

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

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM PARALELO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO

por

Wagner Augusto Ferreira Pereira

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

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Pereira, Wagner Augusto Ferreira
Análise do comportamento de uma associação de
bombas centrífugas em paralelo de uma torre de
resfriamento. / Wagner Augusto Ferreira Pereira. --
2021.
25 f.
Orientador: Sérgio Luiz Frey.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Bombas centrífugas. 2. Associação em paralelo.
3. Torre de resfriamento. I. Frey, Sérgio Luiz,
orient. II. Título.

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

Wagner Augusto Ferreira Pereira

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM PARALELO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO

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

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Sérgio Luiz Frey

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Adriane Prisco Petry

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Volnei Borges

Porto Alegre, novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais João Carlos e Maria de Lourdes,
À minha irmã Mariana Louise,
Por todo apoio, suporte e incentivo ao longo de todas as etapas curso.

À minha namorada Thauany Brasil,
Por todo o apoio, suporte e compreensão.

Ao professor Sérgio Frey pela orientação e disponibilidade para a realização deste trabalho.

À Braskem pela oportunidade de aprendizado ao longo do meu estágio
Principalmente ao Jeferson Diefenthaler, Róger Hackenhaar e Valtermir Zandoná.

Pereira, Wagner Augusto Ferreira. **Análise do comportamento de uma associação de bombas centrífugas em paralelo de uma torre de resfriamento**. 2021. 25p Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento de uma associação de 9 bombas centrífugas em paralelo que transportam água resfriada de uma torre de resfriamento de uma planta petroquímica para ser utilizada em processos de troca térmica.

Será realizado uma modelagem do atual sistema de bombeamento, sendo estimado o tempo de payback dessa instalação, assim como a análise da variação de potência de acionamento e a vazão total de água resfriada devido a possíveis indisponibilidades de bombas associadas.

PALAVRAS-CHAVE: bombas centrífugas, torre de resfriamento, associação em paralelo

Pereira, Wagner Augusto Ferreira. **Analysis of the behavior of an association of centrifugal pumps in parallel in a cooling tower.** 2021. 25p. Mechanical Engineering End Of course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The present work presents a study on the behavior of an association of 9 centrifugal pumps in parallel that transport chilled water from a cooling tower of a petrochemical plant to be used in heat exchange processes.

A modeling of the current pumping system will be carried out, estimating the payback time of this installation, as well as the analysis of the variation in drive power and the total chilled water flow due to possible unavailability of associated pumps.

KEYWORDS: centrifugal pumps, cooling tower, parallel association

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Área	[m ²]
D	Diâmetro	[m]
f	Fator de atrito	[adimensional]
g	Gravidade	[m ² s ⁻¹]
H	Altura manométrica	[m]
I	Investimento inicial	[reais]
i	Taxa mínima de atratividade	[reais]
J	Período	[meses]
K'	Característica do sistema	[m ⁻⁵ s ⁻²]
L	Comprimento	[m]
\dot{m}	Vazão mássica do gás	[kg s ⁻¹]
n	Rotação	[rpm]
p	Pressão	[N m ⁻²]
P	Potência	[W]
R	Receita	[reais]
Q	Vazão	[m ³ h]
q	Calor	[J kg ⁻¹]
u	Velocidade tangencial	[m s ⁻¹]
V	Velocidade	[m s ⁻¹]
v	Volume específico	[m ³ kg ⁻¹]
w	Velocidade relativa	[m s ⁻¹]
Y	Salto energético	[J kg ⁻¹]
Z	Cota	[m]

Símbolos gregos

ρ	Massa específica do sólido	[kg m ⁻³]
σ	Coeficiente de thoma	[adimensional]
η	Rendimento	[adimensional]
φ	Diâmetro	[m]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
2.1 BOMBAS ESTUDADAS	3
2.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS.....	3
2.3 FATORES QUE MODIFICAM AS CURVAS CARACTERÍSTICAS	3
2.3.1 EFEITO DA MUDANÇA DE ROTAÇÃO NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	4
2.3.2 EFEITO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS	4
2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA	4
2.4 PONTO DE TRABALHO.....	5
2.4.1 VARIAÇÃO DO PONTO DE TRABALHO	5
3. CASO DE ESTUDO	5
3.1 METODOLOGIA.....	5
3.2 TRIÂNGULO DE VELOCIDADES	6
3.3 SALTO ENERGÉTICO	6
3.4 VAZÃO	7
3.5 POTÊNCIA	7
3.6 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS	7
3.6.1 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE	7
3.6.2 ASSOCIAÇÃO EM PARALELO.....	7
3.7 PAYBACK DESCONTADO	9
4. RESULTADOS	9
4.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA DA ASSOCIAÇÃO	9
4.2 ASSOCIAÇÃO DAS 9 BOMBAS CENTRÍFUGAS	11
4.3 ALTERAÇÃO NO NÚMERO DE BOMBAS.....	12
4.4 ANÁLISE DE CUSTOS	13
5. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXO	16
ANEXO A: KSB ETA 250-40 1460 rpm.....	16
ANEXO B KSB RDL 440 400 1750 rpm	17

1. INTRODUÇÃO

A torre de resfriamento tem como objetivo fornecer água resfriada para os trocadores de calor em operação nas plantas industriais, mantendo as temperaturas de processo sob controle através da reutilização de água.

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA), responsável pela gestão de recursos hídricos em uma estimativa nacional de consumo de água em 2020, demonstra que a indústria de transformação representa o terceiro maior uso, atrás do abastecimento humano urbano e da agricultura irrigada. Esse estudo revela que os setores de fabricação de alimentos, metalurgia, produtos químicos e bicombustíveis são responsáveis por 85% da retirada de água e por 90% do consumo desse recurso pela indústria.

