

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APRIMORAMENTO DO BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM GRANDES
FAZENDAS

por

Pedro Ernesto Amaral dos Santos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

dos Santos, Pedro Amaral
APRIMORAMENTO DO BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM
GRANDES FAZENDAS / Pedro Amaral dos Santos. -- 2019.
20 f.
Orientador: Sérgio Luiz Frey.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Irrigação. 2. Pivô central. 3. Bomba centrífuga.
4. Payback descontado. I. Luiz Frey, Sérgio, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pedro Ernesto Amaral dos Santos

APRIMORAMENTO DO BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM GRANDES
FAZENDAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Sérgio Luiz Frey

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Adriane Petry

Prof. Alexandre de Paula

Prof. Paulo Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Daniel Frasson pela atenção, disponibilidade e informações prestadas a respeito da fazenda Boi Forte.

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu pai, Florenício Alves do Santos, a minha mãe, Paula Christine Anschau do Amaral dos Santos, e ao meu irmão, Matheus Amaral dos Santos, sem os quais não seria possível começar, prosseguir e concluir Engenharias.

Santos, Pedro E. A. **APRIMORAMENTO DO BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM GRANDES FAZENDAS**. 2019. Número de páginas: 21. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O consumo energético e hídrico para irrigação em grandes fazendas, devido à extensão do Brasil e notável participação do setor primário no PIB brasileiro, é uma matéria de suma importância. Este trabalho apresenta uma avaliação em termos de curvas características e cavitação de um sistema atualmente instalado de irrigação por pivô-central em uma fazenda do oeste baiano e a análise de propostas de aprimoramento do mesmo sistema, buscando alternativas em quesito de associações de bombas, mudanças no diâmetro da linha adutora e estimativas para os *paybacks* do empreendimento em diferentes cenários.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação, pivô-central, bomba centrífuga, *payback*.

Santos, Pedro E. A. **APRIMORAMENTO DO BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO EM GRANDES FAZENDAS**. 2019. Número de páginas: 21. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

Energy and water consumption for irrigation on large farms, due to the extension of Brazil and the remarkable participation of the primary sector in the Brazilian GDP, is a matter of high importance. This paper presents an evaluation in terms of characteristic curves and cavitation of a currently installed center pivot irrigation system in a western Bahia farm and the subsequent optimization of the same system, seeking alternatives regarding pump associations, changes in pipeline's diameter and estimates for project paybacks in different scenarios.

KEYWORDS: irrigation, center pivot, centrifugal pump, payback.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE.....	2
2.2 TRIÂNGULO DE VELOCIDADES.....	2
2.3 EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DAS BOMBAS.....	3
2.4 POTÊNCIA, PERDAS DE ENERGIA E RENDIMENTOS DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA.....	3
2.5 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO ESPECÍFICA.....	4
2.6 CAVITAÇÃO.....	4
2.7 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS E DO SISTEMA.....	5
2.8 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	7
2.9 NÚMERO DE REYNOLDS.....	8
2.10 <i>PAYBACK</i> DESCONTADO.....	8
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	9
3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA.....	9
3.1.1 Cálculo da vazão do sistema.....	9
3.1.2 Equação da curva característica do sistema	9
3.1.3 Análise da perda de carga na canalização adutora.....	10
3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA.....	10
2.2.1 Cavitação da bomba KSB ETA 200-40.....	10
4. CASO DE ESTUDO.....	11
4.1 MUDANÇA NO DIÂMETRO DA CANALIZAÇÃO ADUTORA.....	11
4.1.1 Curvas características dos sistemas.....	11
4.1.2 Análise dos custos e da receita.....	12
4.1.3 Premissas da viabilidade econômica.....	12
4.1.4 Estudo da cavitação nos sistemas.....	13
4.2 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE.....	13
4.2.1 Duas bombas centrífugas de mesmo modelo em série.....	13
4.2.2 Análise da cavitação da associação.....	13
4.2.1 Duas bombas centrífugas em série com válvula <i>by-pass</i>	13
5. RESULTADOS.....	14
5.1 MUDANÇA NO DIÂMETRO DA CANALIZAÇÃO ADUTORA.....	14
5.1.1 Resultado da viabilidade econômica.....	14
5.2 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE.....	15
6. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
ANEXO A.....	17
APÊNCICE A.....	18

1. INTRODUÇÃO

O setor primário da economia brasileira sempre teve uma participação muito importante no produto interno bruto do país. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2018), a área plantada no Brasil, de 2002 a 2010, cresceu 22,7% e, de 2010 a 2018, cresceu 24%, atingindo 73.230.674 hectares (8,6% do território nacional). Esse aumento veio acompanhado de um desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos de irrigação, os quais ajudaram a reduzir riscos de quebra de safra por secas, aumentar as produtividades das culturas e melhoria na qualidade do produto. O regime pluviométrico num país de dimensões continentais e a distribuição temporal e espacial das chuvas longo do ano fez com que diferentes métodos de irrigação predominassem no Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste, variando entre irrigação superficial, localizada, aspersão convencional ou por pivô central.

No método de aspersão por pivô central, produz-se uma chuva artificial acima do solo para irrigar a plantação. A água, ao ser expelida pelo aspersor ao ar, encontra resistência aerodinâmica e transforma-se em pequenas partículas. Segundo Testezlaf (2017), o pivô central é constituído por uma linha de aspersão firmada sob o solo por torres de sustentação munidas de jogos de rodas para realizar um movimento circular ao redor de uma torre central, formando um círculo de área irrigada. Os componentes deste sistema são: motobomba, canalização, torre central e aspersores dispostos ao longo da tubulação do pivô, sendo o mais tecnológico, eficiente em termos de uniformidade na lâmina d'água e muito utilizado em grandes fazendas.

Plantações extensas, com áreas irrigadas acima de 100 hectares, demandam basicamente máquinas de grande porte, sistemas de condução que suportem elevadas pressões e uma adaptabilidade da vazão do fluido de irrigação à rotatividade das culturas plantadas e ao nível pluviométrico da região e da estação. Um sistema de irrigação projetado de forma a minimizar perdas energéticas na linha de canalização e reduzir custos de aquisição, instalação e manutenção dos componentes é imperativo para o sucesso de fazendas onde uma possível quebra de safra podem causar prejuízos significativos. Exemplo desta otimização, segundo Silva (1998), é a escolha de diâmetro para as linhas de sucção, de recalque e do pivô-central baseada em análise econômica, “considerando o balanço entre o custo do material e o custo da energia”, além de evitar a cavitação na máquina geradora.

Este trabalho tem como principal motivação a oportunidade de propor modificações em sistemas de irrigação existentes em prol de propiciar um maior retorno financeiro e a enorme quantidade de fazendas utilizando média/baixa tecnologia nos seus campos.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Testezlaf (2017) estabeleceu estudos dos sistemas de irrigação, definindo a qualidade, o planejamento necessário e os impactos de cada método na lavoura.

Silva (1998) caracterizou uma lateral de irrigação por pivô central por sua perda de carga, pressão, análise da aplicação d'água. O seu trabalho permitiu definir precisamente valores de vazão e pressão dos aspersores na linha de aspersão.

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo do trabalho é avaliar o atual sistema de bombeamento da Fazenda Boi Forte, localizada no oeste baiano, quanto ao rendimento da bomba centrífuga e à possibilidade de cavitação e propor mudanças visando aperfeiçoar o nível de eficiência energética e o custo de aquisição do maquinário. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Dimensionamento do diâmetro da canalização para redução de perdas energéticas e custos, analisando a viabilidade econômica das propostas de redimensionamento;
- Associação em série de geradores, buscando a utilização de bombas centrífugas menores e posterior análise de viabilidade econômica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Bombas de deslocamento não-positivo (bombas centrífugas) são máquinas geratrizes com o objetivo de deslocar um líquido por escoamento, gerando vazão dentro de um sistema hidráulico. Esse deslocamento do fluido é promovido por um órgão giratório provido de pás (rotor). Segundo Palmieri (1994), a inexistência de contato entre o rotor e a carcaça ocasiona uma grande quantidade de vazamentos internos que contribuem para uma baixa eficiência volumétrica se comparada a bombas de deslocamento positivo. Assim, o fluido ideal para este tipo de bomba é o de baixa viscosidade, como a água, pois apenas a força centrífuga será responsável pela geração de vazão.

