

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI – CORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LEANDRO DALLA COSTA SCHMIDT

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES
ELEVATÓRIAS PREDIAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO - PR
2018

LEANDRO DALLA COSTA SCHMIDT

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES
ELEVATÓRIAS PREDIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof Dr. Wagner Alessandro Pansera.

TOLEDO - PR

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 134

Avaliação da eficiência energética em estações elevatórias prediais

por

Leandro Dalla Costa Schmidt

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13:50 h do dia **12 de junho de 2012** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof Dr. Benedito Martins Gomes
(Unioeste)

Prof^a MSc. Patrícia Cristina Steffen
(UTFPR-TD)

Prof Dr. Wagner Alessandro Pansera
(UTFPR-TD)

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
(UTFPR-TD)

RESUMO

O uso de conjunto motobomba em estações elevatórias utiliza-se de energia elétrica para realizar o recalque da água. Afim de avaliar o consumo desse equipamento, criaram-se alguns índices capazes de medir e classificar a eficiência energética de uma bomba. Um dos índices criados mais recentemente é o índice GPX (*Green Pump Index*), cujo qual permite a classificação de um conjunto motobomba em uma tabela de eficiência criada para tal. Diante disso, este trabalho buscou analisar diferentes situações para estações elevatórias em instalações prediais, visando a determinação da eficiência obtida nesse tipo de aplicação. Os testes realizados envolveram edifícios de diversas alturas e bombas com características distintas. Em grande parte dos resultados obtidos, concluiu-se que a eficiência energética das bombas em instalações prediais encontra-se abaixo do recomendado, quando se é utilizado apenas uma bomba para o recalque. Porém, o uso de bombas em série provou-se uma alternativa interessante para edificações cuja demanda de volume recalcado e altura estática permitem o seu uso com alto rendimento.

Palavras-chave: Conjunto motobomba. Eficiência energética. Instalações prediais.

ABSTRACT

The use of a water pumps in lifting stations consumes electric power to carry out the water to superior levels. In order to evaluate the consumption of this equipment, there were created some indexes capable of measuring and classifying the energy efficiency of a pump. One of the most recently created indexes is the Green Pump Index (GPX), which allows the classification of a water pump into an efficiency table created for it. This work sought to analyze different situations for lift stations in building installations, seeking to determine the efficiency obtained in this type of application. The tests carried out involved buildings of different heights and pumps with different characteristics. In large part of the obtained results, it was concluded that the energy efficiency of the pumps in buildings is below of what is recommended, when only one pump was used. However, the use of pumps in series has proved an interesting alternative for buildings which demand for water and static height allow their use with high efficiency.

Keywords: Water pumps. Energy efficiency. Building installations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipo de rotores.	12
Figura 2 – Componentes gerais de uma bomba centrífuga.	13
Figura 3 – Estação elevatória típica.	14
Figura 4 – Curvas características de uma bomba.	17
Figura 5 – Curvas características normalmente encontradas em catálogos.	18
Figura 6 – Curva característica de uma instalação.	20
Figura 7 – Ponto de operação de uma bomba centrífuga.	21
Figura 8 – Fluxograma para o dimensionamento do conjunto motobomba.	23
Figura 9 – Escala de classificação do índice GPX.	27
Figura 10 – Fluxograma para otimização energética de uma estação elevatória.	27
Figura 11 – Curvas características (Hm X Q).	34
Figura 12 – Curvas características (Hm X Q).	39
Figura 13 – Ponto de operação com a bomba A.	43
Figura 14 – Diâmetro X GPX.	47
Figura 15 – Energia elétrica consumida diariamente X Diâmetro.	48
Figura 16 – Curva característica de duas bombas idênticas em série.	50
Figura 17 – Curva característica de modelo e protótipo (6 pavimentos).	52
Figura 18 – Curva característica de modelo e protótipo (11 pavimentos).	53
Figura 19 – Curva característica de modelo e protótipo (16 pavimentos).	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro interno das tubulações	31
Tabela 2 – Custo de tubulações	32
Tabela 3 – Cálculos hidráulicos (6 Pav.)	33
Tabela 4 – Características das bombas (6 Pav.)	34
Tabela 5 – Índices de eficiência (6 Pav.)	35
Tabela 6 – Diâmetros para a tubulação de recalque (6 Pav.)	36
Tabela 7 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (6 Pav.)	36
Tabela 8 – Custo por sistema (6 Pav.)	37
Tabela 9 – Cálculos hidráulicos (11 Pav.)	38
Tabela 10 – Características das bombas (11 Pav.)	38
Tabela 11 – Índices de eficiência (11 Pav.)	39
Tabela 12 – Diâmetros para a tubulação de recalque (11 Pav.)	40
Tabela 13 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (11 Pav.) ..	41
Tabela 14 – Custo por sistema (11 Pav.)	41
Tabela 15 – Cálculos hidráulicos (16 Pav.)	42
Tabela 16 – Características das bombas (16 Pav.)	42
Tabela 17 – Índices de eficiência (16 Pav.)	44
Tabela 18 – Diâmetros para a tubulação de recalque (16 Pav.)	44
Tabela 19 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (16 Pav.) ..	45
Tabela 20 – Custo por sistema (16 Pav.)	45
Tabela 21 – Resumo de resultados com diferentes bombas	46
Tabela 22 – Índices para edificações de 24 e 30 pavimentos	49
Tabela 23 – Índices com associação de bombas para edificação de 30 Pav.	50
Tabela 24 – Comparação entre modelos e protótipos	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	BOMBAS CENTRÍFUGAS	12
2.2	ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS	13
2.2.1	Altura manométrica	15
2.2.2	Curvas características de uma bomba	16
2.2.3	Curva característica de um sistema	18
2.2.4	Ponto de operação	20
2.2.5	Potência	21
2.2.6	Cavitação	22
2.2.7	Bombas em série e em paralelo	23
2.3	DIMENSIONAMENTO	23
2.4	INDICES PARA DIAGNÓSTICO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	ESTUDO DE CASO	28
3.2	ESTIMATIVA DA DEMANDA	28
3.3	FORMA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA	28
3.4	VAZÃO DE PROJETO	30
3.5	DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO	30
3.6	PONTO DE OPERAÇÃO	31
3.7	ÍNDICES DE DESEMPENHO	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	EDIFICAÇÃO DE 6 PAVIMENTOS	33
4.2	EDIFICAÇÃO DE 11 PAVIMENTOS	37
4.3	EDIFICAÇÃO DE 16 PAVIMENTOS	42
4.4	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	46
4.4.1	Eficiência em edifícios mais altos	48
4.5	VARIAÇÕES NA VELOCIDADE DO ROTOR	51

5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é indispensável para a realização do transporte de água potável através de estações elevatórias. Desta forma, além da importância da diminuição do consumo de água, também se mostra de grande relevância a economia de energia gasta para o transporte da mesma (MONTENEGRO *et al.*, 2006).

No mundo, muito se estuda sobre a economia de energia no setor de saneamento, visto que só nos Estados Unidos tal fator é responsável pelo uso de 3% da energia total gasta (MONTENEGRO *et al.*, 2006). Neste trabalho, foram analisadas melhorias no que diz respeito ao uso de energia para estações elevatórias prediais, dado que tal campo ainda está em carência quanto a este fator.

Em sistemas elevatórios, é o conjunto motobomba que faz uso de energia elétrica para o transporte de água, logo, este equipamento foi considerado como o objeto de estudo primário. Sua operação pode ocorrer de diversas formas, variando as rotações por minuto e o tempo de funcionamento, além de outras variáveis, visando-se obter a forma de funcionamento mais eficiente (GOMES, 2009).

Precedentemente a um estudo mais detalhado quanto a operação da bomba, é necessário fazer a escolha da mesma por meio de catálogos. Além da comparação entre preços de compra, também é importante analisar o consumo de energia de cada conjunto. É imprescindível considerar o dimensionamento da bomba requerida em fases primárias de projeto das instalações, uma vez que mesmo entre marcas de primeira linha, pode-se economizar até 25% ou mais (ALFA LAVAL, 2009).

Segundo Brustolini (2012), o custo para a implantação de estações elevatórias muitas vezes acaba sendo ultrapassado, com o passar do tempo, pelos gastos em energia elétrica consumida para a operação do mesmo. Em vista de uma análise mais precisa da energia gasta neste tipo de sistema, foram criados alguns índices de avaliação que estimam a energia consumida pelo motor elétrico (VIVAS *et al.*, 2012).

Dentre os índices existentes, se destaca o indicador de consumo específico (CE), capaz de determinar a energia gasta por metro cúbico de água bombeado (GOMES, 2009). Além desse, também se abordou neste trabalho o índice GPX (Green Pump Index), criado em 2011 afim de obter o desempenho real de sistemas, e compará-lo com o que pôde ser atingido potencialmente (Riventa & Deritend Ind., 2011).

1.1 JUSTIFICATIVA

Em dimensionamentos de estações elevatórias prediais, normalmente escolhe-se uma bomba cujo custo de compra seja o menor possível, atendendo as necessidades impostas pelo sistema. Porém, muitas vezes tal escolha não representa o menor custo energético ao longo do tempo, fator que, segundo a Alfa Laval CO. (2009) pode refletir em torno de 40% do custo total da instalação a longo prazo.

Visto que existem muitos estudos abordando a eficiência energética em estações elevatórias para distribuição de água, o presente trabalho busca aplicar alguns dos métodos existentes para estações elevatórias prediais, dado que tal campo ainda está em falta de maiores estudos.

Além disso, com a criação de índices para a avaliação de tal eficiência, torna-se mais simplificado a análise de tais sistemas no que diz respeito ao consumo de energia. Desta forma é possível aplicar algumas alterações no conjunto motobomba avaliando como este se comporta em relação a sua eficiência energética.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência energética de instalações elevatórias prediais utilizando o índice GPX (*Green Pump Index*).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho de bombas em edificações com diferentes alturas geométricas através do índice de consumo específico de energia e GPX (*Green Pump Index*);
- Analisar possíveis formas alternativas de aprimoramento dos índices de eficiência;
- Verificar o índice GPX como um medidor de eficiência energética para conjuntos motobomba,

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BOMBAS CENTRÍFUGAS

Esse tipo de bomba possui pás de curvatura simples fixadas a uma coroa circular e a um disco quando são fechadas (Figura 1a). Dentre os rotores utilizados, este é o mais comum, por conter melhor líquidos menos viscosos. Vale notar que ao redor do rotor, existe uma peça de carcaça chamada de voluta, caracterizada por sua forma em espiral crescente, criando assim um escoamento crescente em torno da periferia do rotor (BRUSTOLINI, 2012).

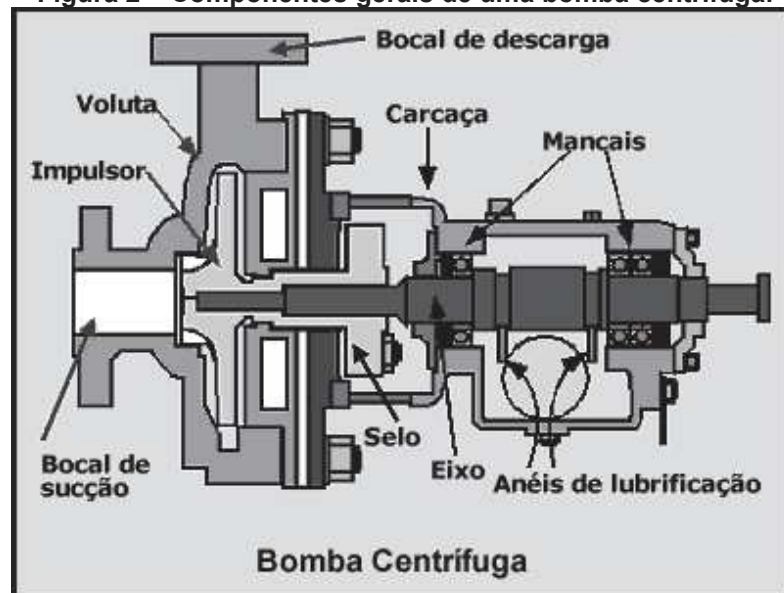


Antes de ser ligada, a bomba centrífuga deve ser preenchida por água, devido a folga existente entre seu rotor e o coletor, isso se deve ao fato desta não ser auto-aspirante. Ao iniciar o movimento do rotor, a água é forçada para as extremidades pela força centrífuga, isso acaba gerando duas áreas de diferentes pressões, sendo maior nas extremidades e menor no centro do rotor. Devido à baixa pressão no centro, a água do reservatório inferior (submetido a pressão atmosférica) desloca-se pelo tubo de sucção até o rotor da bomba (MACINTYRE, 2013).

Ao mesmo tempo, a energia existente na boca de recalque torna-se superior a pressão estática no resto da tubulação que liga a bomba ao reservatório superior, desta forma a água é forçada a alcançar cotas superiores (MACINTYRE, 2013).

A energia para o funcionamento desta bomba é fornecida por um motor de acionamento. Normalmente, este utiliza-se de energia elétrica para funcionar, existindo também motores de combustão. A ligação entre este motor e a bomba é feito por um eixo rígido ou por uma luva elástica, como pode ser visto na Figura 2 (BAPTISTA; LARA, 2010).

Figura 2 – Componentes gerais de uma bomba centrífuga.



Fonte: GANGHIS, 2006.

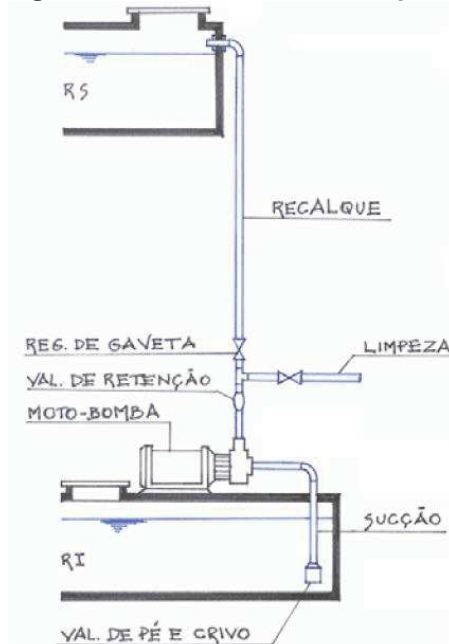
A utilização desse tipo de bomba faz-se necessário apenas em casos onde a pressão de chegada no ramal de entrada não for suficiente para abastecer todos os pontos necessários. Tal ocorrência é mais comum em edifícios de altura elevada, onde a pressão disponibilizada pela empresa responsável pela distribuição da água não é suficiente para abastecer todos os pavimentos (NETTO *et al.*, 1998).

