

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITARIO DE PALMAS  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCAS BRAGA CHEREM

**AVALIAÇÃO DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DE ÁGUA**

PALMAS – TO

2016

LUCAS BRAGA CHEREM

AVALIAÇÃO DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional  
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins  
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental

Área de concentração: Saneamento

Orientador: Prof.º Dr.º Juan Carlos Valdés Serra

PALMAS – TO

2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS BRAGA CHEREM

AVALIAÇÃO DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DE ÁGUA

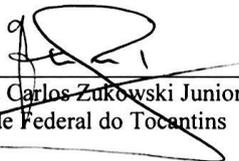
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental,  
Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca  
Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

### BANCA EXAMINADORA



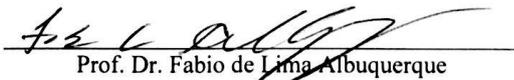
---

Prof. Dr. Juan Carlos Vades Serra  
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



---

Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior  
Universidade Federal do Tocantins



---

Prof. Dr. Fabio de Lima Albuquerque  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Aprovada em: 24 de junho de 2016  
Local de defesa: Sala 01 do bloco H  
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

C521a Cherem, Lucas Braga.  
AVALIAÇÃO DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DE ÁGUA. / Lucas Braga Cherem. – Palmas, TO, 2016.  
68 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins  
– Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)  
Profissional em Engenharia Ambiental, 2016.

Orientador: Juan Carlos Valdés Serra

1. Inversor de Frenquência. 2. Eficiência Energética. 3. Bombeamento. 4.  
Saneamento. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao meu orientador Dr. Juan Carlos Valdés Serra pela paciência, apoio e orientação na conclusão deste trabalho.
- A minha família que esteve sempre presente me incentivando.
- A Odebrecht|Ambiental Saneatins pela disponibilização de dados e matérias para realização do estudo de caso.
- Aos colegas de trabalho que me ajudaram em várias etapas para no desenvolvimento do trabalho.
- Aos amigos que fizeram parte desse momento.

## RESUMO

CHEREM, L. B. **Avaliação do uso de inversor de frequência em estação elevatória de água.** 2016. 62 p. Dissertação (Mestrado) Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento do saneamento básico, com este setor representando 2,40% do consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2015. No panorama atual buscar alternativas de eficiência energética é fundamental tanto para redução no consumo de energia, causando assim um menor impacto ambiental, como para a redução de custos para as empresas responsáveis pelo saneamento, melhorando assim seu desempenho. Neste contexto o objetivo deste trabalho foi a avaliação de uma técnica de eficiência energética em sistemas de bombeamento. Utilizou-se um inversor de frequência para variar a rotação do motor com o objetivo de reduzir a vazão em comparação ao uso de uma válvula controladora de vazão. A análise foi feita em um sistema de abastecimento de água no município de Palmas-TO onde um motor de 100 cv era acionado por uma chave *soft starter*. O estudo de caso monitorou a potência, vazão, pressão, volume de água bombeado e o consumo de energia do sistema em questão, e possibilitou comprovar a eficiência do uso do inversor de frequência visto que o houve um ganho representativo no rendimento do sistema, além de uma redução de aproximadamente 22% no consumo de energia após sua implementação. Conclui-se que em sistemas onde há restrição de vazão feitas por válvulas, há viabilidade econômica para aplicação de um inversor de frequência, e que o investimento necessário para essa alteração, retorna para o investidor por meio da economia com o consumo de energia elétrica. Para este caso foi calculado um *pay back* de 10 meses.

**PALAVRAS-CHAVE:** eficiência energética, inversor de frequência, bombeamento.

## **ABSTRACT**

**CHEREM, L. B. Evaluation of the usage of a variable frequency driver on water lifting stations.** 2016. 62 p. Thesis (Mestrado) Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.

