

ANÁLISE DA VIABILIDADE NO USO DE VARIADORES DE VELOCIDADE PARA CONTROLE NO BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Guilherme Henrique, gui_rodrrigues@hotmail.com¹

Mariane Cordeiro Gasques, mariane_gasques@hotmail.com¹

João Hermes Clerici, joao_clerici@usf.edu.br

Universidade São Francisco, R. Waldemar César da Silveira, 105
Jardim Cura D'Ars (SWIFT), Campinas - São Paulo

RESUMO Em sistemas de distribuição de água existem dois métodos de controle de vazão amplamente conhecidos, o de válvula de estrangulamento, mais antigo e mais utilizado, bem como o de controle por VSDs (Variable Speed Drives), variando a velocidade da motobomba. Atualmente tem-se um consumo alto de energia com o uso de válvulas de estrangulamento, já que as mesmas controlam o fluxo de água e a motobomba trabalha em sua potência nominal, que muitas vezes vai além da necessidade de vazão do sistema e com agravamentos quando os sistemas estão mal dimensionados. Visando comprovar a eficiência no ganho energético no uso dos VSDs este estudo descreve e compara os dois sistemas de controle na distribuição de água na estação de tratamento de Louveira - SP. O artigo ainda demonstra a viabilidade do uso dos VSDs para a estação estudada, visto que esta viabilidade é dependente de diversos fatores de bombeamento, através da modelagem pelo software EPANET e comprovação gráfica da eficiência, potência e energia consumidas para a mesma necessidade de vazão, dados coletados da própria estação. Os resultados mostram um ganho significativo na utilização dos dispositivos variadores de velocidade, comprovando que para a estação de Louveira além do ganho energético na utilização dos mesmos, o investimento para a implementação tem um retorno breve, porém ainda não alcança eficiência máxima por estar superdimensionado para a demanda atual.

PALAVRAS-CHAVE VSD (Variable Speed Drive), Motobombas, Válvulas, Eficiência, Economia

INTRODUÇÃO

No Brasil ao longo dos anos houve um aumento significativo na demanda de água, devido ao crescimento populacional e à crescente no consumo per capita, condição a qual os municípios trabalham constantemente para reverter com a conscientização da população e tarifas de penalização para consumos excessivos.

Existe então uma alta significativa nos gastos de energia para o fornecimento e gestão na distribuição de água decorrentes desse consumo. Em 2018 as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) atingiram o valor de R\$ 6,19 bilhões de reais, cerca de 1 bilhão a mais do que no ano anterior.

Posto que grande parte dessas despesas são desperdícios decorrentes do uso ineficiente dos equipamentos de bombeamento para a distribuição de água, em especial no controle dos motores elétricos, torna-se importante buscar alternativas que otimizem esses sistemas e reduzam as perdas.

As bombas d'água são movidas por motores elétricos que são mecanicamente acoplados por eixos e movimentam uma hélice propulsora dentro do sistema de distribuição de água, esse conjunto é chamado de motobomba, que trabalha com o objetivo de aumentar pressão dentro das tubulações de forma que com que a água chegue até pontos mais distantes de sua área de captação.

Atualmente o avanço tecnológico dentro da eletrônica de potência permite utilizar recursos precisos, que auxiliam nas reduções de perdas e são grandes aliados na busca por eficiência energética, como os VSDs (Variable Speed

Drive¹). O variador permite variar parâmetros de propriedade elétrica como: tensão e frequência por meio de transistores IGBT, que controlam propriedades mecânicas como: torque e velocidade. Dessa forma é possível ajustar dentro da necessidade da carga a melhor relação de propriedades que fazem com que o motor opere de maneira mais eficaz.

Com os motores trabalhando conforme a demanda real do sistema que oscila no tempo, é possível variar parâmetros elétricos para controle de velocidade dos motores que permite reduzir a potência demandada do sistema em períodos de menor consumo de água, gerando uma redução no consumo de energia.

Outro ponto a favor dos variadores de velocidade está em sua tecnologia embarcada para conexões em rede, nos dias atuais a maior parte dos VSDs disponíveis em mercado possuem rede de comunicação, com opções de rede em Ethernet e outros protocolos que permitem uma integração com sistemas supervisórios trazendo conectividade, informação de carga e operação remota aos controladores das subestações.

Apesar do uso de VSDs ser amplamente difundido no mercado, os métodos de controle de vazão mais utilizados ainda são os convencionais: controle por válvulas de estrangulamento, sistema liga/desliga, e sistema de by-pass. Esses métodos ocasionam mudanças drásticas no sistema em um curto período de tempo gerando um distúrbio chamado golpe de ariete, que é uma pressão nas paredes de uma

¹ Variador de velocidade, conhecido comercialmente como inversor de frequência.

tubulação quando há mudança brusca no movimento do líquido, o qual pode ser eliminado com o controle preciso de velocidade e recursos de aceleração e desaceleração [1]. Dessa forma, surge a motivação deste trabalho que é avaliar o uso de VSDs em um sistema de distribuição de água. O trabalho será desenvolvido utilizando a modelagem em computador de um sistema de distribuição de água com os dados coletados na Estação de Tratamento de Água de Louveira.

A partir dos resultados obtidos, será feita a comparação da aplicação de uso de variadores de velocidade com sistemas convencionais comandados por válvulas de estrangulamento, demonstrando a viabilidade do investimento em sistemas por VSDs.

A parte estrutural do trabalho, tem como referencial teórico estudos de aplicações em sistemas hidráulicos com aplicações semelhantes à estudada, exemplos reais de investimentos em atualizações de modelos de distribuição de água, operação de motores elétricos em regime CA (Corrente Alternada), e controle por variadores de velocidade em aplicações CA. A metodologia é baseada em cálculos e simulações de operações em sistemas de distribuição de água em um determinado período de tempo, onde será possível apresentar resultados e compará-los com dados de operações atuais. Como resultado dessa comparação será possível demonstrar a viabilidade do investimento necessário para a implementação de um sistema de controle utilizando VSDs em redes de distribuição de água.

II.REFERENCIAL TEÓRICO

Para elaboração das pesquisas, levantamentos de dados e análise dos comportamentos dos sistemas de distribuição de água, é necessário um breve estudo sobre os componentes principais que compõem uma instalação hidráulica desse porte.

O principal componente a ser estudado neste artigo e a sua aplicabilidade dentro de sistemas hidráulicos é o drive variador de velocidade (VSD). Os variadores de velocidade para aplicações em baixa tensão comumente utilizam inversores de frequência de seis degraus e modulação por PWM.

A Figura 2.1 mostra um circuito que produz uma saída trifásica em corrente alternada. A principal função deste circuito é no controle de rotação do motor de indução, onde a frequência de saída do circuito pode variar. As chaves são fechadas e abertas na sequência mostrada na Figura 2.2. [2]

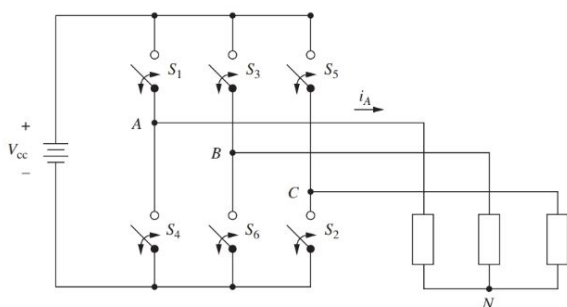


Figura 2.1 - Inversor trifásico [2].