2.2 ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Uma estação elevatória típica consiste em dois reservatórios, um superior e um inferior, e uma bomba hidráulica capaz de promover o deslocamento da água residente no reservatório inferior até o superior (Figura 3), através de uma tubulação ligando o conjunto (BAPTISTA; LARA, 2010).

A tubulação responsável por ligar o reservatório inferior a bomba é denominada de tubulação de sucção, já a ligação da bomba com o reservatório superior é feita pela tubulação de recalque (MACINTYRE, 1990).

Figura 3 – Estação elevatória típica.



Fonte: GHISI, 2004.

A válvula de retenção, segundo Macintyre (1990), evita a propagação, para o interior da bomba, da onda de sobrepresão que se verifica ao longo da massa líquida em escoamento quando o motor da bomba é desligado, pois em certos casos pode causar danos a bomba.

Logo após a válvula, faz-se necessário o uso de um registro, tornando possível a manutenção da válvula, além do controle de vazão. Normalmente o registro de gaveta é a escolha para as instalações elevatórias (BAPTISTA; LARA, 2010).

Segundo Baptista e Lara (2010), quando a bomba se encontra acima do nível de água do reservatório inferior, chamamos de sucção de positiva (Figura 3), quando está abaixo do nível denomina-se sucção negativa, podendo dizer que a bomba está afogada.

Para sucções positivas, faz-se necessário o uso de uma *válvula de pé com crivo*. O papel desta é evitar que a água que se encontra na tubulação de sucção volte ao reservatório quando a bomba encerra seu funcionamento, pois como já visto a bomba deve estar cheia de líquido para funcionar corretamente. Já o crivo acoplado a esta válvula tem o intuito de impedir a passagem de partículas sólidas para o interior do rotor (BAPTISTA; LARA, 2010).

2.2.1 Altura manométrica

Regis (2010) define altura manométrica como a energia fornecida por unidade de peso do fluido transportado. Para o cálculo desta variável, deve ser levado em conta a altura geométrica da estação elevatória que deve ser vencida pela bomba, assim como as perdas de cargas contínuas e singulares da tubulação.

Se aplicarmos a equação de Bernoulli em dois pontos que contêm uma bomba, teremos que considerar a altura manométrica (BAPTISTA; LARA, 2010).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} + H_m = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (1)$$

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} - \frac{U_1^2}{2g} + \Delta h_{1-2} \quad (2)$$

Onde:

H_m = Altura manométrica [m];

Z = cota do ponto referenciado [m];

P = Pressão existente no ponto referenciado [kgf/m²];

γ = Peso específico da água [kg/m³];

U = Velocidade da água no ponto referenciado [m/s];

g = Aceleração da gravidade [m/s²];

Δh_{1-2} = Perda de carga entre ambos os pontos [m.c.a.].

Considerando que ambos os reservatórios (início e fim da tubulação) estejam submetidos a pressão atmosférica além de uma diferença em energia cinética desprezível, teremos a equação 3 (BAPTISTA; LARA, 2010).

$$H_m = Z_2 - Z_1 + \Delta h_{1-2} \quad (3)$$

Para o cálculo das perdas de carga localizadas, pode-se utilizar a consideração do comprimento equivalente encontrado em tabelas específicas. Esta consideração transforma as perdas causadas por aparelhos como curvas e válvulas em comprimento total da tubulação. Em alguns casos ainda se opta por simplesmente

majorar o comprimento real em 20% a 30%. Considerando um comprimento equivalente pode-se utilizar a equação 4 (RIBEIRO, 2014):

$$\Delta h_{1-2} = J \cdot L_{eq} \quad (4)$$

Onde:

Δh_{1-2} = Perda de carga [m.c.a.];

J = Perda de carga unitária [m.c.a./m];

L_{eq} = Comprimento da tubulação equivalente [m].

Já para o cálculo da perda de carga unitária, pode-se utilizar a fórmula de Flamant (5), que pode ser aplicada em regimes turbulentos e tubos lisos (RIBEIRO, 2014).

$$J = 4 \cdot C \cdot V^{\frac{3}{4}} \cdot D^{-\frac{5}{4}} \quad (5)$$

Onde:

C = Coeficiente característico do conduto;

V = Velocidade de escoamento da água [m/s];

D = Diâmetro interno do conduto [m].

2.2.2 Curvas características de uma bomba

Segundo Baptista e Lara (2010), as bombas são projetadas para trabalhar com vazões previamente estabelecidas. Através de ensaios verifica-se que elas são capazes de atender outros valores de vazões e alturas manométricas além dos pontos para os quais elas foram projetadas.

A representação gráfica deste conjunto de alturas manométricas e vazões denomina-se curva característica. Além destas grandezas, são utilizadas também nestas curvas outras características como o diâmetro do rotor, velocidade de rotação, potência motriz e rendimento (BRUSTOLINI, 2012).

Normalmente, são quatro as curvas características de bomba tradicionais:

- Curva de altura manométrica x vazão;

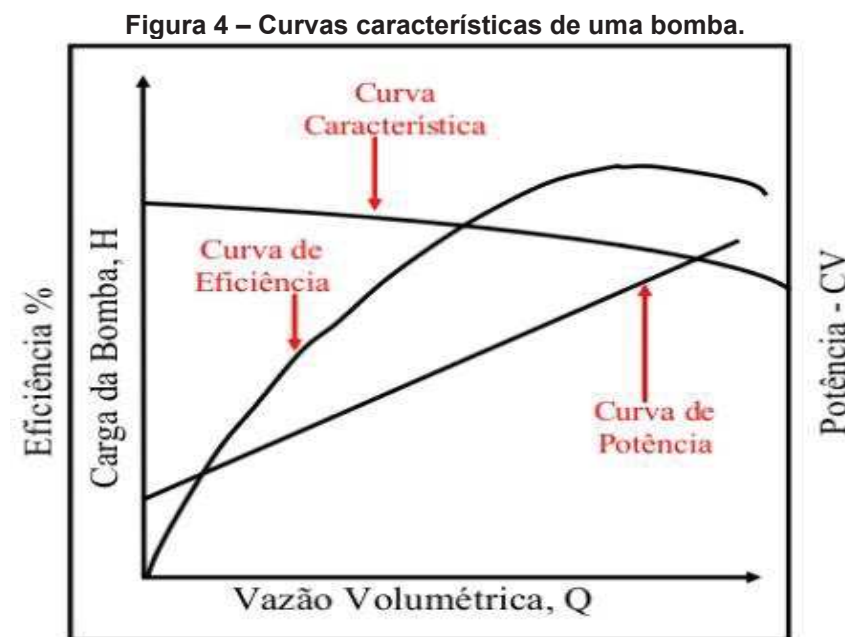
- Curva de potência x vazão;
- Curva de rendimento x vazão;
- Curva do NSPH requerido x vazão.

As curvas que relacionam a altura manométrica com a vazão das bombas podem ser representadas por uma equação do 2º grau (6).

$$H_m = aQ^2 + bQ + c \quad (6)$$

Sendo que os coeficientes a, b e c podem ser obtidos através da determinação de três pontos da relação H_m e Q (BAPTISTA; LARA, 2010).

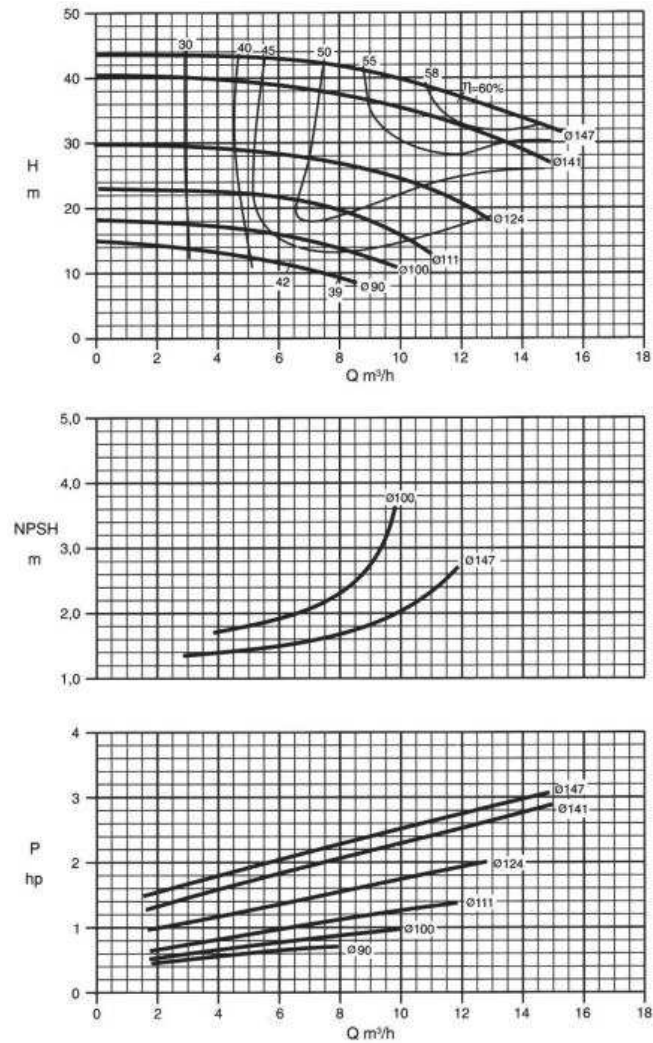
Como já mencionado, a curva característica principal de uma bomba junta-se ao rendimento e a potência motriz. O conjunto destas curvas constituem as curvas características de uma bomba e estão representadas na Figura 4, considerando uma mesma velocidade de rotação (BRUSTOLINI, 2012).



Fonte: SILVA, 2016.

Em catálogos de bombas normalmente se encontram as curvas como representado na Figura 5. Desta forma, já conhecida a vazão necessária a ser recalçada, torna-se mais fácil encontrar a bomba desejada alinhando os gráficos. Cada conjunto de curvas é referente a uma velocidade de rotação em rpm (MACINTYRE, 1990).

Figura 5 – Curvas características normalmente encontradas em catálogos.



Fonte: Catálogo de bombas KSB.

2.2.3 Curva característica de um sistema

A equação entre os reservatórios, sujeitos a mesma pressão, pode ser representado pela expressão 7 (BAPTISTA; LARA, 2010).

$$H_m = H_g + \Delta h_{1-2} \quad (7)$$

Onde:

H_m = Altura manométrica [m];

H_g = Altura geométrica [m];

Δh_{1-2} = Perda de carga total na tubulação [m.c.a.].

Segundo a NBR 5626 (ABNT, 1998), para instalações de água fria recomenda-se a utilização da fórmula de Fair-Whipple-Hsiao, sendo esta uma fórmula empírica que representa a perda de carga em função da vazão de escoamento e das características da tubulação. Considerando tubos lisos teremos:

$$H_t = 0,000869 \cdot D^{-4,75} \cdot L_e \cdot Q^{1,75} \quad (8)$$

Onde:

H_t = Perda de carga do trecho (m.c.a);

L_e = Comprimento real da tubulação somado ao comprimento correspondente das peças (m).

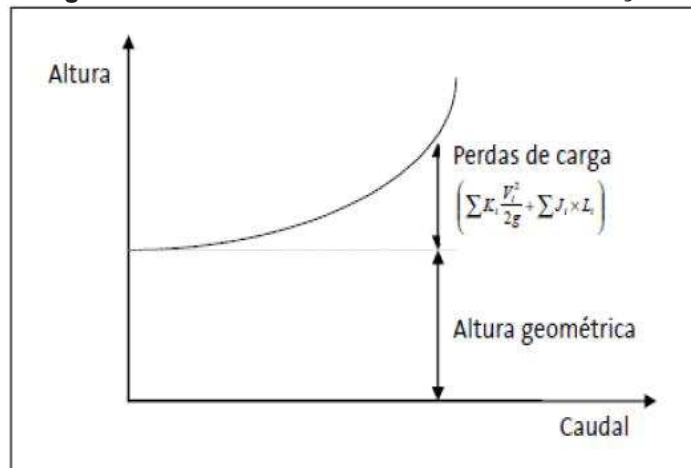
Logo, conhecendo o diâmetro, o comprimento virtual e a altura geométrica entre os reservatórios, tem-se uma altura manométrica dependendo apenas da vazão. Segundo Brustolini (2012), a altura manométrica pode ser representada pela seguinte equação:

$$H_m = H_g + K \cdot Q^{1,75} \quad (9)$$

$$K = 0,000869 \cdot D^{-4,75} \cdot L_e \quad (10)$$

Portanto, conhecidas as características do sistema (coeficientes de perda de carga, altura geométrica, comprimento da tubulação e diâmetro), pode-se traçar a curva correspondente a tubulação atribuindo valores de vazão (Figura 6). Normalmente, a tubulação de sucção é desprezada por não apresentar valores muito significativos, porém, caso se deseja considerar sua parcela, é possível considerá-la em série com a curva resultante de recalque (BAPTISTA; LARA, 2010).

Figura 6 – Curva característica de uma instalação.



Fonte: RIBEIRO, 2014.

Como pode ser observado na Figura 6, a altura geométrica é responsável pela maior parte do obstáculo superado pela água em movimento. Porém, dependendo da altura da edificação, a perda de carga presente na tubulação pode vir a representar uma grande percentagem nesta altura a ser vencida.