2.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A Equação da Continuidade estabelece que, em um volume de controle (VC), qualquer aumento de massa é proveniente de um escoamento líquido positivo de massa no mesmo VC.

Baseando-se nas premissas de escoamento incompressível e em regime permanente, a Equação de Continuidade pode ser descrita, de acordo com Fox (2010), pela fórmula abaixo:

$$VA = Q \quad (1)$$

onde:

V representa a velocidade média da corrente fluida;

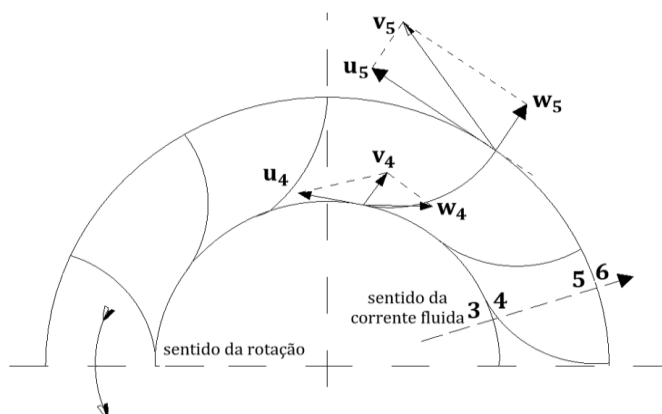
A representa a área da seção do VC;

Q representa a vazão volumétrica do sistema, cujo valor é constante.

2.2 TRIÂNGULO DE VELOCIDADES

O triângulo de velocidades associa o movimento absoluto do fluido com o movimento relativo dentro do rotor de uma bomba centrífuga. Pode ser esquematizado pela figura abaixo, que corresponde a um corte do rotor num plano meridional.

Figura 1 - Corte no plano meridional de um rotor de bomba centrífuga



onde:

w representa a velocidade relativa da corrente fluida;

v representa a velocidade absoluta da corrente fluida;

u representa a velocidade tangencial da corrente fluida.

Os índices 3, 4, 5 e 6 indicam, respectivamente, um ponto imediatamente anterior à entrada do fluido no rotor, imediatamente após a sua entrada do rotor, imediatamente anterior a sua saída e imediatamente posterior a sua saída do rotor.

A partir da análise do triângulo formado pelos vetores **u**, **v**, **w** pode-se inferir que a projeção \mathbf{v}_{u5} é a velocidade tangencial do fluido e relacionada a energia específica doada ao fluido, como será visto na próxima seção, e \mathbf{v}_{w5} relacionado à vazão da bomba centrífuga.

2.3 EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DAS BOMBAS

O fluido, ao passar pelas pás do rotor, recebe energia na forma de energia de pressão, de velocidade e potencial, que, neste caso, pode ser considerada insignificante frente às outras. Para tal equacionamento, admite-se as hipóteses de número infinito de pás no rotor, escoamento em regime permanente e escoamento sem perdas energéticas.

Assim, obtém-se a seguinte equação:

$$w_{p\acute{a}\infty} = u_5 V_{u5} - u_4 V_{u4} \quad (2)$$

onde $w_{p\acute{a}\infty}$ representa o trabalho específico, em J/kg, do fluido.

Segundo Henn (2006), pode-se assumir que, para bombas geradoras desprovidas de pás diretrizes antes do rotor, $\mathbf{v}_{u4} = 0$, logo:

$$w_{p\acute{a}\infty} = u_5 V_{u5} \quad (3)$$

A Equação 3, acrescenta-se o fator de deficiência de potência, μ , para corrigir as diferenças de entrega de energia entre o modelo de bomba proposto acima e uma bomba real com número finito de pás. Assim, tem-se:

$$w_{p\acute{a}} = \mu w_{p\acute{a}\infty} \quad (4)$$

2.4 POTÊNCIA, PERDAS DE ENERGIA E RENDIMENTOS DE UMA BOMBA CENTRIFUGA

A potência disponível no fluido ao sair da bomba é dada por:

$$P = \rho Q w \quad (5)$$

onde:

ρ representa a massa específica do fluido de trabalho, em kg/m^3 ;

A energia específica disponível pelo fluido na saída da bomba, w , em J/kg, é calculada a partir das perdas hidráulicas, de acordo com Henn (2006):

$$w = w_{pá} / \eta_h = w_{pá} - E_p$$

onde:

η_h representa o rendimento hidráulico da bomba;

E_p representa a energia específica referente às perdas hidráulicas, em J/kg.

As perdas em uma máquina real englobam as perdas internas e as externas. O rendimento total de uma máquina geradora, η_t , pode ser escrito como:

$$\eta_t = \eta_h \eta_v \eta_a \eta_m \quad (7)$$

onde:

η_v representa o rendimento volumétrico da bomba;

η_a representa o rendimento de atrito de disco bomba;

η_m representa o rendimento mecânico da bomba.

Relacionando o rendimento total da bomba com sua potência, pode-se equacionar da seguinte forma:

$$\eta_t = \rho Q w / P_e \quad (8)$$

onde:

P_e representa a potência no eixo da máquina, em W.

2.5 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO ESPECÍFICA

A velocidade de rotação específica, n_{qA} , é uma grandeza adimensional que se mantém constante para máquinas de fluxo semelhantes. Segundo Macintyre (1997), a sua importância vem do fato de ser um termo comparativo entre diferentes bombas em relação à velocidade do fluido e ser usado na determinação do formato do rotor que deve ser empregado para uma determinada rotação, vazão e altura manométrica. De acordo com Henn (2006), n_{qA} pode ser escrita como:

$$n_{qA} = 10^3 n \frac{Q^{1/2}}{w^{3/4}} \quad (9)$$

onde:

n representa a rotação do rotor, em rpm.

2.6 CAVITAÇÃO

Segundo Henn (2006), a cavitação consiste na formação e subsequente colapso de bolhas geralmente preenchidas por vapor de líquido em fluidos em movimento. Isso se deve ao atingimento, em qualquer lugar do escoamento, de uma pressão abaixo da pressão de vaporização do líquido.

O $NPSH_d$ é definido como a energia disponível para introduzir o líquido na bomba sem haver vaporização em qualquer ponto do fluido, através da equação abaixo:

$$NPSH_d = \frac{P_M}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - H_{sg} - H_{ps} + \frac{V_M^2}{2g}$$

onde:

H_{sg} representa a altura geométrica da sucção, em m;

H_{ps} representa a perda de carga na canalização de sucção, em mca;

P_v representa a pressão de vaporização na boca de sucção da bomba, em kgf/m^2 ;

γ representa o peso específico do fluido bombeado, em kgf/m^3 .

