MODELO DESCRITIVO DA OPERAÇÃO DE CONJUNTOS INJETOR- BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADOS EM POÇOS

FERNANDO CAMPOS MENDONÇA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
"Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia,
Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Maio, 1999

ERRATA

1) Na página 4, último parágrafo, onde se lê:

“Abreu et al. (1987), trabalhando com injetores...”, leia-se

“Abreu et al. (1987), escrevendo sobre injetores...”

2) Na página 5, último parágrafo, onde se lê:

“Ballofett et al. (1955) afirmaram que...”, leia-se

“Ballofett et al. (1955), citados por Botrel (1996), afirmaram que...”

3) Na página 6, 2º parágrafo, onde se lê:

“O autor também afirmou que deve haver uma relação entre os diâmetros dos bocais convergente (d_1) e divergente (d_2), recomendando que $d_1:d_2$ seja de 3:1.”, leia-se

“O autor também afirmou que deve haver uma relação entre os diâmetros dos bocais convergente (d_1) e divergente (d_2), recomendando que $d_1:d_2$ seja de 1:3.”

4) Na página 14, 14ª linha, onde se lê:

c) Hazen-Williams (diâmetro entre 50 e 3000 mm, **nº de Reynolds maior que 10^5**), leia-se

c) Hazen-Williams (diâmetro entre 50 e 3000 mm, **nº de Reynolds maior que 10^4**).

5) Na página 29, 2º parágrafo, onde se lê:

“b) se o valor de ΔH_{bomba} tornar-se negativo”, leia-se

“b) se o valor de ΔH_{bomba} tornar-se negativo ou igual a zero”

6) Na página 48, o título correto da Tabela 3 é **“Tabela 3 - Valores médios dos coeficientes de descarga (C_d) e de perda de carga (K) dos injetores para cada pressão de entrada”**

7) Na página 62, Figura 22, e na página 63, Figuras 23 e 24, onde se lê:

“...Curva $\square$ Útil x D_{boc} para...”, leia-se **“...Curva Δ Útil x D_{boc} para...”**.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Mendonça, Fernando Campos

Modelo descritivo da operação de conjuntos injetor-bomba centrífuga
utilizados em poços / Fernando Campos Mendonça. - - Piracicaba, 1999.
101 p. : il.

Tese (doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999.
Bibliografia.

1. Bomba centrífuga 2. Bomba hidráulica 3. Fonte de água 4. Hidráulica
agrícola 5. Injetor 6. Modelo matemático 7. Poço 8. Programa de computação 9.
Simulação I. Título

CDD 621.67

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O Autor"

“ Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu:”

Há tempo para de nascer e tempo de morrer; tempo de plantar e tempo de arrancar o que se plantou;

tempo de matar e tempo de curar; tempo de derrubar e tempo de edificar;

tempo de chorar e tempo de rir; tempo de prantear e tempo de dançar;

tempo de espalhar pedras e tempo de ajuntar pedras; tempo de abraçar e tempo de afastar-se de abraçar;

tempo de buscar e tempo de perder; tempo de guardar e tempo de deitar fora;

tempo de rasgar e tempo de coser; tempo de estar calado e tempo de falar;

tempo de amar e tempo de odiar; tempo de guerra e tempo de paz.”

(Provérbios, 3:1-8)

Dedico este trabalho a Deus, por me presentear com o tempo, e aos meus pais, Antônio e Antônia, pelo tempo e dedicação para fazer crescer o responsável pela realização deste trabalho.

Ofereço este trabalho à minha esposa, Janea, pela luta, perseverança e apoio durante os vários anos gastos nesta etapa de minha formação profissional.

“Tudo posso naquele que me fortalece” (Fp, 4:13)

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor da vida, pela fé e perseverança sempre concedidas, e pelas próximas bênçãos que certamente virão.

À minha esposa, Janea Falcão dos Santos Mendonça, pela atenção e carinho dispensados a mim e pelas muitas horas concedidas a este trabalho.

Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel, pela amizade, orientação, apoio e incentivo recebidos no decorrer de dez anos de convivência e, principalmente, no decorrer deste trabalho.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pelas condições proporcionadas para a realização deste trabalho.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro concedido. Aos funcionários José Figueiredo, Hélio de Toledo Gomes, Gilmar Batista Grigolon e Antônio César de Souza Rocha, pela amizade, apoio e auxílio na realização deste trabalho.

Aos colegas de curso Luís Fernando de Souza Campeche, Jarbas Honório de Miranda, Sérgio Antônio Veronez de Sousa, Dáucio Ricardo Botelho Alves e Cristina Miranda Alencar, pelo auxílio logístico, na coleta de dados e principalmente pela amizade, contribuições fundamentais à realização desta obra.

Aos demais professores do Curso de Pós-graduação em Irrigação e Drenagem, pela formação científica proporcionada.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xv
SUMMARY.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Injetores.....	3
2.2. Utilidade e capacidade dos injetores.....	4
2.3. Dimensionamento de injetores.....	5
2.4. Rendimento dos injetores.....	6
2.5. Rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga.....	10
2.6. Otimização do bocal do injetor.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1. Pressuposições para o desenvolvimento teórico.....	12
3.2. Perda de carga no sistema injetor-bomba centrífuga.....	15
3.2.1. Perda de carga no bocal do injetor.....	16
3.2.2. Combinação 1 (Flamant - Flamant).....	17
3.2.3. Combinação 2 (Flamant - Hazen-Williams).....	19
3.2.4. Combinação 3 (Hazen-Williams - Hazen-Williams).....	20
3.3. Explicitação da vazão circulante (q _{circ}) em equações solucionáveis por métodos numéricos.....	20
3.3.1. Combinação 1 - (Flamant - Flamant).....	21
3.3.2. Combinação 2 (Flamant - Hazen-Williams).....	24
3.3.3. Combinação 3 (Hazen-Williams - Hazen-Williams).....	25
3.3.4. Resolução das equações de vazão circulante (q _{circ}).....	26
3.4. Cálculo do rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga.....	27
3.5. Otimização do bocal do injetor.....	29
3.6. Montagem experimental.....	30
3.6.1. Descrição geral do experimento.....	30
3.6.2. Testes para obtenção de parâmetros das bombas centrífugas.....	31
3.6.3. Testes para obtenção de parâmetros dos injetores.....	31
3.6.4. Cálculos com o modelo matemático proposto.....	34
3.6.5. Testes com o sistema injetor-bomba centrífuga.....	43
3.6.6. Equipamentos empregados nos experimentos.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1. Ensaio das bombas centrífugas.....	46
4.2. Ensaio dos injetores.....	48
4.3. Resultados simulados.....	49
4.4. Otimização dos bocais dos injetores.....	60
5. CONCLUSÕES.....	66
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Esquema de injetor para bombas de poços	3
Figura 2 - Características de $\mu(\delta)$ e $\eta(\delta)$ para m constante.....	7
Figura 3 - Variação dos coeficientes μ e δ para $\eta = 0,3$ e vários valores de m.....	8
Figura 4 - Sistema injetor-bomba centrífuga	11
Figura 5 - Esquema experimental para obtenção dos parâmetros dos injetores	30
Figura 6 - Esquema de testes com o sistema injetor-bomba centrífuga	41
Figura 7 - Representação gráfica dos dados observados e estimados - Bomba JACUZZI mod. 1VJF15-M 38J	47
Figura 8 - Representação gráfica dos dados observados e estimados - Bomba JACUZZI mod. 2VJF15-T 39B	47
Figura 9 - Representação gráfica dos dados observados e estimados - Bomba JACUZZI mod. 3VJE15-M 39G.....	48
Figura 10 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 3VJE15-M 39 G – Altura de sucção de 16,47 m.....	50
Figura 11 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 2VJF15-T 39 B – Altura de sucção de 16,47 m.....	51
Figura 12 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 1VJF15-M 38 J – Altura de sucção de 16,47 m.....	52
Figura 13 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 3VJE15-M 39 G – Altura de sucção de 11,97 m.....	53
Figura 14 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 2VJF15-T 39 B – Altura de sucção de 11,97 m.....	54
Figura 15 - Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 1VJF15-M 38 J – Altura de sucção de 11,97 m.....	55
Figura 16 - Comparação de H_{fsist} e $\Delta H_{útil}$ estimados e observados do con- junto bomba- injetor 1VJF15-M 38J operando a uma altura de suc- ção de 16,47 m	57

Figura 17 - Comparação de Hfsist e $\Delta H_{\text{útil}}$ estimados e observados do conjunto bomba-injetor 3VJE15-M 39G	58
Figura 18 - Comparação de Hfsist e $\Delta H_{\text{útil}}$ estimados e observados do conjunto bomba-injetor 2VJF15-T 39B	58
Figura 19 - Sistema bomba-injetor 3VJE15-M 39G - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)	61
Figura 20 - Sistema bomba-injetor 3VJE15-M 39G - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)	61
Figura 21 - Sistema bomba-injetor 2VJF15-T 39B - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)	62
Figura 22 - Sistema bomba-injetor 2VJF15-T 39B - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)	62
Figura 23 - Sistema bomba-injetor 1VJF15-M 38J - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)	63
Figura 24 - Sistema bomba-injetor 1VJF15-M 38J - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)	63

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Combinações de fórmulas de perda de carga de acordo com o diâmetro das tubulações de recirculação e sucção.....	16
Tabela 2 - Conjuntos bomba-injetor JACUZZI utilizados no experimento.....	30
Tabela 3 - Valores médios e média geral dos coeficientes de descarga (C_d) e de perda de carga dos injetores para cada pressão de entrada.....	48
Tabela 4 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 1VJF15-M 38J.....	68
Tabela 5 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 2VJF15-T 39B.....	68
Tabela 6 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 3VJE15-M 39G.....	69
Tabela 7 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1.....	70
Tabela 8 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2.....	70
Tabela 9 - Injetor 2VJF15-T 39B (2 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1.....	71
Tabela 10 - Injetor 2VJF15-T 39B (2 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2.....	71
Tabela 11 - Injetor 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1.....	72
Tabela 12 - Injetor 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2.....	73
Tabela 13 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1.....	73
Tabela 14 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2.....	74
Tabela 15 - Injetor 2VJF15-T 39B (2 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1.....	74
Tabela 16 - Injetor 2VJF15-T 39B (2 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2.....	75
Tabela 17 - Injetor 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1.....	75
Tabela 18 - Injetor 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2.....	76
Tabela 19 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 3VJE15-M 39G - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1.....	78
Tabela 20 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 3VJE15-M 39G $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 1.....	78

Tabela 21 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 3VJE15-M 39G - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2	79
Tabela 22 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 3VJE15-M 39G $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 2.....	79
Tabela 23 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 3VJE15-M 39G - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1	80
Tabela 24 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 3VJE15-M 39G $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 1.....	81
Tabela 25 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 3VJE15-M 39G - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2	82
Tabela 26 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 3VJE15-M 39G $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 2.....	83
Tabela 27 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 2VJF15-T 39B - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1	84
Tabela 28 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 2VJF15-T 39B $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 1.....	85
Tabela 29 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 2VJF15-T 39B - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2.....	86
Tabela 30 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 2VJF15-T 39B $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 2.....	87
Tabela 31 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 2VJF15-T 39B - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1	88
Tabela 32 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 2VJF15-T 39B $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 1.....	89

Tabela 33 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 2VJF15-T 39B - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2.....	90
Tabela 34 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 2VJF15-T 39B $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 2.....	91
Tabela 35 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 1VJF15-M 38J - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 1.....	92
Tabela 36 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 1VJF15-M 38J $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 1.....	93
Tabela 37 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 1VJF15-M 38J - $\Delta z = 16,47\text{m}$ - Teste 2.....	94
Tabela 38 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 1VJF15-M 38J $\Delta z=16,47\text{m}$ - Teste 2.....	95
Tabela 39 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 1VJF15-M 38J - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 1.....	96
Tabela 40 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 1VJF15-M 38J $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 1.....	97
Tabela 41 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil - Conjunto 1VJF15-M 38J - $\Delta z = 11,97\text{m}$ - Teste 2.....	98
Tabela 42 - Dados coletados dos sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) - Conjunto 1VJF15-M 38J $\Delta z=11,97\text{m}$ - Teste 2.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

- Q_1 – vazão motriz ou circulante do sistema injetor-bomba centrífuga [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q_2 – vazão succionada pelo injetor [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 Q_d – vazão total do sistema injetor-bomba centrífuga [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 H_1 – pressão do fluido bombeado à entrada do injetor [kPa ou mca]
 H_s – pressão do fluido aspirado à entrada do injetor [kPa ou mca]
 H_d – pressão do fluido à saída do injetor [kPa ou mca]
 d_1 – diâmetro do bocal convergente do injetor [mm]
 d_2 – diâmetro do bocal divergente do injetor [mm]
 μ – razão entre altura líquida de elevação (ΔH_{util}) e altura líquida motriz (H_m)
 $(\mu = \Delta H_{\text{util}}/H_m)$ [-]
 ΔH_{util} – diferencial de pressão útil do conjunto injetor-bomba centrífuga
[kPa ou mca]
 H_m – altura líquida motriz, proporcionada pelo trabalho da bomba centrífuga e pelo desnível entre a mesma e o injetor [kPa ou mca]
 P_s – pressão na saída do injetor [kPa ou mca]
 P_a – pressão na seção contraída do injetor [kPa ou mca]
 P_e – pressão na entrada do injetor [kPa ou mca]
 δ – relação entre vazão motriz e vazão succionada pelo injetor ($\delta = - Q_1/Q_2$) [-]
 η – rendimento do injetor tipo Venturi no recalque de fluidos [%]
 $H = P_s - P_a$ – altura líquida de elevação do fluido após o injetor [kPa ou mca]
 $h = P_e - P_s$ – diferencial de pressão fluido motriz [kPa ou mca]
 μ_0 – valor de μ quando $\delta = 0$ (vazão motriz nula) [-]
 δ_0 – valor de δ quando $\mu = 0$ (pressão totalmente transformada em velocidade na seção de estrangulamento) [-]
 m – relação entre áreas do bocal convergente e divergente do injetor [-]
 S_c – área do bocal convergente do injetor [m^2]
 S_d – área do bocal divergente do injetor [m^2]
 η' – rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga [%]

P_{util} – Potência útil desenvolvida pelo conjunto injetor-bomba centrífuga
[W ou CV]

P_{bomba} – potência desenvolvida pela bomba [W ou CV]

P_{Hf} - potência consumida para suprir a perda de carga do sistema [W ou CV]

C_d – coeficiente de descarga do bocal convergente do injetor [-]

K – coeficiente de perda de carga do injetor [-]

D_{boc} - diâmetro do bocal convergente do injetor [mm]

ΔH_{bomba} – diferencial de pressão proporcionado pela bomba centrífuga
[kPa ou mca]

a, b, c – coeficientes de regressão polinomial da relação vazão *versus* pressão de uma bomba centrífuga [-]

q_{bomba} – vazão da bomba centrífuga [m³ . s⁻¹]

q_{circ} – vazão circulante do conjunto injetor-bomba centrífuga [m³ . s⁻¹]

S_{bocal} – área do bocal convergente do injetor [m²]

g – aceleração da gravidade [m . s⁻²]

H_1 – pressão de alimentação do bocal do injetor (entrada) [kPa ou mca]

H_2 – pressão de descarga do bocal do injetor (saída) [kPa ou mca]

q_{util} – vazão útil do conjunto injetor-bomba centrífuga [m³ . s⁻¹]

$\Delta Z_1, \Delta Z_2$ – diferenças de nível entre a bomba centrífuga e o injetor, considerado-se os trechos 1 e 2 da tubulação de sucção, respectivamente [m]

ΔZ_{sub} – profundidade de imersão do injetor [m]

$H_{\text{f}_{\text{sist}}}$ – perda de carga no sistema (conjunto injetor-bomba centrífuga) [kPa ou mca]

$H_{\text{f}_{\text{boc}}}$ – perda de carga no bocal do injetor [kPa ou mca]

H_{f_1} – perda de carga no trecho 1 da tubulação de sucção [kPa ou mca]

H_{f_2} – perda de carga no trecho 2 da tubulação de sucção [kPa ou mca]

P_{Hfsist} – potência dissipada pela perda de carga do sistema injetor-bomba centrífuga
[W ou CV]

P_{hid} – potência hidráulica desenvolvida por um dispositivo de bombeamento
[W ou CV]

γ - peso específico do fluido [kgf/m³]

Q – vazão de um fluido qualquer em um sistema de bombeamento [m^3/s]

H' – pressão de um sistema de bombeamento [kPa ou mca]

H_f – perda de carga em um sistema hidráulico [kPa ou mca]

b_i – coeficiente de atrito de Flamant para o trecho “i” da tubulação de sucção [-]

L_i – comprimento do trecho “i” da tubulação de sucção [m]

D_i – diâmetro do trecho “i” da tubulação de sucção [mm]

V_i – velocidade de escoamento no trecho “i” da tubulação de sucção [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

S_i – área da seção transversal do trecho “i” da tubulação de sucção [m^2]

C_i – coeficiente de atrito da fórmula de Hazen – Williams para o trecho “i” da tubulação de sucção [-]

$H_{f_{\text{boc}}}$ – perda de carga no bocal do injetor [kPa ou mca]

V_{boc} – velocidade de escoamento de fluido no bocal do injetor [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

q_{max} – vazão máxima da bomba centrífuga [m^3/s]

E_1, E_2, E_3 – energia disponível nos pontos 1 (imediatamente antes do injetor), 2 (sucção do injetor) e 3 (imediatamente após o injetor) [W ou CV]

$H_{fE_{1-3}}$ – energia dissipada devido à perda de carga do injetor [W ou CV]

π - constante matemática ($\pi = 3,141592$) [-]

MODELO DESCRITIVO DA OPERAÇÃO DE CONJUNTOS INJETOR- BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZADOS EM POÇOS

Autor: FERNANDO CAMPOS MENDONÇA

Orientador: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um modelo matemático para simulação da operação de conjuntos formados por uma bomba centrífuga e um injetor, para retirada de água de poços. O modelo simula a operação e permite obter a máxima pressão útil proporcionada pela associação bomba-injetor. Utiliza como parâmetros de entrada as características individuais da bomba, do injetor e da tubulação de sucção, simulando-se o funcionamento do conjunto na sucção de água de poços. Os parâmetros da bomba são a curva de vazão *versus* pressão e a vazão máxima. A tubulação de sucção foi dividida em dois trechos: descida ao poço e subida até a bomba. Os parâmetros da tubulação são o diâmetro, material constituinte, comprimento e desnível do trecho entre a bomba e o nível da água no poço. Os parâmetros do injetor a inserir no modelo são o coeficiente de descarga, coeficiente de perda de carga e diâmetro do bocal. Para aferir os resultados da simulação do modelo foram feitos dois experimentos, utilizando-se três conjuntos bomba-injetor de diferentes dimensões e capacidade operacional. O modelo proporcionou um bom ajuste da relação vazão útil *versus* pressão útil, bem como do rendimento da associação bomba-injetor para todos os conjuntos. A partir dos resultados de simulação do modelo é possível otimizar o diâmetro do bocal do injetor a fim de se obter a máxima pressão útil possível. Isto possibilita seu uso no planejamento de instalações de conjuntos bomba-injetor e também a otimização da pressão útil fornecida pelos mesmos, chegando ao máximo rendimento.

OPERATIONAL DESCRIPTIVE MODEL OF CENTRIFUGAL-JET PUMP ASSOCIATIONS USED IN WELLS

Author: FERNANDO CAMPOS MENDONÇA
Adviser: PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

SUMMARY

This work aimed the development of a mathematical model for simulating the operation of centrifugal and jet pump associations, for suctioning water of wells. The model simulates the operation and allows to obtain the maximum net pressure head provided by centrifugal-jet pump associations, varying the jet pump nozzle diameter. The model uses, as incoming parameters, the individual parameters of centrifugal pumps, jet pumps, and suction pipeline, allowing a simulation of water suction from centrifugal-jet pump associations. The centrifugal pump parameters are the relation between flow rate and pressure head, and the maximum flow rate. The suction pipeline is divided on two parts: the first one going down to the well, and the second one, going back up to the centrifugal pump. Data from the suction pipeline are: pipe diameter, building material, length and level difference from centrifugal pump to well's water level. The jet pump parameters for inserting on the model are the nozzle discharge coefficient, friction loss coefficient and the nozzle diameter. In order to verify the results of simulation, it were made two experiments, using three centrifugal-jet pump associations of different dimensions and operational capacity. The model allowed a good adjustment for the flow rate-pressure-head relation, as well as the pressure efficiency of jet pump-centrifugal pump associations, for all associations. Model has also allowed the optimization of jet pump nozzle diameter, in order to obtain the maximum net pressure head. This allows its use on designing installations of centrifugal-jet pump associations, as well as the optimization of net pressure head provided by the jet pump nozzle, reaching the maximum efficiency

1. INTRODUÇÃO

A instalação de uma unidade de bombeamento é projetada para determinadas condições físicas, considerando-se várias situações e vários parâmetros. Entre eles estão os limites superior e inferior de altura de sucção. Uma bomba centrífuga só é capaz de retirar água de uma fonte qualquer, sem o auxílio de qualquer outro equipamento, até um certo limite de profundidade. Essa profundidade depende das características da bomba, da tubulação de sucção, da pressão atmosférica e da temperatura reinante no local da fonte de água.

A pressão atmosférica proporciona a energia necessária à elevação de água. Por este motivo a profundidade do poço não pode ser maior do que o valor da pressão atmosférica local (convertida em metros de coluna do líquido succionado), a não ser que se consiga aumentar o nível de energia disponível na sucção. Uma forma de se fazer isto é a utilização de injetores.

Os injetores normalmente são associados às bombas centrífugas para retirar água a uma profundidade maior do que seria possível utilizando-se apenas essas bombas. São utilizados também na quimigação, escorva de bombas hidráulicas, aeração de água e lavagem de máquinas agrícolas, entre outras funções.

As principais vantagens da utilização de injetores são a ausência de partes móveis, simplicidade de construção, dispensa de lubrificação, facilidade de instalação, baixo custo de aquisição e manutenção, boa relação custo-benefício e grande variação de vazão. As principais limitações são a faixa de pressão de para funcionamento (normalmente abaixo de 407,6 kPa, ou 40 mca) e o rendimento energético do equipamento (transmissão de energia), que geralmente situa-se abaixo de 30%.

Observa-se porém, que a sua utilização geralmente não se realiza com base em características técnicas bem definidas, como é o caso dos sistemas de bombea-

mento de água em poços (Botrel, 1996). Para que se possa utilizar adequadamente a associação injetor-bomba centrífuga é necessário conhecer as características hidráulicas da bomba e do injetor, bem como as perdas de carga que ocorrem no processo de sucção de água pelo sistema de bombeamento.

Os objetivos deste trabalho foram: a) obtenção de um modelo matemático para descrever a operação de conjuntos formados por um injetor e uma bomba centrífuga operando em poços, a fim de determinar a relação vazão útil *versus* pressão útil do conjunto injetor-bomba centrífuga e a maximização da pressão útil obtida através da determinação do diâmetro ótimo do bocal do injetor; b) o desenvolvimento de um programa computacional para solucionar as equações do modelo matemático.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Injetores

Botrel (1996) afirmou que, inicialmente, os tubos Venturi só foram utilizados para medição de vazão. Segundo Delmée (1983), G.B. Venturi desenvolveu, em 1797, o primeiro trabalho sobre tubos com seção estrangulada para medição de vazão, em pesquisas sobre o princípio de comunicação lateral do movimento nos fluidos. Somente 90 anos depois é que Clemens Herschel desenvolveu o tubo Venturi.

Troskolanski (1977) observou que os aparelhos a jato valem-se do princípio de Venturi, sendo definidos como dispositivos apropriados para aspirar e recalcar simultaneamente um fluido (líquido, gás ou vapor) ou uma mistura fluido-sólido.

Macintyre (1987) citou várias aplicações da associação entre injetor e bomba centrífuga: obtenção de vácuo em recipientes de instalações industriais de secagem e em certos condensadores de vapor; injeção de ar para o interior de reservatórios hidropneumáticos; esvaziamento de poços de esgotos e retirada de água de poços com profundidade da ordem de 20 a 40 metros, ou até mais que isto.

O autor afirmou que o funcionamento dos injetores baseia-se numa aplicação direta do Princípio da Conservação da Energia. São dispositivos que constam essencialmente de um tubo aspirador e um bocal convergente, alimentando um bocal convergente-divergente, isto é, um “Venturi” (Vide Figura 1). Os injetores são muito empregados em instalações de poços freáticos de profundidades relativamente pequenas, porém superiores às que permitiriam uma bomba funcionar segundo a instalação convencional, isto é, com a bomba acima do nível do reservatório.

A vazão motriz (Q_1), proveniente de uma bomba e que produzirá a elevação desejada, atravessa o bocal convergente e passa por uma câmara de mistura, che-

gando, a seguir, ao bocal divergente (difusor). Na passagem pelo bocal convergente a pressão diminui, podendo tornar-se menor que a pressão atmosférica na câmara de mistura. Quando isto ocorre a pressão relativa negativa formada no injetor, aliada à velocidade da veia líquida, produz o arrasto do ar existente na tubulação de sucção do injetor e, em seguida, do próprio líquido que deve ser aspirado (Q_2), seguindo ambos pela tubulação de recalque.

Figura 1- Esquema de injetor para bombas de poços

Macintyre (1987) recomendou a utilização do injetor quando a profundidade do poço for maior que 6 ou 7 metros, ou melhor, quando for superior ao valor da máxima altura estática de aspiração permitida.

2.2. Utilidade e capacidade dos injetores

Abreu et al. (1987), trabalhando com injetores para injeção de fertilizantes, observaram que o fluxo de fertilizante injetado tem uma relação direta com a pressão da água na entrada do mecanismo, com pressão mínima em torno de 152,85 kPa (15

mca). Os autores ainda relataram que os modelos usuais apresentam vazão entre 0,05 e 3 m³/h (50 e 3000 L/h), sendo que a vazão mínima a passar pelo injetor depende da sua capacidade, variando de 1 m³/h (para injetores de 1") a mais de 20 m³/h (para alguns injetores de 2"). Observando os catálogos dos injetores, os autores notaram que as vazões são referentes à água na forma natural, e que a sua capacidade diminui à medida que aumenta a densidade da solução de fertilizante.