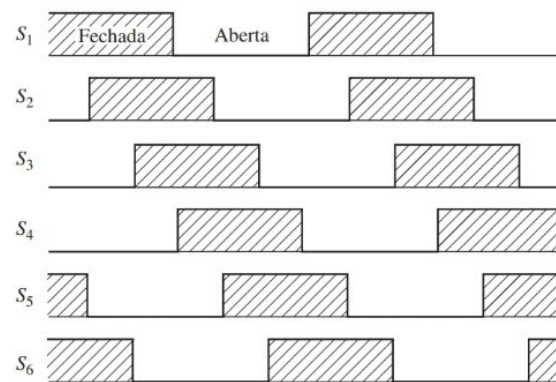


Figura 2.2 - Sequência de chaveamento para os seis degraus de saída [2].

A velocidade de regime de um motor de indução é ligeiramente menor que a velocidade síncrona e depende do escorregamento. Para um motor de indução com número de pólos p e frequência da rede de alimentação f [Hz], a velocidade síncrona, em rpm, é dada por:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

E a velocidade do motor, em rpm, é dada por:

$$n = (1 - s)n_s \quad (2.2)$$

Onde s é escorregamento, que é calculado por:

$$s = (n_s - n)/n_s \quad (2.3)$$

Se a frequência elétrica aplicada sofrer alterações, a rotação do motor mudará proporcionalmente. Todavia, se a tensão aplicada for mantida constante quando a frequência diminuir, o fluxo magnético no entreferro aumentará para o ponto de saturação. É desejável manter o fluxo no entreferro constante e igual ao seu valor nominal. Isto é efetuado variando a tensão aplicada proporcionalmente com a frequência. [2]

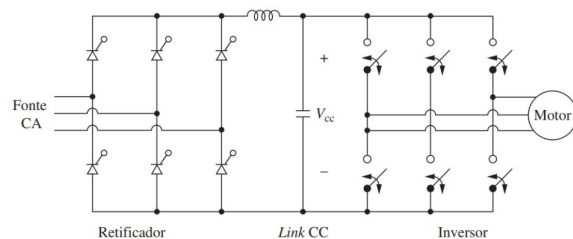


Figura 2.3. Conversor CA-CA com um link CC [2].

Esse tipo de controle de velocidade de motores de indução é chamado volts/hertz ou V/Hz.

O inversor com PWM é útil numa aplicação com volts/hertz porque a amplitude da tensão na saída pode ser ajustada mudando a taxa de modulação. A entrada CC para o inversor pode vir de uma fonte não controlada neste caso. A configuração na Figura 2.3 é classificada como um

conversor CA-CA com um link CC entre as duas tensões CA.

A modulação por largura de pulso pode ser usada para os inversores trifásicos assim como para os inversores monofásicos. Basicamente, cada chave é controlada pela comparação da referência da onda senoidal com a onda triangular da portadora. A frequência fundamental na saída é a mesma da onda de referência e a amplitude de saída é determinada pelas amplitudes relativas das ondas de referência e da portadora.

No caso do inversor trifásico de seis degraus, as chaves na Figura 2,1 são controladas aos pares, (S1, S4), (S2, S5) e (S3, S6). Quando uma chave num par é fechada, a outra é aberta. Cada par de chaves necessita de uma referência com onda senoidal. As três senóides de referências são separadas por 120° para produzir uma saída trifásica balanceada. A Figura 2.4 mostra uma portadora triangular e as três ondas de referências [2].

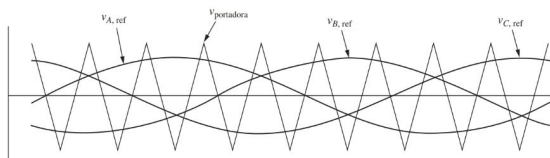


Figura 2.4. Formas de onda da portadora e referência para o funcionamento da PWM com mf ma 9 e 0,7 para o inversor trifásico da Figura 2.1 [2].

Os circuitos inversores de frequência são basicamente o coração dos variadores de velocidade, é por definição circuitos com aplicações em acionamentos de motores CA no ajuste da rotação, como bombas centrífugas [2].

“Inversores são circuitos que convertem CC em CA. Mais precisamente, os inversores transferem potência de uma fonte CC para uma carga CA. Os conversores em ponte completa controlados podem funcionar em alguns casos como inversores, mas é preciso que haja uma fonte CA para estas ocasiões. Em outras aplicações, o objetivo é o de criar uma tensão CA quando apenas uma fonte CC está disponível. [...] Os inversores são usados em aplicações como: acionamentos motores CA com ajuste da rotação, fontes de alimentação sem interrupção (UPS) e funcionamento de aparelhos CA a partir da bateria de automóveis.” [2]

O consumo de energia é mostrado pela curva superior do gráfico da figura 2.1, corresponde a um sistema de controle utilizando válvulas de estrangulamento de fluxo [3]. Já na curva inferior, o gráfico mostra o comportamento do sistema usando VFD (Variable Frequency Drive²), que permite o controle da velocidade do motor e consequentemente o fluxo.

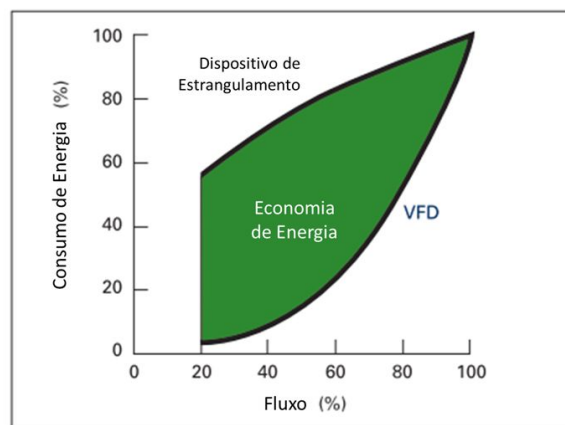


Figura 2.5. Consumo de energia em função do fluxo para sistemas com controle de fluxo por VFD e por válvula de estrangulamento [3].

Após essa breve introdução aos circuitos inversores de frequência, onde foi apresentado os conceitos de funcionamento do acionamento, será introduzido outro componente elétrico que compõe o sistema estudado, os motores elétricos.

Motores elétricos segundo são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica, disponibilizada por um eixo em rotação [5].

Entre os motores em CA (corrente alternada) os mais importantes podem ser classificados nos seguintes tipos: síncronos e assíncronos. O motor CA assíncrono é também conhecido como motor de indução, pois seu funcionamento é baseado em indução magnética, e sua estrutura é mostrada na Figura 2.6.

Os motores de indução trifásicos e monofásicos representam um valor próximo de 95% do total de motores instalados nos setores industrial, rural, comercial e residencial. Por outro lado, são responsáveis por aproximadamente 75% do total de potência instalada classificadas como motores. Sua enorme empregabilidade deve-se as suas características operacionais que permitem o acionamento de praticamente todos os tipos de máquinas e equipamentos. Além disso, sua robustez garante uma longa vida útil [5]

² Variador de frequência, os VFD e o VSD são termos permutáveis.



Figura 2.6. Corte de um motor de indução trifásico catálogo ABB³

Os motores elétricos, dentro do sistema de bombeamento, são utilizados para mover através de seu eixo mecânico uma bomba, formando assim o conjunto denominado motobomba (Motor elétrico + bomba). Segundo o guia básico de bombas as curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante são disponibilizadas nos catálogos técnicos e trazem informações importantes para o dimensionamento de um sistema, conforme exemplo da Figura 2.7 [11]. As curvas tradicionais são basicamente utilizadas em termos de potência absorvida, altura, rendimento em função da vazão, “Há, ainda outra curva, que traduz o NPSH requerido pela bomba, o qual deve ser comparado ao NPSH disponível do sistema.” [4]

Conforme publicação (Bombas, ventiladores e compressores, Fundamentos) [7] as bombas podem ser arranjadas em dois tipos de circuitos que são classificados como aberto e fechado. Neste estudo de caso o objeto de estudo é uma aplicação de circuito aberto onde a função da bomba é transferir, ou transportar, fluido de um ponto X para um ponto Y.