A quantidade de energia mínima para que não haja cavitação na bomba, $NPSH_b$, em metros de coluna d'água, é definida por:

$$NPSH_b = \sigma_{\min} H + \frac{V_3^2}{2g} \quad (11)$$

onde:

σ_{\min} representa o valor mínimo do coeficiente de Thoma para que haja cavitação;

Para bombas centrífugas, Henn (2006) indica a equação abaixo, sendo válida apenas para o ponto de projeto ou de rendimento máximo do gerador:

$$\sigma_{\min} = 2,9 * 10^{-4} * n_{qA}^{4/3} \quad (12)$$

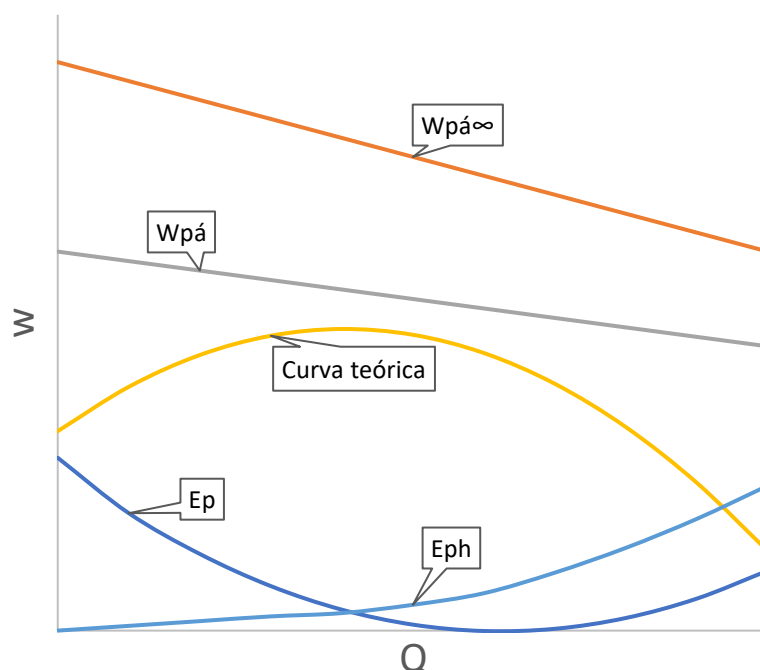
A satisfação da equação abaixo permite evitar-se o fenômeno da cavitação.

$$NPSH_b \leq NPSH_d \quad (13)$$

2.7 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS E DO SISTEMA

As curvas ideal e teórica de máquinas geradoras são obtidas a partir da equação 2, fazendo-se variar o salto energético a partir da variação da vazão e mantendo-se constante a velocidade de rotação. Abaixo, a representação de tais curvas para uma bomba centrífuga de pás curvadas para trás.

Figura 2 - Curva ideal, teórica e real para uma bomba centrífuga de pás curvadas para trás



A curva ideal é dada por $w_{pá\infty} = f(Q)$. Ao aplicar-se o fator de deficiência de potência, resulta em $w_{pá} = f(Q)$ e então, ao se considerar as perdas hidráulicas, obtém-se finalmente a curva teórica $w = f(Q)$.

A curva característica da bomba (curva real) é medida em laboratório e possibilita a identificação do ponto nominal (Q_n, w_n) , no qual $\eta_t = f(Q)$ tem seu valor máximo.

O Princípio de Conservação de Energia aplicado ao recalque de um fluido de um reservatório designado pelo índice 2 até um reservatório destino designado pelo índice 9 resulta na equação 9.6 de Henn (2006) abaixo:

$$w = \frac{P_J - P_M}{\rho} + g(Z_J - Z_M) + \frac{V_J^2 - V_M^2}{2} + E_p \quad (14)$$

onde:

P_M representa a pressão na superfície do reservatório de sucção, em N/m^2 ;

P_J representa a pressão na boca de descarga da canalização de recalque, em N/m^2 ;

Z_M representa a cota de referência da superfície do reservatório de sucção, em m;

Z_J representa a cota de referência da boca de descarga da tubulação, em m;

V_M representa a velocidade do fluido na superfície do reservatório de sucção, em m/s;

V_J representa a velocidade do fluido na superfície do reservatório de recalque, em m/s;

E_p representa a energia específica referente às perdas hidráulicas, em J/kg.

O equacionamento das curvas características é feito a partir da conversão do trabalho específico disponível em altura manométrica total de acordo com Henn (2006):

$$w = gH \quad (15)$$

onde:

H representa a altura manométrica total, em mca.

A curva característica de um sistema com velocidade do fluido no reservatório de sucção sendo nula e escoamento sendo considerado turbulento, pode ser descrita segundo Henn (2006):

$$H = H_g + K'Q^2 \quad (16)$$

onde:

H_g representa a altura manométrica estática requerida pelo sistema, em m;

$K' = \frac{K}{g}$ = representa a característica da canalização, em $m^{-5}s^2$.

A energia de pressão estática, $w_{est} = gH_g$, é a soma da energia potencial e da energia de pressão cedida do gerador de fluxo à unidade de massa do fluido para o seu transporte do reservatório de sucção ao reservatório de destino. A altura manométrica estática pode ser definida como:

$$H_g = \frac{P_J - P_M}{\rho g} + (Z_J - Z_M) \quad (17)$$

O fator K' pode ser definido, baseado na equação de Darcy-Weisbach e na Equação da Continuidade, como:

$$K' = \left(\frac{8}{\pi^2 \phi^4} + f \frac{8L_{eq}}{\pi^2 \phi^5} \right) / g \quad (18)$$

onde:

f representa o coeficiente de atrito adimensional;

ϕ representa o diâmetro da tubulação, em metros;

L_{eq} representa o comprimento equivalente da tubulação, em metros.

O segundo termo da Equação 18 corresponde à perda de carga total na canalização, H_p , em mca, podendo-se definir então a equação de Darcy-Weisbach:

$$H_p = f \frac{8L_{eq}Q^2}{\pi^2 \phi^5 g} \quad (19)$$

O ponto de funcionamento da bomba é o ponto de intersecção entre a curva real da máquina com a curva característica da canalização.

2.8 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

A associação em série prioriza o aumento da altura manométrica do sistema dado pela soma dos trabalhos específicos de cada bomba em uma vazão desejada. Assim, é muito utilizada em sistemas com salto energético requerido acima do limite alcançado por uma única bomba.

O índice I designa bomba I e índice II, bomba II. As relações do trabalho específico disponível da associação, w_A , trabalho específico disponível das bombas, w_I e w_{II} , vazão da

associação, Q_A , vazão das bombas, Q_I e Q_{II} , potência da associação, P_A , potência das bombas, P_I e P_{II} , são dadas pelas equações abaixo:

$$w_A = w_I + w_{II} \quad (24)$$

$$Q_A = Q_I = Q_{II} \quad (25)$$

$$P_A = P + P_{II} \quad (26)$$

O rendimento da associação, n_{tA} , é dado em Henn (2006):

$$n_{tA} = \frac{n_{tI}n_{tII}(w_I + w_{II})}{n_{tII}w_I + n_{tI}w_{II}} \quad (27)$$

onde:

n_{tI} representa o rendimento total da máquina I;

n_{tII} representa o rendimento total da máquina II;

2.9 NÚMERO DE REYNOLDS

O Número de Reynolds é usado para caracterizar o regime do escoamento do fluido. Para valores acima de 4300, o escoamento é considerado turbulento e, para valores abaixo, é considerado laminar. A sua equação é dada por:

$$Re = \phi V \rho / \mu \quad (28)$$

onde:

μ representa a viscosidade dinâmica d'água, em kg/ms.

2.10 PAYBACK DESCONTADO

O *payback* descontado é uma ferramenta muito utilizada para analisar investimentos. Pode ser entendido como o tempo necessário para se recuperar o capital investido quando se traz fluxo de caixa futuro a valor presente com uma taxa mínima de atratividade, considerando, assim, o custo do capital ao longo do tempo. Segundo Ross (2013), ele pode ser expresso por:

$$FCC = -|I| + \sum_{j=1}^t \frac{(R_j - C_j)}{(1 - i)^j} \quad (29)$$

onde:

FCC representa o valor presente do capital, em R\$;

I representa o valor do investimento inicial, em R\$;

j representa um índice genérico de período;

R_j receita no período j , em R\$;

C_j representa o custo no período j , em R\$;

i representa a taxa mínima de atratividade.

O *payback* descontado será o valor de t para o qual $FCC = 0$.

