

**FACULDADE DOCTUM**

**Engenharia Elétrica**

**Frederico Kneipp Carvalho Ribeiro**

**Estudo sobre bombas em paralelos buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com a regulação PID em inversores de frequência**

**Juiz de Fora**

**2018**

**Estudo sobre bombas em paralelos buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com a regulação PID em inversores de frequência**

Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial para conclusão do curso de Bacharel Engenharia Elétrica

Orientação: José Carlos Grizendi

**Juiz de Fora**

**2018**

Kneipp Carvalho Ribeiro, Frederico.

Estudo sobre bombas em paralelos buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com a regulação PID em inversores de frequência / Frederico Kneipp Carvalho Ribeiro-2016.

N<sup>a</sup> 69 folhas.

Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Inversores de frequência. 2. Controlador Lógico

Programável I. Estudo sobre bombas em paralelos buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com a regulação PID em inversores de frequência

. II Faculdade Doctum Juiz de Fora

Frederico Kneipp Carvalho Ribeiro

Estudo sobre bombas em paralelos buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com a regulação PID em inversores de frequência

Monografia de Conclusão de Curso, submetida à Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada pela seguinte banca examinadora.

Professor. Mestre e José Carlos Miranda Grizendi Orientador e Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora.

Professor Mestre e Sérgio Queiroz Almeida Coorientador Docente da Faculdade Machado Sobrinho - Unidade Juiz de Fora.

Professor Mestre e Mozart Ferreira Braga Júnior Docente da Faculdade Doctum - Unidade Juiz de Fora.

Examinada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_.

Autoria

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e nessa jornada que não foi fácil, cada semestre era um passo para meu sonho.

Agradeço aos meus pais Paulo Roberto Carvalho Ribeiro e Margareth Aparecida Kneipp Carvalho pelo apoio.

Aos meus irmãos Fellipe Kneipp Carvalho Ribeiro e Eduardo Carvalho Ribeiro por acreditarem na minha capacidade de vencer essa fase.

A minha noiva Dolores Martins Guerra que me incentivou e me ouviu nos momentos difíceis, compreendendo minha ausência pelo tempo dedicado aos estudos.

Ao meu orientador José Carlos Miranda Grizendi pela paciência, apoio e orientação na conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador Sergio de Queiroz, por ter aceitado a me auxiliar nesse desafio, e ter me apoiado em muitos momentos complicados ao longo do desenvolvimento do TCC.

Ao coordenador de curso Luis Gustavo Schroder que me ajudou a vencer cada obstáculo do curso e entendeu minhas dificuldades. Obrigado pelos conselhos, frases de incentivo e puxões de orelha.

Aos professores da DOCTUM que de um modo indireto contribuíram para minha formação, compartilhando seus conhecimentos e experiências.

Aos funcionários que me acolheram, atenderam prontamente e me ajudaram no que foi preciso.

## RESUMO

Esse trabalho descreve a implementação de um sistema inovador que resultou em uma melhoria significativa no processo de distribuição de água da terceira adutora Parque de Exposição companhia CESAMA localizada no município de Juiz de Fora – MG. O novo sistema economizou 23,03% de energia num período de onze meses.

Para esse trabalho foi empregado um sistema de eficiência energética que incluía duas motos - bombas em paralelo, em conjunto com sistema de automação confiável com utilização de inversores de frequência, transmissores de pressão e vazão, além de um Controlador Lógico Programável “CLP”. Foi utilizado um modem via rádio fazendo uma comunicação em tempo real com o centro de controle operacional “CCO” da CESAMA. Essa comunicação chamada “telemetria” recebia e enviava informações necessárias para o bom funcionamento do sistema, informando rotação, corrente, potência consumida de cada conjunto, a vazão e a pressão da rede de sucção e recalque. É essa pressão de recalque que controlava a rotação do motor aumentando ou diminuindo de acordo com a demanda.

O controle de rotação recebia um sinal de 4 a 20mA que vinha do sensor de pressão instalado no recalque da bomba, esse mesmo sinal era então enviado para o inversor de frequência, e processado em um modelo matemático, o “PID” (proporcional integral derivativo). Com isso se conseguia ter um controle da velocidade dos motores, com operação contínua e variando a rotação de acordo com a demanda do consumo.

O processo PID resultou em uma redução no consumo de energia elétrica, prevenindo o desligamento das bombas, dessa forma reduzindo o número de quebras na rede e aumentando a vida útil das bombas. O novo sistema produziu uma redução no número de partidas dos motores e permitiu uma suavização de cada partida, conseqüentemente eliminando desperdício ao longo do processo de bombeamento e distribuição de água tratada.

**Palavras-chave:** inversores de frequência. Centro de controle operacional. Proporcional integral derivativo. Controlador Lógico Programável.

shut off.

## ABSTRACT

This work describes the implementation of an innovative system that demonstrated significant improvement on the water distribution process of the third pipeline Parque de Exposição CESAMA located in the city of Juiz de Fora on the state of Minas Gerais. The new system saved 25.03% electric power consumption in an eleven-month period.

For this work, it was employed an energy efficiency system that included two motor pumps running in parallel, along with a reliable automation system, with the use of frequency inverters, pressure and flow transmitters and a Programmable Logic Controller (CLP). It was used a radio wireless modem communicating in real time directly with CESAMA operational control center, "CCO". This form of communication, called "telemetry", sent and received the information necessary for the system proper functioning, informing rotation, current and power consumption of each set, and the flow and pressure form of the suction and booster network. This booster pressure controlled the engine speed to increase or decrease according to the demand.

The rotation control received a signal, from 4 to 20mA, coming from the pressure sensor installed in the pump booster. Then, the same signal was sent to the frequency inverter, and processed using the proportional-integral-derivative model, "PID". As a result, it was attained control of the motor speed, having a continuous operation and varying the rotation according to the consumption demand.

The PID process resulted in an energy consumption decrease, prevented the pump from shutting off, thus reducing the number of broken networks

and increasing the pump life span. The new system produced a reduction in the number of motors starts as well as allowed a smoother start, therefore eliminating waste throughout the treated water pumping and distribution process.

**KEYWORDS:** frequency inverters. Operational control center. Proportional integral derivative. Programmable logical controller. shut off.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de Abastecimento de Juiz de Fora.....	16
Figura 2 - bomba centrífuga .....	19
Figura 3 - Bomba radial.....	20
Figura 4 - Bomba axial .....	20
Figura 5 - Bomba misto.....	21
Figura 6 - Conjunto de eixo horizontal.....	21
Figura 7 – Barrilete de recalque .....	23
Figura 8 - Vazão das bombas individuais.....	24
Figura 9 - Pontos de operação com uma, duas e três bombas idênticas em paralelo .....	25
Figura 10 - Motor Elétrico .....	26
Figura 11 – ponto ideal do sistema. ....	28
Figura 12 - Curva característica de uma bomba centrífuga .....	29
Figura 13 – Ponto de operação de uma bomba no sistema .....	30
Figura 14 – Disposição de um inversor de frequência .....	32
Figura 15 – Circuito eletrônico de um inversor de frequência .....	32
Figura 16 - Chaveamento do bloco inversor.....	33
Figura 17 – Esquema de funcionamento dos transistores no motor de indução.....	34
Figura 18– Forma de onda de saída de tensão de um inversor de frequência .....	34
Figura 19– Curva do conjugado de acordo com a frequência de alimentação.....	35
Figura 20– Curva de potencia de acordo com a frequência de alimentação.....	36
Figura 21– Mudança no ponto de funcionamento do sistema .....	40
Figura 22– Consumo entre os métodos de controle.....	41
Figura 23 Imagem da sala do CCO da CESAMA.....	43
Figura 24 – Tela do operador do CCO.....	44

Figura 25– Foto da análise gráfica .....	44
Figura 26 - Interface do CCO .....	45
Figura 27 - Interface do CCO com as divisões de cada regional .....	45
Figura 28 - Diagrama de controle de vazão em malha aberta .....	46
Figura 29– Diagrama de controle de malha fechada.....	47
Figura 30 - Diagrama de controle de CLP, transmissor de pressão com inversor de frequência.....	48
Figura 31- Transmissor pressão de recalque .....	49
Figura 32 - Sensor de Pressão de Sucção.....	50
Figura 33 – Informação em tempo real do CCO da Vazão e do Quilowatts/hora consumido por uma bomba. ....	54
Figura 34 - sistema supervisório .....	55
Figura 35 - Valor em tempo real do CCO da vazão e do consumo em Quilowatt-hora das bombas em paralelo. ....	56
Figura 36 - sistema supervisório .....	57
Figura 37 - Energia consumida no período de onze meses. ....	59
Figura 38 - comparativo de energia consumida x vazão .....	60

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Dado da CESAMA.....	10
Tabela 1 - Valor pago durante onze meses com sistema de bomba em paralelo.....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CCO	Centro de controle operacional
CESAMA	Companhia de saneamento municipal
CLP	Controlador lógico programável
CV	Cavalo vapor
ETA	Estação de tratamento de água
H	Hertz
KW/h	Quilowatt-hora
MDIC	Ministério do desenvolvimento indústria e comercio
MME	Ministério de minas energia
PID	Proporcional integral e derivativo
PNEF	Plano nacional de eficiência energética
PROCEL	Programa nacional de conservação de energia elétrica
SDA	Sistema de distribuição de água
V	Tensão

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	12
2.1.1. OBJETIVO GERAL .....	12
2.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	13
3. JUSTIFICATIVA .....	13
4. REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
4.1.1 CESAMA .....	14
4.1.2. ESTRUTURA TARIFÁRIA DE ENERGIA NO BRASIL E SEU CUSTO.....	16
4.1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO .....	17
4.1.4. BOMBAS HIDRÁULICAS .....	18
4.1.5. BOMBAS CENTRIFUGAS.....	19
4.1.6 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRIFUGA .....	22
4.1.7 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS SERIE .....	23
4.1.8 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO .....	23
4.1.9 MOTOR ELÉTRICO E O FUNCIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA .....	25
4.2. SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM BOMBA CENTRÍFUGA .....	26
4.2.1. CURVA DO SISTEMA .....	28
4.2.1 Curva das Bombas Centrífugas .....	29
4.2.2 Métodos de Controle de Vazão .....	30
4.2.3 Acionamentos Eletrônicos .....	31
4.2.4 O Inversor de Frequência.....	31
4.2.5 Variadores de Rotação.....	36
4.2.6 Leis de Similaridade .....	37
4.2.7 Inversor de Frequência em Bombas .....	39

4.2.8 Automação do sistema de abastecimento de água.....	42
4.2.9 Sistemas de Controle .....	46
4.3.1 Controle de Pressão de recalque .....	48
4.3.2. Controle de pressão de sucção .....	49
4.3.3. Benefícios do controle da pressão .....	50
4.3.4 MEDIDAS OPERACIONAIS.....	51
4.3.5. Medidas Administrativas.....	52
5. Resultados .....	53
5.1 RESULTADOS OBTIDOS: .....	53
6 Conclusão .....	61
REFERÊNCIAS.....	61

## 1. INTRODUÇÃO

### **Sistema de abastecimento de Juiz de Fora – MG**

Para atender à população urbana de Juiz de Fora, a Cesama conta basicamente com quatro sistemas de abastecimento: Dr. João Penido, CDI, São Pedro e Chapéu d'Uvas.

Estes sistemas de abastecimento são compostos de quatro grandes adutoras, de reservatórios de pequeno, médio e grandes portes, de subadutoras, redes troncos e redes de distribuição propriamente ditas.

De forma a garantir o abastecimento de água nas partes altas da cidade, a Cesama mantém em funcionamento estações elevatórias espalhadas em diversos bairros.

#### PRINCIPAIS UNIDADES OPERACIONAIS:

Adutoras:

Dr. João Penido Filho - 9,7 km de extensão;

Menelick de Carvalho - 9.7 km de extensão;

Terceira Adutora - 13,5 km de extensão;

Chapéu d'Uvas - 17,5 km de extensão;

Número de reservatórios: 91.

Capacidade de Reservação (total): 48.510 m<sup>3</sup>.

Elevatórias de água: 155

Elevatórias de esgoto: 11

(CESAMA,[2017] “online”)

## CESAMA em números

**Tabela 2 Dado da CESAMA**

Índice de atendimento à população	Água Tratada: 94,81% / Coleta de Esgoto: 93,7%
Número de Ligações	144.832 ligações de água / 142.447 ligações de esgoto
Volume de água consumido (micromedido)	2.442.532 m <sup>3</sup> médio/mensal
Volume de água macromedido	3.594.328 m <sup>3</sup> médio/mensal
Volume de água produzido	3.783.058 m <sup>3</sup> médio/mensal
Volume de água fluoretada	3.687.079 m <sup>3</sup> médio/mensal
Economias Água	246.949 unidades
Economias Esgoto	244.730 unidades

JUIZ DE FORA. CESAMA. (Org.). **Números e Indicadores**. 2017. Disponível em: <<http://www.cesama.com.br/?pagina=numeros>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

Em 17 de outubro de 2001 foi aprovada a “Lei de Eficiência Energética” (BRASIL, 2001), que determina níveis máximos de consumo de energia para máquinas e aparelhos elétricos fabricados ou comercializados no país.

Decretado em 19 de dezembro de 2001 o Decreto 4.059 (BRASIL, 2001), que, para tal tarefa, criou o Comitê Gestor de Índice e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, criado a partir dos ministérios de Minas e Energia (MME), de Ciência e Tecnologia (MCT) e de desenvolvimento, indústria e comércio exterior (MDIC), as agências ANEEL e ANP.

Em dezembro de 2002 foi homologado o Decreto 4.508/2002 que regimentou a eficiência energética dos motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo (BRASIL, 2002).