Ferreira (1994) estudou dois tipos de injetores tipo Venturi, constatando que a vazão de sucção aumenta com o aumento do diferencial de pressão, para uma mesma pressão de alimentação. A vazão de sucção diminui com o acréscimo da pressão de alimentação, para um mesmo diferencial de pressão. A última conclusão do autor foi que a vazão de sucção aumenta juntamente com o aumento da pressão relativa de sucção (tensão), para todos os casos estudados.

Macintyre (1987) citou um caso específico, o das bombas fabricadas pela Jacuzzi do Brasil. As bombas possuem um registro de controle de vazão incorporado à própria bomba, que também possui um manômetro adaptado. As bombas são fabricadas para potências de 1/3 a 15 CV, conforme o modelo, podendo atender à profundidade de mais de 100 m, altura manométrica de 200 m e descargas de até 26 m³/h.

2.3. Dimensionamento de injetores

Feitosa Filho & Arruda (1994) observaram que os parâmetros para dimensionamento dos injetores são: vazão que deve passar pelo injetor, pressão de serviço próximo ao início da seção convergente do injetor, altura de sucção e pressão negativa desejada na seção estrangulada do injetor.

Urquhart (1950) afirmou que o ângulo do bocal convergente do venturímetro é 21°, o diâmetro da garganta deve estar entre 1/2 e 1/4 do diâmetro da tubulação de entrada, e o ângulo de divergência, entre 5 e 7°. Ballofett et al. (1955) afirmaram que o diâmetro da garganta deve ser de 1/3 do diâmetro da tubulação em que o injetor está instalado. A seção convergente pode ter um comprimento de 2,5 vezes o diâmetro da tubulação, correspondendo a um ângulo de 15°, e a seção divergente deve ter um com-

primento de 7,5 vezes o diâmetro da tubulação, correspondente a um ângulo de 5° (ângulo ótimo). Vennard & Street (1978) recomendaram um cone de entrada lisa com ângulo em torno de 20° , um cilindro de seção curta e um cone difusor com ângulo entre 5 e 7° para minimizar a perda de carga.

Outros autores observaram que a relação entre os diâmetros ou áreas dos bocais divergente e convergente também são importantes para o funcionamento dos injetores. Russel (1971) afirmou que a porção convergente do medidor Venturi varia de 2 a 2,5 vezes o diâmetro da tubulação, e a porção divergente deve ter um ângulo de 5° . O autor também afirmou que deve haver uma relação entre os diâmetros dos bocais convergente (d_1) e divergente (d_2), recomendando que $d_1:d_2$ seja de 3:1.

Botrel (1996) desenvolveu um modelo computacional que permite simular a relação vazão *versus* pressão de um conjunto injetor-bomba centrífuga a partir das características hidráulicas próprias da bomba e do injetor. O autor dividiu seu trabalho em duas partes: a) simulação do relacionamento entre a vazão e a pressão de um conjunto injetor-bomba centrífuga, a partir do conhecimento dos parâmetros hidráulicos próprios do injetor e da bomba centrífuga; e b) simulação da máxima pressão que se pode obter com uma determinada bomba centrífuga em função do diâmetro do bocal do injetor, a uma vazão preestabelecida. O autor criou dois modelos matemáticos, e também dois programas computacionais para resolvê-los. Após a criação dos modelos e dos programas, o autor montou um experimento para testar e validar os resultados de seus modelos. Os resultados validaram os modelos criados, permitindo conclusões a respeito da maximização de pressão para um determinado injetor e do rendimento da associação injetor-bomba centrífuga.

2.4. Rendimento dos injetores

Silvester & Mueller (1968) afirmaram que a eficiência dos injetores pode ser expressa por várias fórmulas, dependendo dos pontos de tomada de pressão e da forma de energia considerada em cada ponto. Acrescentaram que na dedução da fórmula geral do rendimento de injetores tipo Venturi, a relação de energia utilizada baseia-se no

conceito de energia útil para realizar o trabalho em relação à energia gasta para executá-lo.

Flügel¹, citado por Hirschmann(1958) afirmou que qualquer injetor de água tem como valor característico o quociente μ , dado por:

$$\mu = \frac{P_s - P_a}{P_e - P_s} \quad (1)$$

em que,

μ - razão entre altura líquida de elevação ($H_{\text{útil}}$) e altura líquida motriz (H_m)

P_s - pressão na saída do injetor (após)

P_a - pressão na seção contraída do injetor

P_e - pressão na entrada (antes) do injetor

O autor também citou como características do injetor o quociente de vazão (δ) e o rendimento (η):

$$\delta = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2)$$

em que,

Q_1 - vazão de elevação

Q_2 - vazão motriz

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} \frac{H}{h} = \delta \mu \quad (3)$$

Carlier(1968) utilizou a mesma expressão de Flügel para o rendimento global de ejetores, admitindo que os fluidos motor e de sucção são comuns (mesmo tipo fluido). O autor assumiu que as curvas características de $H(Q_2)$ e $\eta(Q_2)$, sob carga motriz constante (h), são semelhantes às das bombas centrífugas. O rendimento encontrado foi sempre pequeno, no máximo 0,3. O rendimento máximo para um injetor é dado pelo valor máximo do produto de μ por δ , isto é, para

$$\mu = \frac{\mu_o}{2} \quad \delta = \frac{\delta_o}{2} \quad (4)$$

¹ FLÜGEL, G. Berechnung Von Strahlapparaten, VDI - Zeitschrift Bd. 83, Nr.38.

em que,

μ_0 - valor de μ quando $\delta = 0$ (vazão motriz nula)

δ_0 - valor de δ quando $\mu = 0$ (pressão totalmente transformada em velocidade na seção de estrangulamento)

Além de μ e δ Carlier(1968) citou outro parâmetro característico do emissor, a relação m :

$$m = \frac{S_c}{S_d} \quad (5)$$

em que,

S_c - área do bocal convergente

S_d - área do bocal divergente

O autor apresentou um gráfico que mostra as características de $\mu(\delta)$ e $\eta(\delta)$ para valores constantes da relação m , conforme mostra a Figura 2. De acordo com o gráfico, o maior rendimento é obtido quando $m=0,25$.

Figura 2 - Características de $\mu(\delta)$ e $\eta(\delta)$ para m constante

O autor também apresentou um gráfico da variação dos coeficientes μ e δ para um rendimento fixo e igual a 0,3 ($\eta=0,3$), conforme mostra a Figura 3.

A relação m é, na verdade, uma relação entre os diâmetros dos bocais convergente e divergente. Feitosa Filho et al. (1998) avaliou o desempenho de três injeto-

res tipo Venturi com câmara de mistura e relação m igual a 0,509 , 0,723 e 0,932 , comparando-os a um injetor tipo Venturi sem câmara de mistura. A presença da câmara de mistura aumentou o rendimento dos injetores, e o maior rendimento foi conseguido para o injetor de relação m igual a 0,509. Os autores afirmaram que a relação m influenciou no desempenho dos equipamentos, principalmente na vazão succionada e no rendimento. Também afirmaram que a velocidade do fluido motriz no interior da câmara de mistura foi o parâmetro que mais interferiu na variação da vazão succionada e no rendimento dos injetores.

Figura 3 - Variação dos coeficientes μ e δ para $\eta = 0,3$ e vários valores de m

Zárate Rojas et al. (1996) apresentaram metodologias de desenvolvimento e avaliação de dois injetores tipo venturi para tubulações com diâmetro de 3/4 e de 1 polegada (20 e 25 mm, respectivamente). Os autores afirmaram que o maior rendimento (10,46%) foi obtido com o injetor de 1 polegada, sob pressão de alimentação de 101,9 kPa (10 mca). Também observaram que a vazão de sucção dos injetores diminuiu com o aumento da tensão de sucção.

Feitosa Filho et al. (1996) afirmaram que o injetor tipo Venturi é um equipamento que apresenta baixo rendimento e seu uso é criticado por este motivo. Os autores deduziram equações para determinar a perda de carga e o rendimento dos injeto-

res, visando determinar as melhores condições de trabalho para cada equipamento testado. Observaram que a perda de carga média foi de 37,5% da pressão de serviço e que o maior rendimento obtido foi de 15,4%. Os autores também fizeram análises de regressão polinomial para a vazão succionada em função da pressão motriz, da vazão motriz e do diferencial de pressão dos injetores, concluindo que os dados analisados são melhor representados por um modelo polinomial quadrático.

2.5. Rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga

Botrel (1996) afirmou que o rendimento energético do conjunto injetor-bomba centrífuga sofre redução com o aumento do coeficiente de descarga do bocal injetor, da altura manométrica resultante, da área do bocal do injetor e do coeficiente de perda de carga do injetor.

O autor considerou como rendimento hidráulico do conjunto injetor-bomba centrífuga (η') a relação entre a potência hidráulica proveniente do conjunto injetor-bomba centrífuga e a potência hidráulica desenvolvida pela bomba centrífuga, ou seja:

$$\eta' = \frac{P_{util}}{P_{bomba}} \quad (6)$$

em que,

η' - rendimento hidráulico do conjunto injetor-bomba centrífuga

P_{bomba} - potência desenvolvida pela bomba

P_{util} - potência desenvolvida pelo conjunto injetor bomba centrífuga

A potência útil pode ser descrita pela seguinte equação:

$$P_{util} = P_{bomba} - P_{Hf} \quad (7)$$

Introduzindo os termos da Equação 7 na Equação 6, o autor obteve:

$$\eta' = 1 - \frac{P_{Hf}}{P_{bomba}} \quad (8)$$

em que,

P_{Hf} - potência consumida para suprir a perda de carga do sistema

2.6. Otimização do bocal do injetor

Botrel (1996) definiu o injetor de bocal ótimo como sendo aquele que produz a máxima pressão quando associado a uma bomba centrífuga, para uma vazão preestabelecida. O autor criou um modelo matemático para encontrar o bocal ótimo de um injetor associado a uma bomba centrífuga.

Para proceder a otimização do bocal do injetor o autor utilizou um processo de varredura e uma equação que relaciona a vazão útil e o diferencial de pressão útil. Esta equação tem como parâmetros de entrada: os coeficiente de descarga e de perda de carga do injetor (C_d e K , respectivamente), o diâmetro do bocal do injetor (D_{boc}), os parâmetros característicos da relação vazão-pressão de uma bomba centrífuga e a vazão útil (q_{util}) do sistema. Estabelecendo um valor para vazão útil e para o diâmetro do bocal do injetor, a única variável restante é o diferencial de pressão útil (ΔH_{util}), que pode ser calculado por métodos numéricos. O autor utilizou o método de Newton-Raphson para solucionar a equação obtida.

O autor realizou o processo de varredura variando o valor do diâmetro do bocal do injetor desde um valor mínimo até um máximo e repetindo o cálculo do diferencial de pressão útil através do modelo matemático. Para agilizar a solução o autor criou um modelo computacional que apresenta, ao final dos cálculos, uma tabela com os valores de diâmetro do bocal, vazão útil e diferencial de pressão útil. Assim é possível determinar qual é o diâmetro que proporciona o maior diferencial de pressão para uma determinada vazão útil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Pressuposições para o desenvolvimento teórico

Há quatro pressuposições propostas por Botrel (1996) que devem ser feitas para descrever a operação de conjuntos injetor-bomba centrífuga.

A primeira pressuposição é que a relação entre vazão e pressão em bombas centrífugas é conhecida e pode ser representada pela equação

$$\Delta H_{bomba} = a + b q_{bomba} + c q_{bomba}^2 \quad (9)$$

em que,

ΔH_{bomba} - diferença de pressão propiciada pela bomba centrífuga

a, b e c - coeficientes da regressão polinomial

q_{bomba} - vazão da bomba centrífuga

A segunda é que a relação entre vazão e pressão do bocal do injetor também é conhecida e pode ser representada pela equação

$$q_{circ} = C_d S_{bocal} \sqrt{2g (H_1 - H_2)} \quad (10)$$

em que,

q_{circ} - vazão de recirculação

C_d - coeficiente de descarga do bocal do injetor

S_{bocal} - área do bocal do injetor

g - aceleração da gravidade

H_1 - pressão de alimentação do bocal do injetor (entrada)

H_2 - pressão de descarga do bocal do injetor (saída)

A terceira é que o acoplamento do injetor será feito na tubulação de sucção

da bomba centrífuga. Para descrever a perda de carga que ocorre no sistema formado pela bomba e o injetor, são utilizadas as fórmulas de perda de carga já conhecidas.

Para facilitar a compreensão apresenta-se, na Figura 4, o esquema de montagem do sistema injetor-bomba centrífuga.

Figura 4 - Sistema injetor-bomba centrífuga

Pelo esquema é possível perceber que a bomba centrífuga envia parte de sua vazão para a tubulação de sucção (trecho 1). A passagem da água pelo bocal do injetor promove a sucção de água da fonte (poço, rio, lago etc.). A vazão elevada (q_{bomba}) é composta por duas partes: a vazão circulante (q_{circ}) e a vazão útil (q_{util}).

A perda de carga que ocorre no sistema é o somatório das perdas de carga

que ocorrem no bocal do injetor, no trecho 1 e no trecho 2 da tubulação de sucção da bomba centrífuga, ou seja:

$$Hf_{sist} = Hf_{boc} + Hf_1 + Hf_2 \quad (11)$$

em que,

Hf_{sist} - perda de carga que ocorre no sistema injetor-bomba centrífuga

Hf_{boc} - perda de carga no bocal do injetor

Hf_1 - perda de carga no trecho da tubulação anterior ao injetor

Hf_2 - perda de carga no trecho da tubulação posterior ao injetor

Várias fórmulas de perda de carga podem ser utilizadas nos cálculos, desde que sejam respeitadas as suas recomendações de utilização. Em condutos de escoamento forçado, as fórmulas mais utilizadas são:

- a) Universal (Darcy-Weissbach);
- b) Flamant (diâmetro menor ou igual a 50 mm);
- c) Hazen-Williams (diâmetro entre 50 e 3000 mm, nº de Reynolds maior que 10^5).

A quarta pressuposição a respeito da operação de conjuntos injetor-bomba centrífuga é que a potência desenvolvida pela bomba é igual à potência hidráulica do conjunto injetor-bomba centrífuga mais a potência hidráulica perdida no sistema de recirculação:

$$P_{bomba} = P_{util} + P_{Hfsist} \quad (12)$$

em que,

P_{bomba} - potência da bomba centrífuga

P_{util} - potência útil do sistema injetor-bomba centrífuga

P_{Hfsist} - potência dissipada devido à perda de carga do sistema injetor-bomba centrífuga

A potência hidráulica pode ser obtida pela equação:

$$P_{hid} = \gamma Q H, \quad (13)$$

em que,

γ - peso específico do líquido

Q - vazão

H' - pressão

3.2. Perda de carga no sistema injetor-bomba centrífuga

No Brasil as fórmulas mais utilizadas em condutos forçados de projetos são as de Flamant e Hazen-Williams.

A equação de Flamant é utilizada em condutos com diâmetro igual ou inferior a 50 mm, e normalmente é representada da seguinte forma:

$$H_f = \frac{4}{D^{1,25}} \frac{b L}{V^{1,75}} \quad (14)$$

ou ainda

$$H_f = \frac{4}{D^{1,25}} \frac{b L}{S^{1,75}} Q^{1,75} \quad (15)$$

em que,

b - fator de atrito, que depende do material da tubulação

S - área da seção transversal da tubulação

Q - vazão que passa pela tubulação

L - comprimento da tubulação

A equação de Hazen-Williams é utilizada em condutos com diâmetro entre 50 e 3000 mm, em escoamentos de regime turbulento (Número de Reynolds acima de 5×10^5). Esta equação tem a seguinte forma:

$$H_f = \frac{10,65}{C^{1,852}} \frac{L}{D^{4,87}} Q^{1,852} \quad (16)$$

em que,

C - fator de atrito, que depende do material da tubulação e do tempo de uso

A partir daqui será feito o desenvolvimento teórico utilizando-se as combinações possíveis entre as fórmulas de perda de carga de Flamant e de Hazen-Williams, para os dois trechos da tubulação de sucção. Para o bocal do injetor será utilizada a fórmula de perdas de carga localizadas.

Considerando-se o diâmetro dos trechos 1 e 2 da tubulação de sucção pode-se ter as seguintes combinações de uso das formulas de perda de carga:

Tabela 1 - Combinações de fórmulas de perda de carga de acordo com o diâmetro das tubulações de recirculação e sucção

Combinação	Tubulação de Sucção			
	Trecho 1	Diâmetro (mm)	Trecho 2	Diâmetro (mm)
1	Flamant	≤ 50	Flamant	≤ 50
2	Flamant	≤ 50	Hazen-Williams	> 50
3	Hazen-Williams	> 50	Flamant	≤ 50
4	Hazen-Williams	> 50	Hazen-Williams	> 50

Há um detalhe, porém, que reduz o número de combinações possíveis. Os injetores são construídos de tal forma que o trecho 1 da tubulação (descida) tem diâmetro inferior ao do trecho 2 (subida). Assim conclui-se que não há a possibilidade de ocorrência do uso da fórmula de Hazen-Williams no primeiro trecho e de Flamant no segundo, eliminando-se a Combinação 3.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos e do modelo computacional incluirão, portanto, as combinações 1, 2 e 4 no cálculo das perdas de carga na tubulação de sucção.

3.2.1. Perda de carga no bocal do injetor

A perda de carga no bocal não muda com o diâmetro dos trechos 1 e 2 da tubulação de sucção, mas varia com a vazão circulante (q_{circ}). A equação que representa essa perda de carga é:

$$Hf_{boc} = K \frac{V_{boc}^2}{2g} \quad (17)$$

em que,

K - constante obtida experimentalmente

V_{boc} - velocidade de escoamento do líquido no bocal

g - aceleração da gravidade

Sabe-se que a vazão que passa pelo bocal é a vazão circulante (q_{circ}). Pela Equação da Continuidade é possível concluir que:

$$V = \frac{Q}{S} \quad (18)$$

em que,

Q - vazão que passa pela seção circular de um conduto forçado

V - velocidade de escoamento

S - área da seção transversal de um conduto forçado

Pode-se, então, reescrever a equação 17 da seguinte forma:

$$Hf_{boc} = \frac{K}{2g S_{boc}^2} q_{circ}^2 \quad (19)$$

É possível reescrever a equação 19 atribuindo-se um valor para o diâmetro do bocal:

$$Hf_{boc} = K_1 q_{circ}^2 \quad (20)$$

em que,

$$K_1 = \frac{K}{2g S_{boc}^2} \quad (21)$$

S_{boc} - área da seção transversal do bocal do injetor

3.2.2. Combinação 1 (Flamant - Flamant)

Observando-se a Figura 4 percebe-se que pelo trecho 1 da tubulação de sucção passa a vazão circulante (q_{circ}). Após o injetor, no trecho 2, passam a vazão circulante e a vazão útil (q_{util}). A soma dessas vazões é a vazão do sistema injetor-bomba, ou simplesmente vazão da bomba (q_{bomba}). Esse esquema de vazões de cada trecho será utilizado, juntamente com a Equação da Continuidade, para os cálculos de perda de carga na tubulação de sucção.

Nos trechos 1 e 2 dessa tubulação as perdas de carga são representadas pelas equações a seguir:

Trecho 1:

$$Hf_1 = \frac{4 \ b_1 \ L_1}{D_1^{1,25} \ S_1^{1,75}} q_{circ}^{1,75} \quad (22)$$

em que:

Hf_1 - perda de carga no trecho 1

b_1 - fator de atrito da fórmula de Flamant para o trecho 1

L_1 - comprimento do trecho 1

D_1 - diâmetro do trecho 1

S_1 - área da secção transversal do trecho 1

q_{circ} - vazão circulante

Trecho 2:

$$Hf_2 = \frac{4 \ b_2 \ L_2}{D_2^{1,25} \ S_2^{1,75}} q_{bomba}^{1,75} \quad (23)$$

em que,

Hf_2 - perda de carga no trecho 2

b_2 - fator de atrito da fórmula de Flamant para o trecho 2

L_2 - comprimento do trecho 2

D_2 - diâmetro do trecho 2

S_2 - área da secção transversal do trecho 2

q_{bomba} - vazão da bomba

Estabelecendo-se valores para o diâmetro e o comprimento de cada trecho da tubulação de sucção, e especificando o material da tubulação, é possível reescrever as Equações 22 e 23 da seguinte forma:

$$Hf_1 = K_2 \ q_{circ}^{1,75} \quad (24)$$

$$Hf_2 = K_3 \ q_{bomba}^{1,75} \quad (25)$$

em que,

$$K_2 = \frac{4 \ b_1 \ L_1}{D_1^{1,25} \ S_1^{1,75}} \quad (26)$$

$$K_3 = \frac{4 \ b_2 \ L_2}{D_2^{1,25} \ S_2^{1,75}} \quad (27)$$

A perda de carga que ocorre no sistema formado pelo injetor e pelos dois trechos da tubulação de sucção é representada pela soma das perdas de carga de cada um dos componentes. Introduzindo-se os termos das Equações 20, 24 e 25 na equação 11 obtém-se:

$$Hf_{sist} = K_1 q_{circ}^2 + K_2 q_{circ}^{1,75} + K_3 q_{bomba}^{1,75} \quad (28)$$

3.2.3. Combinação 2 (Flamant - Hazen-Williams)

A obtenção de uma equação de perda de carga do sistema para este caso segue um raciocínio semelhante ao da combinação anterior. Partindo-se da equação 11 deve-se chegar a um resultado semelhante à equação 28. O único termo que será modificado é o que descreve a perda de carga no trecho 2 da tubulação de sucção, no qual será utilizada a fórmula de Hazen-Williams.

No trecho 1 utiliza-se a equação 24. Para o trecho 2 tem-se:

$$Hf_2 = \frac{10,65 L_2}{C_2^{1,852} D_2^{4,87}} q_{bomba}^{1,852} \quad (29)$$

em que,

C_2 - fator de atrito para o trecho 2, dependente do material da tubulação

É possível, tal como no item anterior, tornar a equação 29 mais simples. Atribuindo-se valores ao diâmetro e ao comprimento, e especificando-se o material da tubulação no trecho 2, pode-se reescrever essa equação da seguinte forma:

$$Hf_2 = K_4 q_{bomba}^{1,852} \quad (30)$$

em que,

$$K_4 = \frac{10,65 L_2}{C_2^{1,852} D_2^{4,87}} \quad (31)$$

Assim chega-se à equação para determinação da perda de carga no sistema:

$$Hf_{sist} = K_1 q_{circ}^2 + K_2 q_{circ}^{1,75} + K_4 q_{bomba}^{1,852} \quad (32)$$

3.2.4. Combinação 3 (Hazen-Williams - Hazen-Williams)

Neste caso ambas as equações de perda de carga do sistema utilizam a fórmula de Hazen-Williams. A equação 30 continua a determinar a perda de carga no trecho 2, tal qual no item anterior. A perda de carga no trecho 1 será determinada por:

$$Hf_1 = \frac{10,65 L_1}{C_1^{1,852} D_1^{4,87}} q_{circ}^{1,852} \quad (33)$$

em que,

C_1 - fator de atrito para o trecho 1, dependente do material da tubulação

Semelhantemente às combinações anteriores, parte da equação 33 pode tornar-se constante através da especificação do material da tubulação e da atribuição de valores ao diâmetro e comprimento do trecho 1. A equação 33 torna-se, então:

$$Hf_1 = K_5 q_{circ}^{1,852} \quad (34)$$

em que,

$$K_5 = \frac{10,65 L_1}{C_1^{1,852} D_1^{1,852}} \quad (35)$$

Assim chega-se à equação que determina a perda de carga no sistema, neste caso:

$$Hf_{sist} = K_1 q_{circ}^2 + K_5 q_{circ}^{1,852} + K_4 q_{bomba}^{1,852} \quad (36)$$

3.3. Explicitação da vazão circulante (q_{circ}) em equações solucionáveis por métodos numéricos

Com a introdução dos termos das Equações 11 e 13 na equação 12, e sabendo-se que a perda de carga é composta por três partes distintas (bocal, trecho 1 e trecho 2 da sucção), chega-se a:

$$\gamma q_{bomba} \Delta H_{bomba} = \gamma q_{util} \Delta H_{util} + \gamma q_{circ} Hf_{boc} + \gamma q_{circ} Hf_1 + \gamma q_{bomba} Hf_2 \quad (37)$$

O incremento de pressão fornecido pela bomba é uma função conhecida e está representado pela equação 9. A introdução dessa equação na equação 37 e a divisão de todos os termos por γ resulta em:

$$a q_{bomba} + b q_{bomba}^2 + c q_{bomba}^3 = q_{util} \Delta H_{util} + q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1) + q_{bomba} Hf_2 \quad (38)$$

O termo ΔH_{util} representa um incremento de pressão útil, ou seja, o somatório da energia presente na massa de água que passa pela tubulação de recalque e da energia necessária para elevar a água até a bomba centrífuga. Assim tem-se:

$$\Delta H_{util} = \frac{Pres_{util}}{\gamma} + \Delta z_1 \quad (39)$$

em que,

ΔH_{util} – diferencial de pressão útil, mca

$Pres_{util}$ – pressão útil, kgf/m²

γ – peso específico do fluido, kgf/m³

A partir deste ponto deve-se introduzir as equações de perda de carga calculadas nos itens 3.2.1 a 3.2.4, de acordo com a combinação de diâmetros dos dois trechos da tubulação de sucção.