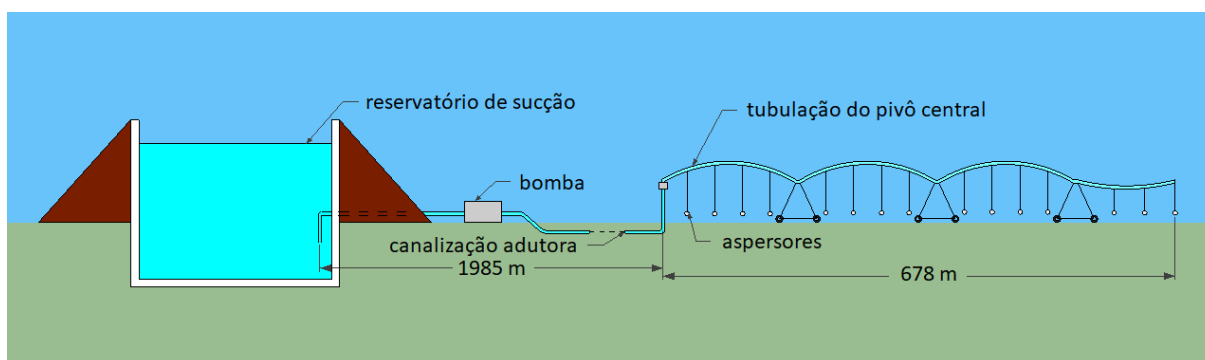
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A Fazenda Boi Forte extrai o seu recurso hídrico do lençol freático via um poço. O fluido é canalizado para uma represa que abastece os pivôs-centrais. As bombas encontram-se próximas à represa e a linhas que canalizam o fluido dos poços aos pivôs, doravante chamada de linha/canalização adutora, possuem comprimentos que variam desde 486 a 1985 metros. As culturas da lavoura alteram ao longo dos anos, variando entre milho e soja.

A fazenda apresenta, na média dos últimos 12 meses, um custo por kWh de R\$ 0,26.

O pivô objeto de estudo deste trabalho, de canalização adutora mais longa, é ilustrado abaixo, em proporções sem escala definida.

Figura 3 - Representação do sistema de bombeamento e irrigação do pivô estudado



3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA

3.1.1 Cálculo da vazão do sistema

A unidade de bombeamento irriga, no ponto nominal do gerador, 11,4 mm/dia em uma área de 145 hectares. A vazão do sistema pode ser definida pela fórmula abaixo:

$$Q = 5A * X / 12 \quad (30)$$

onde:

A representa a área total irrigada, em hectares;

X representa a lâmina diária irrigada, em metros.

Assim, $Q = 691 \text{ m}^3/\text{h}$ no ponto de funcionamento nominal da bomba centrífuga.

3.1.2 Equação da curva característica do sistema

A Tabela A.1 compila parâmetros do sistema de bombeamento e tubulações. A variável K' foi determinada a partir do seu isolamento na Eq. (16). A Eq. (17) aplicada ao sistema resulta em $H_g = 18,54 \text{ mca}$. Assim, a curva característica do sistema é expressa abaixo e ilustrada pelo Figura A.2 do Apêndice A.

$$H = 18,54 + 8,322 * 10^{-5} Q^2 \quad (31)$$

3.1.3 Análise da perda de carga na canalização adutora

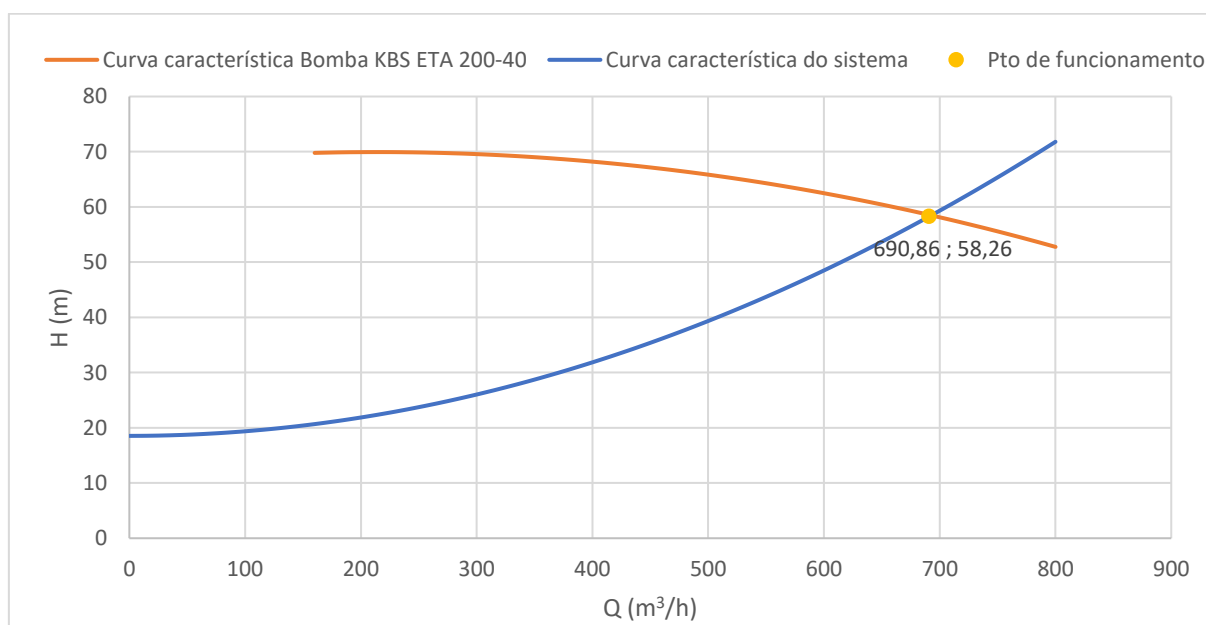
A partir da Eq. (1) e dos dados da Tabela A.1, obteve-se $V_j = 1,99$ m/s na linha adutora. De acordo com a Eq. (28), o número de Reynolds do escoamento é $Re = 6,97 * 10^5$ encontrando-se em regime turbulento. Pelo Diagrama de Moody, Figura A.5 do Anexo A, o coeficiente de atrito f não depende da vazão neste regime, mas apenas da rugosidade relativa, ε/D . Pelos dados da Tabela A.1, $\varepsilon/\phi = \frac{0,006*10^{-3}}{0,35} = 1,7 * 10^{-5}$ o que resultou em $f = 0,0128$. A perda energética distribuída na linha adutora, segundo Eq. (19), é $H_{P_dist} = 14,68$ mca. Pelos dados da Tabela A.1, tem-se que $H_P = H_{P_dist} + H_{P_local} = 19,68$ mca na linha adutora.

3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA

A bomba centrífuga instalada no sistema é da marca KSB, modelo ETA 200-40 e rotação de 1760 rpm, cuja curva característica foi obtida através do Manual Técnico N° A1150.0P da KSB e está ilustrada pelo Figura A.3 do Apêndice A. A partir da extração de diferentes pontos da curva, pode-se definir a seguinte equação característica da bomba:

$$H = -5 * 10^{-5}Q^2 + 2,14 * 10^{-2}Q + 67,647 \quad (32)$$

Figura 4 - Curva característica da bomba e do sistema



O rendimento total da bomba, no ponto nominal, é de 85% e a potência consumida no eixo, de acordo com a Figura A.4 do Anexo A, é de $P_e = 181$ cv, correspondendo a $P_e = 133,12$ kW.

2.2.1 Cavitação da bomba KSB ETA 200-40

Supondo o fluido a 20°C, $P_v = 238$ kgf/m², $\gamma = 998$ kgf/m³. Pela Tab. (A.1), $H_{sg} = -1$ m e $H_{ps} = 0,4$ mca. Supondo V_M insignificante frente às demais variáveis, tem-se,

pela Eq. (10), $NPSH_d = 10,71$ mca. De acordo com as Eqs. (9), (11) e (12), $n_{qA} = 109,96$, $\sigma_{min} = 0,15277$ e $NPSH_b = 9,68$ mca, o que satisfaz a Eq. (13) da condição de não cavitação.