De acordo (MME, 2007), em 60% do consumo de energia na indústria são de motores de indução trifásicos. O indicador de eficiência energética a ser empregado foi o rendimento nominal (BRASIL, 2002), tendo critérios mínimos para motores padrões e para motores de eficiência energética.

Segundo (MESQUITA; et al, 2006; SOUZA; SILVA, 2012; BRIDI, 2013). Um dos maiores custos das empresas de saneamento no Brasil são os motores de indução como os maiores consumidores de energia elétrica das empresas, pois para se bombear água até os pontos desejados e necessário um motor elétrico para movimentar uma bomba centrífuga. Com isso as empresas de saneamento têm buscados meios para implantação de programas de eficiência energética, buscando melhores resultados operacionais e maior competitividade no mercado.

Segundo Gurgel (2006), conforme o relevo da cidade, é necessário o utilização de bombas centrífugas para o bombeamento de água em locais de níveis mais elevado a onde a água se desloca por gravidade não é permitido.

No caso de Booster, onde a água solicitada pelo sistema é variável, a bomba sofre grandes alterações na sua rotação durante seu funcionamento. Em instalações onde o conjunto moto-bomba opera sem o controle de rotação, a potência consumida é maior que a potência necessária para manutenção do sistema, fazendo que a bomba funcione em shutt off gerando desperdício de energia elétrica.

Segundo (SAFFI; WARTCHOW; ANTONINI, 2010). Dentre as opções para a diminuição do consumo energético em sistemas como booster, que bombeiam água direto na rede sem o uso de reservatórios, a mais utilizada se dá através da variação da rotação na bomba com a utilização de inversores de frequência, de modo que o motor vai variando a sua rotação de acordo com a necessidade do sistema.

No ponto de vista de Mesquita (2009), a utilização dos inversores de frequência em sistemas de pressurização de água. Com o objetivo de controle de vazão, é cada vez mais utilizado em programas de eficiência energética, visto que o inversor de frequência vai modulando a rotação das bombas do sistema, fazendo que elas trabalhem em um ponto ideal da curva do sistema sem ter desperdício de energia elétrica e com isso aumentando a vida útil dos componentes mecânicos.

De acordo Campestrini (2006), o controlador PID é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Isto se justifica pela sua fácil implementação, além do baixo custo, robustez e versatilidade, com capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatório para uma grande variedade de processos encontrados na indústria, o que conseqüentemente promove a diversidade de aplicações em sistemas de controle.

Segundo Guedes (1994), devido à grande necessidade de um acionamento mecânico rotativo, os motores elétricos têm sido utilizados em uma vasta gama de aplicações, pois apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de motores, como por exemplo: um elevado rendimento, robustez, facilidade de construção, baixo custo, vasta faixa de velocidade e potência, fácil controle a distância, fácil manutenção e construção.

De acordo Filippo (2000), estes equipamentos elétricos são responsáveis pelo consumo de pouco mais de 50% de toda energia nas indústrias. Constituem ainda, 95% do total de motores instalados nos setores rural, comercial, industrial e residencial no Brasil. Além de serem responsáveis por aproximadamente 75% do total da potência instalada do universo de todos os motores.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.1. OBJETIVO GERAL**

Desenvolver estudos sobre moto bombas em paralelo buscando comprovar ganhos operacionais e energéticos com a Regulação PID em inversores de frequência do booster Parque de Exposição, localizada no município de Juiz de Fora – MG.

### **2.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Especificar os equipamentos;
- Avaliar o desempenho do sistema variando a rotação do motor;
- Verificar o consumo de potencia com uma bomba e com duas bombas em paralelo;
- Quantificar a viabilidade econômica da implantação do sistema;
- Determinar o tipo mais eficaz de controle de bomba;
- Resultados da implantação do sistema;

### **3. JUSTIFICATIVA:**

O presente trabalho objetivou averiguar essa problemática com vistas a identificar os fatores técnicos, operacionais, econômico-financeiros, administrativos e gerenciais que têm influenciado na efetividade da gestão do abastecimento de água e eficiência energética em sistemas públicos de abastecimento de água da CESAMA.

### **4. METODOLOGIA**

A metodologia desse trabalho será baseada em estudos bibliográficos, e estudos de campo coletando dados quantitativos e qualitativos em tempo real com centro de controle operacional na CESAMA.

Esse estudo visa avaliar o desempenho em vazão e o consumo em quilowatts/hora de uma bomba funcionamento e de duas bombas em paralelo.

Para o estudo considerado economicamente a bomba terá um acionamento via inversor de frequência com um controle de pressão na sucção e no recalque da bomba com controle via PID num sistema de malha fechada.

O estudo foi feito num período de um ano, entre outubro de 2017 a outubro de 2018 sendo verificada a viabilidade econômica de duas bombas em paralelo e apresentados os resultados do sistema dentro de um ano.

## **5. REFERENCIAL TEÓRICO**

O trabalho se baseia em um estudo de caso realizado na terceira adutora “Booster Parque de Exposição”, neste estudo será avaliado de maneira comparativa o funcionamento de bombas em paralelo, através de suas curvas e também dos possíveis sistemas de bombeamento. Assim, serão apresentados conceitos de motores elétricos por serem equipamentos que efetivamente consomem energia elétrica. Será detalhado o acionamento elétrico do sistema, os instrumentos que farão a leitura do sistema e o controle via PID na qual o estudo se baseia, além da economia obtida com o sistema.

Por último será apresentada medidas de eficiência energéticas no saneamento com enfoque especial na medida adotada.

### **4.1.1 CESAMA**

A Companhia de Saneamento Municipal – Cesama tem como principais atribuições planejar e executar sistemas de água e esgoto de Juiz de Fora e alguns distritos, buscando a universalização na prestação dos serviços. Atualmente, cerca de 99% da população têm acesso à água tratada e, aproximadamente, 98% contam com serviço de coleta de esgoto. Nos últimos anos, a companhia tem investido em obras de abastecimento.

Além do booster da Terceira Adutora, foi inaugurada adutora de Chapéu d'Uvas, garantindo maior agilidade operacional para o sistema da cidade, e outras grandes obras estão em andamento, como a sub adutora de São Pedro, o reservatório do bairro Caiçaras e a interligação da adutora de Chapéu d'Uvas à Estação de Tratamento de Água (ETA) Marechal Castelo Branco. Além da expansão do sistema de abastecimento, a CESAMA busca desenvolver ações que contribuam para a preservação do meio ambiente, em especial dos recursos hídricos disponíveis no município. Com prioridade para as obras de despoluição do Rio Paraibuna, que irão proporcionar um aumento significativo no índice de tratamento de esgoto, saltando dos atuais 10 para mais de 50% nos próximos anos.

O booster terceira adutora Parque de Exposição é composto por dois conjuntos moto bomba em paralelo, mais uma de reserva, com potência de 600 CV e vazão de 600 litros por segundo cada conjunto.

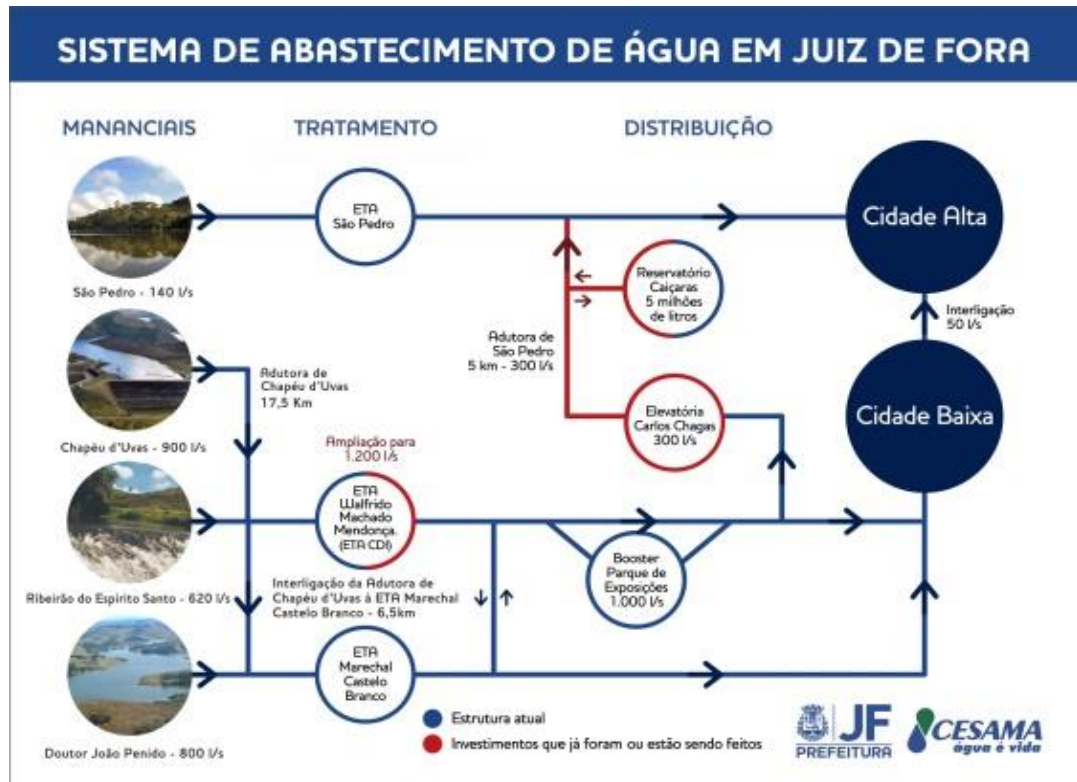
Esta estação funciona de acordo com a demanda, aumentando e diminuindo a rotação dos motores e com isso aumentando velocidade da água nas tubulações e, conseqüentemente, a oferta do produto, podendo chegar a mil litros por segundo.

A estação foi entregue à população do município, ampliando a capacidade de adução dos sistemas de produção João Penido e Estação de Tratamento de Água Walfrido Machado Mendonça (ETA CDI) para o sistema de distribuição.

A figura 1 mostra o sistema de distribuição de água de Juiz de fora desde a captação, passando pelo tratamento e chegando até a distribuição da terceira Adutora Parque de Exposição.

Na figura 1 mostra alguns pontos em vermelho que ainda estão sendo investidos.

Figura 1 - Sistema de Abastecimento de Juiz de Fora



Fonte: CESAMA

#### 4.1.2. ESTRUTURA TARIFÁRIA DE ENERGIA NO BRASIL E SEU CUSTO

A estrutura tarifária vigente é a composição de tarifas que são aplicadas à demanda de potência ou consumo de energia elétrica de acordo com tensão e modalidade de fornecimento (NETO, 2008).

A Resolução Normativa nº 414/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece as condições gerais de fornecimento de Energia Elétrica. Suas disposições são válidas tanto para distribuidoras como consumidores de energia.

Segundo Tsutiya (2006), o entendimento do sistema tarifário é uma alternativa para se buscar uma forma de reduzir custos com energia elétrica, pois deve-se verificar para cada instalação qual a melhor alternativa de cobrança de energia.

### 4.1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO

A aprovação da “Lei de Eficiência Energética” (Lei no 10.295 de 17. Out.2001 – BRASIL, 2001), cuja tramitação no Congresso Nacional iniciou em 1990, vem instituir a etiquetagem obrigatória no Brasil, mecanismo de reconhecida eficácia para melhorar o uso eficiente de energia. O primeiro equipamento a ser regulamentado foi o motor elétrico trifásico, através do Decreto 4.508, de 11.Dez.2002

Estima-se que este equipamento pode chegar a consumir 32% da energia elétrica do país (MME, 2001).

Com o objetivo de promover o uso eficiente de energia e combater seu desperdício foi criado em 1985 o PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, coordenado pelo MME e executado pela Eletrobrás. Somente no ano de 2014 o PROCEL contribuiu para uma economia de 10.500 GWh.

Em 2003, a ELETROBRAS/PROCEL instituiu o PROCEL SANEAR – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, que atua de forma conjunta com o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. PROCEL SANEAR vem atuando no setor de saneamento desde 1996, porém seu foco estava restrito ao uso eficiente de energia elétrica nos conjuntos moto-bombas dos sistemas de saneamento.

Com a criação de o PROCEL SANEAR, este enfoque foi ampliado e, atualmente, abrange também ações quanto à conservação da água, visando integrar os dois temas; além do desenvolvimento e a operacionalização de projetos e políticas governamentais.

O PROCEL SANEAR tem como principais objetivos:

- Promover ações que visem ao uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, incluindo os consumidores finais;
- Incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos, como estratégia de prevenção à escassez de água destinada à geração hidroelétrica;

- Contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental, com menores custos para a sociedade.

O programa identificou o potencial de economia de energia elétrica para o setor cerca de 1.557 Mwh/ano. Podem ser tomadas medidas administrativas e operacionais para reduzir o custo com energia elétrica, essas medidas estão detalhadas a seguir:

#### **4.1.4. BOMBAS HIDRÁULICAS**

Conforme (REGIS, 2010). O método de bombeamento pode ser determinado como o resultado de acrescentar energia a um fluido visando deslocá-lo de um ponto a outro.

A bomba hidráulica sede energia ao fluido que se desloca através da tubulação de recalque assim atingindo a altura desejada. As bombas são subdivididas em dois grandes grupos:

- a) Bombas volumétricas (ou de deslocamento positivo)
- b) Bomba Centrífuga cujos tipos mais comuns são as bombas centrífugas radiais centrifugam de fluxo misto e centrífuga de fluxo axial.

As bombas volumétricas caracterizam-se por produzir, em uma ou mais de suas câmaras, variações do volume interno, o que acarreta ou provoca as variações de pressão responsáveis pela sucção e recalque do fluido.