3.3.1. Combinação 1 - (Flamant - Flamant)

A introdução dos termos da equação 28 na equação 38 e o agrupamento de todos os termos do lado esquerdo da igualdade resultam em:

$$a q_{bomba} + b q_{bomba}^2 + c q_{bomba}^3 - q_{util} \Delta H_{util} - q_{circ} (K_1 q_{circ}^2 + K_2 q_{circ}^{1,75}) - q_{bomba} K_3 q_{bomba}^{1,75} = 0 \quad (40)$$

Desenvolvendo os termos da equação 40 chega-se a:

$$a q_{bomba} + b q_{bomba}^2 + c q_{bomba}^3 - q_{util} \Delta H_{util} - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 q_{bomba}^{2,75} = 0 \quad (41)$$

A vazão que flui pela bomba é igual à soma da vazão circulante com a vazão útil, ou seja:

$$q_{bomba} = q_{circ} + q_{util} \quad (42)$$

Introduzindo os termos da equação 42 na equação 41 tem-se:

$$a(q_{circ} + q_{util}) + b(q_{circ} + q_{util})^2 + c(q_{circ} + q_{util})^3 - q_{util} \Delta H_{util} - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2.75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2.75} = 0 \quad (43)$$

Evoluindo a equação 43 obtem-se:

$$a q_{circ} + a q_{util} + b q_{circ}^2 + 2b q_{circ} q_{util} + b q_{util}^2 + c q_{circ}^3 + 3c q_{circ}^2 q_{util} + 3c q_{circ} q_{util}^2 + c q_{util}^3 - \Delta H_{util} q_{util} - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2.75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2.75} = 0 \quad (44)$$

A vazão circulante é aquela que passa pelo bocal do injetor. A equação 10 relaciona a vazão circulante (q_{circ}) e a diferença entre a pressão de alimentação e a pressão de descarga do injetor. A pressão de alimentação é aquela existente no final do trecho 1 da tubulação de sucção, e a pressão de descarga é a que está presente na câmara de mistura do injetor. Assim,

$$q_{circ} = C_d S_{bocal} \sqrt{2g \Delta H_i} \quad (45)$$

Essa diferença é chamada de diferencial de pressão do injetor (ΔH_i), que é definido pela equação:

$$\Delta H_i = \frac{Pres_{util}}{\gamma} + \Delta z_1 - Hf_1 - \Delta z_{sub} \quad (46)$$

Mas sabe-se, pela equação 39, que

$$\Delta H_{util} = \frac{Pres_{util}}{\gamma} + \Delta z_1$$

Então a expressão de ΔH_i torna-se

$$\Delta H_i = \Delta H_{util} - Hf_1 - \Delta z_{sub} \quad (47)$$

Pode-se obter a expressão da vazão circulante do sistema injetor-bomba centrífuga através da introdução dos termos da equação 47 na equação 45:

$$q_{circ} = C_d S_{bocal} \sqrt{2g (\Delta H_{util} - Hf_1 - \Delta z_{sub})} \quad (48)$$

ou ainda:

$$q_{circ} = K_6 \sqrt{\Delta H_{util} - Hf_1 - \Delta z_{sub}} \quad (49)$$

em que,

$$K_6 = C_d S_{bocal} \sqrt{2g} \quad (50)$$

A partir da equação 49 pode-se isolar o termo ΔH_{util} da seguinte forma:

$$\Delta H_{util} = \frac{q_{circ}^2}{K_6^2} + Hf_1 + \Delta z_{sub} \quad (51)$$

Sabe-se, pela observação da equação 24, que a perda de carga no trecho 1 da tubulação (Hf_1) pode ser definida por:

$$Hf_1 = K_2 q_{circ}^{1,75} \quad (52)$$

Então a equação 51 pode ser reescrita:

$$\Delta H_{util} = \frac{q_{circ}^2}{K_6^2} + K_2 q_{circ}^{1,75} + \Delta z_{sub} \quad (53)$$

Introduzindo os termos da equação 53 na equação 44 chega-se a:

$$a q_{circ} + a q_{util} + b q_{circ}^2 + 2b q_{circ} q_{util} + b q_{util}^2 + c q_{circ}^3 + 3c q_{circ}^2 q_{util} + 3c q_{circ} q_{util}^2 + c q_{util}^3 - \left(\frac{q_{circ}^2}{K_6^2} + K_2 q_{circ}^{1,75} + \Delta z_{sub} \right) q_{util} - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} = 0 \quad (54)$$

ou ainda:

$$a q_{circ} + a q_{util} + b q_{circ}^2 + 2b q_{circ} q_{util} + b q_{util}^2 + c q_{circ}^3 + 3c q_{circ}^2 q_{util} + 3c q_{circ} q_{util}^2 + c q_{util}^3 - \frac{q_{util}^2}{K_6^2} q_{circ} - K_2 q_{util} q_{circ}^{1,75} + \Delta z_{sub} q_{util} - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} = 0 \quad (55)$$

Agrupando os os termos semelhantes em q_{circ} obtém-se:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} + \left(b + 3c q_{util} - \frac{q_{util}}{K_6^2} \right) q_{circ}^2 - K_2 q_{util} q_{circ}^{1,75} + \left(a + 2b q_{util} + 3c q_{util}^2 \right) q_{circ} + (a - \Delta z_{sub}) q_{util} + b q_{util}^2 + c q_{util}^3 = 0 \quad (56)$$

Atribuindo um valor a q_{util} chega-se a:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} + K_7 q_{circ}^2 - K_8 q_{circ}^{1,75} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0 \quad (57)$$

em que,

$$K_7 = b + 3c q_{util} - \frac{q_{util}}{K_6^2} \quad (58)$$

$$K_8 = K_2 q_{util} \quad (59)$$

$$K_9 = a + 2b q_{util} + 3c q_{util}^2 \quad (60)$$

$$K_{10} = (a - \Delta z_{sub}) q_{util} + b q_{util}^2 + c q_{util}^3 \quad (61)$$

A equação 57 pode ser resolvida por métodos numéricos, fornecendo o valor da vazão circulante. A partir dessa vazão pode-se calcular o valor de ΔH_{util} , utilizando a equação 51. Com o valor de q_{util} e q_{circ} pode-se obter a vazão da bomba (q_{bomba} , equação 42) e, conseqüentemente, o diferencial de pressão da bomba (ΔH_{bomba} , equação 9).

A equação 57 é solucionada por meio de um método numérico iterativo denominado Método de Newton-Raphson. A metodologia para sua solução será apresentada em um item específico. O mesmo método será utilizado também para a solução das equações das demais combinações de fórmulas de perda de carga.

3.3.2. Combinação 2 (Flamant - Hazen-Williams)

A equação 32 representa a perda de carga que ocorre no sistema, neste caso. Utiliza-se a fórmula de perdas de carga localizadas para o injetor (primeiro termo da equação 32) e as fórmulas de Flamant e Hazen-Williams para os trechos 1 e 2 da tubulação de sucção, respectivamente (segundo e terceiro termos da equação 32).

Analogamente à combinação anterior, será obtida a equação que explicita a vazão circulante do sistema injetor-bomba centrífuga. Introduzindo a equação 32 (ao invés da equação 28, utilizada no item anterior) na equação 38 obtém-se:

$$a q_{bomba} + b q_{bomba}^2 + c q_{bomba}^3 - q_{util} \Delta H_{util} - q_{circ} \left(K_1 q_{circ}^2 + K_2 q_{circ}^{1,75} \right) - q_{bomba} K_4 q_{bomba}^{1,852} = 0 \quad (62)$$

A introdução dos termos das Equações 42 e 51 na equação 62 resulta em:

$$a(q_{circ} + q_{util}) + b(q_{circ} + q_{util})^2 + c(q_{circ} + q_{util})^3 - q_{util} \left(\frac{q_{circ}^2}{K_6^2} + Hf_1 + \Delta z_{sub} \right) - K_1 q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,852} = 0 \quad (63)$$

Inserindo os termos da equação 24 na equação 63 (Cálculo de Hf_1), fazendo-se sua evolução, atribuindo um valor a q_{util} e agrupando os termos semelhantes em relação a q_{circ} , chega-se a:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,852} + K_7 q_{circ}^2 - K_8 q_{circ}^{1,75} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0 \quad (64)$$

A equação 64 pode ser resolvida por métodos numéricos e o restante do processo é semelhante ao item anterior.

3.3.3. Combinação 3 (Hazen-Williams - Hazen-Williams)

Utiliza-se a fórmula de Hazen-Williams no cálculo das perdas de carga em ambos os trechos da tubulação. Introduzindo a equação 36 na equação 38 obtém-se:

$$a q_{bomba} + b q_{bomba}^2 + c q_{bomba}^3 - q_{util} \Delta H_{util} - q_{circ} \left(K_1 q_{circ}^2 + K_5 q_{circ}^{1,852} \right) - q_{bomba} K_4 q_{bomba}^{1,852} = 0 \quad (65)$$

A introdução dos termos das Equações 42 e 51 na equação 65 resulta em:

$$a(q_{circ} + q_{util}) + b(q_{circ} + q_{util})^2 + c(q_{circ} + q_{util})^3 - q_{util} \left(\frac{q_{circ}^2}{K_6^2} + Hf_1 + \Delta z_{sub} \right) - K_1 q_{circ}^3 - K_5 q_{circ}^{2,852} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,852} = 0 \quad (66)$$

Introduzindo os termos da equação 34 na equação 66 (Cálculo de Hf_1), fazendo-se sua evolução, atribuindo um valor a q_{util} e agrupando os termos semelhantes em relação a q_{circ} , chega-se a:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_5 q_{circ}^{2,852} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} + K_7 q_{circ}^2 - K_{11} q_{circ}^{1,852} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0 \quad (67)$$

em que,

$$K_{11} = K_5 q_{util} \quad (68)$$

A equação 67 pode ser resolvida por métodos numéricos e o restante do processo de cálculo é semelhante às combinações anteriores.

3.3.4. Resolução das equações de vazão circulante (q_{circ})

Nos itens 3.3.1 a 3.3.3 foram desenvolvidas 3 equações que explicitam a vazão circulante. Neste item mostra-se o método de resolução das equações obtidas.

O método a ser utilizado é o de Newton-Raphson. É um método iterativo que se inicia atribuindo um valor à variável da função (neste caso, q_{circ}). A seguir utiliza-se a seguinte equação para encontrar o próximo valor da variável :

$$x_i = x_{i-1} - \frac{f(x_{i-1})}{f'(x_{i-1})} \quad (69)$$

em que,

x_i - valor da variável na i -ésima iteração

x_{i-1} - valor da variável na $(i-1)$ -ésima iteração

$f(x_{i-1})$ - valor da função para o $(i-1)$ -ésimo valor da variável

$f'(x_{i-1})$ - valor da derivada da função para o $(i-1)$ -ésimo valor da variável

O processo é repetido várias vezes até que a diferença entre o valor de uma iteração e o valor da seguinte seja inferior ao valor limite, de acordo com o critério estabelecido por quem se utiliza do método.

Neste caso em particular tem-se:

$$x = q_{circ} \quad (70)$$

$$x_o = q_{max}$$

Critério de parada: $|x_i - x_{i-1}| \leq 0,0000001 x_i$

Devem ser solucionadas por este método as equações 57, 64 e 67. A seguir são apresentadas as suas derivadas em relação à vazão circulante (q_{circ}).

Equação 57:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_3 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} + K_7 q_{circ}^2 - K_8 q_{circ}^{1,75} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0$$

Derivada:

$$3 (c - K_1) q_{circ}^2 - 2,75 K_2 q_{circ}^{1,75} - 2,75 K_3 (q_{circ} + q_{util})^{1,75} + 2 K_7 q_{circ} - 1,75 K_8 q_{circ}^{0,75} + K_9 = 0$$

Equação 64:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_2 q_{circ}^{2,75} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,852} + K_7 q_{circ}^2 - K_8 q_{circ}^{1,75} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0$$

Derivada:

$$3 (c - K_1) q_{circ}^2 - 2,75 K_2 q_{circ}^{1,75} - 2,852 K_4 (q_{circ} + q_{util})^{1,852} + 2 K_7 q_{circ} - 1,75 K_8 q_{circ}^{0,75} + K_9 = 0$$

Equação 67:

$$(c - K_1) q_{circ}^3 - K_5 q_{circ}^{2,852} - K_4 (q_{circ} + q_{util})^{2,75} + K_7 q_{circ}^2 - K_{11} q_{circ}^{1,852} + K_9 q_{circ} + K_{10} = 0$$

Derivada:

$$3 (c - K_1) q_{circ}^2 - 2,852 K_5 q_{circ}^{1,852} - 2,75 K_4 (q_{circ} + q_{util})^{1,75} + 2 K_7 q_{circ} - 1,852 K_{11} q_{circ}^{0,852} + K_9 = 0$$

Após a obtenção do valor da vazão circulante (q_{circ}) faz-se o cálculo de $\Delta H_{útil}$ utilizando a equação 53.

Com o valor de q_{circ} e $q_{útil}$ pode também calcular a vazão da bomba (q_{bomba} , equação 42) e, conseqüentemente, o valor de ΔH_{bomba} (equação 9).

3.4. Cálculo do rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga

O rendimento do conjunto é definido na equação 8 como sendo

$$\eta' = 1 - \frac{P_{Hf}}{P_{bomba}}$$

Pela equação 12 sabe-se que

$$P_{bomba} = P_{util} + P_{Hf}$$

Substituindo os termos da equação 12 na equação 8 tem-se:

$$\eta' = 1 - \frac{P_{Hf}}{P_{util} + P_{Hf}} \quad (71)$$

A equação 13 mostra que

$$P_{hid} = \gamma Q H$$

Substituindo os termos da equação 13 na equação 71, e sabendo que a perda de carga que ocorre no sistema injetor-bomba é composto por 3 partes (bocal trecho 1 e trecho 2 da sucção), obtém-se:

$$\eta' = 1 - \frac{\gamma q_{circ} Hf_{bocal} + \gamma q_{circ} Hf_1 + \gamma q_{bomba} Hf_2}{\gamma q_{util} \Delta H_{util} + \gamma q_{circ} Hf_{bocal} + \gamma q_{circ} Hf_1 + \gamma q_{bomba} Hf_2} \quad (72)$$

A equação 42 mostra que

$$q_{bomba} = q_{circ} + q_{util}$$

Introduzindo os termos da equação 42 na equação 72 chega-se a:

$$\eta' = 1 - \frac{q_{circ} Hf_{bocal} + q_{circ} Hf_1 + (q_{circ} + q_{util}) Hf_2}{q_{util} \Delta H_{util} + q_{circ} Hf_{bocal} + q_{circ} Hf_1 + (q_{circ} + q_{util}) Hf_2} \quad (73)$$

Reunindo os termos semelhantes obtém-se:

$$\eta' = 1 - \frac{q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) + q_{util} Hf_2}{q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) + q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2)} \quad (74)$$

A seguir apresenta-se a simplificação da equação 74 em três passos, chegando-se à equação final do rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga:

a) Voltando o primeiro termo para a forma de fração:

$$\eta' = \frac{q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) + q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2) - q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) - q_{util} Hf_2}{q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) + q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2)} \quad (75)$$

b) Subtraindo os termos semelhantes (iguais):

$$\eta' = \frac{q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2) - q_{util} Hf_2}{q_{circ} (Hf_{bocal} + Hf_1 + Hf_2) + q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2)} \quad (76)$$

c) Evoluindo os termos do numerador:

$$\eta' = \frac{q_{util} \Delta H_{util}}{q_{circ} Hf_{sist} + q_{util} (\Delta H_{util} + Hf_2)} \quad (77)$$

A partir daqui cada combinação de equações de perda de carga levará a uma expressão particular para o rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga. Seu cálculo pode, entretanto, ser feito a partir da equação 77, pois todos os seus termos podem ser calculados através da metodologia apresentada no item 3.3.4.

Com a teoria apresentada até aqui pode-se obter, por varredura, a relação entre a vazão útil ($q_{\text{útil}}$) e o diferencial de pressão útil ($\Delta H_{\text{útil}}$). Inicia-se o processo de cálculo com vazão útil nula ($q_{\text{útil}} = 0$), calculando-se o valor de q_{circ} , $\Delta H_{\text{útil}}$, ΔH_{bomba} e do rendimento do conjunto injetor-bomba (η'). A partir dos valores iniciais deve-se incrementar o valor de $q_{\text{útil}}$ e calcular os valores das outras variáveis citadas neste parágrafo. O processo deve continuar até que um dos seguintes critérios de finalização sejam verdadeiros:

- a) se o valor calculado de q_{bomba} ultrapassar o máximo, que é obtido por experimentação;
- b) se o valor de ΔH_{bomba} tornar-se negativo;
- c) se o rendimento for menor ou igual a zero.

De forma a aumentar a compreensão do funcionamento do sistema é interessante apresentar os resultados do cálculo das perdas de carga que ocorrem em cada parte do sistema, bem como a perda de carga total do mesmo. Essas variáveis podem ser apresentadas facilmente junto às demais envolvidas no funcionamento do sistema, pois fazem parte do processo de cálculo.

3.5. Otimização do bocal do injetor

Botrel(1996) formulou o conceito de bocal ótimo como sendo aquele que produz a máxima pressão para uma vazão preestabelecida, quando associado a uma bomba centrífuga. O procedimento adotado para otimização do bocal do injetor neste trabalho foi adaptado a partir da metodologia do autor supracitado. O método de otimização segue o mesmo processo de obtenção da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil, acrescentando apenas um processo de varredura para a variável D_{boc} (diâmetro do bocal).

Todos os parâmetros de entrada do processo de cálculo já são conhecidos, exceto o diâmetro do bocal. A partir daí estabelece-se um valor inicial (o menor possível) para o diâmetro do bocal, iniciando-se o processo de cálculo com a obtenção das constantes envolvidas no processo: K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 e K_6 .

Fixando valores para $q_{\text{útil}}$ entre um valor máximo e um mínimo, pode-se calcular as outras constantes (K_7 , K_8 , K_9 , K_{10} , K_{11}) e encontrar a relação entre $q_{\text{útil}}$ e $\Delta H_{\text{útil}}$. O valor máximo de $\Delta H_{\text{útil}}$ é encontrado através do exame dos cálculos efetuados, ou de um gráfico dos resultados obtidos para um determinado valor de $q_{\text{útil}}$.

Neste trabalho foi adotada a apresentação gráfica dos resultados, pois é uma maneira bastante adequada para a visualização dos resultados. Em um gráfico pode-se apresentar as curvas $\Delta H_{\text{útil}} \times D_{\text{boc}}$ para os diversos valores de vazão útil preestabelecidos.

3.6. Montagem experimental

3.6.1. Descrição geral do experimento

Foi montado um experimento para verificar a aplicação do modelo matemático proposto. Foram escolhidos três modelos de bombas centrífugas da marca JACUZZI (3500 rpm), cada uma com seu respectivo modelo de injetor, conforme pode-se observar na Tabela 2. Juntamente à descrição dos modelos de bombas e injetores vem o diâmetro interno dos dois trechos de tubulação de sucção a serem usados (trecho 1 antes e trecho 2 após o injetor).

Tabela 2 - Conjuntos bomba-injetor JACUZZI utilizados no experimento

Modelo	Potência (CV)	Diâmetro do bocal (mm)	Tubulação de sucção	
			D_1 (mm)	D_2 (mm)
3VJE15-M 39G	3	5,9	27,5	35,6
2VJF15-T 39B	2	8,0	35,6	43,5
1VJF15-M 38J	1	6,1	35,6	43,5

Os objetivos do experimento são: a) obtenção dos parâmetros característicos das bombas centrífugas e dos injetores; b) observação do funcionamento dos conjuntos formados por uma bomba centrífuga, tubulação de sucção e um injetor, e comparação

dos dados observados com os previstos pelo modelo matemático desenvolvido.

O experimento foi executado em duas etapas. A primeira foi realizada a uma altura de sucção de 16,47 m e a segunda, a 11,97 m. Isto foi feito para verificar a precisão do modelo matemático na descrição do funcionamento dos conjuntos bomba-injetor.

Para que se possa inserir as informações necessárias à execução do modelo é preciso conhecer as características da bomba centrífuga, do injetor e da tubulação de sucção. A tubulação de sucção é subdividida em dois trechos (1 e 2) de diâmetros diferentes ($D_1 < D_2$) devido à diferença de vazão em cada um. A respeito da tubulação é necessário conhecer o diâmetro e o material da mesma em cada trecho.

Os testes necessários para a obtenção dos parâmetros dos injetores e das bombas são os mesmos para ambas as alturas de sucção, e serão descritos nos itens a seguir.

3.6.2. Testes para obtenção de parâmetros das bombas centrífugas

Os parâmetros característicos da bomba centrífuga serão obtidos através do levantamento de sua curva de vazão x pressão. A partir desses dados pode-se obter, por regressão polinomial, os coeficientes empíricos **a**, **b** e **c**, que descrevem a relação vazão x pressão expressa pela equação 9.

Para a obtenção dos parâmetros das bombas foi montada uma bancada para os testes, na qual foram medidos os pares de valores de vazão e pressão. Após a medição foi feita a regressão polinomial e calculou-se os parâmetros **a**, **b** e **c**.

3.6.3. Testes para obtenção de parâmetros dos injetores

Os parâmetros característicos do injetor são: diâmetro do bocal, coeficiente de perda de carga (**K**) e coeficiente de descarga (**Cd**). O diâmetro do bocal foi medido com paquímetro digital de precisão 0.05 mm. Fixou-se a profundidade de imersão do injetor em 0,75 m para todos os conjuntos bomba-injetor.

Para se obter os coeficientes **K** e **Cd** do injetor foi montado o esquema

experimental apresentado na Figura 5. A instalação dos conjuntos bomba-injetor foi feita no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural. As bombas centrífugas foram instaladas em uma torre de abastecimento de água, a 16,47 m de altura, na primeira etapa de testes, e a 11,97 m, na segunda.

Figura 5 - Esquema experimental para obtenção dos parâmetros dos injetores

Os injetores foram instalados em um reservatório de água subterrâneo, situado exatamente abaixo da torre onde encontravam-se as bombas.

A coleta de dados para obtenção do coeficiente K foi feita no próprio local da instalação, variando-se a vazão circulante (Q_1).

Foram medidas e anotadas as pressões e vazões antes e após o injetor (H_1 e Q_1 ; H_3 e Q_3).

Os diferenciais de pressão necessários à coleta de dados e determinação de K e C_d foram obtidos através da variação das vazões útil circulante. O aumento da abertura do registro situado no recalque da bomba centrífuga promoveu-se um aumento da vazão útil (Q_2 , succionada, ou $q_{\text{útil}}$), o que acarretou em uma diminuição da vazão circulante (Q_1 , motriz, ou q_{circ}). Desta forma foi possível obter vários diferenciais de pressão e medir

as pressões ocorrentes nos pontos de medição. As faixas de pressão de entrada utilizadas nos testes de cada conjunto bomba-injetor variaram com a altura de sucção utilizada (16,47 ou 11,97 m) os limites extremos foram:

Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV):	193,61 a 417,79 kPa (19 a 41 mca)
Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV):	366,84 a 499,31 kPa (36 - 49 mca)
Conjunto 2VJF15-M 39B (2CV):	356,65 a 601,21 kPa (35 - 59 mca)

A vazão Q_1 é a vazão circulante (q_{circ}) e a vazão Q_3 é a vazão da bomba (q_{bomba}). A partir dessas medições pode-se calcular a vazão Q_2 , ou vazão útil (q_{util}):

$$q_{util} = Q_3 - Q_1 \quad (78)$$

Também é possível calcular a perda de carga que ocorre no injetor e, conseqüentemente, determinar o coeficiente K. Por haver acréscimo de massa no decorrer do processo (q_2 , ou q_{util}) o cálculo da perda de carga é feito através de um balanço de energia, seguindo o esquema da Figura 5:

$$E_1 + E_2 = E_3 + HfE_{1-3} \quad (79)$$

em que,

E_1 - energia no ponto 1

E_2 - energia no ponto 2

E_3 - energia no ponto 3

HfE_{1-3} - energia dissipada no injetor

Sabe-se que

$$E_{hid} = \gamma Q H \quad (80)$$

Substituindo os termos da equação 80 na equação 79 tem-se:

$$\gamma Q_1 H_1 + \gamma Q_2 H_2 = \gamma Q_3 H_3 + \gamma Q_3 Hf_{1-3} \quad (81)$$

em que,

Hf_{1-3} - perda de carga que ocorre no injetor (Hf_{boc})

A seguir isola-se o termo Hf_{1-3} , ou Hf_{boc} , para determinar seu valor:

$$Hf_{boc} = \frac{Q_1 H_1 + Q_2 H_2 - Q_3 H_3}{Q_3} \quad (82)$$

A equação 17 também apresenta a perda de carga que ocorre no injetor.

Igualando-se os termos da equação 82 aos da equação 17 obtém-se:

$$\frac{Q_1 H_1 + Q_2 H_2 - Q_3 H_3}{Q_3} = K \frac{V_{boc}^2}{2g} \quad (83)$$

Utilizando-se a equação da Continuidade consegue-se, então, a equação do coeficiente K:

$$K = \frac{g \pi^2 D_{boc}^4}{8 Q_1^2} \frac{Q_1 H_1 + Q_2 H_2 - Q_3 H_3}{Q_3} \quad (84)$$

A determinação do coeficiente de perda de carga do injetor foi feita de forma mais simples, utilizando-se o diâmetro do bocal, a vazão circulante (Q_1) e o diferencial de pressão entre os pontos 1 e 2. Essa determinação também foi feita no próprio local de instalação dos conjuntos bomba-injetor. No ponto 2 a pressão reinante é devida à profundidade de imersão do injetor (Δz_{sub}). Assim tem-se:

$$Cd = \frac{Q_1}{S_{boc} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}} \quad (85)$$

ou ainda,

$$Cd = \frac{4 Q_1}{\pi D_{boc}^2 \sqrt{2g(H_1 - H_2)}} \quad (86)$$

O injetor pode estar operando a diversos diferenciais de pressão. Os testes para a obtenção do coeficiente de descarga foram feitos no próprio local do experimento, utilizando-se as variações de pressão de entrada reinantes nas condições de funcionamento para obter um valor médio de Cd.

3.6.4. Cálculos com o modelo matemático proposto

Após a obtenção dos parâmetros individuais de cada componente do sistema é possível simular o seu funcionamento através do modelo matemático desenvolvido.

Para facilitar os cálculos foi desenvolvido um modelo computacional para a execução do modelo matemático.

Os parâmetros de entrada para execução do modelo computacional são:

- a) diâmetro, comprimento e material de composição dos dois trechos da tubulação;
- b) parâmetros empíricos a , b e c , da relação vazão versus pressão, e vazão máxima das bombas centrífugas;
- c) diâmetro do bocal, profundidade de imersão e coeficientes K e C_d do injetor;

Após a entrada dos parâmetros o modelo computacional determina os coeficientes de atrito dos dois trechos da tubulação de sucção, realiza os cálculos e fornece uma tabela de resultados contendo: perdas de carga ocorrentes no sistema ($H_{f_{boc}}$, H_{f_1} , H_{f_2} , $H_{f_{sist}}$), vazões circulante, útil e da bomba (q_{circ} , $q_{útil}$, q_{bomba}); diferenciais de pressão da bomba e útil (ΔH_{bomba} , $\Delta H_{útil}$) e rendimento do conjunto injetor-bomba centrífuga (η').