De acordo com a notícia publicada pelo portal de notícias online da Globo, o Brasil desperdiça 39,2% de toda a água potável, essa quantidade desperdiçada seria suficiente para abastecer mais de 63 milhões de brasileiros em um ano. As informações são de um estudo do Instituto Trata Brasil, feito a partir de dados públicos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2019, que reforçam a importância do consumo consciente de água.

O presente trabalho é uma modelagem do comportamento de uma associação de 9 bombas centrífugas, que operam em paralelo bombeando água resfriada de uma torre de resfriamento para ser utilizada em processos de resfriamento na Braskem no polo petroquímico de Triunfo-RS. Para isso, serão definidas as curvas características da associação e do sistema onde poderemos analisar a influência na alteração do seu ponto de trabalho devido a indisponibilidades no número de bombas associadas.

Atualmente, mais de 50% do consumo de água da Braskem acontece nas torres de resfriamento seguindo os conceitos da economia circular, visando a utilização consciente em escala industrial elevando os padrões de qualidade através da melhora da sustentabilidade por meio de produtos que evitem o desperdício e aumentam a eficiência. Através do uso mais eficiente de recursos naturais, como energia e principalmente como a água.

Esse reaproveitamento de água ocorre através de um processo de resfriamento evaporativo que utiliza ar em contracorrente. Criando assim um ciclo, para que para a torre de resfriamento após a sua utilização para ser reaproveitada novamente no processo.

O controle da temperatura é fundamental para garantir a confiabilidade de sistemas térmicos. Em um ambiente industrial tem a função de garantir que não ocorra o aquecimento excessivo de equipamentos. Esse monitoramento diminui o risco envolvido em processos industriais e o número de intervenções do sistema e principalmente evitando excessivas paradas de manutenções que conseqüentemente reduzem a produção.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

As bombas centrífugas são descritas pela KSB (2003) como máquinas hidráulicas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo. Recebendo energia de uma fonte motora e cedendo parte desta energia ao fluido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou ambas.

A torre de resfriamento tem grande aplicação industrial, ALVAREZ (2019) descreve como sendo o processo em que parte da água quente que entra é evaporada, saindo juntamente com o ar pela parte superior da torre através de ventiladores que forçam a sua saída.

A água resfriada que é bombeada por uma associação de bombas em paralelo de uma torre de resfriamento serve como fluido de arrefecimento em em trocadores de calor na planta

petroquímica, sendo aquecida durante esse processo e retornando para torre de resfriamento para ser resfriada novamente, apresentando uma pequena perda de água por evaporação de menos de 2% de água.

O sistema é responsável pelo bombeamento da água refrigerada que retorna para o processo, conforme pode ser visto na Fig.1. Em média, a água entra a temperatura de 45 °C sendo reduzida para 30°C. Nessa associação de bombas, nem sempre todas as bombas estão disponíveis para a operação devido a possíveis intervenções de manutenção nas bombas. Para isso, iremos analisar neste presente trabalho as alterações do ponto de funcionamento para garantir a continuidade do sistema mesmo com bombas inoperantes.

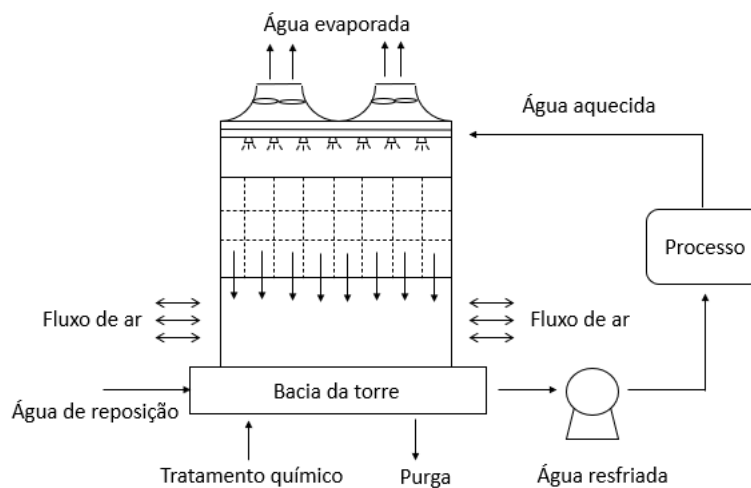
Fig. 1 – Sistema de bombeamento de água da torre de resfriamento



Fonte: Braskem

A Fig. 2, mostra o ciclo da água durante o processo de reutilização na planta petroquímica. O ar atmosférico que entra pelas aberturas laterais entra em contato com a água, ocasionando o seu resfriamento. No fundo, a água resfriada é retirada e reaproveitada, retornando para o processo através das bombas centrífugas.

Fig. 2 – Esquema do sistema de bombeamento de água da torre de resfriamento



Fonte: Autoria própria

2.1 BOMBAS ESTUDADAS

As bombas centrífugas estudadas diferem principalmente em vazão, rotação e diâmetro, conforme pode ser visto na Tab. 1. Variando de 1000 e 2000 m³/h, enquanto a bacia da torre de refrigeração possui uma capacidade de 2500 m³ de água.

Esses serão os parâmetros analisados ao longo deste presente trabalho para facilitar a sua representação sendo representados pelas letras A, B, C e D.

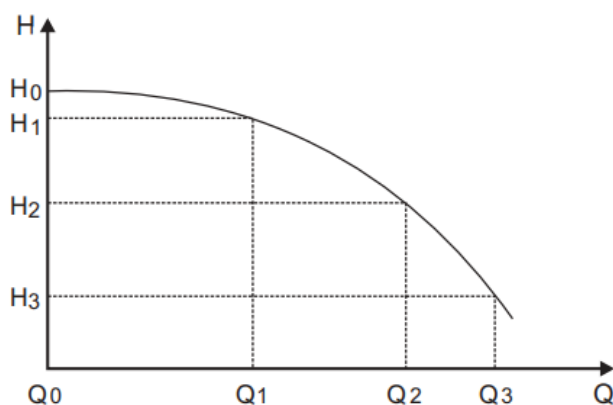
Tab. 1 – Dados comparativos entre as bombas

Bomba	Quantidade	Q[m ³ /h]	Rotação[rpm]	φ [m]	η [%]	Modelo
A	4	1700	1750	0,404	82	RDL 400 440 A
B	2	1000	1760	0,383	86	ETA 250 40
C	1	1800	1750	0,400	82	RDL 400 440 A
D	2	2000	1750	0,410	82	RDL 400 440 A

2.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS

Segundo KSB (2003), as curvas características são representações gráficas do funcionamento da bomba, obtidas através de experiências do fabricante em laboratório, que relacionam a altura manométrica e a vazão, conforme observados na Fig. 3.

