e 20 horas por dia para pivô central foram escolhidos com base nos projetos atuais. Também, buscou-se com

essa escolha evitar a irrigação no horário em que a tarifa de energia elétrica é mais cara.

A lâmina de água empregada neste estudo foi escolhida pelo fato de representar uma lâmina média aplicada na maioria das culturas.

3.2.1 Relação entre a potência do sistema e a área irrigada

Buscou-se obter a potência necessária para se irrigar áreas utilizando aspersão convencional, autopropelido e pivô central. A potência do sistema foi obtida pela equação 13 em que a altura manométrica foi dada pelo somatório da pressão no início da área, desnível geométrico, perda de carga no recalque e na sucção.

Utilizou-se neste estudo valores de desnível geométrico variando em função da pressão no início da área. Foram adotados como valor de desnível geométrico porcentagens de 0, 50, 100 e 150 % do P_{in} para aspersão convencional e pivô central e porcentagens de 0, 15, 30 e 45 % para auto propelido.

A perda de carga no recalque também foi relacionada à pressão no início da área. Utilizou-se para aspersão convencional valores de 10 a 100 %, para o pivô central de 10 a 70 % e, para autopropelido valores, de 2 a 10 % do valor do P_{in} .

Para obtenção do valor da pressão no início da área utilizou-se os dimensionamentos já apresentados nas diversas situações de cada um dos sistemas, considerando sempre a área irrigada como sendo plana, sem qualquer diferença de nível. Com base nos valores obtidos nestes dimensionamentos foi possível gerar equações específicas para cada sistema.

Para a irrigação por aspersão a pressão no início da área foi determinada conforme a equação 22.

$$\text{Pin}_{\text{as}} = e^{\{5,87 + 0,04 \cdot [\ln(A_i)]^2\}} \quad (22)$$

$$r^2 = 0,89$$

em que,

Pin_{as} = pressão no início da área irrigada com aspersão convencional, kPa;

A_i = área irrigada, ha.

Nas áreas irrigadas com autopropelido a pressão na entrada da área foi determinada pela equação 23.

$$\text{Pin}_{\text{ap}} = e^{[6,09 + 0,24 \cdot \ln(A_i)]} \quad (23)$$

$$r^2 = 0,98$$

em que,

Pin_{ap} = pressão no início da área irrigada com autopropelido, kPa;

A_i = área irrigada, ha.

Com base nos valores encontrados no ponto do pivô correspondente a cada área irrigada foi ajustada uma equação que representasse a interação entre estas variáveis. Com os dados do dimensionamento obteve-se a equação 24.

$$\text{Pin}_{\text{pi}} = e^{[3,86 + 0,49 \cdot \ln(A_i)]} \quad (24)$$

$$r^2 = 0,99$$

em que,

$P_{in\ p_i}$ = pressão no início da área irrigada com pivô central, kPa;

A_i = área irrigada, ha.

A vazão do sistema foi obtida com base na lâmina aplicada, tempo de funcionamento e área irrigada.

$$Q = f(L_{am}, T_f, A_i) \quad (25)$$

em que,

L_{am} = lâmina média diária;

T_f = tempo de funcionamento;

A_i = área irrigada.

Os valores de vazão, variando, em função da lâmina, tempos de funcionamento e áreas irrigadas foram os mesmos utilizados durante o dimensionamento das áreas irrigadas com os três sistemas.

As vazões vieram da padronização da lâmina e tempo de funcionamento para cada sistema, como feito durante o dimensionamento das áreas para determinação da pressão no início da área.

Com a ajuda de uma planilha eletrônica confeccionada para esse fim foi possível obter a relação entre a potência necessária e a área irrigada, expressos na forma de $cv.ha^{-1}$.

Com base na equação 15 foi determinado o consumo diário do motor e este foi relacionado com a área irrigada, obtendo-se a relação entre os dois, expressa em $kWh/h.ha$.

3.2.2 Relação custo por área irrigada

Buscando analisar a influência das características locais no custo dos sistemas de irrigação, foram feitas interações entre área irrigada, desnível geométrico, comprimento e tipo de tubo da adutora, além da pressão no início da área para cada um dos sistemas de irrigação utilizados neste estudo.

Uma planilha eletrônica foi desenvolvida especialmente para o cálculo do custo total do sistema de irrigação, na qual os dados de entrada utilizados nesta planilha foram: tipo de material utilizado na adutora, a área irrigada, lâmina aplicada, tempo de funcionamento e tipo de sistema.

O diâmetro da adutora foi determinado com base nos valores de vazão e velocidade econômica encontrados na primeira etapa deste trabalho.

A altura manométrica total foi determinada pela equação 10. No sistema de irrigação por aspersão convencional, quando a altura manométrica foi menor que 120 metros utilizaram-se na adutora tubos de PVC com pressão nominal compatível, sendo estes tubos PN 80 para pressões menores que 80 metros e PN 125 para pressões entre 80 e 120 metros. Nos sistemas utilizando autopropelido e pivô central, foi utilizada tubulação de aço galvanizado.

O custo do sistema de recalque foi obtido pela equação gerada no item 3.1.1.1, tendo como base a vazão e a altura manométrica.

O custo da tubulação foi obtido com base nas equações geradas nos itens 3.1.1.2, sendo essa função do comprimento, diâmetro e tipo de material utilizado na adutora.

Para determinação do custo do sistema de irrigação, considerando somente o equipamento na área irrigada (sem conjunto motobomba e tubulação), foram ajustados modelos com os valores obtidos nos estabelecimentos comerciais a fim de obter uma equação que representasse o custo em função da área para cada um dos sistemas de irrigação analisados neste estudo.

O custo total do sistema de irrigação foi dado pelo somatório do custo do sistema de recalque, da tubulação e do sistema de irrigação (custo do equipamento considerando somente a área irrigada).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Equações para determinação dos custos

Na seqüência serão apresentadas as equações ajustadas para determinação dos custos do motor elétrico, bomba, tubulação de aço galvanizado, tubulações de PVC e sistema de recalque que foram analisados.

4.1.1 Custo do motor elétrico

Para obtenção do custo do motor elétrico foi ajustada uma equação na qual o custo está em função da potência do motor.

$$\begin{aligned}C_{ME} &= 152,37 \cdot Pot + 1149 & (26) \\r^2 &= 0,988\end{aligned}$$

em que,

C_{ME} = custo do motor elétrico, R\$;

Pot = potência comercial do motor, cv.

A Figura 7 representa a variação do custo do motor em função da sua potência.

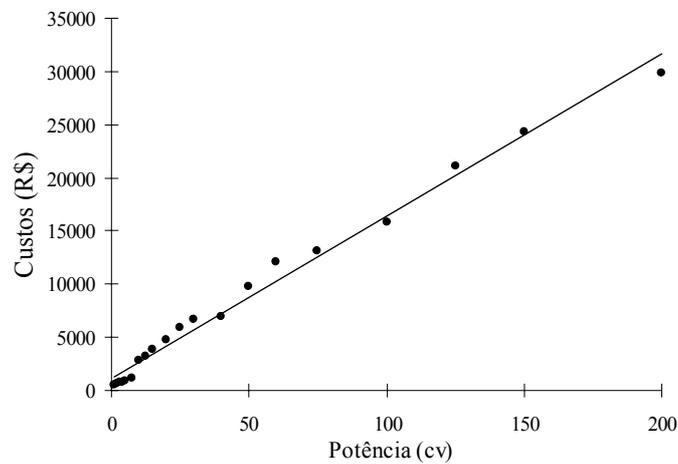


FIGURA 7 Variação do custo do motor em função da sua potência.

4.1.2 Custo da bomba

O modelo ajustado para o custo da bomba hidráulica em um sistema de recalque em função da altura manométrica e da vazão, está apresentado na equação 27.

$$C_B = e^{[7,43 + 0,008 \cdot H_{\text{man}} + 812 \cdot Q^{2,5}]} \quad (27)$$

$$r^2 = 0,969$$

em que,

C_B = custo da bomba, R\$;

H_{man} = altura manométrica, kPa;

Q = vazão, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.3 Custo da tubulação de aço galvanizado e PVC

A equação 28 apresenta o modelo ajustado que permite obter o custo da tubulação de aço galvanizado:

$$C_{\text{Tag}} = e^{[1,43 + \ln(L) + 6,10 \cdot (D)^{0,5}]} \quad (28)$$

$r^2=0,997$

em que,

C_{Tag} = custo da tubulação de aço galvanizado, R\$;

L = comprimento da tubulação, m;

D = diâmetro da tubulação, m.

Para tubulação de PVC foram obtidas duas equações: uma para pressão menor que 800 kPa (equação 29) e, outra para pressão até 1250 kPa (equação 30).

$$C_{\text{TPVC}_{80}} = e^{[-0,4563 + \ln(L) + 8,62 \cdot (D)^{0,5}]} \quad (29)$$

$r^2=0,986$

em que,

$C_{\text{TPVC}_{80}}$ = custo da tubulação de PVC PN80, R\$;

L = comprimento da tubulação, m;

D = diâmetro da tubulação, m.

$$C_{\text{TPVC125}} = e^{\left[0,238 + \ln(L) + 7,844 \cdot (D)^{0,5}\right]} \quad (30)$$

$r^2=0,997$

em que,

C_{TPVC125} = custo da tubulação de PVC PN125, R\$;

L = comprimento da tubulação, m;

D = diâmetro da tubulação, m.

4.1.4 Custo do sistema de recalque

O custo do sistema de recalque (incluindo motor, bomba, acoplamento, chaves de proteção e partida, sucção e ligação de pressão) pode ser estimado pela equação:

$$C_{\text{sr}} = e^{\left[6,62 + 0,054 \cdot H_{\text{man}}^{0,5} + 9,12 \cdot Q^{0,5}\right]} \quad (31)$$

$r^2=0,993$

em que,

C_{sr} = custo do sistema de recalque, R\$;

H_{man} = altura manométrica, m;

Q = vazão, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A Figura 8 representa o custo do sistema de recalque para diferentes combinações de vazão e pressão. Cada uma das curvas representa os pontos (Q x H_{man}) de mesmo custo. Observa-se que um mesmo custo pode representar

sistemas com maiores valores de vazão e menores de altura manométrica ou sistemas para vazões menores e maiores valores de altura manométrica.

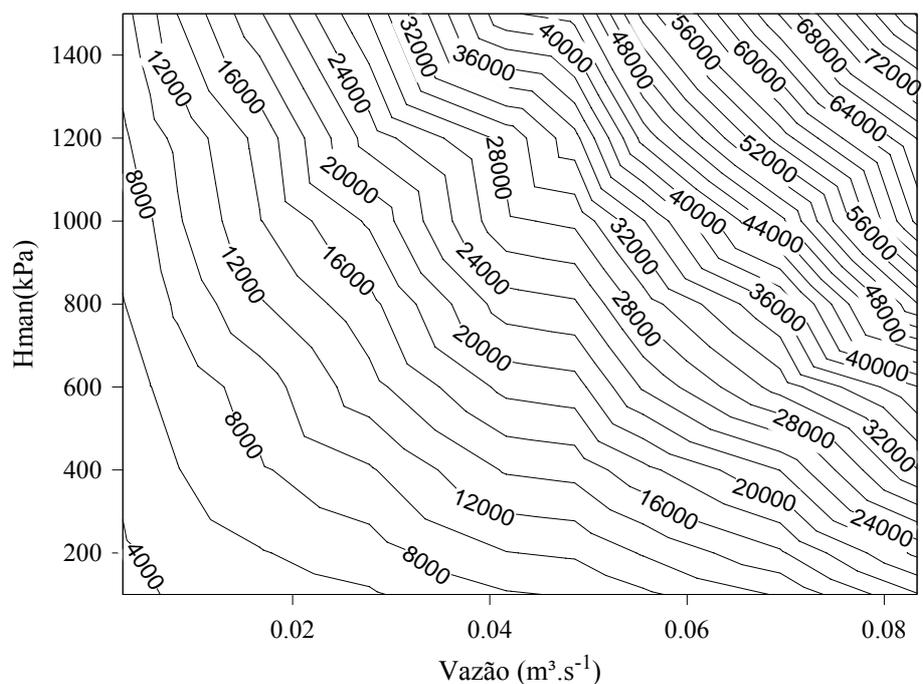


FIGURA 8. Representação do custo do sistema de recalque em função da altura manométrica e da vazão.