Electricity is primordial for basic sanitation development, and this sector was responsible for 2.4% of Brazilian energy consumption in 2015. In our recent scenario, seeking for more energetic efficient processes is mandatory for reducing the environmental impact as well as costs incurred from a lower energy consumption for companies responsible for public sanitation. The objective of this current study was the evaluation of energetic efficiency technique for pumping systems. A Variable Frequency Drive was installed to vary the engine rotation aiming to reduce the flow rate when compared to the standard usage of a flow control valve. The analysis was made on a system of water supply in the municipality of Palmas-TO where a 100hp motor was ignited by a soft starter. This study monitored the following parameters: power, flow rate, pressure, pumped water volume and system energy consumption; this allowed proving the efficiency of the usage of the variable frequency drive which increased the system yield as well as reduced energy consumption in approximately 22%. It was then concluded that on systems where there are flow rate restrictions by valves it is economically feasible to install a variable frequency drive and the payback for the initial investment will come in power savings, to the case in question the payback is 10 months.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, Variable Frequency Driver, pumping

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bomba Centrífuga .....	22
Figura 2: Curva da bomba vazão x altura .....	23
Figura 3: Curva da bomba potência x altura.....	24
Figura 4: Bomba acima do nível do reservatório.....	26
Figura 5: Bomba abaixo do nível do reservatório .....	26
Figura 6: Curva do Sistema .....	27
Figura 7: Ponto de trabalho.....	27
Figura 8: Tipos de motores elétricos .....	28
Figura 9: Motor elétrico de indução .....	29
Figura 10: Potência consumida por um motor em partida direta.....	32
Figura 11: Potência consumida por um motor em partida estrela triangulo.....	33
Figura 12: Potência consumida por um motor em partida com autotransformador .....	34
Figura 13: Potência consumida por um motor em partida com soft starter.....	35
Figura 14:Estágios do funcionamento de um inversor de frequência.....	36
Figura 15:Potência consumida por um motor em partida com inversor de frequência	37
Figura 16:Inversor de frequência.....	38
Figura 17:Impacto na variação de velocidade na curva da bomba .....	42
Figura 18:Variação da potência útil variando a rotação .....	42
Figura 19:Variação do rendimento do sistema (motor – inversor) com carga .....	43
Figura 20: Economia de energia através do uso de inversor de frequência.....	43
Figura 21:Município de Palmas.....	46
Figura 22:Croqui do sistema da UTS II.....	48
Figura 23:Caixa de reunião, CMB e barrilete.....	48
Figura 24:Adutora entre caixa de reunião e UTS II.....	49
Figura 25:Bomba KSB Meganorm modelo 125-400.....	50
Figura 26:Motor WEG W22 Plus .....	50
Figura 27:Válvula controladora de vazão .....	51
Figura 28:Tubo sensor modelo OPTFLUX 2000 .....	52
Figura 29:DATA LOGGER DMP-01-DPP .....	52
Figura 30: Potência x tempo - sistema antigo.....	54
Figura 31: Potência x tempo - sistema atual .....	54

Figura 32: Potência x tempo - sistema atual .....	55
Figura 32: Vazão x tempo - sistema atual .....	55
Figura 34: Volume bombeado nos sistemas antigo e atual.....	58
Figura 35: Consumo de energia nos sistemas antigo e atual .....	59
Figura 36: Comparativo entre sistemas .....	59
Figura 37: Volume bombeado no ano de 2015.....	61
Figura 35: Fluxo de Caixa .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Redes de distribuição no bairro Taquari em Palmas-TO .....	47
Tabela 2 – Medições de vazão e pressão no estudo de caso .....	53
Tabela 3 – Medições de potência no estudo de caso .....	56
Tabela 4 – Medições de energia no estudo de caso .....	58
Tabela 5 – Tempo de funcionamento e volume produzido em 2015.....	60
Tabela 6 – Resultado financeiro da substituição do sistema de partida.....	62

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Itens de faturamento de acordo com a modalidade tarifária.....	18
Quadro 2 – Descontos concedidos conforme classe de unidades consumidoras.....	18
Quadro 3 – Itens de faturamento de acordo com a modalidade tarifária.....	19
Quadro 4 – Descontos concedidos conforme classe de unidades consumidoras.....	57