O modelo computacional também permite fazer a otimização do bocal do injetor. Obtém-se, por um processo de varredura, as curvas de diferencial de pressão útil em relação ao diâmetro do bocal, para valores pré-fixados de vazão útil. Assim é possível determinar o diâmetro de bocal que maximiza a pressão útil para uma determinada vazão útil.

O fluxograma do modelo computacional, denominado INJETOR, encontra-se listado a seguir.

3.6.5. Testes com o sistema injetor-bomba centrífuga

Cada conjunto formado por injetor e bomba centrífuga foi testado para obtenção dos dados experimentais de seu funcionamento e comparação com os resultados previstos pelo modelo matemático.

O esquema experimental é apresentado na Figura 6. A vazão útil e a vazão circulante foram determinadas por medidores de vazão do tipo magnético indutivo, situados nas tubulações de recalque ($q_{\text{útil}}$) e no trecho 1 da sucção (q_{circ}).

Figura 6 - Esquema de testes com o sistema injetor-bomba centrífuga

No sistema montado foram instaladas 5 tomadas de pressão. Duas delas estavam situadas na tubulação de sucção, uma antes e outra após o injetor, em local

próximo a ele. As outras três situavam-se próximas à bomba: uma no trecho 1 da tubulação de sucção, outra no trecho 2 e a terceira, na tubulação de recalque. Essas tomadas serviram para medir a pressão existente em cada um desses pontos na tubulação e determinar as perdas de carga do sistema, o diferencial de pressão útil e a pressão proporcionada pela bomba.

O registro situado na tubulação de recalque foi manuseado de forma a obter-se diferentes valores de vazão útil e vazão circulante dentro do intervalo de operação da bomba centrífuga. Desta forma obteve-se a cada medição, direta ou indiretamente, os seguintes dados: vazão útil ($q_{\text{útil}}$), diferencial de pressão útil ($\Delta H_{\text{útil}}$), vazão circulante (q_{circ}), pressão na entrada da bomba centrífuga (H'_{1}), perda de carga no injetor ($H_{\text{f}_{\text{boc}}}$) e perdas de carga nos trechos 1 e 2 da tubulação de sucção.

3.6.6. Equipamentos empregados nos experimentos

Os equipamentos empregados nos experimentos descritos nos itens 3.6.2, 3.6.3 e 3.6.5 estão disponíveis no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. Suas características são apresentadas a seguir.

a) Medidores de vazão:

Os medidores de vazão empregados nos testes são do tipo magnético indutivo, marca CONAUT. Esses medidores não causam perda de carga localizada, pois mantêm uniforme a seção transversal de escoamento da canalização, permitindo medições de vazão com erro máximo de 0,5% e fornecendo leitura digital.

b) Medidores de pressão:

A pressão foi medida por transdutores de pressão marca INTERFACE, aferidos com auxílio de um manômetro-padrão, permitindo medições com erro máximo de 0,2%.

c) Conjunto moto-bomba:

Os ensaios individuais de cada injetor foram realizados no próprio local do experimento, com as respectivas tubulações e bomba indicada para cada injetor, nas duas alturas de sucção utilizadas (16,47 e 11,97 m). Além disso houve os ensaios das bombas centrífugas JACUZZI, já descritas no item 3.6.1.

d) Injetores:

Os injetores utilizados foram adquiridos juntamente com as bombas JACUZZI, formando um conjunto único, e foram representados esquematicamente na Figura 1. O diâmetro do bocal de cada um dos três modelos é apresentado na Tabela 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas e figuras apresentadas e discutidas neste capítulo contêm os resultados observados nos ensaios com os conjuntos injetor-bomba centrífuga e a estimativa desses resultados, obtida através de cálculos efetuados com o auxílio do programa computacional INJETOR, desenvolvido para esta finalidade. Com o objetivo de proporcionar uma leitura facilitada do texto, as tabelas muito extensas são apresentadas em anexos, no final do trabalho. A discussão do trabalho proporciona a localização das tabelas e gráficos necessários ao entendimento dos resultados obtidos.

4.1. Ensaios das bombas centrífugas

As representações gráficas dos dados experimentais observados e estimados são mostradas nas Figuras 7, 8 e 9, apresentando a correspondência entre os dados de vazão e de pressão medidos para cada bomba centrífuga testada, operando isoladamente (sem o injetor).

Nos gráficos também é possível ver a regressão polinomial para a relação vazão *versus* pressão da respectiva bomba centrífuga. Os dados utilizados para a confecção dos gráficos encontram-se nas Tabelas 4, 5 e 6, no Anexo A.

As equações obtidas por regressão polinomial apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,98, mostrando um bom ajuste aos dados observados, e foram utilizadas no modelo matemático para simulação do funcionamento conjunto de bomba e injetor.

As Figuras 7, 8 e 9 confirmam a primeira pressuposição feita para o modelo matemático, na qual afirma-se que a relação entre a vazão e a pressão da bomba centrífuga pode ser descrita por um polinômio de segundo grau.

Figura 7- Representação gráfica dos dados observados e da regressão polinomial Bomba Jacuzzi mod. 3VJE15-M 39G

Figura 8- Representação gráfica dos dados observados da regressão polinomial Bomba Jacuzzi mod. 2VJF15-T 39B

Figura 9 - Representação gráfica dos dados observados e da regressão polinomial Bomba Jacuzzi - mod. 1VJF15-M 38J

4.2. Ensaios dos injetores

Na Tabela 3 encontram-se os valores do coeficiente de descarga (C_d) e do coeficiente de perda de carga (K) obtidos para cada injetor e utilizados nas simulações, em cada altura de sucção e nas faixas de pressão de entrada utilizadas nos testes.

Tabela 3- Valores médios e média geral do coeficientes de descarga (C_d) e de perda de carga dos injetores para cada pressão de entrada

Conjunto bomba-injetor	Potência (CV)	Altura de sucção (m)	C_d	K
3VJE15-M 39G	1/3 CV	16,47	0,823	0,643
		11,97	0,827	0,704
2VJF15-M 39B	2 CV	16,47	0,928	0,641
		11,97	0,911	0,643
1VJF15-M 38J	1 CV	16,47	0,730	0,749
		11,97	0,901	0,681

Os resultados obtidos mostraram diferenças nos valores dos coeficientes C_d e K , quando comparados aos resultados obtidos por Botrel(1996). Provavelmente isto é devido às características dos injetores testados, que são diferente daqueles utilizados pelo autor supracitado. Os injetores testados pelo autor foram do tipo “T” e apresentavam bocais convergente e divergente com ângulos maiores que os bocais testados neste trabalho, resultando em valores diferentes para os coeficientes. Os resultados completos encontram-se no Anexo A, apresentando as pressões na entrada e na saída dos injetores, as vazões circulante (motriz) e útil (succionada), o coeficiente de descarga (C_d) e o coeficiente de perda de carga (K).

Esses resultados mostram que os coeficientes de descarga variaram com a pressão de entrada do injetor. Como a variação foi bastante acentuada em alguns casos, optou-se por utilizar a mediana dos dados nas simulações de funcionamento, a fim de obter um melhor ajuste aos resultados observados. Este fato pode ser constatado através da comparação entre as médias e as medianas dos dados, apresentadas nas Tabelas 7 a 18 do Anexo A.

4.3. Resultados simulados

Os resultados das simulações de funcionamento dos conjuntos bomba-injetor foram obtidos utilizando-se o programa computacional INJETOR, que efetuou os cálculos a partir dos parâmetros de entrada do sistema, conforme apresentado no seu fluxograma. Os resultados foram transferidos para uma planilha eletrônica e transformados em gráficos. Neles são apresentados os diferenciais de pressão útil e os rendimentos estimados e observados.

As simulações representam o funcionamento do esquema apresentado na Figura 6. Os resultados são apresentados de forma gráfica, mostrando 4 testes por conjunto, 2 em cada altura de sucção. Os dados completos encontram-se no Anexo B, no final deste trabalho. Os resultados simulados e observados encontram-se nas Figuras 10, 11 e 12, para a altura de sucção de 16,47 m, e nas Figuras 13, 14 e 15, para a altura de sucção de 11,97 m.

A) Altura de sucção de 16,47 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 3VJE15-M 39G (1/3 CV)

$\Delta Z_1 = 16,47$; $\Delta L = 19,87$ m; $\Delta Z_{\text{sub}} = 0,75$ m $D_1 = 27,5$ mm $D_2 = 35,6$ mm
 $D_{\text{boc}} = 5,9$ mm $K = 0,633$ $C_d = 0,823$

Figura 10 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 3VJE15-M 39 G – Altura de sucção de 16,47 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta Z_1 = 16,47$; $\Delta L = 20,17$ m; $\Delta Z_{\text{sub}} = 0,75$ m $D_1 = 35,6$ mm $D_2 = 43,5$ mm $D_{\text{boc}} = 6,1$ mm $K = 0,633$ $C_d = 0,823$

■ $\Delta H_{\text{útil}}$ est. ■ $\Delta H_{\text{útil}}$ obs. ● Rend. est. ● Rend. obs.

■ $\Delta H_{\text{útil}}$ est. ■ $\Delta H_{\text{útil}}$ obs. ● Rend. est. ● Rend. obs.

Figura 11 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 2VJF15-T 39 B – Altura de sucção de 16,47 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 1VJF15-M 38J (1 CV) $\Delta z = 16,47$; $\Delta L = 20,17$ m ; $\Delta z_{\text{sub}} = 0,75$ m $D_1 = 27,5$ mm $D_2 = 35,6$ mm $D_{\text{boc}} = 5,9$ mm $K = 0,633$ $C_d = 0,823$ **Bomba 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta Z = 16,47$ m - Teste 1** **Bomba 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta Z = 16,47$ m - Teste 2**

Figura 12 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 1VJF15-M 38 J – Altura de sucção de 16,47 m

B) Altura de sucção de 11,97 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 3VJE15-M 39G (1/3 CV)

$\Delta z = 11,97$; $\Delta L = 14,97$ m ; $\Delta z_{\text{sub}} = 0,75$ m

$D_1 = 27,5$ mm

$D_2 = 35,6$ mm

$D_{\text{boc}} = 5,9$ mm

$K = 0,633$

$C_d = 0,823$

Figura 13 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 3VJE15-M 39 G – Altura de sucção de 11,97 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 2VJF15-T 39B (2 CV)

$\Delta z = 11,97$; $\Delta L = 15,37$ m; $\Delta z_{\text{sub}} = 0,75$ m

$D_1 = 35,6$ mm

$D_2 = 43,5$ mm

$D_{\text{boc}} = 6,1$ mm

$K = 0,633$

$C_d = 0,823$

Bomba 2VJF15-T 39B (1 CV) - $\Delta Z = 11,97$ m - Teste 1

Bomba 2VJF15-T 39B (1 CV) - $\Delta Z = 11,97$ m - Teste 2

Figura 14 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 2VJF15-T 39 B – Altura de sucção de 11,97 m

SISTEMA BOMBA-INJETOR 1VJF15-M 38J (1 CV)

$\Delta z = 11,97$; $\Delta L = 15,37$ m ; $\Delta z_{\text{sub}} = 0,75$ m

$D_1 = 27,5$ mm

$D_2 = 35,6$ mm

$D_{\text{boc}} = 5,9$ mm

$K = 0,633$

$C_d = 0,823$

Bomba 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta Z = 11,97$ m - Teste 1

Bomba 1VJF15-M 38J (1 CV) - $\Delta Z = 11,97$ m - Teste 2

Figura 15 – Comparação de resultados simulados e observados do conjunto bomba-injetor 1VJF15-M 38 J – Altura de sucção de 11,97 m

Através da análise dos gráficos percebe-se que o modelo proporcionou uma estimativa adequada da relação entre o diferencial de pressão útil ($\Delta H_{\text{útil}}$) e a vazão útil ($q_{\text{útil}}$) dos conjuntos injetor-bomba. Os melhores ajustes foram obtidos para o conjunto 1VJF15-M 38J, em ambas as alturas de sucção, e para o conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV) à altura de sucção de 16,47 m. O modelo não apresentou um bom ajuste da relação $\Delta H_{\text{útil}}$ *versus* $q_{\text{útil}}$ para os conjuntos 3VJE15-M 39G à altura de sucção de 11,97 m e 2VJF15-T 39B operando em ambas as alturas de sucção testadas.

A estimativa do rendimento dos conjuntos bomba-injetor também mostrou-se adequada, exceto para os conjunto 2VJF15-T 39B. Este fato pode estar relacionado a fatores não previstos pelo modelo. Uma análise do cálculo do rendimento e das simulações fornece esclarecimentos importantes, tal como se vê a seguir.

A Equação 77 apresenta a forma de cálculo do rendimento:

$$\eta = \frac{q_{\text{útil}} \Delta H_{\text{útil}}}{q_{\text{circ}} Hf_{\text{sist}} + q_{\text{útil}} (\Delta H_{\text{útil}} + Hf_2)}$$

Conforme já foi dito, as melhores estimativas da relação $\Delta H_{\text{útil}} \times q_{\text{útil}}$ foram as do conjunto 1VJF15-M 38J e, portanto, o numerador da Equação 77 está corretamente dimensionado. Resta, portanto, analisar seu denominador.

Pode-se perceber, através das Tabelas 19 a 42 (Anexo B), que a perda de carga no trecho 2 da tubulação de sucção (Hf_2) apresenta valores baixos, tendo pouca influência nos resultados. Os fatores mais importantes são a perda de carga do sistema (Hf_{sist}) e o diferencial de pressão útil ($\Delta H_{\text{útil}}$). Na perda de carga do sistema a parte mais importante é a perda de carga no bocal (Hf_{boc}). A Figura 16 apresenta a comparação entre os resultados estimados e observados das duas variáveis, no Teste 1 do conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV), operando à altura de sucção de 16,47 m. Esse teste apresenta um desvio do rendimento para os valores mais altos de $q_{\text{útil}}$, conforme pode-se verificar na Figura 16. Os resultados apresentados nessa figura evidenciam a diferença entre os valores estimados e observados da perda de carga do sistema, bem como a aproximação entre os resultados de diferencial de pressão útil.

Resultados estimados e observados de perda de carga do sistema e diferencial de pressão útil - Conj. bomba-injetor 1VJF15-M 38J $\Delta z = 16,47\text{m}$

Figura 16- Comparação de $H_{f_{sist}}$ e $\Delta H_{útil}$ estimados e observados do conjunto bomba-injetor 1VJF15-M 38J operando a uma altura de sucção de 16,47 m

Baseando-se nessa diferença entre rendimento estimado e observado encontrada em um teste com bom ajuste da relação $\Delta H_{útil} \times q_{útil}$, procurou-se verificar a ocorrência do mesmo fenômeno no Teste 1 do conjunto 3VJE15-M 39G, operando à altura de sucção de 11,97 m, e no Teste 1 do conjunto 2VJF15-T 39B, operando à altura de sucção de 16,47 m, a fim de comprovar a causa dos desvios no rendimento desse conjunto. As Figuras 17 e 18 apresentam os valores de perda de carga do sistema e diferencial de pressão útil, estimados e observados, para os conjuntos 3VJE15-M 39G e 2VJF15-T 39B, respectivamente.

Percebe-se que no caso do conjunto 3VJE15-M 39G (Figura 17) a estimativa da perda de carga do sistema está bem ajustada aos resultados observados no teste. Já no conjunto 2VJF15-T 39B nota-se que aumentaram as diferenças entre as perdas de carga estimada e observada no sistema. Houve também diferenças entre o diferencial de pressão útil estimado e o observado, o que atenuou a diferença entre o rendimento estimado e o observado.

Figura 17 - Comparação de H_{fsist} e $\Delta H_{útil}$ estimados e observados do conjunto 3VJE15-M 39G

Figura 18 - Comparação de H_{fsist} e $\Delta H_{útil}$ estimados e observados do conjunto 2VJF15-T 39B

Essas diferenças podem ser atribuídas a dois fatores:

- a) o modelo não considera as perdas de carga localizadas ocorrentes no sistema;
- b) os coeficientes de descarga e de perda de carga do injetor são considerados constantes no modelo, o que não corresponde à realidade.

No caso do conjunto 3VJE15-M 39G a diferença entre os rendimentos estimado e observado está diretamente ligada à diferença entre a estimativa de $\Delta H_{\text{útil}}$ e os valores observados. Pela análise conjunta das equações 26 e 53, percebe-se que o valor de $\Delta H_{\text{útil}}$ é dependente do coeficiente de descarga e do comprimento do trecho 1 da tubulação de sucção (L_1). Se a perda de carga localizada no sistema for acentuada, deve-se aumentar o valor de L_1 para considerar essa perda nos cálculos. O modelo não considera as perdas localizadas e, portanto, pode haver erros na estimativa de $\Delta H_{\text{útil}}$. Outra possível causa pode ser atribuída ao coeficiente de descarga. A análise conjunta das equações 50 e 53 mostra que o coeficiente de descarga entra no cálculo de $\Delta H_{\text{útil}}$. Um coeficiente de descarga incorreto acarretará em erro na estimativa de $\Delta H_{\text{útil}}$ e, consequentemente, no cálculo do rendimento do conjunto. Através de várias simulações feitas com o auxílio do programa INJETOR, foi possível perceber que o coeficiente de descarga tem influência bastante acentuada sobre $\Delta H_{\text{útil}}$. O incremento de L_1 não apresentou, no entanto, o mesmo grau de influência.

No caso do conjunto 2VJE15-T 39B é possível perceber, observando-se a Figura 18, que houve uma diferença bastante acentuada entre a estimativa e os resultados observados das perdas de carga do sistema ($H_{f_{\text{sist}}}$), além da diferença entre $\Delta H_{\text{útil}}$ observado e estimado. O modelo subestimou $\Delta H_{\text{útil}}$ e $H_{f_{\text{sist}}}$. Analisando-se a equação 77 é possível afirmar que o rendimento será superestimado, pois a utilização de um valor subestimado de $H_{f_{\text{sist}}}$ tem grande influência sobre o cálculo do rendimento (η). Como essa variável encontra-se no denominador da equação, a estimativa do valor de η será superior ao valor real.

Outro fator a ser considerado como possível fonte de erro é o uso de valores fixos para os coeficientes de descarga (C_d) e de perda de carga do injetor (K). Na

obtenção dos valores para esses coeficientes notou-se que houve variações de ambos ao longo dos testes. As perdas localizadas podem ter importância significativa em um sistema que utiliza muitas conexões e tem bruscas mudanças de direção do curso da água. Se os coeficientes de descarga e de perda de carga variarem significativamente, haverá mudanças nos valores previstos de diferencial de pressão útil e da perda de carga do sistema bomba-injetor.

Ambos os fatores podem causar distorções na estimativa do modelo, especialmente quando se trata de vazões e pressões maiores. Isto explica a tendência de afastamento das estimativas do rendimento com o aumento da vazão útil, em relação aos resultados observados.

O conjunto 2VJF15-T 39B tem potência maior e, conseqüentemente, vazão e pressão maiores que os demais conjuntos. Isto evidenciou as diferenças entre as estimativas e a observação de resultados.

Conclui-se, portanto, que o modelo pode ser aperfeiçoado, melhorando sua capacidade de simulação da realidade, mediante um estudo mais aprofundado das perdas de carga localizadas ocorrentes no sistema e da inclusão de equações para cálculo dos coeficientes de descarga e perda de carga do injetor, pois esses coeficientes variam com a velocidade de escoamento de água no bocal.

4.4. Otimização dos bocais dos injetores

As Figuras 19 a 24 apresentam os resultados da otimização dos bocais dos injetores para diversos valores de vazão útil e para cada altura de sucção. Apresentou-se uma otimização por conjunto e por altura de sucção, suprimindo-se as repetições de testes. Pela figuras pode-se determinar qual diâmetro de bocal do injetor maximizará o diferencial de pressão útil.

Como os resultados coletados são muito extensos, os valores de vazão útil utilizados nas figuras foram escolhidos ao longo dos resultados disponíveis. Procurou-se utilizar sete pontos aproximadamente equidistantes, ao longo da faixa de q_{util} disponível.

Otimização do diâmetro do bocal do injetor para diversos valores de vazão útil
(D_{boc} x $\Delta H_{\text{útil}}$) - Bomba 3VJE15-M 39G - 1/3 CV

Figura 19 - Sistema bomba-injetor 3VJE15-M 39G - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x D_{boc} para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)

Otimização do diâmetro do bocal do injetor para diversos valores de vazão útil
(D_{boc} x $\Delta H_{\text{útil}}$) - Modelo 3VJE15-M 39G - 1/3 CV

Figura 20 - Sistema bomba-injetor 3VJE15-M 39G - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x D_{boc} para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)

**Otimização do diâmetro do bocal do injetor para diversos valores de vazão útil
($D_{boc} \times \Delta H_{útil}$) - Modelo 2VJF15-M 39B - 2 CV**

Figura 21 - Sistema bomba-injetor 2VJF15-T 39B - Curvas $\Delta H_{útil} \times D_{boc}$ para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)

**Otimização do diâmetro do bocal do injetor para diversos valores de vazão
útil ($D_{boc} \times \Delta H_{útil}$) - Modelo 2VJF15-M 39B - 2 CV**

Figura 22 - Sistema bomba-injetor 2VJF15-T 39B - Curvas $\Delta H_{útil} \times D_{boc}$ para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)

Figura 23 - Sistema bomba-injetor 1VJF15-M 38J - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 16,47 m)

Figura 24 - Sistema bomba-injetor 1VJF15-M 38J - Curvas $\Delta H_{\text{útil}}$ x Dboc para otimização do bocal do injetor (Altura de sucção de 11,97 m)

O aumento do diâmetro do bocal inicialmente aumenta o diferencial de pressão útil ($\Delta H_{\text{útil}}$) até um certo ponto, a partir do qual começa a haver uma diminuição desse diferencial. O ponto de máximo $\Delta H_{\text{útil}}$ determina o diâmetro ótimo do bocal do injetor a ser utilizado para cada vazão útil estudada.

Pelas Figuras 19 a 24 percebe-se que o incremento de $\Delta H_{\text{útil}}$ devido ao redimensionamento do bocal é maior nos menores valores de vazão útil.

O aumento da vazão útil, e a conseqüente diminuição da vazão circulante, vão diminuindo a capacidade do injetor aumentar $\Delta H_{\text{útil}}$. A partir de um determinado valor de $q_{\text{útil}}$ torna-se inviável o uso do injetor, pois o diferencial de pressão útil obtido é menor que a altura de sucção. Quando isto ocorre o sistema para de funcionar.

No conjunto 2VJF15-T 39B esse incremento ocorreu até um certo valor de vazão útil. Nas vazões maiores não houve uma elevação de $\Delta H_{\text{útil}}$ com o aumento do diâmetro do bocal, indicando que o injetor funcionará em condições precárias, fora de suas especificações de vazão e/ou de pressão.

A redução da altura de sucção de 16,47 para 11,97m praticamente duplicou o limite superior de vazão útil do conjunto 3VJE15-M 39G (Aumento de 98,32%). Esse comportamento não foi verificado nos conjuntos 2VJF15-T 39B (Aumento de 2,22%) e 1VJF15-M 38J (Redução de 13,97%). Esse comportamento forneceu indícios sobre as diferenças de construção de cada conjunto.

São bombas que apresentam comportamentos diferenciados em relação à variação da altura de sucção e, entretanto, o modelo proporcionou uma boa estimativa de seu funcionamento. Com isto demonstra-se a utilidade da utilização do modelo matemático na previsão do funcionamento de sistemas formados por bombas centrífugas e injetores utilizados em poços.

A análise das Figuras 19 a 24 apresenta um aspecto fundamental do uso de conjuntos injetor-bomba centrífuga, que é o acréscimo de $\Delta H_{\text{útil}}$ devido à mudança de diâmetro do bocal do injetor. Para os conjuntos 3VJE15-M 39G e 1VJF15-M 38J o diâmetro do bocal ótimo variou de 3 a 6 mm, considerando-se as duas alturas de sucção

testadas, e os diâmetros dos bocais comercializados são 5,9 e 6,1 mm, respectivamente. No conjunto 2VJF15-T 39B o diâmetro do bocal ótimo variou de 4 a 6 mm em ambas as alturas de sucção, e o diâmetro do bocal comercializado é 8,0 mm.

O projeto dos conjuntos 3VJE15-M 39G e 1VJF15-M 38J prevê um bocal adequado à vazão útil máxima dos conjuntos, pois seu diâmetro está próximo do ideal para a maior vazão (Ver Figuras 19, 20, 23 e 24). Já o conjunto 2VJF15-T 39B não apresentou um bocal otimizado, de acordo com a previsão do modelo, pois o diâmetro utilizado proporciona um valor de ΔH_{util} inferior ao do bocal ótimo (Ver Figuras 21 e 22). Deve-se lembrar, entretanto, que o modelo não teve um bom ajuste ao comportamento do conjunto 2VJF15-T 39B, e as diferenças entre a estimativa do modelo e os resultados observados provavelmente justificam as diferenças de ΔH_{util} entre o bocal ótimo (modelo) e o bocal utilizado no injetor.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se afirmar que:

- a) O modelo matemático proporcionou uma simulação adequada da relação $\Delta H_{\text{útil}}$ *versus* $q_{\text{útil}}$, para os conjuntos 3VJE15-M 39G (1/3 CV), na altura de sucção de 16,47 m, e 1VJE15-M 38J, nas duas alturas de sucção testadas;
- b) O modelo matemático proporcionou uma estimativa adequada do rendimento do sistema bomba-injetor para os conjuntos 3VJE15-M 39G (1/3 CV), na altura de sucção de 16,47 m, e 1VJE15-M 38J nas duas alturas de sucção testadas;
- c) A melhor relação entre $\Delta H_{\text{útil}}$ e diâmetro do bocal do injetor varia de acordo com a vazão útil desejada. De modo geral, para os injetores e vazões úteis testados, os maiores valores de $\Delta H_{\text{útil}}$ podem ser obtidos com o diâmetro de bocal variando de 3 a 6 mm;
- d) Para a vazão máxima de cada conjunto injetor-bomba centrífuga, os diâmetros de bocais que proporcionam o maior valor de $\Delta H_{\text{útil}}$ foram: 5 mm para o conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV); 4 mm, para o conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV) e 3 mm, para o conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV);
- e) O ajuste do modelo aos dados observados pode ser melhorado, utilizando-se expressões matemáticas para o cálculo dos coeficientes de descarga e de perda de carga do injetor, pois eles sofreram variações com a velocidade de escoamento de água pelo bocal;
- f) O modelo computacional desenvolvido mostrou-se adequado à obtenção das estimativas de funcionamento de conjuntos injetor-bomba centrífuga.