Fig. 3 – Curva característica de uma bomba



Fonte: KSB

2.3 FATORES QUE MODIFICAM AS CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas características são modificadas devido à mudança da rotação, diâmetro externo do impelidor, efeito do tempo de serviço, além de alterações na geometria do impelidor e do líquido bombeado.

2.3.1 EFEITO DA MUDANÇA DE ROTAÇÃO NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Considerando um dado fluido e mantido o diâmetro do impelidor constante, DE FALCO (1998) descreve a relação de proporcionalidade entre os valores de vazão, altura manométrica e potência, com a rotação. Sempre que alteramos a rotação haverá a alteração nas curvas características da bomba, encontrando a nova rotação de índice 2, como pode ser visto nas equações 1.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \qquad \frac{P_{e2}}{P_{e1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \qquad (1)$$

2.3.2 EFEITO DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO NAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

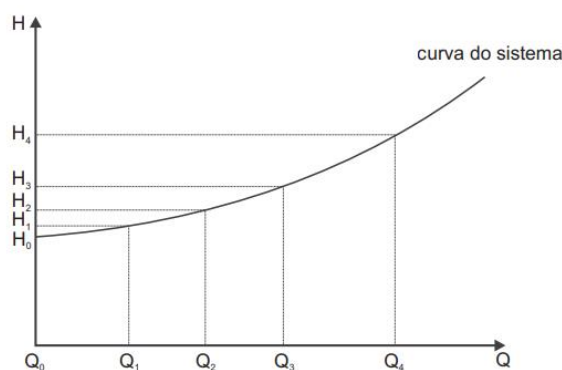
Quando existe uma alteração no diâmetro do impelidor em bombas geometricamente semelhantes, é guardada uma proporcionalidade entre essas variáveis DE FALCO (1998) demonstra que para esse caso deve ser calculadas esses novos valores utilizando as equações 2, onde o índice 2 representa os novos valores obtidos.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \qquad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \qquad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \qquad (2)$$

2.4 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA

A curva característica do sistema, conforme pode ser vista na Fig. 4, é descrita por KSB (2003) como a representação gráfica de tubulações, principalmente através de sistemas que incluem associações de bombas, sistemas com variações de níveis nos reservatórios e sistemas com vazões variáveis.

Fig. 4 – Curva do sistema



Fonte: KSB

HENN (2006) cita que para instalações de bombeamento, considerando igual a zero as velocidades nas superfícies dos reservatórios e nula a diferença de pressão entre o reservatório de recalque e o reservatório de sucção podem ser aproximadas pela equação 3.

$$H = H_g + K'Q^2 = (z_2 - z_1) + K'Q^2 \quad (3)$$

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

2.4 PONTO DE TRABALHO

O ponto de cruzamento entre as curvas do sistema e da bomba é chamado de ponto de trabalho. SANTOS (2007) explica que a relação entre a curva característica do sistema e da bomba representa a necessidade de energia e a disponibilidade de energia, respectivamente.

É importante ressaltar a diferença entre ponto nominal e ponto de trabalho, HENN (2006) descreve o ponto nominal como sendo equivalente ao rendimento máximo da máquina, enquanto o ponto de trabalho é o ponto da curva característica em que a bomba está realmente funcionando, mas que em uma situação ideal, poderá ser igual ao nominal.

2.4.1 VARIAÇÃO DO PONTO DE TRABALHO

O ponto de trabalho pode ser modificado, DE FALCO (1998) descreve que essa alteração pode ser ocasionada pela variação da curva do sistema através do estrangulamento parcial de válvula na descarga reduzindo a vazão.

Entretanto, a variação das curvas da bomba é o método mais usual utilizado podendo ser realizada por diversos fatores da variação da rotação e alteração do diâmetro externo do impelidor, e principalmente como será analisado no presente trabalho devido ao número de bombas associadas.

3. CASO DE ESTUDO

3.1 METODOLOGIA

Para a obtenção das curvas características de cada uma das bombas estudadas, serão extraídos os valores de altura manométrica e vazão a partir dos dados fornecidos pelo fabricante para os modelos KSB ETA 250 40 1460 rpm e KSB RDL 440 400 A 1750 rpm, apresentados respectivamente nos apêndices A e B.

Esses valores serão ajustados através das relações de proporcionalidade exibidas nas equações 1 e 2, conforme os diâmetros e rotações para uma das bombas estudadas no presente trabalho, de acordo com os dados exibidos anteriormente na Tab. 1.

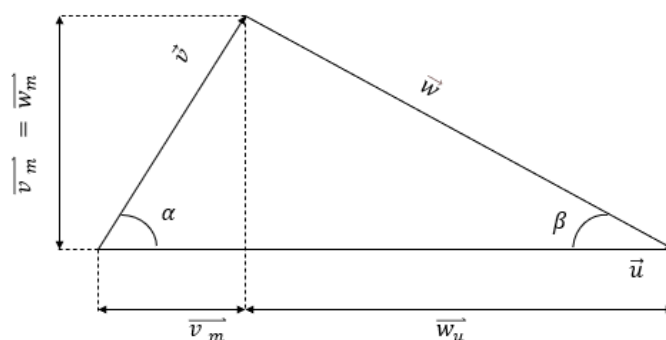
Após a obtenção dos valores de vazão e altura manométrica para cada caso específico, por serem valores contínuos e obedecerem a um padrão de tendência podem ser aproximados através de um ajuste de curvas. As vazões serão somadas para o um mesmo valor de altura manométrica de acordo com as equações 13, e 14 e que são representados graficamente pelas Fig. 7 e 8. Sendo definida a curva resultante da associação que será realizada uma análise do seu comportamento em função da variação do número de bombas em funcionamento devido a alteração do ponto de trabalho e potência de acionamento.