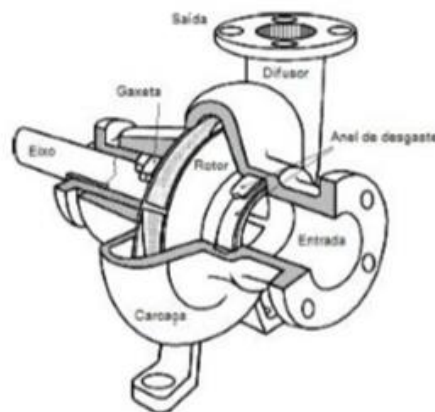
Segundo CARVALHO (1984), as bombas centrífugas se caracterizam pela existência de um rotor dotado de palhetas que fica em contato com o fluido, de tal forma que é movimentado por uma fonte de energia, a ação centrífuga e da força de sustentação produzida pelo escoamento do fluido em torno das palhetas, provocam uma sucção na entrada do rotor que aspira o fluido. Assim o fluido é submetido a uma força centrífuga que eleva a pressão, com isso e ocasionando o recalque do fluido.



#### 4.1.5. BOMBA CENTRIFUGA

De acordo (TSUTIYA, 2006), as bombas centrífugas movimentam o líquido através da força fornecida pelo giro do rotor, dando força ao líquido, que isso aumentada a pressão na saída da bomba, isso ocorre através da voluta da bomba. A Figura 2 apresenta uma bomba centrífuga

**Figura 2 - bomba centrífuga**



Fonte – TSUTIYA, 2006.

As bombas centrífugas possuem dois componentes fundamentais:

- a) Rotor;
- b) Difusor.

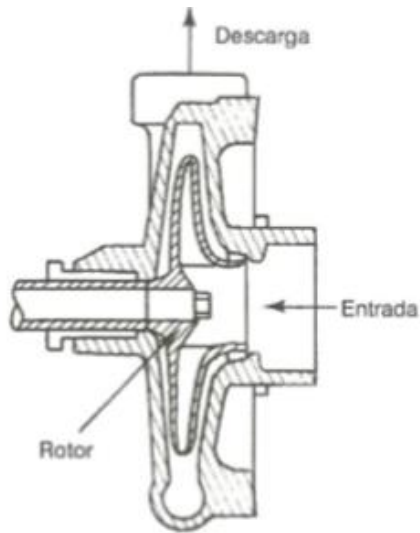
O rotor é muito importante para o processo de bombeamento. Sendo responsável pela sucção do fluido e recalcar para fora da bomba aumentando a vazão e a pressão. Um motor é acoplado ao seu eixo fazendo a movimentação do fluido. O difusor tem o papel de captar o líquido expelido pelo rotor e encaminhá-lo para a tubulação de recalque. O difusor é um canal de seção crescente, causando redução na velocidade e conseqüente aumento na pressão do fluido.

#### Classificação das Bombas Centrífugas

TSUTIYA (2006), cita que as bombas podem ser de fluxo radial; fluxo misto; e de fluxo axial.

- a) Bombas de fluxo radial: São bombas que se caracteriza por recalcar pequenas vazões em grandes alturas. A Figura 3 ilustra esse tipo de bomba.

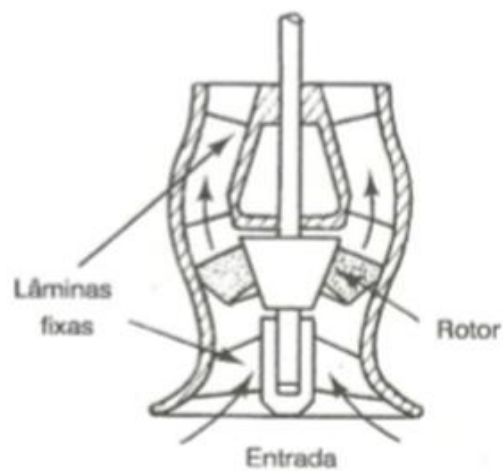
**Figura 3 - Bomba radial.**



Fonte – TSUTIYA, 2006.

- b) Bomba de fluxo axial: Esse tipo de bomba, mostrada na Figura 4, é usado para recalcar grandes vazões e pequena altura de elevação.

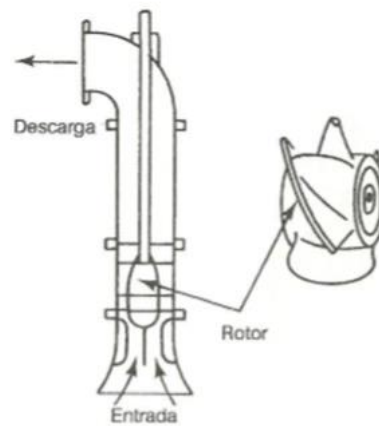
**Figura 4 - Bomba axial**



Fonte – TSUTIYA, 2006.

- c) Bombas de fluxo misto: São utilizadas para os casos em que a altura de elevação seja levemente baixa e a vazão elevada. A Figura 5 apresenta esse tipo de bomba.

Figura 5 - Bomba misto.



Fonte – TSUTIYA, 2006.

Segundo TSUTIYA (2006) apresenta três tipos de conjuntos moto-bomba.

- Conjunto de eixo horizontal;
- Conjunto de eixo vertical;
- Conjunto moto-bomba submerso.

Figura 6 - Conjunto de eixo horizontal.



Fonte – AUTOR, (2018)

**A Figura 7- Conjunto de eixo vertical.**



Fonte – Orteb

**A Figura 8 - Conjunto motor-bomba submersa.**



Fonte – Sulzer

#### **4.1.6 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS CENTRIFUGA**

Rafael Fernando Dutra (2013 apud MACINTYRE, 1997), em varias aplicações, o campo de variação da vazão ou altura manométrica pode ser excessivamente amplo para ser abrangido por uma única bomba, mesmo variando a sua velocidade.

Por este motivo, recorre-se à associação de bombas em série ou em paralelo, desejando à redução de custos do projeto, ao aumento de segurança de operação ou à flexibilidade do processo.

#### **4.1.7 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS SERIE**

Segundo Rafael Fernando Dutra (2013 apud Henn,2006), por meio de bombas ligadas em série, têm-se a mesma vazão, enquanto se proporciona uma altura manométrica total representada pela soma das alturas manométricas individuais das bombas. Este tipo de sistema é empregado em bombas de múltiplos rotores, bombas submersas de poços artesianos ou ainda em processos em que haja condições de pressão bastante diversas ao longo do tempo. Por não se tratar do objeto de estudo desse trabalho, não será dado maior enfoque neste tipo de associação e para um maior aprofundamento sobre o assunto, deve-se consultar a literatura corrente (Henn, 2006 e Macintyre, 1997).

#### **4.1.8 ASSOCIAÇÃO DE BOMBAS EM PARALELO**

Consiste na ligação em paralelo das tubulações de recalque de modo tal que pela mesma tubulação escoam as descargas de duas ou mais bombas funcionando simultaneamente. Segundo Rafael Fernando Dutra (2013 apud MACINTYRE, 1997; PORTO, 2006) como mostra na figura abaixo.

**Figura 7 – Barrilete de recalque**

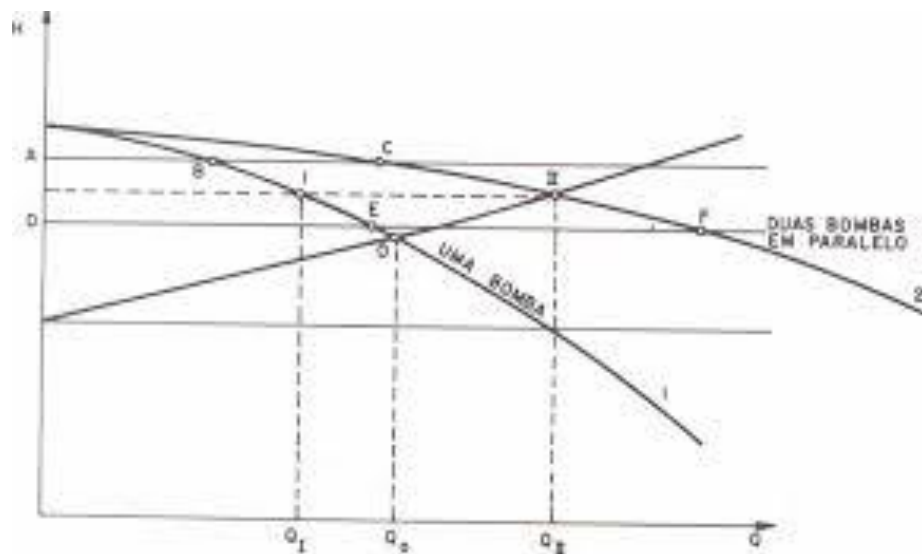


Fonte – Autor(2018)

Neste sistema, conforme Segundo Rafael Fernando Dutra (2013 apud Henn, 2006), os valores de altura manométrica permanecerão iguais enquanto o valor de vazão total do sistema corresponderá à soma das vazões individuais de cada uma das bombas.

(Rafael Fernando Dutra (2013 apud Macintyre 1997) e Porto 2006) afirmam que, se não houvesse perdas de carga no sistema, a vazão do sistema com duas bombas seria o dobro da vazão com uma única bomba. No entanto, em situações reais, conforme mostra a Figura 7 onde é traçada uma curva de perda de carga do sistema, o valor de vazão com duas bombas é menor que o dobro da fornecida por uma só bomba, e a resultante do funcionamento de três bombas tem um valor ainda mais baixo que o triplo do correspondente a uma bomba.

**Figura 8 - Vazão das bombas individuais**



Fonte Macintyre 1997

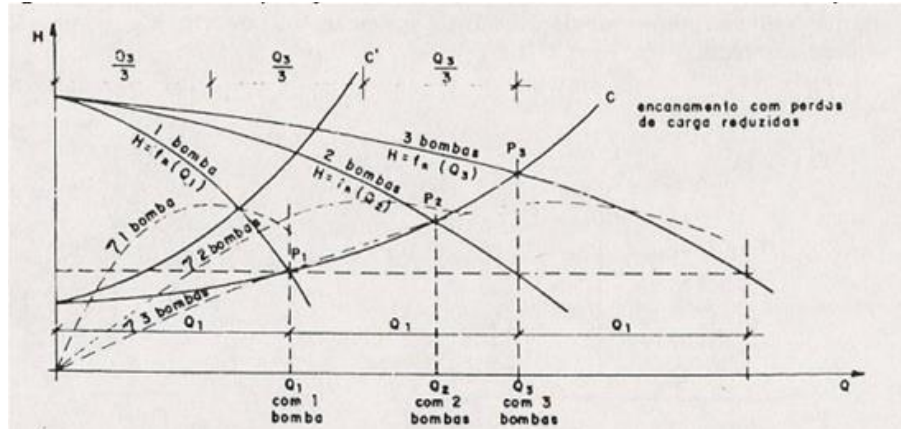


Figura 9 - Pontos de operação com uma, duas e três bombas idênticas em paralelo

Fonte Macintyre 1997

Pela Figura 8, pode-se perceber que quanto maior for a perda de carga do sistema, menor será o aumento da descarga (vazão de bombeamento) causado pela associação em paralelo. Por essa razão, deve-se estudar com atenção um sistema com bombas trabalhando em paralelo, para se evitar que elas trabalhem com valores de descargas muito abaixo de seu valor nominal, o que causará cavitação, aquecimento excessivo e baixa eficiência segundo Rafael Fernando Dutra (2013 apud MACINTYRE, 1997).

#### 4.1.9 MOTOR ELÉTRICO E O FUNCIONAMENTO DA BOMBA CENTRÍFUGA

CARVALHO (1984), afirma que para o funcionamento de uma bomba centrífuga é necessário uma fonte de acionamento externa à bomba, como um motor elétrico.

Na Figura 9 ilustra um dos principais acionadores de bombas, as quais constituem as maiores cargas de um sistema de abastecimento de água e de esgoto sanitário (SNSA, 2008).

**Figura 10 - Motor Elétrico**



Fonte: Autor (2018)

Conforme (MARQUES, 2006) motor é um conversor eletromecânico que, baseado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica.

Esse motor acoplado em uma bombas centrífugas, tem a função de girar o rotor dentro da voluta da bomba, movimentando o líquido e criando a força centrífuga, que se transforma em energia cinética e de pressão, repassando-a ao fluido.

A entrada do líquido na bomba é chamada de sucção, onde a pressão pode ser inferior à atmosférica ou superior. A saída da bomba é conhecido como recalque. A diferença de pressão na sucção e no recalque da bomba é conhecida como altura manométrica total e determina a capacidade da bomba recalcar o líquido, em função das pressões que deverá vencer expressa em energia de pressão.

#### **4.2. SISTEMA DE BOMBEAMENTO COM BOMBA CENTRÍFUGA**

Segundo (MOREIRA, 2008). Uma bomba pode operar a uma rotação constante e produzir vazões mínimas e máximas de acordo com sua velocidade.



A equação 1 apresenta o calculo para o rendimento de um motor:

$$pc = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (1)$$

Onde:

PC – potência cedida ao líquido (CV);

$\gamma$  – peso específico do líquido (kgf/m<sup>3</sup>);

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/s);

H – carga da bomba (m);

75 – fator de conversão de kgm/s para CV;

$\eta$  – rendimento da bomba.

Ainda segundo MOREIRA (2008), afirma que a potência de uma bomba centrífuga acionada por um motor elétrico de indução trifásico é dada pela equação (2).

$$Pe = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \eta \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

Onde:

PE – potência consumida da rede elétrica por motor de indução trifásico (W);

V – tensão entre fases (V);

I – corrente (A);

$\cos \varphi$  – fator de potência;

$\eta$  – rendimento da bomba.