4.2 Dimensionamento econômico

Para cada combinação de tempo de funcionamento, vazão, altura manométrica, material e comprimento da adutora foram gerados os custos variáveis, fixos e totais, e, conseqüentemente, obtidos os diâmetros e velocidades econômicas. Na Figura 9 estão representadas as variações dos custos (variáveis, fixos e totais) em função do diâmetro da tubulação, para um sistema de recalque com tempo de funcionamento de 720 horas.ano⁻¹, vazão de

0,016 m³.s⁻¹, altura manométrica total de 550 kPa, e tubulação da adutora de aço galvanizado com 500 metros de comprimento. Para esta situação, o diâmetro econômico determinado pelo menor custo total é de 125 mm.

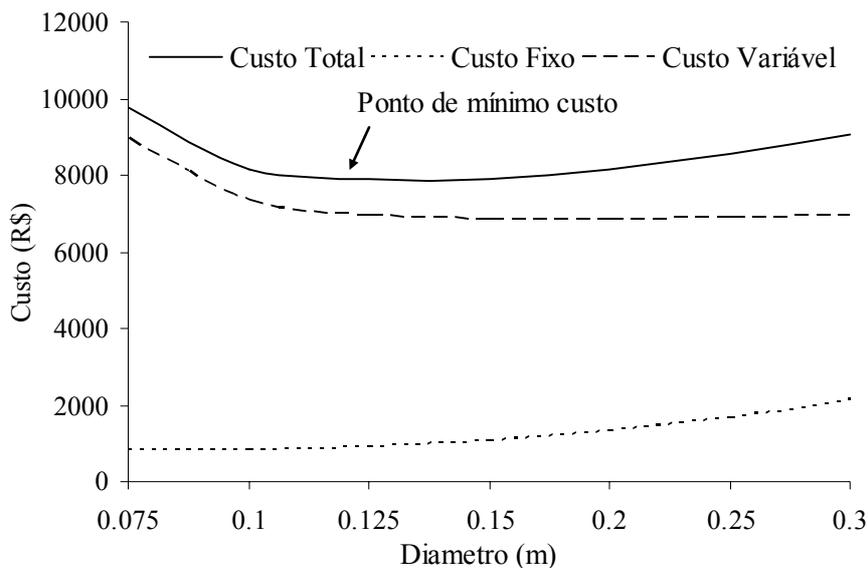


FIGURA 9 Custos fixos, variáveis e totais para um sistema de recalque com uma vazão de 0,016 m³.s⁻¹, altura manométrica de 550 kPa e tubulação de 500 m de comprimento, funcionando 720 horas.ano⁻¹.

Analisando a Figura 9, percebe-se que os custos fixos crescem à medida que o diâmetro aumenta, sendo isto explicado pelo aumento do custo das tubulações e acessórios com a elevação do diâmetro. Entretanto, com o aumento do diâmetro o custo variável tende a diminuir, tendo em vista que a velocidade também tende a diminuir com o aumento do diâmetro, reduzindo as perdas de carga e, conseqüentemente, os custos com bombeamento. O custo total apresentado na figura é o somatório dos custos fixos e variáveis, sendo que o

ponto mínimo nesta curva corresponde ao diâmetro recomendado para a situação.

Na Figura 10 estão apresentados os custos totais para cada diâmetro da tubulação, para a altura manométrica total de 50 m, o comprimento da tubulação de aço galvanizado de 500 m e o tempo de funcionamento de 720 horas por ano para vazões até $0,0277 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Analisando o gráfico da figura 10 é possível perceber que cada diâmetro possui valores de vazão que apresentam custos menores quando comparados com outros diâmetros. Sendo assim, um determinado diâmetro apresenta uma faixa de valores de vazão na qual seu uso é mais indicado.

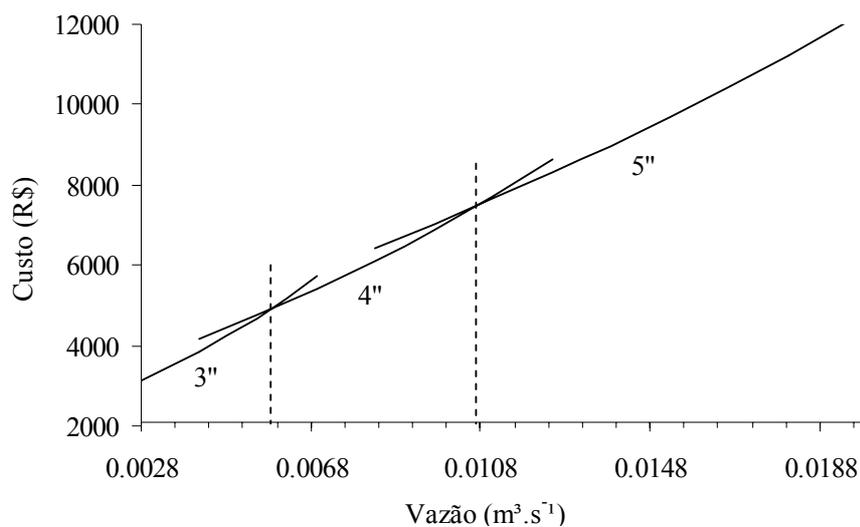


FIGURA 10 Custos totais de recalque para alguns diâmetros de tubos de aço galvanizado com 500 m de comprimento, altura manométrica de 55 metros e tempo de funcionamento de 720 horas.ano⁻¹.

Os valores de velocidade econômica e da constante K da equação de Bresse em função do comprimento da adutora, da vazão do sistema e do tempo de funcionamento estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 para tubulações de aço galvanizado e nas Tabelas 8 e 9 para PVC.

TABELA 6 Velocidade econômica para adutoras de aço galvanizado com comprimentos de 100, 500 e 1000 m e tempo de funcionamento de 1440 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	1440 horas.ano ⁻¹					
	100 m		500 m		1000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,71	1,34	0,71	1,34	0,71	1,34
0,011 – 0,022	1,07	1,09	1,07	1,09	1,26	1,01
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,28	1,00	1,28	1,00
0,033 – 0,044	1,28	1,00	1,28	1,00	1,46	0,93
0,044 – 0,055	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,45	0,94	1,39	0,96	1,48	0,93
Média	1,19	1,03	1,22	1,02	1,28	1,00

TABELA 7 Velocidade econômica para adutoras de aço galvanizado com comprimentos de 100, 500 e 1000 m e tempo de funcionamento de 2880 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	2880 horas.ano ⁻¹					
	100 m		500 m		1000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,69	1,36	0,69	1,36	0,69	1,36
0,011 – 0,022	0,89	1,20	0,89	1,20	0,89	1,20
0,022 – 0,033	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16
0,033 – 0,044	1,13	1,06	0,97	1,15	0,97	1,15
0,044 – 0,055	1,04	1,11	1,04	1,11	1,04	1,11
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,26	1,00	1,26	1,00
0,066 – 0,083	1,18	1,04	1,03	1,11	1,03	1,11
Média	1,03	1,11	0,98	1,14	0,98	1,14

TABELA 8 Velocidade econômica para adutoras de PVC com comprimentos de 100, 500 e 1000 m e tempo de funcionamento de 1440 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	1440 horas.ano ⁻¹					
	100 m		500 m		1000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40
0,011 – 0,022	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,05	1,10	1,05	1,10
0,033 – 0,044	1,2	1,03	1,20	1,03	1,46	0,93
0,044 – 0,055	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,53	0,91	1,53	0,91	1,53	0,91
Média	1,17	1,04	1,17	1,04	1,21	1,03

TABELA 9 Velocidade econômica para adutoras de PVC com comprimentos de 100, 500 e 1000 m e tempo de funcionamento de 2880 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	2880 horas.ano ⁻¹					
	100 m		500 m		1000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43
0,011 – 0,022	0,8	1,26	0,80	1,26	0,80	1,26
0,022 – 0,033	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16
0,033 – 0,044	1,13	1,06	1,13	1,06	1,39	0,96
0,044 – 0,055	1,04	1,11	1,04	1,11	1,14	1,06
0,055 – 0,066	1,26	1,01	1,26	1,01	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,32	0,98	1,27	1,00	1,32	0,98
Média	1,02	1,12	1,01	1,12	1,08	1,08

Os valores de velocidades médias encontrados entre as diversas situações analisadas variaram entre 0,67 e 1,63 m.s⁻¹ para tubulações de aço galvanizado e entre 0,62 e 1,97 m.s⁻¹ para tubulações de PVC, sendo estes valores diferentes dos apresentados nas diversas literaturas existentes, que

consideram velocidades de até $2,6 \text{ m.s}^{-1}$, como apresentado por Azevedo Neto et al. (2002) e Bernardo et al. (2006).

As oscilações (descontinuidade da tendência de variação) observadas para os valores de velocidade econômica nas Tabelas 6 a 9 é devido à progressiva alteração do diâmetro à medida que se muda a vazão.

De forma geral, para todas as situações analisadas, observa-se que o valor da velocidade econômica é crescente com a vazão. Este comportamento é decorrente da influência do custo da tubulação, pois, para o escoamento de maiores vazões há a necessidade do emprego de tubulações com maiores diâmetros, as quais possuem custos muito maiores. O resultado disso é que diâmetros menores serão mais econômicos, e, conseqüentemente, também serão maiores os valores de velocidade.

Analisando-se um mesmo tipo de material da tubulação e tempo de funcionamento, observa-se que o comprimento da tubulação não apresentou influência sobre o valor final da velocidade econômica, ou seja, esta praticamente permaneceu inalterada, independentemente do comprimento da adutora. A variação do comprimento da adutora reflete diretamente nos custos (fixos e variáveis), ou seja, quanto maior o comprimento maior o custo fixo, e também, maiores os custos variáveis (maior perda de carga e conseqüentemente maior consumo). Assim, o aumento dos custos fixos, no presente estudo, é equilibrado com aumento dos custos variáveis, redundando na permanência do mesmo diâmetro econômico, independentemente dos valores de comprimento analisados.

Considerando um mesmo tipo de material da tubulação observa-se, entre as Tabelas 6 e 7 para aço galvanizado, e 8 e 9 para PVC, que a velocidade econômica varia de forma inversa ao tempo de funcionamento, ou seja, à medida que se aumenta o tempo de funcionamento, a velocidade média econômica tende a diminuir. Maior tempo de funcionamento representa maior gasto com energia

e, conseqüentemente, maior custo variável, fazendo com que o diâmetro econômico seja maior e o valor da velocidade menor.

Maiores valores de gasto com energia elétrica acarretam em elevação dos custos totais do sistema, provenientes do aumento dos custos variáveis, sendo preciso reduzir a potência necessária ao funcionamento do sistema a qual só pode ser proveniente de uma redução da altura manométrica. Visto que a perda de carga na adutora é uma componente influente no valor da altura manométrica, a sua redução proporciona uma redução na potência necessária ao funcionamento do sistema. Esta redução da perda de carga é conseguida com a utilização de diâmetros maiores, que por sua vez apresentam menores velocidades para uma mesma vazão.