4. CASO DE ESTUDO

4.1 MUDANÇA NO DIÂMETRO DA CANALIZAÇÃO ADUTORA

4.1.1 Curvas características dos sistemas

Os tubos PVC PN 60 utilizados são da linha Irriga LF DEFoFo da marca TIGRE e possuem diâmetros de 0,25 m, 0,30 m, 0,35 m, 0,40 m e 0,50 m. Os cálculos não levaram em consideração os efeitos na tubulação do pivô, visto que traria consigo uma série de incertezas relacionadas à constante mudança de direção do fluido e à falta de dados como rugosidade e presença de acessórios.

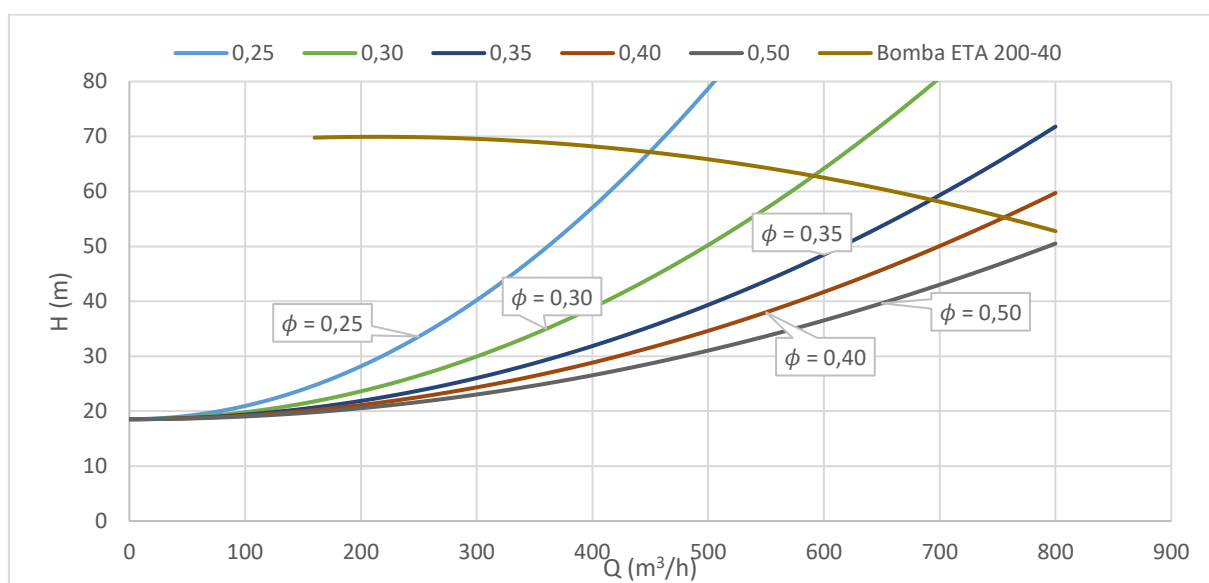
Abaixo, segue tabela resumindo os dados obtidos.

Tabela 2 - Estudo da variação do diâmetro da canalização adutora

Diâmetro canalização adutora (m)	0,25	0,30	0,35 (atual)	0,40	0,50
Velocidade média (m/s)	3,91	2,71	1,99	1,53	0,98
Número de Reynolds	9,8E+05	8,1E+05	7,0E+05	6,1E+05	4,9E+05
Fator de atrito	0,0121	0,0124	0,0128	0,0129	0,0132
$H_{P_distribuída}$ linha adutora (mca)	74,87	30,83	14,68	7,61	2,55
H_{P_local} linha adutora (mca)	19,21	9,26	5,00	2,93	1,2
H_P tubulação pivô-central (mca)	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04
H_P total (mca)	114,12	60,14	39,72	30,58	23,79
K' (m ⁻⁴)	2,4E-04	1,3E-04	8,3E-05	6,4E-05	5,0E-05
Altura manométrica (mca)	132,66	78,68	58,26	49,12	42,33

Abaixo, curvas características dos sistemas e bomba ETA 200-40, atualmente instalada.

Figura 5 - Curvas características dos sistemas e bomba



De acordo com o Figura A.3 de Anexo, nenhuma bomba KSB tem como ponto nominal de funcionamento o ponto cuja linha adutora possui diâmetros de $\phi = 0,25$ m e $\phi = 0,30$ m. Assim, estes diâmetros foram desconsiderados da análise posterior de custos.

4.1.2 Análise dos custos e da receita

O custo variável, fixo e operacional por hectare de milho e de soja, com exceção de custos de irrigação e de eletricidade, foi baseado nos dados do Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária, IMEA, para a região do Nordeste. Os dados compilados foram expostos na Tabela A.3 do Apêndice, a qual também contempla as bombas KSB adequadas a cada sistema, junto com seus preços de aquisição (orçamento realizado junto à KSB em 05/12/2019) e estimativa do custo inicial diverso.

A partir dos dados de potência no ponto nominal das máquinas da Tabela A.3, foi traçado um comparativo dos custos de energia elétrica e aquisição da linha adutora, conforme Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 - Comparativo de custos de energia e aquisição de tubulações

Diâmetro canalização adutora (m)	0,35 (atual)	0,40	0,50
Modelo de bomba KSB adequada	200-40	200-40	200-33
Diâmetro bomba (mm)	380	360	330
Ponto nominal	(691 ; 58)	(691 ; 51)	(691 ; 43)
Rendimento total	0,85	0,84	0,83
Potência consumida (kW)	133,12	117,68	97,82
Custo do kWh (R\$)	0,26		
Volume d'água mensal (m ³)	504.430		
Custo do metro cúbico d'água (R\$/m ³)	0,05	0,04	0,04
Custo mensal de energia (R\$)	25.266	22.336	18.566
Custo tubo PVC PN 60 6 m (R\$)	1.041	1.443	2.145
Custo total tubulação (R\$)	344.419	477.411	709.631

A produção de sacos por hectare de milho e soja e a duração do ciclo das culturas foram obtidas junto aos técnicos da fazenda. O preço dos sacos se baseou nos dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (ESALQ/USP), sendo considerado o preço médio dos últimos 4 anos. No Apêndice, a Tabela A.5 compila dos dados obtidos.

4.1.3 Premissas da viabilidade econômica

A viabilidade econômica dos sistemas foi realizada desconsiderando o valor dos bens adquiridos após o horizonte de tempo do investimento, desconsiderando o custo de aquisição das terras, visto que o estudo do caso é de existente e a partir da premissa de uma taxa mínima de atratividade de 2%. Os dados que embasaram a viabilidade econômica são descritos abaixo:

- Investimento inicial do empreendimento: custo de aquisição das máquinas geradoras (Tabela A.3) + custo inicial diverso (Tabela A.3) + custo total tubulação (Tabela 4);
- Despesa mensal: custo mensal de energia (Tabela 4) + custo operacional milho + soja mensal (Tabela A.3);
- Receita total mensal: Tabela A.5

4.1.4 Estudo da cavitação nos sistemas

O diâmetro do flange de sucção das bombas do estudo, de acordo com KSB (2018), é o mesmo, logo tem-se que o diâmetro da linha de sucção também o é. Como também não há de alteração na vazão, na pressão à montante, na pressão de vaporização, na altura de sucção geométrica e em V_3 , pode-se considerar que, de acordo com as equações 10 e 11, $NPSH_d$ e $NPSH_b$ permanecem o mesmo da seção 2.2.1.

4.2 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE

4.2.1 Duas bombas centrífugas de mesmo modelo em série

Na associação em série, tendo em vista a Eq. (24) e (25), o ponto de nominal das máquinas bomba é (690; 29,3). De acordo com a Fig. (A.3), o modelo de bomba KSB ETA 200-33 com 290 mm de diâmetro é o mais adequado para este ponto de funcionamento.

A partir de pontos extraídos da curva característica da bomba, foi equacionado a sua curva conforme abaixo:

$$H = -3,4 * 10^{-5} Q^2 + 1,06 * 10^{-2} Q + 37,533 \quad (33)$$

A Tabela A.6 do Apêndice compila os dados resultantes das análises de aperfeiçoamento dos custos de energia

4.2.2 Análise da cavitação da associação

De acordo com Eqs. (9), (11) e (12), $n_{qA} = 186,4$, $\sigma_{min} = 0,308$ e $NPSH_b = 8,89$ mca para as bombas em série, o que satisfaz a Eq. (13) da condição de não cavitação.

