UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HERMES CANCIO DOS SANTOS

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA EM OPERAÇÃO COM ÓLEO

SANTOS – SP
2016

HERMES CANCIO DOS SANTOS

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA EM OPERAÇÃO COM ÓLEO

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e co-Orientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior, e da Profa. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia.

SANTOS - SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Dos Santos, Hermes Cancio.
Modelagem Computacional da Curva Característica de Uma Bomba Centrífuga Em Operação com Óleo.
Hermes Cancio dos Santos. - 2016. 63 páginas.

Orientador: Prof.Dr. Aldo Ramos Santos.
Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior e Profa. Ma. Dorotéa Vilanova Garcia

Dissertação (Mestrado)- - Universidade Santa Cecília, Programa De Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. Bomba centrífuga. 2. Polinômio Interpolador. 3. Modelagem. 4. Curva Característica. I. Santos, Aldo Ramos II. Moraes Junior, Deovaldo III. Garcia, Dorotéa Vilanova.
IV. Modelagem Computacional da Curva Característica de Uma Bomba Centrífuga em Operação com Óleo.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, João Cancio (“in memoriam”) e Maria Aparecida (“in memoriam”), pelos exemplos de coragem e honestidade, que a mim deram durante todas suas vidas.

A minha eterna companheira Roseli, (“in memoriam”), pelo amor, pela dedicação, pela cumplicidade e por todos os bons e maus momentos, que passamos juntos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Aldo Ramos Santos, meu orientador, pela amizade, orientação, sabedoria e constante incentivo e entusiasmo demonstrado pelo assunto tratado.

Ao meu Coorientador, Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior, pelo exemplo de cultura, de bondade e amizade, e pelo carinho que demonstra por todos aqueles que instrui.

A minha Coorientadora Profa. Ms. Dorotéa Vilanova Garcia, pela amizade, e paciência que demonstra ter por todos alunos

Ao Professor Roberto Patela, meu mestre há 35 anos, um agradecimento especial, por ter aberto para mim as portas do meio acadêmico da Universidade Santa Cecília.

Ao corpo de professores, pesquisadores e funcionários da Universidade Santa Cecilia – UNISANTA.

Aos colegas do Mestrado em Engenharia Mecânica da UNISANTA, pelo companheirismo, pela amizade e pelos momentos que passamos juntos, sejam em trabalhos em grupo, ou fora das salas de aula.

Ao G.’. A.’. D.’. U.’. que é DEUS, em todos os momentos...

,

EPÍGRAFE

A mudança está em tuas mãos, reprograma tua meta, busca o bem, e viverás melhor. Embora ninguém possa voltar atrás e fazer novo começo, qualquer um pode começar de novo e fazer um novo fim.

Chico Xavier

RESUMO

A bomba centrífuga é um equipamento empregado para transportar líquidos no interior de dutos. Mesmo sendo projetadas para deslocar líquidos diversos, como combustíveis e até suspensões de minério, os fornecedores apresentam curvas de seleção apenas para operação com água. O presente trabalho teve por objetivo criar um modelo matemático, para determinar as curvas características de uma bomba centrífuga operando com fluído viscoso, conhecido o desempenho desta bomba operando com água. Visou-se também quantificar o comportamento deste equipamento, quando submetido ao bombeamento de líquidos de diversas viscosidades. Como ferramenta matemática principal, para elaboração do modelo, usou-se o Polinômio Interpolador de Lagrange (PIL), uma ferramenta matemática deduzida para determinar qual a função que pontos dispersos num plano tendem a criar nele. O material usado neste modelo foram os diversos pontos de vazão, carga e rendimento, fornecidos pelo fabricante, e que construíram as curvas característica do equipamento de estudo. Conforme recomenda a literatura que trata do desempenho das curvas características das bombas, identificou-se o (BEP) *Best Eficience Point*, fornecido pelo fabricante, e por ele construiu-se uma tabela com os valores das vazões, cargas e rendimentos, tanto do (BEP), como dos seus derivados: 0,6(BEP), 0,8(BEP) e 1,2(BEP), quando operando com água. Conhecidas as funções criadas no plano cartesiano por esses pontos: vazão em função de carga e vazão em função de rendimento pôde-se então, preservando as características algébricas dessas funções, e tendo a vazão como (Domínio) e a carga ou rendimento como (Imagem),complementar os dados iniciais não contemplados pelo fabricante, ficando possível, assim, pelas equações fornecidas pelo HI-US (Hydraulic Institute), a construção do gráfico das curvas características dessa bomba para qualquer viscosidade. O método permitiu criar uma previsão teórica de desempenho para essa bomba, quando operando com fluídos de diversas viscosidades, analisar o comportamento do equipamento e analisar o prognóstico estatístico do seu desempenho.

Palavras-chave: Bomba Centrífuga. Lagrange Interpolador. Modelagem. Curva Característica

ABSTRACT

A centrifugal pump is a device used to carry liquids in pipelines. Despite being designed to move various fluids, such as fuels and even ore suspensions, vendors have only selection of curves for operation with water. This study aimed to create a mathematical model that determine the characteristic curves of a centrifugal pump operating with viscous fluid, known performance of this pump with water. It also aimed to quantify the behavior of this equipment when subjected to pumping liquids of different viscosities. As the main mathematical tool for developing the model, usou- the polynomial interpolator Lagrange (PIL), a mathematical tool equated to determine what function points scattered on a plane tend to create it. The material used in this model were the various points of flow, load and performance, provided by the manufacturer, and who built the curves characteristic of the study equipment. As recommended by the literature on the performance of the characteristic curves, identified the (BEP) Best Eficience Point, provided by the manufacturer, and he built up a table with the values of the flow rates, charges and income, both (BEP) as their derivatives: 0.6 (BEP),0.8 (BEP) and 1.2 (BEP), when operating with water. Knowing the functions created in the Cartesian plane through these points: Flow load function and flow in function could yield up then, preserving the characteristics of algebraic functions, and having the flow as (Domain) and the charge or income as (Picture), complementary initial data not contemplated by the manufacturer, being thus possible, by the equations provided by US-HI (Hydraulic Institute), the construction of the graph of characteristic curves for any such viscosity pump. The method allowed the creation of a theoretical prediction performance for this pump, when operating with fluids of different viscosities, analyze the behavior of the equipment and analyzing the statistical prediction of its performance.

Keywords: Centrifugal Pump. Characteristic Curve. Lagrange Interpolator. Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Curva característica da bomba centrífuga 10GA3-T	32
Figura 2	Curvas gráficas das tabelas 2 e 5, (Q x H)	38
Figura 3	Curvas gráficas das tabelas 2 e 5, (Q x η)	38
Figura 4	Gráfico das variações dos dados das tabelas 4 e 5	39
Figura 5	Curvas gráficas das tabelas 2 e 7, (Q x H)	40
Figura 6	Curvas gráficas das tabelas 2 e 7, (Q x η)	40
Figura 7	Gráfico das variações dos dados das tabelas 5 e 7	41
Figura 8	Gráfico das variações dos dados das tabelas 4 e 7	42
Figura 9	Curvas gráficas das tabelas 2 e 10, (Q x H)	44
Figura 10	Curvas gráficas das tabelas 2 e 10, (Q x η)	44
Figura 11	Gráfico das variações dos dados das tabelas 7 e 10	44
Figura 12	Gráfico das variações dos dados das tabelas 4 e 10	45
Figura 13	Curvas gráficas das tabelas 2 e 13, (Q x H)	46
Figura 14	Curvas gráficas das tabelas 2 e 13, (Q x η)	46
Figura 15	Gráfico das variações dos dados das tabelas 10 e 13	47
Figura 16	Gráfico das variações dos dados das tabelas 4 e 13	48
Figura 17	Médias das variações entre as viscosidades, tabela 17	49
Figura 18	Médias das diferenças entre água e viscosidade, tabela 18	49

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1	Dados fornecidos pelo fabricante JACUZZI	33
Tabela 2	Dados do fabricante JACUZZI complementados	33
Tabela 3	Método Stepanoff para melhor aproveitamento	35
Tabela 4	Complementação dos dados Stepanoff	35
Tabela 5	Ensaio Teórico 1 – Viscosidade= 20 cSt	37
Tabela 6	Variação dos dados das Tabelas 4 e 5	38
Tabela 7	Ensaio Teórico 2 – Viscosidade 50 cSt	39
Tabela 8	Variação dos dados das Tabelas 5 e 7	41
Tabela 9	Variação dos dados das Tabelas 4 e 7	41
Tabela 10	Ensaio Teórico 3 – Viscosidade = 100 cSt	42
Tabela 11	Variação dos dados das Tabelas 7 e 10	43
Tabela 12	Variação dos dados das Tabelas 4 e 10	44
Tabela 13	Ensaio Teórico 4 – Viscosidade = 150 cSt	45
Tabela 14	Variação dos dados das Tabelas 10 e 13	46
Tabela 15	Variação dos dados das tabelas 4 e 13	47
Tabela 16	Variações entre as médias das viscosidades	48
Tabela 17	Variações entre a água e as viscosidades	49

ABREVIATURAS E SIGLAS

barril	Unidade utilizada para exprimir volumes de petróleo, igual a 158,98729 litros (caso seja estadunidense) ou igual 159,11315 (caso seja imperial britânica).
CAF	*Core Anular Flow*, escoamento bifásico anular.
cgs	Unidade Padrão do (SI) - centímetro(comprimento), grama (massa) e segundo (tempo).
cm	Unidade e comprimento no (SI).
cm^2	Centímetro quadrado, unidade derivada do (SI) utilizada para determinação de área.
cm^3	Centímetro cúbico, unidade derivada do (SI) utilizada para determinação de volume.
cP	Centipoise, unidade utilizada para expressar viscosidade dinâmica equivalente a 1/1000 Kg/m.s (SI).
cSt	Centistokes, unidade utilizada para expressas viscosidade cinemática equivalente a 1/100 Stokes ou 1/100 cm^2/s.
Di	Diâmetro interno.
g	Grama, unidade de medida de massa (SI).
h	Hora, unidade de tempo equivalente a 60 minutos (SI).
Hg	Símbolo químico do metal Mercúrio.
hp	*Horse Power,* cavalo de força, unidade de potência do sistema inglês, equivalente a 745,7 Nm/s (SI).
Hz	Hertz. Unidade derivada do (SI), utilizada para a determinação de frequência, equivalente a 1 ciclo por segundo.
kg	Quilograma, unidade de massa equivalente a 1.000 Gramas (SI).
kgf	Quilograma força, é uma unidade definida pela força de uma massa de 1 kg, sujeita à ação da gravidade. Adota-se a equivalência de 1 kgf = 9,80665 N(SI).
km	Unidade equivalente a 1.000 metros (SI).
L/min	Litros por minuto.

L	Litro, unidade de volume (SI).
m	Unidade de comprimento equivalente a 100 cm(SI).
m^2	Metro quadrado, unidade derivada do (SI), utilizada para determinação de área (superfície).
m^3	Metro cúbico, unidade derivada (SI), utilizada para determinação de volume, equivalente a 1.000 litros.
min	Minuto, unidade de tempo (SI), equivalente a 60 segundos.
mm	Milímetro, unidade de comprimento ewuivalente a 1/1.000 Metro.
mca	Metros de coluna de água.
N	Newton, unidade de medida de força, equivalente a 1 $kg.m/s^2$ (SI).
Pa	Pascal, unidade padrão de pressão e tensão do (SI), equivalente a uma força de 1 N aplicada a 1 metro quadrado de superfície.
Pa.s	Pascal segundo, unidade utilizada para expressar viscosidade dinâmica, equivalente a 1 kg/m.s (SI).
Petrobrás	Petróleo Brasileiro S.A.
rpm	Rotação por minuto.
rps	Rotação por segundo.
s	Segundo, unidade de tempo (SI).
s^2	Segundo ao quadrado, unidade derivada do (SI). Utilizada para medir a aceleração de um móvel.
SI	Sistema Internacional de Unidades (cgs).
UNISANTA	Universidade Santa Cecília.
’’	Símbolo utilizado para exprimir medida em polegadas (sistema métrico inglês), unidade equivalente a 0,0254 metros (SI)
ΔP	Pressão diferencial.
π	Letra grega, tem valor aproximado a 3,1415926536...
ρ	Letra grega usada para exprimir o valor da constante que define massa específica.

SUMÁRIO

1. I**NTRODUÇÃO**..... 13
1.1 GENERALIDADES..... 13
1.2 OBJETIVO GERAL..... 15
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 15
2.**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**..... 16
2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 26
3. **MATERIAL E MÉTODOS**..... 32
3.1 MATERIAL..... 32
3.2 MÉTODOS..... 34
3.2.1 1ª Interpolação..... 34
3.2.2 Método Stepanoff para cálculo do fluido viscoso..... 34
3.2.3 Complementação do Método Stepanoff..... 35
3.2.4 Conclusão do Método..... 35
4. **RESULTADOS E DISCUSSÃO**..... 37
4.1 Aplicação do Método..... 37
4.2.1 Ensaio Teórico 1..... 37
4.2.1 Ensaio Teórico 2..... 39
4.2.2 Ensaio Teórico 3..... 42
4.2.3 Ensaio Teórico 4..... 45
5. **CONCLUSÃO E SUGESTÕES**..... 50
5.1 **CONCLUSÃO.**..... 50
5.2 **SUGESTÕES**..... 51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 52
APÊNDICES 54
APÊNDICE A -- 1ª. Interpolação – vazão e carga, equação 35..... 54
APÊNDICE B - 1ª.Interpolação – vazão e rendimento, equação 36..... 55
APÊNDICE C - Resultados do processamento dos valores dos dados do 56
Ensaio Teórico 1, Tabela 5 …. 58

APÊNDICE D - Resultado do processamento dos valores dos dados do Ensaio Teórico 2, Tabela 7 57
APÊNDICE E - Resultados do processamento dos valores dos dados do Ensaio Teórico 3, Tabela 10 58
APÊNDICE F – Resultado do processamento dos valores dos dados do EnsaioTeórico 4, Tabela 13 59
ANEXOA – Carta de correção..... 60
ANEXOB - Protocolo de procedimentos da carta de correção..... 61
ANEXO C - Fluxograma explicativo do método..... 62

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

No transporte de fluido, de viscosidade maior que a da água, é comum adaptar-se as características da bomba às propriedades deste fluido, provocando-se com isso uma modificação considerável na capacidade de bombeamento do equipamento, caracterizada pela diminuição da vazão, da carga, do rendimento ou destas três características ao mesmo tempo.

O *Standard Hydraulic Institute* (HY-US), fornece cartas de correção chamadas "ábacos" que auxiliam na escolha da bomba centrífuga para operar com fluidos viscosos, e disponibiliza as equações para construir as cartas. Contudo, essas cartas operaram com gráficos sistêmicos de difícil visualização, que comprometem a exatidão dos resultados. Stepanoff,1955, já alertava para essa condição, e acreditava que só era possível obter o desempenho de uma bomba centrífuga operando com fluido viscoso, com dados experimentais. Considerando a escassez de recursos estatísticos e computacionais daquela década, torna-se compreensível a conclusão daquele experimentador. Além disso, essas cartas fornecem dados, somente para uma faixa entre 20 e 20.000 m^3/h, deixando o usuário que necessita de uma bomba para vazões menores, sem critério para a escolha de um equipamento adequado. A carta, ANEXO A, determina somente a capacidade viscosa referente ao ponto de melhor eficiência (BEP) Best *Eficience Point*, através da sua vazão (Q_{BEP}), não fornece essa informação quando se refere aos pontos de $0,6Q_{BEP}$, $0,8Q_{BEP}$, e $1,2Q_{BEP}$, necessária para construção da curva característica de bomba centrífuga para líquido viscoso (Método de Stepanoff).

A produção de óleos pesados passa necessariamente, pelo desenvolvimento e aprimoramento de várias técnicas de produção, entre elas a técnica de elevação artificial, e existem requisitos adicionais, ditados por fatores econômicos produtivos, que impõem desafios ao pesquisador ou ao experimentador.