Comparando-se os valores de velocidade econômica entre adutoras de PVC e aço galvanizado, percebe-se que as tubulações de PVC apresentam velocidades econômicas ligeiramente maiores em relação ao aço galvanizado; isto é explicado pela menor perda de carga nos tubos de PVC, o que permite a utilização de velocidades maiores. Pelo fato do custo unitário de um tubo de PVC de mesmo diâmetro de um tubo de aço galvanizado ser menor, a influência da adutora no custo total do sistema é menor em adutoras que utilizam PVC. Isto implica também em alteração na velocidade considerada econômica.

Os atuais valores de velocidade econômica, apresentados neste trabalho, estão abaixo daqueles normalmente indicados na literatura (dimensionamento utilizando velocidades até $2,5 \text{ m.s}^{-1}$) e, também, daqueles utilizados em muitos projetos técnicos. Azevedo (2003) utilizou em seu trabalho dados de projetos implantados, cuja velocidade média usada para o dimensionamento foi de $1,85 \text{ m.s}^{-1}$, muito acima, portanto, da média de $1,1 \text{ m.s}^{-1}$ e, também, acima da máxima de $1,63 \text{ m.s}^{-1}$ obtida neste estudo. Um dos projetos utilizados no referido trabalho do autor apresentava uma vazão de $187,90 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ utilizando uma tubulação de 175 mm na adutora de 1686 metros de comprimento, o que

corresponde a uma velocidade de $2,16 \text{ m.s}^{-1}$. Porém, quando compara essa situação com os dados obtidos neste trabalho percebe-se que a velocidade mais econômica deveria ser menor que $1,13 \text{ m.s}^{-1}$.

Lima (2006), avaliando um sistema de irrigação por pivô central, encontrou uma baixa eficiência deste, cuja velocidade de escoamento na adutora chegava a $2,26 \text{ m.s}^{-1}$. A otimização deste sistema, com intuito de reduzir o consumo de energia, resultou em uma adutora cuja velocidade não ultrapassava a velocidade de $1,57 \text{ m.s}^{-1}$, valor similar ao encontrado neste trabalho para mesma condição.

Em seu trabalho, Folegatti et al. (1998) avaliou um pivô central de grande vazão e, de acordo com os dados apresentados pelo autor, o dimensionamento da adutora foi feito com uma velocidade de $2,77 \text{ m.s}^{-1}$. Maiores velocidades de escoamento representam o emprego de menores diâmetros, com diminuição do investimento inicial na aquisição da adutora, ou seja, com custo inicial menor. Considerando-se os atuais valores de velocidade econômica, o custo variável do referido sistema (especialmente com relação à energia) será maior, ou seja, o custo total do sistema poderia ser menor caso uma menor velocidade de escoamento fosse adotada para o dimensionamento da adutora.

O aumento da velocidade visa a utilização de tubulações com diâmetros menores, o que acarreta em custos iniciais menores para o irrigante, facilitando a comercialização dos equipamentos. De forma geral, em muitos dimensionamentos de sistemas de recalque têm sido adotadas maiores valores de velocidades, se comparados aos obtidos no atual trabalho, redundando em um maior gasto com energia. Entretanto, a redução dos gastos com investimentos iniciais não reflete em um custo menor do sistema como um todo, uma vez que existe a necessidade de analisar todos os custos que estão envolvidos em um projeto de irrigação (custos fixos e variáveis). Isto é confirmado por Favetta

(1998) que avaliou o dimensionamento de diversos equipamentos do tipo pivô central e concluiu que, já naquele ano, 77,5 % dos sistemas teriam um custo anual total inferior se utilizassem um diâmetro diferente do original. Os resultados aqui obtidos mostram que no dimensionamento de adutoras, tanto em sistemas de irrigação quanto para abastecimento de água, a utilização de velocidades econômicas pode determinar a viabilidade econômica do investimento.

4.3 Variações da velocidade com o custo da energia e da tubulação

As Figuras 11 e 12 apresentam as variações percentuais dos valores das velocidades econômicas em função do aumento da energia elétrica, considerando tubulações de 100 e 2000 metros de comprimento de aço galvanizado e PVC, respectivamente, funcionando 2880 horas.ano⁻¹.

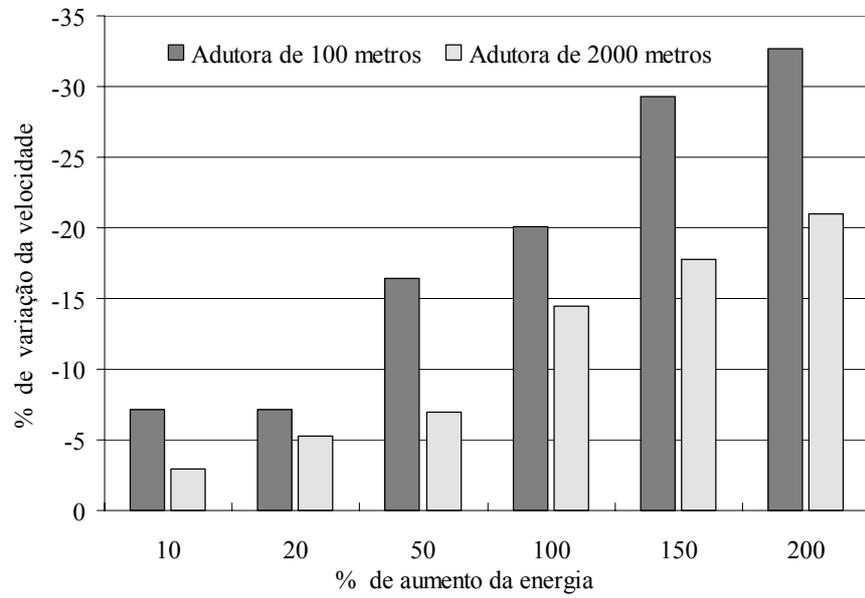


FIGURA 11 Influência do aumento da tarifa energética sobre a velocidade econômica para o aço galvanizado.

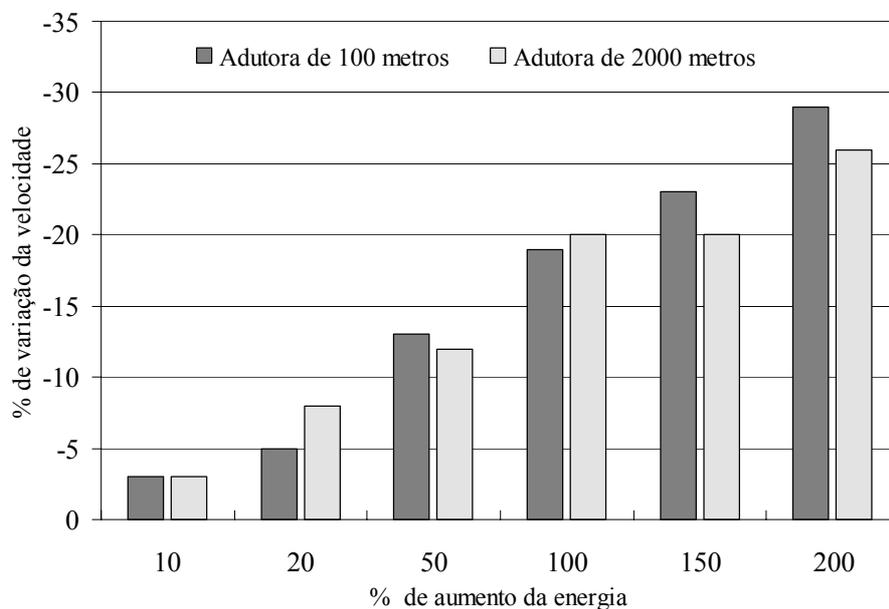


FIGURA 12 Influência do aumento da tarifa energética sobre a velocidade econômica para PVC.

Com base nas Figuras 11 e 12 foi possível perceber que, de modo geral, o aumento do custo da energia elétrica provocou uma redução no valor da velocidade econômica.

Para tubulações de aço galvanizado, a velocidade econômica mostrou ser mais sensível ao aumento da energia quando a adutora é de pequena extensão (100 m). Nestas, o valor inicial de investimento com a aquisição da tubulação tem menor peso no custo total do sistema, assim, o aumento da energia tem maior impacto nos custos finais, resultando em diâmetro econômico maior e velocidade menor. O contrário acontece para adutoras maiores, ou seja, para o comprimento analisado de 2000 metros, devido à grande extensão da adutora, os custos iniciais de investimento são grandes e, uma variação do diâmetro teria um impacto significativo nos custos totais, em comparação a uma adutora de menor

comprimento. Embora um aumento de energia resulte em uma variação negativa da velocidade de escoamento, esta não é tão acentuada quanto aquela observada para o comprimento de 100 m.

Comparando as Figuras 11 e 12, observa-se que quando a adutora possui maior extensão (2000 m) a variação da velocidade econômica, em função do aumento da energia, é menor para tubulações de aço galvanizado. O tubo de aço possui um custo maior que o PVC, constituindo em um valor inicial de investimento superior, assim, a energia terá menor impacto no custo total. Este comportamento é semelhante àquele verificado quando foram comparadas adutoras de mesmo material, porém, de diferentes comprimentos.

Já, quando o comprimento da adutora é menor (100 m), os custos iniciais com investimento são menores, representando, portanto, um menor percentual do custo total do sistema; neste caso, o aumento da energia apresenta maior impacto no valor final dos custos, resultando em uma maior variação da velocidade econômica para tubulações de aço, as quais, por serem mais rugosas, proporcionam maiores valores de perda de carga para uma mesma extensão da adutora em relação ao PVC.

Nas Figuras 13 e 14 estão apresentadas as variações da velocidade econômica em função do aumento do custo da tubulação, para tubulações de 100 e 2000 m, para aço galvanizado e PVC, respectivamente, funcionando 2880 horas.ano⁻¹.

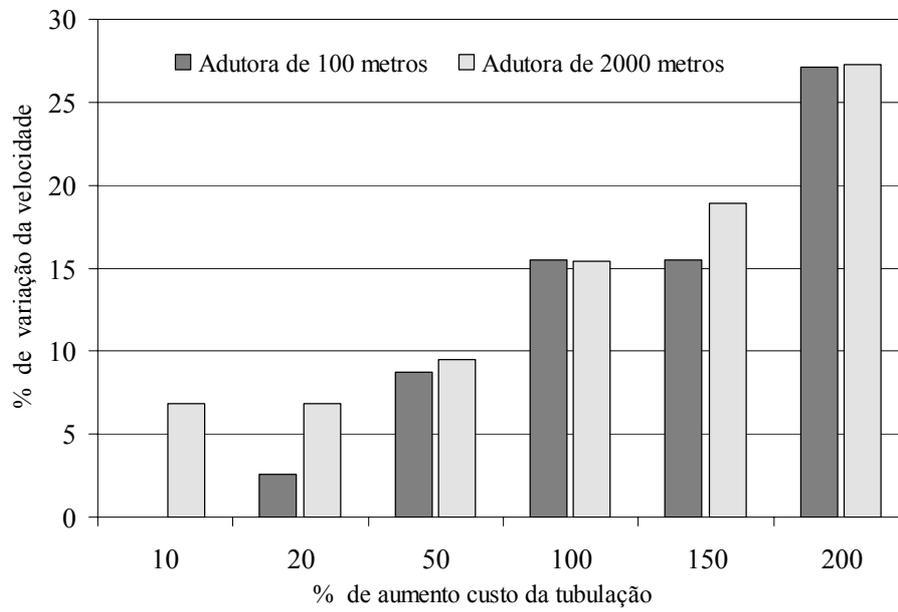


FIGURA 13 Influência do aumento do custo da tubulação sobre a velocidade econômica para aço galvanizado.