4.2.3 Duas bombas centrífugas em série com válvula *by-pass*

Este cenário, cujo sistema de máquinas associadas em série conta com uma válvula *by-pass*, valida o sistema para funcionar quando for necessário a manutenção preventiva de uma das máquinas, podendo ser feita sem interromper totalmente o escoamento do fluido para a lavoura. Ao ser aberta, a válvula desvia o escoamento.

A tabela abaixo compila os valores obtidos para este sistema, com apenas uma das bombas centrífugas em funcionamento.

Tabela 7- Sistema em série com válvula *by-pass* aberta

Modelo de bomba KSB	200-33
Altura manométrica (mca)	35,4
Vazão no ponto nominal (m ³ /h)	450
NPSH _b	6,7
Rendimento total	0,70
Potência consumida (kW)	61,5
Custo kWh	0,26
Volume d'água mensal (m ³)	504.430
Custo metro cúbico d'água (R\$/m ³)	0,04
Custo mensal de energia (R\$)	11.673

A Figura A.6 da Apêndice ilustra a curva característica da bomba 200-33 quando a válvula *by-pass* estiver aberta.

5. RESULTADOS

De acordo com os dados da Tabela A.1 e da Figura 4, pode-se presumir que o sistema atualmente instalado, com a bomba centrífuga KSB ETA 200-40 de diâmetro 380 e linha adutora de $\phi = 0,35$ m atende às necessidades de vazão, altura manométrica total e condição de não-cavitação. Além disso, o rendimento total no ponto nominal de funcionamento da máquina geradora, de 85%, é mais alto que todos os outros rendimentos totais calculados ao longo deste trabalho.

5.1 MUDANÇA NO DIÂMETRO DA CANALIZAÇÃO ADUTORA

As curvas características dos sistemas de diâmetros $\phi = 0,40$ m e $\phi = 0,50$ m, para uma vazão $Q = 691$ m³/h, requerem um menor valor de altura manométrica se comparadas ao sistema atualmente instalado. Isto se deve ao fato de ambas simulações terem apresentado, de acordo com os dados da Tabela 2, uma menor perda energética distribuída e localizada na linha adutora.

5.1.1 Resultado da viabilidade econômica

Tabela 8 - Análise de viabilidade econômica.

Diâmetro linha adutora (m)	0,35 (atual)	0,40	0,50
Investimento inicial (R\$)	905.603	1.037.120	1.261.030
Despesa mensal (R\$)	125.172	122.241	118.472
Receita total mensal (R\$)	175.192	175.192	175.192
<i>Payback</i> (meses)	18,3,1	19,6	22,2
<i>Payback</i> descontado (meses)	22,7	25,1	30,1

O fato de o sistema atual ter um *payback* descontado menor se comparado aos outros sistemas confirma o fato de não ser viável um investimento inicial 14,5% maior visando uma redução de 2,3% na despesa mensal do empreendimento e muito menos um aumento inicial de 39,2% para uma redução de 3,08% na despesa mensal.

O aumento do diâmetro da linha adutora e conseqüentemente queda da velocidade do fluido resulta, pela Princípio da Conservação de Energia, em uma pressão maior do fluido, sendo necessário avaliar a utilização de uma tubulação PVC PN 80 de maior resistência à pressão interna e mais cara, piorando ainda mais o *payback* das melhorias propostas. Além disso, o aumento da pressão também traz efeitos para a tubulação do pivô-central, diminuindo a perda de carga na tubulação e exigindo aspersores que funcionem em um intervalo de pressão superior aos atuais.

Enfim, é importante ressaltar que a viabilidade econômica das melhorias propostas é fortemente sensível custo inicial diverso, dado hipotético presumido na Tabela A.3.

5.2 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM SÉRIE

A associação em série resultou em uma margem ainda maior na condição de não cavitação da Eq. (13). Porém, não reduziu o custo elétrico mensal de forma significativa, proporcionando apenas 0,7% de redução, apesar de apresentar um rendimento total da associação de 0,795, de acordo com a Tab. (7). O custo de aquisição do maquinário na associação em série não apresentou redução, de acordo com a Tab. (A.6). Assim, não se fez necessário uma análise de viabilidade econômica. A associação em série com válvula *by-pass* acionada proporcionou uma vazão aceitável para, se não perdurar por muitos dias, não prejudicar gravemente a lavoura ao ser realizada a manutenção de uma das máquinas geradoras.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que a unidade de bombeamento e a unidade de condução do fluido operam em regime satisfatório no que se refere à cavitação e ao consumo elétrico.

O redimensionamento da linha adutora, que escoava o fluido da máquina geradora à torre central do pivô, foi bem sucedida a nível de aprimoramento das perdas energéticas, dentro das hipóteses pré-estabelecidas, porém fracassou ao não aperfeiçoar custos do projeto como um todo.

A associação em série não produziu economia significativa do custo elétrico mensal e reduziu o rendimento total da unidade de bombeamento, não sendo acatado como uma melhoria efetiva.

Sugestões para futuros estudos sobre problemas similares foram propostas abaixo:

- Acrescentar o Índice de Preços ao Produtor de grupos de produtos Agrícolas (IPPA_G) proposto por Barros et al (2019) no cálculo do preço médio dos grãos na Tabela A.5;
- Considerar a temperatura do fluido na boca de sucção das bombas centrífugas para ajuste da pressão de vaporização e do peso específico do fluido;
- Analisar o uso tubulações de marcas concorrentes à TIGRE;
- Analisar o uso de bombas axiais em série com bombas centrífugas para o sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, G.S.C; CASTRO, N.R.; GILIO, L.; MORAIS, A.C.P.; SOUZA JUNIOR, M.L.; MACHADO, G.C. **Índices de Preços ao Produtor de Grupos de Produtos Agropecuários (IPPA) – Metodologia e primeiros resultados.** Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), Piracicaba, 09/2019. Disponível em <<https://www.cepea.esalq.usp.br/ippa.aspx>>. Acesso em 05/12/2019.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (ESALQ/USP). Análise Conjuntural – Análise CEPEA, 11/2019. **AGROMENSAL NOVEMBRO/2019 SOJA.** Disponível em <<https://www.cepea.esalq.usp.br/categoria/agromensal.aspx?mes=11&ano=2019>>. Acesso em 05/12/2019.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (ESALQ/USP). Análise Conjuntural – Análise CEPEA, 11/2019. **AGROMENSAL NOVEMBRO/2019 MILHO.** Disponível em <<https://www.cepea.esalq.usp.br/categoria/agromensal.aspx?mes=11&ano=2019>>. Acesso em 05/12/2019.

FOX, R. W., PRITCHARD, P.J., MCDONALD, A.T., 2010. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 8a Edição, Editora LTC.

HENN, ÉRICO ANTÔNIO LOPES, 2006. **Máquinas de fluido.** 2a Edição, Editora UFSM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção Agrícola Municipal – Tabela 1612. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/cnt/brasil>>. Acesso em 05/12/2019.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA (IMEA). Custo de produção da soja – Safra 2019/20. **Relatório.** Disponível em <<http://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalle?c=4&s=3>>. Acesso em 05/12/2019.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA (IMEA). Custo de produção do milho – Safra 2019/20. **Relatório.** Disponível em <<http://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalle?c=3&s=3>>. Acesso em 05/12/2019.

KSB BOMBAS HIDRÁULICAS SA, 2008. **Manual Técnico e Curvas Características N° A1150.0P/3.** Disponível em <http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=MT_ETA_A1150_0P_3.pdf&tipo=tecnicos>. Acesso em 05/12/2019.

MACINTYRE, A.J. 1997. **Bombas e instalações de bombeamento.** 2a Edição, Editora LTC.