2.2.4 Ponto de operação

É possível afirmar, para uma estação elevatória típica, que quanto maior for o caudal a bombear, menor será a altura manométrica atingida pelo fluido com a mesma bomba. Pois sendo a altura manométrica a energia necessária a ser fornecida ao fluido, com uma maior quantidade de fluido e uma mesma energia fornecida pela bomba, a altura manométrica será menor (RIBEIRO, 2014).

O ponto de funcionamento de uma bomba centrífuga pode ser determinado pela intersecção da curva característica da tubulação com a curva da bomba (H/Q), como pode ser observado na Figura 7. O ponto encontrado determina o caudal que a estação elevatória em questão será capaz de bombear (MACINTYRE, 2013).

Figura 7 – Ponto de operação de uma bomba centrífuga.



Fonte: RIBEIRO, 2014.

Com este ponto de operação da bomba, também será possível determinar a potência absorvida, o rendimento e o $NSPH_{requerido}$, conforme já visto anteriormente em curvas encontradas nos catálogos de bombas (RIBEIRO, 2014).

2.2.5 Potência

Segundo Brustolini (2012), a potência hidráulica, conveniente chamada de potência útil, compreende a potência efetivamente utilizada pelo fluido pelo seu escoamento.

Como já representado, a bomba recebe potência através de um motor elétrico, determinada de potência motriz. Esta potência deve ser maior que a hidráulica, pois nesta transformação de potências ocorre perdas devido a transformação de energia elétrica em energia cinética. Estas perdas manifestam-se pelo rendimento (BRUSTOLINI, 2012).

A potência de um conjunto motobomba recalçando água é determinada através da seguinte equação (GHISI, 2004):

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{75\eta} \quad (11)$$

Onde:

P = potência necessária para o conjunto motobomba [cv];

γ = Peso específico do fluido [kgf/m^3];

Q = Vazão [m^3/s];

η = Rendimento do conjunto motobomba [adimensional].

Segundo Gomes (2009), a potência requerida da rede elétrica por uma estação elevatória de água bruta, tratada ou de esgoto, em kWh, é frequentemente calculada pela fórmula prática:

$$P = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (12)$$

2.2.6 Cavitação

A cavitação é o fenômeno de vaporização do líquido presente nas tubulações, ela se assemelha à fervura, mudando apenas o agente causador. Enquanto na fervura existe um aumento da temperatura com uma pressão constante, na cavitação temos um aumento de pressão com a temperatura constante (BAPTISTA; LARA, 2010).

Para análise da cavitação em um sistema, é necessário conhecer o valor do NSPH disponível, que representa a carga existente na instalação para permitir a sucção do fluido (MACINTYRE, 2013).

$$NSPH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \left[h_s + \frac{P_v}{\gamma} + \Delta h_s \right] \quad (13)$$

Onde:

h_s = Altura da tubulação de sucção [m];

P_v = Pressão do vapor do líquido a temperatura dominante [kgf/m²];

γ = Peso específico da água [kg/m³];

Δh_s = Perdas de carga na tubulação de sucção [m.c.a.].

Para verificar a ocorrência de cavitação, deve-se comparar o NSPH disponível com o NSPH requerido (fornecido pelo fabricante da bomba). Caso o NSPH requerido seja igual ou superior ao NSPH disponível, conclui-se que haverá cavitação no sistema (BAPTISTA; LARA, 2010).

Para efeitos de segurança, é comum utilizar uma margem de 0,6 m do líquido bombeado, ou 20% do valor do NSPH disponível (MACINTYRE, 2013).

2.2.7 Bombas em série e em paralelo

Quando se busca aumentar a vazão recalçada, ou a altura manométrica de uma estação elevatória, uma alternativa possível é a associação de bombas. Segundo Gomes (2009), quando se deseja ganhar vazão, associam-se bombas em paralelo, e quando se deseja aumentar a altura manométrica, associam-se as bombas em série.

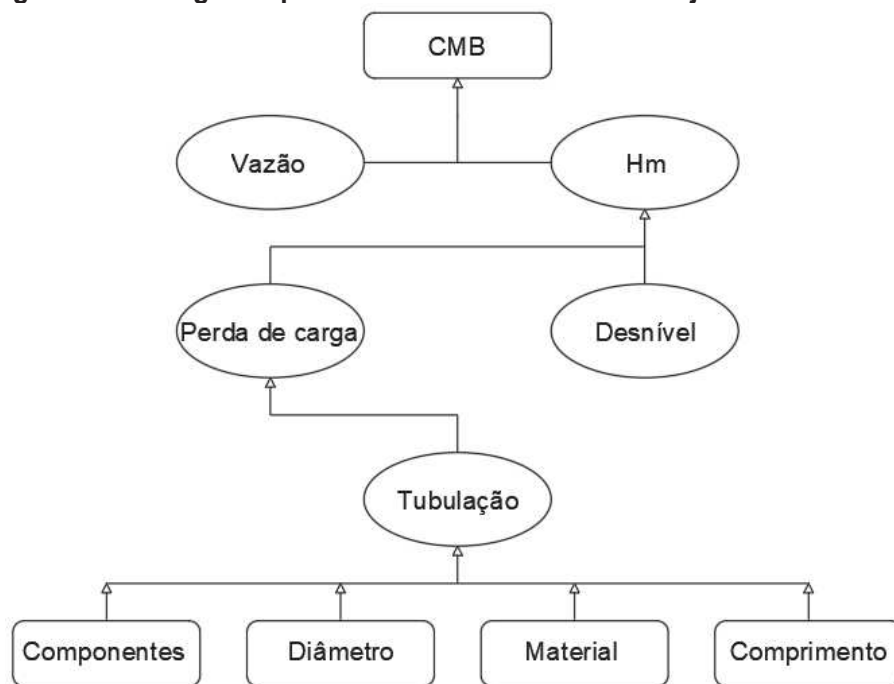
Em uma associação em paralelo, cada bomba recalca metade da vazão total, porém, a altura de recalque do conjunto é o mesmo que seria alcançado com o uso de apenas uma das bombas (PORTO, 2006).

Já a associação em série liga a entrada de uma bomba na saída de outra, dessa forma, a mesma vazão passa pelas duas bombas, mas as alturas de recalque de cada bomba somam-se para resultar em uma altura total dobrada (PORTO, 2006).

2.3 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um conjunto motobomba deve seguir uma série de passos, desde a determinação do tipo de material a ser utilizado até a vazão necessária para a edificação. A Figura 8 representa de forma ordenada as etapas a serem seguidas para tal dimensionamento.

Figura 8 – Fluxograma para o dimensionamento do conjunto motobomba.



Fonte: PEREIRA e SOARES, 2006.

Inicialmente, deve-se determinar o material a ser utilizado e o diâmetro dos tubos. Segundo Baptista e Lara (2010), para o cálculo do diâmetro de recalque, existem duas formulações:

$$D_R = K\sqrt{Q} \quad (14)$$

$$D_R = 1,3\sqrt{Q}^4 \sqrt{\frac{h}{24}} \quad (15)$$

Onde:

D_R = Diâmetro de recalque[m];

h = Tempo de funcionamento do conjunto motobomba (Horas).

A expressão 14, conhecida como fórmula de Bresse, utiliza um coeficiente variável K, que depende entre outras coisas dos custos de investimento e de operação, não sendo fixo e variando para diferentes locais e tempos. Já a expressão 15, chamada de fórmula de Forchheimer, determina o diâmetro de recalque levando em consideração as horas de funcionamento do conjunto motobomba. Desta forma essa formulação é a mais recomendada para sistemas que não trabalham intermitentemente (GHISI, 2004).

Uma vez determinado todas as características da tubulação a ser implantada, deve-se encontrar a altura manométrica a ser vencida pelo conjunto. Esta variável depende da perda de carga e do desnível geométrico presente na instalação. Seguindo as recomendações da NBR 5626 (ABNT, 1998), a altura manométrica pode ser encontrada com a aplicação da equação 9.

Tsutiya (2006) define que cada pessoa necessita de aproximadamente 100 litros de água por dia para atender todas as suas necessidades, porém, segundo bases do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, no Brasil este número pode chegar a mais de 200 litros por dia. Além disso, dados do IBGE apontam que em 2001 a média de pessoas para uma família Brasileira era de 3,3 pessoas. Estes dados devem ser levados em consideração na aplicação da expressão 16, que determinará o volume que o conjunto motobomba deverá bombear por dia.

$$V = 0,2 \times 4 \times N^{\circ}de \text{ apartamentos} \quad (16)$$

$$Q = \frac{V}{Tempo \text{ de funcionamento}} \quad (17)$$

Onde:

V = Volume diária consumido [m^3];

Q = Vazão de projeto [m^3/s].

Com a vazão de projeto e a altura manométrica determinada, deve-se então encontrar, por meio de catálogos de fabricantes, o conjunto motobomba mais adequado para a dada situação. Além disso, comparando-se as curvas do sistema e da bomba, será possível determinar o ponto de operação em qual o conjunto irá trabalhar (NETTO *et al.*, 1998).

2.4 INDICES PARA DIAGNÓSTICO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A busca pela eficiência energética em sistemas de bombeamento de água pode muitas vezes significar diminuição nas perdas de água bombeada.

O diagnóstico de um sistema consiste na determinação de possibilidades de ganhos em eficiência hidroenergética, sendo seu produto final uma lista de intervenções e as respectivas estimativas de redução de consumo de energia elétrica e redução da demanda de potência no horário da ponta do sistema elétrico. (GOMES, 2009, p. 251).

Levando em conta que a energia elétrica necessária para a ativação da bomba seja o insumo principal do processo de recalque, pode-se determinar a eficiência energética através de um indicador de consumo de energia específica, onde o valor obtido representará a energia necessária para o bombeamento de $1 m^3$ de água. Segundo Gomes (2009), a energia específica deve ser determinada conforme a expressão 18.

$$CE = \frac{EE_{cons}}{V_{bomb}} \quad (18)$$

Onde:

CE = Consumo específico de energia [kWh/m³];

EE_{cons} = Energia elétrica consumida [kWh];

V_{bomb} = Volume bombeado [m³].

Para um sistema com apenas um ponto de operação, o cálculo desta energia específica pode ser feito de forma simples. Porém, para sistemas com mais de um ponto de operação, a determinação dessa energia resulta em um cálculo ponderado, por volume bombeado, da energia específica de cada ponto (VIVAS *et al*, 2012).

Além da energia específica, foram desenvolvidos outros índices capazes de analisar a eficiência energética de conjuntos motobomba. Entre eles se destaca o índice *Green Index Pump* – GPX (Riventa & Deritend Ind., 2011), representado pela expressão 19.

$$GPX = \frac{Q \cdot H_g}{3,67 \cdot P} \quad (19)$$

Onde:

Q = Vazão bombeada [m³/h];

H_g = Altura geométrica a ser vencida [m];

P = Potência elétrica consumida pelo conjunto motobomba [kWh].

Este índice foi criado com a intenção de comparar a eficiência dos equipamentos escolhidos dentro das características específicas de um dado sistema. Facilitando assim, a comparação de diferentes conjuntos motobomba, independente da sua aplicação (Riventa & Deritend Ind., 2011).

Além disso, o índice GPX também é capaz de comparar o desempenho atual de um conjunto com o desempenho que poderá potencialmente ser atingido. Com seu valor podendo variar de 1 a 100, ele irá indicar se o conjunto motobomba necessita de maiores investigações ou trabalhos de reparo. A Figura 9 apresenta um exemplo do estado atual de um conjunto em comparação com uma situação potencial a ser alcançada (Riventa & Deritend Ind., 2011).

Figura 9 – Escala de classificação do índice GPX, sendo o funcionamento atual representado por “C”, e o funcionamento potencial por “P”.

GPX INDEX	C	P	ACTION
<50 G8			BELOW RECOMMENDED EFFICIENCY Immediate Action recommended to improve Energy Efficiency
50 - 54 G7	53		
55 - 59 G6			
60 - 64 G5			
65 - 69 G4			AVERAGE PERFORMANCE Future planning should include Energy Reduction measures
70 - 74 G3		71	
75 - 79 G2			EXCELLENT PERFORMANCE
80+ G1			

Fonte: Riventa & Deritend Ind., 2011.

Segundo esta classificação, caso uma estação elevatória possua um GPX inferior a 65, ela possui uma eficiência abaixo daquela recomendada. Caso este número esteja entre 65 e 75, sua eficiência é média, já para valores superiores tem-se que a estação possui uma excelente performance no que diz respeito a eficiência energética.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo proposto visa avaliar e comparar estações elevatórias com foco na eficiência energética. Para tal, seguiram-se alguns passos afim de encontrar por meio de tentativa e erro a combinação mais eficiente. A Figura 10 representa o fluxo tomado para que o objetivo fosse alcançado.

Figura 10 – Fluxograma para otimização energética de uma estação elevatória.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxograma em questão será levado em conta para a comparação de algumas bombas, onde que em seu fim será determinado qual bomba alcançou a melhor eficiência. Uma vez escolhida a bomba, o mesmo fluxograma será repetido,

porém desta vez serão variados tanto o tempo de funcionamento deste sistema, como os diâmetros por este utilizado.

3.1 ESTUDO DE CASO

Para uma análise mais abrangente dos casos de edificações que podem vir a se beneficiar de tal otimização, considerou-se inicialmente edifícios de 6, 11 e 16 pavimentos. Essas edificações fictícias foram escolhidas para que se fosse realizada uma comparação entre o potencial de economia entre diferentes alturas geométricas, e diferentes demandas, prevendo-se um potencial maior quanto maior a edificação estudada. O pé-esquerdo considerado para cada pavimento é de 3 metros.

3.2 ESTIMATIVA DA DEMANDA

Segundo bases do Sistema Nacional de Informações de Saneamento, o consumo médio de água por uma pessoa no Brasil é de cerca de 200 litros por dia, e dados do IBGE indicam que a média de pessoas por família brasileira é de 3,3 pessoas. Estes dados foram levados em conta ao se estimar a demanda de cada edificação.