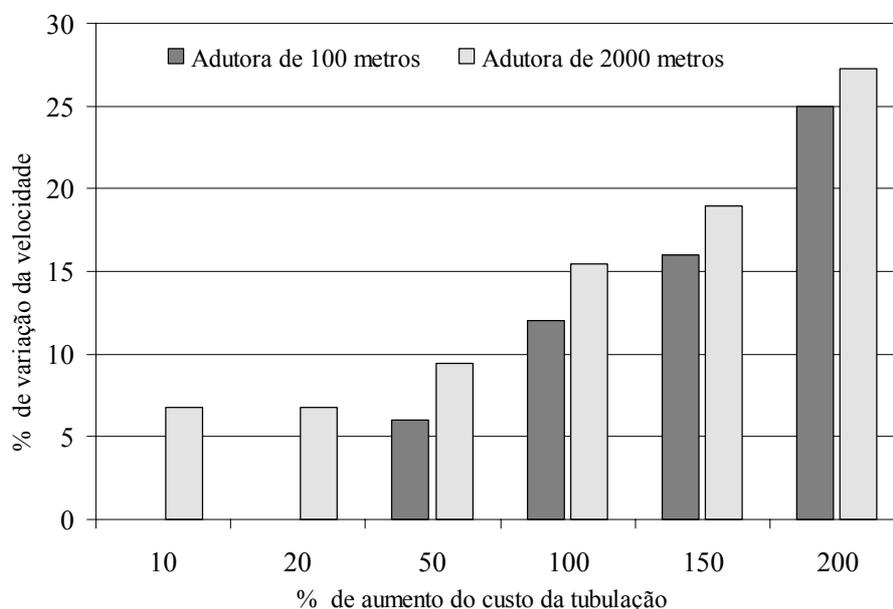


FIGURA 14 Influência do aumento do custo da tubulação sobre a velocidade econômica para PVC.

Independentemente do material da tubulação, há um aumento da velocidade econômica com o custo da tubulação. O aumento da tubulação representa um aumento dos custos fixos e, também, uma maior participação na composição dos custos finais. Assim, o diâmetro econômico tende a ser menor (menor diâmetro menor custo) com conseqüente aumento da velocidade de escoamento.

Comparando as figuras entre si, observa-se que para adutora de maior extensão (2000 m) a magnitude do aumento da velocidade foi semelhante para o aço e PVC. Quando se utiliza uma adutora menor (100 m) o aumento da velocidade econômica foi ligeiramente superior para adutora de aço; o custo da

tubulação de aço galvanizado é superior para o PVC, considerando um mesmo diâmetro.

Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as variações da velocidade econômica de escoamento em função do aumento concomitante da energia elétrica e da tubulação, considerando adutoras de 100 e 2000 m, para aço galvanizado e PVC, respectivamente, funcionando 2880 horas.ano⁻¹.

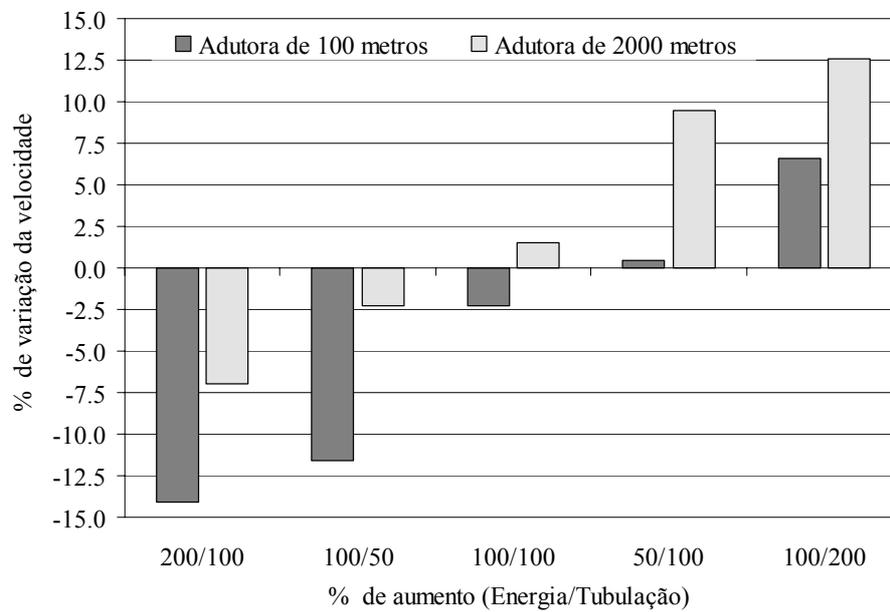


FIGURA 15 Variação da velocidade econômica em função do aumento dos custos da tubulação e da energia, em adutoras de 100 e 2000 metros de aço galvanizado, com tempo de funcionamento de 2880 horas.ano⁻¹.

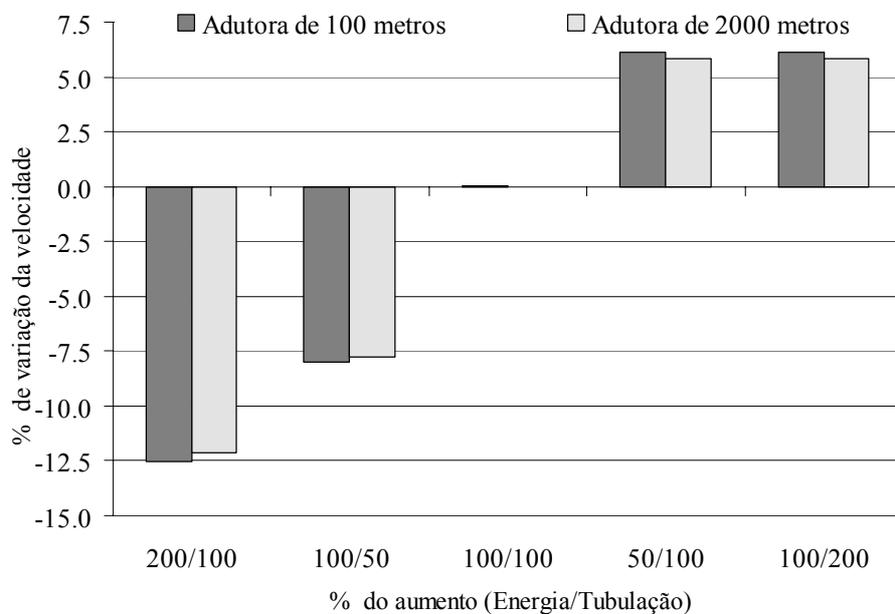


FIGURA 16 Variação da velocidade econômica em função do aumento dos custos da tubulação e da energia, em adutoras de 100 e 2000 metros de PVC, com tempo de funcionamento de 2880 horas.ano⁻¹.

Analisando-se as figuras pode-se perceber que quando o custo da energia elétrica aumenta mais que o custo da tubulação, a velocidade tende a diminuir e pode aumentar quando a tubulação apresentar custos maiores.

As variações da velocidade econômica, para adutoras de PVC com 100 e 2000 m, não apresentaram diferenças acentuadas entre si, independentemente da variação da relação de custos energia/tubulação. Já para aço galvanizado a variação foi grande. Os maiores custos de investimento na aquisição dos tubos de aço e, também, de perda de carga, conferem uma maior sensibilidade às variações de custos da energia e da tubulação.

Considerando apenas tubulações de aço galvanizado (Figura 15) observa-se uma diminuição mais acentuada da velocidade para adutoras menores, quando o aumento do custo de energia é maior que o verificado para tubulação. Já, quando o aumento da tubulação é maior que a energia há uma tendência de aumento da velocidade econômica, ou seja, há uma tendência de menores diâmetros econômicos.

Nos últimos 10 anos o custo da energia elétrica aumentou 360 % em média, enquanto o custo da tubulação sofreu um aumento de 200 %. Esse comportamento de preços reforça os resultados deste trabalho, o qual apresenta velocidades econômicas menores que aquelas encontradas em literaturas e/ou utilizadas em dimensionamentos de sistemas de recalque. Com o crescente aumento da demanda de energia no País, há uma tendência do preço da energia continuar crescendo, o que, baseado nos resultados e discussões anteriores, permite prever, então, uma tendência de redução da velocidade econômica. Isto ressalta a necessidade de se atualizar, constantemente, custos e determinar diâmetros que sejam mais econômicos para utilização em adutoras em sistemas de recalque.

4.4 Parâmetros econômicos

4.4.1 Relação entre a potência demandada e a área irrigada

A relação entre a potência demandada e a área irrigada, em função do desnível geométrico e do comprimento da adutora, está apresentada nas Tabelas 10, 11 e 12 para aspersão convencional, autopropelido e pivô central, respectivamente.

TABELA 10 Relação entre a potência necessária em cv e a área irrigada com aspersão convencional funcionando 8 horas por dia aplicando uma lâmina diária de 6 mm.

Área	Hf (% Pin)				
	Hg (% Pin)	10	30	50	70
1 ha Pin = 360 kPa	0	2,04	2,40	2,77	3,13
	50	2,95	3,31	3,68	4,05
	100	3,86	4,23	4,59	4,96
	150	4,78	5,14	5,51	5,87
5 ha Pin = 370 kPa	0	2,25	2,66	3,07	3,47
	50	3,27	3,67	4,08	4,48
	100	4,28	4,69	5,09	5,50
	150	5,29	5,70	6,11	6,51
10 ha Pin = 460 kPa	0	2,51	2,96	3,41	3,87
	50	3,64	4,09	4,54	4,99
	100	4,77	5,22	5,67	6,12
	150	5,90	6,35	6,80	7,25
15 ha Pin = 470 kPa	0	2,72	3,21	3,70	4,19
	50	3,95	4,44	4,93	5,42
	100	5,17	5,66	6,15	6,64
	150	6,40	6,89	7,38	7,87

TABELA 11 Relação entre a potência necessária em cv e a área irrigada com autopropelido funcionando 16 horas por dia aplicando uma lâmina diária de 6 mm.

Área	hf (% Pin)					
	Hg (% Pin)	2	4	6	8	10
10 ha Pin = 7400 kPa	0	1,96	2,00	2,04	2,08	2,12
	15	2,25	2,29	2,33	2,37	2,41
	30	2,54	2,58	2,62	2,65	2,69
	45	2,83	2,86	2,90	2,94	2,98
20 ha Pin = 920 kPa	0	2,30	2,35	2,39	2,44	2,48
	15	2,64	2,68	2,73	2,77	2,82
	30	2,98	3,02	3,07	3,11	3,16
	45	3,31	3,36	3,40	3,45	3,49
40 ha Pin = 1040 kPa	0	2,70	2,75	2,80	2,86	2,91
	15	3,09	3,15	3,20	3,25	3,30
	30	3,49	3,54	3,59	3,65	3,70
	45	-	-	-	-	-
55 ha Pin = 1150 kPa	0	2,90	2,96	3,02	3,07	3,13
	15	3,33	3,38	3,44	3,50	3,55
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-
65 ha Pin=1190 kPa	0	3,02	3,07	3,13	3,19	3,25
	15	3,46	3,52	3,57	3,63	3,69
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-

TABELA 12 Relação entre a potência necessária em cv e a área irrigada com pivô central funcionando 20 horas por dia aplicando uma lâmina diária de 6 mm.