Um método de elevação artificial utilizado e consagrado pela indústria de petróleo é o do uso das máquinas de fluxo, e especificamente os das bombas centrífugas. Esses equipamentos incrementam a energia de pressão disponível no reservatório em quantidade suficiente para o transporte. Para se conhecer a faixa operacional ótima em que uma bomba, operando com fluido de viscosidade acima daquele da água vai operar, isto é, a faixa de vazões da bomba em que a energia especifica transferida (altura de elevação) e eficiência têm valores adequados para o sistema, há de se conhecer às limitações de rendimento e potência. *"Potência absorvida e rendimento de uma bomba são variáveis interligadas"*, (MORAES, 2011).

Nos ábacos propostos pelo *Hydraulic Institute Standart*, a correção da curva de desempenho – vazão, carga e rendimento, tem a viscosidade do fluido de trabalho como parâmetro, e a utilização dos ábacos clássicos apresenta uma limitação adicional: os valores dos coeficientes de correção publicados restringem-se à operação da bomba em seu ponto de eficiência máxima, o (BEP) *Best Eficience Point*, operando com água e na rotação nominal. Porém, esta nem sempre é a condição real mais adequada, de operação de uma bomba centrífuga aplicada no transporte de fluido em instalações produtoras de petróleo.

O óleo ou a mistura produzida quase sempre tem viscosidade mais elevada que a água, e a similaridade operacional da bomba, para estes diferentes fluidos de trabalho, fica comprometida. Portanto, os procedimentos instruídos pelos ábacos do *Hydraulic Institute Standart,* não envolvem a complexidade de todos os fatores envolvidos na operação, tornando-se, assim, necessário a construção de novos métodos de correção das variáveis envolvidas, quando sujeitas às variações da viscosidade, sejam eles empíricos, teóricos, estatísticos ou computacionais, ou buscando modelos, mesmo que simplificados, que se apoiem numa maior compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem nos processos de transferência de energia.

1.2 OBJETIVO GERAL.

O presente estudo visou criar um modelo matemático para determinar o desempenho de uma bomba centrífuga operando com um fluido viscoso, acima de 1 cP. a 200 cP., tendo como parâmetro de referência a curva característica dessa bomba com água dada pelo catálogo do fabricante.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

a) Construir a curva característica do equipamento, partindo-se do ponto de melhor eficiência (BEP, acrônimo de *Best Eficience Point), através* dos pontos de: $0,6Q_{BEP}$, $0,8Q_{BEP}$, $1,0Q_{BEP}$ e $1,2Q_{BEP}$, suas respectivas cargas: $0,6H_{BEP}$, $0,8H_{BEP}$, $1,0H_{BEP}$ e $1,2\ H_{BEP}$, rendimentos: $0,6\eta_{BEP}$ e $0,8\eta_{BEP}$ e $1,0\eta_{BEP}$ e $1,2\eta_{BEP}$, e potências (P), fornecidas.

b) Fazer uma análise computacional do comportamento da bomba centrífuga quando se aumenta a viscosidade do fluido bombeado, e mostrar através de números e gráficos as variações incrementadas.

c) Testar o desempenho teórico do modelo, com fluidos de viscosidades iguais a: 20, 50, 100 e 150 cSt.

d) Mostrar, através de números e gráficos, os resultados estatísticos dessas variações de viscosidades, comparar as suas influências, no comportamento da vazão, carga e rendimento, e também nas reações do equipamento ao processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É vasta, até a década de 60, a literatura referenciável que trata em geral das maquinas de fluxo, e em particular das bombas centrífugas. Pertencem àquela época às tabelas e ábacos operacionais, bem como os conceitos desenvolvidos, e são contemporâneos à época os principais pesquisadores.

Isso fica evidente quando se percebe que experimentalistas como 958) e (STEPANOFF,1955) pesquisador de relevada importância no desenvolvimento da área de máquinas de fluxo, seja ainda bastante citado em trabalhos científicos e técnicos atuais. Em 1955, afirmava Stepanoff:" É *impossível estabelecer o desempenho de uma bomba centrífuga, operando com fluido viscoso, com deduções puramente teóricas…A relação entre a carga, altura de elevação, e a vazão a uma rotação constante, é um problema experimental".* Para essa afirmação o pesquisador contava apenas com testes experimentais, realizados com bombas centrífugas convencionais de diâmetros de flange de descarga de ¾'' (19 mm) a 8''(200 mm), realizando testes com água e com onze tipos de óleos de viscosidades entre 1 a 2000 cSt, tendo verificado que, para uma certa bomba operando com rotação constante, a carga diminui com o aumento da viscosidade do fluido bombeado, de tal forma que a rotação específica permanece constante. Definiu Stepanoff (1955) como a velocidade de rotação específica da bomba, ou seja, é a velocidade em rpm que uma bomba teórica, geometricamente semelhante à bomba real, operaria com o máximo de eficiência, se fosse projetada para descarregar i galão/min contra uma altura de elevação de 1ft. A Equação 1, apresenta este parâmetro.

$$N_S = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \qquad (1)$$

sendo

N_S a velocidade da rotação específica de Stepanoff, em rpm, Q a vazão volumétrica em galões por minuto, e H a altura de elevação (carga) em pés. As faixas normais das velocidades de rotação específica estão entre 500 e 15000 rpm.

sendo

Bombas centrífugas puras	$500 < N_S < 4200$
Bombas de fluxo misto e bombas axiais	$4200 < N_S < 9000$
Bombas axiais	$9000 < N_S < 15000$

Stepanoff (1955) propôs então, com essa base totalmente empírica, uma relação, Equação 2, entre vazão e altura de elevação (carga), usando como fluido de referência a água, e como fluido viscoso, válido somente para a condição específica operacional daquele equipamento, o ponto de melhor eficiência (BEP, acrônico de *best eficience point):*

$$\frac{Q_o}{Q_w} = \sqrt[2]{\frac{H_o}{H_w}^3} \quad (2)$$

sendo

Q_o a vazão do óleo em galão por minuto, Q_w vazão da água em galão por minuto, H_o a altura de elevação (carga) do óleo em pés e H_w altura de elevação (carga) da água em pés.

Foi elaborado então pelo experimentador um ábaco, reproduzindo os seus experimentos, relacionando um número de *Reynolds* modificado (*Reynolds de Stepanoff*), com a eficiência da bomba e criando fatores de correção para a carga (altura de elevação) e a vazão, mantendo a operando com água como fluido de referência, usando como equipamentos bombas de vários fabricantes e de características diferentes.

Propôs então o autor o número de *Reynolds,* Equação 3:

$$Re_{stepanoff} = \frac{N\ Q_o}{\nu\ \sqrt{H_w}} \quad (3)$$

sendo ν a viscosidade cinemática medida em pé quadrado por segundo.

É fornecido pelo ábaco, ANEXO A, fatores de correção para a carga (altura de elevação), C_H e a eficiência da bomba C_η, relacionados a uma condição operacional específica para este equipamento. Todos os cálculos iniciam-se após a identificação das condições da bomba no (BEP) quando operando com água, numa determinada rotação e usando as relações de similaridade de bombas centrífugas. O procedimento funciona assim: estima-se um valor de vazão para uma para nova condição com o fluido viscoso, calcula-se o número de *Reynolds* característico, a seguir é obtido, no diagrama, o fator de correção da carga (altura de elevação) C_H, calcula-se com a Equação 2, o fator de correção da vazão C_Q e, com esses dados, a nova vazão. Compara-se então esta vazão com a estimada anteriormente, se convergir, calcula-se a nova carga (altura de elevação) com o fator de correção C_H obtido, se não, repete-se o procedimento até convergir. O fator do rendimento C_η é retirado diretamente do gráfico.

O método tem algumas desvantagens relacionadas com as imprecisões da interatividade, mas a maior delas é que os fatores de correção, C_Q da vazão e C_η do rendimento, ficam condicionados ou relacionados às condições de similaridades geométricas, cinemáticas e dinâmicas do (BEP).

Testes com bombas convencionais de simples estágios bombeando óleos derivados de petróleo foram realizados pelo *Hydraulic Institute Standart – USA (1955),* e os resultados dos dados experimentais destes testes geraram dois ábacos (cartas de correção), ANEXO A, um para centrífugas de 2'' (50 mm) a 8'' (200mm) de diâmetro do flange de descarga e outro para bombas com flange de diâmetro de descarga de 1'' (25 mm) ou menores. Esses ábacos geram fatores de correção (C_Q), (C_H) e (C_η) para a vazão(Q_w), carga(C_H) e rendimento (η), respectivamente, que são utilizados na curva característica da bomba quando operando com água, para corrigir seu desempenho quando operando com fluido viscoso

Curva característica de uma bomba centrífuga é a ilustração da construção de um gráfico cartesiano, abscissa(x) e ordenada(y), das relações funcionais entre vazão(Q) em função da carga(H) e vazão(Q) em função do rendimento (η), gerando as funções Q(x)H(y) e Q(x)η(y), respectivamente, no plano cartesiano.

Entende-se por ábaco, a carta corretiva composta por dois diagramas, Figura 1, o primeiro utiliza, como referência para ajuste, a vazão $Q_{W\text{-}BEP}$ do (BEP) *Best Eficience Point,* da curva de desempenho da bomba com água, o segundo fornece os fatores de correção: C_Q, C_H e $C_{\eta\ da}$ vazão, da carga e do rendimento, respectivamente. O (BEP) é a variável independente que substitui o número de *Reynolds* do ábaco de *Stepanoff.* Carga $H_{W\text{-}BEP}$ (altura de elevação), e rendimento $\eta_{W\text{-}BEP}$ e a viscosidade cinemática do fluido viscoso que será bombeado, são parâmetros do diagrama,

É com base nestes parâmetros que o segundo diagrama fornece os fatores de correção, da curva da bomba operando com água, para a curva da bomba agora operando com fluido viscoso.

Os fatores de correção C_Q e C_η são independentes da vazão da água, mas, quatro valores diferentes de C_H serão obtidos para os diferentes pontos de vazão: $0{,}6Q_{W\text{-}BEP}$ e $0{,}8Q_{W\text{-}BEP}$ e $1{,}0Q_{W\text{-}BWP}$ e $1{,}2Q_{W\text{-}BEP}$. A nova curva característica tem, também, um ponto adicional que corresponde ao ponto de "*schut-off* ", isto é, a condição, na prática operacional, que fornece a altura de elevação (carga) correspondente à vazão nula da bomba. A carga (altura de elevação) para este ponto permanece a mesma, independente da viscosidade do fluido a ser bombeado. Essas condições, praticadas pelo uso da carta de correção, são válidas somente para uma faixa de bombeamento de 21,6 a 2,160 m^3/h (100 a 10.000 gpm), para altura de elevação (carga) de 1,8 a 183 m (6 a 600 ft) e viscosidade cinemática entre 4 a 3.300 cSt.

Gulich (1999) e Li et al. (2002) são alguns dos autores que fazem questionamento sobre o uso dos ábacos do *Hydraulic Institute Standart,* para correção das curvas características, eles alegam que os testes feitos pelo HI-US, foram realizados em bombas com características bem diferentes das bombas utilizadas na elevação do petróleo, e que os fatores de correção só são aplicados no ponto de melhor eficiência (BEP), e a uma determinada rotação. "*As relações de similaridade de bombas centrífugas se mantêm para qualquer viscosidade, porem com menor precisão do que com água",* Stepanoff (1955). Conclui-se então, que a condição de melhor eficiência não se preserva totalmente quando aplicadas às relações de similaridade, em se tratando de fluidos muito viscosos, e se, essa condição for usada como referência, cálculos

muito discrepantes poderão ser obtidos à medida que o desvio entre o ponto de melhor eficiência (BEP) com a água e com o fluido viscoso aumenta.

Gomide (1997), também está entre os autores que recomendam o uso dos ábacos, carta de correção, para se determinar a curva característica de uma bomba operando com fluido viscoso, conhecido o desempenho desta bomba operando com água, mas, discorda do uso do rendimento fornecido pelo fabricante posto como imposição.

"*Para estimativas rápidas do rendimento de bombas centrífugas, pode-se utilizar uma expressão que simplifica o trabalho porque independe da consulta aos catálogos e, assim, despersonaliza o valor utilizado para completar o cálculo da potência*" (GOMIDE,1997).

Disponibiliza então o autor a Equação 4, como uma maneira de se calcular o rendimento, sem depender da potência consumida, conhecendo-se somente a vazão (Q) e a carga (H).

$$\eta = 80 - 0{,}937H + 8{,}460*10^{-3}QH - 1{,}514*10^{-5}Q^2H + 5{,}802*10^{-3}H^2 - 3{,}028*10^{-5}H^2 + 8{,}346*10^{-8}Q^2H^2 \quad (4)$$

sendo

η rendimento da bomba em (%)

Q a vazão em (m^3/h)

H a carga em (mca)

Intervalo de aplicabilidade

$20 < Q < 250$ (m^3/h)

$15 < H < 100$ (m)

Macintyre, (1997) analisa os fatores que alteram as curvas características das máquinas de fluxo, e comparando o funcionamento de duas bombas iguais, com o mesmo número de rotações por minuto, a mesma viscosidades, mas bombeando líquidos de pesos específicos diferentes, e observou que o rendimento se mantem praticamente o mesmo nos dois casos, as cargas (altura de elevação) totais geradas pelo rotor são as mesmas, porque as velocidades tanto do rotor como do líquido não mudam, mas que as

alturas representativas das pressões variarão, porque a pressão é proporcional ao peso específico do liquido, Equação 5.

$$P = \gamma * H \qquad (5)$$

sendo

P a pressão em (kgf/cm^2), H altura de elevação em (metros) e γ o peso específico do fluido em (N/m^3).

Portanto, a variação da pressão entre a saída e a entrada do rotor será tanto maior quanto maior o peso específico, mas a altura de elevação (carga) se mantem a mesma. Observou ainda, Macintyre, que se a viscosidade variar (ou variar a temperatura, que afetará a viscosidade), as perdas por atrito e turbilhona mento, principalmente no rotor, e entre este e a caixa, também sofrerão variações. *"Consequentemente, uma bomba trabalhando com a mesma velocidade, só poderá fornecer a mesma descarga (vazão) bombeando líquido de maior viscosidade, para uma altura de elevação (carga) menor, e consumindo também, para isso, maior potência motriz devido às perdas internas", DeFalco,1998.*

A viscosidade costuma ser expressa em:

a - Centipoise, para viscosidade absoluta

b - Stokes ou Centistokes, para viscosidade cinemática.

c - Saybolt Seconds Universal (SSU), para viscosidade em tempo de escoamento.

O autor também concluiu que, teoricamente, bombas geometricamente semelhantes, terão grandezas variando proporcionalmente entre si, com isso as curvas características deveriam ser teoricamente semelhantes, mas, que na realidade, numa série de bombas geometricamente semelhantes, as de menores dimensões têm rendimento menor, porque as espessuras das palhetas, as folgas, a rugosidade relativa e as imperfeições são relativamente maiores para essas bombas do que para as de maiores dimensões, e, por isso, as curvas características não são exatamente semelhantes.

Cengel, (2011), propõe que as análises dos problemas de Engenharia sejam estudadas tanto experimentalmente, como analiticamente através dos (CFD) *Computational Fluid Dynamics,* largamente usado em aplicações de modelagem computacional. Aponta alguns softwares como o FLUENT, largamente usado em aplicações de modelagem de escoamentos, (EEG) *Engineering Equation Solver,* Solucionador de Equações de Engenharia é um programa que soluciona equações lineares, não lineares e diferenciais. Tem embutido uma vasta biblioteca de funções de propriedades termodinâmicas bem como funções matemáticas. O (EES) economiza esforços, porém não resolve problemas de engenharia, resolve apenas as equações.