“Uma simples instalação de recalque predial é um exemplo típico de circuito aberto. A bomba transfere água do reservatório inferior para o superior. A função exercida pela bomba nesse caso não difere da função de transporte desde a captação de água de um rio até a estação de tratamento em um sistema de grande porte. A função é a mesma para o descarregamento de petróleo de um navio petroleiro para tanques de armazenagem na área portuária. A mesma função é observada na transferência de querosene de aviação desde uma refinaria de petróleo até os tanques de um aeroporto. O mesmo ocorre em transposição de rios. Em todos esses casos, a bomba transferiu fluido de um ponto X para um ponto Y.” [7]

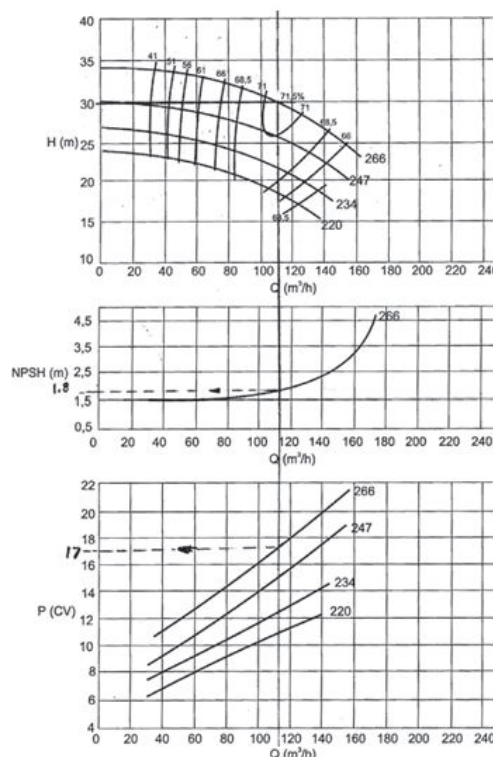


Figura 2.7. Curvas características de bombas: Isorendimento, NPHS e Potência [11]

As dimensões no estudo das máquinas hidráulicas e mecânica dos fluidos, permite chegar as relações de estudo de eficiência das bombas centrífugas, às quais se dá usualmente o nome de “leis de similaridade”. Elas refletem a variação das características da bomba (vazão, altura manométrica e potência) quando outras grandezas variam (rotação, diâmetro do rotor, peso específico do líquido bombeado, viscosidade, etc.) [4].

As Leis de Similaridade aplicadas ao estudo de máquinas hidráulicas, mais especificamente de bombas centrífugas, mostra que é possível validar a variação das curvas características em relação a rotação do motor, proporcionando uma melhor escolha de acionamento para sistemas de bombeamento com demanda variável [3].

Destacado a importância das leis de similaridade é necessário conhecer quais são. As leis são [3]:

1. O fluxo ou volume varia linearmente com a velocidade. Se a velocidade diminuir em 50%, o fluxo diminui em 50%;
2. A pressão varia ao quadrado da velocidade. Se a velocidade diminuir em 50%, a pressão diminui em 25%;
3. O consumo de energia varia conforme o cubo da velocidade. Se a velocidade diminuir 50%, o consumo de energia diminui para 12,5%.

É destacado também a importância facilitadora do uso de softwares para a simulação hidráulica em sistemas mais complexos, tornando possível a otimização energética dos sistemas de bombeamento com uma escolha mais eficiente das bombas para a vazão desejada. Os softwares dispensam a necessidade da consulta massiva de diversos catálogos de fabricantes, com suas respectivas possibilidades de bombas

³ Disponível em: <encurtador.com.br/jpxyH> Acesso em Jul. 2020.

e curvas de sistema, tornando o dimensionamento mais prático e assertivo. [4]

A figura 2.8 onde é mostrado o esquema de instalações básicas de recalque que tem como objetivo realizar a transferência de um reservatório inferior para o outro superior. Uma das instalações mostradas é definida como “em sucção” onde o nível do reservatório inferior está localizado abaixo da linha de centro da bomba e a outra é chamada de “afogada” onde nível está acima da linha de centro [7].

“A linha de centro da bomba sempre é tomada como referência para indicação das alturas geométricas ou topográficas. Nessas duas instalações básicas, a descarga superior é livre. A instalação da tubulação antes da bomba (a montante) é definida como tubulação de admissão. Já a instalação após a bomba (a jusante) é definida como tubulação de recalque. É importante observar que ambos os reservatórios estão sujeitos à pressão atmosférica e, por hipótese, o fluido está em repouso no seu interior ($v = 0$).” [7]

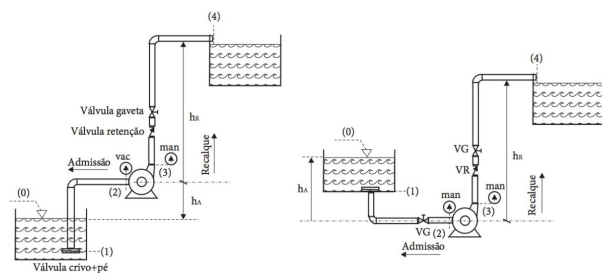


Figura 2.8 - Instalações básicas de recalque [7]

Após conhecer o meio de controle, modo de funcionamento do sistema, método de análise e seleção dos motores elétricos e bombas, e para finalizar os tipos de sistemas disponíveis para seleção dos mais adequados a aplicação, será visto na sequência como estes conceitos serão aplicados neste estudo de caso.

III.METODOLOGIA

O presente estudo tem como base de metodologia a pesquisa de caráter qualitativo, onde foi realizado um estudo de caso em uma estação de tratamento e distribuição de água.

A investigação deste estudo de caso é do tipo teste de teoria, que é utilizado para testar questões complexas, onde um caso pode ser suficiente para falsificar uma teoria ou identificar áreas de falha, ou seja, essa pesquisa será feita de forma explanatória [10].

O levantamento de dados para realização deste estudo, foi feito através de uma visita técnica monitorada à uma subestação de tratamento e distribuição de água na cidade de Louveira, interior de São Paulo. O município se estende por 55,1 km² e contava com 48 885 habitantes no último censo. A densidade demográfica é de 886,7 habitantes por km² no território do município. [18]

O sistema avaliado é responsável por captar as águas do rio Capivari, que faz parte da bacia composta também pelos rios Piracicaba e Jundiá e distribuir aos habitantes de modo que todos tenham acesso à água encanada.

A estação elevatória estudada, foi inaugurada no começo de Julho de 2020, possui 6 conjuntos duplos de motobombas com capacidade de vazão de 1,2 milhões de litro hora conforme noticiado por Cada Vez Mais Louveira [12]



Figura 3.0 - Estação elevatória da cidade de Louveira 10 de Julho de 2020 [12]

O objetivo da aplicação deste método é realizar uma análise com foco na área de bombeamento e controle de vazão do sistema, coletando dados para efeito comparativo de performance em situações de aplicações de tecnologias diferentes para controle.