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATM	Altura Manométrica Total
CMB	Conjunto motobomba
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CV	Cavalo Vapor
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETA	Estação de Tratamento de Água
FC	Fator de Carga
Hp	<i>Horse Power (cavalo vapor)</i>
Hz	Hertz
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IHM	Interface Homem Máquina
IGBT	<i>Isulated Gate Bipolar Transistor</i>
PIS	Programa de Integração Social
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PTP	Poço Tubular Profundo
PMW	Pulse With modulation
RAP	Reservatório Apoiado
REL	Reservatório Elevado
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR	Taxa Interna de Retorno
UTS	Unidade de Tratamento Simplificada
VAL	Valor Anual Líquido
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1.	ESTRUTURA TARIFÁRIA DE ENERGIA NO BRASIL E SEU CUSTO..	16
2.2.	HIDRÁULICA.....	19
2.2.1.	Vazão .....	19
2.2.2.	Pressão .....	20
2.2.3.	Balanco de massa .....	20
2.2.4.	Teorema de Bernoulli.....	20
2.2.5.	Perda de carga .....	21
2.3.	BOMBAS HIDRÁULICAS .....	22
2.3.1.	Curva da bomba .....	23
2.3.2.	Rendimento de bombas e potência absorvida.....	24
2.4.	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO .....	25
2.4.1.	Curva do Sistema .....	27
2.5.	MOTOR ELÉTRICO.....	28
2.6.	TIPOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES.....	31
2.7.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO.....	38
2.7.1.	Medidas Administrativas .....	39
2.7.2.	Medidas Operacionais.....	39
2.7.3.	Uso de inversor de frequência para controle de velocidade.....	41
2.8.	VIABILIDADE ECONÔMICA .....	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1.	ÁREA DE ESTUDO .....	46
3.2.	METODOLOGIA .....	50
4.	RESULTADOS .....	53

4.1. RESULTADOS ECONÔMICOS .....	60
5. DISCUSSÕES .....	63
6. CONCLUSÕES .....	64
7. RECOMENDAÇÕES.....	65
BIBLIOGRAFIA .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

No ano de 2014, de acordo com o Balanço energético Nacional 2014, o consumo de eletricidade no Brasil foi de 530,96 TWh, o que representou um aumento de 2,88% se comparado ao ano anterior. Neste contexto, o setor de Saneamento foi responsável por 12,74 TWh, um consumo 5% maior que no ano de 2013, correspondendo ao equivalente a 2,40% de todo o consumo no país. (SNIS, 2013; SNIS, 2014; EPE 2014).

O consumo de energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento do saneamento básico, uma vez que, é um insumo básico para o bombeamento, transporte, tratamento e distribuição de água (MOURA, 2010). O custo com energia elétrica representou 11% dos gastos das empresas de saneamento no ano de 2014, sendo superado apenas pelo custo com pessoal próprio (SNIS, 2014), mostrando assim a importância do consumo consciente e da busca por ações de eficiência energética que podem trazer benefícios, tanto para as companhias de saneamento, como aos seus usuários, os quais terão esses benefícios repassados às tarifas.

Neste sentido, em função das diversas formas de geração de energia, a expansão de medidas de eficiência energética trará, além de maior disponibilidade de energia, uma redução na concentração de gases de efeito estufa como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e monóxido de carbono (CO) que trazem consequências desastrosas para o clima da terra (ABDELAZIZ, 2010).

Como alternativas para redução dos custos com energia elétrica podem ser adotadas medidas administrativas e operacionais (GOMES, 2009). Dentre as medidas operacionais as ações de eficiência energética vem ganhando força, tornando-se o ponto central contra o desperdício de energia elétrica, apesar de ainda ser uma técnica desconhecida por profissionais da área (MESQUITA, 2009).

Devido ao panorama atual, o uso de inversor de frequência passa a ser de fundamental importância, visando otimizar o uso de energia elétrica sem afetar os aspectos operacionais dos sistemas de bombeamento (RODRIGUES, 2007).

Assim, estes fatores citados acima, motivaram o desenvolvimento deste trabalho no qual foi feita a modulação de carga através da utilização de inversor de frequência em um conjunto motor-bomba em comparação ao uso de válvulas para controle de vazão são avaliados.

## Objetivos

### Objetivo Geral

Avaliar a eficácia da utilização de inversor de frequência para redução do consumo de energia, em sistema de bombeamento de água na cidade de Palmas - TO, em comparação à restrição de vazão através do controle da abertura de válvula.

### Objetivos Específicos

- a) Avaliar o desempenho do sistema restringindo a vazão por meio do controle de válvulas;
- b) Avaliar o desempenho do sistema variando a rotação do motor;
- c) Avaliar comparativamente o desempenho do sistema com a utilização de restrição de vazão por meio de válvula e com a variação de rotação do motor;
- d) Avaliar a viabilidade econômica da substituição de válvula restrita por inversor de frequência.