3.2 TRIÂNGULO DE VELOCIDADES

O triângulo de velocidades demonstrado por HENN (2006) é a representação geométrica da equação vetorial que relaciona o movimento relativo com o movimento absoluto das partículas fluidas que percorrem o rotor de uma máquina de fluxo, essa representação é observada na Fig. 5

$$\vec{v} = \vec{w} + \vec{u} \quad (5)$$

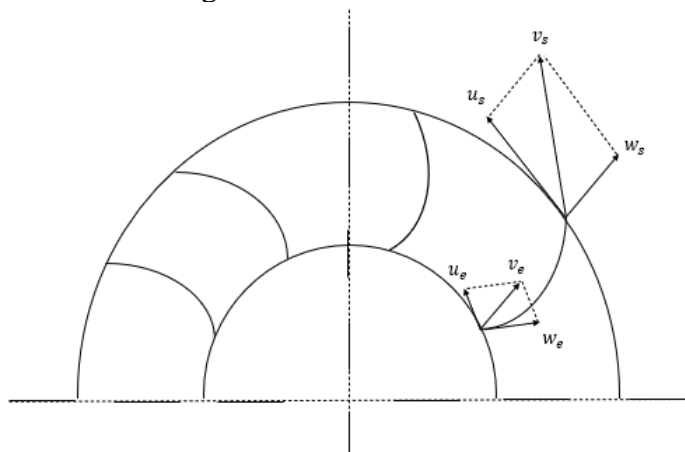
Fig. 5 – Triângulo de velocidades



Fonte: Autoria própria

Para a aplicação do triângulo de velocidades, considera-se a corrente fluida que circula através do rotor, representado esquematicamente na Fig. 6, pelo corte segundo um plano meridiano que passa pelo eixo do rotor e pelo corte segundo um plano perpendicular ao eixo do rotor.

Fig. 6 – Cinemática do rotor



Fonte: Autoria própria

3.3 SALTO ENERGÉTICO

O salto energético é a energia por unidade de peso que o sistema solicita para transportar o fluido do reservatório de sucção para o reservatório de descarga, com uma determinada vazão.

Para máquinas que trabalham com fluido incompressível, é comum associar a energia recebida, no caso das bombas, a uma altura de coluna do fluido, conforme HENN (2006) e KSB (2003).

$$Y = gH \quad (6)$$

3.4 VAZÃO

Pela equação da continuidade, o fluxo mássico através de qualquer seção, é constante em um regime permanente:

$$\dot{m} = \rho Q \quad (7)$$

$$Q = VA \quad (8)$$

$$\dot{m} = \rho_a A_a V_a = \rho_d A_d V_d = \text{constante} \quad (9)$$

3.5 POTÊNCIA

As perdas internas englobam-se as perdas hidráulicas, perdas volumétricas, perdas por atrito de disco.

$$\eta_t = \eta_h \eta_v \eta_a \eta_m = \frac{\rho Q Y}{P_e} \quad (10)$$

Assim, o rendimento da associação entre duas bombas seriam

$$\eta_{tA} = \frac{\eta_{t1} \eta_{t2} (Q_1 + Q_2)}{\eta_{t1} Q_2 + \eta_{t2} Q_1} \quad (11)$$

A potência é calculada pela seguinte expressão

$$P = \frac{\dot{m} Y}{\eta} = \frac{\rho Q Y}{\eta} \quad (12)$$

3.6 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS

As bombas podem ser associadas em série e em paralelo dependendo da necessidade encontrada em cada problema específico.

3.6.1 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE

A associação de bombas em série é uma opção quando, para a vazão desejada, a altura manométrica do sistema é muito elevada, acima dos limites alcançados por uma única bomba.

3.6.2 ASSOCIAÇÃO EM PARALELO

A associação em paralelo é utilizada quando a vazão desejada excede os limites de capacidade das bombas a um determinado sistema. DE FALCO (1998) e HENN (2006)

destacam as vantagens em se optar por essa associação através dos benefícios de redução de custos do projeto, aumento da segurança de operação e a flexibilidade do processo de manutenção.

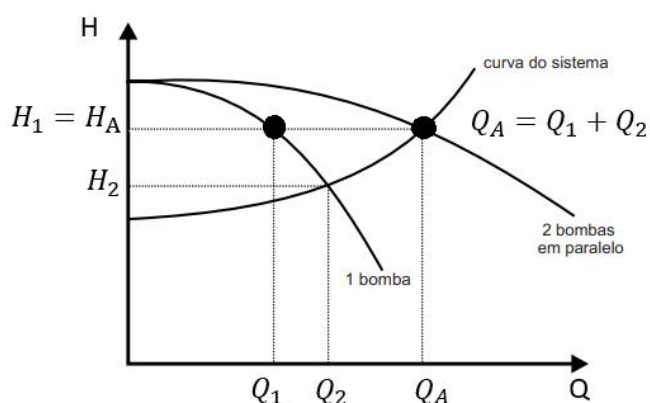
O valor da vazão total do sistema será a soma da vazão correspondente de cada tubulação. As Fig. 7 e 8 demonstram graficamente as equações 13, 14 e 15, as relações entre salto energético, vazão e potência da associação.