ANEXO A

Curva Vazão x Pressão das Bombas

Coeficientes de descarga (C_d) e de perda de carga (K) dos injetores

Relação vazão versus pressão para as bombas centrífugas utilizadas

Tabela 4 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 1VJF15-M 38J (1CV)

Ordem	Vazão (m3/s)	Pressão (mca)	Ordem	Vazão (m3/s)	Pressão (mca)
1	0.0000000	31	11	0.00132430	21
2	0.0003137	30	12	0.00138329	20
3	0.0004645	29	13	0.001480454	19
4	0.0006919	28	14	0.001518329	18
5	0.0008208	27	15	0.001584044	17
6	0.0009162	26	16	0.001661144	16
7	0.0010295	25	17	0.001705489	15
8	0.0011001	24	18	0.001797079	14
9	0.0011651	23	19	0.001802466	13
10	0.0012428	22	20	0.00186160	12

Regressão polinomial para a bomba 1VJF15-M 38J:

$$\Delta H_{bomba} = -4,852971818 \times 10^6 q_{bomba}^2 - 981,8362 q_{bomba} + 30,868 \quad (R^2 = 0,9957)$$

Vazão máxima: 6,74 m³/h

Tabela 5 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 2VJF15-T 39B (2CV)

Ordem	Vazão (m3/s)	Pressão (mca)	Ordem	Vazão (m3/s)	Pressão (mca)
1	0.0000000	40	13	0.00163679	28
2	0.0002576	39	14	0.0016988	27
3	0.0005220	38	15	0.00177959	26
4	0.0007475	37	16	0.0018214	25
5	0.0009072	36	17	0.00191445	24
6	0.0009524	35	18	0.00199754	23
7	0.0011302	34	19	0.00200136	22
8	0.0012288	33	20	0.00205984	21
9	0.0013128	32	21	0.00214606	20
10	0.0014207	31	22	0.00223432	19
11	0.0014802	30	23	0.00224317	18
12	0.0015257	29	24	0.00228189	17

Regressão polinomial para a bomba 2VJF15-M 39B:

$$\Delta H_{bomba} = -3,9288421154 \times 10^6 q_{bomba}^2 - 783,8175 q_{bomba} + 39,717 \quad (R^2 = 0,9962)$$

Vazão máxima: 8.31 m³/h

Tabela 6 - Dados experimentais de vazão e pressão da bomba JACUZZI, modelo 3VJE15-M 39G (1/3 CV)

Ordem	Vazão (m ³ /s)	Pressão (mca)
1	0.0000000	20
2	0.0002703	19
3	0.0004946	18
4	0.0005958	17
5	0.0007589	16
6	0.0008465	15
7	0.0009516	14
8	0.0010487	13

Regressão polinomial para a bomba 3VJE15-M 39G:

$$\Delta H_{bomba} = -3,9949804582 \times 10^6 q_{bomba}^2 - 2400,4959 q_{bomba} + 19,9748 \quad (R^2 = 0,9833)$$

Vazão máxima: 3,83m³/h

Coefficientes de descarga (Cd) e de perda de carga (K) dos injetores testados

Tabela 7 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 1

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
38.47	22.77	0.0000000	0.0006124	0.823	0.614
35.49	19.77	0.0000313	0.0005877	0.823	0.624
33.51	17.78	0.0000518	0.0005708	0.823	0.639
32.43	16.79	0.0000757	0.0005613	0.823	0.627
30.70	15.05	0.0000953	0.0005457	0.823	0.648
29.04	13.42	0.0001181	0.0005304	0.823	0.667
27.47	11.87	0.0001405	0.0005155	0.823	0.694
25.74	10.21	0.0001700	0.0004985	0.823	0.726
Média:				0.823	0.655
Mediana:				0.823	0.643

Tabela 8 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
39.39	23.77	0.0000000	0.0006195	0.823	0.762
39.39	23.77	0.0000000	0.0006195	0.823	0.762
35.48	19.77	0.0000331	0.0005874	0.823	0.791
35.47	19.77	0.0000339	0.0005873	0.823	0.790
33.46	17.78	0.0000602	0.0005700	0.823	0.795
32.48	16.78	0.0000684	0.0005614	0.823	0.811
32.42	16.79	0.0000763	0.0005609	0.823	0.795
31.84	16.44	0.0001111	0.0005558	0.823	0.738
31.89	16.48	0.0001097	0.0005562	0.823	0.739
31.67	16.32	0.0001191	0.0005542	0.823	0.726
31.58	16.31	0.0001287	0.0005534	0.823	0.707
31.18	16.08	0.0001528	0.0005498	0.823	0.666
31.14	16.08	0.0001589	0.0005494	0.823	0.653
31.02	16.02	0.0001657	0.0005483	0.823	0.641
30.76	15.91	0.0001850	0.0005460	0.823	0.605
Média:				0.823	0.732
Mediana:				0.823	0.739

Coefficientes de descarga (Cd) e de perda de carga (K) dos injetores testados

Tabela 9 - Injetor 2VJF15-T 39B (2 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 1

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
56.89	23.06	0.0000000	0.001530	0.917	0.716
54.88	24.07	0.0000000	0.001535	0.937	0.648
54.42	23.11	0.0000748	0.001514	0.928	0.653
53.45	22.14	0.0001335	0.001501	0.929	0.647
53.51	20.21	0.0002559	0.001468	0.908	0.688
52.96	21.15	0.0001500	0.001494	0.929	0.661
52.53	19.26	0.0003204	0.001459	0.911	0.680
51.54	18.31	0.0003898	0.001453	0.916	0.670
50.07	17.87	0.0004822	0.001437	0.919	0.635
49.10	17.44	0.0005786	0.001420	0.917	0.611
48.13	16.40	0.0006409	0.001402	0.915	0.620
47.14	15.72	0.0007195	0.001395	0.920	0.604
46.15	14.89	0.0007830	0.001390	0.927	0.598
46.16	15.01	0.0007948	0.001386	0.924	0.593
45.17	14.67	0.0008482	0.001378	0.929	0.573
44.19	13.58	0.0009134	0.001364	0.929	0.587
43.21	12.44	0.0009885	0.001355	0.934	0.601
42.23	12.15	0.0010721	0.001344	0.937	0.576
41.24	11.60	0.0011384	0.001336	0.943	0.567
40.26	10.17	0.0012082	0.001325	0.947	0.607
39.28	9.82	0.0012454	0.001316	0.952	0.598
Média:				0.927	0.625
Mediana:				0.928	0.611

Tabela 10 - Injetor 2VJF15-T 39B(2 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
58.89	25.06	0.0000000	0.001529	0.901	0.717
58.41	24.59	0.0000419	0.001520	0.899	0.712
57.92	24.10	0.0000567	0.001516	0.901	0.711
56.93	24.11	0.0000843	0.001509	0.904	0.686
55.95	23.14	0.0001312	0.001499	0.906	0.681
54.99	22.18	0.0002029	0.001480	0.903	0.676
54.02	20.74	0.0003011	0.001460	0.898	0.678
53.03	20.29	0.0003651	0.001455	0.904	0.652
52.06	19.35	0.0004448	0.001442	0.904	0.643
51.07	18.88	0.0004941	0.001433	0.907	0.626

Tabela 10 - Injetor 2VJF15-T 39B(2 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 2 (cont.)

50.09	18.42	0.0005427	0.001424	0.911	0.610
49.12	17.46	0.0006109	0.001406	0.908	0.612
48.15	16.23	0.0006920	0.001392	0.908	0.620
47.16	15.34	0.0007594	0.001386	0.914	0.615
46.17	14.25	0.0008427	0.001376	0.917	0.619
45.20	13.33	0.0008889	0.001359	0.915	0.635
44.22	12.37	0.0009834	0.001350	0.920	0.636
43.24	11.52	0.0010760	0.001339	0.923	0.638
42.25	10.82	0.0011295	0.001330	0.927	0.641
41.27	10.23	0.0012088	0.001322	0.933	0.634
40.30	9.76	0.0012345	0.001304	0.931	0.641
Média:				0.911	0.652
Mediana:				0.908	0.641

Tabela 11 - Injetor 1VJF15-M 39B (1 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 1

H1	H3	q _{útil}	q _{circ}	Cd	K
(mca)	(mca)	(m3/s)	(m3/s)	obs.	obs.
48.16	18.59	0.0000000	0.000620	0.696	1.289
47.17	17.60	0.0000349	0.000616	0.698	1.266
47.19	17.60	0.0000561	0.000593	0.672	1.336
46.20	17.10	0.0000788	0.000572	0.655	1.375
46.20	16.61	0.0001000	0.000578	0.662	1.349
45.23	16.37	0.0001466	0.000541	0.626	1.412
44.23	15.18	0.0002202	0.000538	0.630	1.340
43.23	14.37	0.0002866	0.000540	0.639	1.245
42.18	13.50	0.0003493	0.000599	0.719	0.992
41.19	12.29	0.0004231	0.000584	0.709	1.011
40.58	12.03	0.0004758	0.000707	0.865	0.703
39.08	10.99	0.0005559	0.000706	0.881	0.674
38.09	9.99	0.0006452	0.000697	0.881	0.674
37.10	9.61	0.0006690	0.000692	0.887	0.662
Média:				0.730	1.095
Mediana:				0.697	1.255

Tabela 12 - Injetor 1VJF15-M 39B (1 CV) - $\Delta z = 16,47$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	qútil (m3/s)	qcirc (m3/s)	Cd obs.	K obs.
47.03	19.14	0.0000000	0.000770	0.874	0.788
46.04	18.65	0.0000484	0.000762	0.875	0.757
45.54	17.66	0.0000754	0.000759	0.876	0.762
45.05	16.68	0.0001184	0.000751	0.872	0.768
44.05	16.44	0.0001474	0.000746	0.876	0.738
43.07	14.88	0.0002374	0.000731	0.868	0.740
42.08	14.31	0.0002826	0.000720	0.865	0.725
41.09	13.40	0.0003388	0.000710	0.864	0.720
40.60	13.11	0.0003818	0.000696	0.852	0.717
40.12	12.70	0.0004120	0.000682	0.840	0.728
39.12	11.67	0.0004815	0.000678	0.846	0.718
38.18	10.60	0.0005785	0.000610	0.770	0.822
37.22	10.43	0.0006027	0.000568	0.726	0.859
36.25	9.27	0.0006485	0.000522	0.677	1.009
Média:				0.834	0.775
Mediana:				0.864	0.749

Tabela 13 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 1

H1 (mca)	H3 (mca)	qútil (m3/s)	qcirc (m3/s)	Cd obs.	K obs.
40.19	23.20	0.0000000	0.0006200	0.815	0.648
39.21	22.20	0.0000072	0.0006120	0.815	0.656
37.22	21.20	0.0000139	0.0006050	0.827	0.623
36.74	20.20	0.0000239	0.0005990	0.825	0.644
35.26	19.20	0.0000350	0.0005900	0.829	0.630
34.77	18.20	0.0000447	0.0005840	0.827	0.655
33.80	17.20	0.0000578	0.0005710	0.820	0.671
32.32	16.21	0.0000719	0.0005610	0.825	0.658
31.34	15.21	0.0000858	0.0005520	0.824	0.668
30.85	14.21	0.0000928	0.0005460	0.822	0.706
29.37	13.21	0.0001111	0.0005320	0.821	0.703
28.39	10.76	0.0001281	0.0005240	0.823	0.811
26.42	10.77	0.0001617	0.0005090	0.830	0.706
25.44	9.72	0.0001817	0.0005000	0.831	0.730
24.45	9.13	0.0001997	0.0004920	0.835	0.722
23.96	8.62	0.0002119	0.0004890	0.838	0.732
22.49	7.42	0.0002522	0.0004720	0.836	0.758
22.00	6.87	0.0002694	0.0004620	0.828	0.794
20.52	5.96	0.0003150	0.0004560	0.847	0.772
19.54	5.12	0.0003456	0.0004420	0.842	0.825
Média:				0.828	0.706
Mediana:				0.827	0.704

Tabela 14 - Injetor 3VJE15-M 39G (1/3 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
40.19	23.20	0.0000000	0.0006200	0.815	0.648
39.21	22.20	0.0000072	0.0006120	0.815	0.656
37.22	21.20	0.0000139	0.0006050	0.827	0.623
36.74	20.20	0.0000239	0.0005990	0.825	0.644
35.26	19.20	0.0000350	0.0005900	0.829	0.630
34.77	18.20	0.0000447	0.0005840	0.827	0.655
33.80	17.20	0.0000578	0.0005710	0.820	0.671
32.32	16.21	0.0000719	0.0005610	0.825	0.658
31.34	15.21	0.0000858	0.0005520	0.824	0.668
30.85	14.21	0.0000928	0.0005460	0.822	0.706
29.37	13.21	0.0001111	0.0005320	0.821	0.703
28.39	12.22	0.0001281	0.0005240	0.823	0.714
26.42	10.67	0.0001617	0.0005090	0.830	0.713
25.44	9.55	0.0001817	0.0005000	0.831	0.744
24.45	8.92	0.0001997	0.0004920	0.835	0.740
23.96	8.37	0.0002119	0.0004890	0.838	0.754
22.49	7.08	0.0002522	0.0004720	0.836	0.792
22.00	6.50	0.0002694	0.0004620	0.828	0.835
20.52	5.52	0.0003150	0.0004560	0.847	0.825
19.54	4.62	0.0003456	0.0004420	0.842	0.892
Média:				0.828	0.714
Mediana:				0.827	0.704

Tabela 15 - Injetor 2VJF15-M 39B (2 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 1

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
58.82	25.41	0.0000000	0.001535	0.905	0.703
57.84	24.43	0.0000417	0.001522	0.905	0.701
56.86	23.45	0.0001039	0.001511	0.906	0.691
56.36	22.96	0.0001222	0.001507	0.908	0.690
54.88	22.00	0.0002133	0.001491	0.910	0.665
54.39	21.53	0.0002722	0.001482	0.909	0.656
53.90	20.55	0.0003172	0.001476	0.909	0.662
53.41	20.07	0.0003633	0.001465	0.907	0.659
52.92	19.59	0.0004100	0.001457	0.906	0.655
51.94	18.63	0.0004806	0.001444	0.906	0.651
50.95	18.14	0.0005183	0.001433	0.908	0.640
50.47	17.67	0.0005768	0.001420	0.904	0.637
49.48	16.71	0.0006394	0.001416	0.911	0.632
47.99	15.74	0.0007027	0.001407	0.919	0.620
47.00	14.77	0.0007619	0.001394	0.921	0.627
46.02	13.82	0.0008478	0.001379	0.921	0.630
44.04	12.84	0.0009811	0.001361	0.929	0.602
43.05	12.51	0.0010233	0.001354	0.935	0.585
42.56	11.79	0.0010889	0.001345	0.934	0.598
42.07	11.24	0.0011465	0.001339	0.936	0.604
40.08	10.24	0.0012536	0.001326	0.950	0.588
39.11	8.77	0.0013917	0.001306	0.947	0.634
36.14	6.99	0.0015302	0.001281	0.967	0.655
34.66	5.76	0.0015352	0.001259	0.971	0.713
Média:				0.922	0.646
Mediana:				0.911	0.645

Tabela 16 - Injetor 2VJF15-M 39B (2 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
58.83	25.41	0.0000000	0.001531	0.902	0.707
57.84	24.43	0.0000383	0.001523	0.905	0.701
56.85	23.45	0.0000967	0.001514	0.908	0.691
56.36	22.96	0.0001244	0.001505	0.906	0.691
54.88	22.00	0.0002206	0.001490	0.910	0.664
54.39	21.53	0.0002739	0.001482	0.909	0.655
53.90	20.54	0.0002950	0.001477	0.910	0.668
53.41	20.07	0.0003600	0.001465	0.907	0.661
52.92	19.59	0.0003950	0.001459	0.907	0.658
51.94	18.63	0.0004811	0.001443	0.906	0.651
50.96	18.15	0.0005267	0.001431	0.907	0.639
50.47	17.67	0.0005793	0.001418	0.903	0.638
49.48	16.71	0.0006377	0.001415	0.910	0.633
47.99	15.74	0.0007027	0.001406	0.919	0.621
47.00	14.77	0.0007686	0.001392	0.919	0.626
46.03	13.82	0.0008478	0.001375	0.918	0.633
44.04	12.84	0.0009856	0.001359	0.928	0.602
43.05	12.51	0.0010267	0.001351	0.933	0.587
42.57	11.80	0.0011000	0.001341	0.931	0.598
42.07	11.24	0.0011479	0.001336	0.933	0.606
40.08	10.24	0.0012522	0.001325	0.949	0.590
39.11	8.76	0.0013867	0.001306	0.947	0.635
37.13	7.54	0.0015302	0.001288	0.959	0.643
36.14	6.99	0.0015302	0.001275	0.963	0.661
35.15	6.03	0.0015336	0.001266	0.969	0.703
Média:				0.922	0.646
Mediana:				0.910	0.643

Tabela 17 - Injetor 1VJF15-M 39B (1 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 1

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
46.61	18.11	0.0000000	0.000786	0.897	0.773
46.62	18.11	0.0000000	0.000784	0.894	0.777
45.13	17.13	0.0000789	0.000772	0.895	0.740
44.63	16.13	0.0000961	0.000769	0.897	0.753
43.63	16.65	0.0001544	0.000761	0.898	0.687
43.64	15.16	0.0001883	0.000756	0.892	0.730
42.65	14.18	0.0002622	0.000746	0.890	0.715
42.64	15.16	0.0001856	0.000756	0.902	0.702
41.65	14.18	0.0002683	0.000746	0.901	0.681
41.65	13.19	0.0003022	0.000741	0.895	0.713
41.15	13.21	0.0003317	0.000739	0.898	0.686
41.15	14.20	0.0003122	0.000739	0.898	0.653
39.66	12.23	0.0004122	0.000729	0.903	0.660
39.66	12.23	0.0004117	0.000731	0.905	0.657
39.16	12.03	0.0004489	0.000725	0.904	0.642
38.66	12.02	0.0004589	0.000725	0.910	0.622
38.17	11.63	0.0005006	0.000720	0.909	0.613
37.67	10.81	0.0005372	0.000717	0.912	0.630
37.67	10.70	0.0005394	0.000717	0.912	0.635
37.17	10.63	0.0005624	0.000715	0.915	0.615
36.67	10.40	0.0005874	0.000712	0.918	0.605
Média:				0.902	0.681
Mediana:				0.901	0.681

Tabela 18 - Injetor 1VJF15-M 39B(1 CV) - $\Delta z = 11,97$ m - Teste 2

H1 (mca)	H3 (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	Cd obs.	K obs.
47.62	18.11	0.0000000	0.000782	0.882	0.809
47.61	18.11	0.0000000	0.000786	0.887	0.800
45.62	17.13	0.0000717	0.000774	0.893	0.755
43.63	16.14	0.0001311	0.000766	0.904	0.710
43.63	16.14	0.0001367	0.000762	0.899	0.714
43.64	15.16	0.0001833	0.000759	0.895	0.727
43.14	14.66	0.0002083	0.000752	0.892	0.730
42.14	14.18	0.0002533	0.000750	0.901	0.698
41.65	14.18	0.0002717	0.000745	0.900	0.681
40.65	13.20	0.0003106	0.000740	0.905	0.680
40.65	13.22	0.0003572	0.000739	0.904	0.657
39.66	12.17	0.0003839	0.000732	0.907	0.672
39.65	12.23	0.0003939	0.000735	0.910	0.660
39.66	11.75	0.0004344	0.000731	0.905	0.670
38.66	11.43	0.0004656	0.000724	0.908	0.651
37.66	11.20	0.0005106	0.000721	0.917	0.614
37.17	10.83	0.0005550	0.000717	0.918	0.604
36.67	10.75	0.0005666	0.000715	0.922	0.590
36.67	10.68	0.0005694	0.000714	0.920	0.594
36.17	10.57	0.0005881	0.000711	0.923	0.579
Média:				0.905	0.680
Mediana:				0.904	0.676

ANEXO B

**Resultados estimados (simulação) e observados (testes)
do funcionamento dos conjuntos bomba- injetor**

Tabela 19 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil

Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV)
K = 0,697
Cd = 0,823

$\Delta z = 16,47$ m

TESTE 1

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	q _{circ} (m ³ /s)	q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
16.04	0.92	0.27	17.23	0.00058094	0.00000000	35.65	17.23	0.00058094	0.00
15.66	0.90	0.27	16.84	0.00057401	0.00001162	34.82	17.20	0.00058563	4.02
15.30	0.88	0.28	16.46	0.00056735	0.00002324	34.04	17.16	0.00059059	7.80
14.95	0.87	0.28	16.10	0.00056094	0.00003486	33.29	17.13	0.00059580	11.37
14.63	0.85	0.29	15.77	0.00055477	0.00004647	32.58	17.09	0.00060125	14.74
14.32	0.83	0.29	15.44	0.00054883	0.00005809	31.91	17.05	0.00060692	17.92
14.02	0.82	0.30	15.13	0.00054310	0.00006971	31.26	17.00	0.00061282	20.92
13.74	0.80	0.30	14.84	0.00053758	0.00008133	30.65	16.96	0.00061891	23.75
13.46	0.79	0.31	14.56	0.00053225	0.00009295	30.06	16.91	0.00062520	26.43
13.21	0.78	0.31	14.30	0.00052711	0.00010457	29.50	16.86	0.00063168	28.96
12.96	0.76	0.32	14.04	0.00052214	0.00011619	28.96	16.81	0.00063833	31.35
12.72	0.75	0.32	13.80	0.00051733	0.00012781	28.45	16.76	0.00064514	33.62
12.49	0.74	0.33	13.56	0.00051268	0.00013942	27.95	16.71	0.00065210	35.76
12.27	0.73	0.34	13.34	0.00050817	0.00015104	27.48	16.66	0.00065921	37.80
12.06	0.72	0.34	13.13	0.00050380	0.00016266	27.02	16.60	0.00066646	39.73
11.86	0.71	0.35	12.92	0.00049956	0.00017428	26.58	16.54	0.00067384	41.56

Tabela 20-Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 3VJE15-M 39G(1/3 CV)

						$\Delta z = 16,47$ m	TESTE 1		
Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{boc} (mca)	Hf _{sist} (mca)	q _{útil} (m ³ /s)	q _{circ} (m ³ /s)	q _{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	Rend. (%)
1,011	0,297	15,70	17,01	0,0000000	0,0006124	0,0006124	17,01	38,47	0,00
0,941	0,302	14,70	15,94	0,0000313	0,0005877	0,0006191	16,96	34,47	10,32
0,894	0,305	14,19	15,39	0,0000518	0,0005708	0,0006225	16,93	31,96	15,83
0,868	0,318	13,48	14,66	0,0000757	0,0005613	0,0006370	16,83	30,26	21,73
0,826	0,321	13,15	14,30	0,0000953	0,0005457	0,0006410	16,79	28,20	25,55
0,786	0,328	12,80	13,92	0,0001181	0,0005304	0,0006485	16,74	26,22	29,43
0,748	0,334	12,57	13,65	0,0001405	0,0005155	0,0006560	16,68	24,44	32,65
0,705	0,346	12,31	13,36	0,0001700	0,0004985	0,0006685	16,58	22,52	36,30

Tabela 21 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV)** **$\Delta z = 16,47$ m****TESTE 2****K = 0,643****Cd = 0,823**

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
15.83	0.98	0.29	17.09	0.000600	0.000000	38.07	17.09	0.00060080	0.00
15.41	0.95	0.29	16.65	0.000592	0.000012	37.08	17.06	0.00060477	4.32
15.01	0.93	0.29	16.23	0.000585	0.000024	36.14	17.03	0.00060907	8.37
14.63	0.91	0.30	15.84	0.000577	0.000036	35.25	17.00	0.00061368	12.18
14.27	0.89	0.30	15.47	0.000570	0.000048	34.41	16.96	0.00061858	15.76
13.93	0.87	0.31	15.11	0.000563	0.000060	33.61	16.92	0.00062376	19.13
13.61	0.86	0.31	14.78	0.000557	0.000072	32.85	16.88	0.00062921	22.30
13.30	0.84	0.32	14.46	0.000550	0.000084	32.13	16.84	0.00063490	25.28
13.01	0.82	0.32	14.15	0.000544	0.000096	31.44	16.80	0.00064084	28.08
12.73	0.81	0.33	13.87	0.000538	0.000108	30.79	16.75	0.00064700	30.73
12.47	0.79	0.33	13.59	0.000533	0.000120	30.17	16.70	0.00065338	33.22
12.21	0.78	0.34	13.33	0.000527	0.000132	29.57	16.65	0.00065995	35.57
11.97	0.77	0.34	13.08	0.000522	0.000144	29.00	16.60	0.00066671	37.79
11.74	0.75	0.35	12.84	0.000517	0.000156	28.46	16.54	0.00067365	39.88
11.52	0.74	0.36	12.61	0.000512	0.000168	27.94	16.49	0.00068076	41.87
11.31	0.73	0.36	12.40	0.000507	0.000180	27.44	16.43	0.00068802	43.74
11.10	0.72	0.37	12.19	0.000503	0.000192	26.96	16.37	0.00069543	45.51

Tabela 22-Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 3VJE15-M 39G(1/3 CV) **$\Delta z = 16,47$ m****TESTE 2**

Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{boc} (mca)	Hf _{sist} (mca)	Q _{útil} (m ³ /s)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	Rend. (%)
1,03	0,30	15,62	16,95	0,0000000	0,0006195	0,0006195	16,95	39,39	0,00
1,03	0,30	15,62	16,95	0,0000000	0,0006195	0,0006195	16,95	39,39	0,00
0,94	0,30	14,63	15,88	0,0000331	0,0005874	0,0006205	16,95	34,41	10,88
0,94	0,30	14,60	15,84	0,0000339	0,0005873	0,0006212	16,94	34,37	11,13
0,89	0,31	13,88	15,08	0,0000602	0,0005700	0,0006301	16,88	31,66	18,10
0,87	0,31	13,75	14,93	0,0000684	0,0005614	0,0006298	16,88	30,53	19,90
0,87	0,32	13,45	14,64	0,0000763	0,0005609	0,0006373	16,82	30,24	21,90
0,85	0,34	12,26	13,46	0,0001111	0,0005558	0,0006668	16,60	28,71	29,78
0,85	0,34	12,31	13,50	0,0001097	0,0005562	0,0006658	16,61	28,79	29,50
0,85	0,35	12,00	13,20	0,0001191	0,0005542	0,0006733	16,55	28,33	31,44
0,85	0,36	11,65	12,86	0,0001287	0,0005534	0,0006822	16,48	27,96	33,45
0,84	0,38	10,84	12,06	0,0001528	0,0005498	0,0007026	16,32	26,92	38,08
0,84	0,38	10,62	11,83	0,0001589	0,0005494	0,0007083	16,27	26,70	39,27
0,83	0,39	10,39	11,61	0,0001657	0,0005483	0,0007140	16,22	26,41	40,48
0,83	0,40	9,72	10,95	0,0001850	0,0005460	0,0007310	16,09	25,63	43,92

Tabela 23 Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV)** **$\Delta z = 11,97$ m****TESTE 1****K = 0.733****Cd = 0.828**

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	q _{circ} (m ³ /s)	q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
16.41	0.68	0.20	17.29	0.00057300	0.00000000	34.08	17.29	0.00057300	0.00
16.05	0.66	0.20	16.92	0.00056674	0.00001146	33.36	17.25	0.00057820	3.83
15.71	0.65	0.21	16.57	0.00056072	0.00002292	32.67	17.21	0.00058364	7.45
15.39	0.64	0.21	16.24	0.00055491	0.00003438	32.02	17.17	0.00058929	10.88
15.08	0.63	0.21	15.92	0.00054930	0.00004584	31.39	17.13	0.00059514	14.11
14.79	0.62	0.22	15.62	0.00054390	0.00005730	30.79	17.09	0.00060120	17.17
14.50	0.61	0.22	15.33	0.00053868	0.00006876	30.22	17.04	0.00060744	20.07
14.23	0.60	0.22	15.06	0.00053364	0.00008022	29.67	17.00	0.00061386	22.82
13.97	0.59	0.23	14.79	0.00052877	0.00009168	29.15	16.95	0.00062045	25.41
13.73	0.58	0.23	14.54	0.00052406	0.00010314	28.65	16.90	0.00062720	27.88
13.49	0.57	0.24	14.30	0.00051950	0.00011460	28.16	16.85	0.00063410	30.21
13.26	0.56	0.24	14.07	0.00051508	0.00012606	27.70	16.79	0.00064114	32.43
13.04	0.55	0.25	13.84	0.00051079	0.00013752	27.25	16.74	0.00064831	34.54
12.83	0.55	0.25	13.63	0.00050663	0.00014898	26.83	16.68	0.00065561	36.54
12.63	0.54	0.26	13.42	0.00050259	0.00016044	26.41	16.63	0.00066303	38.44
12.43	0.53	0.26	13.22	0.00049867	0.00017190	26.01	16.57	0.00067057	40.25
12.24	0.52	0.27	13.03	0.00049484	0.00018336	25.63	16.51	0.00067821	41.97
12.06	0.52	0.27	12.85	0.00049112	0.00019482	25.26	16.45	0.00068594	43.61
11.88	0.51	0.28	12.67	0.00048750	0.00020628	24.90	16.39	0.00069378	45.18
11.71	0.50	0.28	12.49	0.00048396	0.00021774	24.55	16.32	0.00070170	46.67
11.54	0.50	0.29	12.33	0.00048050	0.00022920	24.21	16.26	0.00070970	48.09
11.38	0.49	0.29	12.17	0.00047713	0.00024066	23.88	16.19	0.00071779	49.45
11.22	0.49	0.30	12.01	0.00047382	0.00025212	23.57	16.13	0.00072594	50.75
11.07	0.48	0.31	11.86	0.00047059	0.00026358	23.26	16.06	0.00073417	51.99
10.92	0.47	0.31	11.71	0.00046742	0.00027504	22.96	15.99	0.00074246	53.18
10.78	0.47	0.32	11.56	0.00046431	0.00028650	22.66	15.92	0.00075082	54.32
10.63	0.46	0.33	11.42	0.00046126	0.00029796	22.38	15.85	0.00075923	55.40
10.50	0.46	0.33	11.29	0.00045827	0.00030942	22.10	15.78	0.00076769	56.45
10.36	0.45	0.34	11.15	0.00045532	0.00032088	21.82	15.70	0.00077621	57.45
10.23	0.45	0.34	11.02	0.00045243	0.00033234	21.56	15.63	0.00078477	58.41
10.10	0.44	0.35	10.90	0.00044957	0.00034380	21.30	15.56	0.00079338	59.33

Tabela 24- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV) $\Delta z = 11,97$ m TESTE 1

Hf_1 (mca)	Hf_2 (mca)	Hf_{boc} (mca)	Hf_{sist} (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	ΔH_{util} (mca)	Rend. (%)
0,778	0,228	16,994	18,000	0,0000000	0,0006200	0,0006200	18,0	40,19	0,00
0,761	0,228	16,758	17,747	0,0000072	0,0006120	0,0006192	18,0	38,96	2,52
0,745	0,228	15,558	16,531	0,0000139	0,0006050	0,0006189	17,0	36,76	4,86
0,733	0,230	15,762	16,724	0,0000239	0,0005990	0,0006229	17,5	35,96	7,89
0,713	0,232	14,960	15,905	0,0000350	0,0005900	0,0006250	17,0	34,16	11,29
0,701	0,234	15,229	16,163	0,0000447	0,0005840	0,0006287	17,5	33,43	13,66
0,674	0,234	14,927	15,835	0,0000578	0,0005710	0,0006288	17,5	32,13	17,01
0,653	0,237	14,128	15,018	0,0000719	0,0005610	0,0006329	17,0	30,33	20,54
0,635	0,240	13,877	14,752	0,0000858	0,0005520	0,0006378	17,0	29,09	23,42
0,623	0,241	14,349	15,213	0,0000928	0,0005460	0,0006388	17,5	28,56	24,14
0,595	0,243	13,558	14,397	0,0001111	0,0005320	0,0006431	17,0	26,77	27,90
0,580	0,249	15,187	16,016	0,0001281	0,0005240	0,0006521	18,5	25,94	28,28
0,551	0,262	12,466	13,279	0,0001617	0,0005090	0,0006707	16,5	23,24	35,58
0,534	0,270	12,452	13,256	0,0001817	0,0005000	0,0006817	16,5	22,18	37,63
0,519	0,277	11,915	12,710	0,0001997	0,0004920	0,0006917	16,1	21,05	39,99
0,514	0,283	11,927	12,724	0,0002119	0,0004890	0,0007009	16,1	20,55	40,94
0,483	0,300	11,510	12,293	0,0002522	0,0004720	0,0007242	15,9	18,93	44,82
0,465	0,305	11,559	12,329	0,0002694	0,0004620	0,0007314	15,9	18,43	46,22
0,455	0,334	10,951	11,740	0,0003150	0,0004560	0,0007710	15,3	16,91	49,39
0,430	0,347	10,995	11,773	0,0003456	0,0004420	0,0007876	15,2	16,12	51,13

Tabela 25 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV)** **$\Delta z = 11,97 \text{ m}$** **TESTE 2** **$K = 0.733 \text{ Cd} = 0.827$**

$H_{f_{boc}}$ (mca)	H_{f_1} (mca)	H_{f_2} (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{circ} (m ³ /s)	$Q_{\text{útil}}$ (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q_{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
16.41	0.68	0.20	17.29	0.00057300	0.00000000	34.16	17.29	0.00057300	0.00
16.05	0.66	0.20	16.92	0.00056672	0.00001146	33.44	17.25	0.00057818	3.84
15.71	0.65	0.21	16.57	0.00056067	0.00002292	32.74	17.21	0.00058359	7.47
15.39	0.64	0.21	16.24	0.00055484	0.00003438	32.08	17.17	0.00058922	10.90
15.08	0.63	0.21	15.92	0.00054922	0.00004584	31.45	17.13	0.00059506	14.14
14.78	0.62	0.22	15.62	0.00054380	0.00005730	30.85	17.09	0.00060110	17.21
14.50	0.61	0.22	15.33	0.00053856	0.00006876	30.28	17.04	0.00060732	20.11
14.23	0.60	0.22	15.05	0.00053351	0.00008022	29.73	17.00	0.00061373	22.86
13.97	0.59	0.23	14.78	0.00052862	0.00009168	29.20	16.95	0.00062030	25.46
13.72	0.58	0.23	14.53	0.00052390	0.00010314	28.69	16.90	0.00062704	27.93
13.48	0.57	0.24	14.29	0.00051932	0.00011460	28.21	16.85	0.00063392	30.27
13.25	0.56	0.24	14.06	0.00051489	0.00012606	27.74	16.79	0.00064095	32.49
13.03	0.55	0.25	13.83	0.00051059	0.00013752	27.30	16.74	0.00064811	34.60
12.82	0.55	0.25	13.62	0.00050642	0.00014898	26.87	16.69	0.00065540	36.60
12.61	0.54	0.26	13.41	0.00050237	0.00016044	26.45	16.63	0.00066282	38.50
12.42	0.53	0.26	13.21	0.00049844	0.00017190	26.05	16.57	0.00067034	40.32
12.23	0.52	0.27	13.02	0.00049461	0.00018336	25.66	16.51	0.00067797	42.04
12.04	0.52	0.27	12.83	0.00049088	0.00019482	25.29	16.45	0.00068570	43.68
11.87	0.51	0.28	12.65	0.00048725	0.00020628	24.93	16.39	0.00069353	45.25
11.69	0.50	0.28	12.48	0.00048370	0.00021774	24.58	16.33	0.00070144	46.74
11.53	0.50	0.29	12.31	0.00048024	0.00022920	24.24	16.26	0.00070944	48.16
11.37	0.49	0.29	12.15	0.00047686	0.00024066	23.91	16.20	0.00071752	49.52
11.21	0.49	0.30	11.99	0.00047355	0.00025212	23.59	16.13	0.00072567	50.82
11.06	0.48	0.31	11.84	0.00047031	0.00026358	23.28	16.06	0.00073389	52.06
10.91	0.47	0.31	11.69	0.00046714	0.00027504	22.98	15.99	0.00074218	53.25
10.76	0.47	0.32	11.55	0.00046403	0.00028650	22.69	15.92	0.00075053	54.39
10.62	0.46	0.33	11.41	0.00046097	0.00029796	22.40	15.85	0.00075894	55.48
10.48	0.46	0.33	11.27	0.00045797	0.00030942	22.12	15.78	0.00076740	56.52
10.35	0.45	0.34	11.14	0.00045503	0.00032088	21.85	15.71	0.00077591	57.52
10.22	0.45	0.34	11.01	0.00045213	0.00033234	21.58	15.63	0.00078447	58.48
10.09	0.44	0.35	10.88	0.00044927	0.00034380	21.32	15.56	0.00079307	59.40
9.96	0.44	0.36	10.76	0.00044646	0.00035526	21.06	15.48	0.00080172	60.28

Tabela 26- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 3VJE15-M 39G (1/3 CV) $\Delta z = 11,97$ m TESTE 2

Hf_1 (mca)	Hf_2 (mca)	Hf_{boc} (mca)	Hf_{sist} (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	$\Delta H_{útil}$ (mca)	Rend. (%)
0,778	0,228	16,994	18,000	0,0000000	0,0006200	0,0006200	18,0	40,19	0,00
0,761	0,228	16,758	17,747	0,0000072	0,0006120	0,0006192	18,0	38,96	2,52
0,745	0,228	15,558	16,531	0,0000139	0,0006050	0,0006189	17,0	36,76	4,86
0,733	0,230	15,762	16,724	0,0000239	0,0005990	0,0006229	17,5	35,96	7,89
0,713	0,232	14,960	15,905	0,0000350	0,0005900	0,0006250	17,0	34,16	11,29
0,701	0,234	15,229	16,163	0,0000447	0,0005840	0,0006287	17,5	33,43	13,66
0,674	0,234	14,927	15,835	0,0000578	0,0005710	0,0006288	17,5	32,13	17,01
0,653	0,237	14,128	15,018	0,0000719	0,0005610	0,0006329	17,0	30,33	20,54
0,635	0,240	13,877	14,752	0,0000858	0,0005520	0,0006378	17,0	29,09	23,42
0,623	0,241	14,349	15,213	0,0000928	0,0005460	0,0006388	17,5	28,56	24,14
0,595	0,243	13,558	14,397	0,0001111	0,0005320	0,0006431	17,0	26,77	27,90
0,580	0,249	13,368	14,197	0,0001281	0,0005240	0,0006521	17,0	25,59	30,49
0,551	0,262	12,600	13,413	0,0001617	0,0005090	0,0006707	16,6	23,27	35,38
0,534	0,270	12,691	13,495	0,0001817	0,0005000	0,0006817	16,7	22,24	37,28
0,519	0,277	12,219	13,015	0,0001997	0,0004920	0,0006917	16,3	21,14	39,53
0,514	0,283	12,290	13,087	0,0002119	0,0004890	0,0007009	16,4	20,66	40,40
0,483	0,300	12,029	12,811	0,0002522	0,0004720	0,0007242	16,2	19,11	44,04
0,465	0,305	12,154	12,924	0,0002694	0,0004620	0,0007314	16,3	18,65	45,36
0,455	0,334	11,697	12,486	0,0003150	0,0004560	0,0007710	15,8	17,22	48,33
0,430	0,347	11,887	12,665	0,0003456	0,0004420	0,0007876	15,7	16,51	49,95

Tabela 27 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil

Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV)

 $\Delta z = 16,47 \text{ m}$

TESTE 1

K = 0.540

Cd = 0,928

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.70	1.56	0.60	28.86	0.00156566	0.00000000	59.73	28.86	0.0015656	0.00
25.99	1.52	0.61	28.12	0.00154459	0.00003131	58.15	28.72	0.0015759	4.02
25.30	1.48	0.61	27.40	0.00152411	0.00006263	56.65	28.58	0.0015867	7.82
24.65	1.45	0.62	26.72	0.00150418	0.00009394	55.20	28.43	0.0015981	11.41
24.01	1.42	0.63	26.06	0.00148477	0.00012525	53.81	28.27	0.0016100	14.81
23.41	1.39	0.64	25.43	0.00146586	0.00015657	52.47	28.10	0.0016224	18.02
22.82	1.36	0.65	24.83	0.00144743	0.00018788	51.18	27.93	0.0016353	21.05
22.26	1.33	0.66	24.24	0.00142944	0.00021919	49.94	27.75	0.0016486	23.93
21.71	1.30	0.67	23.68	0.00141187	0.00025051	48.74	27.56	0.0016623	26.65
21.19	1.27	0.68	23.14	0.00139469	0.00028182	47.58	27.36	0.0016765	29.24
20.68	1.24	0.69	22.61	0.00137788	0.00031313	46.47	27.16	0.0016910	31.68
20.19	1.22	0.70	22.11	0.00136141	0.00034445	45.38	26.95	0.0017058	34.01
19.71	1.19	0.71	21.62	0.00134527	0.00037576	44.34	26.73	0.0017210	36.21
19.25	1.17	0.72	21.14	0.00132943	0.00040707	43.32	26.51	0.0017365	38.31
18.80	1.14	0.73	20.68	0.00131387	0.00043839	42.33	26.28	0.0017522	40.30
18.37	1.12	0.74	20.23	0.00129858	0.00046970	41.37	26.05	0.0017682	42.19
17.95	1.10	0.76	19.80	0.00128353	0.00050101	40.44	25.81	0.0017845	43.99
17.53	1.08	0.77	19.38	0.00126870	0.00053232	39.53	25.56	0.0018010	45.71
17.13	1.06	0.78	18.97	0.00125409	0.00056364	38.65	25.31	0.0018177	47.34
16.74	1.03	0.79	18.57	0.00123966	0.00059495	37.78	25.06	0.0018346	48.90
16.36	1.01	0.81	18.18	0.00122542	0.00062626	36.94	24.79	0.0018516	50.39
15.98	0.99	0.82	17.80	0.00121134	0.00065758	36.11	24.53	0.0018689	51.80
15.62	0.97	0.83	17.42	0.00119740	0.00068889	35.31	24.26	0.0018862	53.15
15.26	0.95	0.85	17.06	0.00118361	0.00072020	34.52	23.98	0.0019038	54.45
14.91	0.93	0.86	16.70	0.00116993	0.00075152	33.75	23.71	0.0019214	55.68
14.57	0.92	0.87	16.36	0.00115637	0.00078283	32.99	23.42	0.0019392	56.86
14.23	0.90	0.89	16.01	0.00114291	0.00081414	32.25	23.14	0.0019570	57.98
13.90	0.88	0.90	15.68	0.00112954	0.00084546	31.52	22.84	0.0019750	59.06
13.57	0.86	0.92	15.35	0.00111625	0.00087677	30.80	22.55	0.0019930	60.09
13.25	0.84	0.93	15.03	0.00110303	0.00090808	30.09	22.25	0.0020111	61.07
12.94	0.83	0.95	14.71	0.00108987	0.00093940	29.40	21.95	0.0020292	62.01
12.63	0.81	0.96	14.40	0.00107676	0.00097071	28.72	21.64	0.0020474	62.91
12.32	0.79	0.98	14.09	0.00106369	0.00100202	28.04	21.33	0.0020657	63.77
12.02	0.77	0.99	13.79	0.00105066	0.00103334	27.38	21.02	0.0020839	64.59
11.73	0.76	1.01	13.49	0.00103765	0.00106465	26.73	20.71	0.0021023	65.38
11.44	0.74	1.02	13.20	0.00102466	0.00109596	26.08	20.39	0.0021206	66.13
11.15	0.72	1.04	12.91	0.00101169	0.00112728	25.45	20.07	0.0021389	66.84
10.87	0.71	1.05	12.63	0.00099871	0.00115859	24.82	19.74	0.0021573	67.53
10.58	0.69	1.07	12.35	0.00098574	0.00118990	24.20	19.41	0.0021756	68.18
10.31	0.68	1.08	12.07	0.00097275	0.00122122	23.59	19.09	0.0021939	68.80
10.03	0.66	1.10	11.79	0.00095975	0.00125253	22.99	18.75	0.0022122	69.40

Tabela 28- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta z = 16,47$ m TESTE 1

Hf_1 (mca)	Hf_2 (mca)	Hf_{boc} (mca)	Hf_{sist} (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	ΔH_{util} (mca)	Rend. (%)
1,577	0,594	33,828	36,00	0,0000000	0,001530	0,0015300	36,0	56,89	0,00
1,587	0,598	30,815	33,00	0,0000000	0,001535	0,0015350	33,0	54,88	0,00
1,547	0,637	30,211	32,40	0,0000748	0,001514	0,0015888	33,5	53,32	7,51
1,522	0,672	29,404	31,60	0,0001335	0,001501	0,0016345	33,5	51,55	12,65
1,461	0,741	29,905	32,11	0,0002559	0,001468	0,0017239	35,5	50,12	21,32
1,509	0,679	29,764	31,95	0,0001500	0,001494	0,0016440	34,0	50,91	13,77
1,444	0,786	29,206	31,44	0,0003204	0,001459	0,0017794	35,5	48,46	25,19
1,433	0,839	28,518	30,79	0,0003898	0,001453	0,0018428	35,5	46,83	28,83
1,404	0,904	26,445	28,75	0,0004822	0,001437	0,0019192	34,5	44,32	33,86
1,374	0,975	24,849	27,20	0,0005786	0,001420	0,0019986	34,0	42,29	38,44
1,342	1,015	24,577	26,93	0,0006409	0,001402	0,0020429	34,1	40,97	40,61
1,329	1,082	23,704	26,12	0,0007195	0,001395	0,0021145	33,8	39,42	43,25
1,320	1,138	23,295	25,75	0,0007830	0,001390	0,0021730	33,7	38,18	44,90
1,313	1,146	22,975	25,43	0,0007948	0,001386	0,0021808	33,6	37,98	45,50
1,299	1,190	21,933	24,42	0,0008482	0,001378	0,0022262	33,0	36,60	47,25
1,275	1,242	22,024	24,54	0,0009134	0,001364	0,0022774	33,1	35,60	48,45
1,260	1,309	22,246	24,82	0,0009885	0,001355	0,0023435	33,3	34,68	49,54
1,241	1,385	20,992	23,62	0,0010721	0,001344	0,0024161	32,7	33,14	51,67
1,227	1,448	20,403	23,08	0,0011384	0,001336	0,0024744	32,3	32,00	52,87
1,208	1,512	21,508	24,23	0,0012082	0,001325	0,0025332	32,8	31,67	53,01
1,193	1,543	20,878	23,61	0,0012454	0,001316	0,0025614	32,2	30,70	53,67

Tabela 29 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV)** $\Delta z = 16,47 \text{ m}$ **TESTE 2** $K = 0.540$ $Cd = 0,908$

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.70	1.56	0.60	28.86	0.00156566	0.00000000	62.28	28.86	0.00156566	0.00
25.96	1.52	0.61	28.08	0.00154359	0.00003131	60.57	28.74	0.00157491	4.19
25.24	1.48	0.61	27.33	0.00152218	0.00006263	58.92	28.61	0.00158481	8.14
24.55	1.45	0.62	26.62	0.00150138	0.00009394	57.35	28.47	0.00159532	11.86
23.90	1.41	0.63	25.94	0.00148117	0.00012525	55.84	28.32	0.00160643	15.37
23.27	1.38	0.64	25.28	0.00146152	0.00015657	54.39	28.16	0.00161809	18.69
22.66	1.35	0.64	24.66	0.00144240	0.00018788	53.00	28.00	0.00163027	21.82
22.08	1.32	0.65	24.05	0.00142377	0.00021919	51.67	27.82	0.00164296	24.77
21.52	1.29	0.66	23.47	0.00140561	0.00025051	50.38	27.64	0.00165611	27.57
20.98	1.26	0.67	22.92	0.00138789	0.00028182	49.14	27.45	0.00166971	30.21
20.46	1.23	0.68	22.38	0.00137058	0.00031313	47.94	27.26	0.00168371	32.71
19.96	1.21	0.69	21.86	0.00135366	0.00034445	46.79	27.06	0.00169811	35.08
19.48	1.18	0.70	21.36	0.00133711	0.00037576	45.68	26.85	0.00171287	37.32
19.01	1.16	0.71	20.88	0.00132090	0.00040707	44.60	26.63	0.00172797	39.45
18.55	1.13	0.72	20.41	0.00130500	0.00043839	43.55	26.41	0.00174338	41.47
18.11	1.11	0.74	19.95	0.00128940	0.00046970	42.54	26.18	0.00175909	43.38
17.68	1.08	0.75	19.52	0.00127407	0.00050101	41.55	25.95	0.00177508	45.20
17.27	1.06	0.76	19.09	0.00125899	0.00053232	40.60	25.71	0.00179132	46.93
16.86	1.04	0.77	18.68	0.00124416	0.00056364	39.66	25.46	0.00180780	48.57
16.47	1.02	0.78	18.27	0.00122954	0.00059495	38.76	25.21	0.00182449	50.14
16.08	1.00	0.80	17.88	0.00121512	0.00062626	37.88	24.95	0.00184139	51.63
15.71	0.98	0.81	17.50	0.00120089	0.00065758	37.01	24.69	0.00185847	53.04
15.34	0.96	0.82	17.13	0.00118683	0.00068889	36.17	24.42	0.00187572	54.39
14.99	0.94	0.84	16.76	0.00117293	0.00072020	35.35	24.15	0.00189313	55.68
14.64	0.92	0.85	16.41	0.00115917	0.00075152	34.55	23.88	0.00191068	56.91
14.29	0.90	0.86	16.06	0.00114553	0.00078283	33.76	23.60	0.00192836	58.08
13.96	0.88	0.88	15.72	0.00113202	0.00081414	32.99	23.31	0.00194616	59.20
13.63	0.86	0.89	15.39	0.00111861	0.00084546	32.23	23.02	0.00196406	60.26
13.31	0.85	0.91	15.06	0.00110529	0.00087677	31.49	22.73	0.00198206	61.28
12.99	0.83	0.92	14.74	0.00109206	0.00090808	30.76	22.43	0.00200014	62.25
12.68	0.81	0.94	14.43	0.00107890	0.00093940	30.04	22.13	0.00201829	63.18
12.37	0.79	0.95	14.12	0.00106580	0.00097071	29.34	21.83	0.00203651	64.07
12.07	0.78	0.97	13.82	0.00105275	0.00100202	28.64	21.52	0.00205478	64.91
11.78	0.76	0.98	13.52	0.00103976	0.00103334	27.96	21.21	0.00207309	65.72
11.48	0.74	1.00	13.23	0.00102679	0.00106465	27.29	20.89	0.00209144	66.49
11.20	0.73	1.01	12.94	0.00101386	0.00109596	26.63	20.57	0.00210982	67.23
10.91	0.71	1.03	12.65	0.00100095	0.00112728	25.98	20.25	0.00212822	67.93
10.63	0.70	1.04	12.37	0.00098805	0.00115859	25.33	19.93	0.00214664	68.60
10.36	0.68	1.06	12.10	0.00097515	0.00118990	24.70	19.60	0.00216506	69.24
10.09	0.66	1.07	11.83	0.00096226	0.00122122	24.07	19.27	0.00218347	69.84
9.82	0.65	1.09	11.56	0.00094936	0.00125253	23.45	18.94	0.00220188	70.42
9.55	0.63	1.11	11.29	0.00093644	0.00128384	22.84	18.61	0.00222028	70.97
9.29	0.62	1.12	11.03	0.00092350	0.00131516	22.23	18.27	0.00223865	71.49

Tabela 30- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta z = 16,47$ m TESTE 2