#### 4.2.1. CURVA DO SISTEMA

De acordo (POLESE, 2010), aponta quanto de energia e gasto para que o líquido seja bombeado pela tubulação para vencer as resistências concedidas. Ainda GOMES (2010), explana que o gráfico sistema é obtido a partir da equação (3):

$$H=H_g+K.Q^2 \quad (3)$$

Onde:

H - altura manométrica do sistema (m);

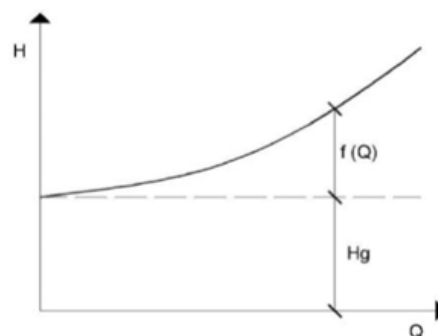
$H_g$  - altura geométrica, (m);

k - constante referente às perdas de cargas localizadas;

Q - vazão do sistema, (m<sup>3</sup>/s).

A curva mostra a variação da pressão manométrica em função da variação de vazão. Na Figura 10, mostra a variação de pressão x vazão.

**Figura 11 – ponto ideal do sistema.**



Fonte: Polse,2010

Onde:

(Hg) - representa a altura estática total;

f(Q), - corresponde à parcela dinâmica;

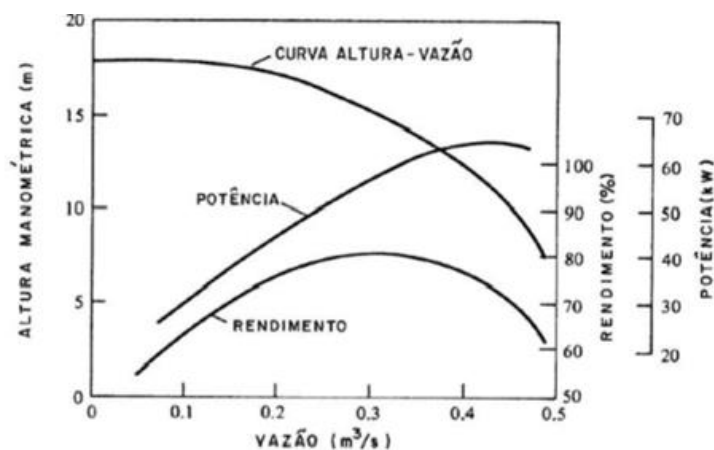
(f(Q)=kQ<sup>2</sup>) varia de acordo com a vazão

#### 4.2.1 Curva das Bombas Centrífugas

Conforme GOMES (2010), esclarece que as alguns gráficos de bombas vão de encontro com a vazão recalçada e com a altura manométrica, e com a potência absorvida e com o rendimento.

Em tese, as curvas características das bombas centrífugas têm as condições apresentado na Figura 11.

**Figura 12 - Curva caraterística de uma bomba centrifuga**



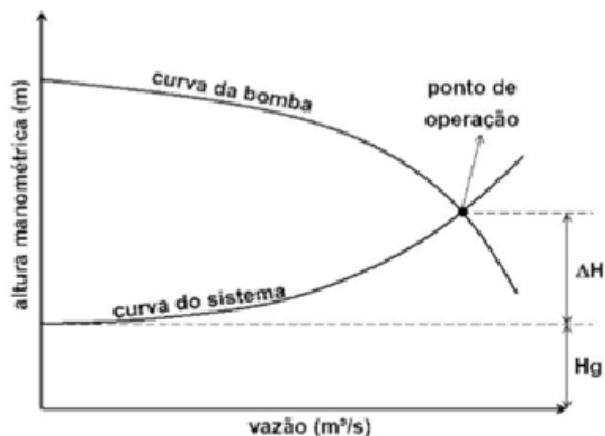
Fonte – TSUTIYA, 2006 (adptado)

O gráfico altura manométrica x vazão, e a relação entre a vazão que a bomba é suficiente para recalcar um determinado valor de altura manométrica de pressão.

Segundo (TSUTIYA, 2006), a seleção do conjunto moto-bomba, se faz através uma análise previa da curva do sistema no ponto mais alto e depois faz uma pesquisa de curva das bombas disponíveis no mercado. Assim pode-se definir o tipo de funcionamento do sistema, ou seja, com uma única bomba ou com duas bombas em paralelo.

O momento de uma bomba num determinado sistema é concedido pela intercepção da curva de operação do sistema. A Figura 12 mostra o ponto de intersecção da curva do sistema com a curva da bomba.

**Figura 13 – Ponto de operação de uma bomba no sistema**



Fonte: ZAMBON e CONTEIRA, 2011

(GOMES, 2010). Quando exige uma eficiência na demanda de água e necessário um bom controle de vazão e pressão. Nesse caso o controle é fundamental quando a carga solicitada ao sistema que vai modulando durante o dia, isso quanto é um Booster.

#### 4.2.2 Métodos de Controle de Vazão

Para controle de vazão constante segundo (GOMES (2010), explica que algumas das técnicas usadas atualmente, (Liga-Desliga, By-Pass e Válvula de

estrangulamento), para esse tipo de acionamento, tem um grande desperdício de energia elétrica, contudo, outros acionamentos eletrônicos, são muito mais eficientes.

Conforme (TSUTIYA 2006). Indica que dentre todos os acionamentos de motores, o melhor custo benefício em relação a consumo de energia e o uso do inversor de frequência.

### **4.2.3 Acionamentos Eletrônicos**

Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud SILVA JR 2004), com o grande desenvolvimento da eletrônica de potência e com a aparição de novos acionamentos eletrônicos tornou-se uma excelente alternativa. O acionamento tipo tiristorizado pode ser usado para partida de motores de indução, com a utilização de soft-starters, ou com o inversor de frequência no controle PID de bombas centrífugas. Como a velocidade do motor de indução trifásico é proporcional à frequência das tensões e da corrente de entrada, os motores ligados por uma soft Start operam numa velocidade constante, a única coisa e a partida que e em rampa. No caso para um controle mais preciso de velocidade e usado o inversor de frequência.

Conforme Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud MOREIRA, 2008). A utilização de inversores de frequência tem uma economia de energia reduzindo os custos operacionais e evitando o desperdício de material.

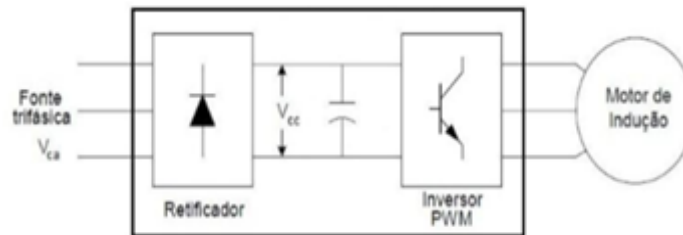
### **4.2.4 O Inversor de Frequência**

O inversor de Frequência e um acionamento mais utilizado atualmente para controle de rotação de motores de indução, são equipamentos eletrônicos tiristorizado que permitem um bom controle de velocidade, por meio da tensão e da frequência aplicadas aos motores.

GOMES (2010) afirma que a denominação “inversor de frequência” é popularmente usada, onde a entrada é dada em corrente alternada (CA), com tensão e frequência constantes, e a saída é também em CA, porém, com tensão

e frequência variáveis. A composição do inversor de frequência é apresentada na Figura 13.

**Figura 14 – Disposição de um inversor de frequência**

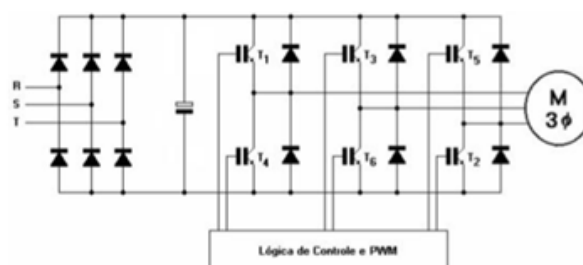


Fonte: Gomes 2010

Os inversores de frequência mais comuns se utilizam do controle escalar, no qual é feito o controle da relação tensão/frequência (V/f). Além dos inversores que aproveitam esse tipo de técnica de controle, alguns inversores tem outras alternativas de controle que mais avançadas, que necessita de uma grande precisão. Esse controle chamado “controle vetorial”, em que o controle da tensão (V) e da frequência (f) é independentemente um do outro.

RODRIGUES (2007), explana que a energia que vem da rede elétrica CA, passa por uma ponte retificadora que é retificada para tensão em CC essa tensão passa por um filtro capacitivo e é aplicada para alimentação do circuito. Esse controle é feito por transistores que é um circuito aparte do circuito de comando separado, como visto na Figura 14.

**Figura 15 – Circuito eletrônico de um inversor de frequência**

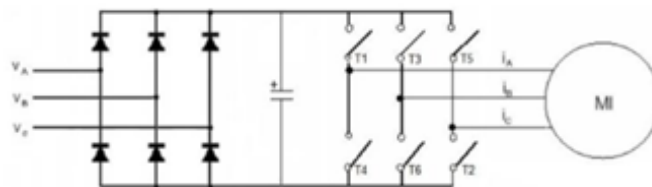


Fonte: Gomes 2010

Os transistores e diodos que fazem parte do circuito de potencia de um inversor de frequência atuam como chaves eletrônicas abrindo e fechando, conforme esquematizado na Figura 15.

Segundo RODRIGUES (2007), que essas chaves são controladas, na sua abertura e no seu fechamento através de um controle lógico, ligando e desligando-os de modo a intercalar o sentido da corrente que circula pelo motor de indução.

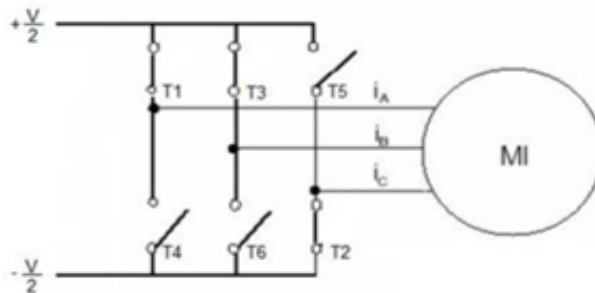
**Figura 16 - Chaveamento do bloco inversor**



Fonte – Gomes 2010 (adptado)

Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud SILVA JR (2004)). Quando o Inversor de frequência estiver em funcionamento ocorrerá o acionamento dos transistores associando-os três a três, por exemplo, ligando os transistores T1, T2 e T3, e desligando os demais T4, T5 e T6, como mostrado na Figura 16. A cada ciclo de chaveamento alterna-se o sentido da corrente no motor, formando uma tensão alternada defasada e  $120^\circ$  uma da outra.

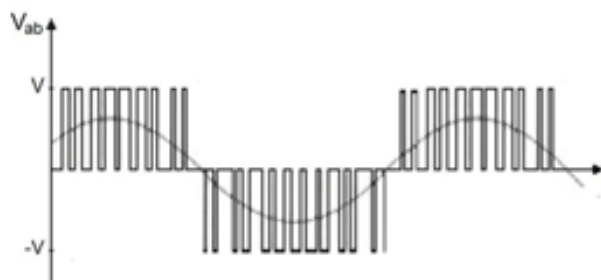
**Figura 17 – Esquema de funcionamento dos transistores no motor de indução**



Fonte – RODRIGUES, 2007 (Adaptado)

Conforme Danilo Bernardis Albaneze (2012). Um inversor de frequência com controle escalar irá proporcionar, em sua saída, uma tensão e frequência variáveis, mantendo a relação  $V/f$ . Essa tensão de saída que é aplicada ao motor, gerada por tiristores eletrônicos, chaveados a altas frequências dentro do circuito retificador do inversor de frequência, que consiste em varias sucessão de pulsos de tensão. Esses pulsos são modulados com larguras diferentes a chamada técnica PWM senoidal, em que uma onda senoidal é comparada com uma onda triangular para a formação dos pulsos de tensão, de forma que a tensão média se assemelha a uma onda senoidal. A tensão de linha na saída do inversor de frequência possui uma forma de onda quadrada como ilustra na Figura 17.

**Figura 18– Forma de onda de saída de tensão de um inversor de frequência**

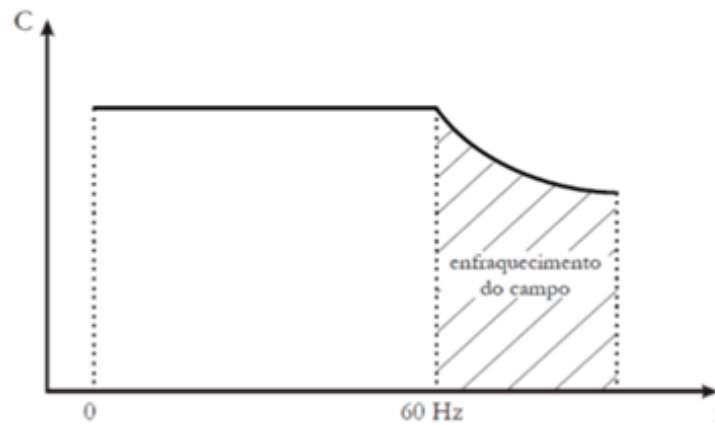


Fonte: BRAGA, 2007.



As curvas características do torque e da potência em função da frequência de alimentação são observadas na Figura 18, nelas o conjugado permanece constante até a frequência nominal de 60 Hz e, acima desta, começa a decrescer tendo o enfraquecimento do campo.