$$Y_A = Y_1 = Y_2 = Y_3 \dots = Y_9 \quad (13)$$

$$Q_A = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_9 \quad (14)$$

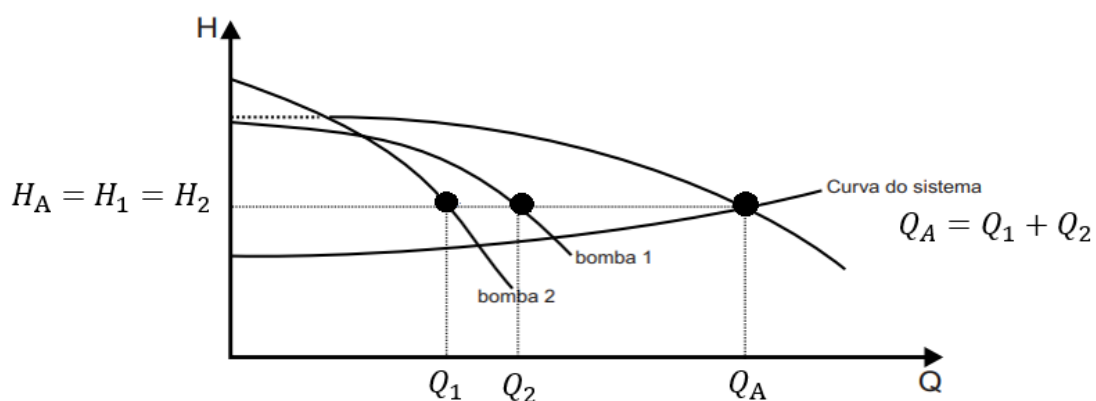
$$P_{eA} = P_{e1} + P_{e2} + \dots + P_{e9} \quad (15)$$

Fig. 7 – Associação de bombas iguais em paralelo



Fonte: Autoria própria

Fig. 8 – Associação de bombas diferentes em paralelo



Fonte: Autoria própria

3.7 PAYBACK DESCONTADO

É um indicador utilizado para avaliar o tempo de retorno ao realizar a viabilidade de um investimento. ROSS (2013) descreve o procedimento de cálculo, onde descontamos cada um dos fluxos de caixa. Então, perguntamos quanto tempo leva para que os fluxos de caixa descontados equivalham ao investimento inicial.

$$FCC = -|I| + \sum_{j=1}^t \frac{R_j - C_j}{1-i} \quad (16)$$

4. RESULTADOS

4.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA DA ASSOCIAÇÃO

As equações características das bombas estudadas serão aproximadas em equações polinomiais de segundo grau. Utilizando a equação 2 para realizar os ajustes para cada dos seus diâmetros. A partir dos pontos obtidos do apêndice A para o diâmetro de 0,460 m, por ser tratar apenas da curva fornecida pelo fabricante que possui maior alcance de pontos. Os resultados estão descritos na Tab. 2.

Tab. 2 – Ajuste dos diâmetros para as bombas A C e D

Q [m ³ /h]	D=0,460m	D=0,400m	D=0,404m	D=0,410m
	H[mca]	H[mca]	H[mca]	H[mca]
0	101	76,37	77,90	80,23
100	98	74,10	75,59	77,85
200	94	71,07	72,50	74,67
300	91	68,80	70,19	72,29
400	88	66,54	67,87	69,90
500	84	63,51	64,79	66,73
600	80	60,49	61,70	63,55
700	74	55,95	57,07	58,78
800	69	52,17	53,22	54,81
900	60	45,36	46,28	47,66

Conforme pode ser encontrado no apêndice B, as bombas B devem ter os seus pontos da curva característica alterados de 1460 rpm para 1760. E devem ser alterados os valores de diâmetros de 0,380 e 0,400 m. Utilizando as equações 18 e 19 para alteração da curva característica do diâmetro de 0,380 para 0,383 m e depois para a rotação de 1460 para 1760 rpm. Realizou-se um ajuste de curva para a obtenção das equações, como pode ser visto na Tab. 3.

Tab. 3 – Ajuste de rotação e diâmetro das bombas B

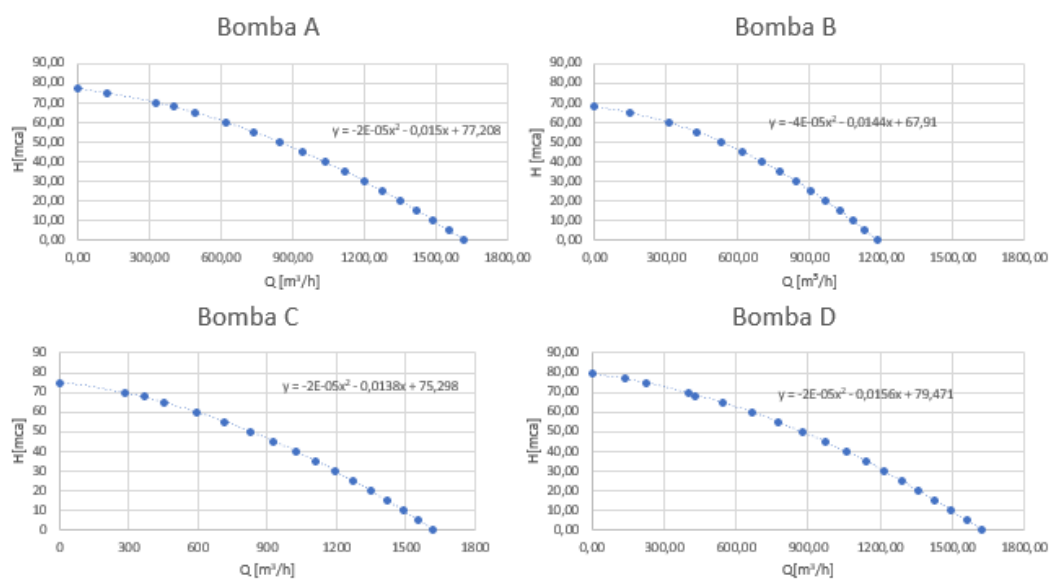
Q[m ³ /h]	D ₁ =0,380 m	D ₂ =0,383 m	n ₂ =0,383 m
	H [mca]	H [mca]	H [mca]
0	47,5	48,25	70,15
100	47,2	47,94	69,70
200	46,8	47,54	69,11
300	46,0	46,72	67,93
400	45,2	45,91	66,75
500	44,0	44,69	64,98
600	43,8	44,49	64,68
700	41,0	41,64	60,55
800	38,5	39,11	56,85
900	35,5	36,06	52,42
1000	32,0	32,50	47,25
1100	27,5	27,93	40,61
1200	21,0	21,33	31,01

Os valores encontrados na Tab. 3 foram aproximados por equações através do ajuste de curvas, conforme encontrados na Tab. 4 e vistas na Fig. 9.