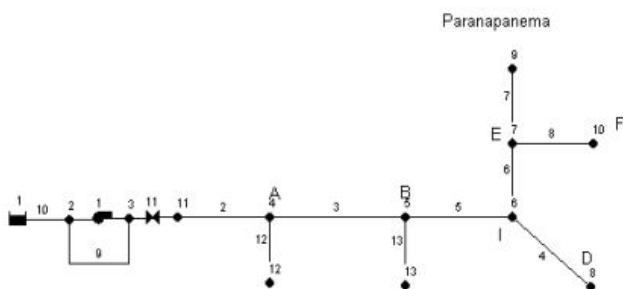
Os dados coletados em loco são de extrema importância para o desenvolvimento deste estudo, pois com base nas informações levantadas, realizamos os cálculos para simulação do comportamento do sistema em duas linhas de controle, sendo elas: por meio de válvulas hidráulicas de estrangulamento e por variação de velocidade de motores elétricos com o uso de VSDs. Para esta etapa do trabalho os dados que necessitamos e coletamos são:

- A vazão por demanda, disponibilidade e sazonalidade do consumo de água da estação;
- Controle tele-remoto utilizado;
- Modelos e quantidades dos conjuntos de motobombas utilizados;
- Diâmetro da tubulação;
- Capacidade de vazão das bombas;
- Potência e tensão de operação dos motores elétricos;
- Disposição de operação das bombas (se operam em série/ conj. paralelo, etc.)

resultados obtidos para definição do melhor conjunto a ser adotado para esse sistema de distribuição estudado. A partir de valores sólidos de redução obtidos, realizamos um estudo de tempo estimado para pagamento desse investimento.

- Estes dois regimes de operação estudados foram aplicados para cálculo de consumo de energia e análise dos resultados para comprovação de eficiência energética.

Sabendo-se a disposição das bombas e os dados previamente citados é possível projetar no software EPANET um modelo matemático-operacional de representação como no exemplo demonstrado da figura 3.1, onde as unidades A. “Leste” e B. “Pulmão” são retratadas.



Para o cenário 1 na unidade representada, com a unidade operada pelo sistema convencional com controle de vazão por válvulas de bloqueio, “a válvula 11, localizada entre os nós 3 e 11 do modelo do EPANET, fez a função de uma válvula redutora de pressão (VRP), sendo que sua regulação de saída variava a 105 cada hora segundo a média das pressões daquele período, por exemplo, entre as 9:00 e 10:00 hs. da manhã a regulação de saída da VRP assumia o valor médio das pressões desse mesmo período.” [16]

Após a validação de performance dos sistemas fizemos um comparativo de consumo de energia elétrica com base nos

6

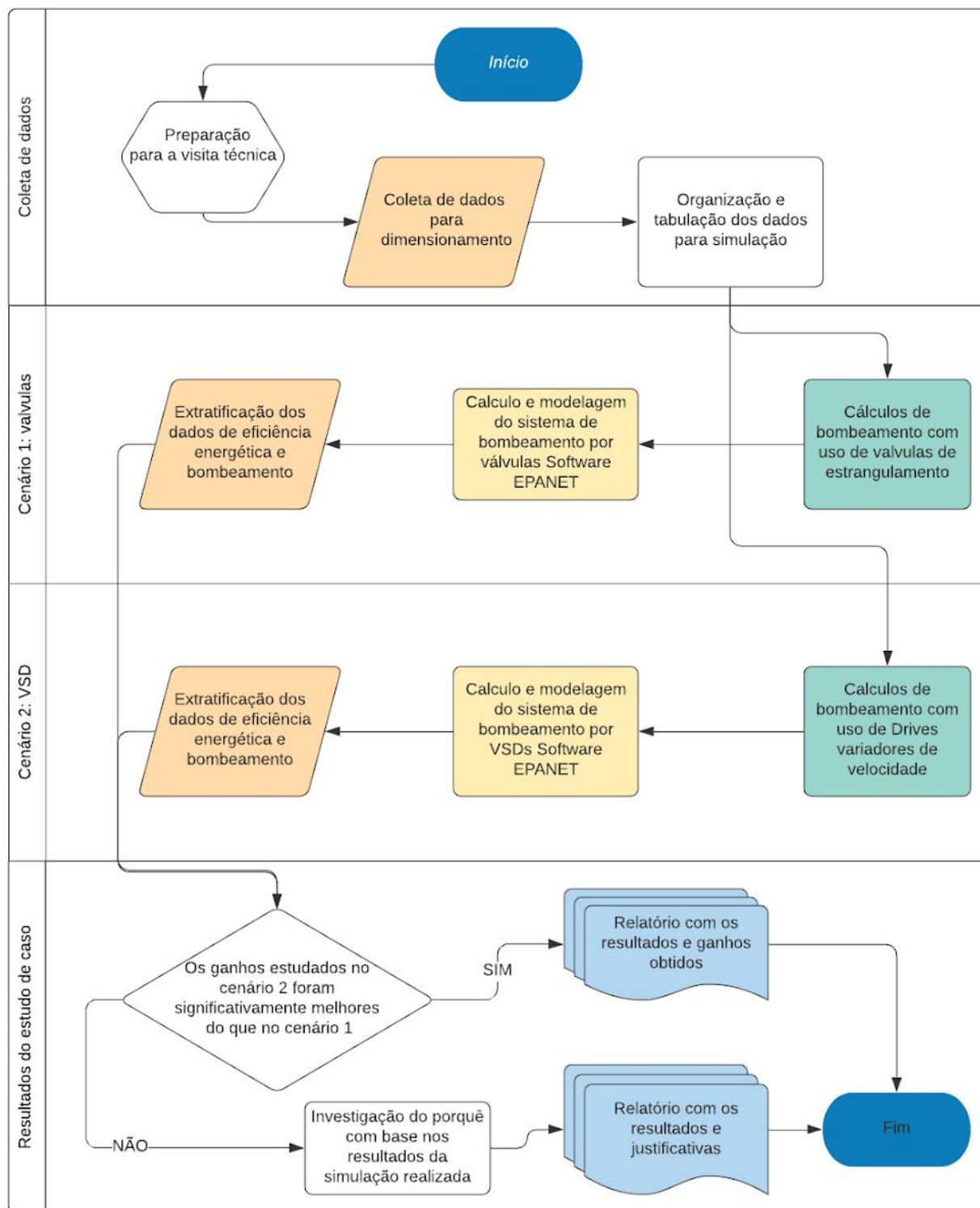


Figura 3.2. Fluxograma da metodologia do estudo de caso (Fonte: Autor)

IV. TESTES E RESULTADOS OBTIDOS

Conforme descrito no fluxograma de metodologia, após a coleta de dados realizada através da visita técnica do 04 de Setembro na estação de Distribuição e tratamento de água de Louveira-SP, os dados foram tabulados para a organização e modelagem dos sistemas (Tabela 3.1)

A subestação de tratamento de água possui uma capacidade de captação de até 150L/s e de vazão de até 140L/s e um reservatório que comporta até 1 Mi de litros.

Após a captação do rio, a água é bombeada até a entrada da subestação onde há uma calha parshall que mede o volume de água entrando na subestação e envia os dados para o supervisor BluePlant - Altus, depois a água segue para os processos de tratamento químico e filtração antes de seguir rumo ao reservatório.

Tabela 4.1 – Dados técnicos gerais da subestação de tratamento e distribuição de água

Dados Coletados na visita		
Tratamento		
Captação	150 L/s	+/- 20
Vazão	140 L/s	+/- 20
Supervísório atual	BluePlant - Altus	
Horário de pico	18:00 - 21:00	
Tensão de rede	380V	
Reservatório	1 Mi Litros	
Distribuição		
2 bombas em paralelo por reservatório- redundância		
total de 6 reservatórios		
Sequência de instalação:	Bomba - Válvula de retenção - Registro	
Topografia	Reservatório acima do sistema de distribuição	
Novo sistema supervísório:	Elíipse	
Inversores	Danfoss	
Rede de comunicação	Modbus RTU	

Na saída do reservatório as tubulações seguem para a subestação de distribuição de água, que fica localizada em um nível inferior ao tratamento com o objetivo de o desnível ajudar no transporte da água.