Utilizando os dados fornecidos, considerou-se, para fins de uma estimativa mais precisa, 4 pessoas por apartamento e 4 apartamentos por andar. Juntamente com o consumo por pessoa, pôde-se então determinar o volume a ser bombeado diário pelo conjunto motobomba. Seguindo estes dados, tem-se um volume diário a ser bombeado de 16 m³, 32 m³ e 48 m³, para edificações de 6, 11 e 16 pavimentos respectivamente, sendo que o primeiro pavimento das edificações não é habitado.

3.3 FORMA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

Frequentemente, em edificações onde se faz necessário a instalação de um conjunto motobomba, opta-se pela utilização de uma estação elevatória como a representada na Figura 3, fazendo o uso da bomba para realizar o recalque da água de um reservatório até outro.

Além deste método citado para o recalque de água, existe também a possibilidade da utilização do conjunto motobomba como um booster, dispensando assim a utilização de um reservatório inferior. Neste esquema, o conjunto motobomba irá apenas exercer um aumento na pressão da água, visto que esta já irá chegar ao conjunto com uma certa pressão, disponibilizada pela empresa responsável pela distribuição de água (GOMES, 2009). Para o estudo proposto, considerou-se a utilização de dois reservatórios.

Segundo a NBR 5626 (ABNT, 1998) o tempo de recalque diário para uma residência unifamiliar deve ser menor do que 1 hora, sendo que para outros edifícios este tempo pode chegar até 6 horas.

Ainda no que se refere a tempo de enchimento do reservatório, vale notar que a versão antiga da NBR 5626 (ABNT, 1982) recomenda um enchimento de 15% do volume total diário em cada hora de recalque. Desta forma, segundo essa versão da norma, o tempo para funcionamento diário de uma bomba deveria ser de no máximo 6,66 horas. O presente estudo irá trabalhar com o funcionamento diário que irão variar entre 15 minutos e 24 horas, partindo de um tempo inicial para o dimensionamento padrão de 4 horas diárias.

Semelhante a determinação do tempo de funcionamento, também será variado as rotações por minuto do rotor da bomba, porém, tal variável necessita de um ajuste mais fino, visto que mesmo pequena alteração na rotação tem impactos significativos no consumo de energia.

Tratando-se destes impactos causados pela variação da rotação por minuto de uma bomba, Baptista e Lara (2010) definem uma semelhança hidráulica entre o comportamento de um modelo em relação a um protótipo. Desta forma, é possível estabelecer equações que relacionam as rotações com a vazão, altura manométrica e a potência da bomba. Levando em conta as diferenças no diâmetro dos rotores de protótipo e modelo, podem ser expressas as equações 20, 21 e 22.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_p}{n_m} \cdot \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^3 \quad (20)$$

$$\frac{H_p}{H_m} = \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^2 \quad (21)$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_p}{D_m}\right)^5 \quad (22)$$

Onde:

Q = Vazão [m^3/s];

H = Altura manométrica [m];

P = Potência [kWh];

D = Diâmetro do rotor [m];

n = Rotações por minuto [rpm].

3.4 VAZÃO DE PROJETO

A vazão de projeto irá depender diretamente do tempo de funcionamento da bomba, na Seção 3.3 traçou-se um gráfico analisando quantas horas representa o menor consumo de energia, desta forma pode-se utilizar a equação 17 para determinar a vazão, considerando o consumo de 200 L/hab/dia e a demanda diária determinada na Seção 3.2.

3.5 DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO

Como representado na Seção 2.3, em sistemas onde não ocorre o trabalho ininterrupto da bomba, é recomendada a utilização da equação de Forchheimer (15). Esta equação foi a utilizada para o presente estudo, visto que serão utilizadas diferentes tempos de funcionamento diário para a bomba.

O valor calculado de diâmetro não representa aquele que de fato será utilizado, visto que o valor final deve respeitar os diâmetros comerciais existentes. Para a realização deste trabalho foram considerados os diâmetros comerciais de 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 85 e 110.

Os valores utilizados para diâmetros internos estão expostos na Tabela 1, sendo que as tubulações em questão tratam-se de tubos de PVC soldável.

Tabela 1 – Diâmetro interno das tubulações

Diâmetro nominal (mm)	D Interno (mm)
20	17,0
25	21,6
32	27,8
40	35,2
50	44,0
60	53,4
75	66,6
85	75,6
110	97,8

Fonte: ABNT NBR 5648.

Vale notar, que para todos os cálculos realizados, o diâmetro considerado foi o diâmetro interno das tubulações, visto que cada tubulação de diâmetro nominal diferente, muda também a espessura de suas paredes, desta forma cada qual terá um diâmetro interno diferente.

3.6 PONTO DE OPERAÇÃO

Determinado o diâmetro da tubulação, deve-se então encontrar o ponto de operação em que o sistema trabalha. Primeiramente, determinou-se as curvas características do sistema para cada estudo de caso, e como já visto na Seção 2.2.3, este traçado conta com a determinação de um coeficiente K, que será uma constante na equação da curva do sistema (10), levando em conta o diâmetro e o comprimento equivalente da tubulação.

Para o estudo proposto, será considerado um aumento de 20% no comprimento da tubulação, dispensando assim a contabilização de cada peça específica no comprimento equivalente, visto que tal valor é o que se nota na maioria dos casos. Além disso, vale notar que o comprimento real da tubulação de recalque será medido através de simples modelos esboçados no programa Autocad.

Uma vez traçado a curva característica do sistema para cada estudo de caso, pode-se então buscar em catálogos bombas que melhor se enquadram nas características do projeto. O presente estudo irá promover o uso e comparação de bombas de dois diferentes fabricantes largamente utilizados no mercado brasileiro.

3.7 ÍNDICES DE DESEMPENHO

Além do ponto de operação, os catálogos das bombas específicas escolhidas também irão disponibilizar a potência e o rendimento de cada unidade. Com estes dados, analisaram-se os índices GPX e consumo específico, citados na Seção 2.4.

Para uma comparação efetiva dos gastos existentes em cada caso, é necessário definir o custo da tubulação, e comparar com as possíveis economias na energia gasta por cada sistema. A Tabela 2 mostra o custo por metro de tubulação, sendo que os preços mostrados representam o valor encontrado na cidade de Toledo – PR.

Tabela 2 – Custo de tubulações

Diâmetro Nominal (mm)	Preço (R\$/m)
20	R\$ 2,50
25	R\$ 3,50
32	R\$ 5,50
40	R\$ 8,00
50	R\$ 9,00
60	R\$ 15,00
75	R\$ 24,00
85	R\$ 37,00
110	R\$ 48,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do custo da instalação, deve-se contabilizar o gasto pela energia, para tal, é necessário a consulta a Resolução Homologatória nº 2.255 (ANEEL, 2017), de 20 de junho de 2017, que estabelece as tarifas de energia. Segundo esta resolução o custo da energia consumida é de R\$ 0,69118/KWh.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta Seção serão apresentados resultados encontrados com a aplicação dos métodos já propostos, para edificações de diferentes alturas geométricas, bem como estes foram obtidos.

4.1 EDIFICAÇÃO DE 6 PAVIMENTOS

Utilizando as formulações apresentadas na Seção 2, fez-se possível o cálculo das variáveis hidráulicas, como apresentado na Tabela 3, utilizando-se de um tempo de funcionamento de 4 horas diárias.

nº de pavimentos	6
Pessoas por família	4
Ap. por andar	4
Volume diário (m ³)	16,00
Altura geométrica (m)	19,55
Tempo de funcionamento (h)	4,00
Vazão (m ³ /h)	4,00
Diâmetro de recalque calculado (mm)	27,69
Diâmetro de recalque comercial (mm)	32,00
Diâmetro de recalque interno (mm)	27,80
Comprimento (m)	26,25
Le (m)	31,50
K	673158,83
Hm (m)	24,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos cálculos apresentados na Tabela 3, considerou-se como já mencionado um tempo de funcionamento de 4 horas, porém, devido ao ponto de operação, este tempo pré-determinado não será o mesmo aplicado em prática. O tempo realmente de funcionamento irá variar entre bombas, considerando-se a vazão em que cada uma irá trabalhar.

Ainda pela Tabela 3, é possível determinar a equação do sistema, sendo que se utilizando de uma tubulação de 32 mm, essa equação será a seguinte:

$$H_m = 19,55 + 673158,83 \cdot Q^{1,75} \quad (23)$$

Com a equação do sistema determinado, para uma tubulação de diâmetro comercial de 32 mm (tubulação de recalque), pode-se então, com a escolha de algumas bombas, determinar os possíveis pontos de operação em cada uma delas. Para este edifício, serão comparadas três bombas diferentes, denominadas aqui como bomba A, B e C. Essas bombas foram baseadas em modelos reais feitas por dois fabricantes. A Tabela 4 representa algumas características principais das bombas propostas.

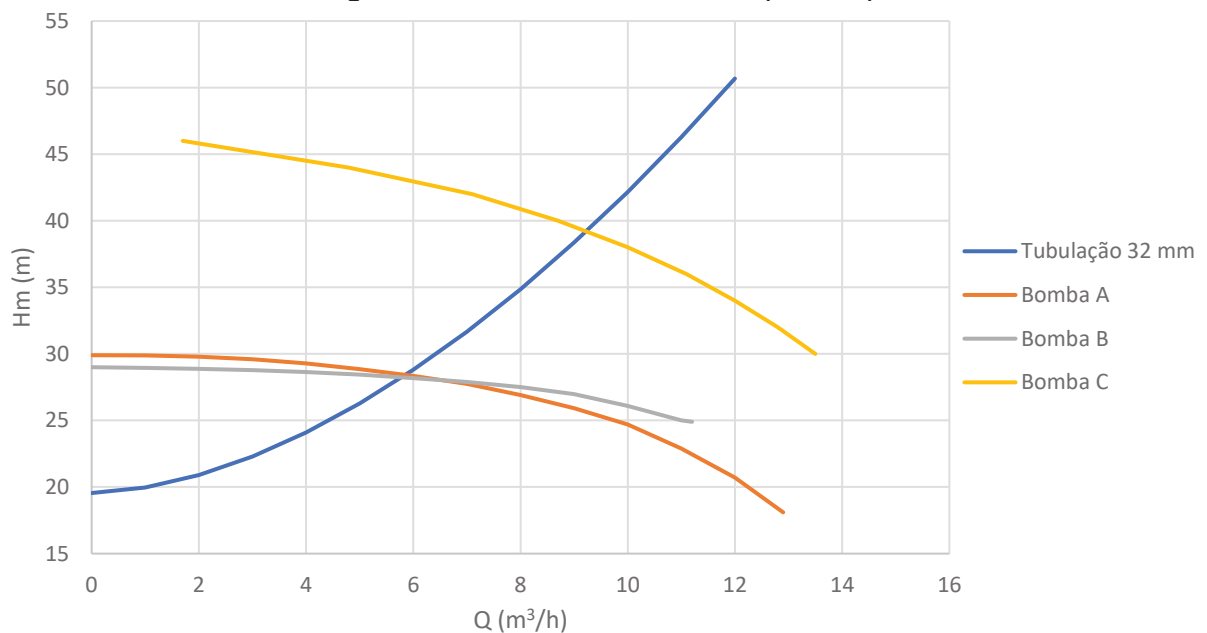
Tabela 4 – Características das bombas (6 Pav.)

Bomba	Rotações por minuto (rpm)	Diâmetro do rotor (mm)
A	3500	124
B	1750	238
C	3450	159

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 11 representa as curvas características de todas as bombas juntamente com a tubulação determinada pela Tabela 3. Sendo que a tubulação utilizada para a curva ascendente possui um diâmetro de 32 mm.

Figura 11 – Curvas características (Hm X Q)



Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações a seguir representam as bombas A, B e C respectivamente, e foram utilizadas para o traçado de suas curvas.

$$H_m = -0,00978 \cdot Q^2 + 0,4443 \cdot Q + 29,438 \quad (24)$$

$$H_m = -0,0461 \cdot Q^2 + 0,181 \cdot Q + 28,802 \quad (25)$$

$$H_m = -0,0994 \cdot Q^2 + 0,202 \cdot Q + 45,721 \quad (26)$$

Utilizando-se da equação de cada bomba e da tubulação, torna-se possível determinar o ponto de operação em que este sistema irá trabalhar. Juntamente com o rendimento característico de cada bomba, e com o cálculo da potência, torna-se possível o cálculo dos índices de desempenho conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Índices de eficiência (6 Pav.)

Bomba	Hm (m)	Q (m³/h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m³)	GPX (%)
A	28,63	5,94	47,20	0,98	0,17	32,24
B	28,30	5,81	26,50	1,69	0,29	18,31
C	39,15	9,21	46,00	2,14	0,23	22,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com este dimensionamento padrão, nota-se uma grande variação nos índices dependendo do conjunto motobomba utilizado. Pela Tabela 5 nota-se uma diferença no GPX de até 14% entre as bombas A e B, que apresentaram o maior e o menor índice respectivamente.

A Bomba B apresentou o menor índice principalmente pela sua baixa eficiência neste sistema. Já a bomba C, apesar de apresentar rendimento similar a Bomba A, resultou em um índice de menor valor devido a sua grande perda de carga em conjunto com a tubulação, possuindo altura manométrica até 10 m maior do que a perda das outras bombas. Já a Bomba A por sua vez apresentou os melhores índices, devido a menor perda de carga quando em combinação com a tubulação escolhida, perante a Bomba C, e elevado rendimento perante a Bomba B. Devido a isso, apenas a Bomba A será considerada para os cálculos a seguir.

Variando o tempo de funcionamento diário da Bomba A, foi possível determinar uma gama de diâmetros possíveis de serem utilizados pelo conjunto

motobomba proposto, considerando um tempo mínimo de 15 minutos diários, até 24 horas (funcionamento ininterrupto). A Tabela 6 exhibe os resultados encontrados.

Tabela 6 – Diâmetros para a tubulação de recalque (6 Pav.)