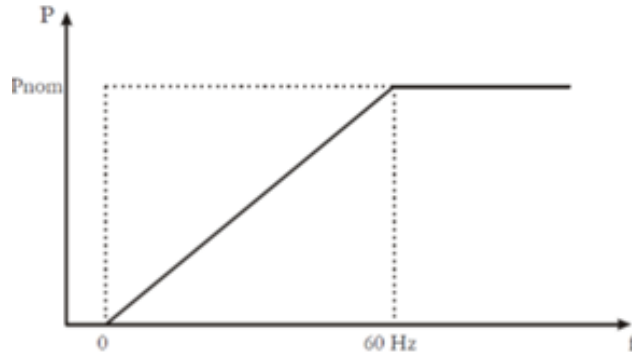
**Figura 19– Curva do conjugado de acordo com a frequência de alimentação**



Fonte: GOMES, 2010

A potência de saída do inversor de frequência comporta-se da mesma forma que a variação  $V/f$ , ou seja, cresce linearmente até alcançar a frequência nominal que é de 60 Hz e permanece constante acima desta, como ilustra a Figura 19.

**Figura 20– Curva de potencia de acordo com a frequência de alimentação**



Fonte: GOMES, 2010

GOMES (2010), diz que há uma tendência entre os projetistas adotar a faixa de 50 a 100% da velocidade de rotação nominal para o acionamento das bombas.

#### 4.2.5 Variadores de Rotação

Conforme REGIS (2010), os métodos que trabalham com bombas centrífugas possuem, em geral, uma demanda de vazão variável, pode ser feito de várias maneiras, sendo uma das mais usuais, aquela em que se utiliza uma válvula de controle, contudo, desta maneira, a diminuição da vazão é acompanhada por um aumento da perda de carga.

A solução nesse caso é usar um inversor de frequência que, reduzindo a rotação de trabalho do motor, alteraria a curva da bomba. Assim, a diminuição da vazão conduz também a um menor valor da perda de carga, fornecendo uma economia de energia, quando comparada ao método que utiliza válvula de controle.

Em estudos realizados na cidade de São Paulo e na cidade de Lins, interior do estado, TSUTIYA (1997) concluiu que, dentre todos os métodos de controle, o mais econômico com relação ao consumo de energia elétrica, é com o uso do inversor de frequência. Em sua pesquisa efetuada em Lins, foi verificada uma economia de 38% no consumo de energia elétrica, quando se utiliza o inversor de frequência, em relação ao bombeamento com rotação constante. Outro ponto observado por TSUTIYA, consiste no fato de que, com o uso do inversor, as pressões na rede de distribuição permanecem praticamente constantes, não havendo grandes flutuações como acontece quando o bombeamento é feito com bombas de rotação constante.

#### 4.2.6 Leis de Similaridade

Conforme SILVA JR (2004), a variação na velocidade de rotação pode ser controlada pelo inversor de frequência através da variação da frequência de operação, de acordo com a equação (4). Vê-se que uma redução na frequência provoca redução na velocidade de rotação, ao passo que o aumento da frequência implica num aumento de velocidade, não excedendo a frequência da rede elétrica, que tende o enfraquecimento do campo.

$$n = \frac{120 \cdot f \cdot (1 - S)}{p} \quad (4)$$

Onde,

$n$  – velocidade de rotação (rpm);

$f$  – frequência (Hz);

$s$  – escorregamento.

$p$  – número de pólos do motor.

Desse modo, os inversores de frequência controlam a velocidade de rotação do motor elétrico, cujo eixo está acoplado ao rotor da bomba. Ao variar a rotação da bomba, suas curvas de funcionamento são alteradas, mudando o ponto de operação do sistema. As equações que relacionam a vazão, a altura manométrica total e a potência, com a velocidade de rotação da bomba, são conhecidas como Leis de Similaridade (GOMES, 2010). Com a alteração na rotação da bomba tem-se a variação da vazão (Q), dada pela equação (5), da potência absorvida, dada pela equação (6) e da altura manométrica (H), dada pela equação (7).

- A vazão varia diretamente proporcional a variação da rotação, conforme apresentado na equação (5)

$$Q = \left(\frac{n}{n_1}\right) \cdot Q_1 \quad (5)$$

- A potência absorvida proporcionalmente ao cubo da variação da rotação conforme equação (6).

$$P = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3 \cdot P_1 \quad (6)$$

- A altura manométrica varia proporcional ao quadrado da variação da rotação conforme equação (7).

$$P = \left(\frac{Q}{Q_1}\right)^2 \cdot P_1 \quad (7)$$

Onde,

Q 1 – Vazão antiga (m<sup>3</sup>/s);

Q – Vazão obtida com a nova rotação (m<sup>3</sup>/s);

P 1 – Potência absorvida (W);

P – Potência absorvida com a nova condição (W);

H 1 – Altura manométrica (m);

H – Nova altura manométrica (m);

n 1 – Rotação antiga (rpm);

n – Nova rotação (rpm).

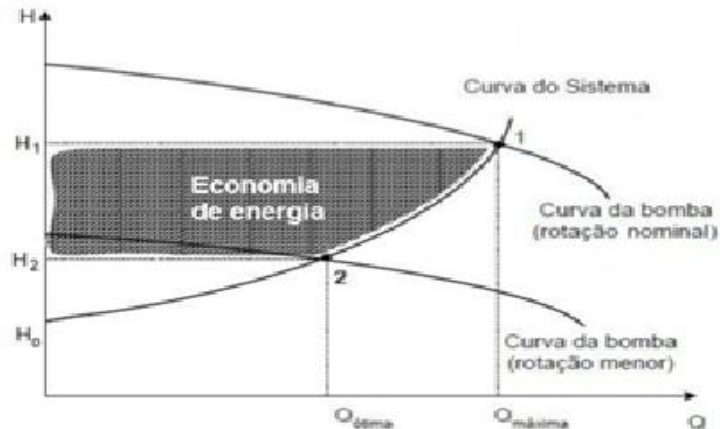
Segundo Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES 2010), além do grande potencial para a redução do consumo de energia, os resultados com aplicação de bombas, operando com variação da velocidade de rotação, vão bem além do ganho quantitativo de energia, podendo incluir aumento do desempenho e confiabilidade do sistema de distribuição de água.

#### **4.2.7 Inversor de Frequência em Bombas**

Inversores de frequência constitui uma prática de grande potencial de economia de energia. Essa economia obtida com a operação com rotação variável, em lugar do acionamento direto da rede elétrica, pode ser visualizada na Figura 20.

A figura 20 apresenta o ponto de trabalho original, com uma partida direta da rede de energia, é dado pela interseção da curva da bomba, com rotação nominal, com a curva do sistema, no ponto 1.

**Figura 21– Mudança no ponto de funcionamento do sistema**



Fonte: GOMES, 2010

Com o uso do inversor de frequência para fazer o controle de velocidade da bomba, será modificada sua curva característica, trazendo a curva para o ponto 2 que é o ponto ótimo de seu funcionamento fazendo.

A diminuição da velocidade de rotação conduz a uma menor vazão e a um menor valor da altura manométrica de bombeamento, o que gera uma economia de energia.

O novo ponto de operação acarreta em um menor valor de pressão, e de acordo com a equação (6), o ponto 2 resultará em uma economia de potência absorvida em relação ao ponto 1, e, conseqüentemente, a um menor consumo de energia.

A figura 20 apresente a economia de energia atingida com a utilização do inversor de frequência (ponto 2) é proporcional à área rachurada.

Segundo MARQUES (2006), a economia com o uso do inversor, ( $\Delta E$ ), é dada em uma função da parcela ( $\Delta H$ ) e do número de horas, de operação ( $t$ ), como mostra a equação (8).

$$\Delta E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot t}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_m \cdot \eta_b} \cdot \Delta H \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde

$\Delta E$  – Economia de energia (kWh)

$\rho$  – densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  – aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )

$Q$  – Vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$t$  – tempo (h)

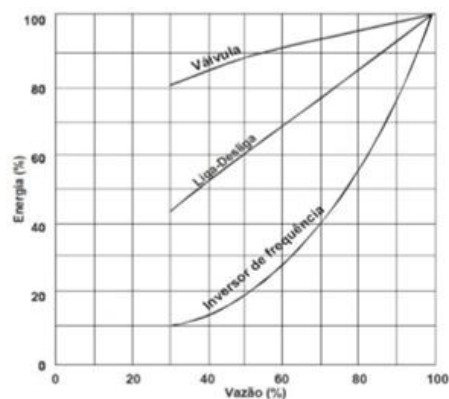
$\Delta H$  – Pressão (m)

$\eta_m$  – rendimento do motor (%)

$\eta_b$  – rendimento da bomba (%)

A Figura 21 apresenta a comparação entre os consumos de energia elétrica de bombas centrífugas, utilizando os métodos de controle de vazão mais comuns: válvula de controle (estranguladora), método liga-desliga e com o uso do inversor de frequência

**Figura 22– Consumo entre os métodos de controle**



Fonte: GURGEL, 2006

Pode-se dizer que o uso de inversores de frequência sobre os outros dois tipos de controle, porém, MARQUES (2006), afirma que bombas operando com modulação de velocidade, muitas vezes são descartadas pelos projetistas pelo seu elevado custo um inversor de frequência, se comparado com um sistema de velocidade constante. No entanto, trata-se de um custo inicial, portanto, é

necessário se fazer uma análise dos custos operacionais e de manutenção dos equipamentos em comparação ao menor consumo de energia e menor desgaste da bomba, proporcionado pelo inversor. Devem ser analisadas também as necessidades do sistema no que se referem às variações de vazão e o tempo de permanência de um determinado ponto de operação, principalmente na diminuição da vazão. Além da considerável economia de energia, SNSA (2008) e GOMES (2010), apontam que o sistema de controle de velocidade de rotação da bomba apresenta uma série de outras vantagens:

- Aumento da confiabilidade do sistema;
- Aumento da vida útil da bomba devido à eliminação do desequilíbrio interno de pressões, fonte causadora do desgaste mecânico;
- Melhor controle do processo de bombeamento;
- Diminuição do número de rompimentos nos tubos;
- Limitação da corrente de partida;
- Partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- Simplificação da rede de dutos através da eliminação das válvulas de estrangulamento;
- Eficiência do sistema de bombeamento através da obediência às variações de pressão ou fluxo;
- Possibilita a automação do sistema.

#### **4.2.8 Automação do sistema de abastecimento de água**

Segundo GOMES (2010), a automação pode ser definida como qualquer aplicação de técnica computadorizada ou mecânica para diminuir ou suprimir a interferência humana em qualquer processo.

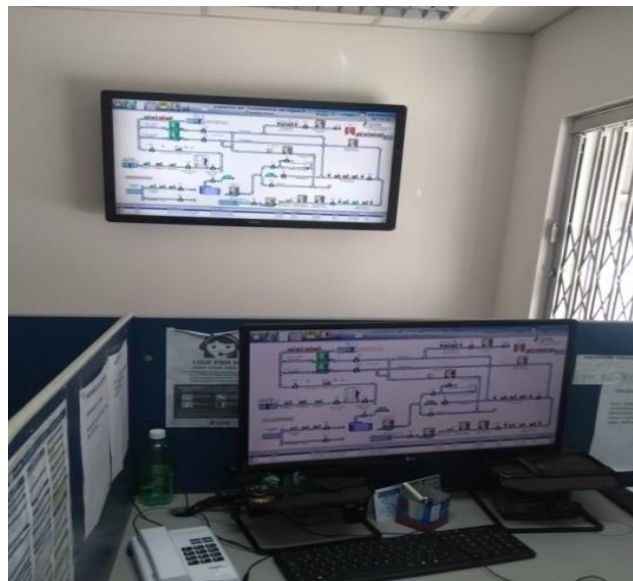


Para TSUTIYA (2006), a automação de sistemas consiste na aplicação de tecnologia que possibilite realizar a supervisão e o controle necessário dos processos envolvidos, de maneira a atendê-los operando com a melhor relação custo benefício.

Um sistema de abastecimento de água automatizado possui um CCO - Centro de Controle Operacional, nesse centro e que chega as informações do campo em tempo real informando as variáveis do campo, temos também as informações de bomba ligada e desligada rotação e corrente.

Os sistemas supervisórios, também conhecidos como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), as informações vem dos CLP's - Controladores Lógicos Programáveis, através de uma rede de comunicação de dados (via rádio ou modem GPRS). A figura 22 apresenta a sala do CCO.

**Figura 23 Imagem da sala do CCO da CESAMA**



Fonte: Autor (2018)

O supervisório propõe essa interface com o operador que é capaz de visualizar todas as informações que vem do campo. O sistema permite que o operador interaja no sistema e mude seus set-points (valores de referências) caso seja preciso. Informações são coletadas que são armazenadas em um banco de dados, gerando gráficos, históricos, projetando tendências estatísticas e alarmes. O

software tem autonomia para comandar o procedimento de acordo com a lógica e sequência de operação pré-estabelecida.

Figura 24 – Tela do operador do CCO.