Delmée, (1982) preocupou-se mais com a interferência da viscosidade no processo das curvas características, é definiu viscosidade como a resistência que o fluido oferece ao deslocamento de suas partículas. Classifica a *viscosidade absoluta* (ou viscosidade dinâmica) e a define na Equação 6, de Newton, na aplicação de um dispositivo experimental em que o fluido preenche um espaço entre duas placas, e uma fixa e outra, de superfície S, deslocando-se em relação à placa fixa a uma velocidade V, aplicando na placa móvel uma força F:

$$\mu = \frac{F.e}{S.V} \tag{6}$$

A viscosidade absoluta tem como unidade o Pa.s (Pascal vezes segundo ou poiseuille), no (SI) Sistema internacional, porem esta unidade é preterida pelo cP (centipoise), sendo um Pa = 1.000 cP.

A outra expressão da viscosidade é a *viscosidade cinemática (v*), definida como a relação entre a viscosidade absoluta do fluido (**μ**) e sua massa especifica (ρ), à mesma temperatura, Equação7.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{7}$$

A viscosidade cinemática tem como unidade o metro quadrado por segundo (m^2/s), no (SI), mas também é preterida na indústria pelo Centistokes (cSt), sendo 1cSt = 10^{-6} m^2/s.

Moraes, e Moraes, (2011) indicam o uso do ábaco, ANEXO A, para o cálculo dos índices de correção da curva característica de uma bomba transportando água, quando se quer transportar com esse mesmo equipamento fluido de viscosidade diferente, e disponibiliza um protocolo de procedimentos para o seu uso correto.

Com os dados da curva característica, e de posse da carta de correção, ANEXO A, o autor protocola o seguinte procedimento: usando o ponto de melhor eficiência η_{BEP-} da água, por sua vazão correspondente (Q_W), por sua carga correspondente (H_W)), e usando a viscosidade V_w do fluido:

a) Entrar nos "ábacos" (carta de correção, ANEXO A), no ponto de vazão Q_W),
b) Subir verticalmente até o ponto de carga H_W correspondente,
c) Seguir horizontalmente até a viscosidade (V), especifica do liquido.
d) Para finalmente subir verticalmente até interseccionar as curvas correspondentes aos coeficientes de:
e) correção da vazão C_Q, único, que determina a vazão do fluido viscoso em 0.6Q 0.8Q 1.0Q e 1.2Q
f) correção das cargas, um para cada porcentagem 0.6 C_H , 0.8 C_H ,1.0 C_H e1.2 C_H
g) correção do rendimento C_η, único.

Esses coeficientes multiplicados pela respectiva: vazão (Q_w), carga (H_w) e rendimento (η_w) da água é que determinará qual será a vazão Q_{vis} , carga H_{vis} e rendimento η_{vis} para o fluido viscoso que se pretende bombear

Expõe também o autor, uma definição do conceito de rendimento, como quociente da relação entre máquinas, geratriz e operadora. "*Rendimento (η) de uma bomba é a relação entre a energia fornecida pelo motor (maquina motriz), e a absorvida pela bomba (maquina operatriz), considerando que o motor não transmite para o eixo toda potência que gera e a bomba, devido as suas perdas internas, necessita de mais energia do que consome".*

Divide-se o rendimento em:

1) Hidráulico: Leva em consideração o acabamento interno superficial do rotor e da carcaça da bomba.

2) Volumétrico: Contempla os vazamentos externos pelas vedações (gaxetas) e a recirculação interna bomba, sendo que as injetoras, as autoaspirantes e de alta pressão possuem rendimento volumétrico e global inferior às convencionais.

3) Mecânico: Considera que apenas uma parte da potência necessária ao acionamento de uma bomba é usada para deslocar o líquido, o restante perde-se por atrito.

O rendimento global então será a relação entre a potência global e a potência absorvida pela bomba *"Potência absorvida e rendimento de uma bomba são variáveis interligadas."* (MORAES, 2011).

Rotawa (2012) apresenta uma reprodução algébrica particular, do modo de se calcular a curva característica de uma bomba operando com água, diferente daquela apresentada pelo *Standard Hydraulic Institute.*

O parâmetro B, Equação 24, desenvolvido nas equações do HY-US, é pelo autor substituído por outro procedimento algébrico, denominado "vazão corrigida", Equação 12, mas que tem a mesma finalidade daquele parâmetro B, o de substituir os procedimentos iniciais, instruídos na carta de correção, Figura 1, e protocolados na explanação dela.

Por Rotawa, a Equação 8, expressa o efeito da carga (altura manométrica).

$$yH = -2{,}24083 + 0{,}11414 * \ln(Hw) + 0{,}2298476 * \ln(q_w) \quad (8)$$

O efeito da viscosidade fica expresso da Equação 9.

$$vH = a_v - 0{,}9004548 * \ln(q_w)_c \quad (9)$$

em *Engler, Equação 10, ou Centistokes, Equação 11..*

$$a_v = 2{,}92897 + 0{,}459401 * \ln(v_e) \quad \text{em Engler} \quad (10)$$

$$a_v = 2{,}12588 + 0{,}439379 * \ln(v_c) \quad \text{em Centistokes} \quad (11)$$

Explicitando a vazão corrigida $(q_w)_c$ na Equação 12, se obtém.

$$(q_w)_c = e^{-\left(\frac{yH-av}{0,9004548}\right)} \quad (12)$$

Os cálculos dos índices de correção: do rendimento C_η, Equação 13, da vazão C_q, Equação 14, e das cargas $0,6C_H$ e $0,8C_H$ e$1,0C_H$ e $1,2C_H$, Equações de 15 a 17, são agora determinados.

Rendimento (η_w):

$$C\eta = 2,58778 - 1,0582*\ln(q_w)_c + 0,250222*[\ln(q_w)_c]^2 - 0,0218283*[\ln(q_w)_c] \quad (13)$$

Vazão (q_w):

$$C_q = 8,198030 - 4,20638*\ln(q_w)_c + 0,829463*[\ln(q_w)_c]^2 - 0,0552263*[\ln(q_w)_c]^3 \quad (14)$$

Carga(H_w):

$$0,6Q_w: C_H = 4,551710 - 2,03959*\ln(q_w)_c + 0,395278*[\ln(q_w)_c] - 0,0259935*[\ln(q_w)_c]^3 \quad (15)$$

$$0,8Q_w: C_H = 3,94550 - 1,74897*\ln(q_w)_c + 0,350021*[\ln(q_w)_c]^2 - 0,0238088*[\ln(q_w)_c]^3 \quad (16)$$

$$1,0Q_w: C_H = 1 - 0,0409042*[\ln(q_w)_c - 4,3189130] - 0,0664958*[\ln(q_w)_c - 4,3189130]^2 + 0,117403*[\ln(q_w)_c - 4,3189130]^3 - 0,0725729*[\ln(q_w)_c - 4,3189130]^4\ 0,0125293*[\ln(q_w)_c - 4,3189130]^5 \quad (17)$$

$$1,2Q_w: C_H = 1 - 0,0378202*[\ln(q_w)_c - 3,9464886] - 0,0711279*[\ln(q_w)_c - 3,9464886]^2 - 0,100591*[\ln(q_w)_c - 3,9464886]^3 - 0,0519556*[\ln(q_w)_c - 3,9464886]^3 - 0,00765013*[\ln(q_w)_c - 3,9464886]^5 \quad (18)$$

Alerta porém o autor a usar estes procedimentos somente dentro da escala da carta de correção, exclusivamente para bombas de projeto hidráulico convencional, em faixa de operação normal, e especificamente para líquidos newtonianos.

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

O Polinômio Interpolar de Lagrange, (PIL) determinado na função (Px), representado nas equações de 19 a 23, desenvolvido pelo matemático Joseph-Louis Lagrange, século XVIII, consiste num método matemático capaz de fornecer, dados dois ou mais pontos cartesianos numa superfície, qual a função que aqueles pontos determinam no plano, (Chapra,2012).

1. Polinômio Interpolador de Lagrange - para 4 pontos.

$$F0 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_{3)}} y_0 \quad (19)$$

$$F1 = \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3} \; y_1 \quad (20)$$

$$F_2 = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3} y_2 \quad (21)$$

$$F3 = \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_3} y_3 \quad (22)$$

$$P(x) = F_0 + F_1 + F_2 + F_3 \quad (23)$$

sendo:

$(x_0; y_0)$ $(x_1; y_1)$ $(x_2; y_2)$ $(x_3; y_3)$ coordenadas cartesianas dispersas no plano.

2.2 Polinômio Interpolador de Lagrange – para 6 pontos

Matriz Lagrangeana

$$\begin{array}{llllll}
\mathbf{x - x_0} & \mathbf{x_0 - x_1} & \mathbf{x_0 - x_2} & \mathbf{x_0 - x_3} & \mathbf{x_0 - x_4} & \mathbf{x_0 - x_5} \\
\mathbf{x_1 - x_0} & \mathbf{x - x_1} & \mathbf{x_1 - x_2} & \mathbf{x_1 - x_3} & \mathbf{x_1 - x_4} & \mathbf{x_1 - x_5} \\
\mathbf{x_2 - x_0} & \mathbf{x_{2-} x_1} & \mathbf{x - x_2} & \mathbf{x_2 - x_3} & \mathbf{x_2 - x_4} & \mathbf{x_2 - x_5} \\
\mathbf{x_3 - x_0} & \mathbf{x_{3-} x_1} & \mathbf{x_3 - x_2} & \mathbf{x - x_3} & \mathbf{x_3 - x_4} & \mathbf{x_3 - x_5} \\
\mathbf{x_4 - x_0} & \mathbf{x_4 - x_1} & \mathbf{x_4 - x_2} & \mathbf{x_4 - x_3} & \mathbf{x - x_4} & \mathbf{x_4 - x_5} \\
\mathbf{x_5 - x_0} & \mathbf{x_5 - x_1} & \mathbf{x_5 - x_2} & \mathbf{x_5 - x_3} & \mathbf{x_5 - x_4} & \mathbf{x - x_5}
\end{array}$$

$$\mathrm{F0} = \frac{(\mathrm{x}-\mathrm{x}_1)}{(\mathrm{x}_0-\mathrm{x}_1)}\frac{(\mathrm{x}-\mathrm{x}_2)}{(\mathrm{x}_0-\mathrm{x}_2)}\frac{(\mathrm{x}-\mathrm{x}_3)}{(\mathrm{x}_0-\mathrm{x}_3)}\frac{(\mathrm{x}-\mathrm{x}_4)}{(\mathrm{x}_0-\mathrm{x}_4)}\frac{(\mathrm{x}-\mathrm{x}_5)}{(\mathrm{x}_0-\mathrm{x}_5)} \quad (y_0) \tag{24}$$

$$\mathbf{F1} = \frac{(x-x_0)}{(x_1-x_0)}\frac{(x-x_2)}{(x_1-x_2)}\frac{(x-x_3)}{(x_1-x_3)}\frac{(x-x_4)}{(x_1-x_4)}\frac{(x-x_5)}{(x_1-x_5)} \quad (Y_1) \tag{25}$$

$$\boldsymbol{F2} = \frac{(x-x_0)}{(x_2-x_0)}\frac{(x-x_1)}{(x_2-x_1)}\frac{(x-x_3)}{(x_2-x_3)}\frac{(x-x_4)}{(x_2-x_4)}\frac{(x-x_5)}{(x_2-x_5)} \quad (Y_2) \tag{26}$$

$$\boldsymbol{F3} = \frac{(x-x_0)}{(x_3-x_0)}\frac{(x-x_1)}{(x_3-x_1)}\frac{(x-x_2)}{(x_3-x_2)}\frac{(x-x_4)}{(x_3-x_4)}\frac{(x-x_5)}{(x_3-x_5)} \quad (Y3) \tag{27}$$

$$\boldsymbol{F4} = \frac{(x-x_0)}{(x_4-x_0)}\frac{(x-x_1)}{(x_4-x_1)}\frac{(x-x_2)}{(x_4-x_2)}\frac{(x-x_3)}{(x_4-x_3)}\frac{(x-x_5)}{(x_4-x_5)} \quad (Y4) \tag{28}$$

$$\boldsymbol{F5} = \frac{(x-x_0)}{(x_5-x_0)}\frac{(x-x_1)}{(x_5-x_1)}\frac{(x-x_2)}{(x_5-x_2)}\frac{(x-x_3)}{(x_5-x_3)}\frac{(x-x_4)}{(x_5-x_4)} \quad (Y_5) \tag{29}$$

P(x)= F0 + F1 + F2+ F3+ F4+ F5 (30)

2.1.1 Equações do HI-US – Hydraulic Institute

A norma ANSI/HI 9.6.7-2010 recomenda o uso das Equações de 31 a 38, desenvolvidas pelo Standard Hydraulic Institute, para determinar em que condições uma bomba projetada para transportar água, poderá transportar outro liquido de viscosidade diferente do fluido do projeto, dispensando o uso da carta de correção. São baseadas no número de Reynolds ajustadas para o desempenho da bomba em uma determinada velocidade, parâmetro B (Equação 31). Se B=<1 a vazão (Q_W) e a carga (H_W) para a água serão iguais à vazão (Q_{vis}) e a carga (Hvis) do fluido viscoso. No caso de 1<B<40 o fator de correção da vazão (C_Q) é dado pela Equação 32, e a vazão do fluido viscoso pela Equação 33.

2.1 Parâmetros B

Esse parâmetro substitui as etapas a, b e c, quando se usa a carta de correção do ANEXO A.

$$B = 16{,}5 * \frac{V^{0.5}}{Q_{BEP-W}^{0.375}} * \frac{H_{BEP-W}^{0{,}0625}}{N^{0{,}25}} \quad (31)$$

2.1.2 Fatores de correção da vazão (Q, m^3/h), Equações 25 e 26.

$$C_Q = 2{,}71^{-0.165(logB)^{3{,}15}} \quad (32)$$

$$Q_{vis} = C_Q * Q_w \quad (33)$$

2.1.3) Fator de correção da carga (H , m), Equações 27 e 28.

$$Ch = 1 - (1 - C_{BEP-W}) \left(\frac{Q_w}{Q_{BEP-w}}\right)^{0.75} \quad (34)$$

$$H_{vis} = C_h * H_w \quad (35)$$

2.1.4 Fatores de correção do rendimento (η %), Equações 29 e 30.

$$C\eta = B^{-(0.0547)(B)^{0.69}} \quad (36)$$

$$\eta_{vis} = C_\eta * \eta_w \quad (37)$$

2.1.5 Fatores de correção da potência (P, rpm), Equação 38.

$$P_{vis} = \frac{Q_{vis} * H_{vis}}{367 * \eta_{vis}} \quad (38)$$

sendo

Vis	a viscosidade da água	(cSt)
Q_w	a vazão da água em	(m^3/h)
H_W	a carga da água em	(m)
η_W	a rendimento da água em	(%)
Q_{BEP-W}	a vazão no ponto de melhor eficiência	(m^3/h)
H_{BEP-W}	a carga no ponto de melhor eficiência	(m)
η_{BEP-W}	o rendimento no (BEP) em	(%)
Qvi	a vazão do líquido viscoso em	(m^3/h)
Q_{vis}	a carga do liquido viscoso em	(m)
η_{vis}	o rendimento liquido viscoso em	(%)
P_{vis}	a Potência do liquido viscoso em	(cv)

2.2 Potência (*BHP*) *Brake House Power.*

A potência (*BHP*) de uma bomba é a energia que ela consome para transportar o fluido na vazão desejada, altura estabelecida, com o rendimento esperado, o (*BHP*) “Consumo de Energia da Bomba”, é função de duas outras potências também envolvidas no funcionamento de uma bomba.