T (h)	Q (m ³ /h)	Diâmetro (mm)	
		Calculado	Comercial
0,25	64,00	55,38	60,00
0,50	32,00	46,56	50,00
1,00	16,00	39,16	
1,50	10,67	35,38	40,00
2,00	8,00	32,93	
2,50	6,40	31,13	
3,00	5,33	29,75	
3,50	4,57	28,62	
4,00	4,00	27,68	
4,50	3,56	26,88	32,00
5,00	3,20	26,18	
5,50	2,91	25,56	
6,00	2,67	25,01	
6,50	2,46	24,52	
14,50	1,10	20,06	25,00
15,00	1,07	19,89	
24,00	0,67	17,69	20,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com uma gama de diâmetros estabelecida, extrapolando limites de tempo de funcionamento estabelecidos por norma, torna-se possível promover uma comparação entre a eficiência de diferentes sistemas utilizando a Bomba A, a Tabela 7 representa os resultados encontrados.

Tabela 7 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (6 Pav.)

D (mm)	K	Q (m ³ /h)	T (h)	η (%)	P. (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)	EE (kWh)
60,00	30304,66	11,87	1,35	47,50	1,42	0,12	44,39	1,92
50,00	76020,39	10,96	1,46	48,00	1,40	0,13	41,62	2,05
40,00	219408,11	8,93	1,79	52,50	1,19	0,13	40,10	2,13
32,00	673158,83	5,94	2,70	47,20	0,981	0,165	32,24	2,64
25,00	2231901,44	3,22	4,97	31,00	0,84	0,26	20,31	4,20
20,00	6961421,88	1,68	9,50	22,00	0,62	0,37	14,38	5,93

Fonte: Elaborado pelo autor.

NOTAS: Q: Vazão; η : rendimento; T: Tempo de funcionamento diário; P: Potência; CE: Consumo específico; EE: Energia elétrica consumida diariamente.

Pela Tabela 7, nota-se que quanto maior o diâmetro utilizado, menor se torna a energia diária consumida. A Tabela 8 representa os custos que existem em cada

sistema de tubulação, assim como o custo mensal de energia consumida por cada sistema.

Tabela 8 – Custo por sistema (6 Pav.)

D (mm)	Custo médio mensal em energia (R\$)	Custo tubulação (R\$)
60	R\$ 39,81	R\$ 393,75
50	R\$ 42,46	R\$ 236,25
40	R\$ 44,07	R\$ 210,00
32	R\$ 54,82	R\$ 144,38
25	R\$ 87,04	R\$ 91,88
20	R\$ 122,86	R\$ 65,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da Tabela 6, percebe-se que quanto maior o diâmetro da tubulação utilizado, maior é o índice GPX. Porém, se compararmos por exemplo a tubulação de 40 mm com 60 mm, nota-se que o índice GPX não aumentou muito, enquanto o custo da tubulação aumenta em grande proporção. Desta forma, dentre as alternativas avaliadas, a tubulação de 40 mm apresenta a mais vantagem economicamente.

Comparando o sistema de 40 mm com o dimensionamento padrão inicial, onde utilizou-se um diâmetro nominal de 32 mm, é possível estabelecer um prazo em que tal instalação irá gerar economia para a instalação como um todo.

Entre os sistemas com tubulação de 32 e 40 mm, a diferença de consumo de energia diária é de 0,518 KWh, porém, a diferença entre o preço total da tubulação é de R\$ 65,63. Considerando a tarifa de energia, este valor será coberto pela economia de energia em 183 dias, com uma economia anual de R\$ 130,73.

Além dos gastos estipulados, a mudança de tubulação, juntamente com o tempo de funcionamento diário desta bomba resultou em uma melhora no índice GPX de até 7,86%, alcançando um índice final de aproximadamente 40%.

4.2 EDIFICAÇÃO DE 11 PAVIMENTOS

Assim como na Seção 4.1, esta edificação também irá contar com um dimensionamento padrão visando 4 horas de funcionamento diário como ponto de início para as comparações.

Tabela 9 – Cálculos hidráulicos (11 Pav.)

nº de pavimentos	11
Pessoas por família	4
Apartamentos por andar	4
Volume diário (m ³)	32,00
Altura geométrica (m)	34,32
Tempo de funcionamento (h)	4,00
Vazão (m ³ /h)	8,00
Diâmetro de recalque calculado (mm)	39,16
Diâmetro de recalque comercial (mm)	40,00
Diâmetro de recalque interno (mm)	35,20
Comprimento (m)	41,25
Le (m)	49,50
K	344805,07
H _m (m)	42,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 9 determina-se a equação da curva do sistema:

$$H_m = 34,32 + 344805,07 \cdot Q^{1,75} \quad (27)$$

A equação 27 trata-se de um sistema com diâmetro nominal de 40 mm, para este caso também serão comparadas três bombas com características diferentes como na Seção 4.1, possuindo rotações por minuto e diâmetro de rotor distintas uma das outras. A Tabela 10 mostra as características principais das bombas utilizadas para esta edificação.

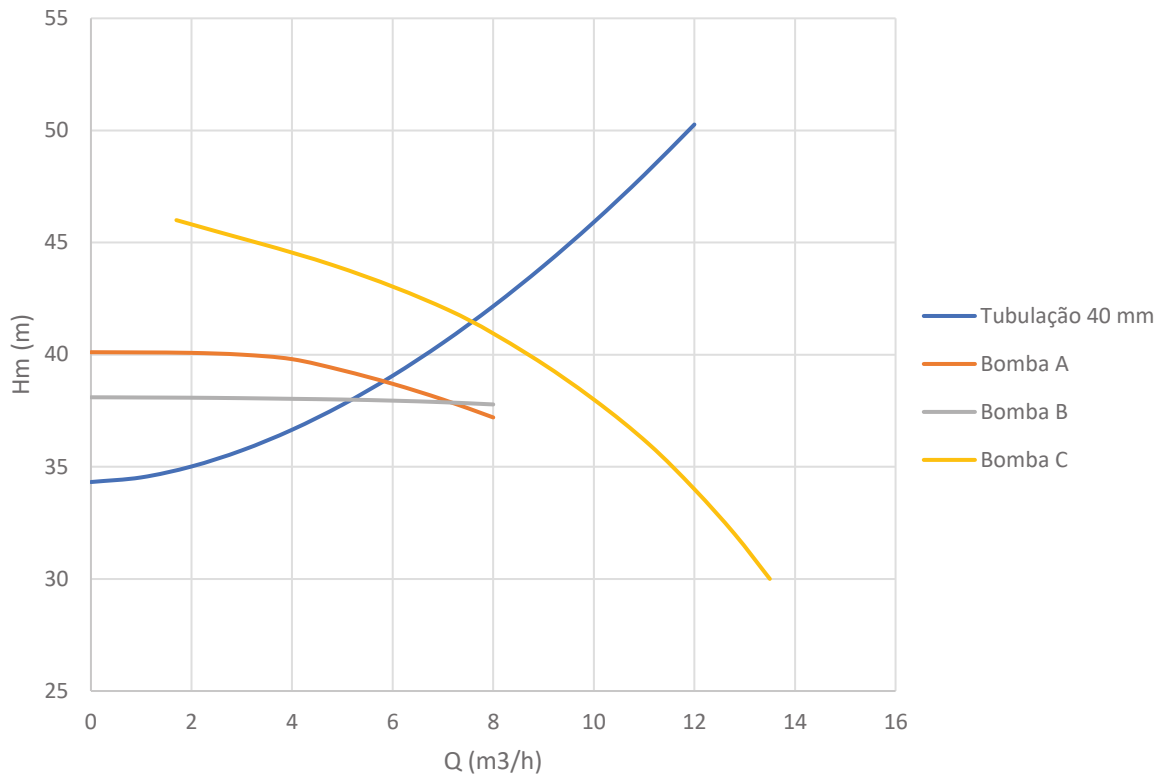
Tabela 10 – Características das bombas (11 Pav.)

	Rotações por minuto (rpm)	Diâmetro do rotor (mm)
A	3500	141
B	1750	278
C	3450	159

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 12 apresenta um gráfico contendo as curvas de todas as bombas analisadas juntamente com a curva do sistema.

Figura 12 – Curvas características (Hm X Q)



Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações a seguir representam as curvas das bombas A, B e C respectivamente.

$$H_m = -0,077. Q^2 + 0,2908. Q + 38,88 \quad (28)$$

$$H_m = -0,0059. Q^2 + 0,0098. Q + 38,08 \quad (29)$$

$$H_m = -0,0094. Q^2 + 0,202. Q + 45,721 \quad (30)$$

Utilizando as equações de cada bomba, possibilita-se o cálculo dos índices de eficiência com cada bomba, como demonstrado pela Tabela 11.

Tabela 11 – Índices de eficiência (11 Pav.)

Bomba	Hm (m)	Q (m³/h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m³)	GPX (%)
A	38,92	5,90	49,50	1,26	0,21	43,66
B	37,98	5,18	32,00	1,67	0,32	28,92
C	41,50	7,61	46,00	1,87	0,25	38,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo os índices encontrados pelas bombas, é possível afirmar que existe uma grande diferença nestes índices dependendo da bomba a ser utilizada, se comparado a bomba com o melhor e o pior índice GPX, nota-se que existe uma diferença de até 14%, com um consumo específico até 0,11 KWh/m³ menor.

Como para este edifício a bomba A também representou a maior eficiência energética, ela será utilizada para melhor análise de combinações de sistemas. A Tabela 12 apresenta os possíveis diâmetros de tubulação a serem utilizados para esta estação elevatória.

Tabela 12 – Diâmetros para a tubulação de recalque (11 Pav.)

T (h)	Q (m ³ /h)	Diâmetro (mm)	
		Calculado	Comercial
0,25	128,00	78,31	85,00
0,50	64,00	65,85	75,00
1,00	32,00	55,37	60,00
1,50	21,33	50,03	
2,00	16,00	46,56	50,00
2,50	12,80	44,03	
3,00	10,67	42,07	
3,50	9,14	40,48	
4,00	8,00	39,15	40,00
4,50	7,11	38,01	
5,00	6,40	37,03	
5,50	5,82	36,15	
6,00	5,33	35,38	
6,50	4,92	34,68	
7,00	4,57	34,04	
7,50	4,27	33,46	
8,00	4,00	32,92	
8,50	3,76	32,43	
9,00	3,56	31,97	32,00
24,00	1,33	25,01	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a gama de diâmetros estabelecida, calculou-se então todas as variáveis para cada caso até os índices de eficiência energética, como exibido pela Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (11 Pav.)

D (mm)	K	Q (m ³ /h)	T (h)	η (%)	P. (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)	EE (kWh)
85	9134,25	10,35	3,09	57,2	1,71	0,16	56,68	5,28
75	16678,18	10,16	3,15	57,0	1,69	0,17	56,07	5,34
60	47624,49	9,44	3,39	56,5	1,63	0,17	54,23	5,52
50	119467,86	8,16	3,92	55,15	1,50	0,18	50,99	5,86
40	344805,07	5,90	5,43	49,5	1,26	0,21	43,66	6,85
32	1057885,14	3,49	9,16	38,5	0,99	0,28	33,07	9,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

NOTAS: Q: Vazão; η : rendimento; T: Tempo de funcionamento diário; P: Potência; CE: Consumo específico; EE: Energia elétrica consumida diariamente.

A partir da Tabela 14, torna-se possível a comparação dos benefícios a longo prazo que a implantação de uma tubulação perante a outra pode vir a oferecer.

Tabela 14 – Custo por sistema (11 Pav.)

Dr (mm)	Custo médio mensal em energia (R\$)	Preço tubulação (R\$)
85	R\$ 109,48	R\$ 1.526,34
75	R\$ 110,66	R\$ 990,06
60	R\$ 114,42	R\$ 618,79
50	R\$ 121,70	R\$ 371,27
40	R\$ 142,12	R\$ 330,02
32	R\$ 187,61	R\$ 226,89

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tubulação de 50 mm apresenta uma economia de 0,985 KWh por dia em comparação com o dimensionamento padrão, sendo que tal dimensionamento resultou em uma tubulação de 40 mm. Já a diferença no custo inicial do material é de R\$ 41,25, considerando a energia economizada diariamente, e a tarifa cobrada por ela, este valor será compensado em 61 dias, gerando uma economia anual de R\$248,46.

Além dos valores estipulados de gastos, tem-se que o sistema de 50 mm, juntamente com seu respectivo tempo de funcionamento de 3,92 horas diárias, melhorou o índice GPX em até 7,3%. Com o índice de aproximadamente 51%, sua classificação segundo a tabela representada pela Figura 9 avança de G8 para G7.

4.3 EDIFICAÇÃO DE 16 PAVIMENTOS

Assim como realizados nas seções anteriores, o dimensionamento padrão para este caso também irá partir do ponto de funcionamento de 4 horas diárias, as variáveis hidráulicas são encontradas na Tabela 15.

nº de pavimentos	16
Pessoas por família	4
Ap. por andar	4
Volume diário (m ³)	48,00
Altura geométrica (m)	49,45
Tempo de funcionamento (h)	2,70
Vazão (m ³ /h)	18,00
Diâmetro de recalque calculado (mm)	52,91
Diâmetro de recalque comercial (mm)	60,00
Diâmetro de recalque interno (mm)	53,40
Comprimento (m)	56,25
Le (m)	67,50
K	64938,55
H _m (m)	55,42

Fonte: Elaborado pelo autor.