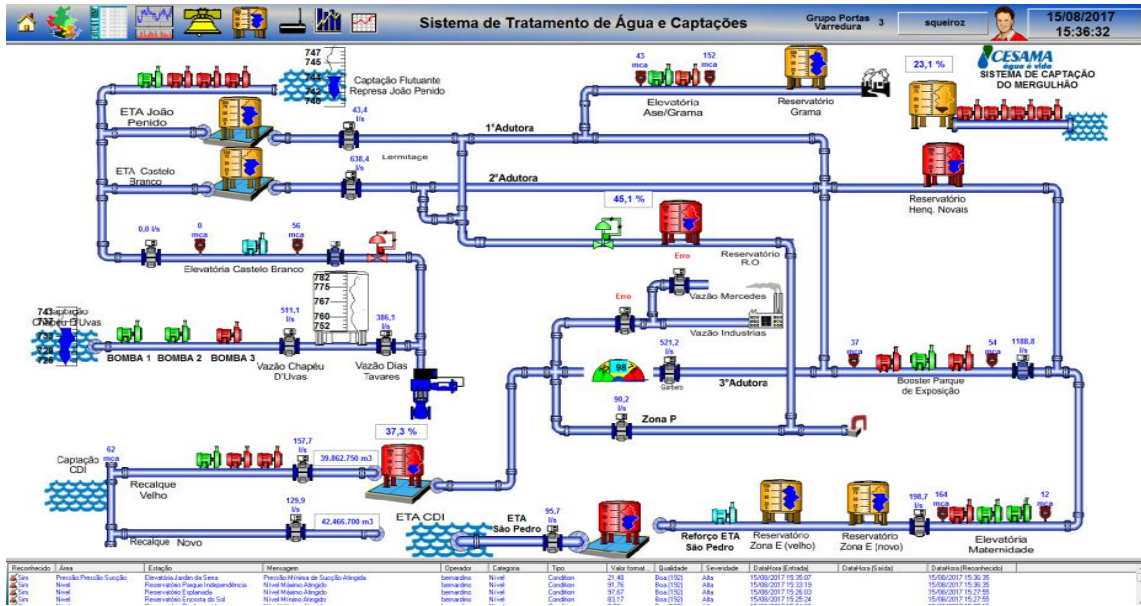
Fonte: autor (2018)

Figura 25– Foto da análise gráfica



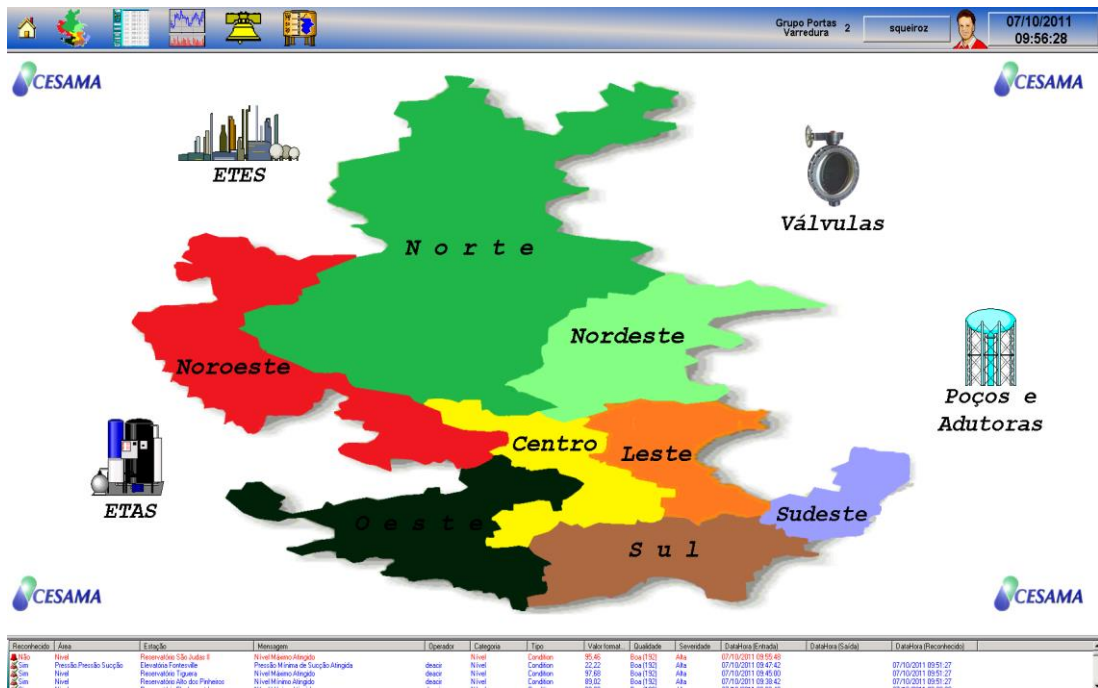
Fonte: Autor (2018)

Figura 26 - Interface do CCO



Fonte: Autor (2018)

Figura 27 - Interface do CCO com as divisões de cada regional



Fonte: Autor (2018)

Com o programa Elipse é possível monitorar todas as variáveis importantes do sistema a ser controlado, comandar e supervisionar o estado dos diversos equipamentos e monitorar qualquer anormalidade operacional, como este sistema de supervisão é capaz de alarmar possíveis problemas, a fim de que as soluções necessárias sejam tomadas de forma ágil.

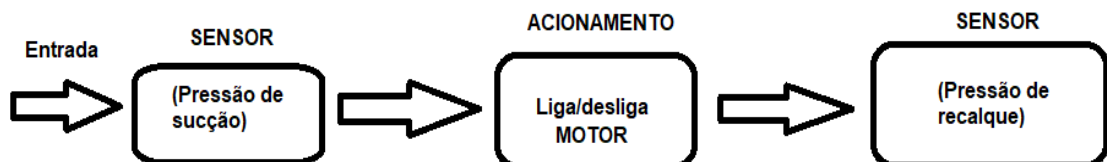
#### 4.2.9 Sistemas de Controle

GOMES (2010) explana que um sistema de supervisório se dispõe de vários componentes físicos, conectados ao campo trocando informações em tempo real com CCO.

Os sistemas de controle podem ser de “malha aberta” ou de “malha fechada”.

O sistema de controle em malha aberta utiliza um transdutor para controlar o processo sem a utilização de realimentação (feedback). Supostamente, considere um sistema de bombas, que se determinam em função do tempo, quantas bombas devem ser ligadas (sem nenhuma variável sendo medida), esse é um exemplo de controle em malha aberta tipo liga-desliga, o CCO não teria nenhuma informação do campo um controle as cegas. A Figura 27 ilustra o diagrama de blocos desse sistema de controle em malha aberta.

**Figura 28 - Diagrama de controle de vazão em malha aberta**

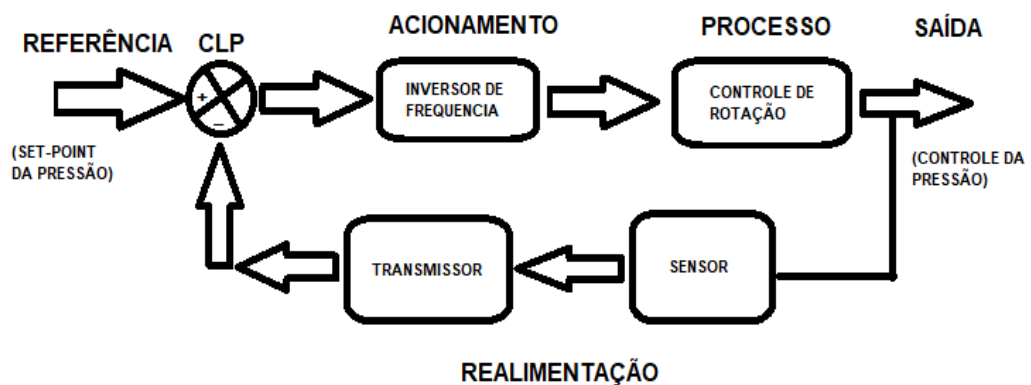


Fonte: Autor (2018)

GOMES (2010), Já os sistemas em malha fechada, conhecidos também como sistemas retroalimentados, determinam a ação corretiva mais eficiente com base nas informações do campo. Para tanto, são utilizados transdutores que enviam um sinal

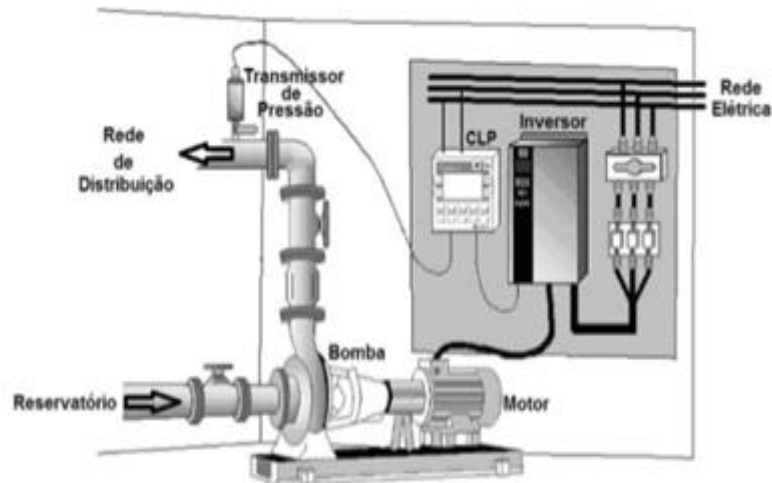
analógico, que forma um looping. Como exemplo de um sistema de controle em malha fechada, pode-se citar o controle da pressão através da variação da velocidade de rotação do conjunto moto-bomba, esse sinal é enviado do sensor passando pelo inversor de frequência que nele já está pré-estabelecido um valor de setpoint (em inglês), que modula a rotação do motor de indução. Esse sinal é reenviado para o CLP com uma comunicação RS 485 que processa essa informação que é enviado em tempo real para o CCO com isso o operador sabe de tudo o que acontece no campo. A Figura 28 apresenta o diagrama de blocos desse sistema de controle em malha fechada, a figura 29 mostra como ficaria no campo.

**Figura 29– Diagrama de controle de malha fechada**



Fonte: Autor (2018)

**Figura 30 - Diagrama de controle de CLP, transmissor de pressão com inversor de frequência.**



Fonte: Braga, 2007

GOMES (2010), Nos sistemas de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da variável controlada. A diferença entre o valor de referência e o sinal da malha de realimentação é chamada de erro. A saída do sistema de controle, geralmente, é definida como variável de controle.

#### 4.3.1 Controle de Pressão de recalque

O controle de pressão de saída da bomba pode ser implementado através da instalação de um sistema de controle com um CLP, um inversor de frequência e um transmissor de pressão. No recalque da bomba da estação elevatória. Os transmissores eletrônicos de pressão, como o da Figura 30, utilizam um elemento primário mecânico elástico, que é conectado a tubulação e se desloca em função da pressão aplicada sobre ele (DANFOSS, 2012). Este movimento é enviado ao transdutor elétrico do transmissor, que o converte em um sinal eletrônico padronizado de 4 a 20 mA, correspondente à pressão medida pelo aparelho. O sinal gerado de 4 a 20 mA, correspondente à pressão medida pelo aparelho.



**Figura 31- Transmissor pressão de recalque**



Fonte: Autor(2018)

Na implementação desse controle, primeiramente é necessário definir um set-point de pressão que garanta o abastecimento em todas as regiões abrangidas pelo sistema. No CLP foi programado um valor do set-point e recebe um sinal de 4-20 mA que vem do sensor que é referente ao valor da pressão medida, enviando essas informações para o inversor de frequência. O mesmo fez uma comparação entre o valor medido e o valor do set-point, definindo se há um aumento ou redução da frequência de acionamento do motor, aumentando ou reduzindo a velocidade de rotação, estabelecendo assim, o ajuste da pressão ideal no sistema naquele instante de tempo. A disposição dos equipamentos para o controle da pressão de saída da bomba, com o auxílio do inversor de frequência, é ilustrada na Figura 29.

#### **4.3.2. Controle de pressão de sucção**

A finalidade do controle de pressão de entrada da bomba é mais proteger a bomba para que ela não funcione à vácuo, o sensor monitoriza a pressão de sucção enviando um sinal de 4-20 mA para CLP. A lógica feita no CLP tem um valor de set point determinado se a pressão diminuir mais que seu set point (pré-determinado) a bomba desliga automaticamente, informando a falta d' água. A disposição dos

equipamentos para o controle da pressão de entrada da bomba, com o auxílio do CLP, é ilustrada na Figura 31. Atualmente na CESAMA essa lógica é implantada em todas as bombas para proteção contra desgaste mecânico.

**Figura 32 - Sensor de Pressão de Sucção**



Fonte: Autor (2018)

#### **4.3.3. Benefícios do controle da pressão**

A influência da pressão nas perdas é conhecida há muito tempo por engenheiros e técnicos das companhias de saneamento. Conforme apresentado por SNSA (2008), um bom controle da pressão é fundamental para a redução de perdas reais (ou físicas) em sistemas urbanos de distribuição de água (SDA), já que os furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta.

SNSA (2008), além de evitar o aumento do diâmetro dos furos das tubulações, uma das maiores vantagens do gerenciamento da pressão em sistemas de distribuição de água é a redução significativa da frequência de novas rupturas de rede. Logo, a redução de suas perdas de água é uma consequência direta da redução do consumo de energia elétrica.

Para GOMES (2010), as principais ações para o controle de pressão em sistemas de distribuição de água (SDA) são: a setorização das redes hidráulicas, instalação de válvulas redutoras de pressão e a operação de bombas com velocidade de rotação variável.



#### 4.3.4 MEDIDAS OPERACIONAIS

Outras aplicações operacionais, que envolve custos e resultados de engenharia, devem ser levadas em conta aspectos técnicos e econômicos para cada caso.

Segundo Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES, 2009) O fator de potência é uma grandeza adimensional que indica a proporção entre a energia ativa e energia total absorvida por um equipamento elétrico. Conforme (SILVA, 2009), seu valor varia entre 0 e 1 indutivo ou capacitivo.

Para clientes no mercado cativo atendidos por média e alta tensão entre 06:00 e 00:00 o valor do fator de potência tem que ser acima de 0,92 indutivo e entre 00:00 e 06:00 acima de 0,92 capacitivo. Caso o cliente trabalhe fora desses horários o mesmo estará sujeito a uma cobrança da companhia de energia. (ANEEL, 2000).