Área	Hf (% Pin)				
	Hg (% Pin)	10	30	50	70
30 ha Pin = 250 kPa	0	0,52	0,61	0,70	0,79
	50	0,75	0,84	0,93	1,03
	100	0,98	1,07	1,16	1,26
	150	1,21	1,30	1,39	1,49
50 ha Pin = 320 kPa	0	0,66	0,78	0,90	1,02
	50	0,96	1,08	1,20	1,31
	100	1,26	1,37	1,49	1,61
	150	1,55	1,67	1,79	1,91
80 ha Pin = 400 kPa	0	0,83	0,98	1,13	1,28
	50	1,20	1,35	1,50	1,65
	100	1,58	1,73	1,88	2,03
	150	1,95	2,10	2,25	2,40
100 ha Pin = 450 kPa	0	0,93	1,09	1,26	1,43
	50	1,34	1,51	1,68	1,84
	100	1,76	1,93	2,09	2,26
	150	2,18	2,34	2,51	2,68

Com base nos resultados obtidos nesta análise foram geradas as equações 32, 33 e 34 para obtenção da potência necessária por área irrigada em função da área e da altura manométrica. Estas equações são válidas para uma lâmina aplicada de 6 mm, durante os tempos específicos adotados para cada sistema de irrigação.

Com a equação 32 é possível obter a potência necessária por área irrigada utilizando aspersão convencional funcionando 8 horas por dia.

$$CV/ha_{asp} = -0,0016A_i + 0,0050 \cdot H_{man} + 0,1375 \quad (32)$$

$$r^2 = 0,982$$

em que:

A_i = área irrigada, ha;

H_{man} = altura manométrica, kPa.

A equação 33 permite obter a relação $CV \cdot ha^{-1}$ para áreas irrigadas com autopropelido funcionando 16 horas por dia.

$$CV/ha_{ap} = 0,0004 A_i + 0,0024 H_{man} + 0,183 \quad (33)$$

$$r^2 = 0,985$$

em que:

A_i = área irrigada, ha;

H_{man} = altura manométrica, kPa.

A potência necessária por hectare por área irrigada com pivô central funcionando 20 horas por dia pode ser obtida com a equação 34.

$$CV/ha_{piv} = 0,005 \cdot \ln(A_i) + 0,002 \cdot H_{man} - 0,010 \quad (34)$$

$$r^2 = 0,998$$

em que:

A_i = área irrigada, ha;

H_{man} = altura manométrica, kPa.

De forma geral, a potência unitária ($\text{CV}\cdot\text{ha}^{-1}$) é crescente com o desnível geométrico, comprimento da adutora e, também, com o tamanho da área. O aumento do desnível acarreta em uma maior altura manométrica; uma maior extensão da adutora redundando em uma perda de carga maior e, conseqüentemente, maior altura manométrica; uma maior área irrigada requer uma maior pressão no início da área (P_{in}), refletindo, também, no aumento da altura manométrica e, finalmente, aumento da potência demandada.

Entre todos os sistemas analisados, o pivô central é o que apresenta menor relação $\text{cv} \times \text{área}$ irrigada, pois, normalmente este sistema utiliza-se de aspersores de baixa pressão ou sprays, resultando em um baixo valor da pressão na base do pivô ou entrada da área (P_{in}), especialmente considerando o tamanho da área irrigada.

A maior demanda de potência unitária por área irrigada foi obtida para o sistema de aspersão convencional. Comparando os valores de potência, apresentados pelos sistemas de aspersão convencional e autopropelido, considerando uma mesma situação de trabalho como, por exemplo, uma área de 10 ha com desnível zero e perda de carga igual a 10 % do P_{in} , encontra-se 2,51 $\text{cv}\cdot\text{ha}^{-1}$ para aspersão convencional contra 2,12 $\text{cv}\cdot\text{ha}^{-1}$ para o autopropelido. É importante lembrar que os tempos de funcionamento são diferentes para cada sistema. No caso da aspersão, o tempo é a metade daquele adotado para o autopropelido, o que implica em uma vazão duas vezes maior. Isto resulta em uma relação potência \times área maior, embora a pressão no início da área seja maior para o autopropelido. Se considerasse um mesmo tempo de funcionamento e lâmina de aplicação, certamente, o autopropelido apresentaria maior demanda de potência. Entretanto, na prática, estes sistemas, devido às suas características, são, normalmente, indicados para tempos diferentes, como aqueles utilizados no presente trabalho.

Com base nos valores apresentados nas Tabelas 10 a 12 é possível saber a potência necessária para irrigar uma área sob determinada condição. Supondo uma irrigação utilizando pivô central, para uma área de 50 ha, com um desnível geométrico total de 50 % da pressão na entrada da área e a perda de carga na adutora correspondente a 30 % da mesma pressão, encontra-se, através do quadro, uma potência necessária de 1,1 cv por hectare, o que equivale a uma potência absorvida total de 55 cv para irrigar a área. Esta situação é equivalente a uma área de 50 ha irrigada com pivô central, onde o desnível total é de 25 metros e a perda de carga na adutora de 150 kPa.

Tomando como exemplo uma irrigação por aspersão para uma área de 1 ha, onde a pressão no início da área equivale a 362,6 kPa, e outra área de 15 ha, onde a pressão no início da área é de 467,6 kPa percebeu-se que, mesmo quando estas foram submetidas a uma mesma condição, o valor da potência necessária por área foi diferente. Para a área de um 1 ha foi necessário 4 cv.ha^{-1} e para área de 15 hectares foi necessário $5,4 \text{ cv.ha}^{-1}$.

Com base na potência necessária e no tempo de funcionamento para cada sistema de irrigação, foi determinado o consumo de energia elétrica, em função da área irrigada, desnível e perda de carga (Tabelas 13, 14 e 15).

TABELA 13 Consumo diário de energia elétrica em kWh.dia⁻¹ para o sistema de irrigação por aspersão convencional para aplicação de uma lâmina de 6 mm com 8 horas de funcionamento, em função da área irrigada, desnível geométrico e perda de carga no sistema de recalque.

Área	Hf (%Pin)				
	Hg (% Pin)	10	30	50	70
1 ha Pin = 360 kPa	0	16	19	22	25
	50	24	27	29	32
	100	31	34	37	40
	150	38	41	44	47
5 ha Pin = 370 kPa	0	18	21	25	28
	50	26	29	33	36
	100	34	37	41	44
	150	42	46	49	52
10 ha Pin = 460 kPa	0	20	24	27	31
	50	29	33	36	40
	100	38	42	45	49
	150	47	51	54	58
150 kPa Pin = 470 kPa	0	22	26	30	34
	50	32	35	39	43
	100	41	45	49	53
	150	51	55	59	63

TABELA 14 Consumo diário de energia elétrica em kWh.dia⁻¹ para o sistema de irrigação autopropelido para aplicação de uma lâmina de 6 mm com 16 horas de funcionamento, em função da área irrigada, desnível geométrico e perda de carga no sistema de recalque.

Área	Hf (% Pin)					
	Hg (% Pin)	2	4	6	8	10
10 ha Pin = 740 kPa	0	31	32	33	33	34
	15	36	37	37	38	38
	30	41	41	42	42	43
	45	45	46	46	47	48
20 ha Pin = 920 kPa	0	37	38	38	39	40
	15	42	43	44	44	45
	30	48	48	49	50	50
	45	53	54	54	55	56
40 ha Pin = 1040 kPa	0	43	44	45	46	47
	15	49	50	51	52	53
	30	56	57	57	58	59
	45	-	-	-	-	-
55 ha Pin = 1150 kPa	0	46	47	48	49	50
	15	53	54	55	56	57
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-
65 ha Pin = 1190 kPa	0	48	49	50	51	52
	15	55	56	57	58	59
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-

TABELA 15 Consumo diário de energia elétrica em kWh.dia⁻¹ para o sistema de irrigação por aspersão convencional para aplicação de uma lâmina de 6 mm com 20 horas de funcionamento, em função da área irrigada, desnível geométrico e perda de carga no sistema de recalque.

Área	Hf (% Pin)				
	Hg (% Pin)	10	30	50	70
30 ha Pin = 250 kPa	0	10	12	14	16
	50	15	17	19	21
	100	20	21	23	25
	150	24	26	28	30
50 ha Pin = 320 kPa	0	13	16	18	20
	50	19	22	24	26
	100	25	27	30	32
	150	31	33	36	38
80 ha Pin = 40 kPa	0	17	20	23	26
	50	24	27	30	33
	100	32	35	38	41
	150	39	42	45	48
100 ha Pin = 450 kPa	0	19	22	25	29
	50	27	30	34	37
	100	35	39	42	45
	150	44	47	50	54

Como a energia é determinada pela potência necessária e o tempo de funcionamento do sistema, foi observado o mesmo comportamento da potência necessária no eixo para cada hectare, ou seja, crescente com o desnível, perda de carga ou comprimento da adutora e com a área irrigada.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 13 a 15, percebe-se que não é possível apresentar um valor médio de potência necessária por área irrigada para os projetos de irrigação considerando somente a área a ser irrigada. Os resultados deste trabalho contrastam com Proni (1987), que relaciona a potência do conjunto motobomba somente com o tamanho da área irrigada e apresenta um valor médio de potência de 2,37 cv.ha⁻¹.

Em termos de consumo energético, o sistema de irrigação autopropelido aparece em primeiro lugar, na frente, inclusive, do sistema de aspersão convencional o qual apresentou maior demanda de potência unitária. O tempo de funcionamento passou a ser determinante, resultando em maior consumo de irrigação para o autopropelido. O sistema pivô central, embora trabalhe durante uma jornada maior (20 horas para este estudo), apresentou um menor consumo unitário ($\text{kWh}\cdot\text{ha}^{-1}$) devido ao baixo valor da potência demandada por área irrigada.

De forma a exemplificar a utilização dos resultados obtidos foi feita a simulação de uma área cultivada com feijão de inverno e irrigada por pivô central, na qual buscou-se determinar o consumo total de energia elétrica durante todo o ciclo da cultura. A área irrigada analisada foi de 50 ha, com um desnível total de 30 metros em relação à fonte de captação localizada a 1000 metros de distância. Considerando-se que a adutora utilizada foi dimensionada de forma econômica, o diâmetro utilizado para a vazão de $0,0416 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ foi de 250mm, conforme os resultados de dimensionamento econômico apresentados neste trabalho. Com base na vazão, no comprimento e diâmetro da adutora foi possível encontrar a perda de carga da mesma utilizando a equação de Hazen-Williams, de 33 kPa. A condição de funcionamento apresentada pode ser encontrada na Tabela 15, na qual o desnível de 30 metros é, aproximadamente, igual a 100 % do valor da P_{in} e a perda na adutora representa 10 % da P_{in} , sendo necessária uma potência absorvida de $0,96 \text{ cv}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tabela 12) ou 48 cv para irrigar toda a área. Com esta condição de funcionamento o consumo de energia elétrica por cada hectare irrigado é de $25 \text{ kWh}\cdot\text{dia}^{-1}$, o que equivale a $1250 \text{ kWh}\cdot\text{dia}^{-1}$ para irrigar toda a área. Considerando um ciclo médio para a cultura de 90 dias, existindo a necessidade de irrigar durante 80 dias, o consumo de energia seria de 100 MWh. Como a potência do sistema enquadra-se no grupo B de consumo não existe a cobrança de demanda, sendo o custo total com energia elétrica

representado somente pelo consumo (R\$ 0,3359 por kWh consumido, segundo tarifa da CEMIG). Então o custo da energia elétrica para um ciclo de cultivo do feijão de inverno será de aproximadamente R\$ 33.590,00.