Tab. 4 – Equações características das bombas

Bomba	Equação Característica
A	$H(Q)=-0,00002014*Q^2-0,015*Q+77,208$
B	$H(Q)=-0,00003624*Q^2-0,0144*Q+67,91$
C	$H(Q)=-0,00001976*Q^2-0,0138*Q+75,298$
D	$H(Q)=-0,00002077*Q^2-0,0156*Q+79,471$

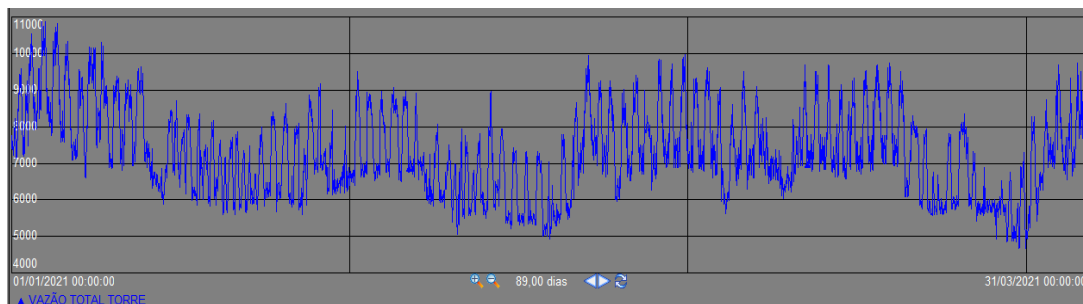
Fig. 9 – Curvas características



4. 2 ASSOCIAÇÃO DAS 9 BOMBAS CENTRÍFUGAS

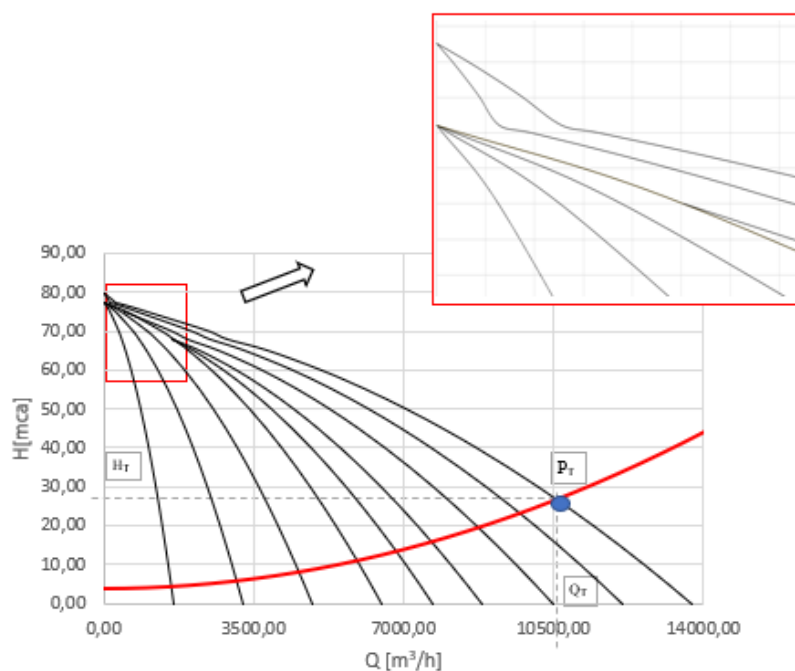
Foram obtidos os valores de vazão total da torre de resfriamento em 3 meses de funcionamento das bombas associadas. Os dados escolhidos são do período de maior solicitação, sendo no período do verão de 01/01 a 31/03/2021, conforme pode ser visto na Fig. 10.

Fig. 10 – Variação da vazão da torre de resfriamento



Com uma diferença de altura geométrica de 4 m e com o valor de vazão máximo de $Q = 10888,5 \text{ m}^3/\text{h}$, encontrado nesse período, chegou-se na altura manométrica de $H = 24,21 \text{ m}$. Utilizando esses valores na equação 3 se obtém a curva característica da canalização: $H(q) = 4 + 2,04 * 10^{-7} * Q^2$. A altura manométrica no ponto de trabalho é igual em cada uma das bombas, enquanto a vazão da associação e a potência são iguais às somas de cada um dos seus respectivos termos presentes nas bombas associadas em paralelo como pode ser visto na Fig. 11, onde temos a representação da curva da associação. O gráfico demonstra a representação gráfica resultante das bombas começando pela bomba A e sendo associada na seguinte ordem A, B, C e D, sendo o gráfico mais à direita como o resultante da associação.

Fig. 11 – Curva da associação



4.3 ALTERAÇÃO NO NÚMERO DE BOMBAS

Os resultados exibidos na Tab. 5 mostram os dados dos novos pontos de funcionamento devido a possíveis indisponibilidades das bombas, sendo realizada uma comparação do valor da nova potência para manter a altura manométrica do sistema sem indisponibilidades. Considerando o peso específico da água resfriada da torre de resfriamento sendo bombeada a 30 °C igual a 996 kg/m³. Com 8 Bombas disponíveis ocorre uma redução entre 8,50 a 10,9% na vazão de referência, enquanto a altura manométrica é reduzida entre 0,54 a 4,14% e a potência de acionamento sofre um aumento no intervalo de 1,26 a 14,74%. No caso de 7 bombas disponíveis ocorre uma redução entre 14,45 a 19,75% na vazão, ocorrendo uma redução da altura manométrica no intervalo de 10,33 a 19,13%, enquanto a potência o percebe-se um aumento entre 22,92 a 35,25%.