A correção do fator de potência ocorre com a utilização de banco capacitores e pode ser realizada na entrada de energia de alta tensão, na entrada de energia de baixa tensão, por grupos de carga ou correção localizada (WEG, 2016).

Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES, 2009) A redução de altura manométrica pode ser obtida através pela implantação de uma nova linha de recalque por um caminho alternativo, quando o ponto de destino for inferior a cota máxima da adutora. Outra forma de reduzir a altura manométrica é através da diminuição da perda de carga da adutora. Esse efeito pode ser alcançado com a substituição de adutora por uma de maior diâmetro ou menor aspereza, revestimento ou limpeza das tubulações, redução da perda de carga através de redimensionamento dos barriletes e por substituição de peças válvulas de controle.

Para Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES, 2009). O rendimento do Conjunto Moto Bomba tem relação com o rendimento elétrico e hidráulico do conjunto. Caso onde são encontrados equipamentos com baixo rendimento pode ser atribuídos a rotores mal dimensionados ou desgastados pelo tempo de uso, de

acordo com demanda as empresas ficam a redimensionar suas redes com isso os motores podem ficar subdimensionados ou superdimensionados de acordo com o barriletes outro problema são motores que já foi avariado e o elevado custo de um novo motor as empresas acaba optando por rebobinar, outro problema são os excessos de vibração motores mal fixados nas suas bases, além de projetos mal dimensionados.

De acordo Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES, 2009) Em situações nas quais é possível otimizar ou ampliar o sistema de reservação para reduzir ou diminuir o bombeamento durante o horário de ponta pode-se ter um ganho com a redução no valor pago pelo consumo de energia elétrica.

Para uso de reservatórios a jusante Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA, 2010) Nesse modelo de projeto os reservatórios são dimensionados de forma a receber o excesso de consumo no momento em que a produção de água está maior que o consumo isso e geralmente no decorrer do dia, e o abastecimento da população ocorre quando a esse consumo supera a produção.

Uso de mais de um reservatório Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA, 2010) Essa aplicação sugere a construção de dois reservatórios, um apoiado e outro elevado. O volume recalcado para o reservatório elevado seria o suficiente apenas para abastecer a parte superior da área a ser abastecida, utilizado dos conceitos de zona de pressão.

#### **4.3.5. Medidas Administrativas**

Os critérios administrativos podem ser tomadas pela companhia de saneamento que tem como objetivo reduções no custo com energia elétrica.

Segundo Danilo Bernardis Albaneze (2012 apud GOMES, 2009). Essas ações não tem custo para a empresa e são obtidas ajustando o contrato junto a concessionaria de energia elétrica.

Essas ações são:

- Adequação de classe de faturamento;
- Ajuste da demanda contratada;
- Mudança na estrutura tarifária;
- Desligamento de unidades não utilizadas;
- Acompanhamento e conferência da leitura realizada pela concessionária;
- Aproximação com a companhia energética para redução de tarifas.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1 Resultados Obtidos:**

A proposta desse trabalho é um estudo de eficiência energética com duas bombas ligadas em paralelo que visam a comprovar ganhos energéticos sem prejudicar o abastecimento de água.

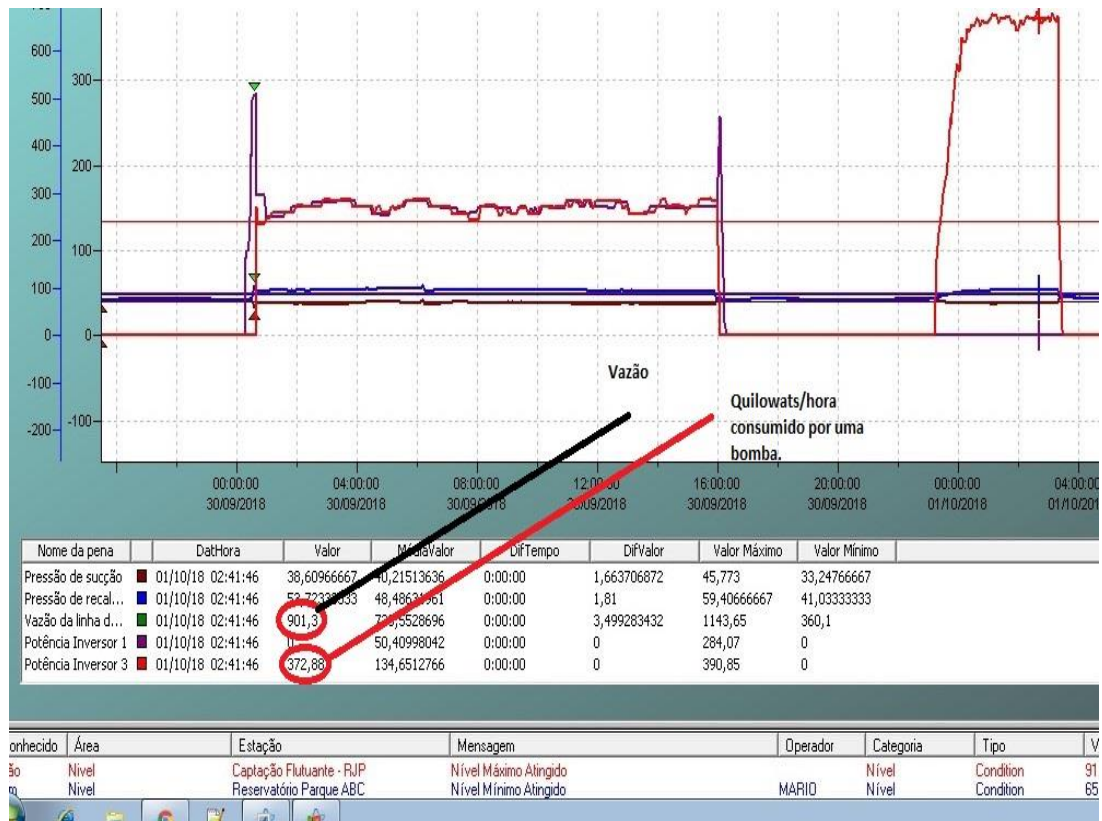
O estudo propõe comparativos para comprovar a eficiência energética de uma bomba e de duas bombas ligadas em paralelo.

No primeiro caso a bomba variar a sua rotação, mas com uma bomba, observamos a vazão, potência consumida e corrente na análise gráfica do CCO e a tela do supervisor.

Caso 1:

Operar com 1 Bomba Booster Parque de Exposição

**Figura 33 – Informação em tempo real do CCO da Vazão e do Quilowatts/hora consumido por uma bomba.**



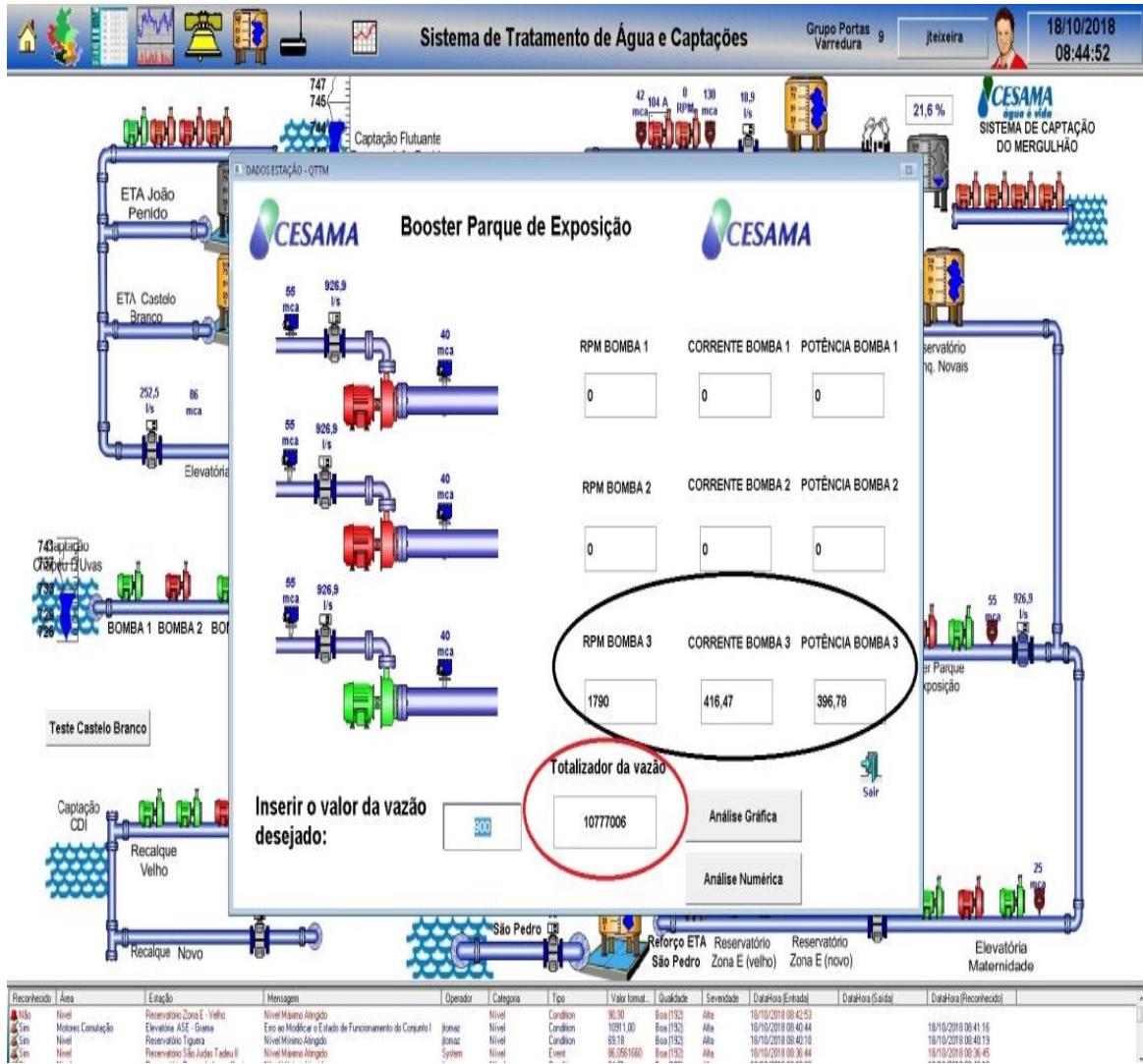
Fonte: Autor (2018)

Com uma bomba funcionando a vazão medida é de 901,3L/s.

Com uma energia consumida de 372,88 kWh.

Na figura 33 apresenta uma interface do sistema supervisório “Elipse” mostrando uma bomba em funcionamento a vazão instantânea, rotação, corrente do motor e sua potencia consumida e o totalizador da vazão esses são os parâmetros essenciais para monitorar o funcionamento da bomba.

Figura 34 - sistema supervisório



Fonte: Autor (2018)

Caso 2:

No segundo caso, presentes irão operar o sistema com duas bombas em paralelo.

### Operar com 2 Bombas booster Parque de Exposição

**Figura 35 - Valor em tempo real do CCO da vazão e do consumo em Quilowatt-hora das bombas em paralelo.**



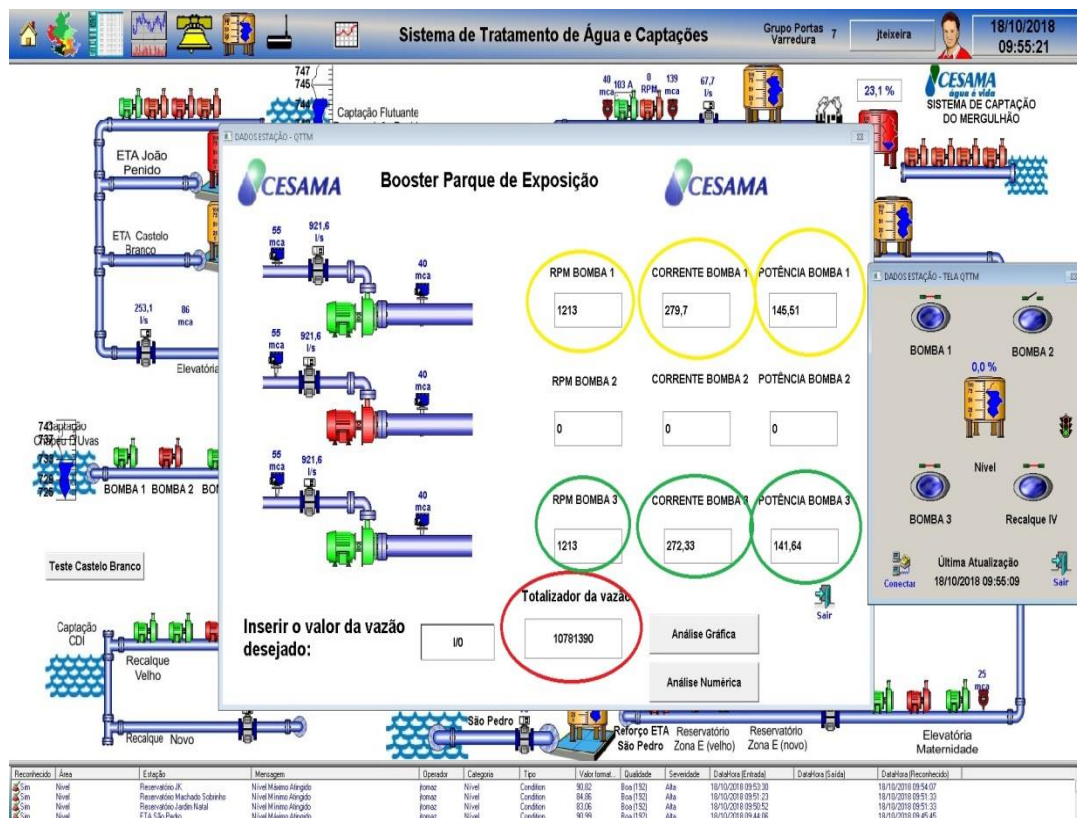
Fonte: (2018)

Nesse caso com duas bombas funcionando em paralelo a vazão medida 893,1L/s com uma energia consumida da bomba1 de 140,95 KWh e a bomba 2 de 143,84kWh pode – se observar que a vazão na rede é praticamente a mesma de uma bomba só com um diferencial de energia consumida e de 284,79 kWh tendo uma diminuição de 25,03% de potência consumida de uma bomba.