4.4.2 Custo do sistema de irrigação

Para determinação do custo do sistema de irrigação foram geradas equações com base nos custos levantados junto aos estabelecimentos comerciais. Estes custos referem-se somente aos equipamentos de irrigação instalados dentro da área considerada. Desta forma, não estão considerados aqui os custos com adutora e sistema de recalque.

A equação 35 apresenta o custo de um sistema de irrigação por aspersão convencional.

$$C_{iasp} = e^{[7,31 + \ln(A_i) \cdot 0,89]} \quad (35)$$

$r^2=0,999$

em que,

C_{iasp} = custo da área irrigada com aspersão convencional, R\$;

A_i = área irrigada, ha.

A Tabela 16 mostra o custo unitário (R\$.ha⁻¹) estimado para as áreas de 1, 5, 10 e 15 ha para sistema de irrigação por aspersão convencional.

TABELA 16 Custo unitário (R\$.ha⁻¹) para sistema de irrigação por aspersão convencional em função da área irrigada.

Área irrigada (ha)	Custo unitário (R\$.ha ⁻¹)
1	1495
5	1253
10	1161
15	1110

A equação 36 apresenta o custo de um autopropelido.

$$C_{iap} = e^{[8,78 + \ln(A_i) \cdot 0,56]} \quad (36)$$

$$r^2=0,972$$

em que,

C_{iap} = custo da área irrigada com autopropelido, R\$;

A_i = área irrigada, ha.

A Tabela 17 mostra o custo unitário (R\$.ha⁻¹) estimado para áreas de 10, 20, 40, 55 e 65 ha do sistema de irrigação autopropelido.

TABELA 17. Custo unitário (R\$.ha⁻¹) para sistema de irrigação por autopropelido em função da área irrigada.

Área irrigada (ha)	Custo unitário (R\$.ha ⁻¹)
10	2361
20	1740
40	1283
55	1115
65	1036

O custo do equipamento de uma área irrigada com pivô central pode ser estimado através da equação abaixo.

$$C_{\text{ipivo}} = e^{[12,07 + A_i \cdot 0,0045]} \quad (37)$$

$r^2=0,96$

em que,

C_{ipivo} = custo da área irrigada com pivô central, R\$;

A_i = área irrigada, ha.

A Tabela 18 mostra o custo unitário (R\$.ha⁻¹) estimado para sistemas de irrigação por pivô central para áreas de 30, 50, 80 e 100 ha.

TABELA 18 Custo unitário (R\$.ha⁻¹) para sistema de irrigação por pivô central convencional em função da área irrigada.

Área irrigada (ha)	Custo unitário (R\$.ha ⁻¹)
30	6660
50	4372
80	3127
100	2738

Analisando os custos unitários dos sistemas de irrigação (Tabelas 16 a 18) observa-se um menor custo, considerando uma mesma área, para o sistema de irrigação por aspersão convencional, seguido pelo autopropelido e, por último, o pivô central. O sistema de irrigação por aspersão convencional é um sistema mais simples, constituído, basicamente, de tubulações, principal e lateral, aspersores e alguns acessórios. O autopropelido é um sistema mais complexo, pois, além da tubulação principal contendo os hidrantes, é constituído de mangueira, carretel enrolador, sistema/equipamento de deslocamento com canhão hidráulico. Daí os custos deste serem mais altos que da aspersão convencional, mesmo considerando um tempo de funcionamento de 16 horas

para o autopropelido contra 8 horas para aspersão convencional. O pivô central é o sistema que apresentou maior custo unitário, independentemente da situação analisada, por ser composto de uma estrutura mecânica móvel o que justifica custos unitários maiores.

4.4.3 Custos totais dos sistemas de irrigação

Os custos totais por área irrigada para os sistemas de irrigação por aspersão analisados, para diferentes condições de funcionamento, estão apresentados nas Tabelas 19, 21 e 23. A Tabela 19 apresenta o custo unitário total por hectare de um sistema de irrigação por aspersão convencional para diferentes áreas.

TABELA 19 Custo por hectare, em R\$, para o sistema de irrigação por aspersão convencional em função da área, desnível e comprimento da adutora.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora (m)				
		100	200	500	1000	2000
1 ha Pin = 360 kPa	0	5.173	5.863	7.935	11.389	18.297
	50	5.974	6.665	8.739	12.196	19.111
	100	6.807	7.499	9.576	13.039	28.291
	150	8.103	9.213	12.542	18.093	29.196
5 ha Pin = 370 kPa	0	2.719	3.080	4.163	5.967	9.575
	50	3.019	3.380	4.463	6.268	9.879
	100	3.334	3.696	5.644	8.314	13.656
	150	3.843	4.377	5.981	8.653	13.998
10 ha Pin = 460 kPa	0	2.262	2.500	3.216	4.408	6.794
	50	2.511	2.750	3.466	4.660	7.049
	100	2.880	3.224	4.256	5.976	9.417
	150	3.166	3.510	4.543	6.266	9.712
15 ha Pin = 470 kPa	0	2.125	2.330	2.944	3.968	6.016
	50	2.370	2.575	3.190	4.216	7.932
	100	2.716	3.005	3.871	5.315	8.205
	150	3.001	3.291	-	-	-

O custo unitário é crescente com o tamanho da adutora, devido à incorporação dos custos de aquisição desta e, também, com o desnível, devido à necessidade de sistema motobomba de maior potência. Entretanto, considerando uma mesma situação de desnível e comprimento da adutora, o custo unitário é decrescente com a área irrigada, ou seja, apresenta o mesmo comportamento do custo do equipamento de irrigação (Tabela 16), embora no custo total unitário estejam incluídos os custos com adutora e sistema de recalque. É importante ressaltar que um aumento de área não significa aumento proporcional dos custos totais do sistema.

O custo unitário total do sistema de irrigação apresenta diferentes valores conforme a combinação das características locais, tais como área, comprimento da adutora e desnível. Assim, uma área de mesmo tamanho pode apresentar diversos custos de implantação do sistema de irrigação, o que, dependendo da situação, inviabiliza a irrigação. A Tabela 20 apresenta a participação (percentual) dos custos do equipamento de irrigação nos custos totais.

TABELA 20 Participação percentual do custo do equipamento de irrigação por aspersão convencional em relação ao custo total do sistema.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora (m)				
		100	200	500	1000	2000
1 ha Pin = 360 kPa	0	28,90	25,50	18,84	13,13	8,17
	50	25,03	22,43	17,11	12,26	7,82
	100	21,96	19,94	15,61	11,47	5,28
	150	18,45	16,23	11,92	8,26	5,12
5 ha Pin = 370 kPa	0	46,08	40,68	30,10	21,00	13,09
	50	41,50	37,07	28,08	19,99	12,68
	100	37,58	33,90	22,20	15,07	9,18
	150	32,60	28,63	20,95	14,48	8,95
10 ha Pin = 460 kPa	0	51,33	46,44	36,10	26,34	17,09
	50	46,24	42,22	33,50	24,91	16,47
	100	40,31	36,01	27,28	19,43	12,33
	150	36,67	33,08	25,56	18,53	11,95
15 ha Pin = 470 kPa	0	52,24	47,64	37,70	27,97	18,45
	50	46,84	43,11	33,74	26,33	13,99
	100	40,87	36,94	28,67	20,88	13,53
	150	36,99	33,73			

Observa-se na Tabela 20 que os custos com equipamentos de irrigação representam um valor cada vez menor, à medida que aumentam o desnível e o comprimento da adutora. Esta variação é mais significativa com relação ao comprimento da adutora que, além de seu custo de aquisição, representa, também, um aumento da perda de carga, exigindo, conseqüentemente, um sistema de recalque de maior capacidade e custo mais elevado. Assim, como exemplo, para uma área de 10 ha com adutora de 100 m e um desnível igual à pressão no início da área, a participação percentual do custo total é de, 40,31 % se este mesmo sistema for localizado a uma distância maior como, por exemplo, 2000 m de adutora, o custo do sistema passa a representar apenas 12,33 % do custo total.

Analisando uma irrigação por aspersão convencional, para áreas de 1 e 15 hectares, considerando as mesmas características de desnível e comprimento da adutora como, por exemplo, desnível igual a zero e comprimento de adutora de 100 metros, o custo dos equipamentos de irrigação representam 28,9 % do custo total para a área de 1 hectare e, para uma área de 15 hectares, o custo do sistema representa 52,24 % do custo total.

A Tabela 21 apresenta o custo total unitário para implantação de sistema de irrigação autopropelido, em função da área irrigada, desnível geométrico e comprimento da adutora.

TABELA 21 Custo por hectare, em R\$, para irrigação com o sistema autopropelido em função da área, desnível e comprimento da adutora.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora (m)				
		100	200	500	1000	2000
10 ha Pin = 740 kPa	0	3.632	4.079	5.419	7.653	12.120
	15	3.725	4.171	5.512	7.746	12.214
	30	3.821	4.267	5.608	7.843	12.312
	45	3.920	4.367	5.708	7.943	12.414
20 ha Pin = 920 kPa	0	2.654	2.883	4.034	5.644	8.863
	15	2.738	2.967	4.118	5.728	8.948
	30	2.825	3.055	4.206	5.816	9.037
	45	2.917	3.147	4.298	5.908	9.130
40 ha Pin = 1040 kPa	0	2.179	2.402	3071	4.185	6.413
	15	2.269	2.492	3.160	4.275	6.505
	30	2.363	2.586	3.255	4.371	6.601
	45	-	-	-	-	-
55 ha Pin = 1150 kPa	0	2.000	2.164	2.656	3.477	5.120
	15	2.099	2.264	2.757	3.579	5.224
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-
65 ha Pin = 1190 kPa	0	1.983	2.167	2.719	3.639	5.479
	15	2.091	2.275	2.827	3.748	5.589
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-

Os resultados apresentados na Tabela 21 para os custos totais de implantação do sistema autopropelido apresentam o mesmo comportamento do sistema convencional, ou seja, o custo total unitário é decrescente com a área irrigada e é proporcional ao desnível geométrico e comprimento da adutora. Esta última, também aqui, exerce maior influência na variação do custo total, ou seja, um aumento da adutora tem um impacto maior nos custos devido ao aumento direto nos custos (aquisição de tubulação) e, também, pelo maior gasto com energia de bombeamento (aumento da altura manométrica). O aumento do desnível, embora cause uma alteração significativa dos custos, o impacto é somente no aumento da altura manométrica.

O comportamento apresentado na irrigação por aspersão convencional onde o custo.ha⁻¹ reduz com o aumento da área também é encontrado nas áreas simuladas para irrigação com autopropelido, explicado também pelo fato dos custos totais dos equipamentos ficarem distribuídos por toda área irrigada.

A Tabela 22 apresenta a participação (percentual) dos custos do equipamento autopropelido nos custos totais da irrigação.