A subestação construída recentemente e iniciou suas operações duas semanas após a visita feita para coleta de dados.



Figura 4.1 - Vista interna da subestação de distribuição

O projeto conta com 6 conjuntos de motobombas localizadas na estação que possuem redundância para atender 6 reservatórios localizados em pontos estratégicos da cidade conforme figura 4.2 de forma a atender a demanda atual e o crescimento populacional em médio e longo prazo. Os reservatórios que recebem a água bombeada nesta estação são: Monterrey, Burck, Arataba, St. Izabel, St. Izabel II e Popular III como é possível visualizar na figura traçada da imagem em satélite de Louveira.

Os bairros Monterrey e Arataba que até o momento de instalação da rede em estudo não eram atendidos através da rede de água, mas apenas por caminhão pipa conforme PMSB, plano municipal de saneamento básico (2013), hoje são contemplados através do novo sistema de bombeamento em estudo com a tecnologia dos variadores de velocidade.



(a) Distribuição Burck, St. Izabel II, St. Izabel e Popular III



(b) Distribuição Arataba e Monterrey

Figura 4.2 - Visão satélite GoogleMaps dos pontos de distribuição de água em que a estação de bombeamento de Louveira atende para o sistema estudado (Fonte: Autor)

Os dados da capacidade de cada conjunto foi coletado conforme tabela 4.2 para análise comparativa entre o controle por válvulas de estrangulamento e variadores de velocidade. Visto que a rede está passando por reforma e apenas parte está atualizada e documentada, nossa análise foi feita com base nos motores e bombas já instalados e dimensionados, apenas variando o controle.

Tabela 4.2 – Dados coletados durante a visita sobre os conjuntos existentes na planta

Tabela 4.2 Dados coletados em campo sobre conjuntos existentes em campo			
Conjunto de bombas		Motor	
KSB:	METN 125-80-200 GC	Pot.	75kW / 100CV
OP:	M521902628	FS	1.25
Q: M³/h	164.03	Tensão	380V
n:	3573 rpm	Corrente	138A
H:	85.03 MCA	RPM	3560
Conjuntos 4 e 6		Rendimento	94.1%
Conjunto de bombas		Motor	
KSB:	METN 200-150-500 CG	Pot.	185 kW / 250CV
OP:	M52 190 2631	FS	1.25
Q: M³/h	395.00	Tensão	380V
n:	3562 rpm	Corrente	336A
H:	70 MCA	RPM	1790
Conjunto 2		Rendimento	96.3%
Conjunto de bombas		Motor	
KSB:	METN 125-80-250 GC	Pot.	90 kW / 125CV
OP:	M521902633	FS	1.25
Q: M³/h	222.01	Tensão	380V
n:	3578 rpm	Corrente	163A
H:	100 MCA	RPM	3575
Conjuntos 1,3 e 5		Rendimento	95.3%

Com base nos dados coletados, foram iniciados os cálculos de consumo de cada modo de controle. Primeiro será apontado o comportamento do sistema operando por válvulas de estrangulamento e motores operando a plena carga sem controle de velocidade conforme tabela 4.3 e 4.4

Tabela 4.3: Análise de consumo - Válvulas de estrangulamento				
Conjunto	Potência do motor	kw/h consumido	Consumo diário kW/h	Consumo mensal kW/h
1,3 e 5	90 kW	96,54	1.834,21	55.026,23
2	185 kW	191,07	3.630,32	108.909,66
4 e 6	75 kW	78,21	1.486,08	44.582,36

Tabela 4.3 – Análise de consumo - Válvulas de estrangulamento

O cálculo para consumo do sistema foi baseado na equação 4.1, onde a potência nominal do motor é relacionada com o rendimento [15], dessa forma é possível obter o consumo em kW/h.

$$C(KWh/h) = \frac{P(cv) \times 0,736}{Rend(\%)} \times 100\% \quad (01)$$

C: Consumo do motor em uma hora de operação

P (cv): Potência mecânica fornecida pelo motor.

Rend(%): Rendimento percentual do motor.

Equação 4.1: Potência elétrica consumida pelo motor em uma hora de operação.

Para análise do consumo do sistema com controle por válvulas de estrangulamento, foram considerados três períodos de vazão durante o dia, sendo eles: das 6:00 as 17:00 com 9 horas em operação e 2 horas em stand by. O segundo período das 17:00 às 22:00 com 5 horas em operação e 1 hora em stand by. O terceiro período das 22:00 as 6:00 com 8 horas em operação e 2 horas em stand by.

Tabela 4.4 - Custo mensal de operação por válvulas de estrangulamento.

Tabela 4.4 - Custo de operação mensal	
Conjunto	Custo Mensal
1,3 e 5	R\$ 39.163,27
2	R\$ 77.513,18
4 e 6	R\$ 31.730,16
	R\$ 148.406,61

As taxas de concessionária consideradas para os cálculos foram: Consumo TUSD R\$0.34302 e consumo TE R\$0,3687.

Buscando agregar no estudo sobre vazão fornecida e potência de bombeamento foi modelado o sistema de controle por válvulas no software EPANET seguindo informações do manual [13], que requer além dos dados de vazão da água tratada e potências, a curva das bombas para o modelamento conforme exemplo da figura 4.3, os quatros valores de vazão e pressão para cada modelo de bomba da estação do presente estudo foram obtidos por meio do catálogo de curvas características da KSB⁵ (2013).

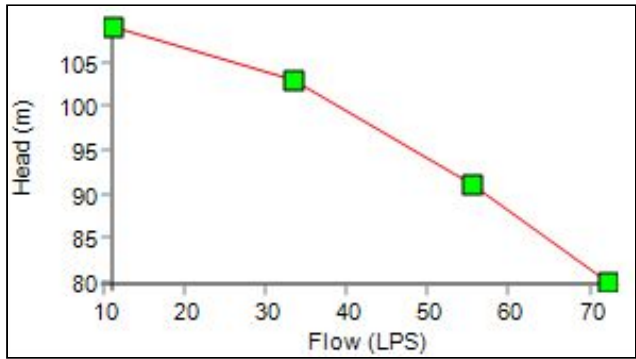


Figura 4.3 – Curva da Bomba de 90kW modelo 125-80-250 (Software EPANET)

Para uma estimativa de comprimento das tubulações entre os reservatórios e a estação de distribuição foram utilizadas na modelagem as distâncias obtidas através da plataforma do Google Maps. Inseridos estes dados no EPANET temos o sistema de controle por estrangulamento representado na figura 4.4, onde visualizamos as motobombas A, C e E de potência 90kW, B de 180kW e as demais D e F de 75kW, estas estão bombeando por partida direta, utilizando sua potência nominal, a limitação de bombeamento neste caso é devido ao máximo valor de vazão fornecido pelo tratamento de 140L/s, ou seja, o sistema está trabalhando abaixo da sua capacidade nominal de vazão.