Determina-se então a equação deste sistema com uma tubulação de recalque de 60 mm:

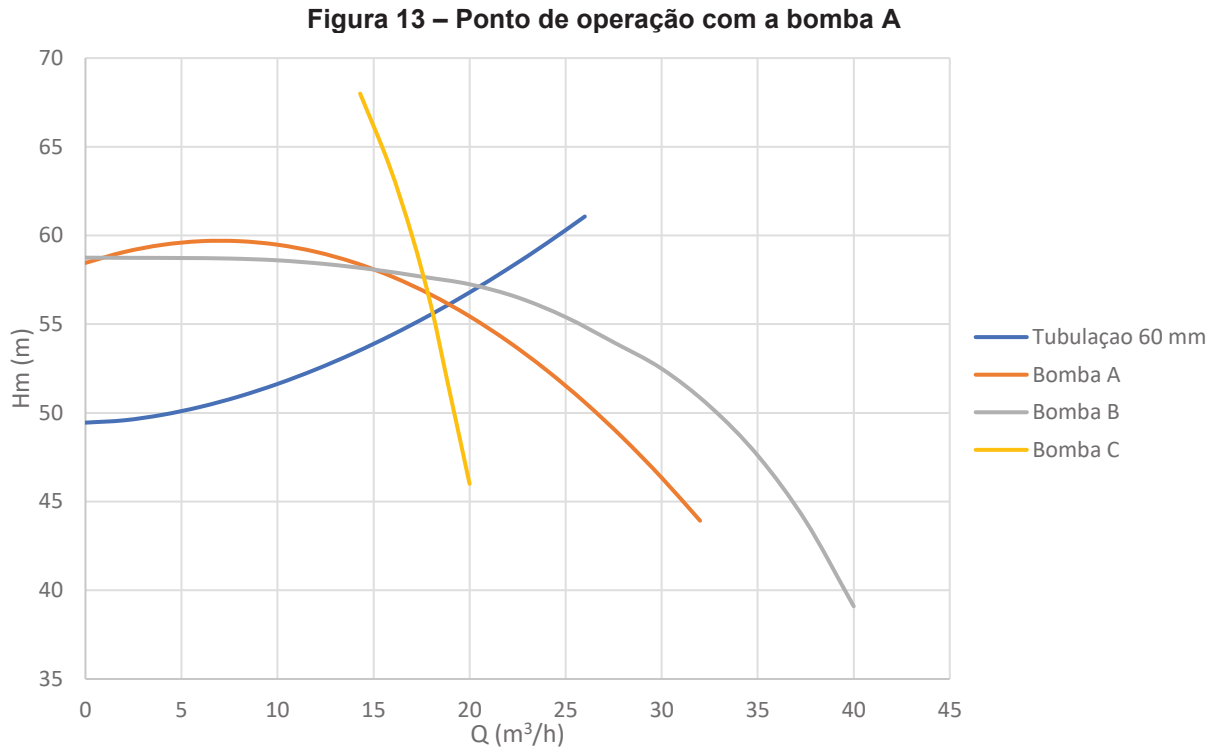
$$H_m = 49,45 + 64938,55 \cdot Q^{1,75} \quad (31)$$

Assim como nas seções anteriores, este dimensionamento também irá contar com três bombas distintas tanto em rotações por minuto, quanto em diâmetro do seu rotor, como representado pela Tabela 16.

	Rotações por minuto (rpm)	Diâmetro do rotor (mm)
A	3500	176
B	1750	333
C	3450	201

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 mostra as curvas das bombas consideradas, assim como a curva da tubulação de 60 mm já determinada pela Tabela 15.



As equações a seguir representam as curvas das bombas A, B e C respectivamente.

$$H_m = -0,0253. Q^2 + 0,2554. Q + 58,456 \quad (32)$$

$$H_m = -0,0202. Q^2 + 0,4029. Q + 57,428 \quad (33)$$

$$H_m = -0,2994. Q^2 + 6,3847. Q + 37,92 \quad (34)$$

Utilizando as equações de cada bomba, possibilita-se o cálculo dos índices de eficiência com cada bomba, como demonstrado pela Tabela 17.

Tabela 17 – Índices de eficiência (16 Pav.)

Bomba	Hm (m)	Q (m ³ /h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)
A	56,12	18,93	54,90	5,27	0,28	48,39
B	57,17	20,58	35,70	8,98	0,44	30,89
C	55,59	18,06	27,34	10,00	0,55	24,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por estes resultados, pode-se notar que a estação com a Bomba A se mostrou com a maior eficiência perante as outras novamente, tendo uma GPX até 24,06% maior quando comparado com a bomba C.

A Tabela 18 exibe a gama de diâmetros possíveis de serem utilizados em conjunto com a Bomba A, visto que essa apresentou os melhores índices dentre aquelas comparadas pela Tabela 17.

Tabela 18 – Diâmetros para a tubulação de recalque (16 Pav.)

Tempo de funcionamento (h)	Q (m ³ /h)	Diâmetro (mm)	
		Calculado	Comercial
0,25	192,00	95,91	110,00
0,50	96,00	80,65	85,00
1,00	48,00	67,82	75,00
1,50	32,00	61,28	
2,00	24,00	57,02	
2,50	19,20	53,93	60,00
3,00	16,00	51,53	
3,50	13,71	49,58	
4,00	12,00	47,95	
4,50	10,67	46,56	
5,00	9,60	45,35	
5,50	8,73	44,28	50,00
6,00	8,00	43,33	
6,50	7,38	42,47	
7,00	6,86	41,69	
7,50	6,40	40,98	
8,00	6,00	40,32	
8,50	5,65	39,71	40,00
20,00	2,40	32,07	
20,50	2,34	31,87	32,00
24,00	2,00	30,64	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a gama de diâmetros estabelecida, calculou-se então, como nas seções anteriores, todas as variáveis relacionadas ao consumo de energia, assim como o tempo real de funcionamento de cada sistema.

Tabela 19 – Índices de eficiência energética para diferentes tubulações (16 Pav.)

D (mm)	K	Q (m ³ /h)	T (h)	η (%)	P. (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)	EE (kWh)
85	12455,04	25,00	1,92	59,60	5,88	0,23	57,20	11,30
75	22741,60	23,48	2,04	58,80	5,74	0,24	55,03	11,75
60	64938,55	18,93	2,54	54,80	5,28	0,27	48,30	13,39
50	162900,84	13,46	3,57	48,40	4,44	0,33	40,81	15,85
40	470160,24	7,80	6,15	35,00	3,62	0,46	29,00	22,30
32	1442483,22	4,06	11,81	28,00	2,35	0,57	23,28	27,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

NOTAS: Q: Vazão; η: rendimento; T: Tempo de funcionamento diário; P: Potência; CE: Consumo específico; EE: Energia elétrica consumida diariamente.

Analisando a Tabela 19, nota-se que o dimensionamento padrão com uma tubulação de 60 mm possui um índice GPX de 48,30%, quando comparado com o diâmetro de 75 mm imediatamente superior, percebe-se uma melhora desse valor de até 7%.

Tratando-se de diâmetros superiores a 75 mm, é possível dizer que a energia consumida, assim como o índice GPX não sofrem grandes melhoras, enquanto o preço total da tubulação aumenta em grande proporção, como exposto pela Tabela 20. Devido a este fator, serão comparados os sistemas de 60 e 75 mm, visto que este último apresenta um melhor custo benefício do que os demais possíveis.

Tabela 20 – Custo por sistema (16 Pav.)

Dr (mm)	Custo médio mensal em energia (R\$)	Preço tubulação (R\$)
85	R\$ 234,42	R\$ 2.081,25
75	R\$ 243,71	R\$ 1.350,00
60	R\$ 277,65	R\$ 843,75
50	R\$ 328,58	R\$ 506,25
40	R\$ 462,38	R\$ 450,00
32	R\$ 575,98	R\$ 309,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Tabela 20, tem-se que a tubulação de 75 mm apresenta um custo inicial R\$ 506,25 mais cara do que a de 60 mm, porém, este valor será ultrapassado pela economia de energia em 447 dias. Além disso, a economia total por ano que esta mudança irá possibilitar é de até R\$ 412,90 reais.

Além de possuir a maior economia, este sistema também irá apresentar o melhor GPX do que os já encontrados anteriormente. Sendo seu GPX de 55,03%, este sistema é o primeiro a se classificar como G6 perante a Figura 9.

4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Esta seção visa comparar todos os resultados encontrados dentre as três edificações consideradas. Com os resultados encontrados nas seções anteriores, torna-se possível a busca por padrões, caso existam entre todos os casos.

Primeiramente, foram analisados os resultados encontrados com as diferentes bombas, de forma onde o diâmetro para as tubulações de cada edificação se mantiveram constantes, a Tabela 21 representa um resumo de todos os resultados encontrados, quanto a eficiência, para este caso.

Tabela 21 – Resumo de resultados com diferentes bombas

Pav.	Bomba	RPM	D. do rotor (mm)	Q (m ³ /h)	T (h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)
6	A	3500	124	5,94	2,70	47,20	0,98	0,17	32,24
	B	1750	238	5,81	2,75	26,50	1,69	0,29	18,31
	C	3450	159	9,21	1,74	46,00	2,14	0,23	22,98
11	A	3500	141	5,90	5,43	49,5	1,26	0,21	43,66
	B	1750	279	5,18	6,18	32,0	1,67	0,32	28,92
	C	3450	159	7,61	4,21	46,0	1,87	0,25	38,05
16	A	3500	176	18,93	2,54	54,90	5,27	0,28	48,39
	B	1750	333	20,58	2,33	35,70	8,98	0,44	30,89
	C	3450	201	18,06	2,66	27,34	10,00	0,55	24,33

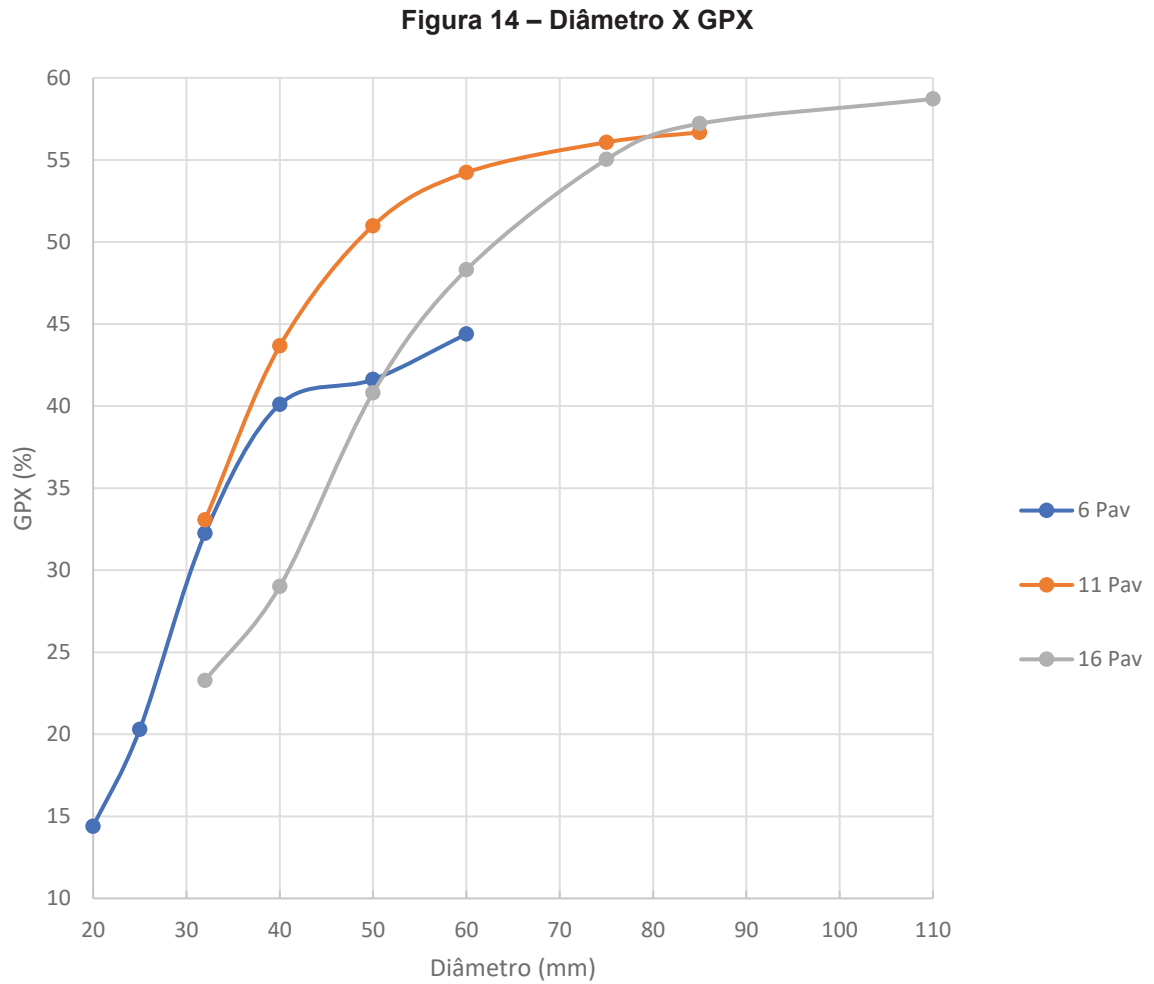
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desta tabela, pode-se notar que as bombas com 3500 rpm se provaram mais eficientes diante das outras. As bombas de 1750 rpm apresentaram baixos índices em geral.

Tratando-se das bombas de 3450 rpm, notamos que apesar de possuírem um bom rendimento, por vezes semelhante aquele fornecido pelas bombas de 3500, elas ainda não alcançam índices tão altos. O fator responsável por isso seria o ponto de operação em que estas bombas irão trabalhar com as tubulações escolhidas, pois como se nota pela Tabela 21, elas irão trabalhar em vazões maiores, elevando assim a perda de carga no sistema. Desta forma, grande parte do seu potencial energético acaba sendo desperdiçado pelo sistema.