São elas:

A. Potência hidráulica

B. Potência Útil.

Porém na prática, apenas a potência motriz faz-se necessária para se chegar ao motor de acionamento da bomba, representado pela Equação 32.

$$BHP = \frac{Q*H*\gamma}{\eta} \quad (39)$$

2.3 Rendimento (η)

O rendimento de uma bomba é a relação entre a energia oferecida pelo motor (máquina motriz) e a absorvida pela bomba (maquina operatriz) , uma vez que o motor não transmite para o eixo toda a potência que gera, assim como a bomba necessita de uma energia maior do que consome, devido as suas perdas passivas na parte interna. Divide-se em rendimento:

a) Hidráulico: Leva em consideração o acabamento interno superficial do rotor e da carcaça da bomba.

b) Volumétrico: Contempla os vazamentos externos pelas vedações (gaxetas) e a recirculação interna bomba, sendo que as injetoras, as autoaspirantes e de alta pressão possuem rendimento volumétrico e global inferior às convencionais.

c) Mecânico: Considera que apenas uma parte da potência necessária ao acionamento de uma bomba é usada para bombear, o restante perde-se por atrito. O rendimento global então será a relação entre a potência global e a potência absorvida pela bomba, conforme Equação 33.

$$\eta = \frac{Qvis*Hvis*0{,}37}{BHP} \quad (40)$$

sendo

Q	a vazão da água em	(m^3/h)
H	a carga da água em	(m)
η	o rendimento da água em	(%)
BHP	a potência	(cv)

2.3 Matrix Laboratory (MatLab)

O MatLab (abreviatura de Matrix Laboratory – Laboratório de Matrizes) é um software de simulação matemática que realiza operações matriciais, constrói gráficos em duas ou três dimensões, auxilia no processamento de sinais, além de manipular outras funções especializadas (GARCIA, 2009).

Embora todos os cálculos envolvidos neste trabalho, possam ser desenvolvidos só com o auxílio de uma calculadora, optou-se por desenvolve-los de uma maneira computacional, para isso foram criados afim de agilizar estes cálculos, alguns programas na linguagem de programação MatLab como:

2.3.1 Lagrangeinterpolador4.mat (para 4 pontos)

Foi desenvolvido na Linguagem de Programação MatLab para melhorar a performance, a agilidade e a exatidão, dos cálculos do (PIL), na existência de quatro pontos dispersos no plano. Transforma os dados de entrada, coordenadas cartesianas dos pontos dispersos no plano, na função P(x) que intersecciona todos os pontos, ou mais próxima fica de fazê-lo, (Equações de 19 a 23), dados de saída.

2.3.2 Polinterpoladorseispontos.mat (para 6 pontos)

Foi desenvolvido na Linguagem de Programação MatLab para melhorar a performance, a agilidade e a exatidão, dos cálculos do (PIL), na existência de seis pontos dispersos no plano. Transforma os dados de entrada, coordenadas cartesianas dos pontos dispersos no plano, na função P(x) que intersecciona todos os pontos, ou mais próxima fica de fazê-lo, (Equações de 19 a 30), dados de saída.

2.3.4 Comando Polyval (Matrix Laboratory)

Dado a função F(x) num plano cartesiano, para todo e qualquer (x) pertencente ao domínio da função, existe um (y) imagem da função de maneira de y = F(x).

Este comando da linguagem de Programação MatLab calcula y = F(x), para todo e qualquer x pertencente ao Domínio de F(x).

Sintaxe: Se $F(x) = ax^n + bx^{n-1} + cx^{n-2} .....dx^{n-m}$, onde (n,m) pertencem ao Conjunto dos Números Naturais, então p = [a b c....d] é o vetor de F(x).

Se $x_0, x_1, x_2, ... x_n$ pertencem ao Domínio de F(x) então:

a = Polyval(p,x_0) determina a = Y_0 t.q. (x_o; y_0) pertence a F(x).

b = Polyval(p,x_1) determina b = Y_1 t.q. (x_1; y_1) pertence a F(x).

c = Polyval (p, x2) determina c = Y_2 t.q. (x_2; y_2) pertence a F(x).

d = Polyval (p, xn) determina d = Yn t.q. (x_n; $Y_{n)}$ pertence a F(x).

3. MATERIAL E MÈTODOS

3.1 MATERIAL.

Os dados iniciais, Tabela 1, exceto os rendimentos (η) que não pertencem ao BEP (*Best Eficience Point*), foram fornecidos pelo fabricante de bombas *JACUZZI (BOMBAS HIDRÁULICAS , 2015),* Figura 1*,* e retrataram as seguintes características: Bomba Centrífuga, mono estágio, modelo 10GA3-T-serie “E”, monobloco com motor elétrico para redes de frequência 60 Hz, monofásico de até 2 cv ou trifásico até 15 cv de potência absorvida, bocais roscados, rotação nominal de 3500 rpm, potência de 10 cv, registrando seu melhor rendimento (η_{BEP}) = 72%, com a vazão Q_w = 56,0 m^3/h e a carga H_w = 35,0 m, tendo altura máxima sem vazão(*shut-off)* igual a 50 metros*,* adequadas para bombeamento com temperatura até 100˚C, admitindo pressões de até 12 kgf/cm^2, encontram-se disponíveis no catalogo do fabricante.

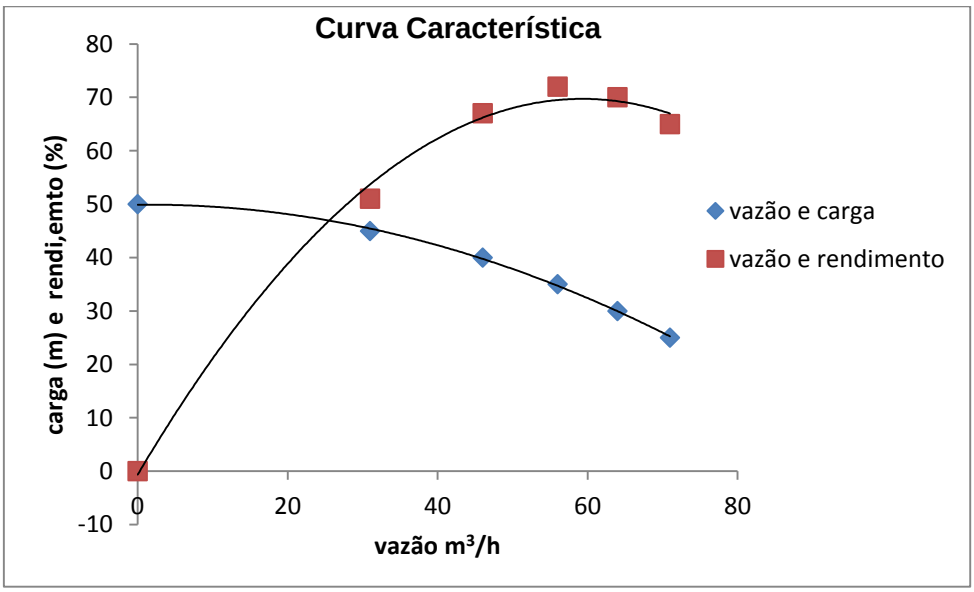


Figura 1 – Curva característica da bomba centrífuga 10GA3-T

Tabela 1 – Dados fornecidos pelo fabricante de bombas Jacuzzi

Viscosidade água Vis (cSt)	1				
Massa específica ϒ (N/m^3)	10000				
Velocidade (rpm)	3500				
Ponto de melhor eficiência			BEP		
Vazão da água Qw (m^3/h)	31	46	56	64	71
Carga Hw (m)	45	40	35	30	25
Rendimento ηw (%)	*	*	72	*	*
Potência P (cv)	10	10	10	10	10

*Não fornecido pelo fabricante

Com os dados da Tabela 1, fornecidos pelo fabricante de bombas Jacuzzi, calcularam-se os outros rendimentos (η), pela Equação 34, completando-se assim os dados da Tabela 2, como dados do fabricante de bombas Jacuzzi complementados.

$$\eta = \frac{Q*H*0{,}37}{BHP} \tag{34}$$

sendo

Q	a vazão da água em	(m^3/h)
H	a carga da água em	(m)
η	o rendimento da água em	(%)
BHP	a Potência	(cv)

Tabela 2 – Dados do fabricante de bombas Jacuzzi complementados

Viscosid. da água Vis (cSt)	1				
Peso específico ϒ (N/m^3)	10000				
Velocidade (rpm)	3500				
Ponto de melhor eficiência			BEP		
Vazão da água Qw (m^3/h)	31	46	56	64	71
Carga Hw (m)	45	40	35	30	25
Rendimento ηw (%)	52	68	72	71	66
Potência p (cv)	10	10	10	10	10

3.2 – MÉTODOS.

3.2.1 – INTERPOLAÇÃO:

Os dados, da vazão e carga da Tabela 2, mais o ponto de shut-off (00;50) são transformados então nos (x_0; y_0), (x_1; y_1),(x_2; y_2), (x_3 ; y_3)(x_4; y_4) (x_5; y_5) da matriz lagrangeana, com os valores (0; 50) (31; 45) (46; 40) (56; 35) (64; 30) (71;25), respectivamente, APÊNDICE A, para proceder os cálculos determinados pelo (PIL), Equações 19 a 30, sendo que esses valores construíram no plano, Equação 35, a função:

$$\mathbf{Q(x)H(y)= 0.000000007288x^5 - 0.00000075069x^4 - 0.000039518x^3 + 0.00095644x^2 - 0.13733x + 50} \quad \mathbf{(35)}$$

Repetiu-se todo processo anterior, pelo mesmo (PIL), e os dados, da vazão e rendimento da Tabela 2, são transformados nos (x_0; y_0), (x_1; y_1),(x_2; y_2), (x_3; y_3)(x_4; y_4) (x_5; y_5) da matriz lagrangeana, agora com os valores (00;00) (31; 51) (46; 68) (56; 72) (64; 70) (71; 66), respectivamente, APÊNDICE B, para desenvolver os cálculos determinados pelo PIL, Equações de 19 a 30, sendo que esses valores construíram no plano, Equação 36, a função:

$$\mathbf{Q(x')\eta(y') = 0.00000025277x^5 - 0.000047924x^4 + 0.003028x^3 - 0.088367x^2 + 2.6689x + 0.0} \quad \mathbf{(36)}$$

3.2.2 – Método Stepanoff para cálculo do fluido viscoso.

Esse experimentador recomenda que: partindo-se da vazão no ponto de melhor eficiência ($1{,}0Q_{BEP}$), da Tabela 2 – dados do fabricante Jacuzzi complementados, calcule-se $0{,}6Q_{BEP}$ e $0{,}8Q_{BEP}$ e $1{,}2\ Q_{BEP}$, derivados do (BEP), com resultados na Tabela 3.

Tabela 3 - Método Stepanoff para melhor aproveitamento dos dados

Viscosidade água Vis (cSt)	1			
Velocidade N (rpm)	3500			
% do η_{BEP}	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	Q_{BEP}	$1,2Q_{BEP}$
Vazão QBEP (m^3/h)	33,6	44,8	56	67,2
Carga H_{BEP} (m)	*	*	35	*
Rendimento η_{BEP} (%)	*	*	72	*

*Não contemplados pelo método

3.2.3 – Complementação do Método Stepanoff - Tabela 4.

Se esses valores da vazão (Q_{BEP}), Tabela 3, forem inseridos no Domínio da função $Q_{(x)}H_{(y)}$, (Equação 35), suas correspondentes imagens, APÊNDICE A, serão as cargas (H_{BEP}), Tabela 4. E se esses mesmos valores da vazão (Q_{BEP}), Tabela 3, forem inseridos no Domínio da função $Q_{(x')}\eta_{(y')}$, (Equação 36) suas correspondentes imagens, APÊNDICE B, serão os rendimentos (η_{BEP}), Tabela 4, completando-se assim os dados iniciais para a água da 1ª. Interpolação.

Tabela 4 – Complementação dos dados Stepanoff para água

Viscosidade água Vis (cSt)	1			
Velocidade N (rpm)	3500			
% do η_{BEP}	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	Q_{BEP}	$1,2Q_{BEP}$
Vazão da água Q_W (m^3/h)	33,60	44,80	56,00	67,20
Carga H_W (m)	44,32	40,50	35.00	27,77
Rendimento ηW (%)	54,51	67,04	72,00	68,27

3.2.4 CONCLUSÁO DO MÉTODO

O processo de modelagem da curva da bomba operando com água para a curva da bomba operando com fluido viscoso está completo. Estão identificados todos os valores de vazão (Q), carga (H) e rendimento (η), tanto do (BEP) como de seus derivados: 0,6(Q, H, η) 0,8(Q, H, η) 1,0(Q, H, η) 1,2(Q, H, η), e com esses valores construiu-se a Tabela 4. Com esses dados, pode-se agora testar o desempenho da bomba operando com liquido de qualquer viscosidade, para tanto basta variar o valor da viscosidade do fluido nesta Tabela.

O que se pretende agora é testar a exatidão do processo, com esses mesmos dados, aplicados ao desempenho de uma bomba operando fluidos com várias viscosidades diferentes, e realizar uma análise e computacional do comportamento de suas curvas características. Escolheu-se então o procedimento de variar, teoricamente, a viscosidade do liquido bombeado em: 20 , 50 , 100 e 150 cSt, mantendo-se porém constantes todos os outros dados referentes à vazão, carga, rendimento, e potência, Tabela 4, e depois fazer duas comparações, uma dos resultados obtidos ,entre as viscosidades, 20 e 50 cSt, 50 e 100cSt, 100 e 150 cSt, e outra entre os dados fornecidos pelo fabricante complementados, Tabela 2, e cada incremento de viscosidade, para observar as variações ocorridas em cada experimento, poder comparar e pesquisar a importância dessas variações, e quais as consequências imediatas causadas por elas.

.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aplicações do Método

4.1.1 Ensaio Teórico 1.

Completado os dados *Stepanoff* referentes a curva característica da bomba operando com água, Tabela 4, pôde-se então modelar, Equações de 31 a 40, o comportamento deste equipamento operando com fluidos de viscosidades diferentes, e construir outra curva característica, Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaio Teórico 1 – Vis = 20cSt.

Viscosidade Vis (cSt)		20		
Velocidade rpm		3500		
% do BEP	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	$1,0Q_{BEP}$	$1,2Q_{BEP}$
Vazão Q_{vis} m^3/h)	33,23	44,31	55,39	66,46
Carga H_{vis} (m)	43,99	40,12	34,61	27,42
Rendimento (%)	49,11	60,40	64,86	61,50
Potência (cv)	7,30	7,21	7,24	7,26

Nesse Ensaio Teórico 1, os dados da Tabela 4, inseridos nas Equações de 31 a 40, do HY-US, geraram a Tabela 5. A variação da viscosidade de agua, para 20 cSt, foi percebida pelo equipamento, APÊNDICE C, e provocou alterações no seu comportamento.

A interpolação dos valores de vazão e carga, da Tabela 5, gerou a Equação 37, com a função:

$$Q(x)H(y) = -0.0000057919x^3 - 0.0059094x^2 + 0.013523x + 46.23 \quad (37)$$

sendo o ponto (0 ; 46,23), coeficiente linear da função, a carga (H).

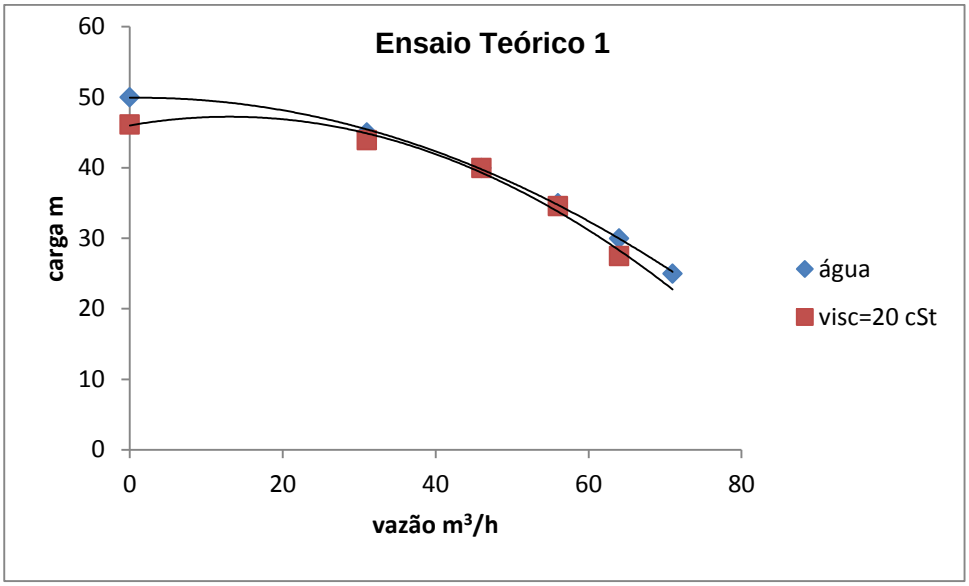


Figura 2 – Curvas gráficas das Tabelas 2 e 5, (Q x H).