TABELA 22 Participação percentual do custo do equipamento de irrigação autopropelido em relação ao custo total do sistema.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora (m)				
		100	200	500	1000	2000
10 ha Pin = 740 kPa	0	65,01	57,88	43,57	30,85	19,48
	15	63,38	56,61	42,83	30,48	19,33
	30	61,79	55,33	42,10	30,10	19,18
	45	60,23	54,06	41,36	29,72	19,02
20 ha Pin = 920 kPa	0	65,56	60,35	43,13	30,83	19,63
	15	63,55	58,65	42,25	30,38	19,45
	30	61,59	56,96	41,37	29,92	19,25
	45	59,65	55,29	40,48	29,45	19,06
40 ha Pin = 1040 kPa	0	58,88	53,41	41,78	30,66	20,01
	15	56,54	51,48	40,60	30,01	19,72
	30	54,30	49,61	39,42	29,35	19,44
	45					
55 ha Pin = 1150 kPa	0	55,75	51,52	41,98	32,07	21,78
	15	53,12	49,25	40,44	31,15	21,34
	30					
	45					
65 ha Pin = 1190 kPa	0	52,24	47,81	38,10	28,47	18,91
	15	49,55	45,54	36,65	27,64	18,54
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-

Também para o sistema de irrigação autopropelido a participação percentual do custo de aquisição do equipamento em relação ao custo total varia de forma inversamente proporcional ao desnível e ao comprimento da adutora. Esta última exerce maior variação na composição de custos, pela mesma razão já discutida anteriormente. Entretanto, como o sistema de irrigação autopropelido tem maior custo de aquisição do que um sistema de irrigação convencional, a participação percentual é maior, mesmo para situações extremas analisadas. Tomando-se como exemplo uma área de 10 ha e adutoras de 100 a 2000 m, com desnível zero, o custo do equipamento autopropelido representa um percentual

de 65 a 19% do custo total, enquanto que, para o sistema de irrigação convencional este valor representa de 51 a 17%.

Um estudo semelhante foi feito para irrigações com pivô central, onde o custo por hectare está apresentado na Tabela 23.

TABELA 23 Custo por hectare, em R\$, para irrigação com pivô central em função da área, desnível e comprimento da adutora.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora		
		500	1000	2000
30 ha Pin = 250 kPa	0	7.982	9.057	11.207
	50	8.034	9.109	11.259
	100	8.086	9.161	11.312
	150	8.140	9.215	11.367
50 ha Pin = 320 kPa	0	5.515	6.405	8.185
	50	5.576	6.466	8.246
	100	5.639	6.529	8.310
	150	5.705	6.595	8.377
80 ha Pin = 400 kPa	0	4.164	4.909	6.400
	50	4.244	4.989	6.481
	100	4.328	5.074	6.567
	150	4.419	5.165	6.659
100 ha Pin = 450 kPa	0	-	4.619	6.175
	50	-	4.715	6.271
	100	-	4.818	6.374
	150	-	4.928	6.486

O custo por hectare de um sistema de irrigação do tipo pivô central também tem a característica, como dos outros sistemas, de redução do custo com o aumento da área irrigada para um mesmo comprimento de adutora. Quando o comprimento da adutora aumenta, para uma mesma área, o custo.ha⁻¹ do pivô central também tende a aumentar.

Diferentemente dos outros sistemas de irrigação, quando o desnível aumentou, proporcionalmente ao comprimento da adutora, não se verificou grandes variações no custo do sistema pivô central. Isto pode ser explicado pelo

elevado custo do sistema e da tubulação quando comparados com o custo do conjunto motobomba.

A Tabela 24 apresenta a participação (percentual) dos custos do equipamento pivô central nos custos totais da irrigação.

TABELA 24 Participação percentual do custo do equipamento de irrigação pivô central em relação ao custo total do sistema

Área	Hg (% Pin)	Comprimento da adutora		
		500	1000	2000
30 ha Pin = 250 kPa	0	83,44	73,53	59,43
	50	82,90	73,11	59,15
	100	93,99	72,70	58,88
	150	81,82	72,27	58,59
50 ha Pin = 320 kPa	0	79,27	68,26	53,41
	50	78,41	67,62	53,02
	100	77,53	66,96	52,61
	150	76,63	66,29	52,19
80 ha Pin = 400 kPa	0	75,10	63,70	48,86
	50	73,68	62,68	48,25
	100	72,25	61,63	47,62
	150	70,76	60,54	46,96
100 ha Pin = 450 kPa	0	-	59,28	44,34
	50	-	58,07	43,66
	100	-	56,83	42,96
	150	-	55,56	42,21

À medida que o sistema apresenta um maior custo de aquisição, como é o caso do pivô central em relação ao sistema de aspersão convencional e autopropelido, maior é o percentual de participação na composição dos custos totais. Mesmo em situações extremas de desníveis acentuados e adutoras extensas, o equipamento pivô central exerce grande peso no custo total do sistema. Neste caso, o custo da adutora e sistema de recalque tem um peso menor. Estes parâmetros indicam que o sistema pivô central tem menor variação no custo final de implantação em função das variações do desnível e do

comprimento da adutora, especialmente quando comparados aos sistemas de aspersão convencional e autopropelido.

Com base nos resultados apresentados para as áreas irrigadas com os diferentes sistemas de irrigação, percebeu-se que o custo por hectare dos sistemas tende a diminuir à medida que se aumenta a área irrigada. Constatou-se que é incorreto indicar um único valor de custo por hectare irrigado de cada sistema como representativo do custo do sistema, tendo em vista que o mesmo varia muito com a área irrigada e as condições desta.

Não seria correta qualquer informação generalizada da porcentagem do custo do sistema de recalque, tubulação ou do sistema de irrigação no custo total, tendo em vista que esta porcentagem varia à medida que se alteram as condições locais. Tendo como exemplo a análise de uma irrigação para uma área de um hectare, com desnível geométrico de aproximadamente 36 metros utilizando aspersão convencional, é possível perceber que para uma adutora de 100 metros o custo do sistema representa 20 % do total, enquanto que a adutora e o sistema de recalque 80 % do custo total. Entretanto quando a adutora é de 1000 metros, estes percentuais são 10 % para o custo do sistema e 90 % para a tubulação e sistema de recalque.

5 CONCLUSÕES

- Quando se aumenta o diâmetro da tubulação os custos fixos tendem a aumentar, enquanto os custos variáveis tendem a diminuir;
- para tubulação de aço galvanizado a velocidade econômica varia entre 0,67 m.s⁻¹ e 1,63 m.s⁻¹ e para PVC varia entre 0,62 e 1,97 m.s⁻¹;
- com o aumento do tempo de funcionamento do sistema a velocidade econômica tende a diminuir;
- o aumento do custo da energia elétrica provoca uma redução na velocidade econômica, enquanto uma elevação no custo da tubulação provoca um aumento da velocidade econômica;
- quando o custo da energia aumenta mais que o custo da tubulação a velocidade econômica tende a diminuir;
- quando o custo da tubulação aumenta mais que o custo da energia a velocidade tende a aumentar;
- nas irrigações com aspersão convencional e autopropelido o desnível geométrico promove maior influência no custo por área irrigada do que o comprimento da adutora quando estes aumentam com a mesma proporção;
- para irrigações com pivô central a influência do desnível geométrico no custo por área irrigada não é tão evidente quanto nos outros sistemas analisados;
- não é possível afirmar que exista um preço médio dos sistemas por área irrigada, pois estes variam muito com a área;
- a influência dos componentes (recalque, adutora e equipamento) no custo total de um sistema varia com as condições locais do sistema.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas de fornecimento de energia elétrica**. Brasília: 2005. (Cadernos Temáticos ANEEL).

AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. 2003. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDES, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: E. Blücher, 2002. 669p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, 1996. 150p.

CARVALHO, J. A.; BRAGA JÚNIOR, R. A.; REIS, J. B. R. S.; Análise de custos na escolha do tipo de motor para acionamento de bombas em áreas irrigadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, n.2, p.434-440, abr./jun. 2000.

CARVALHO, J. A.; REIS, J. B. R. S. Avaliação dos custos de energia de bombeamento e determinação do diâmetro econômico da tubulação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, n.2, p.411-449, abr./jun. 2000.

COIADO, E.M.; RAVELLI JÚNIOR, A. Influência da evolução do custo da energia elétrica no diâmetro econômico de uma instalação de recalque de água de abastecimento. **Revista Brasileira de Engenharia**. Caderno de Recursos Hídricos, v.11, n.2, p.27-48, dez. 1993.

DRUMOND, L. C. D.; FERNANDES, A. L. T. **Irrigação por aspersão em malha**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2001. 84p.

FAVETTA, G. M. **Estudo econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. 1998. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

FAVETTA, G. M. **Estudo econômico do sistema de adução em equipamentos de irrigação do tipo pivô central**. 1998. 110p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

FOLEGATTI, M.V.; PESSOA, P.C.S.; PAZ, V.P.S. Avaliação do desempenho de um Pivô Central de Grande Porte e Baixa Pressão. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 55, n. 1, 1998 .

GILLEY, J.R.; SUPALLA, R.J. Economic analysis of energy saving practices in irrigation. **Transaction of the ASAE**, v.26, n.6, p.1784-1792, 1983.

HOFFMANN, R.; ENGLER, J.J.C.; SERRANO, O.; THAME, A.C.M.; NEVES, E.M. **Administração da empresa agrícola**. 5.ed. São Paulo: Pioneira, 1987. 325p.

LIMA, A. C.; GUIMARAES JR, S. C.; CAMACHO, J. R.; SALERNO, C. H. Desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliação de pivôs centrais de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa . **Anais...** João Pessoa, PB: SBEA, 2006. CD Rom.

MAGALHÃES, C. A. C.; MORENO, J.; SILVA, A. J. L. Programa computacional para o dimensionamento econômico de sistemas de adução de água por recalque. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.8, n.3, p.120-125, 2002.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 318p.

MELO, J.F. **Custos da irrigação por aspersão em Minas Gerais**. 1993. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA FILHO, D.; CAMPANA, S.; SOARES, A.A. Estudo do comportamento de parâmetros elétricos e hidráulicos em sistema de irrigação tipo pivô central utilizando inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000100017&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 01 ago. 2007.

OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; RIBEIRO, M. C. Racionalização energética de uma estação de pressurização de um perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.135-143, 2004.

OLIVEIRA FILHO, D.; FERENC, C. H. R.; TEIXEIRA, C. A.; DIAS, G. P.; MILAGRES, R. C.; PONTES, C. R. Uso de motores monofásicos acoplados mecanicamente em série, em irrigação por pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.139-144. 2004.

PAULINO, W. D.; PEREIRA, P. M. Dimensionamento Econômico de tubulações de recalque. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., 1986, Brasília. **Anais...** Brasília: ABID, 1986. v.3, p.777-796.

PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO. **Tempo de irrigar**: manual do irrigante. São Paulo: Mater, Fundação Victor Civita. 1987. 160 p.

ROBAINA, A. D. Seleção de bombas para irrigação. **Lavoura Arrozeira**, v.50, n.432, p.12-16, 1997.

RODRIGUES, L. N. **Modelo para dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por pivô central**. 140p. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, MG.

SCALOPPI, E. J. Exigências da energia para irrigação. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, n. 21, p. 13-17, 1985.

ZOCOLER, J. L. **Modelo para dimensionamento econômico de sistemas de recalque em projetos hidroagrícolas**. 1998. 107p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP..

ANEXOS

ANEXO A. Velocidades econômicas para tubulações de aço galvanizado e PVC, divididas em faixas de vazões para diferentes tempos de funcionamento e comprimento de adutora.