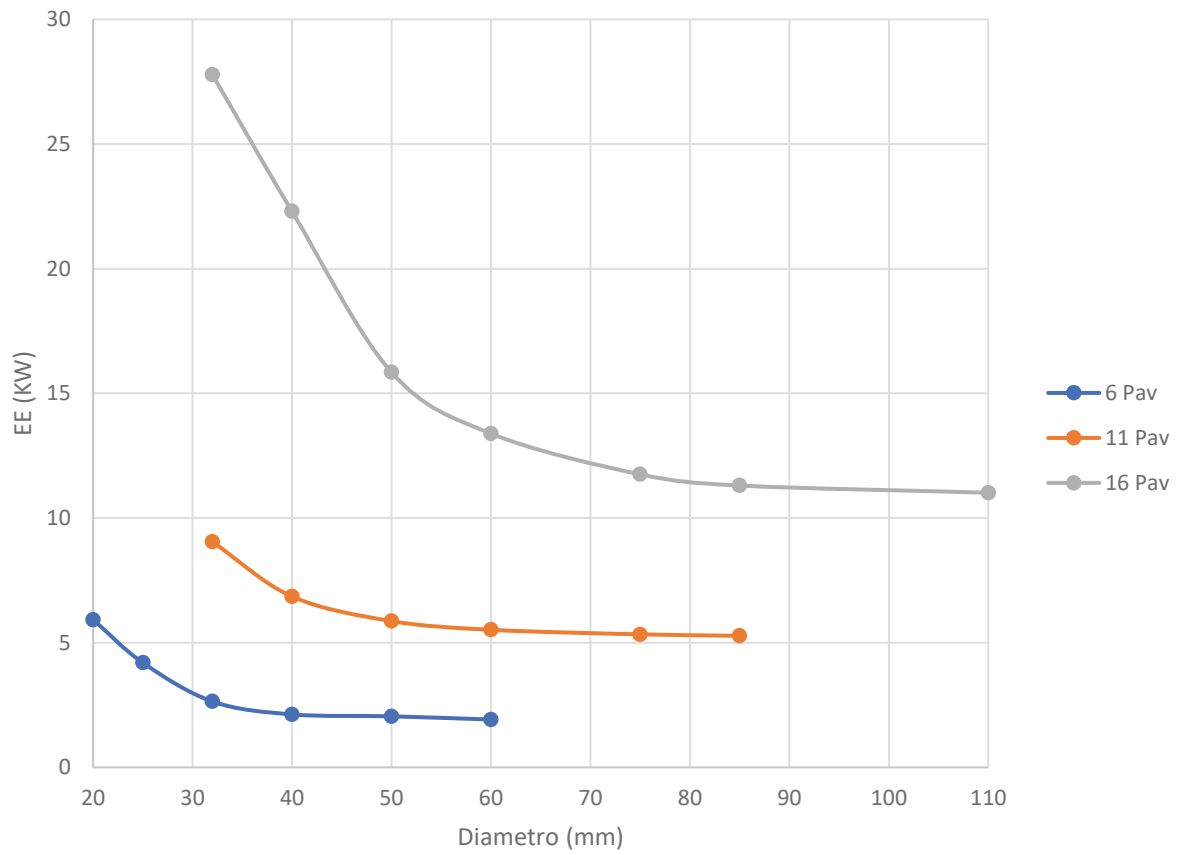
Como já mencionado, as bombas de rotação 3500 rpm forneceram os melhores índices, o que as levou a uma análise de diversas combinações de diâmetros de tubulação e tempo de funcionamento nas seções 4.1, 4.2 e 4.3. As

Figuras 14 e 15 representam os índices obtidos com a aplicação das bombas com essa rotação para cada edifício, relacionando esses índices com a gama de diâmetros possíveis de serem utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Energia elétrica consumida diariamente X Diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto pelas Figuras 14 e 15, sempre que o consumo de energia elétrica diminuiu, o GPX tende a aumentar, possuindo desta forma uma representação correta da eficiência de cada sistema. Além disso, é possível notar com ambos os gráficos, que a partir de certo ponto em cada edificação, a mudança de diâmetro e tempo de funcionamento tendem a não surtir mais tanto efeito no consumo de energia. Isso pode ser notado em todas as edificações.

4.4.1 Eficiência em edifícios com elevada altura geométrica

Através das análises em edifícios de até 16 pavimentos, nota-se que o índice GPX aumentou sua proporção com o aumento do número de pavimentos e consequentemente aumento da altura estática e da demanda. Diante desses dados, realizou-se o dimensionamento de estações para edifícios de 24 e 30 pavimentos.

Esses dimensionamentos visaram buscar o limite que pode ser alcançado pelos índices, visto que estes aparentam melhorar conforme a altura da estrutura. A

Tabela 22 representa os resultados alcançados por esses edifícios utilizando bombas de 3500 rpm, utilizando um diâmetro de tubulação que apresentou o melhor índice dentre os analisados.

Tabela 22 – Índices para edificações de 24 e 30 pavimentos

Pav.	D. do rotor (mm)	Dr (mm)	K	Q (m ³ /h)	T (h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m ³)	GPX (%)
24	199	85,00	17769,74	34,65	2,12	60,10	12,13	0,35	56,03
30	250	110,00	6403,76	63,56	1,46	61,60	26,84	0,42	58,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar com a Tabela 22 um aumento no índice GPX em relação as edificações anteriores. Para a edificação de 16 pavimentos, o índice máximo alcançado foi de 55,03%, já para as novas edificações, esse índice chegou até 58,08% para a edificação de 30 pavimentos. Ou seja, mesmo dobrando-se a altura estática e quase dobrando o consumo, o índice não sofreu grandes alterações.

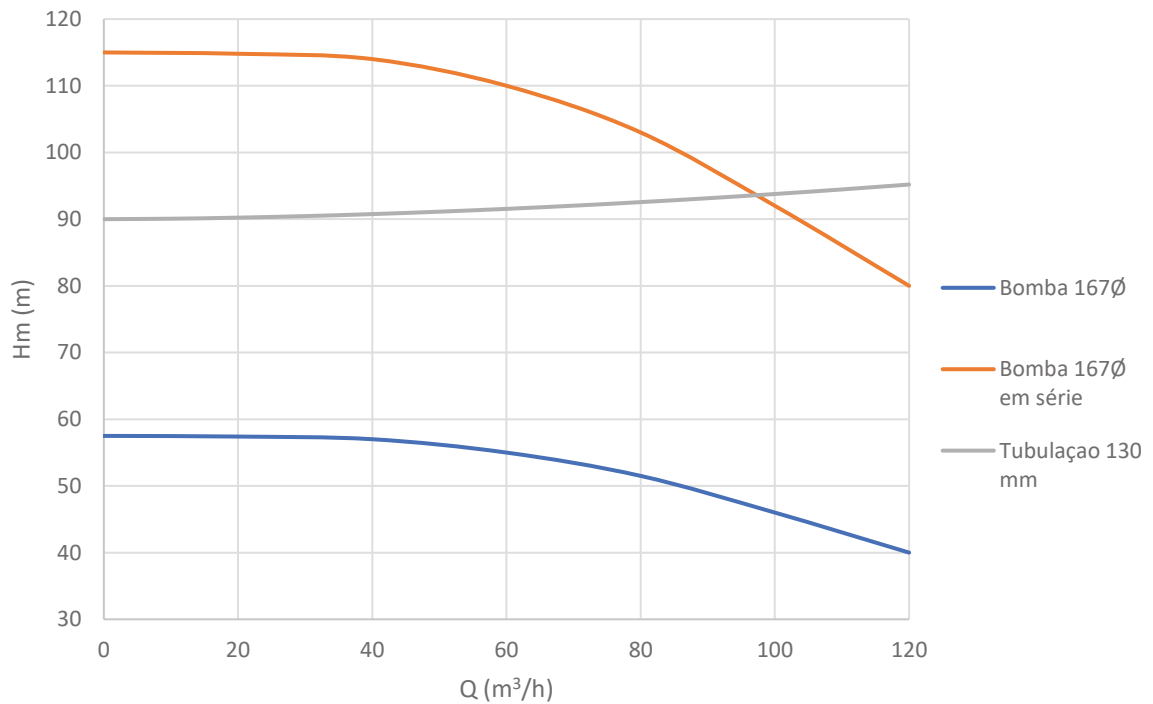
Diante dos cálculos, pode-se dizer que esse tipo de edificação possui um limite no índice GPX que pode chegar no máximo a valores próximos de 60%. Desta forma, a classificação dessas edificações pode chegar até um nível G6 segundo a Figura 9, possuindo uma eficiência considerada abaixo do recomendado.

Buscando uma solução para esse cenário, utilizando o prédio de 30 pavimentos como base, foi testado o uso de bombas associadas, mais precisamente foram analisadas bombas em série. Desta forma, as duas bombas idênticas em conjunto podem recalcar a mesma vazão de uma delas, porém, com o dobro da altura manométrica que apenas uma bomba alcançaria.

A

Figura 16 mostra a curva resultante da associação de duas bombas, assim como seu ponto de operação quando combinado com uma tubulação de 130 mm. A bomba utilizada possui um diâmetro rotor de 167 mm e trabalha a 3500 rpm.

Figura 16 – Curva característica de duas bombas idênticas em série



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto de operação exibido no gráfico foi utilizado para o cálculo dos índices que essa associação foi capaz de alcançar. A Tabela 23 exhibe os resultados encontrados. Para essa associação, fez-se necessário o uso de um diâmetro superior a 110 mm, para que a velocidade na tubulação não excedesse o limite de 3 m/s imposto pela NBR 5626 (ABNT, 1998).

Tabela 23 – Índices com associação de bombas para edificação de 30 pavimentos

Dr (mm)	K	Hm (m)	Q (m³/h)	T (h)	η (%)	P (KWh)	CE(KWh/m³)	GPX (%)
130	1996,28	93,70	98,91	0,94	79,20	31,88	0,32	76,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante destes resultados, fica claro um aumento em grande proporção do índice GPX para essa edificação. O índice antes que alcançava valores de até 58% com o uso de uma bomba, agora chega a 76% com o uso de bombas em série. Dessa

forma, essa associação de bombas alcançou uma classificação de excelente performance segundo o índice GPX.

Esse grande salto em performance deve-se principalmente pelo elevado aumento do rendimento da bomba. Como pode ser visto, a bomba utilizada em série possui um rendimento próximo a 80%, enquanto as bombas anteriormente utilizadas isoladamente possuíam rendimentos próximos a 60%. Essa diferença deve-se ao fato de que entre os fabricantes comuns, as bombas que apresentam os melhores rendimentos são aquelas onde a razão entre altura manométrica e vazão é menor.

Dessa forma, com a associação de duas bombas com baixa altura manométrica e elevada vazão, pode-se vencer a altura estática do edifício elevado e ao mesmo tempo atender a demanda e melhorar a eficiência do conjunto, resultando nos melhores índices GPX analisados.

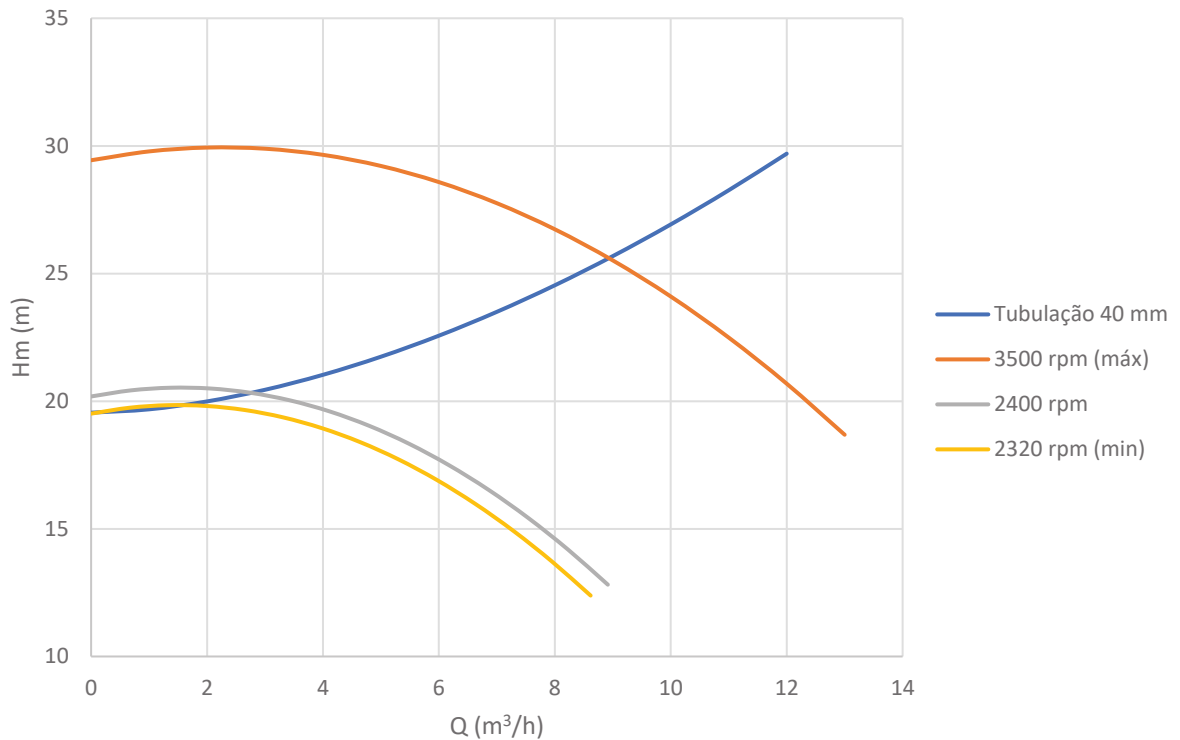
Se comparado a energia gasta com apenas uma bomba na edificação de 30 pavimentos com o uso de bombas em série, existe uma diminuição no consumo de energia diária de até 9 kWh. Dessa forma, é possível economizar 3385 kWh por ano em apenas um edifício dessa magnitude com o uso de bombas em série. Caso essa medida fosse aplicada em diversos edifícios, a economia de energia pode chegar a valores muito maiores.

4.5 VARIAÇÕES NA VELOCIDADE DO ROTOR

Como mencionado na Seção 3.3, as rotações de uma bomba possuem uma semelhança mecânica com as demais variáveis hidráulicas, desta forma, caso ela seja alterada, todas as outras variáveis, como a vazão, a altura manométrica e a potência também serão alteradas. Para a variação das rotações de uma bomba, é necessário o uso de um inversor de frequência, capaz de variar a frequência em que a bomba é designada a trabalhar por fábrica, para os cálculos a seguir, o uso deste aparelho será considerado juntamente com o conjunto motobomba.

Para a realização de um protótipo, a semelhança mecânica deve ser levada em consideração juntamente com a curva da bomba, onde a menor velocidade possível de rotação será aquela onde a curva da bomba em *shut-off* ($Q = 0$) coincide com a curva da tubulação. A Figura 17 representa a curva da menor rotação por minuto possível para a edificação de 6 pavimentos.