PALMIEIRI, A.C. 1994. **Manual de hidráulica básica.** – Porto Alegre: Albarus Sistemas Hidráulicos Ltda.

STEPHEN A. ROSS et al, 2013. **Fundamentos de administração financeira.**– 9. Edição. AMGH Editora LTDA

SILVA, E.M. da; AZEVEDO, J.A. de. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô-central.** Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. 54p. (Embrapa-CPAC. Documentos, 71).

TESTEZLAF, ROBERTO, 2017. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações.** - Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI.

ANEXO A

Figura A.3: bombas KSB – ETA dispostas em vazão por altura manométrica. Figura extraída do Manual Técnico N° A1150.OP da KSB (2018), página 2, disponível em http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=MT_ETA_A1150_OP_3.pdf&tipo=tecnicos

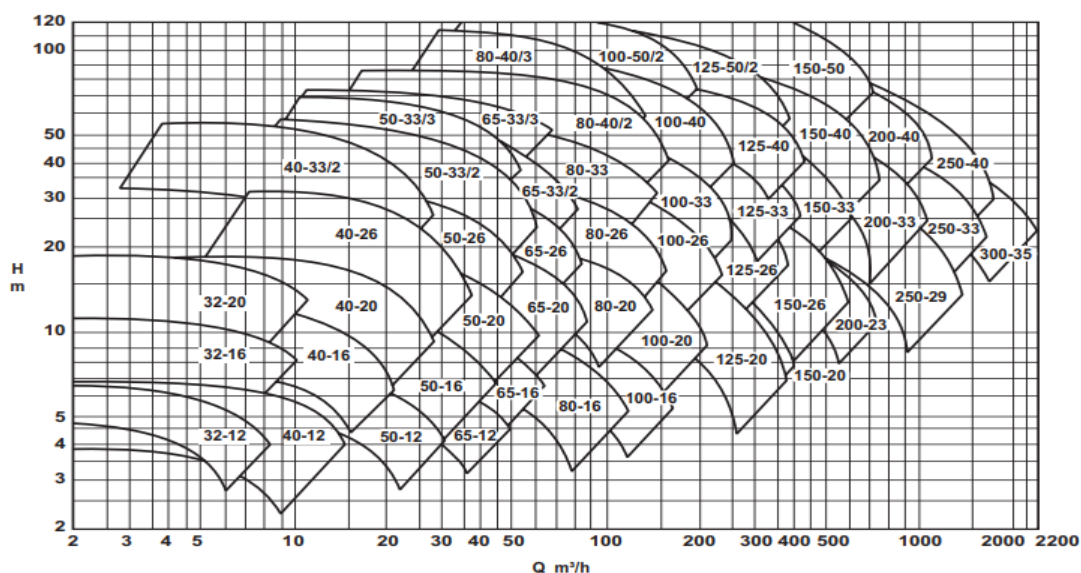


Figura A.4: potência no eixo da bomba centrífuga série 200-40, rotação de 1760 rpm. Figura extraída do Manual Técnico N° A1150.OP da KSB, disponível em http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=MT_ETA_A1150_OP_3.pdf&tipo=tecnicos

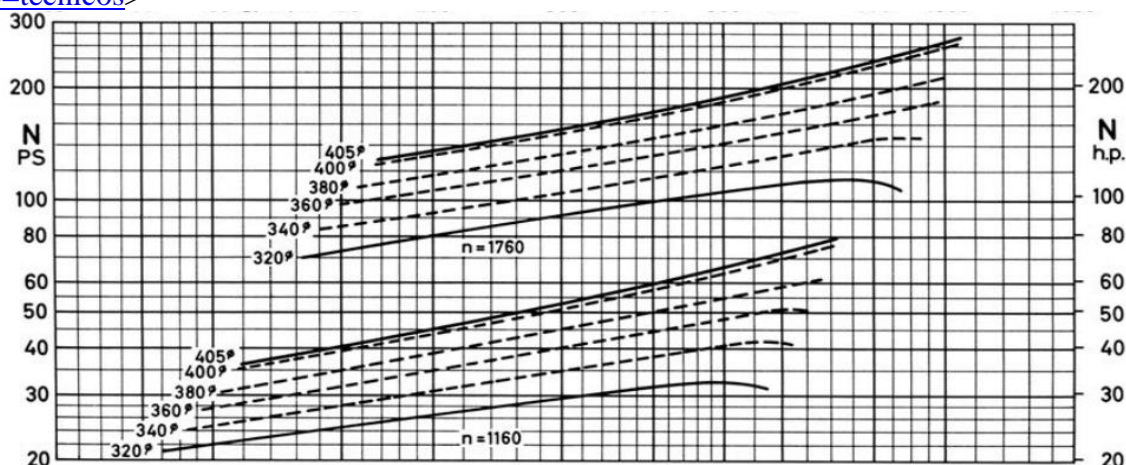
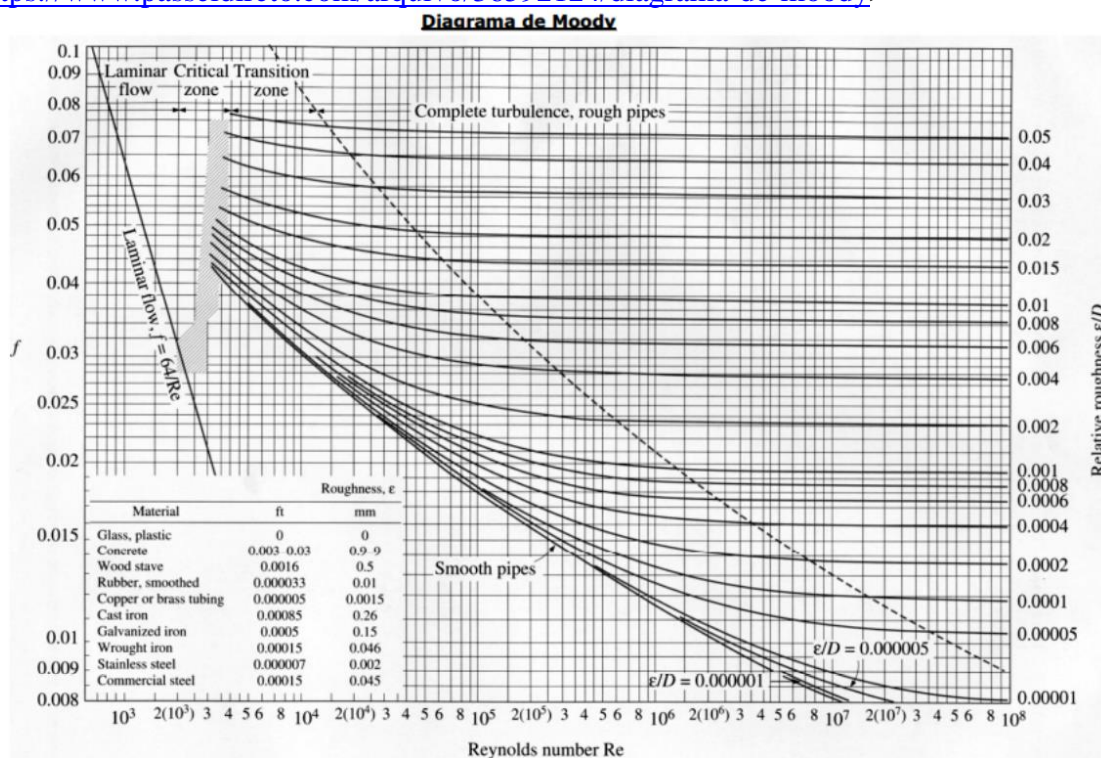


Figura A.5: diagrama de Moody, extraído da internet e disponível em <<https://www.passeidireto.com/arquivo/36592124/diagrama-de-moody>>



APÊNDICE A

Figura A.2: curva característica do sistema.