TABELA 1A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de aço galvanizado funcionando 720 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,93	1,17	0,93	1,17	0,85	1,22	0,85	1,22	0,85	1,22
0,011 – 0,022	1,36	0,97	1,36	0,97	1,27	1,00	1,27	1,00	1,27	1,00
0,022 – 0,033	1,54	0,91	1,54	0,91	1,41	0,95	1,54	0,91	1,54	0,91
0,033 – 0,044	1,28	1,00	1,28	1,00	1,28	1,00	1,28	1,00	1,28	1,00
0,044 – 0,055	1,63	0,88	1,63	0,88	1,52	0,91	1,63	0,88	1,63	0,88
0,055 – 0,066	1,86	0,83	1,86	0,83	1,37	0,96	1,60	0,89	1,60	0,89
0,066 – 0,083	1,45	0,94	1,45	0,94	1,48	0,93	1,48	0,93	1,53	0,91
Média	1,44	0,94	1,44	0,94	1,31	0,98	1,38	0,96	1,39	0,96

TABELA 2A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de aço galvanizado funcionando 1440 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,71	1,34	0,71	1,34	0,71	1,34	0,71	1,34	0,71	1,34
0,011 – 0,022	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,26	1,01	1,35	0,97
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,05	1,10	1,28	1,00	1,28	1,00	1,16	1,05
0,033 – 0,044	1,28	1,00	1,28	1,00	1,28	1,00	1,46	0,93	1,44	0,94
0,044 – 0,055	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,33	0,98
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96	1,50	0,92
0,066 – 0,083	1,45	0,94	1,45	0,94	1,39	0,96	1,48	0,93	1,48	0,93
Média	1,19	1,03	1,19	1,03	1,22	1,02	1,28	1,00	1,28	1,00

TABELA 3A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de aço galvanizado funcionando 1680 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,71	1,34	0,71	1,34	0,72	1,33	0,72	1,33	0,72	1,33
0,011 – 0,022	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	0,98	1,14	1,07	1,09
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,05	1,10	0,94	1,16	0,94	1,16	1,05	1,10
0,033 – 0,044	1,20	1,03	1,20	1,03	1,20	1,03	1,20	1,03	1,20	1,03
0,044 – 0,055	1,23	1,02	1,23	1,02	1,14	1,06	1,13	1,06	1,23	1,02
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,37	0,96	1,26	1,00	1,26	1,00	1,26	1,01
0,066 – 0,083	1,45	0,94	1,45	0,94	1,42	0,95	1,37	0,96	1,37	0,97
Média	1,15	1,05	1,15	1,05	1,11	1,07	1,09	1,08	1,13	1,06

TABELA 4A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de aço galvanizado funcionando 2880 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,69	1,36	0,69	1,36	0,69	1,36	0,69	1,36	0,67	1,38
0,011 – 0,022	0,89	1,20	0,89	1,20	0,89	1,20	0,89	1,20	0,98	1,14
0,022 – 0,033	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16	1,05	1,10
0,033 – 0,044	1,13	1,06	1,13	1,06	0,97	1,15	0,97	1,15	1,12	1,07
0,044 – 0,055	1,04	1,11	1,04	1,11	1,04	1,11	1,04	1,11	1,13	1,06
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,20	1,03	1,26	1,00	1,26	1,00	1,26	1,00
0,066 – 0,083	1,18	1,04	1,18	1,04	1,03	1,11	1,03	1,11	1,03	1,11
Média	1,03	1,11	1,01	1,12	0,98	1,14	0,98	1,14	1,04	1,11

TABELA 5A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Breser para tubos de aço galvanizado funcionando 3600 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40
0,011 – 0,022	0,89	1,20	0,89	1,20	0,89	1,20	1,08	1,09	1,26	1,01
0,022 – 0,033	0,88	1,20	0,88	1,20	0,88	1,20	0,99	1,13	0,99	1,13
0,033 – 0,044	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15
0,044 – 0,055	0,99	1,13	0,99	1,13	1,14	1,05	1,14	1,05	1,14	1,05
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,20	1,03	1,26	1,00	1,37	0,96	1,31	0,99
0,066 – 0,083	1,03	1,11	1,03	1,11	1,03	1,11	1,07	1,09	1,11	1,07
Média	0,97	1,15	0,94	1,16	0,97	1,14	1,04	1,11	1,06	1,10

TABELA 6A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de PVC funcionando 720 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,84	1,23	0,84	1,23	0,84	1,23	0,84	1,23	0,77	1,29
0,011 – 0,022	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09
0,022 – 0,033	1,54	0,91	1,54	0,91	1,41	0,95	1,54	0,91	1,54	0,91
0,033 – 0,044	1,28	1,00	1,28	1,00	1,28	1,00	1,46	0,93	1,28	1,00
0,044 – 0,055	1,52	0,92	1,52	0,92	1,63	0,88	1,52	0,92	1,63	0,88
0,055 – 0,066	1,86	0,83	1,86	0,83	1,85	0,83	1,85	0,83	1,97	0,80
0,066 – 0,083	1,71	0,86	1,71	0,86	1,54	0,91	1,62	0,89	1,53	0,91
Média	1,40	0,98	1,40	0,95	1,37	0,96	1,41	0,95	1,40	0,95

TABELA 7A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de PVC funcionando 1440 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40
0,011 – 0,022	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,05	1,10	1,05	1,10	1,05	1,10	1,16	1,05
0,033 – 0,044	1,2	1,03	1,2	1,03	1,20	1,03	1,46	0,93	1,36	0,97
0,044 – 0,055	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,53	0,91
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,26	1,01	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,53	0,91	1,53	0,91	1,53	0,91	1,53	0,91	1,53	0,91
Média	1,17	1,04	1,16	1,05	1,17	1,04	1,21	1,03	1,23	1,02

TABELA 8A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de PVC funcionando 1680 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40	0,65	1,40
0,011 – 0,022	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14	0,98	1,14	1,17	1,04
0,022 – 0,033	1,05	1,10	1,05	1,10	1,05	1,10	1,05	1,10	1,16	1,05
0,033 – 0,044	1,2	1,03	1,2	1,03	1,20	1,03	1,46	0,93	1,36	0,97
0,044 – 0,055	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,43	0,94	1,33	0,98
0,055 – 0,066	1,37	0,96	1,26	1,01	1,37	0,96	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,53	0,91	1,53	0,91	1,48	0,93	1,53	0,91	1,53	0,91
Média	1,17	1,07	1,16	1,05	1,17	1,05	1,21	1,03	1,22	1,02

TABELA 9A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de PVC funcionando 2880 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43
0,011 – 0,022	0,8	1,26	0,8	1,26	0,80	1,26	0,80	1,26	0,99	1,13
0,022 – 0,033	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16	0,94	1,16	1,05	1,10
0,033 – 0,044	1,13	1,06	1,13	1,06	1,13	1,06	1,39	0,96	1,36	0,97
0,044 – 0,055	1,04	1,11	1,04	1,11	1,04	1,11	1,14	1,06	1,14	1,06
0,055 – 0,066	1,26	1,01	1,2	1,03	1,26	1,01	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,32	0,98	1,32	0,98	1,27	1,00	1,32	0,98	1,32	0,98
Média	1,02	1,12	1,01	1,12	1,01	1,12	1,08	1,08	1,12	1,07

TABELA 10A. Velocidade econômica e coeficiente da equação de Bresse para tubos de PVC funcionando 3600 horas por ano.

Q (m ³ .s ⁻¹)	Comprimento da adutora									
	100 m		200 m		500 m		1000 m		2000 m	
	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K	V(m.s ⁻¹)	K
< 0,011	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43	0,62	1,43
0,011 – 0,022	0,73	1,32	0,73	1,32	0,73	1,32	0,73	1,32	0,92	1,18
0,022 – 0,033	0,88	1,20	0,88	1,20	0,88	1,20	0,88	1,20	0,99	1,13
0,033 – 0,044	0,97	1,15	0,97	1,15	0,97	1,15	1,23	1,02	1,19	1,03
0,044 – 0,055	0,99	1,13	0,99	1,13	0,99	1,13	1,14	1,06	1,14	1,06
0,055 – 0,066	1,26	1,01	1,2	1,03	1,26	1,01	1,37	0,96	1,37	0,96
0,066 – 0,083	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09
Média	0,93	1,17	0,92	1,17	0,93	1,17	1,01	1,13	1,04	1,10

ANEXO B. Custos totais dos sistemas de irrigação em função do desnível geométrico, área irrigada e comprimento da adutora.

TABELA 1B. Custo total, em R\$, do sistema de irrigação por aspersão convencional em função da área irrigada, desnível geométrico e comprimento da adutora.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento adutora				
		100	200	500	1000	2000
1 ha Pin = 360 kPa	0	5.173	5.863	7.935	11.389	18.297
	50	5.974	6.665	8.739	12.196	19.111
	100	6.807	7.499	9.576	13.039	28.291
	150	8.103	9.213	12.542	18.093	29.196
5 ha Pin = 370 kPa	0	13.596	15.400	20.813	29.834	47.876
	50	15.096	16.901	22.316	31.341	49.394
	100	16.671	18.478	28.218	41.571	68.279
	150	19.214	21.887	29.903	43.265	69.992
10 ha Pin = 460 kPa	0	22.619	25.004	32.159	44.084	67.940
	50	25.108	27.496	34.660	46.602	70.493
	100	28.804	32.243	42.562	59.762	94.170
	150	31.655	35.100	45.434	62.660	97.123
15 h Pin = 470 kPa	0	31.874	34.945	44.158	59.515	90.238
	50	35.546	38.623	47.853	63.239	11.8974
	100	40.739	45.071	58.066	79.728	12.3068
	150	45.022	49.362	62.384*	84.090*	127.521*

*utilizou-se adutora de aço galvanizado devido à elevada altura manométrica

TABELA 2B. Custo total, em R\$, do sistema de irrigação por autopropelido em função da área irrigada, desnível geométrico e comprimento da adutora.

Área	Hg (% Pin)	Comprimento adutora				
		100	200	500	1000	2000
10 ha Pin = 740 kPa	0	36.322	40.789	54.190	76.527	121.202
	15	37.246	41.714	55.118	77.459	122.144
	30	38.205	42.674	56.081	78.428	123.122
	45	39.202	43.672	57.083	79.435	124.140
20 ha Pin = 920 kPa	0	53.079	57.659	80.686	112.874	177.252
	15	54.753	59.340	82.362	114.558	178.952
	30	56.506	61.100	84.116	116.320	180.732
	45	58.343	62.944	85.955	118.168	182.597
40 ha Pin = 1040 kPa	0	87.173	96.086	122.824	167.389	256.527
	15	90.749	99.666	126.417	171.004	260.184
	30	94.528	103.449	130.213	174.823	264.049
	45	-	-	-	-	-
55 ha Pin = 1150 kPa	0	109.980	119.010	146.101	191.261	281.613
	15	115.452	124.494	151.620	196.840	287.313
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-
65 ha Pin = 1190 kPa	0	128.908	140.866	176.740	236.533	356.132
	15	135.895	147.861	183.760	243.596	363.281
	30	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-

TABELA 3B. Custo total, em R\$, do sistema de irrigação por pivô central em função da área irrigada, desnível geométrico e comprimento da adutora.

Área	Comprimento adutora			
	Hg (% Pin)	500	1000	2000
30 ha Pin = 25 kPa	0	239.456	271.712	336.222
	50	241.012	273.268	337.780
	100	242.583	274.843	339.367
	150	244.195	276.463	341.004
50 ha Pin = 32 kPa	0	275.732	320.233	409.236
	50	278.786	323.293	412.311
	100	281.934	326.455	415.501
	150	285.229	329.767	418.848
80 ha Pin = 40 kPa	0	333.089	392.725	512.000
	50	339.498	399.156	518.480
	100	346.260	405.952	525.346
	150	353.484	413.216	532.692
100 ha Pin = 45 kPa	0	-	461.929	617.472
	50	-	471.515	627.116
	100	-	481.761	637.439
	150	-	492.823	648.592