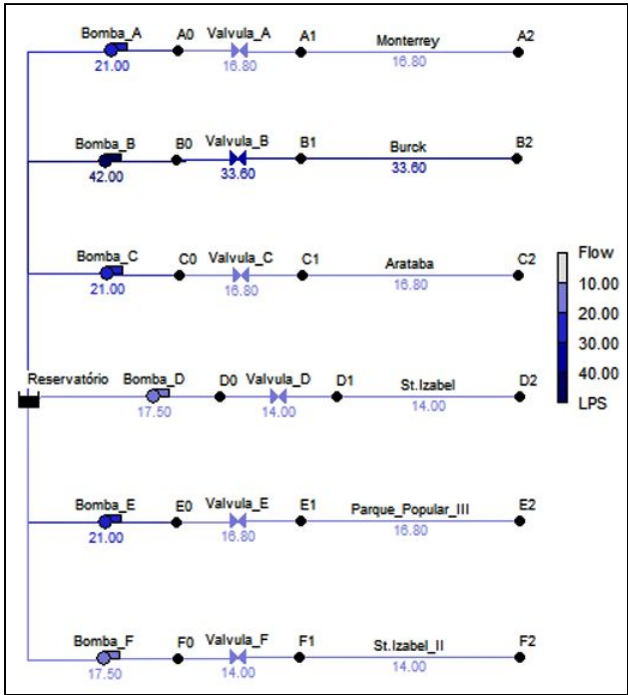


Figura 4.4 – Representação do sistema de distribuição de água de Louveira com controle de vazão por válvulas de estrangulamento. (EPANET)

No segundo cenário analisado foi previsto para controle, o uso de variadores de velocidade. Baseado nas vazões por demanda de horário (tabela 4.5), foram analisadas as curvas características de cada bomba, para saber a nova potência necessária para a vazão conforme o período do dia. Como foi feito uma análise a partir da bomba para conhecer a potência necessária a ser aplicada pelo motor elétrico ao eixo do conjunto, foi previsto um valor de 3% para perdas em acoplamento do sistema, dessa forma o novo cenário de consumo ficou conforme tabela 4.6 e 4.7.

Tabela 4.5 – Consumo por período, Cenário com variadores de velocidade.

Tabela 4.5 - Consumo por período em m³/h			
	6:00 as 17:00	17:00 as 22:00	22:00 as 6:00
Conjunto	m³/h - operante	m³/h - operante	m³/h - operante
Conj. 1,3 e 5	60,48	75,6	45,36
Conj. 2	120,96	151,2	90,72
Conj. 4 e 6	50,4	63	37,8

⁵ KSB SE & Co: SE, Kommanditgesellschaft auf Aktien

Tabela 4.6 – Potência consumida por período - para controle por variadores de velocidade

Tabela 4.6: Análise de potência consumida por período - Variadores de velocidade

		6:00 as 17:00	17:00 as 22:00	22:00 as 6:00
Conjunto	Potência do motor	kw/h consumido	kw/h consumido	kw/h consumido
Conj. 1,3 e 5	90 kW	51,65	55,68	48,42
Conj. 2	185 kW	116,69	126,32	108,12
Conj. 4 e 6	75 kW	41,27	42,50	41,27

Tabela 4.7 – Custo de operação e consumo mensal para controle por variadores de velocidade

Tabela 4.7 - Custo operação e consumo mensal

Consumo diário kW/h	Consumo mensal kW/h	Custo Mensal
1.233,90	37.017,15	R\$ 26.345,84
2.780,19	83.405,59	R\$ 59.361,43
996,69	29.900,64	R\$ 21.280,89
Total: R\$ 106.988,16		

Para determinar a potência necessária no eixo das bombas foi analisado a curva característica de de cada bomba, no manual de curvas de bombas disponibilizado pelo fabricante KSB Brasil, baseado na vazão demandada em cada período de funcionamento. As curvas de relação de vazão (Q) x potência (P) consideradas para os cálculos apresentados estão dispostas abaixo.

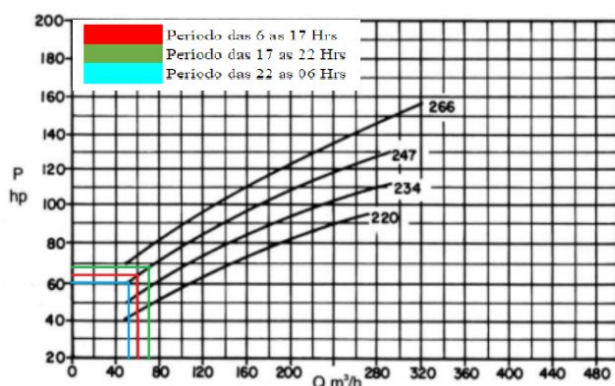


Gráfico 4.1 - Vazão [Q] x Potência [P] Conjuntos 1,3 e 5 - 90 kW motobomba modelo: METN 125-80-250

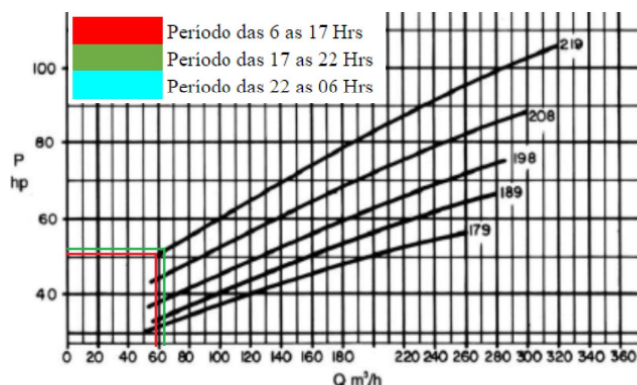


Gráfico 4.2 - Vazão [Q] x Potência [P] para Conjuntos 4 e 6 - 75 kW motobomba modelo: METN 125-80-200

Para o gráfico 4.2 foram apontadas apenas 2 relações de consumo, pois nos períodos das 6:00 as 17:00 e das 22:00 as 06:00 o valor de vazão demandada não atingiram o mínimo da bomba, portanto para estes casos foram considerados a vazão mínima.

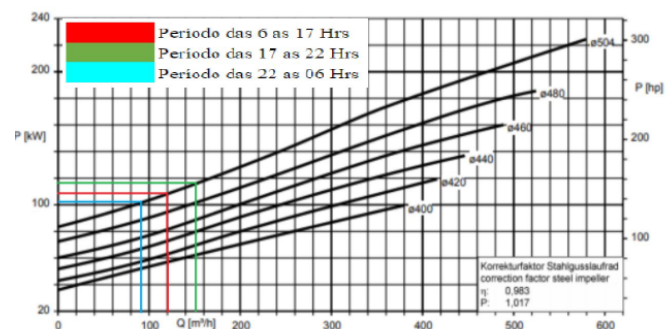


Gráfico 4.3 - Vazão [Q] x Potência [P] para Conjunto 2 - 185 kW motobomba modelo: METN 200-150-500

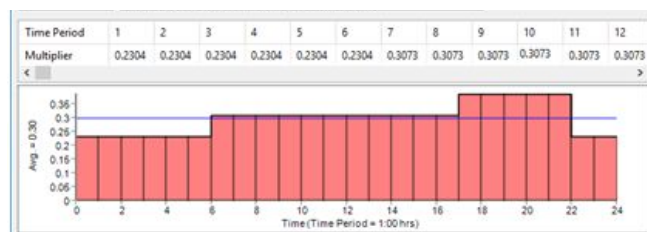
Para este caso de variação de velocidade no EPANET contamos com os gráficos da porcentagem de utilização da capacidade nominal para cada uma das bombas utilizadas no período de 24 horas, conforme figura 4.5, onde temos os hidrogramas de vazão de saída do reservatório. As demandas se alteram entre os períodos das 22h às 06h, das 06h às 17h e 17h às 22h, com uma variação de demanda por período de aproximadamente 80%, 100% e 60% respectivamente.