Tab. 5 – Comparação entre os dados de funcionamento

Caso	Qp [m ³ /h]	Hp[mca]	Pe[MW]	Pe novo [MW]
9 bombas	10888,7	24,21	0,868	-
8 bombas (Sem B)	9963,96	24,08	0,857	0,862
8 bombas (Sem D)	9701,92	23,21	0,740	0,772
8 bombas (sem A)	9709,12	23,24	0,7408	0,772
8 bombas (sem C)	9714,40	23,26	0,7443	0,774
7 bombas (sem B e B)	9311,52	21,71	0,669	0,746
7 bombas (sem D e D)	8738,60	19,58	0,562	0,625
7 bombas (sem D e B)	9026,40	20,64	0,6152	0,721
7 bombas (sem D e A)	8751,20	19,65	0,5628	0,693
7 bombas (Sem A e A)	8747,20	19,64	0,563	0,694
7 bombas (Sem A e B)	9032,80	20,66	0,615	0,721
7 Bombas (Sem C e B)	9037,60	20,68	0,616	0,722
7 Bombas (Sem C e A)	8752,00	19,65	0,561	0,692
7 Bombas (Sem C e D)	8745,60	19,63	0,566	0,755

Tab. 6 – Vazão 8 bombas

Q [m ³ /h]					
Bomba	9 bombas	Sem B	Sem D	Sem A	Sem C
A	1291,797	1290,60	1306,6	1306,20	1305,90
B	916,821	915,831	929,11	928,478	928,504
C	1284,2	1282,98	1299,41	1298,95	1298,65
D	1301,85	1300,7	1316,17	1315,74	1315,46

Tab. 7 – Vazão 7 bombas

Q [m ³ /h] - 7 bombas									
Bomba	Sem A e A	Sem B e B	Sem D e D	Sem C e A	Sem C e B	Sem C e D	Sem D e A	Sem D e B	Sem A e B
A	-	1328,67	1359,48	1358,47	1343,64	1358,76	1358,47	1344,22	1343,93
B	971,95	-	972,66	971,837	958,638	972,07	971,83	960,11	959,876
C	1352,6	1321,96	1353,48	-	-	-	1352,46	1337,87	1337,57
D	1366,34	1337,43	-	1336,2	1351,88	1366,48	1336,4	1352,44	1352,16

4.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Para viabilizar a análise econômica foram estimadas faixas dos preços para se ter uma aproximação do período necessário do payback do sistema de bombeamento de água da torre de resfriamento.

Por se tratar de valores elevados e que não teriam modificações de período no cálculo do payback, foram realizadas hipóteses simplificadoras para se analisar o problema, como pode ser visto na Tab. 8. Considerando como o mês com 30 dias (7200 h) e o valor escolhido para a taxa de desconto de 15% e com uma perda de menos de 2% de água por evaporação, a água utilizada no sistema foi considerada como parte do investimento inicial para a realização da análise de custos.

Os resultados financeiros da empresa petroquímica relativos ao primeiro semestre de 2021. A receita líquida do primeiro trimestre de 2021, foi de R\$ 22.692 milhões, aproximando a receita líquida como sendo a média mensal o valor foi de aproximadamente de R\$ 7.564 milhões. A tubulação é de aço galvanizado sendo considerado uma linha como tendo 400 m por bomba. O diâmetro da linha é reduzido ao longo do seu comprimento, por isso foi considerado um valor médio para estimar o valor total da tubulação. Considerando a quantidade de água total como sendo de aproximadamente ao valor que sai da torre de resfriamento mais a quantidade da bacia. Os resultados são apresentados na Tab. 9.

Tab. 8 – Estimativas para análise de custos fixos

Variáveis	Custo [R\$]
Investimento inicial das 7 bombas A C e D (Valor unitário médio)	100.000
Investimento inicial Bombas B (Valor unitário)	50.000
Despesa do m ³ da água	8,38
Despesa mensal: Energia elétrica	329 R\$/MWh
Despesa tubulação por m (aproximado)	1.000

Tab. 9 – Análise de custos

Variáveis	Resultados
Investimento Bombas	800.000,00
Investimento Tubulação	7.200.000,00
Investimento inicial Água	656.977.418,80
Custo mensal de energia elétrica da bomba	4.233.533,40
Payback descontado	34 meses

5. CONCLUSÃO

A modelagem nos auxilia no entendimento do comportamento da associação das bombas em paralelo, podendo se analisar as perdas de cargas da tubulação e a variação do comportamento do sistema de bombeamento de água resfriada de uma da torre de resfriamento, em função do número de bombas, principalmente para o controle de operação das bombas. Principalmente, através da representação gráfica do funcionamento das 9 bombas centrífugas em paralelo podemos confirmar as vantagens da associação de bombas centrífugas em paralelo, pois ocorre um aumento da vazão disponível, além de podermos ter bombas inoperantes devido a paradas de manutenção sem perdas significativas na vazão do fluido e na altura manométrica da água bombeada, mas para isso o número de bombas fora de operação não pode ser menor que 3.

Se a exigência de processo for de manter a altura manométrica constante, irá aumentar a exigência no funcionamento de bombas, provocando um aumento na faixa de 35% no casos de 3 bombas inoperantes, além de aumentar a potência, afetando principalmente as bombas de menor vazão como por exemplo as bombas B, que tem um aumento da vazão e consequentemente a potência necessária para manter a altura manométrica constante, porque ao se diminuir o número de bombas associadas estava chegando próximo ao seu ponto nominal de funcionamento, apenas variando o número de bombas associadas, em situações do aumento da temperatura ambiente.