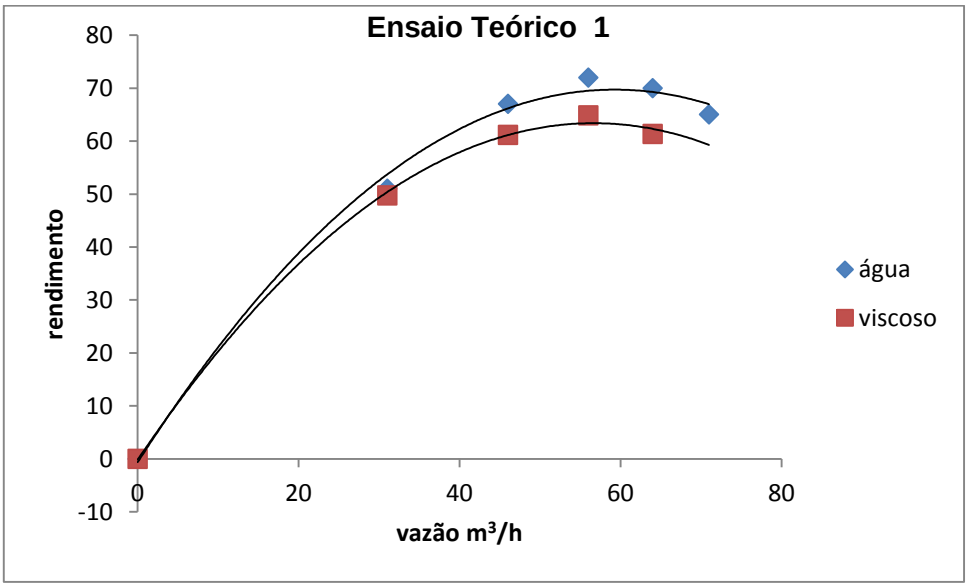


Figura 3 – Curvas gráficas das Tabelas 2 e 5, (Q x η).

Tabela 6 – Variação dos dados das Tabelas 4 e 5

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m^3/h	0,37	0,49	0,61	0,74
Carga (H) m	0,33	0,38	0,40	0,35
Rendimento(η)(%)	5,28	4,00	7,14	6,81
Potencia (P) cv	2,48	2,67	2,76	2,77

Todas as variações de todas as tabelas ocorrem negativamente em virtude do aumento da viscosidade do liquido bombeado.

As variações quando se aumenta a viscosidade do liquido de 1cSt para 20 cSt, estão registradas na Tabela 6, e mostradas na Figura 4. A média das variações das vazões e das cargas 1% foram quase desprezíveis, mas a dos rendimentos chegou a 6% e a das potências 27%. Vazão, carga e rendimento apresentaram variações negativas durante todo o processo.

Quando se aumenta a viscosidade do fluido, provoca-se uma queda inversamente proporcional na vazão, carga e rendimento. Todas as variações foram e serão determinadas pela média aritmética simples.

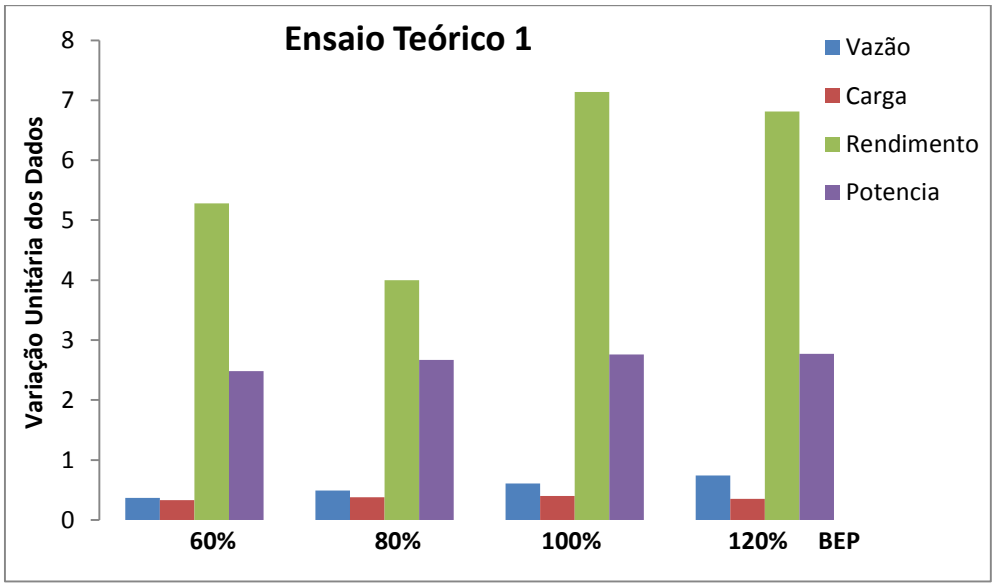


Figura 4 – Gráfico das variações dos dados Tabela 6.

4.2.2. Ensaio Teórico 2.

Tabela 7 – Ensaio Teórico 2 - Vis=50 cSt.

Viscosidade (cSt)		50		
Velocidade (rpm)		3500		
% do BEP	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	$1,0Q_{BEP}$	$1,2Q_{BEP}$
Vazão Q_{vis} (m^3/h)	32,38	43,17	53,97	64,76
Carga H_{vis} (m)	43,22	39,26	33,73	26,61
Rendimento η (%)	44,16	54,32	58,33	55,31
Potência (cv)	7,77	7,66	7,65	7,64

Nesse Ensaio Teórico 2, os dados da Tabela 4, inseridos nas Equações de 31 a 40, do HY-US, geraram os dados a Tabela 7. A variação da viscosidade foi de 1 a 50 cSt, foi percebida pelo equipamento, APÊNDICE D, e provocou uma alteração no seu comportamento.

A interpolação dos valores de vazão e carga, da Tabela 7, gerou a Equação 38.

$$Q(x)H(y) = -0.0000040091x^3 - 0.0061982x^2 + .11855x + 46.00 \quad (38)$$

sendo o ponto (0 ; 46,00), coeficiente linear da função, a carga (H). As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento gráfico dessas curvas representadas em números, nas Tabelas 2 e 7, respectivamente.

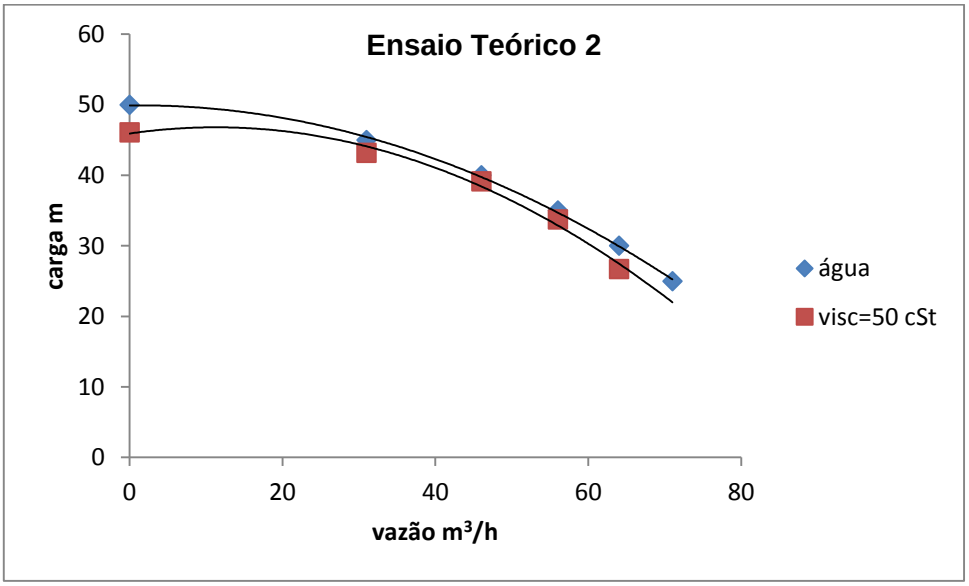


Figura 5 - Curvas gráficas das Tabelas 2 e 7, (Q x H).

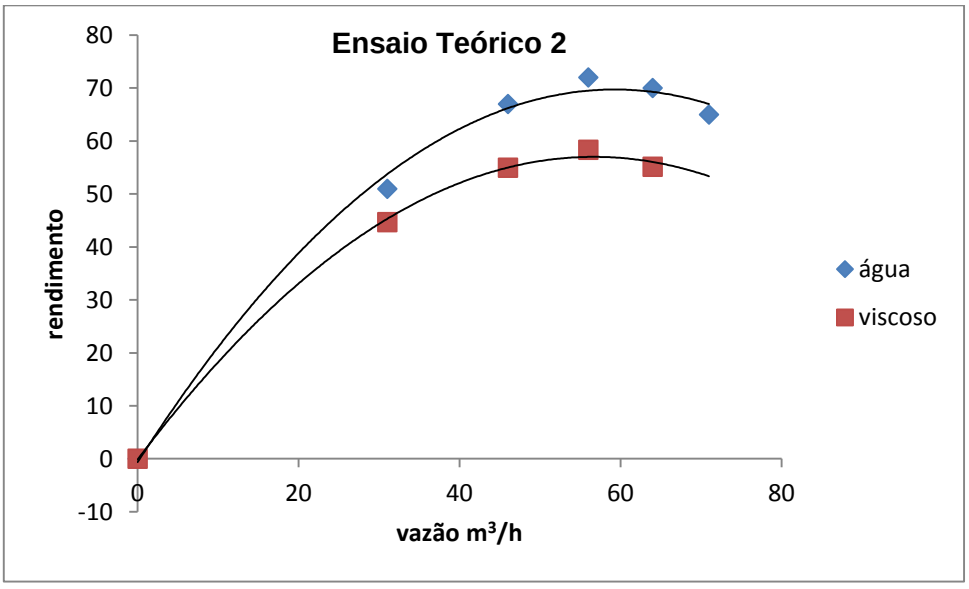


Figura 6 - Curvas gráficas das Tabelas 2 e 7, (Q x η).

Tabela 8 – Variação dos dados das Tabelas 5 e 7

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m^3/h	0,85	1,14	1,39	1,70
Carga (H) m	0,76	0,80	0,88	0,80
Rendimento (ɳ)%	4,82	5,98	6,53	6,23
Potencia (P) cv	0,48	0,44	0,42	0,38

As variações estão registradas na Tabela 8, e mostradas na Figura 7. A média das variações das vazões e das cargas duplicou para 2 %, a dos rendimentos ficou em 8,2%, e a das potências em 4,2%, esta comparação foi entre as viscosidades de 20 e 50 cSt.

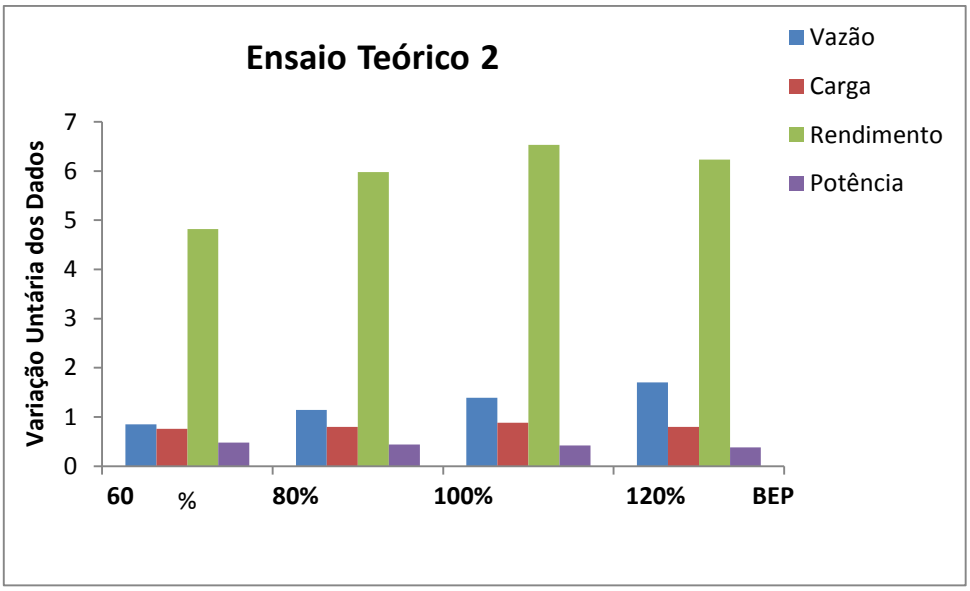


Figura 7 – Gráfico das variações dos Tabela 8.

Nesta comparação usou-se a viscosidade da água com a de 50 cSt. As variações foram registradas na Tabela 9, e mostradas na Figura 8. A média das variações a menor das vazões e das cargas foi de 3,2 %, a dos rendimentos de 17%, e a das potências de 23%.

Tabela 9 – Variação dos dados das Tabelas 4 e 7

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m^3/h	1,22	1,63	2,03	2,44
Carga (H) m	1,10	1,24	1,27	1,16
Rendimento (ɳ)%	10,10	12,12	13,67	13,04
Potência (P) cv	2,00	2,23	2,35	2,39

F

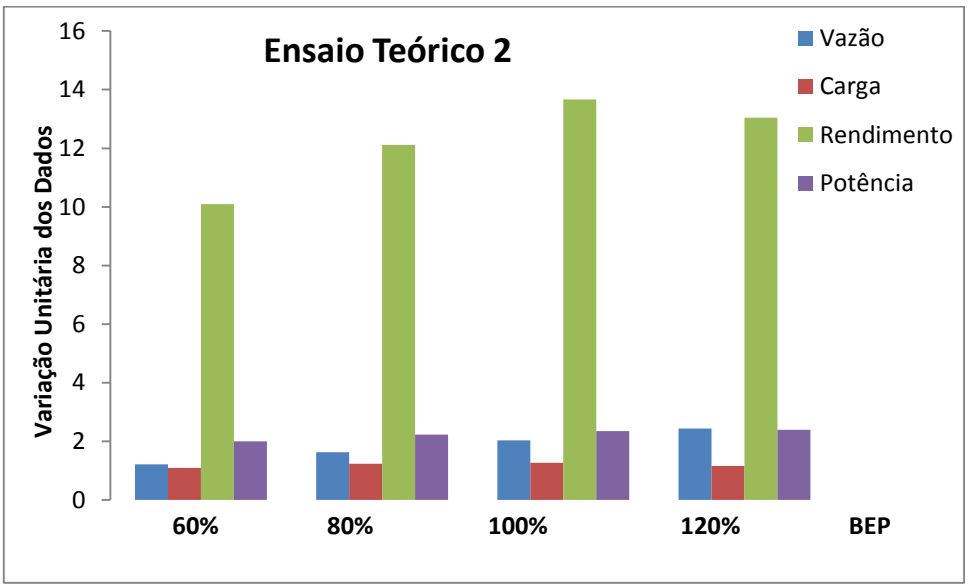


Figura 8 – Gráfico das variações dos dados Tabela 9.

4.2.3. Ensaio Teórico 3.

Tabela 10 – Ensaio Teórico 3 – Vis = 100 cSt.

Viscosidade (cSt)		100		
Velocidade (rpm)		3500		
% do BEP	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	$1,0Q_{BEP}$	$1,2Q_{BEP}$
Vazão Q_{vis} (m^3/h)	31,23	41,64	52,06	62,47
Carga H_{vis} (m)	42,19	38,09	32,53	25,53
Rendimento η(%)	39,11	48,10	51,66	48,98
Potência (cv)	8,26	8,08	8,04	7,98

Nesse Ensaio Teórico 3, os dados da Tabela 4, inseridos nas Equações de 31 a 40, do HY-US, geraram os dados da Tabela 10. A variação da viscosidade de 1 a 100 cSt, foi percebida pelo equipamento, APÊNDICE E, e continuou provocando uma queda no seu desempenho.