(a) Potência 90 kW



(b) Potência 185 kW



(c) Potência 75 kW

Figura 4.5 – Hidrogramas das vazões de saída do reservatório de Louveira para as potências das bombas (EPANET)

Utilizando dos dados de curva característica das bombas e demanda sazonal no período proposto de 24h, juntamente com os dados de vazão da água tratada, potência da motobomba, rendimento e comprimento da linha, na figura 4.6 temos as vazões correspondentes para cada uma das linhas em um sistema por controle de VSDs, onde neste caso representado da figura está trabalhando com 100% da demanda.

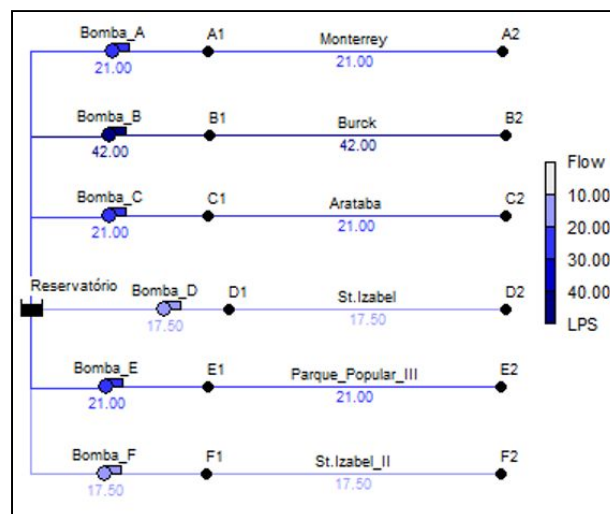


Figura 4.6 – Representação do sistema de distribuição de água de Louveira com controle de VSD á 100% da demanda. (EPANET)

Quando analisamos a figura 4.7 e 4.8, temos os horários de operação das 06h da manhã e 11h da noite, onde vemos o fluxo, respectivamente, de 80% e 60% da vazão total. Nestes estágios de fluxo reduzidos os motores operam a velocidade reduzida por controle dos VSDs fornecendo a vazão requerida pela linha. Podemos destacar que durante o modelamento temos um superdimensionamento acentuado quando a vazão está a 60% nas bombas D, E, onde o software alerta inconsistência no controle de bombeamento para uma vazão tão baixa de 10,5 L/s.

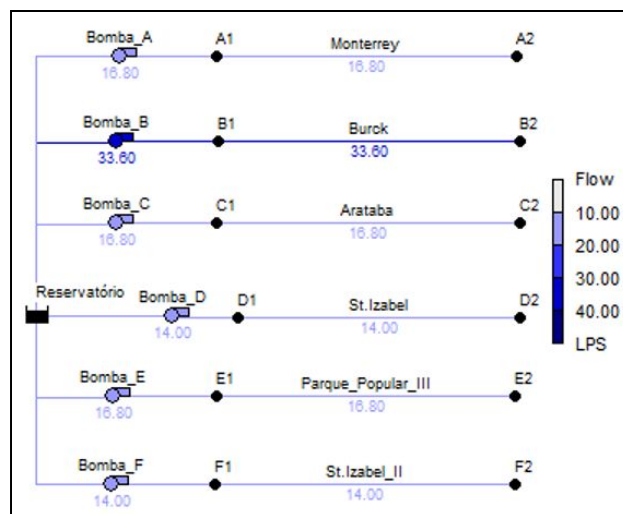


Figura 4.7. Modelagem hidráulica do sistema de bombeamento com o uso de VSDs para 80% da demanda. (EPANET)

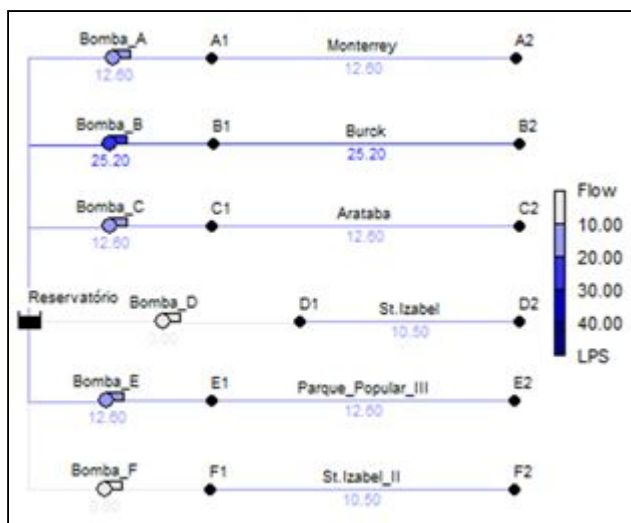


Figura 4.8. Modelagem hidráulica do sistema de bombeamento com o uso de VSDs para 60% de demanda. (EPANET)

Com base nos resultados apresentados de consumo dos sistemas, é possível observar uma redução de 27,91% no cenário com o uso de variadores de velocidade, o que corresponde à uma economia mensal de R\$41.418,45.

Foi solicitado um orçamento para avaliar os custos de instalação dos dois cenários apresentados no presente artigo. Devido a fins de critérios de éticas comerciais da empresa provedora do orçamento, os dados comerciais não serão divulgados.

Portanto para validar a viabilidade econômica do investimento em controle por variadores de velocidade. Foi utilizado o método de cálculo de payback para apresentar o retorno do projeto.

$$PB = I/A \quad (02)$$

onde:

PB: Payback

I: Valor do Investimento

A: Somatória dos ganhos obtidos

O payback encontrado através da fórmula (02) [17] indica um retorno de investimento de aproximadamente 12 meses. Nessa análise não foram incluídos os valores aplicáveis referentes a manutenção de válvulas, desgaste de tubulação,

efeito golpe de ariete, entre outros pontos que devem ser considerados durante a elaboração de um projeto, que viabilizam ainda mais o uso de variadores de velocidades para esse nicho de aplicações.

V. DISCUSSÃO

Após a coleta de dados, cálculos e modelagem foi possível chegar aos resultados sobre as características do sistemas e os potenciais ganhos com o uso de variadores de velocidade no controle das bombas para a estação de Louveira.

Devido às características construtivas da subestação, o reservatório fica em um nível mais elevado que as bombas de distribuição, o desnível gera uma pressão já na entrada das bombas de distribuição, fazendo com que os motores possam operar em regime abaixo de sua capacidade nominal devido a essa força natural já na entrada do sistema. Esse é um ponto que favorece o uso de variadores de velocidade que conseguem controlar as variáveis do motor para operar abaixo de sua corrente nominal, dessa forma o consumo de energia é menor devido ao esforço reduzido do motor.