Na figura 35 ilustra uma interface do sistema supervisorio "Elipse" mostrando as duas bombas em funcionamento em paralelo a vazão instantânea, rotação, corrente do motor e sua potência consumida e o totalizador da vazão, esses são os parâmetros para monitorar o funcionamento das bombas em paralelo.

**Figura 36 - sistema supervisorio**



Fonte: Autor (2018)

Para os conjuntos moto-bombas ligados em paralelo do booster Parque de Exposição observa-se uma diminuição expressiva no consumo de energia tomando como base a conta de Outubro de 2017 chegando em Setembro de 2018 numa economia de 23,03% ao mês uma economia significativa.

Então pode-se observar que o funcionamento das bombas em paralelo com um controle PID é muito eficiente na economia de energia temos alguns gráficos que mostra o valor das contas de energia desde a implantação do sistema de bomba em paralelo até a última conta de Setembro de 2018 também um gráfico que mostra o consumo de Quilowatts/hora de uma bomba e de das bombas em paralelo.

Levando em conta os aspectos econômicos pôde-se observar uma possibilidade de redução na demanda contratada na unidade assim como uma expressiva redução no consumo de energia.

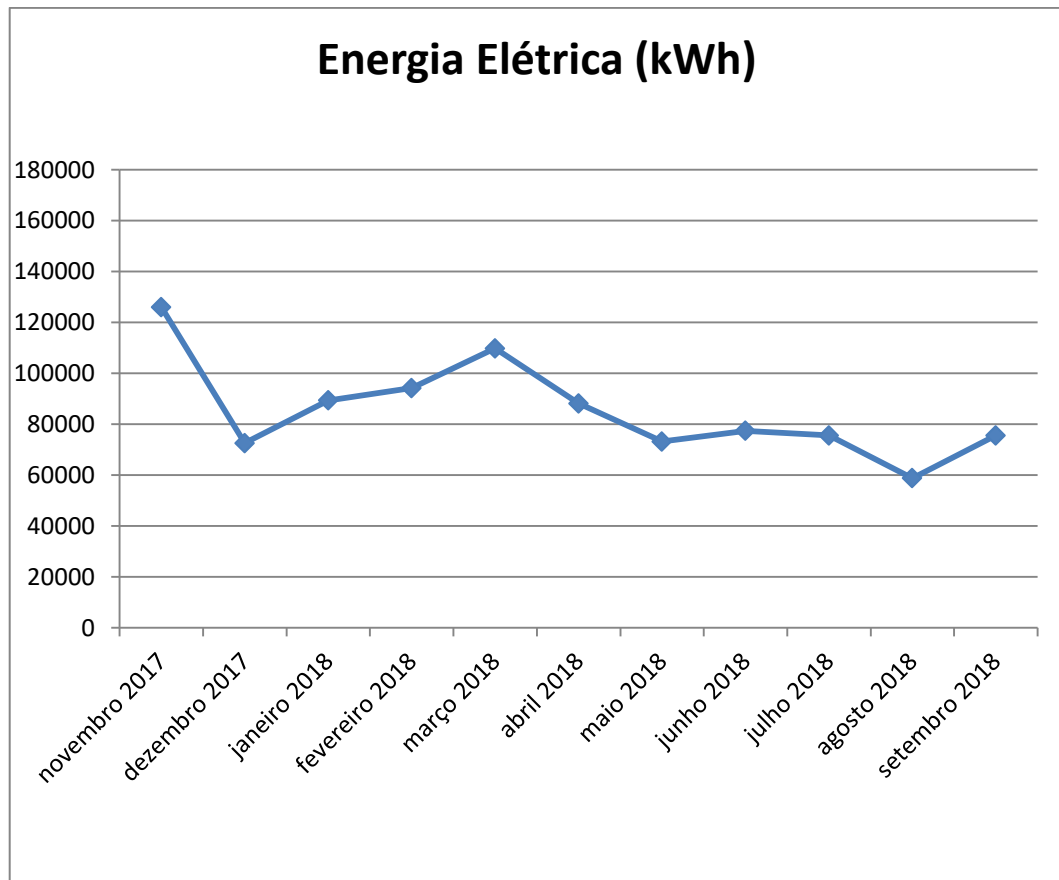
**Tabela 3 – Custo de energia elétrica de onze meses com sistema de bomba em paralelo**

<b>"Booster Parque de Exposição"</b>				
Mês/Ano Referência	Valor a Pagar (R\$)	Energia Ativa HFP/Único (kWh)	Energia Ativa HP (kWh)	Energia Elétrica Total (kWh)
setembro 2018	R\$ 48.948,02	74400	1200	75600
agosto 2018	R\$ 45.210,37	57600	1200	58800
julho 2018	R\$ 51.363,81	74400	1200	75600
junho 2018	R\$ 47.448,67	73200	4200	77400
maio 2018	R\$ 35.348,17	72000	1200	73200
abril 2018	R\$ 41.560,14	86400	1800	88200
março 2018	R\$ 49.168,76	108000	1800	109800
fevereiro 2018	R\$ 41.227,51	93000	1200	94200
janeiro 2018	R\$ 41.629,06	88200	1200	89400
dezembro 2017	R\$ 39.489,32	71400	1200	72600
novembro 2017	R\$62.829,24	123000	3000	126000
Outubro 2017	R\$ 80.491,21	163800	7200	171000

Fonte: Autor (2018)



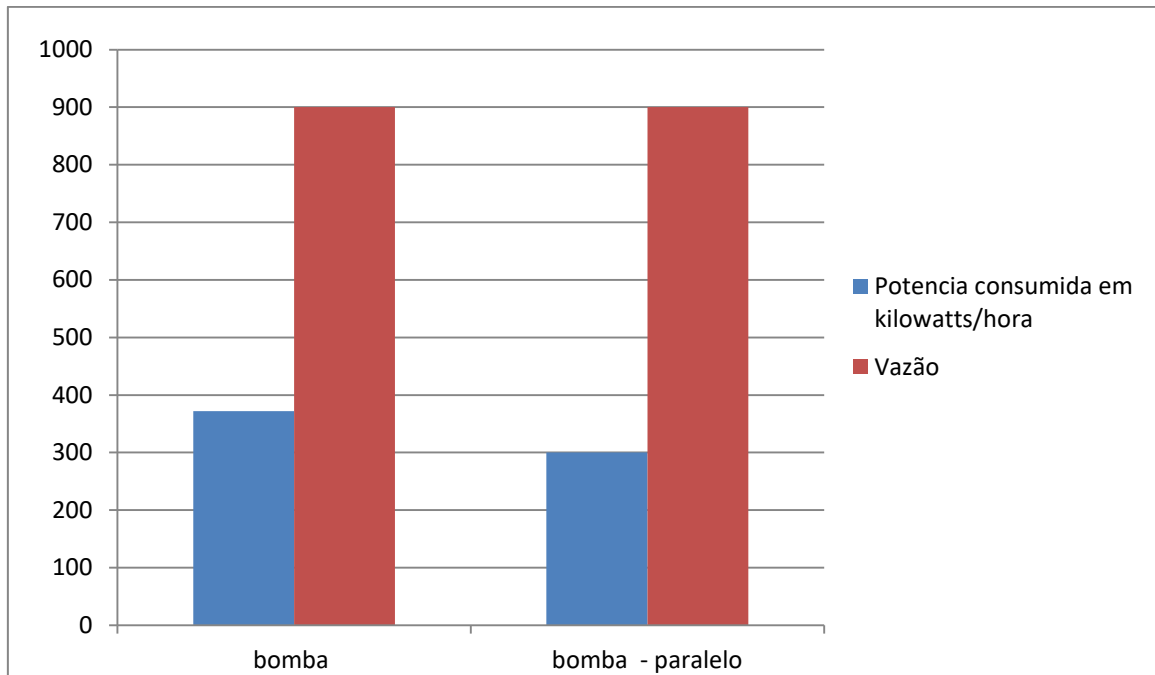
**Figura 37 - Energia consumida no período de onze meses.**



Fonte: Autor (2018)

Com o objetivo de atingir eficiência energética as bombas paralelas trabalham dentro da sua curva característica com um sensor de pressão no recalque, o sensor envia um sinal de 4-20 mA para o inversor ele identifica o sinal assim fazendo a modulação PID para aumentar ou diminuir sua rotação conforme a necessidade do sistema, assim fazendo a bomba trabalhar dentro do seu ponto ideal.

Na análise gráfica, as informações em tempo real da vazão sendo bombeada e energia consumida, a vazão de 900 l/s que é vazão do sistema, mas consumindo uma energia de 372 kWh.

**Figura 38 - comparativo de energia consumida x vazão**

Fonte: Autor (2018)

## **6 Conclusão**

O uso de duas bombas ligadas em paralelo acionadas pelo inversor de frequência e com controle de rotação mostrou-se viável tanto tecnicamente como economicamente ao comparar com uma bomba, apresentando uma economia de 25,03% de energia elétrica.

O funcionamento em paralelo das bombas é mais eficiente, traz a bomba para seu ponto ideal de trabalho sem ter perdas de vazão e sem forçar ao limite mecânico, assim tendo um melhor aproveitamento do equipamento.

O estudo demonstrou uma redução significativa no consumo de energia elétrica desde que o sistema foi implantado das bombas em paralelo, de novembro de 2017 até novembro de 2018 chegando a uma economia de 25% ao decorrer de onze meses.

Levando em conta os aspectos econômicos observa-se redução expressiva de 171000 kWh em outubro de 2017 para 75600 kWh em setembro de 2018 percebemos uma redução durante onze meses de 1144800 kWh isso em valores chegou a R\$321.516,45, é o custo dessa operação foi zero, só com a mudança na forma de operar os conjuntos moto-bomba.

## **REFERÊNCIAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [ANEEL]. Resolução Homologatória nº. 1.919 de 30 de junho de 2015. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2015, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referentes à Energisa Tocantins – Distribuidora de Energia S.A. – ETO e dá outras providências. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acessado em 20/10/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [ANEEL]. Resolução Normativa nº. 414 de 9 de setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>> Acessado em 20/10/2018.

ALBANEZE, Danilo Bernardis. ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA COM A INSTALAÇÃO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO BAIRRO AERA RANCHO EM CAMPO GRANDE - MS. 2012. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - Ms, 2012

BRASIL. Decreto nº 7.981 de 23 de janeiro de 2013. Brasil, 2013.

CARVALHO, Djalma Francisco. Instalações Elevatórias. Bombas. FUMARC - Fundação Mariana Resende Costa. 3ª Edição. Belo Horizonte - MG, 1984.

CESAMA (Juiz de Fora). Companhia de Saneamento Municipal (Ed.). Saneamento Básico - Conceitos. 2010. Disponível em: <<http://www.cesama.com.br/?pagina=saneamento>>. Acesso em: 20 out. 2018.

CHEREM, Lucas Braga. AVALIAÇÃO DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA.2016. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

DUTRA, Rafael Fernando. ANÁLISE DE MELHORIAS EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MUNICIPAL VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. 2013. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Caxias do Sul, 2013.

ELEKTRO/UNIFEI/EXCEN/FUPAI - Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações.1ª Ed. Campinas. 315p. 2012.

Eletrobrás [et al.]. Análise econômica de investimento: guia básico. Brasília: IEL/NC, 2008 Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás 272 p. 2005.

GURGEL, Breno Botelho Ferraz do Amaral. Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água: estudo de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos.2006. 115 f.

GOMES, Heber Pimentel (org). Sistemas de saneamento – Eficiência Energética. 1.ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2010.

MARQUES, Milton César Silva (org). Conservação de energia – Eficiência energética de Equipamentos e Instalações. 3.ed. Itajubá, 2006

MESQUITA, R. P. Análise De Viabilidade Técnica-Econômica Para A Aplicação De Inversores De Frequência Em Sistemas De Bombeamento De Baixa Potência. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2009.

Ministério de Minas e energia, Internet site adress: <http://www.mme.gov.br> acessado em: 20.out.2018.

MOREIRA, Saulo Gomes. Estratégias de simulação para análise da eficiência energética em sistema de bombeamento monitorado via supervisorio. 2008.106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande-MS.

NETO, M. S. A. Medidas de Eficiência Energética em Serviços de Distribuição de Água e Saneamento. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008.

POLESE, Everton Luis. Eficiência energética em sistemas de bombeamento: uso do variador de frequência. 2010, 69f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

PROCEL, Internet site adress: <http://www.eletrobras.gov.br/procel/1.htm> acessado em: 20.out.2018

REGIS, Ramon Lago. Eficiência energética em processos de bombeamento d'água. 2010, 104f. Dissertação – Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA.

SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org). Abastecimento de água – Gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento. Salvador: RECESA, 2008. 139p.

RODRIGUES, Wlamir. Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de Água. 2007, 208f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP

SILVA JR., Anísio Neto. Eficiência Energética em Sistemas de Aeração de Silos de Armazenagem de Grãos, utilizando Inversores de Frequência. 2004.132p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2004.

SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org). Abastecimento de água – Gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento. Salvador: RECESA, 2008. 139p

TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo: ABES. 2006.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e esgoto. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu - PR. 1997

WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Jaraguá do Sul. 2016.