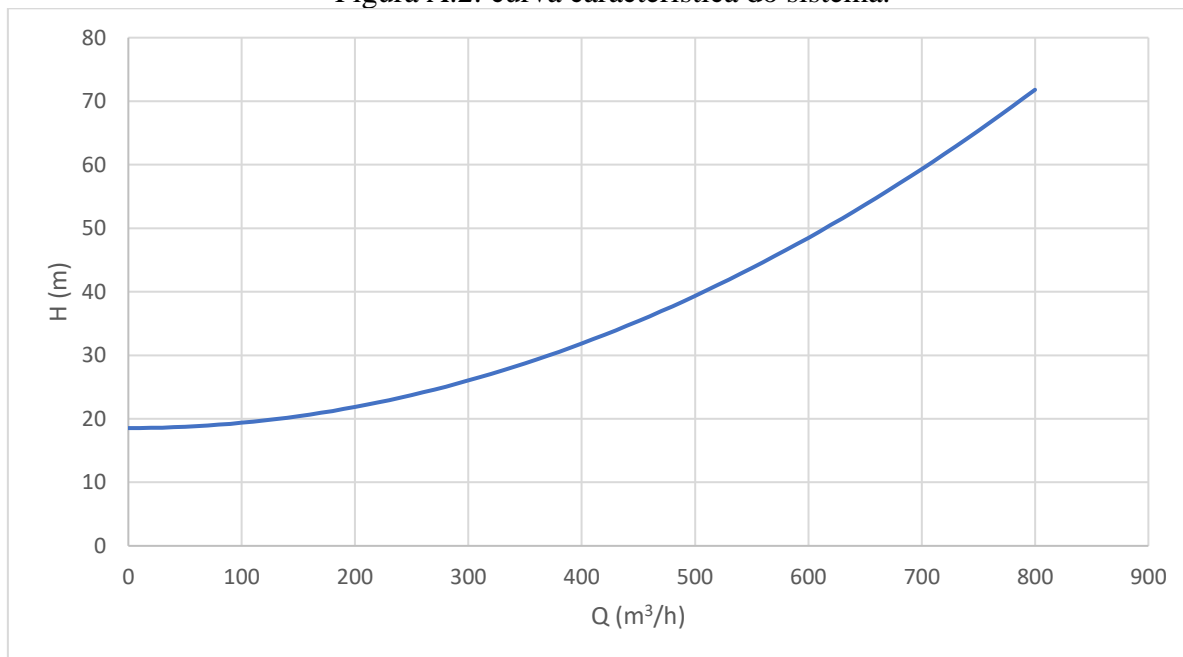


Figura A.3: curva característica da bomba KSB ETA 200-40.

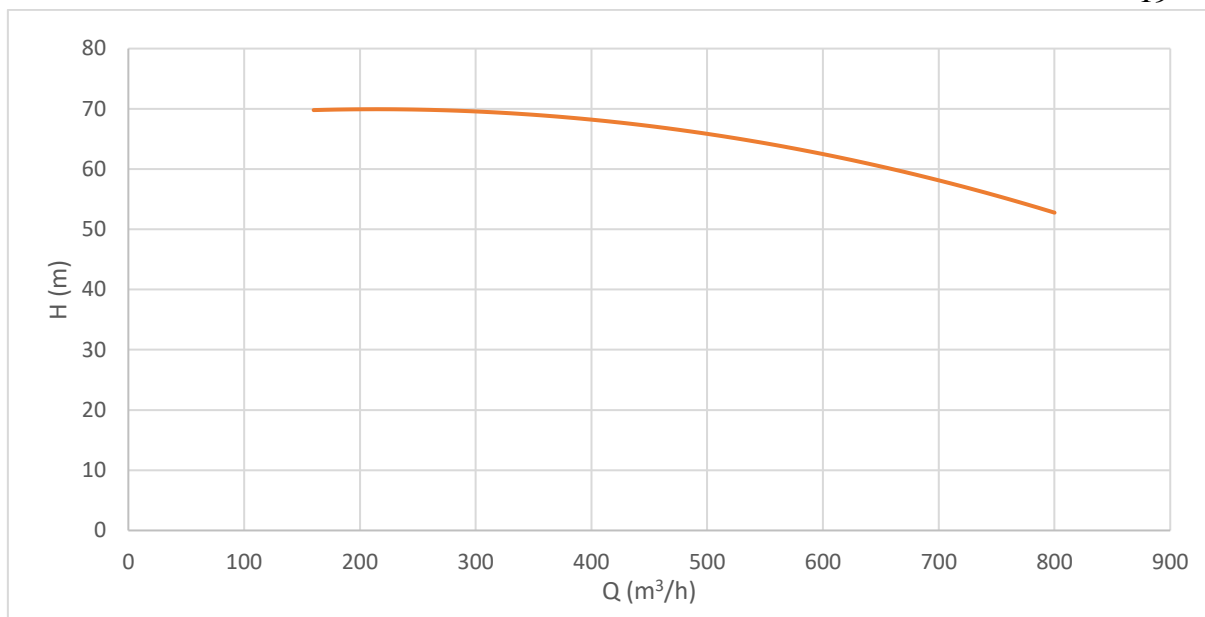


Tabela A.1 - Parâmetros do sistema de irrigação

Comprimento da linha adutora (m)	1985
Diâmetro da linha adutora (m)	0,35
Comprimento da tubulação pivô (m)	678,06
P_M (Pa)	0
P_J tubulação pivô-central (Pa)	127.486,45
Z_M (m)	0
Z_J tubulação pivô (m)	5,54
H_{sg} (m)	-1,0
H_{ps} (mca)	0,4
H_{p_local} linha adutora (mca)	5
H_p tubulação pivô-central (mca)	20,04
Rugosidade absoluta linha adutora (mm)	0,006
Altura manométrica total (mca)	58,26

Tabela A.3- Custos fixos, variáveis das culturas e dos equipamentos para diferentes sistemas

Milho – ciclo (dias)	140		
Milho – custo variável (R\$/ha.ciclo)	2.349,36		
Milho – custo fixo (R\$/ha.ciclo)	255,79		
Milho – custo operacional (R\$/ha.ciclo)	2605,14		
Milho – custo operacional pivô (R\$.ciclo)	377.953,71		
Soja – ciclo (dias)	130		
Soja – custo variável (R\$/ha.ciclo)	3.117,14		
Soja – custo fixo (R\$/ha.ciclo)	350,13		
Soja – custo operacional (R\$/ha.ciclo)	3.467,27		
Soja – custo operacional pivô (R\$.ciclo)	503.031,53		
Custo operacional milho + soja mensal	99.905,71		
Diâmetro canalização adutora (m)	0,35	0,40	0,50
Modelo de bomba KSB adequada	200-40	200-40	200-33
Custo de aquisição da bomba (R\$)	61.184	59.709	51.398

Custo inicial diverso (aspersores, tubulação pivô-central, acessórios, canalização de sucção...) (R\$)	500.000
--	---------

Tabela A.5 - Dados da receita

Cultura	Milho	Soja
Sacos por hectare	165	60
Preço médio (R\$)	38	75
Ciclo da cultura (dias)	140	130
Receita ao mês (R\$)	98.816	76.376
Receita total ao mês (R\$)	175.192	

Tabela A.6 - Comparativo de sistemas sem associação e associação em série

Associação	Sem associação (atual)	2 bombas em série
Modelo KSB adequado	200-40	200-33
Diâmetro bomba (mm)	380	290
Altura manométrica da associação (mca)	58,26	57,6
Altura manométrica por bomba (mca)	58,26	28,80
Vazão da associação (m ³ /h)	690,86	690,86
Rendimento total da associação	0,85	0,795
Potência consumida total (kW)	133,12	132,4
Custo kWh	0,26	0,26
Volume d'água mensal (m ³)	504.430	
Custo metro cúbico d'água (R\$/m ³)	0,05	0,05
Custo mensal de energia (R\$)	25.266	25.080
Custo de aquisição da bomba (R\$)	61.184	48.938
Custo de aquisição da associação (R\$)	61.184	97.876

Figura A.6 - Curvas características dos sistemas e bomba com válvula by-pass