À interpolação dos valores de vazão e carga, da Tabela 10, gerou a Equação 39.

$$Q(x)H(y) = -0.000001377X^3 - 0.0068805X^2 + 0.10201X + 45.67 \quad (39)$$

sendo o ponto (0;45,67), coeficiente linear da função, a carga (H).

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento gráfico das Tabelas 2 e 10.

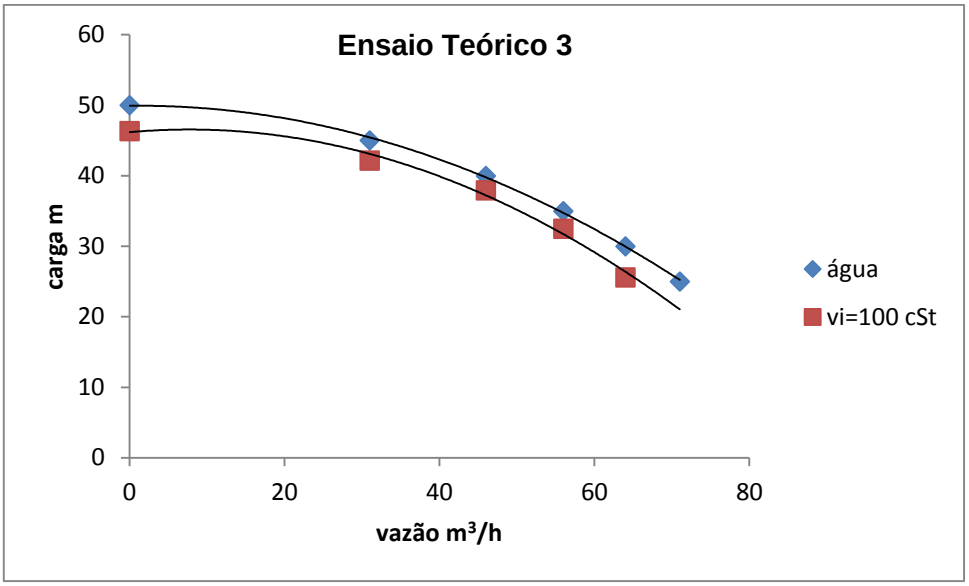


Figura 9 - Curvas gráficas das Tabelas 2 e 10-(Q x H).

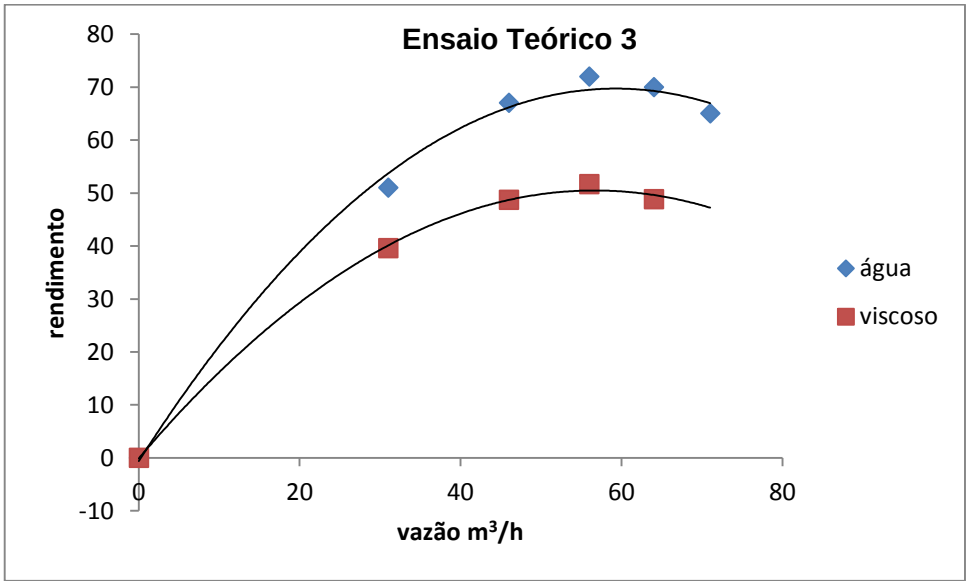


Figura 10 - Curvas gráficas das Tabelas 2 e 10- (Q x ŋ).

Tabela 11 = Variação dos dados das Tabelas 7 e 10

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m3/h	1,18	1,53	1,97	2,29
Carga (H) m	1,04	1,11	1,23	1,09
Rendimento(ŋ)%	4,93	6,12	6,67	6,37
Potência (P) cv	0,51	0,44	0,39	0,34

.

A Tabela 11 registra, e a Figura 11 mostra a variação dos dados das Tabelas 7 e 10, numa média nas vazões e das cargas de 3%, a do rendimento

foi para 8,4% e a da potência subiu para 3,9%, numa comparação de viscosidade entre 50 e 100 cSt.

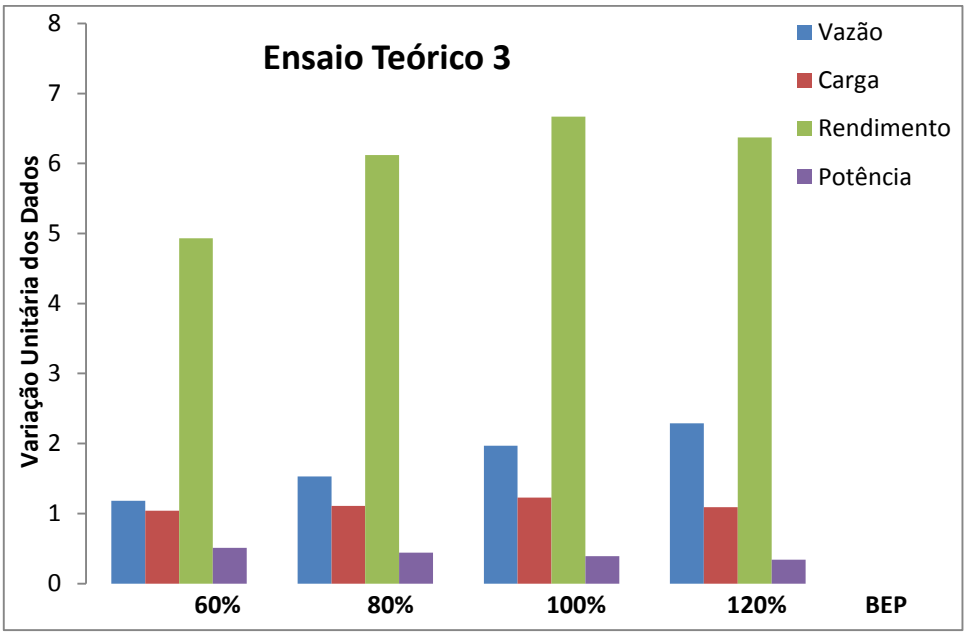


Figura 11- Gráfico das variações dos dados Tabela 11.

Tabela 12 – Variação dos dados das Tabelas 4 e 10.

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m^3/h	2,40	3,16	4,00	4,73
Carga (H) m	2,14	2,35	2,50	2,25
Rendimento (ɳ)%	15,03	18,64	20,34	19,40
Potência (P) cv	1,44	1,74	1,96	2,05

Nesta comparação usou-se a viscosidade da água com a de 100 cSt. A média, das variações registradas na Tabela 12, e mostradas na Figura 12, foi para as vazões foi de 6,3% e para as cargas de 6,6%, a dos rendimentos subiu para 24,6%, e a das potências para 19%.

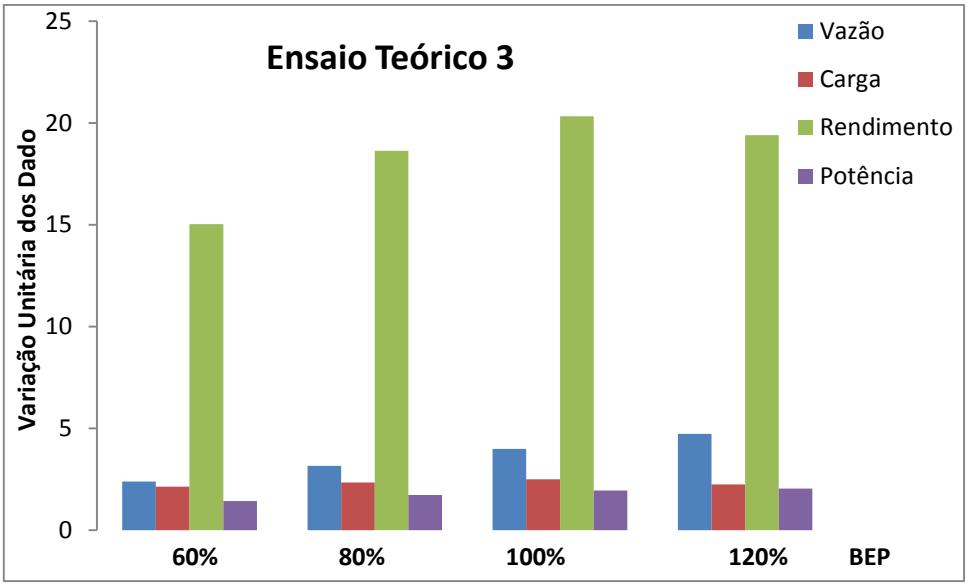


Figura 12 – Gráfico das variações dos dados Tabela 12

4.2.4. Ensaio Teórico 4.

Tabela 13- Ensaio Teórico 4 – Vis = 150 cSt

Viscosidade Vis (cSt)		150		
Velocidade rpm		3500		
% do BEP	$0,6Q_{BEP}$	$0,8Q_{BEP}$	$1,0Q_{BEP}$	$1,2Q_{BE}$
Vazão Q_{vis} (m^3/h)	30,32	40,43	50,54	60,65
Carga H_{vis} (m)	41,37	37,16	31,59	24,66
Rendimento (%)	35,62	43,81	47,06	44,62
Potência (cv)	8,63	8,41	8,32	8,22

No Ensaio Teórico 4, os dados da Tabela 4, foram calculados com as Equações de 31 a 40, e geraram a Tabela 13. A variação da viscosidade, Apêndice H, foi de 1 a 150 cSt.

À interpolação dos valores de vazão e carga, da Tabela 13, gerou a Equação 40.

$$Q(x)H(y) = -0.0066528x^2 + 0.054268x + 45.84 \quad (40)$$

Sendo o ponto (0 ; 45,84), coeficiente linear da função, a carga (H).

As Figuras 13 e 14 mostram o comportamento gráfico das Tabelas 2 e 13, em relação a vazão e carga, e vazão e rendimento, respectivamente.

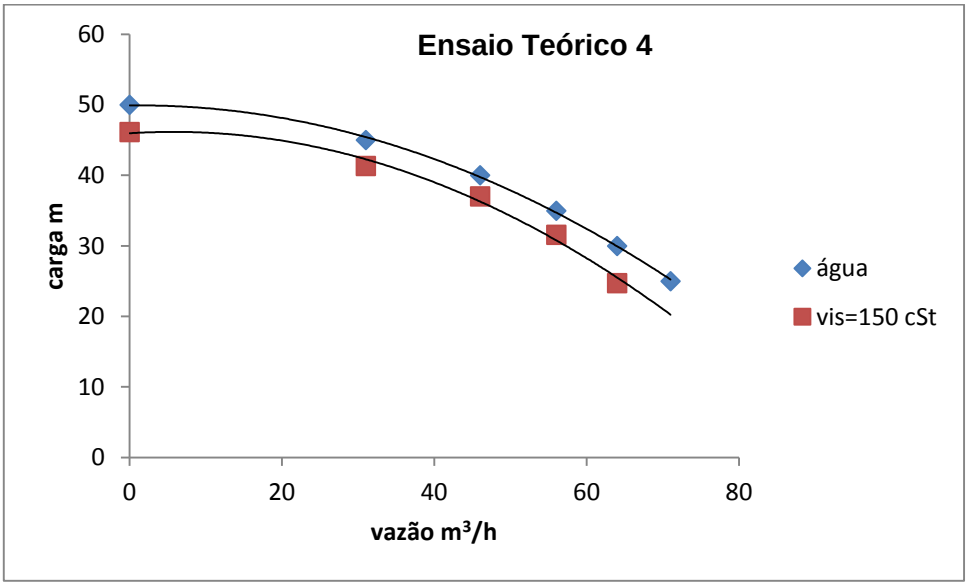


Figura 13 – Curvas gráficas das Tabelas 2 e 13, (Q x H).

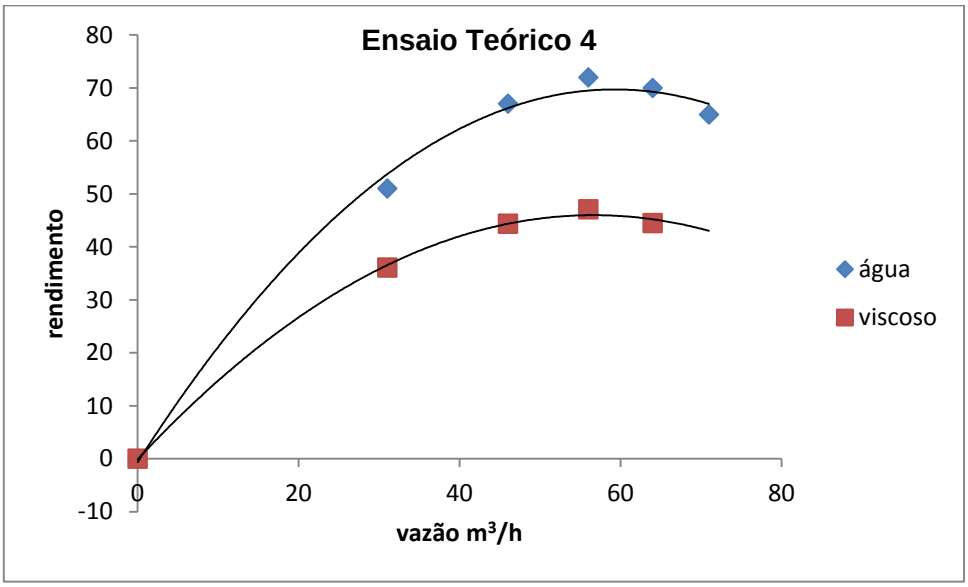


Figura14 – Curvas gráficas das Tabelas 2 e 13, (Q x ɳ)

Tabela 14 – Variação dos dados das Tabelas 10 e 13

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m³/h	0,88	1,21	1,51	1,82
Carga (H) m	0,82	0,90	0,94	0,86
Rendimento ɳ %	3,41	4,22	4,60	4,39
Potência (P) cv	0,57	0,33	0,28	0,24

A Tabela 14 registra, e a Figura 15 mostras, a variação dos dados das Tabelas 10 e 13, com uma variação média das vazões de 2,4%, e das cargas de 2,5%, a variação do rendimento caiu para 5,7% e a da potência subiu para 6,4%, para uma variação entre a viscosidade de100 e 150cSt.

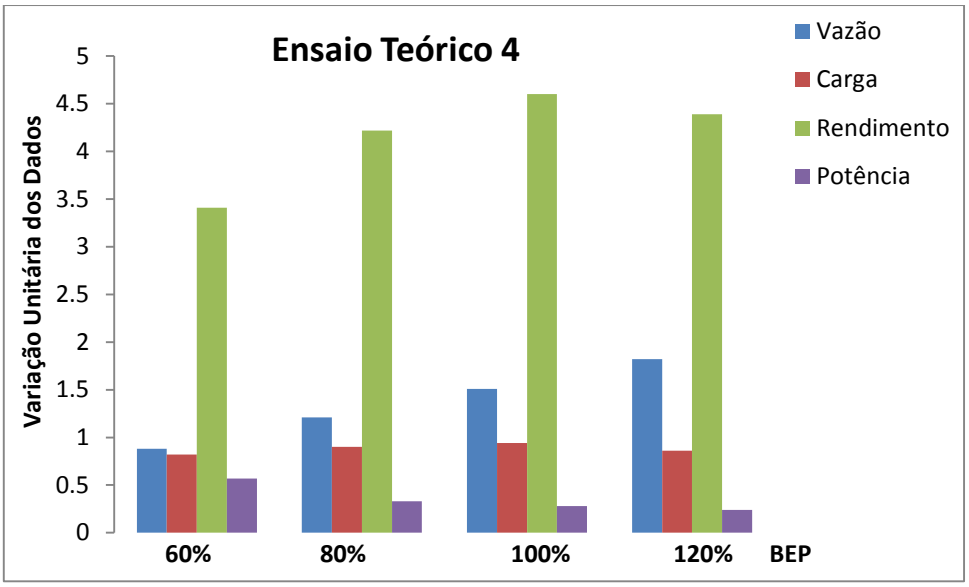


Figura 15 – Gráfico das variações dos dados Tabela 14.