Com as informações de bombeamento coletadas e os cálculos de custo energético, temos os motores operando abaixo das suas capacidades nominais demonstrando que o sistema está superdimensionado, levando em conta que a estação deve ser construída e dimensionada para atender as demandas hídricas a médio e longo prazo devido ao grande investimento, o superdimensionamento é inevitável nos primeiros anos a fim de prover essa capacidade. Porém o método por VSDs tem amenizado este impacto de superdimensionamento, o modo de funcionamento dos conjuntos moto-bombas e suas características de custo têm influência direta no consumo. “Em qualquer caso, sempre, o fator principal, do ponto de vista da otimização energética, é a potência dos motores, cujo modo de funcionamento gerará consumo de energia elétrica e demanda da rede.” [4]. Podemos observar claramente esta influência no gráfico da figura 5.1 onde temos o acumulado em kW/h na utilização dos variadores de VSDs e por válvulas de estrangulamento, tendo uma diferença significativa de economia energética com o uso dos variadores

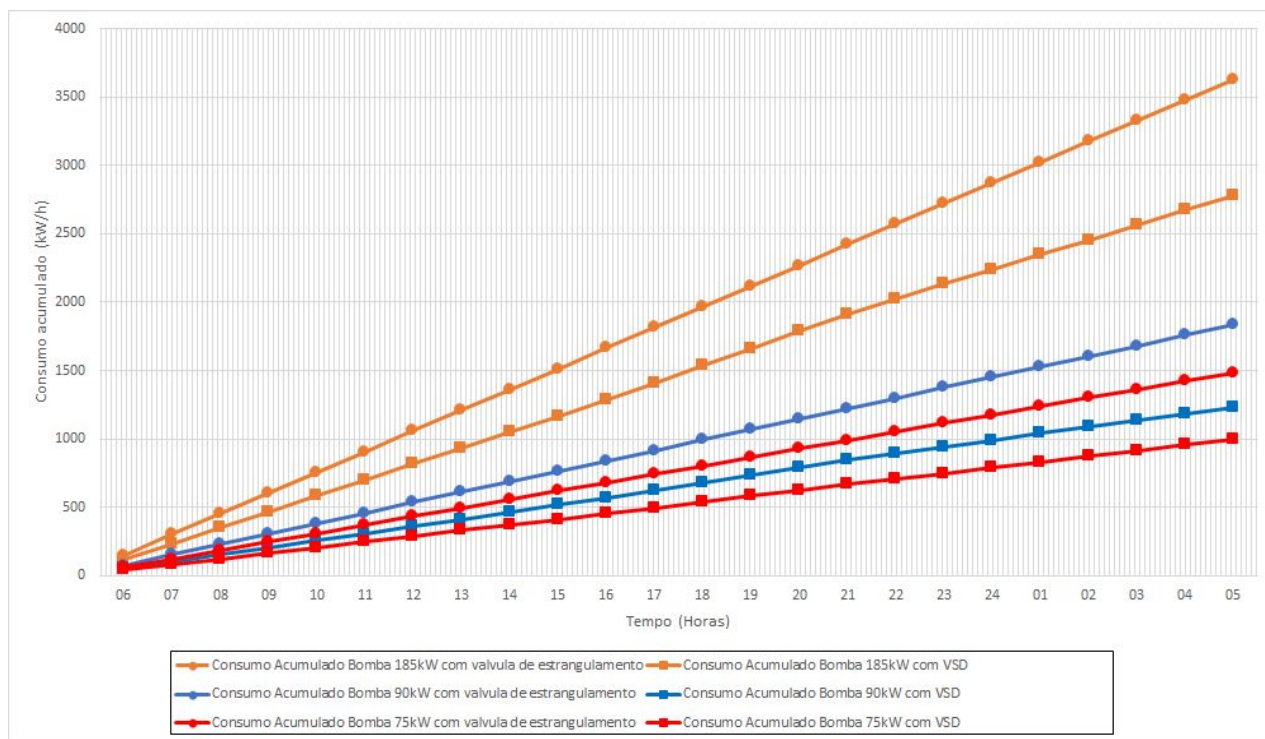


Figura 5.1. Gráfico de comparação em consumo de energia entre os sistemas e controle por válvula de estrangulamento e por controle por VSD (Fonte: Autor)

VI. CONCLUSÃO

No presente estudo vemos que nos estágios de fluxo reduzidos os motores operam a velocidade reduzida por controle dos VSDs, otimizando o sistema e fornecendo a vazão requerida pela linha, sem desperdícios de potência. No controle por válvulas de estrangulamento o motor restringe a sua operação à corrente nominal e a vazão é controlado por válvulas. Pode-se observar na análise realizada que quando o sistema demanda uma vazão menor, o motor continua a operar em sua potência nominal, dessa forma a válvula opera no controle da vazão aumentando a pressão, gerando um desgaste da tubulação e causando desperdícios de energia e água.

Então é possível afirmar que o ganho energético, financeiro e ambiental na utilização de variadores de velocidade torna viável o investimento na aplicação desse tipo de controle na estação de Louveira-SP.

É necessário salientar que os benefícios de utilização das operações além da convencional variam de caso a caso, requerendo assim uma avaliação específica para cada estação em estudo e suas peculiaridades para chegar a conclusões de ganho energético e custo-benefício com o uso de variadores de velocidade.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VIANA, Dandara. **Golpe de aríete: entenda o que é**. Guia da Engenharia. Publicado em 14 jun 2019.

Disponível em <https://www.guiadaengenharia.com/golpe-ariete/>. Acesso em 28 mai 2020.

[2] HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: Análise e projetos de circuitos**. 1ª Edição. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda (McGraw-Hill - Bookman), 2012, p. 348-380.

[3] NEUBERGER, Tom; WESTON, Steven B.. **Variable frequency drives: energy savings for pumping applications**. Guia da Engenharia. Publicado em Novembro 2012. Disponível em <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/mining-metals-minerals/knowledge-center/white-paper/Variable-frequency-drives-energy-savings-for-pumping-applications.pdf>. Acesso em 14 jun 2020.

[4] GAIO, Marcelo Monachesi. **Eficiência energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. p.76-126.

[5] FILHO, Guilherme Filippo. **Motor de Indução**. Editora Érica. Publicado em 2013, - 2ª Edição, 2016, p. 15 - 17

[6] TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**. VI SEREA. Escola Politécnica da USP. <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/conferencia/VI%20serea%20palestra/p05.pdf> Acessado em 15 Jun 2020.

[7] FILHO, Guilherme Filippo. **Bombas, ventiladores e compressores, Fundamentos**. Editora Érica. Publicado em 2015, p. 24 - 26

[8] FRANCISCO, António M. S. **Motores de indução trifásico**. Publicado em Janeiro 2006. http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20el%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf. Acesso em 17 Jun de 2020.

[10] MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2º Edição. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2012. p-_.
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Epanet>. Acesso em 02 Jul 2020.

[11] ELETROBRAS. **Bombas: Guia básica**. Brasília: Eletrobrás, 2009. p.130-132. Disponível em <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Bombas.pdf>. Acesso em 09 Jul 2020.

[12] Cada vez mais Louveira. **Nova Estação Elevatória de água (bombeamento) de Louveira**. Facebook. 10 Jul 2020, 13:39,
<https://www.facebook.com/watch/?v=269246317666353>. Acesso em 16 jun 2020.

[13] ELETROBRAS. **Manual do usuário: Epanet 2.0 Brasil**. PROCEL Sanear. Publicado em Setembro 2020. Disponível em http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf. Acesso em 01 Nov 2020.

[14] KSB. **Bomba padronizada para Uso Geral: Meganorm Folheto de curvas características**. Frankenthal: KSB, 2013. Disponível em http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=Curvas_60Hz_2748_460_01_PB.pdf&tipo=curvas. Acesso em 05 Nov 2020.

[15] Bsantini, Professor - **Anexo de aula**. Publicado em 23 de março de 2006. Disponível em :<http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/bsantini/Supervis%C3%A3o/Anexos/anexo%20xi%20-%20consumo%20de%20energia%20de%20motor%20el%C3%A9trico.pdf> Acesso em 15 nov 2020.

[16] RODRIGUES, Wlamir. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 234p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258179> . Acesso em: 16 Set 2020.

[17] COLVARA, Carlos; SALVADOR Cesar. Análise de redução no consumo de energia elétrica no processo de resfriamento de ração. <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1379/Co>

[lvara Carlos Mateus Goularte.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#) Acesso em 20 de Out 2020.

[18] IBGE. **Cidades e Estados: Louveira**. Última atualização em 2020. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/louveira.html>. Acesso em 15 de Jun 2020.