No presente trabalho o objetivo foi de avaliar a alteração do ponto de trabalho, porém existem diversas situações como a variação da temperatura ambiente que afetam a eficiência do sistema associado. Foi possível também demonstrar a influência da disponibilidade das bombas na alteração do ponto de trabalho e consequente nos valores no funcionamento de cada uma das bombas associadas.

Para complementar a modelagem do sistema de bombeamento da torre de resfriamento foi estimado o tempo necessário para o retorno financeiro através do payback descontado sendo possível estimar o tempo necessário de 34 meses, mostrando a importância da manutenção desses equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, M.E.T. **Refrigeração, Ar-condicionado e Ventilação**, Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2019

DE FALCO, R; DE MATTOS, E.E. **Bombas Industriais**, Editora Interciência, 2ª Edição, 1998.

Quase 40% da água potável no Brasil é desperdiçada, aponta levantamento do Instituto Trata Brasil, **Globo** 31 de maio de 2021, <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2021/05/31/quase-40percent-da-agua-potavel-no-brasil-e-desperdicada-aponta-levantamento-do-instituto-trata-brasil.ghtml>>. Acesso em: nov. de 2020

HENN, E. L. **Máquinas de Fluido** 2ª Edição, Editora UFSM, 2006

KSB, **Manual de Treinamento: Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. Centro de Treinamento da KSB, 2003. 222p.

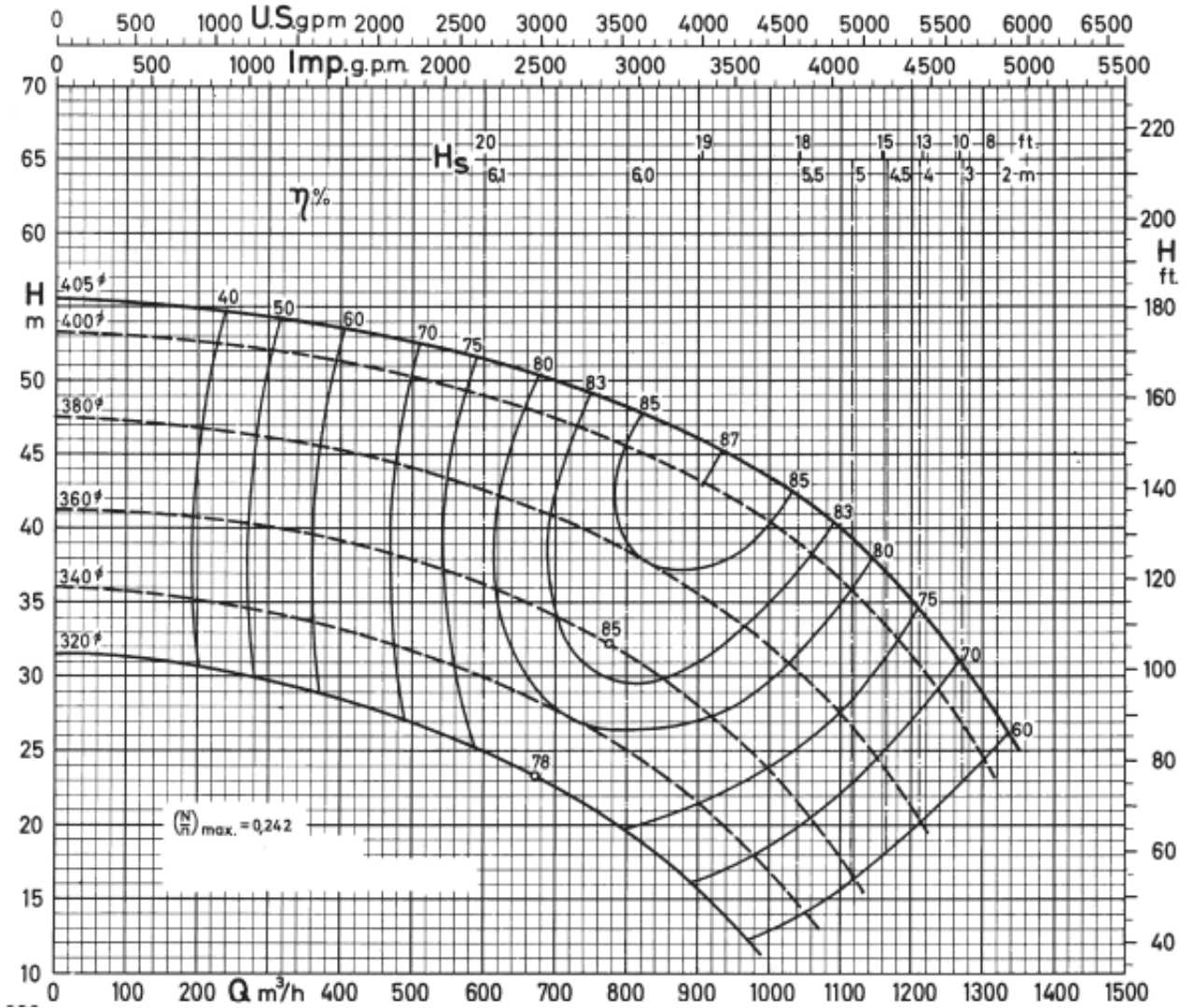
Estudo da Agência Nacional de Águas aborda uso da água no setor industrial, **Ministério do Desenvolvimento Regional**, 07 de outubro, Disponível em:<<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/estudo-da-agencia-nacional-de-aguas-aborda-uso-da-agua-no-setor-industrial>> Acesso em: nov. de 2020

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

SANTOS, S.L. **Bombas & Instalações Hidráulicas**, LCTE Editora, 2007

ANEXO

ANEXO A: KSB ETA 250-40 1460 rpm



ANEXO B KSB RDL 440 400 1750 rpm