Tabela 15 – Variação dos dados das Tabelas 4 e 13

%BEP	60%	80%	100%	120%
Vazão(Q) m^3/h	3,28	4,37	5,46	6,55
Carga (H) m	2,96	3,35	3,41	3,11
Rendimento η %	18,41	21,86	24,94	23,80
Potência (P) cv	1,1	1,46	1,68	1,71

Nesta comparação usou-se a viscosidade da água com a de 100 cSt. A média das variações, registradas na Tabela 15, e mostradas na Figura 16, foi para as vazões foi de 8,78% e para as cargas de 9%, a dos rendimentos subiu para 31,3%, e a das potências caiu para 16%.

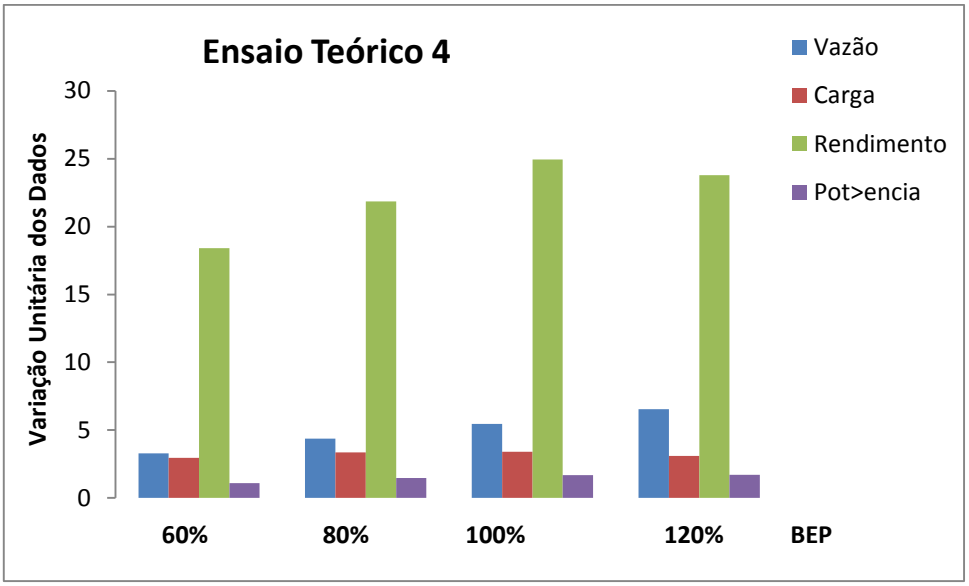


Figura 16 - Gráfico das variações dos dados Tabela 15.

Tabela 16 – Médias das variações entre as viscosidades

Viscosidade	20 e 50 cSt	50 e 100 cSt	100 e 150 cSt
Vazão	1,27	1,74	1,35
Carga	0,82	1,33	0,88
Potência	0,56	1,51	0,35
Rendimento	6,00	5,17	4,22

Nesta análise, Tabela 16, os dados utilizados foram obtidos da somatória das medias das variações da vazão, carga, rendimento e potência, que aconteceram para 20 e 50, 50 e 100, 100 e 150 cSt. A média final foi de 2% para as vazões, para as cargas de 1,75%, para rendimento de 6% e para a potência de 4,4%. Conforme mostra a Figura 17.

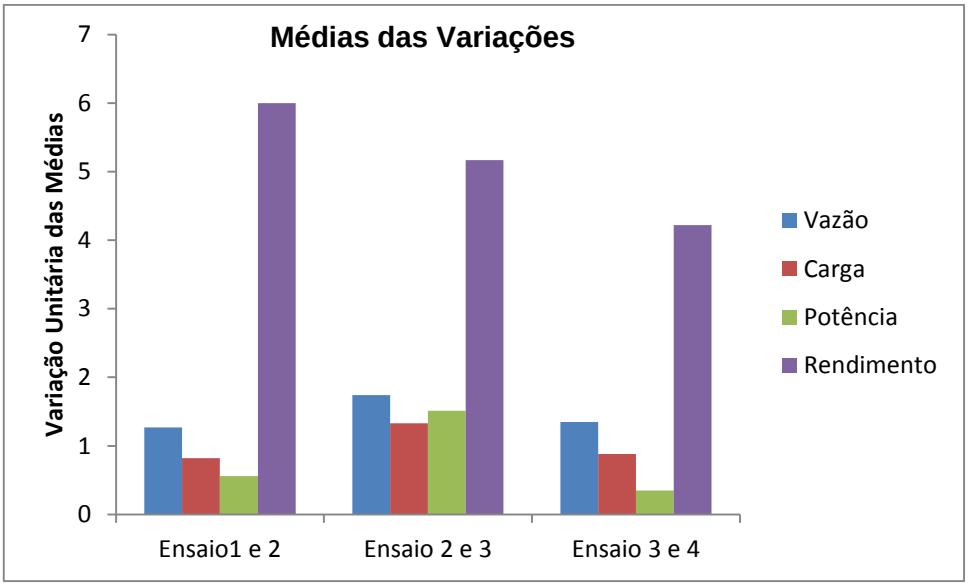


Figura 17 – Médias das variações entre as viscosidades.

Tabela 17 – Médias das variações entre a água e as viscosidades

Viscosidade	20 cSt	50 cSt	100 cSt	150 cSt
Vazão	0,55	1,83	3,57	4,91
Carga	0,35	1,19	2,45	3,20
Potência	0,97	1,62	2,24	2,70
Rendimento	6,57	12,33	19,40	22,25

Nesta análise, Tabela 17, os dados utilizados foram obtidos da somatória das medias das variações da vazão, carga, rendimento e potência, que aconteceram para água e 20, água e 50, água e 100 e água e 150 cSt, e registraram 4,4% para as vazões, 4,4% para as cargas, 23,8% para os rendimentos e 18,7% para as potências, conforme mostra a Figura 18.

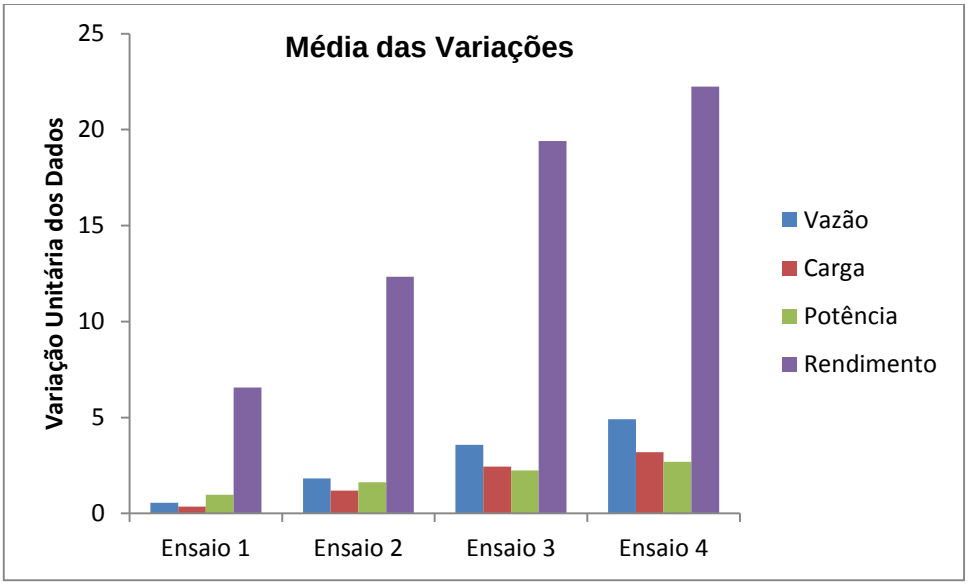


Figura 18 – Médias das variações entre água e as viscosidades

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - CONCLUSÃO

O cálculo da curva característica de um líquido viscoso que pode ser transportado por uma bomba, conhecida a curva característica da mesma bomba para transporte de água, feito com os dados disponíveis, através da carta de correção (ANEXO A), ou através das equações 31 a 38, do HI-US, ficam incompletos porque ainda que identificados os fatores de correção da vazão C_q e carga C_h e rendimento C_η , eles só serão aplicados no ponto onde encontra-se o maior rendimento para aquele equipamento $\eta_{BEP\text{-}w}$. Isto ocorre porque mesmo calculado os valores derivados do (BEP) correspondente a $0.6QBEP_{\text{-}w}$ e 0.8QBEPw e $1.2Q_{BEP\text{-}W,}$ são desconhecidos os valores das cargas: $0{,}6H_{BEP\text{-}w}$ e $0{,}8H_{BEp\text{-}w}$ e $1{,}2H_{BEP\text{-}w}$, não lineares, respectivos àquelas vazões. A consequência imediata disso, é a impossibilidade de se calcular os rendimentos, Equação 40, respectivos àquelas cargas $0{,}6\eta_{BEP}$ e $0{,}8\eta_{BEP}$ e $1{,}2\eta_{BEP}$, tornando impossível a construção da curva característica do equipamento. O que se fez neste trabalho, foi determinar a função Q(x') H(y'), Equação 35 que os valores de vazão e carga da Tabela 2, traçam quando dispersos num plano cartesiano, usando como ferramenta o (PIL). Inseriu-se nessa equação da vazão em função da carga, como xis, os valores das vazões(Q) da Tabela de Stepanoff, e calculou-se o ípsilon correspondente, que será a carga(H). Repetiu-se o mesmo método, Equação 36, na equação da vazão em função do rendimento, para o cálculo dos rendimentos.

O método está concluído aqui, assim sendo, um estudo da variação do comportamento das vazões, cargas rendimentos e potência, do equipamento, foi feita em números em tabelas, e representados em gráficos em figuras. A variação da viscosidade de 1 a 150 cSt, propiciou que se fizesse uma análise do comportamento da bomba, e um estudo computacional da perturbação que essa variação causou na curva de desempenho dela, a medida que se aumentava a viscosidade do fluido. Na Tabela 4, encontram-se todos os dados, referentes à vazão, carga, rendimento e potência, que o usuário necessita saber para conhecer o comportamento, determinar a capacidade, analisar a eficiência e compreender as variações do equipamento por ele escolhido, e definir se esse é o que mais se adapta às suas necessidades.

5.2 SUGESTÕES

1) Sugere-se validar o método experimentalmente para esses valores, e para valores fora do intervalo sugerido pelo HIS-USA.

2) Promover um estudo para identificação das funções de construção, das cartas de correção, para valores menores que 20m^3/h, através de interpolação.

3) Verificar se os Polinômios Interpoladores de Lagrange, Newton / Gregori constroem as mesmas funções, quando abastecidos com os mesmos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ÇENGEL, Y., CIMBALA, J., ***Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações***. São Paulo, Mc Graw-Hill, 2011. Pag18.

DELMÉE, G.J., ***Manual de medição de vazão***. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 1982.

GOMIDE ,1997, **Operações com Fluidos**, Edição do autor, pág. 34

GARCIA, D.V. – Introdução a Computação – MatLab, Apostila, 2009.

GULICH, J.F., ***"Effect of Reynolds-number and surface roughness on the efficiency of Centrifugal Pumps"*** Sulzer Pumps, Winterthur and Escole Polytechnique, Lausanne, Switzerland. ASMEJournal of Fluids Engineering , 1999.

Hydraulic Institute *"**Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary & Reciprocating Pumps."** 14th Edition (1983).*

Jacuzzi, 2015 – **Catálogo de Bombas fornecido pelo fabricante**, pag 34.

Li, W. G., **"*Pumping Highly Viscous Fluid with Centrifugal Pumps,*"** Part I, World Pumps, pp 30-34, August 1999.

MACINTYRE, A, J,1997.**Bombas e instalações de bombeamento**, Editora LCT, segunda edição,pag153.

MATTOS e DE FALCOo, 1998**, Bombas Industriais**, Editora Interciência, Segunda Edição, pág.155

CHAPRA, STEVEN. C. **Métodos Numéricos Aplicados com MatLab para Engenheiros e Cientistas**, 2012, 3ª. Edição, Ed. MacGraw Hill, Pag 416.

MORAES, JR., D., MORAES, M.S., ***Laboratório de Operações Unitárias I*** - Santos, 2011, Edição dos Autores.

ROTAWA, O. 2012, **Aplicações Práticas em Escoamento de Fluidos**, Editora LTC, pág 282.

*STEPANOFFf,J,A,1955**, " Centrifugal and Axial flow Pumps",** Second edition Hydraulic Institute Standart – USA (1955),*

APÊNDICES

APÊNDICE A – Interpolação por Lagrange – Vazão(Q) e Carga(H)

1) Os valores das vazões e cargas, Tabela 2, foram integrados ao (PIL), equações 19 a 23, pelo programa “LagrangeInterpolador.mat”, criado para auxiliar em todos os cálculos efetuados pelo Polinômio Interpolador.

Dê o termo x(0) =0

Dê o termo y(0) =50

Dê o termo x(1) =31

Dê o termo y(1) =45

Dê o termo x(2) =46

Dê o termo y(2) =40

Dê o termo x(3) =56

Dê o termo y(3) =35

Dê o termo x(4) =64

Dê o termo y(4) =30

Dê o termo x(5) =71

Dê o termo y(5) =25

2) Que retornou a função interpolada:

$$\mathbf{Q(x)H(y) = 0.000000007288x^5 - 0.00000075069x^4 + 0.000039518x3 + + 0.00095644x^2 - 0.13733x + 50.0}$$

3) Comando Polyval - Recebe x = vazão(Q) e retorna y = carga(H),Tabela 4.

p = [0.000000007288 -0.00000075069 0.000039518 0.00095644 -0.13733 50.0];

>> a = polyval(p,33,60) a = 44,32

>> b = polyval(p,44,80) b = 40,50

>> c = polyval(p,56,00) c = 35,00

>> d = polyval(p,67,20) d = 27,77

APÊNDICE B - Interpolação por Lagrange - Vazão(Q) e Rendimento(ɳ)

Dê o termo x(0) =0

Dê o termo y(0) =0

Dê o termo x(1) =31

Dê o termo y(1) =51

Dê o termo x(2) =46

Dê o termo y(2) =68

Dê o termo x(3) =56

Dê o termo y(3) =72

Dê o termo x(4) =64

Dê o termo y(4) =70

Dê o termo x(5) =71

Dê o termo y(5) =66

2) Que retornou a função interpolada:

$Q(x')\eta(y') = 0.00000025277x^5 - 0.000047924x^4 + 0.003028x^3 - 0.088367x^2 + 2.6689x + 0.0$

3) Comando Polyval – Recebe x = vazão(Q) e retorna y = rendimento(ɳ)

>> p = [0.00000025277 -0.000047924 + 0.003028 -0.088367 2.6689 0.0];