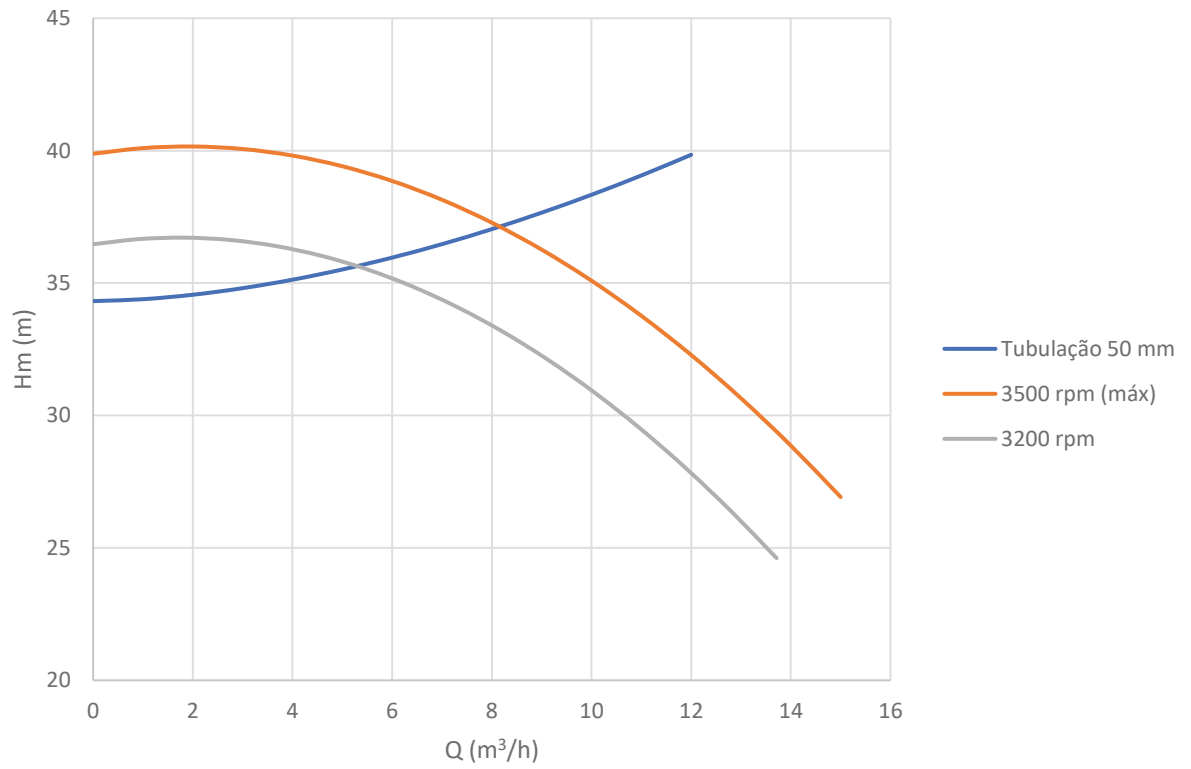
Figura 17 – Curva característica de modelo e protótipo (6 pavimentos)



Fonte: Elaborado pelo autor.

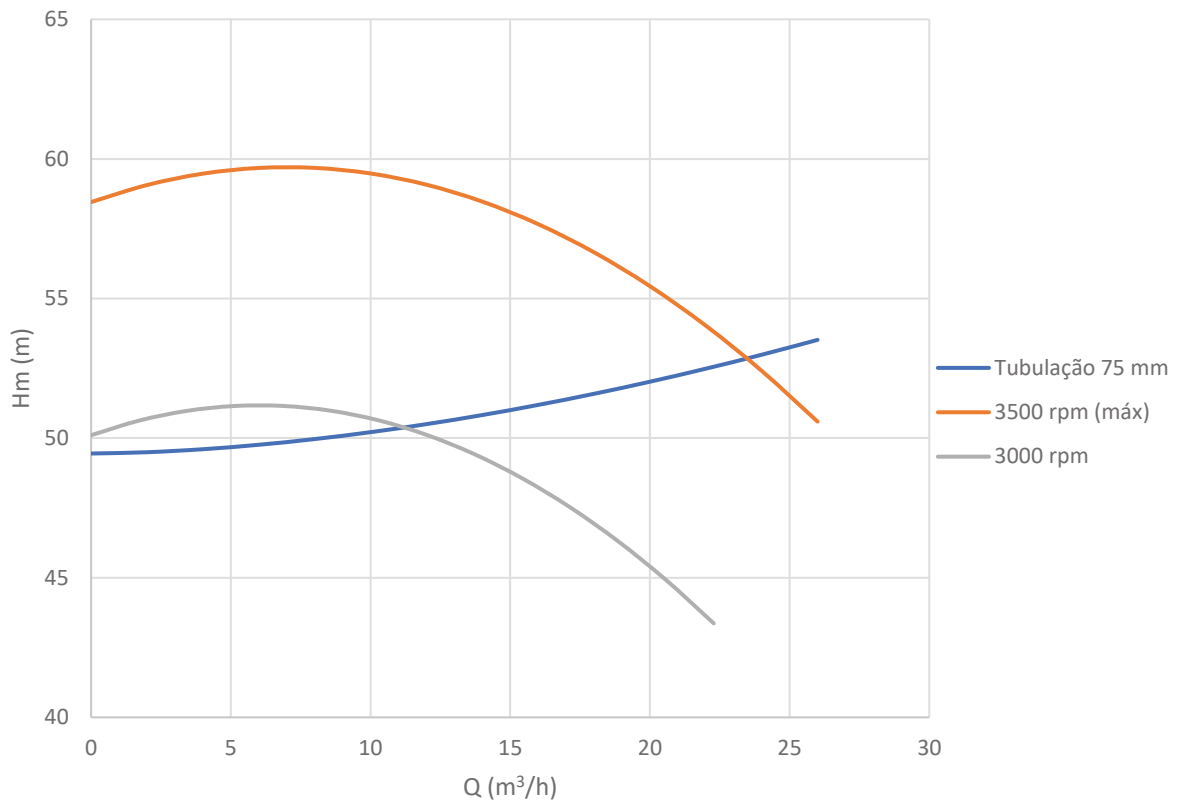
A curva em amarelo representa a menor velocidade possível do rotor, para que este funcione em conjunto com essa edificação. A limitação se deve a altura estática da situação, que neste caso chega a 19,55 m. Caso a velocidade de rotação diminua mais do que o RPM mínimo, as curvas da bomba e tubulação nunca iriam se encontrar.

Diante disso, e visando uma maior eficiência energética, a curva em cinza da Figura 17 representa um protótipo proposto do modelo de bomba de 3500 rpm utilizado para a menor edificação. Também foram idealizados protótipos para as outras edificações, suas curvas podem ser encontradas pelas Figuras 18 e 19. A Tabela 24 resume os resultados obtidos com a variação dessas rotações representadas pelos gráficos.

Figura 18 – Curva característica de modelo e protótipo (11 pavimentos)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Curva característica de modelo e protótipo (16 pavimentos)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Comparação entre modelos e protótipos

Pav.	RPM _m	P _m (KWh)	Q _m (m³/h)	H _m (m)	GPX _m (%)	RPM _p	P _p (KWh)	Q _p (m³/h)	H _p (m)	GPX _p (%)
6	3500	1,19	8,93	25,60	40,10	2400	0,29	2,76	20,33	50,51
11	3500	1,50	8,16	37,13	50,99	3200	0,93	5,30	35,64	53,12
16	3500	5,75	23,48	52,85	55,03	3000	2,62	11,21	50,38	57,73

Fonte: Elaborado pelo autor.

NOTAS: m: modelo; p: protótipo.

Como pode ser notado pela Tabela 24, com 6 pavimentos a diminuição na rotação, e por consequência a maior eficiência obtida foram maiores. Este resultado se deve ao fato de que a menor edificação possui uma menor relação entre altura estática e perda de carga, desta forma, tornou-se possível uma grande diminuição na velocidade de rotação, diminuindo assim a altura manométrica consideravelmente.

A aplicação do inversor de frequência aparenta ser excelente à primeira vista, porém, sua aplicação não é bem assim na prática. Para os cálculos aqui realizados, considerou-se o mesmo rendimento inicial da bomba para os protótipos, mas isso não é verdade. Na prática o inversor de frequência possui um rendimento próprio que também deveria ser considerado nos cálculos, além disso, a mudança do ponto de

operação do sistema gera uma diminuição no rendimento da própria bomba, tornando esta medida nem sempre vantajosa (BASTOS, 2015).

Segundo Bastos (2015), a utilização de inversores de frequência para a variação de velocidade em bombas só começa a gerar economias quando a altura estática representa no máximo metade da altura manométrica. Segundo esta pesquisa, as edificações estudadas neste trabalho, quando postas em prática não devem apresentar vantagem, pois no melhor dos casos a altura estática representa 76% da altura manométrica.

5 CONCLUSÕES

Para as edificações inicialmente analisadas de até 16 pavimentos, foi possível notar que existe uma diferença considerável entre GPX para diferentes bombas utilizadas. Por vezes, apenas pela escolha da bomba esse índice pôde variar em até 15%, mostrando que a escolha da bomba ideal para cada caso é de grande importância para uma boa eficiência.

A variação do tempo de funcionamento e dos diâmetros utilizados também mostraram diferença nos índices, causando alterações de até 10% no índice GPX em algumas edificações.

Em geral, para as edificações analisadas, o índice GPX mostrou-se abaixo do recomendado. O rendimento das bombas analisadas desempenhou um papel fundamental na obtenção desses resultados, por se mostrarem em geral abaixo da faixa de 60%. Desta forma, pode-se dizer que a busca por opções de equipamentos com um rendimento elevado seria uma possível alternativa para o aprimoramento deste índice.

A utilização de bombas em série se mostrou uma alternativa muito eficiente para a melhoria da eficiência energética em alguns casos. Essa associação foi capaz de aprimorar o índice GPX em até 18% para uma edificação de 30 pavimentos, sendo assim uma boa alternativa para casos de elevada altura estática e grande vazão. E vale notar que o rendimento foi de grande importância no aprimoramento deste índice nesta associação de bombas.

O uso de inversores de frequência em bombas para variar sua rotação apresenta resultados satisfatórios dependendo do caso analisado. Para a edificação de 6 pavimentos por exemplo, onde havia uma grande perda de carga no sistema, tal medida aprimorou o índice GPX em até 10%. Porém, apesar dessa melhora no índice GPX, na prática, o rendimento reduzido gerado pelo uso do inversor pode diminuir e até mesmo anular essa melhora, tornando esta medida nem sempre eficaz.

A aplicação do índice GPX provou-se eficiente, representando corretamente o gasto energético de cada sistema. Apesar de não ser um medidor tão preciso quanto o simples cálculo do consumo específico, esse índice é importante pois é capaz de classificar qualquer tipo de sistema em uma mesma tabela. Desta forma, não se faz necessária a posse de uma base de dados para comparação quando esse índice é utilizado, visto que ele possui sua própria classificação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Homologatória N° 2.255**. ANEEL, 2017.

ALFA LAVAL CORPORATE AB. **Otimizar para economizar**: Economia significativa por meio de bombeamento eficiente. Suécia. BPMA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5626. **Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5626. **Instalação predial de água fria**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5648. **Sistemas Prediais de água fria Tubos e Conexões de PVC**. Rio de Janeiro, 2010.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

BASTOS, S. **BOMBAS CENTRÍFUGAS E INVERSORES DE FRENQUÊNCIA**.

Disponível em: <[linkedin.com/pulse/bomba-centrifugas-com-inversores-de-frequencia-economia-bastos](https://www.linkedin.com/pulse/bomba-centrifugas-com-inversores-de-frequencia-economia-bastos)>. Acesso em: 05 abr. 2018.

BRUSTOLINI, E. J. L. **Estudo da eficiência energética da estação elevatória de água bruta do Ribeirão São Bartolomeu – SAAE de Viçosa**. Viçosa, 2012.

GANGHIS, D. **Bombas Industriais**. Salvador: CEFET/BA, [2006].

GHISI, E. **Instalações prediais de água fria**. Florianópolis: UFSC, 2004.

GOMES, H. B. **Sistemas de bombeamento: eficiência energética**. 1. Ed. João Pessoa. Editora Universitária/UFPB. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tamanho da família brasileira**. Disponível em: <<https://teen.ibge.gov.br/censo/274-teen/mao-na-roda/1770-a-familia-brasileira.html>>. Acesso em: 25 set. 2017.

SILVA, J. P. Escoamento de Fluidos e Máquinas de Fluxo. Disponível em <www.slideshare.net/JosemarPereiradaSilva/bombas-2013-2>. Acesso em: 20 abr. 2018

KSB Região América. **Manual de curvas características**. 2005.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MACINTYRE, A. J. **Manual de instalações (Hidráulicas e Sanitárias)**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

MONTENEGRO, L. L. B. et al. Análise econômica das alternativas do sistema de bombeamento da cidade do conde. In: Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, 2006. **Anais...** João Pessoa, 2006.

NETTO, A. et al. **Manual de Hidráulica**. 8. Ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1998.

PEREIRA, J.A.R.; SOARES, J. M. **Rede Coletora de esgoto sanitário: projeto, construção e operação**. 1. Ed. Belém: UFPA, 2006. p 296.

REGIS, R. L. **Eficiência energética em processos de bombeamento d'água**. Salvador: Escola Politécnica da UFBA, 2010.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. Ed. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos – SP, 2009.

RIBEIRO, J. T. G. **Sistemas elevatórios de águas residuais em edifícios**. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2014.

RIVENTA, DERITEND IND. **Green Pump Index – A methodology to benchmark in situ Pump performance (Whitepaper)**. 2011.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2013**. Brasília, 2014.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. Ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1990.

VIVAS, E. et al. **Estudos de otimização energética em estações elevatórias: Uma metodologia para sua seleção**. [S. l.: s. n.], [2014].