Hf_1	Hf_2	Hf_{boc}	Hf_{sistem}^a	$Q_{útil}$	Q_{circ}	Q_{bomba}	ΔH_{bomba}	$\Delta H_{útil}$	Rend.
(mca)	(mca)	(mca)	(mca)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(mca)	(mca)	(%)
1,575	0,594	33,83	36,00	0,0000000	0,001529	0,0015290	36,0	58,89	0,00
1,558	0,617	33,17	35,34	0,0000419	0,001520	0,0015619	36,0	57,76	4,30
1,551	0,625	32,95	35,13	0,0000567	0,001516	0,0015727	36,0	57,05	5,72
1,537	0,641	31,52	33,69	0,0000843	0,001509	0,0015933	35,0	55,63	8,44
1,519	0,668	30,85	33,04	0,0001312	0,001499	0,0016302	35,0	53,99	12,49
1,483	0,709	29,87	32,06	0,0002029	0,001480	0,0016829	35,0	52,05	18,16
1,446	0,771	29,16	31,38	0,0003011	0,001460	0,0017611	35,5	49,90	24,61
1,437	0,820	27,84	30,10	0,0003651	0,001455	0,0018201	35,0	48,13	28,50
1,413	0,876	26,97	29,26	0,0004448	0,001442	0,0018868	35,0	46,32	32,61
1,397	0,911	25,94	28,25	0,0004941	0,001433	0,0019271	34,5	44,82	35,11
1,381	0,946	24,94	27,27	0,0005427	0,001424	0,0019667	34,0	43,36	37,43
1,349	0,991	24,40	26,74	0,0006109	0,001406	0,0020169	34,0	41,86	40,10
1,324	1,053	24,22	26,59	0,0006920	0,001392	0,0020840	34,3	40,45	42,58
1,313	1,112	23,82	26,25	0,0007594	0,001386	0,0021454	34,2	39,16	44,41
1,296	1,183	23,65	26,13	0,0008427	0,001376	0,0022187	34,4	37,90	46,37
1,266	1,212	23,64	26,12	0,0008889	0,001359	0,0022479	34,3	36,97	47,33
1,251	1,299	23,38	25,93	0,0009834	0,001350	0,0023334	34,4	35,75	49,21
1,232	1,384	23,06	25,68	0,0010760	0,001339	0,0024150	34,3	34,58	50,92
1,217	1,432	22,88	25,53	0,0011295	0,001330	0,0024595	34,1	33,70	51,69
1,203	1,509	22,36	25,08	0,0012088	0,001322	0,0025308	33,7	32,60	52,97
1,173	1,518	22,00	24,69	0,0012345	0,001304	0,0025385	33,2	31,76	53,51

Tabela 31 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV)** **$\Delta z = 11,97 \text{ m}$** **TESTE 1** **$K = 0,600$** **$Cd = 0,911$**

Hf_{boc} (mca)	Hf_1 (mca)	Hf_2 (mca)	Hf_{sist} (mca)	Q_{circ} (m ³ /s)	$Q_{\text{útil}}$ (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q_{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
27.06	1.20	0.46	28.72	0.00157609	0.00000000	62.33	28.72	0.00157609	0.00
26.30	1.17	0.47	27.94	0.00155389	0.00003152	60.61	28.60	0.00158541	4.21
25.58	1.14	0.47	27.19	0.00153233	0.00006304	58.96	28.47	0.00159537	8.19
24.88	1.11	0.48	26.48	0.00151140	0.00009457	57.39	28.33	0.00160596	11.93
24.22	1.09	0.48	25.79	0.00149106	0.00012609	55.88	28.17	0.00161714	15.46
23.58	1.06	0.49	25.13	0.00147128	0.00015761	54.43	28.02	0.00162889	18.80
22.97	1.04	0.50	24.50	0.00145202	0.00018913	53.04	27.85	0.00164116	21.95
22.38	1.02	0.50	23.90	0.00143327	0.00022065	51.70	27.67	0.00165393	24.92
21.81	0.99	0.51	23.31	0.00141499	0.00025218	50.41	27.49	0.00166717	27.74
21.26	0.97	0.52	22.75	0.00139715	0.00028370	49.17	27.30	0.00168085	30.40
20.74	0.95	0.53	22.21	0.00137973	0.00031522	47.97	27.10	0.00169495	32.92
20.23	0.93	0.53	21.69	0.00136270	0.00034674	46.82	26.90	0.00170944	35.31
19.74	0.91	0.54	21.19	0.00134603	0.00037826	45.70	26.68	0.00172430	37.57
19.26	0.89	0.55	20.70	0.00132971	0.00040978	44.62	26.47	0.00173949	39.72
18.80	0.87	0.56	20.23	0.00131370	0.00044131	43.57	26.24	0.00175501	41.75
18.35	0.85	0.57	19.77	0.00129799	0.00047283	42.56	26.01	0.00177082	43.69
17.92	0.84	0.58	19.33	0.00128256	0.00050435	41.57	25.77	0.00178691	45.53
17.50	0.82	0.59	18.90	0.00126738	0.00053587	40.61	25.53	0.00180326	47.28
17.09	0.80	0.60	18.49	0.00125244	0.00056739	39.68	25.28	0.00181984	48.94
16.69	0.79	0.61	18.08	0.00123773	0.00059892	38.77	25.02	0.00183664	50.52
16.30	0.77	0.62	17.68	0.00122321	0.00063044	37.89	24.76	0.00185365	52.03
15.92	0.75	0.63	17.30	0.00120888	0.00066196	37.03	24.50	0.00187084	53.47
15.55	0.74	0.64	16.92	0.00119472	0.00069348	36.18	24.23	0.00188820	54.85
15.19	0.72	0.65	16.56	0.00118072	0.00072500	35.36	23.95	0.00190572	56.16
14.83	0.71	0.66	16.20	0.00116686	0.00075653	34.55	23.68	0.00192338	57.41
14.48	0.69	0.67	15.85	0.00115313	0.00078805	33.76	23.39	0.00194118	58.60
14.14	0.68	0.68	15.50	0.00113952	0.00081957	32.99	23.10	0.00195908	59.74
13.81	0.67	0.69	15.17	0.00112601	0.00085109	32.23	22.81	0.00197710	60.83
13.48	0.65	0.70	14.84	0.00111260	0.00088261	31.49	22.51	0.00199521	61.88
13.16	0.64	0.71	14.51	0.00109927	0.00091413	30.76	22.21	0.00201340	62.88
12.85	0.63	0.72	14.19	0.00108601	0.00094566	30.04	21.91	0.00203167	63.83
12.54	0.61	0.73	13.88	0.00107282	0.00097718	29.34	21.60	0.00205000	64.74
12.23	0.60	0.75	13.58	0.00105968	0.00100870	28.64	21.29	0.00206838	65.62
11.93	0.59	0.76	13.27	0.00104659	0.00104022	27.96	20.97	0.00208681	66.46
11.64	0.57	0.77	12.98	0.00103353	0.00107174	27.29	20.65	0.00210527	67.26
11.34	0.56	0.78	12.69	0.00102050	0.00110327	26.62	20.33	0.00212377	68.03
11.06	0.55	0.79	12.40	0.00100749	0.00113479	25.97	20.01	0.00214228	68.76
10.77	0.54	0.80	12.11	0.00099450	0.00116631	25.33	19.68	0.00216081	69.46
10.49	0.52	0.82	11.83	0.00098151	0.00119783	24.69	19.35	0.00217934	70.14
10.22	0.51	0.83	11.56	0.00096852	0.00122935	24.06	19.02	0.00219787	70.78
9.95	0.50	0.84	11.29	0.00095552	0.00126088	23.44	18.68	0.00221639	71.39
9.68	0.49	0.85	11.02	0.00094250	0.00129240	22.83	18.34	0.00223490	71.98
9.41	0.48	0.87	10.75	0.00092946	0.00132392	22.22	18.00	0.00225338	72.54
9.15	0.46	0.88	10.49	0.00091640	0.00135544	21.63	17.66	0.00227184	73.07

Tabela 32- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta z = 11,97$ m TESTE 1

H_{f1} (mca)	H_{f2} (mca)	$H_{f_{boc}}$ (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	$\Delta H_{\acute{u}til}$ (mca)	Rend. (%)
1,145	0,442	33,412	35,00	0,0000000	0,001535	0,0015350	35,000	58,82	0,00
1,128	0,457	32,767	34,35	0,0000417	0,001522	0,0015637	35,000	57,19	4,36
1,114	0,483	31,842	33,44	0,0001039	0,001511	0,0016149	35,000	55,29	10,20
1,109	0,491	31,599	33,20	0,0001222	0,001507	0,0016292	35,000	54,56	11,75
1,089	0,531	29,840	31,46	0,0002133	0,001491	0,0017043	34,500	51,84	19,04
1,077	0,558	29,048	30,68	0,0002722	0,001482	0,0017542	34,500	50,58	23,18
1,069	0,580	29,095	30,74	0,0003172	0,001476	0,0017932	35,000	49,65	25,69
1,056	0,600	28,552	30,21	0,0003633	0,001465	0,0018283	35,000	48,62	28,43
1,046	0,623	28,029	29,70	0,0004100	0,001457	0,0018670	35,000	47,62	30,97
1,029	0,657	27,365	29,05	0,0004806	0,001444	0,0019246	35,000	45,99	34,34
1,016	0,673	26,520	28,21	0,0005183	0,001433	0,0019513	34,500	44,66	36,22
0,999	0,701	25,926	27,63	0,0005768	0,001420	0,0019968	34,500	43,60	38,82
0,995	0,737	25,564	27,30	0,0006394	0,001416	0,0020554	34,500	42,27	40,86
0,984	0,771	24,758	26,51	0,0007027	0,001407	0,0021097	34,000	40,50	42,92
0,968	0,801	24,568	26,34	0,0007619	0,001394	0,0021559	34,000	39,34	44,54
0,950	0,848	24,169	25,97	0,0008478	0,001379	0,0022268	34,000	37,99	46,86
0,928	0,926	22,484	24,34	0,0009811	0,001361	0,0023421	33,054	35,33	50,46
0,920	0,951	21,647	23,52	0,0010233	0,001354	0,0023773	32,408	34,16	51,58
0,909	0,991	21,830	23,73	0,0010889	0,001345	0,0024339	32,669	33,62	52,60
0,902	1,028	21,838	23,77	0,0011465	0,001339	0,0024855	32,753	33,08	53,47
0,887	1,097	20,873	22,86	0,0012536	0,001326	0,0025796	31,827	31,11	55,18
0,863	1,186	21,799	23,85	0,0013917	0,001306	0,0026977	32,390	30,56	56,47
0,835	1,275	21,686	23,80	0,0015302	0,001281	0,0028112	31,252	28,68	57,50
0,810	1,261	22,801	24,87	0,0015352	0,001259	0,0027942	30,976	28,56	56,87

Tabela 33 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil
Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta z = 11,97 \text{ m}$ **TESTE 2**
K = 0,500 **Cd = 0,911**

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.42	1.26	0.48	28.16	0.00161836	0.00000000	65.67	28.16	0.0016183	0.00
25.61	1.22	0.49	27.32	0.00159350	0.00003237	63.69	28.06	0.0016258	4.52
24.84	1.19	0.49	26.53	0.00156942	0.00006473	61.81	27.94	0.0016341	8.76
24.11	1.16	0.50	25.77	0.00154608	0.00009710	60.01	27.82	0.0016431	12.75
23.41	1.13	0.50	25.04	0.00152346	0.00012947	58.29	27.69	0.0016529	16.49
22.74	1.10	0.51	24.35	0.00150151	0.00016184	56.65	27.54	0.0016633	20.01
22.10	1.07	0.51	23.69	0.00148021	0.00019420	55.08	27.39	0.0016744	23.32
21.49	1.05	0.52	23.06	0.00145950	0.00022657	53.58	27.23	0.0016860	26.44
20.90	1.02	0.53	22.45	0.00143937	0.00025894	52.13	27.05	0.0016983	29.38
20.33	1.00	0.53	21.87	0.00141977	0.00029131	50.75	26.87	0.0017110	32.15
19.79	0.98	0.54	21.31	0.00140068	0.00032367	49.41	26.68	0.0017243	34.76
19.27	0.95	0.55	20.77	0.00138205	0.00035604	48.13	26.49	0.0017380	37.22
18.76	0.93	0.56	20.25	0.00136387	0.00038841	46.90	26.28	0.0017522	39.55
18.28	0.91	0.57	19.75	0.00134610	0.00042077	45.70	26.07	0.0017668	41.75
17.81	0.89	0.57	19.27	0.00132872	0.00045314	44.55	25.85	0.0017818	43.84
17.35	0.87	0.58	18.81	0.00131169	0.00048551	43.44	25.62	0.0017972	45.81
16.91	0.85	0.59	18.36	0.00129500	0.00051788	42.36	25.38	0.0018128	47.68
16.49	0.83	0.60	17.92	0.00127862	0.00055024	41.32	25.14	0.0018288	49.45
16.08	0.81	0.61	17.50	0.00126252	0.00058261	40.31	24.89	0.0018451	51.12
15.68	0.80	0.62	17.09	0.00124670	0.00061498	39.32	24.64	0.0018616	52.72
15.29	0.78	0.63	16.70	0.00123112	0.00064735	38.37	24.38	0.0018784	54.23
14.91	0.76	0.64	16.31	0.00121576	0.00067971	37.44	24.12	0.0018954	55.67
14.54	0.75	0.65	15.93	0.00120061	0.00071208	36.53	23.84	0.0019127	57.04
14.18	0.73	0.66	15.57	0.00118566	0.00074445	35.65	23.57	0.0019301	58.34
13.83	0.71	0.67	15.21	0.00117088	0.00077681	34.79	23.29	0.0019476	59.58
13.48	0.70	0.68	14.86	0.00115626	0.00080918	33.94	23.00	0.0019654	60.76
13.15	0.68	0.69	14.52	0.00114178	0.00084155	33.12	22.71	0.0019833	61.89
12.82	0.67	0.70	14.19	0.00112743	0.00087392	32.31	22.41	0.0020013	62.96
12.50	0.65	0.71	13.87	0.00111320	0.00090628	31.52	22.11	0.0020194	63.98
12.18	0.64	0.73	13.55	0.00109907	0.00093865	30.75	21.81	0.0020377	64.96
11.87	0.62	0.74	13.24	0.00108503	0.00097102	29.99	21.50	0.0020560	65.89
11.57	0.61	0.75	12.93	0.00107108	0.00100339	29.24	21.18	0.0020744	66.77
11.27	0.60	0.76	12.63	0.00105719	0.00103575	28.51	20.87	0.0020929	67.62
10.98	0.58	0.77	12.34	0.00104337	0.00106812	27.79	20.55	0.0021114	68.43
10.69	0.57	0.78	12.05	0.00102959	0.00110049	27.09	20.22	0.0021300	69.20
10.41	0.56	0.80	11.76	0.00101585	0.00113285	26.39	19.89	0.0021487	69.94
10.13	0.54	0.81	11.48	0.00100215	0.00116522	25.70	19.56	0.0021673	70.64
9.85	0.53	0.82	11.21	0.00098846	0.00119759	25.03	19.23	0.0021860	71.31
9.58	0.52	0.83	10.93	0.00097479	0.00122996	24.36	18.89	0.0022047	71.95
9.32	0.50	0.85	10.67	0.00096112	0.00126232	23.71	18.55	0.0022234	72.56
9.05	0.49	0.86	10.40	0.00094745	0.00129469	23.06	18.21	0.0022421	73.13
8.79	0.48	0.87	10.15	0.00093377	0.00132706	22.42	17.86	0.0022608	73.68
8.54	0.47	0.88	9.89	0.00092007	0.00135943	21.79	17.52	0.0022795	74.20
8.29	0.46	0.90	9.64	0.00090635	0.00139179	21.17	17.17	0.0022981	74.70
8.04	0.44	0.91	9.39	0.00089259	0.00142416	20.56	16.81	0.0023167	75.17
7.79	0.43	0.92	9.14	0.00087880	0.00145653	19.95	16.46	0.0023353	75.61
7.55	0.42	0.93	8.90	0.00086495	0.00148889	19.35	16.10	0.0023538	76.02
7.31	0.41	0.95	8.66	0.00085106	0.00152126	18.76	15.75	0.0023723	76.41
7.07	0.40	0.96	8.42	0.00083710	0.00155363	18.18	15.39	0.0023907	76.78

Tabela 34- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 2VJF15-T 39B (2 CV) $\Delta z = 11,97$ m TESTE 2

Hf_1	Hf_2	Hf_{boc}	Hf_{sist}	Q_{util}	Q_{circ}	Q_{bomba}	ΔH_{bomb}	ΔH_{util}	Rend.
(mca)	(mca)	(mca)	(mca)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	^a (mca)	(mca)	(%)
1,140	0,440	33,420	35,00	0,0000000	0,001531	0,0015310	35,0	58,83	0,00
1,130	0,455	32,819	34,40	0,0000383	0,001523	0,0015613	35,0	57,24	4,02
1,118	0,481	31,952	33,55	0,0000967	0,001514	0,0016107	35,0	55,40	9,53
1,107	0,491	31,566	33,16	0,0001244	0,001505	0,0016294	35,0	54,53	11,96
1,087	0,534	29,732	31,35	0,0002206	0,001490	0,0017106	34,5	51,74	19,59
1,077	0,559	29,023	30,66	0,0002739	0,001482	0,0017559	34,5	50,55	23,30
1,071	0,568	29,409	31,05	0,0002950	0,001477	0,0017720	35,0	49,95	24,25
1,056	0,598	28,599	30,25	0,0003600	0,001465	0,0018250	35,0	48,67	28,23
1,048	0,615	28,237	29,90	0,0003950	0,001459	0,0018540	35,0	47,82	30,10
1,028	0,657	27,355	29,04	0,0004811	0,001443	0,0019241	35,0	45,98	34,38
1,013	0,677	26,408	28,10	0,0005267	0,001431	0,0019577	34,5	44,55	36,65
0,997	0,701	25,889	27,59	0,0005793	0,001418	0,0019973	34,5	43,56	38,97
0,993	0,735	25,581	27,31	0,0006377	0,001415	0,0020527	34,5	42,29	40,81
0,982	0,771	24,755	26,51	0,0007027	0,001406	0,0021087	34,0	40,50	42,94
0,965	0,804	24,487	26,26	0,0007686	0,001392	0,0021606	34,0	39,26	44,81
0,945	0,845	24,155	25,94	0,0008478	0,001375	0,0022228	34,0	37,97	46,94
0,926	0,928	22,431	24,28	0,0009856	0,001359	0,0023446	33,1	35,27	50,62
0,916	0,951	21,602	23,47	0,0010267	0,001351	0,0023777	32,4	34,11	51,73
0,904	0,996	21,708	23,61	0,0011000	0,001341	0,0024410	32,7	33,50	52,95
0,898	1,026	21,813	23,74	0,0011479	0,001336	0,0024839	32,8	33,06	53,57
0,885	1,095	20,881	22,86	0,0012522	0,001325	0,0025772	31,8	31,12	55,17
0,863	1,182	21,838	23,88	0,0013867	0,001306	0,0026927	32,4	30,60	56,38
0,843	1,280	21,517	23,64	0,0015302	0,001288	0,0028182	31,7	29,06	57,84
0,828	1,270	21,668	23,77	0,0015302	0,001275	0,0028052	31,3	28,66	57,63
0,818	1,265	22,723	24,81	0,0015336	0,001266	0,0027996	31,2	28,75	56,94

Tabela 35 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil
Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV) $\Delta z = 16,47 \text{ m}$ **TESTE 1**
K = 1.108 **Cd = 0.730**

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{saist} (mca)	Q _{circ} (m ³ /s)	Q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomb} (mca)	Q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
27.74	0.33	0.13	28.20	0.00064767	0.00000000	48.06	28.20	0.00064767	0.00
27.29	0.33	0.13	27.75	0.00064247	0.00001295	47.30	28.14	0.00065542	3.32
26.87	0.32	0.13	27.32	0.00063745	0.00002591	46.58	28.08	0.00066335	6.48
26.46	0.32	0.14	26.92	0.00063259	0.00003886	45.88	28.02	0.00067145	9.48
26.07	0.31	0.14	26.52	0.00062790	0.00005181	45.22	27.96	0.00067971	12.33
25.69	0.31	0.14	26.15	0.00062336	0.00006477	44.58	27.89	0.00068813	15.04
25.33	0.31	0.15	25.78	0.00061897	0.00007772	43.96	27.83	0.00069669	17.62
24.98	0.30	0.15	25.44	0.00061471	0.00009067	43.37	27.76	0.00070538	20.08
24.65	0.30	0.15	25.10	0.00061058	0.00010363	42.80	27.69	0.00071420	22.42
24.33	0.30	0.16	24.78	0.00060657	0.00011658	42.25	27.62	0.00072315	24.66
24.02	0.29	0.16	24.47	0.00060267	0.00012953	41.72	27.55	0.00073220	26.79
23.72	0.29	0.16	24.17	0.00059888	0.00014249	41.20	27.47	0.00074137	28.83
23.42	0.29	0.17	23.88	0.00059520	0.00015544	40.71	27.40	0.00075064	30.77
23.14	0.28	0.17	23.60	0.00059161	0.00016839	40.23	27.32	0.00076001	32.63
22.87	0.28	0.17	23.32	0.00058812	0.00018135	39.76	27.24	0.00076946	34.40
22.61	0.28	0.18	23.06	0.00058471	0.00019430	39.31	27.16	0.00077901	36.10
22.35	0.27	0.18	22.80	0.00058137	0.00020725	38.88	27.08	0.00078863	37.73
22.10	0.27	0.18	22.56	0.00057812	0.00022021	38.45	26.99	0.00079833	39.29
21.86	0.27	0.19	22.31	0.00057494	0.00023316	38.04	26.91	0.00080810	40.79
21.62	0.27	0.19	22.08	0.00057182	0.00024611	37.63	26.82	0.00081794	42.22
21.39	0.26	0.20	21.85	0.00056877	0.00025907	37.24	26.73	0.00082784	43.60
21.17	0.26	0.20	21.63	0.00056578	0.00027202	36.86	26.64	0.00083780	44.92
20.95	0.26	0.21	21.41	0.00056284	0.00028497	36.49	26.55	0.00084782	46.20
20.73	0.26	0.21	21.20	0.00055996	0.00029793	36.12	26.45	0.00085789	47.42
20.52	0.26	0.21	20.99	0.00055712	0.00031088	35.76	26.36	0.00086801	48.59
20.32	0.25	0.22	20.79	0.00055434	0.00032383	35.41	26.26	0.00087817	49.73
20.12	0.25	0.22	20.59	0.00055159	0.00033679	35.07	26.17	0.00088838	50.82
19.92	0.25	0.23	20.40	0.00054889	0.00034974	34.74	26.07	0.00089863	51.87
19.73	0.25	0.23	20.21	0.00054623	0.00036269	34.41	25.97	0.00090892	52.88
19.54	0.24	0.24	20.02	0.00054360	0.00037565	34.09	25.86	0.00091925	53.85
19.35	0.24	0.24	19.84	0.00054101	0.00038860	33.77	25.76	0.00092961	54.80
19.17	0.24	0.25	19.66	0.00053845	0.00040155	33.46	25.66	0.00094000	55.71
18.99	0.24	0.25	19.48	0.00053591	0.00041451	33.15	25.55	0.00095042	56.58
18.81	0.24	0.26	19.31	0.00053341	0.00042746	32.85	25.44	0.00096087	57.43
18.64	0.23	0.26	19.13	0.00053093	0.00044041	32.55	25.34	0.00097134	58.25
18.47	0.23	0.27	18.96	0.00052848	0.00045337	32.26	25.23	0.00098184	59.05
18.30	0.23	0.27	18.80	0.00052604	0.00046632	31.97	25.11	0.00099236	59.82
18.13	0.23	0.28	18.63	0.00052363	0.00047927	31.68	25.00	0.0100291	60.56
17.96	0.23	0.28	18.47	0.00052124	0.00049223	31.40	24.89	0.0101347	61.28
17.80	0.23	0.29	18.31	0.00051887	0.00050518	31.12	24.77	0.0102405	61.98
17.64	0.22	0.29	18.15	0.00051651	0.00051813	30.85	24.66	0.0103464	62.65
17.48	0.22	0.30	18.00	0.00051417	0.00053109	30.58	24.54	0.0104525	63.31
17.32	0.22	0.30	17.84	0.00051184	0.00054404	30.31	24.42	0.0105588	63.94
17.17	0.22	0.31	17.69	0.00050952	0.00055699	30.04	24.30	0.0106652	64.56
17.01	0.22	0.31	17.54	0.00050722	0.00056995	29.78	24.18	0.0107717	65.16
16.86	0.21	0.32	17.39	0.00050492	0.00058290	29.51	24.06	0.0108783	65.74

Tabela 35 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil (cont.)**Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV)** **$\Delta z = 16,47 \text{ m}$** **TESTE 1** **$K = 1.108$** **$C_d = 0.730$**

$H_{f_{boc}}$ (mca)	H_{f_1} (mca)	H_{f_2} (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{util} (m ³ /s)	ΔH_{util} (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	Q_{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
16.71	0.21	0.32	17.24	0.00050264	0.00059585	29.26	23.93	0.00109849	66.30
16.55	0.21	0.33	17.09	0.00050036	0.00060881	29.00	23.81	0.00110917	66.85
16.40	0.21	0.33	16.95	0.00049810	0.00062176	28.74	23.68	0.00111986	67.39
16.26	0.21	0.34	16.80	0.00049583	0.00063471	28.49	23.56	0.00113055	67.90
16.11	0.21	0.35	16.66	0.00049358	0.00064767	28.24	23.43	0.00114125	68.41
15.96	0.20	0.35	16.52	0.00049133	0.00066062	27.99	23.30	0.00115195	68.90
15.82	0.20	0.36	16.38	0.00048908	0.00067358	27.74	23.17	0.00116266	69.37

Tabela 36- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 1VJF15-M 38J **$\Delta z = 16,47 \text{ m}$** **TESTE 1**