>> a =polyval(p, 33.60) a = 54,51

>> b =polyval(p,44,80) b = 67,04

>> c = polyval(p,35,00) c = 72,00

>> d =polyval(p,67,20) d = 68,27

APÊNDICE C

```
Dê o valor da vazão no bep em m3/h:                56.00
Dê o valor da carga no bep em metros:               35.00
Dê o valor do rendimento em bep em 0.00;             0.72
Dê o valor da carga no 60bep em metros:            44.32
Dê o valor do rendimento em 60bep  0.00;             0.5451
Dê o valor da carga no 80bep em metros:            40.50
Dê o valor do rendimento  em 80bepem 0.00;         0.6704
Dê o valor da carga no 120bep em metros:           27.77
Dê o valor da rendimento em 120bep em 0.00;        0.6827
Dê o valor  da rotação em rpm:              3500
Dê o valor da viscosidade em cSt:            20
Dissertação Hidraulic (m3/h) ======
----------------agua --------------------
Qw       = 56.00000000
Hw       = 35.00000000
nw       = 0.72000000
Qw60     = 33.60000000
Hw60     = 44.32000000
nw60     = 0.54510000
Qw80     = 44.80000000
Hw80     = 40.50000000
nw80     = 0.67040000
Qw120    = 67.20000000
Hw120    = 27.77000000
nw120    = 0.68270000
----------------viscoso--------------------
Qvis     = 55.39092382
Hvis     = 34.61932738
nvis     = 64.86900242
Qvis60   = 33.23455429
Hvis60   = 43.99137789
nvis60   = 49.11124058
Qvis80   = 44.31273905
Hvis80   = 40.12738863
nvis80   = 60.40024892
Qvis120= 66.46910858
Hvis120= 27.42370565
nvis120 = 61.50842771
----------    --Potencia--------------------
Pvis     = 7.24930647
Pvis60   = 7.30050603
Pvis80   = 7.21950149
Pvis120 = 7.26754639
-----------fatores de correção--------------
Ch       =  0.98912364
Ch60     = 0.99258524
Ch80     = 0.99079972
Ch120    = 0.98752991
Cn       = 0.90095837
Cq       = 0.98912364
B        = 2.64798593
```

APÊNDICE D

Dê o valor da vazão no bep em m^3/h: 56.00
Dê o valor da carga no bep em metros: 35.00
Dê o valor do rendimento em bep em 0.00; 0.7200
Dê o valor da carga no 60bep em metros: 44.32
Dê o valor do rendimento em 60bep 0.00; 0.5451
Dê o valor da carga no 80bep em metros: 40.50
Dê o valor do rendimento em 80bepem 0.00; 0.6704
Dê o valor da carga no 120bep em metros: 27.77
Dê o valor da rendimento em 120bep em 0.00; 0.6827
Dê o valor da rotação em rpm: 3500
Dê o valor da viscosidade em cSt: 50
========= Institute Hidraulic (m^3/h) ======
----------agua ----------
Qw = 56.00000000
Hw = 35.00000000
nw = 0.72000000
Qw60 = 33.60000000
Hw60 = 44.32000000
nw60 = 0.54510000
Qw80 = 44.80000000
Hw80 = 40.50000000
nw80 = 0.67040000
Qw120 = 67.20000000
Hw120 = 27.77000000
nw120 = 0.68270000
----------viscoso----------
Qvis = 53.97438272
Hvis = 33.73398920
nvis = 58.33960302
Qvis60 = 32.38462963
Hvis60 = 43.22709464
nvis60 = 44.16794112
Qvis80 = 43.17950618
Hvis80 = 39.26079865
nvis80 = 54.32065259
Qvis120 = 64.76925926
Hvis120 = 26.61832171
nvis120 = 55.31728748
---------- --Potencia----------
Pvis = 7.65364583
Pvis60 = 7.77256337
Pvis80 = 7.65329172
Pvis120 = 7.64302305
----------fatores de correção----------
Ch = 0.96382826
Ch60 = 0.97534058
Ch80 = 0.96940244
Ch120 = 0.95852797
Cn = 0.81027226
Cq = 0.96382826
B = 4.18683338

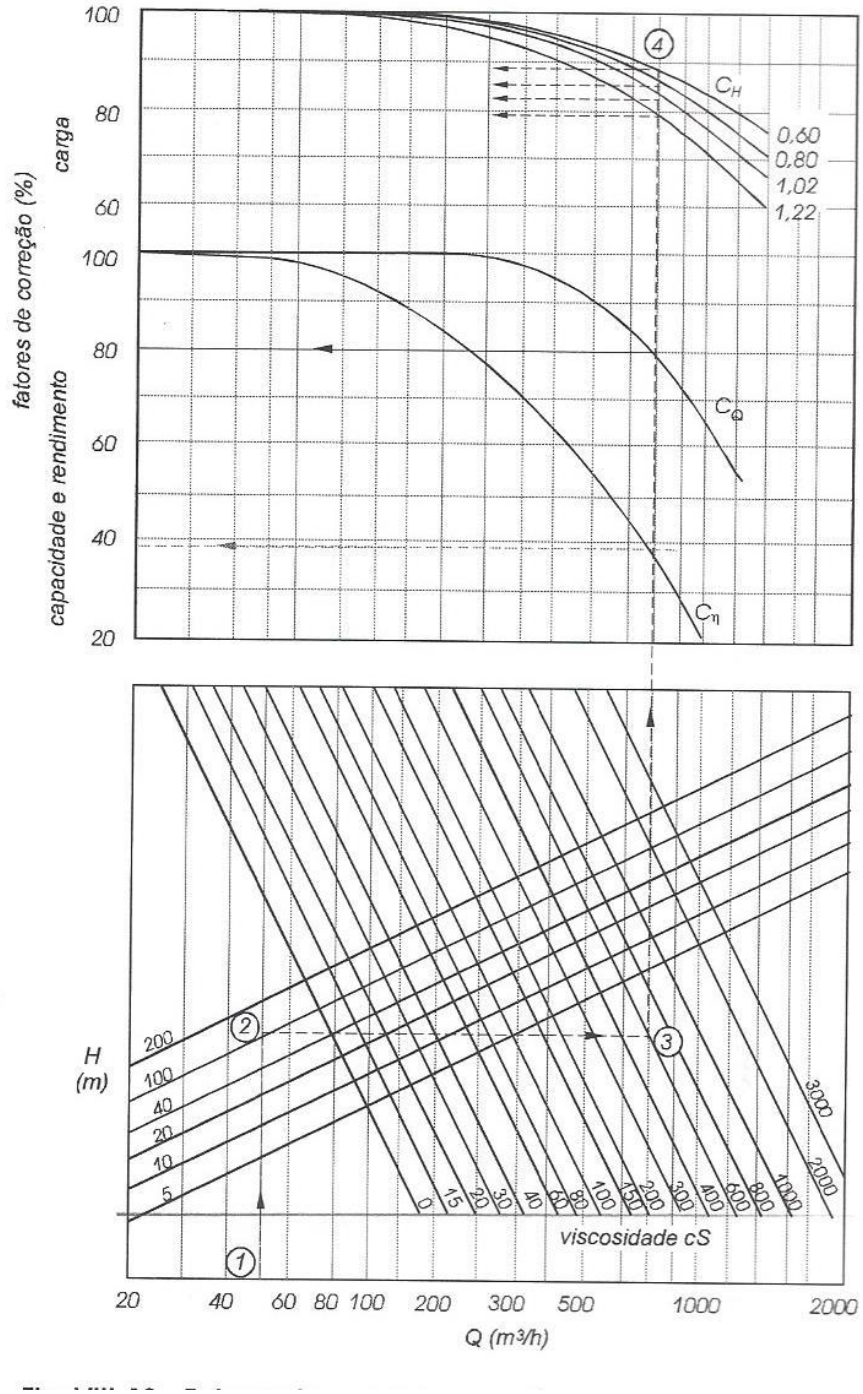
APÊNDICE E

```
 Dê o valor da vazão no bep em m3/h:              56.00
 Dê o valor da carga no bep em metros:            35.00
 Dê o valor do rendimento em bep em 0.00;          0.7200
 Dê o valor da carga no 60bep em metros:          44.32
 Dê o valor do rendimento em 60bep  0.00;          0.5451
 Dê o valor da carga no 80bep em metros:          40.50
 Dê o valor do rendimento  em 80bepem 0.00;       0.6704
 Dê o valor da carga no 120bep em metros:         27.77
 Dê o valor da rendimento em 120bep em 0.00;      0.6827
 Dê o valor  da rotação em rpm:             3500
 Dê o valor da viscosidade em cSt:           100
========= Institute Hidraulic (m3/h) ======
-----------------agua ---------------------
 Qw       = 56.00000000
 Hw       = 35.00000000
 nw       = 0.72000000
 Qw60     = 33.60000000
 Hw60     = 44.32000000
 nw60     = 0.54510000
 Qw80     = 44.80000000
 Hw80     = 40.50000000
 nw80     = 0.67040000
 Qw120    = 67.20000000
 Hw120    = 27.77000000
 nw120    = 0.68270000
----------------viscoso--------------------
 Qvis     = 52.06168539
 Hvis     = 32.53855337
 nvis     = 51.66445580
 Qvis60   = 31.23701123
 Hvis60   = 42.19511432
 nvis60   = 39.11429841
 Qvis80   = 41.64934831
 Hvis80   = 38.09067774
 nvis80   = 48.10534885
 Qvis120 = 62.47402247
 Hvis120 = 25.53084481
 nvis120 = 48.98794997
----------    --Potencia-------------------
 Pvis     = 8.04083314
 Pvis60   = 8.26366194
 Pvis80   = 8.08741980
 Pvis120  = 7.98457555
-----------fatores de correção--------------
 Ch       = 0.92967295
 Ch60     = 0.95205583
 Ch80     = 0.94051056
 Ch120    = 0.91936784
 Cn       = 0.71756189
 Cq       = 0.92967295
 B        = 5.92107655
```

APÊNDICE F

```
 Dê o valor da vazão no bep em m3/h:              56.00
 Dê o valor da carga no bep em metros:             35.00
 Dê o valor do rendimento em bep em 0.00;          0.7200
 Dê o valor da carga no 60bep em metros:          44.32
 Dê o valor do rendimento em 60bep  0.00;          0.5451
 Dê o valor da carga no 80bep em metros:          40.50
 Dê o valor do rendimento  em 80bepem 0.00;     0.6704
 Dê o valor da carga no 120bep em metros:       27.77
 Dê o valor da rendimento em 120bep em 0.00;  0.6827
 Dê o valor  da rotação em rpm:              3500
 Dê o valor da viscosidade em cSt:            150
========= Institute Hidraulic (m3/h) ======
-----------------agua ---------------------
 Qw        = 56.00000000
 Hw        = 35.00000000
 nw        = 0.72000000
 Qw60     = 33.60000000
 Hw60     = 44.32000000
 nw60      = 0.54510000
 Qw80     = 44.80000000
 Hw80     = 40.50000000
 nw80      = 0.67040000
 Qw120   = 67.20000000
 Hw120   = 27.77000000
 nw120    = 0.68270000
-----------------viscoso--------------------
 Qvis       = 50.54660970
 Hvis       = 31.59163106
 nvis        = 47.06009970
 Qvis60    = 30.32796582
 Hvis60    = 41.37766753
 nvis60     = 35.62841715
 Qvis80    = 40.43728776
 Hvis80    = 37.16380776
 nvis80     = 43.81818172
 Qvis120 = 60.65593164
 Hvis120 = 24.66943837
 nvis120  = 44.62212509
----------     --Potencia-------------------
 Pvis        = 8.32123300
 Pvis60     = 8.63752275
 Pvis80     = 8.41054844
 Pvis120   = 8.22353861
-----------fatores de correção--------------
 Ch        = 0.90261803
 Ch60     = 0.93361163
 Ch80     = 0.91762488
 Ch120   = 0.88834852
 Cn        = 0.65361250
 Cq        = 0.90261803
 B         = 7.25180814
```

ANEXO A



Extraído da apostila, Curvas Características"
Moraes, Moraes, 2014.

ANEXO B

Com os dados da curva característica, e de posse da carta de correção, ANEXO A, o autor, protocola o seguinte procedimento: usando o ponto de melhor eficiência η_{BEP-} da água, por sua vazão correspondente (Q_W), por sua carga correspondente (H_W)), e usando a viscosidade V_w do fluido:

a) Entrar nos “ábacos” ((carta de correção, Figura 1), no ponto de vazão Q_W),

b) Subir verticalmente até o ponto de carga H_W correspondente,

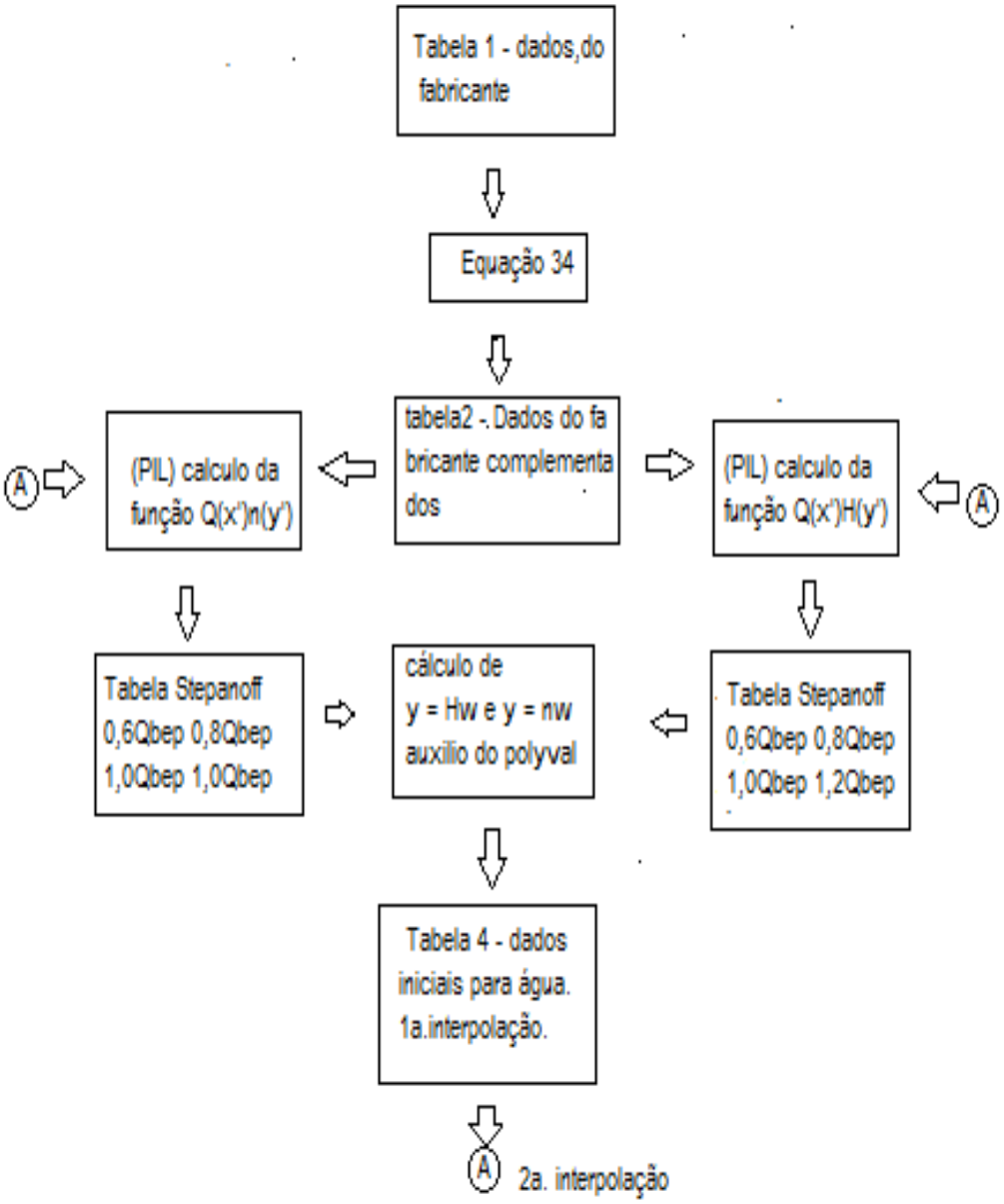
c) Seguir horizontalmente até a viscosidade (V), especifica do liquido.

d) Para finalmente subir verticalmente até interseccionar as curvas

correspondentes aos coeficientes de:

e) correção da vazão C_Q, único, que determina a vazão do fluido viscoso em 0.6Q 0.8Q 1.0Q e 1.2Q

f) correção das cargas, um para cada porcentagem 0.6 C_H , 0.8 C_H ,1.0 C_H e1.2 C_H

g) correção do rendimento C_η, único.

ANEXO C – Fluxograma explicativo do Método.