H_{f_1} (mca)	H_{f_2} (mca)	$H_{f_{boc}}$ (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	ΔH_{util} (mca)	Rend. (%)
0,308	0,119	29,57	30,00	0,0000000	0,000620	0,0006200	30,0	48,16	0,00
0,304	0,129	28,61	29,04	0,0000349	0,000616	0,0006504	30,0	46,21	8,28
0,284	0,128	27,99	28,41	0,0000561	0,000593	0,0006486	30,0	45,59	13,18
0,267	0,129	26,85	27,25	0,0000788	0,000572	0,0006508	29,5	43,95	18,17
0,272	0,139	26,84	27,25	0,0001000	0,000578	0,0006775	30,0	43,45	21,62
0,242	0,142	24,62	25,00	0,0001466	0,000541	0,0006871	29,2	40,99	30,75
0,240	0,169	23,15	23,56	0,0002202	0,000538	0,0007582	29,5	38,33	39,90
0,241	0,196	21,63	22,07	0,0002866	0,000540	0,0008261	29,3	36,00	46,31
0,290	0,250	21,24	21,78	0,0003493	0,000599	0,0009483	29,2	34,74	48,03
0,277	0,277	20,54	21,09	0,0004231	0,000584	0,0010066	29,5	32,83	52,78
0,387	0,367	20,95	21,70	0,0004758	0,000707	0,0011823	29,3	32,98	50,30
0,386	0,412	20,04	20,84	0,0005559	0,000706	0,0012619	28,9	31,02	53,58
0,378	0,459	19,55	20,39	0,0006452	0,000697	0,0013422	28,9	29,54	56,78
0,373	0,470	18,93	19,77	0,0006690	0,000692	0,0013610	28,3	28,53	57,70

Tabela 37 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV)** **$\Delta z = 16,47$ m****TESTE 2** **$K = 0.778$** **$C_d = 0,864$**

$H_{f_{boc}}$ (mca)	H_{f_1} (mca)	H_{f_2} (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	q_{circ} (m ³ /s)	q_{util} (m ³ /s)	ΔH_{util} (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	q_{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.72	0.44	0.17	27.33	0.00075867	0.00000000	47.20	27.33	0.00075867	0.00
26.26	0.43	0.17	26.87	0.00075212	0.00001517	46.40	27.26	0.00076730	3.37
25.82	0.42	0.18	26.42	0.00074579	0.00003035	45.64	27.18	0.00077614	6.56
25.40	0.42	0.18	26.00	0.00073966	0.00004552	44.90	27.11	0.00078518	9.60
24.99	0.41	0.18	25.59	0.00073371	0.00006069	44.20	27.03	0.00079440	12.49
24.60	0.41	0.19	25.20	0.00072794	0.00007587	43.52	26.94	0.00080380	15.24
24.22	0.40	0.19	24.82	0.00072234	0.00009104	42.86	26.86	0.00081338	17.86
23.86	0.40	0.19	24.45	0.00071689	0.00010621	42.23	26.77	0.00082311	20.36
23.51	0.39	0.20	24.10	0.00071160	0.00012139	41.62	26.68	0.00083299	22.73
23.17	0.39	0.20	23.76	0.00070645	0.00013656	41.03	26.59	0.00084301	25.00
22.84	0.38	0.21	23.43	0.00070143	0.00015173	40.46	26.50	0.00085316	27.16
22.53	0.38	0.21	23.11	0.00069653	0.00016691	39.91	26.40	0.00086344	29.22
22.22	0.37	0.22	22.81	0.00069176	0.00018208	39.38	26.30	0.00087384	31.19
21.92	0.37	0.22	22.51	0.00068710	0.00019725	38.86	26.20	0.00088435	33.08
21.63	0.36	0.23	22.22	0.00068254	0.00021243	38.36	26.10	0.00089496	34.88
21.35	0.36	0.23	21.94	0.00067808	0.00022760	37.87	26.00	0.00090568	36.60
21.07	0.36	0.24	21.66	0.00067371	0.00024277	37.39	25.89	0.00091648	38.25
20.81	0.35	0.24	21.40	0.00066943	0.00025795	36.93	25.78	0.00092737	39.83
20.55	0.35	0.25	21.14	0.00066522	0.00027312	36.47	25.67	0.00093835	41.35
20.29	0.34	0.25	20.89	0.00066110	0.00028829	36.03	25.56	0.00094939	42.81
20.04	0.34	0.26	20.64	0.00065705	0.00030347	35.60	25.45	0.00096052	44.20
19.80	0.34	0.26	20.40	0.00065306	0.00031864	35.18	25.33	0.00097170	45.54
19.56	0.33	0.27	20.16	0.00064914	0.00033381	34.77	25.21	0.00098295	46.83
19.33	0.33	0.27	19.93	0.00064528	0.00034899	34.37	25.09	0.00099426	48.07
19.10	0.33	0.28	19.71	0.00064147	0.00036416	33.97	24.97	0.00100563	49.26
18.88	0.32	0.28	19.49	0.00063771	0.00037933	33.58	24.85	0.00101704	50.41
18.66	0.32	0.29	19.27	0.00063400	0.00039451	33.20	24.72	0.00102851	51.51
18.45	0.32	0.29	19.06	0.00063033	0.00040968	32.83	24.60	0.00104001	52.57
18.24	0.31	0.30	18.85	0.00062671	0.00042485	32.46	24.47	0.00105156	53.60
18.03	0.31	0.31	18.64	0.00062312	0.00044003	32.10	24.34	0.00106315	54.59
17.82	0.31	0.31	18.44	0.00061957	0.00045520	31.74	24.21	0.00107477	55.54
17.62	0.30	0.32	18.24	0.00061606	0.00047037	31.39	24.07	0.00108643	56.46
17.42	0.30	0.32	18.05	0.00061257	0.00048555	31.05	23.94	0.00109811	57.35
17.23	0.30	0.33	17.85	0.00060911	0.00050072	30.71	23.80	0.00110983	58.21
17.03	0.30	0.34	17.66	0.00060568	0.00051589	30.37	23.66	0.00112157	59.04
16.84	0.29	0.34	17.47	0.00060227	0.00053107	30.04	23.52	0.00113333	59.84
16.65	0.29	0.35	17.29	0.00059888	0.00054624	29.71	23.38	0.00114512	60.62
16.46	0.29	0.35	17.11	0.00059551	0.00056141	29.39	23.24	0.00115692	61.37
16.28	0.28	0.36	16.92	0.00059216	0.00057659	29.07	23.09	0.00116874	62.10
16.10	0.28	0.37	16.74	0.00058882	0.00059176	28.75	22.94	0.00118058	62.80
15.92	0.28	0.37	16.57	0.00058550	0.00060693	28.43	22.80	0.00119244	63.48
15.74	0.28	0.38	16.39	0.00058219	0.00062211	28.12	22.65	0.00120430	64.14
15.56	0.27	0.39	16.22	0.00057890	0.00063728	27.81	22.50	0.00121618	64.79
15.38	0.27	0.39	16.05	0.00057561	0.00065245	27.51	22.34	0.00122806	65.41

Tabela 38- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV) **$\Delta z = 16,47$ m** **TESTE 2**

H_{f1} (mca)	H_{f2} (mca)	$H_{f_{boc}}$ (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	ΔH_{util} (mca)	Rend. (%)
0,442	0,167	27,89	28,50	0,0000000	0,000770	0,0007700	28,5	47,03	0,00
0,434	0,183	26,25	26,86	0,0000484	0,000762	0,0008104	28,0	44,90	9,59
0,431	0,193	26,20	26,82	0,0000754	0,000759	0,0008344	28,5	43,86	13,97
0,422	0,209	25,86	26,49	0,0001184	0,000751	0,0008694	29,0	42,54	20,18
0,417	0,219	24,52	25,15	0,0001474	0,000746	0,0008934	28,3	40,95	24,31
0,402	0,255	23,60	24,25	0,0002374	0,000731	0,0009684	28,8	38,48	33,93
0,391	0,272	22,44	23,10	0,0002826	0,000720	0,0010026	28,4	36,75	38,34
0,381	0,295	21,66	22,33	0,0003388	0,000710	0,0010488	28,4	35,05	42,67
0,367	0,311	20,72	21,39	0,0003818	0,000696	0,0010778	28,2	33,82	46,25
0,353	0,319	20,20	20,87	0,0004120	0,000682	0,0010940	28,1	32,90	48,55
0,349	0,356	19,70	20,41	0,0004815	0,000678	0,0011595	28,2	31,37	51,88
0,287	0,372	18,23	18,89	0,0005785	0,000610	0,0011880	28,2	28,83	58,71
0,251	0,362	16,51	17,13	0,0006027	0,000568	0,0011702	27,4	26,94	62,03
0,215	0,362	16,40	16,98	0,0006485	0,000522	0,0011705	27,6	25,67	64,66

Tabela 39 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil

Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV)

 $\Delta z = 11,97 \text{ m}$

TESTE 1

 $K = 0.699 \text{ Cd} = 0.901$

Hf _{boc} (mca)	Hf ₁ (mca)	Hf ₂ (mca)	Hf _{sist} (mca)	q _{circ} (m ³ /s)	q _{útil} (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	q _{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.50	0.36	0.14	27.00	0.00079702	0.00000000	47.81	27.00	0.00079702	0.00
26.02	0.36	0.14	26.52	0.00078977	0.00001594	46.96	26.93	0.00080571	3.45
25.56	0.35	0.15	26.06	0.00078274	0.00003188	46.14	26.85	0.00081463	6.73
25.12	0.35	0.15	25.61	0.00077594	0.00004782	45.36	26.77	0.00082376	9.84
24.69	0.34	0.15	25.18	0.00076935	0.00006376	44.60	26.68	0.00083311	12.79
24.28	0.34	0.15	24.77	0.00076295	0.00007970	43.88	26.59	0.00084265	15.61
23.89	0.33	0.16	24.38	0.00075674	0.00009564	43.18	26.51	0.00085238	18.28
23.51	0.33	0.16	24.00	0.00075071	0.00011158	42.51	26.41	0.00086229	20.82
23.14	0.32	0.16	23.63	0.00074484	0.00012752	41.86	26.32	0.00087236	23.25
22.79	0.32	0.17	23.28	0.00073913	0.00014346	41.23	26.22	0.00088260	25.56
22.45	0.31	0.17	22.93	0.00073357	0.00015940	40.62	26.12	0.00089297	27.76
22.12	0.31	0.17	22.60	0.00072815	0.00017534	40.04	26.02	0.00090349	29.86
21.80	0.31	0.18	22.28	0.00072286	0.00019129	39.47	25.92	0.00091414	31.87
21.49	0.30	0.18	21.97	0.00071769	0.00020723	38.92	25.81	0.00092492	33.78
21.18	0.30	0.19	21.67	0.00071264	0.00022317	38.38	25.70	0.00093580	35.62
20.89	0.30	0.19	21.38	0.00070770	0.00023911	37.86	25.59	0.00094680	37.37
20.61	0.29	0.19	21.09	0.00070286	0.00025505	37.36	25.47	0.00095790	39.04
20.33	0.29	0.20	20.82	0.00069811	0.00027099	36.86	25.36	0.00096910	40.65
20.06	0.29	0.20	20.55	0.00069346	0.00028693	36.39	25.24	0.00098039	42.19
19.80	0.28	0.21	20.28	0.00068889	0.00030287	35.92	25.12	0.00099176	43.66
19.54	0.28	0.21	20.03	0.00068440	0.00031881	35.46	25.00	0.00100321	45.08
19.29	0.28	0.21	19.78	0.00067998	0.00033475	35.02	24.87	0.00101473	46.44
19.04	0.27	0.22	19.53	0.00067563	0.00035069	34.58	24.75	0.00102632	47.74
18.80	0.27	0.22	19.29	0.00067135	0.00036663	34.15	24.62	0.00103798	49.00
18.57	0.27	0.23	19.06	0.00066713	0.00038257	33.73	24.49	0.00104970	50.20
18.33	0.26	0.23	18.83	0.00066296	0.00039851	33.32	24.36	0.00106147	51.36
18.11	0.26	0.24	18.60	0.00065885	0.00041445	32.92	24.22	0.00107330	52.48
17.88	0.26	0.24	18.38	0.00065478	0.00043039	32.53	24.09	0.00108518	53.55
17.67	0.26	0.25	18.17	0.00065076	0.00044633	32.14	23.95	0.00109710	54.59
17.45	0.25	0.25	17.95	0.00064679	0.00046227	31.75	23.81	0.00110906	55.59
17.24	0.25	0.26	17.74	0.00064285	0.00047821	31.38	23.67	0.00112106	56.55
17.03	0.25	0.26	17.54	0.00063894	0.00049415	31.01	23.52	0.00113310	57.48
16.82	0.24	0.26	17.33	0.00063507	0.00051009	30.64	23.38	0.00114517	58.38
16.62	0.24	0.27	17.13	0.00063123	0.00052603	30.28	23.23	0.00115726	59.25
16.42	0.24	0.27	16.93	0.00062742	0.00054198	29.93	23.08	0.00116939	60.09
16.22	0.24	0.28	16.74	0.00062363	0.00055792	29.58	22.93	0.00118154	60.90
16.03	0.23	0.28	16.55	0.00061986	0.00057386	29.23	22.78	0.00119372	61.68
15.83	0.23	0.29	16.36	0.00061612	0.00058980	28.89	22.63	0.00120592	62.44

Tabela 40- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV)

					$\Delta z = 11,97 \text{ m}$		TESTE 1		
H_{f1} (mca)	H_{f2} (mca)	$H_{f_{boc}}$ (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	Q_{util} (m ³ /s)	Q_{circ} (m ³ /s)	Q_{bomba} (m ³ /s)	ΔH_{bomba} (mca)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	Rend. (%)
0,355	0,137	28,51	29,00	0,0000000	0,000786	0,0007860	29,0	46,61	0,00
0,353	0,136	28,51	29,00	0,0000000	0,000784	0,0007840	29,0	46,62	0,00
0,344	0,157	26,32	26,83	0,0000789	0,000772	0,0008509	28,5	43,45	14,19
0,342	0,162	26,57	27,08	0,0000961	0,000769	0,0008651	29,0	42,71	16,46
0,336	0,179	23,76	24,27	0,0001544	0,000761	0,0009154	27,5	40,41	25,22
0,332	0,189	24,89	25,41	0,0001883	0,000756	0,0009443	29,0	40,05	28,16
0,324	0,212	23,74	24,28	0,0002622	0,000746	0,0010082	29,0	37,92	35,38
0,332	0,188	23,94	24,46	0,0001856	0,000756	0,0009416	28,0	39,10	28,14
0,324	0,214	22,63	23,17	0,0002683	0,000746	0,0010143	28,0	36,81	36,29
0,320	0,225	23,38	23,92	0,0003022	0,000741	0,0010432	29,0	36,57	38,31
0,319	0,235	22,36	22,91	0,0003317	0,000739	0,0010707	28,5	35,56	40,95
0,319	0,228	21,27	21,82	0,0003122	0,000739	0,0010512	27,5	35,47	40,61
0,311	0,263	20,93	21,51	0,0004122	0,000729	0,0011412	28,0	33,17	46,41
0,313	0,264	20,96	21,53	0,0004117	0,000731	0,0011427	28,0	33,19	46,30
0,308	0,276	20,15	20,73	0,0004489	0,000725	0,0011739	27,7	32,18	48,80
0,308	0,281	19,51	20,10	0,0004589	0,000725	0,0011839	27,2	31,53	49,60
0,305	0,296	18,98	19,58	0,0005006	0,000720	0,0012206	27,1	30,60	51,82
0,302	0,310	19,32	19,93	0,0005372	0,000717	0,0012542	27,5	30,13	52,82
0,302	0,311	19,47	20,09	0,0005394	0,000717	0,0012564	27,6	30,18	52,77
0,301	0,321	18,76	19,38	0,0005624	0,000715	0,0012774	27,2	29,40	54,08
0,299	0,330	18,31	18,94	0,0005874	0,000712	0,0012994	26,9	28,71	55,21

Tabela 41 - Simulação da relação entre vazão útil e diferencial de pressão útil**Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV)** **$\Delta z = 11,97 \text{ m}$** **TESTE 2** **$K = 0.699 \text{ Cd} = 0.901$**

$H_{f_{boc}}$ (mca)	H_{f_1} (mca)	H_{f_2} (mca)	$H_{f_{sist}}$ (mca)	q_{circ} (m ³ /s)	$q_{\text{útil}}$ (m ³ /s)	$\Delta H_{\text{útil}}$ (mca)	ΔH_{bomba} (mca)	q_{bomba} (m ³ /s)	Rend. (%)
26.50	0.36	0.14	27.00	0.00079702	0.00000000	47.81	27.00	0.00079702	0.00
26.02	0.36	0.14	26.52	0.00078977	0.00001594	46.96	26.93	0.00080571	3.45
25.56	0.35	0.15	26.06	0.00078274	0.00003188	46.14	26.85	0.00081463	6.73
25.12	0.35	0.15	25.61	0.00077594	0.00004782	45.36	26.77	0.00082376	9.84
24.69	0.34	0.15	25.18	0.00076935	0.00006376	44.60	26.68	0.00083311	12.79
24.28	0.34	0.15	24.77	0.00076295	0.00007970	43.88	26.59	0.00084265	15.61
23.89	0.33	0.16	24.38	0.00075674	0.00009564	43.18	26.51	0.00085238	18.28
23.51	0.33	0.16	24.00	0.00075071	0.00011158	42.51	26.41	0.00086229	20.82
23.14	0.32	0.16	23.63	0.00074484	0.00012752	41.86	26.32	0.00087236	23.25
22.79	0.32	0.17	23.28	0.00073913	0.00014346	41.23	26.22	0.00088260	25.56
22.45	0.31	0.17	22.93	0.00073357	0.00015940	40.62	26.12	0.00089297	27.76
22.12	0.31	0.17	22.60	0.00072815	0.00017534	40.04	26.02	0.00090349	29.86
21.80	0.31	0.18	22.28	0.00072286	0.00019129	39.47	25.92	0.00091414	31.87
21.49	0.30	0.18	21.97	0.00071769	0.00020723	38.92	25.81	0.00092492	33.78
21.18	0.30	0.19	21.67	0.00071264	0.00022317	38.38	25.70	0.00093580	35.62
20.89	0.30	0.19	21.38	0.00070770	0.00023911	37.86	25.59	0.00094680	37.37
20.61	0.29	0.19	21.09	0.00070286	0.00025505	37.36	25.47	0.00095790	39.04
20.33	0.29	0.20	20.82	0.00069811	0.00027099	36.86	25.36	0.00096910	40.65
20.06	0.29	0.20	20.55	0.00069346	0.00028693	36.39	25.24	0.00098039	42.19
19.80	0.28	0.21	20.28	0.00068889	0.00030287	35.92	25.12	0.00099176	43.66
19.54	0.28	0.21	20.03	0.00068440	0.00031881	35.46	25.00	0.00100321	45.08
19.29	0.28	0.21	19.78	0.00067998	0.00033475	35.02	24.87	0.00101473	46.44
19.04	0.27	0.22	19.53	0.00067563	0.00035069	34.58	24.75	0.00102632	47.74
18.80	0.27	0.22	19.29	0.00067135	0.00036663	34.15	24.62	0.00103798	49.00
18.57	0.27	0.23	19.06	0.00066713	0.00038257	33.73	24.49	0.00104970	50.20
18.33	0.26	0.23	18.83	0.00066296	0.00039851	33.32	24.36	0.00106147	51.36
18.11	0.26	0.24	18.60	0.00065885	0.00041445	32.92	24.22	0.00107330	52.48
17.88	0.26	0.24	18.38	0.00065478	0.00043039	32.53	24.09	0.00108518	53.55
17.67	0.26	0.25	18.17	0.00065076	0.00044633	32.14	23.95	0.00109710	54.59
17.45	0.25	0.25	17.95	0.00064679	0.00046227	31.75	23.81	0.00110906	55.59
17.24	0.25	0.26	17.74	0.00064285	0.00047821	31.38	23.67	0.00112106	56.55
17.03	0.25	0.26	17.54	0.00063894	0.00049415	31.01	23.52	0.00113310	57.48
16.82	0.24	0.26	17.33	0.00063507	0.00051009	30.64	23.38	0.00114517	58.38
16.62	0.24	0.27	17.13	0.00063123	0.00052603	30.28	23.23	0.00115726	59.25
16.42	0.24	0.27	16.93	0.00062742	0.00054198	29.93	23.08	0.00116939	60.09
16.22	0.24	0.28	16.74	0.00062363	0.00055792	29.58	22.93	0.00118154	60.90
16.03	0.23	0.28	16.55	0.00061986	0.00057386	29.23	22.78	0.00119372	61.68
15.83	0.23	0.29	16.36	0.00061612	0.00058980	28.89	22.63	0.00120592	62.44
15.64	0.23	0.29	16.17	0.00061239	0.00060574	28.55	22.47	0.00121813	63.17

Tabela 42- Dados coletados do sistema injetor-bomba centrífuga (Obtidos por experimentação) – Conjunto 1VJF15-M 38J (1 CV) **$\Delta z = 11,97 \text{ m}$** **TESTE 2**

Hf_1	Hf_2	Hf_{boc}	Hf_{sist}	Q_{util}	Q_{circ}	Q_{bomba}	ΔH_{bomba}	ΔH_{util}	Rend.
Hf_{1-2}	Hf_{2-3}	$Hfboc$	$Hfsist$	q_{util}	q_{circ}	q_{bomba}	ΔH_{bomba}	ΔH_{util}	Rend.
(mca)	(mca)	(mca)	(mca)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(mca)	(mca)	(%)
0,352	0,136	29,51	30,00	0,0000000	0,000782	0,0007820	30,0	47,62	0,00
0,355	0,137	29,51	30,00	0,0000000	0,000786	0,0007860	30,0	47,61	0,00
0,346	0,156	26,98	27,48	0,0000717	0,000774	0,0008457	29,0	44,11	12,93
0,339	0,173	24,85	25,37	0,0001311	0,000766	0,0008971	28,0	41,00	21,65
0,336	0,173	24,73	25,24	0,0001367	0,000762	0,0008987	28,0	40,87	22,49
0,334	0,188	25,00	25,52	0,0001833	0,000759	0,0009423	29,0	40,16	27,50
0,329	0,195	24,62	25,15	0,0002083	0,000752	0,0009603	29,0	39,29	30,16
0,327	0,210	23,43	23,96	0,0002533	0,000750	0,0010033	28,5	37,61	34,58
0,323	0,215	22,56	23,10	0,0002717	0,000745	0,0010167	28,0	36,75	36,63
0,319	0,228	22,23	22,78	0,0003106	0,000740	0,0010506	28,0	35,43	39,40
0,319	0,245	21,41	21,97	0,0003572	0,000739	0,0010962	28,0	34,63	43,10
0,313	0,253	21,49	22,06	0,0003839	0,000732	0,0011159	28,1	33,67	44,31
0,316	0,258	21,27	21,85	0,0003939	0,000735	0,0011289	28,0	33,50	44,95
0,313	0,273	21,37	21,96	0,0004344	0,000731	0,0011654	28,5	33,12	47,08
0,307	0,283	20,37	20,96	0,0004656	0,000724	0,0011896	27,8	31,80	49,16
0,305	0,301	19,06	19,67	0,0005106	0,000721	0,0012316	27,1	30,26	51,88
0,302	0,318	18,54	19,16	0,0005550	0,000717	0,0012720	27,0	29,37	53,94
0,301	0,322	17,99	18,61	0,0005666	0,000715	0,0012816	26,5	28,74	54,69
0,300	0,323	18,07	18,70	0,0005694	0,000714	0,0012834	26,6	28,75	54,74
0,298	0,330	17,48	18,10	0,0005881	0,000711	0,0012991	26,2	28,05	55,80

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.M.H.; LOPEZ, J.R.; REGALADO, A.P.; HERNANDEZ, J.F.G. **El riego localizado**. Madrid, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 1987. 317 p.
- BOTREL, T.A. Modelo matemático aplicável ao sistema injetor-bomba centrífuga a fim de aumentar a altura manométrica. Piracicaba, 1996. 57 p. Tese (Livre-docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CARLIER, M. **Machines hydrauliques**. Paris. Imprimerie Louis-Jean, 1968.
- DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 2a. Ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1983. 476p.
- FEITOSA FILHO, J.C. & ARRUDA, N.T. Protótipo, dimensionamento e metodologia de construção de um injetor de produtos químicos "Tipo Venturi", metálico, para uso na quimigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., Campinas, 1994. **Resumos**, Campinas, 1994.
- FEITOSA FILHO, J.C. BOTREL, T.A.; PINTO, J.M.; MENDONÇA, F.C. Avaliação de características hidráulicas que condicionem melhor rendimento e limite operacional de injetores tipo venturi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25. **Resumos**, Bauru, 1996, p. 91.
- FEITOSA FILHO, J.C.; BOTREL, T.A.; PINTO, J.M.; HEINEMANN, A.B. Influência da relação entre os diâmetros dos bocais no desempenho de injetores tipo venturi. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 4, p. 15-24, Jun. 1998.
- FERREIRA, J.O.P. Caracterização hidráulica de dois injetores de fertilizantes tipo Venturi. Piracicaba, 1994. 76 p. Dissertação (M.S.) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

- HIRSCHMANN, R.J. Características de los distintos tipos de bombas. In: HIRSCHMAN, R.J. **Bombas; características y aplicación**. Santiago de Chile, Ed. Universitaria, 1958, cap. 4, p.85-139.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2a. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1987. 782 p.
- SILVESTER, R.; MUELLER, N.G. Design data for the liquid-liquid jet pump. **Journal of Hydraulic Research**, v.6, n.2, p.129-61, 1968.
- TROSKOLANSKI, A.T. Dispositifs d'appareils a jet. In: TROSKOLANSKI, A.T. **Les turbopompes: théorie, tracé et construction**. Paris, Eyrolles, 1977, cap. 16, p.329-33.
- URQUHART, L.C. **Civil engineering handbook**. 3a ed. New York, Mc Graw-Hill, 1950.
- VENNARD, J.K. & STREET, R.L. Medidor Venturi. In: VENNARD, J.K. & STREET, R.L. **Elementos de mecânica dos fluidos**. 5a ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978, p.516-8.
- ZÁRATE ROJAS, R.N.; BOTREL, T.A.; MENDONÇA, F.C. Desenvolvimento e avaliação de dois injetores de fertilizantes tipo venturi. . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25. **Resumos**, Bauru, 1996, p.442.