O trabalho está estruturado em 7 capítulos sendo eles:

- 1) Introdução onde é contextualizado o tema e mostrada a importância de se economizar energia elétrica.
- 2) Revisão Bibliográfica, neste capítulo é feita uma apresentação sobre a estrutura tarifária nacional, noções de hidráulica, bombas hidráulicas, sistemas de bombeamento, motores elétricos e seus tipos de acionamento e também medidas de eficiência energética no saneamento.
- 3) Materiais e Metodos onde é apresentada a metodologia utilizada no estudo e também à área de estudo.
- 4) Nos resultados são apresentados os dados do estudo de caso proposto, onde um inversor de frequência foi utilizado a fim de controlar a vazão de um sistema de bombeamento.
- 5) O capítulo discussões é utilizado para discutir os dados e apresentar as interpretações do estudo.
- 6) Nas conclusões são discutidos os objetivos propostos.
- 7) Recomendações onde são feitas propostas futuras e apresentados algumas recomendações para serem aplicadas para a operação do sistema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos vários itens que são importantes para contextualização das discussões que serão feitas. A parte de estrutura tarifária é fundamental para quantificar os ganhos que se tem ao economizar energia elétrica, conceitos de hidráulica baseam o estudo de caso e o saneamento. Como o estudo de caso foi feito em uma estação elevatória de água é apresentado o funcionamento de bombas, suas curvas e também os possíveis sistemas de bombeamento. São apresentados conceitos de motores elétricos pois são os equipamentos que efetivamente consomem energia elétrica, seus diversos tipos de acionamento pois foi essa a principal alteração feita no sistema ao substituir uma chave *soft starter* por um inversor de frequência e finalizando o capítulo será apresentado medidas de eficiência energéticas no saneamento com um enfoque especial na medida adotada.

### 2.1. 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.

As unidades consumidoras devem ser classificadas de acordo com sua atividade exercida e finalidade. As classes existentes atualmente são (ANEEL, 2010):

- Residencial;
- Industrial;
- Rural;
- Comercial;
- Poder público;
- Iluminação Pública;
- Serviço Público, com as subclasses
  - a) tração elétrica; e

b) água, esgoto e saneamento.

- Consumo próprio.

Em relação a grupos de faturamento existem apenas dois:

- Grupo A – unidades com tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3kV ou quando atendidas por sistema subterrâneo. Apresentam tarifação binômia e os subgrupos são definidos de acordo com a tensão de fornecimento.
- Grupo B- unidades com tensão de fornecimento menor que 2,3kV. Sua tarifa é monômia e os com os seguintes subgrupos: B1 - residencial, B2 - rural, B3 – demais classes; B4 – iluminação pública.

Se tratando de modalidade tarifária existem quatro alternativas:

- Convencional monômia: específica e única alternativa para o grupo B, onde a tarifa é composta apenas pela parcela de consumo; Limitada a cargas acima de 75 kW.
- Convencional binômia: aplicada para unidades do grupo A, possui tarifas para consumo de energia elétrica e demanda de potência, não importando o horário de consumo ao longo do dia; Limitado a potências de 300 kW.
- Horária verde: aplicada para unidades do grupo A, possui uma única tarifa de demanda e duas tarifas para consumo de energia elétrica, diferenciadas pelo horário do consumo; Potências acima de 300 kW são obrigatórias sua classificação na tarifa horária verde ou azul.
- Horária azul: aplicada para unidades do grupo A, possui tarifas diferenciadas tanto para demanda de potência como para consumo de energia elétrica, sendo sua diferenciação definida pelo horário de consumo ao longo do dia.

A determinação do horário para variação de cobrança diferenciada é chamada de horário de ponta. Ele deve ser um período composto por 3 (três) horas consecutivas determinadas pela concessionária de acordo com sua curva de consumo, devendo ser aprovado pela ANEEL. Ele não é aplicado aos sábados e domingos assim como em feriados nacionais. Já o horário fora ponta são as horas não compostas no período de ponta. No estado do Tocantins ele ocorre entre às 18:00 e 21:00 horas.

O quadro 1 traz os itens de faturamento por tipo de fatura.

Quadro 1 – Itens de faturamento de acordo com a modalidade tarifária

Grupo	Tarifa	Valores a serem faturados				
		Consumo	Demanda	Ultrapassagem de demanda	Excesso de energia reativa	Impostos
A	Convencional	Total medido no mês	Maior valor entre: Demanda contratada e demanda mediada	Aplicavel quando a demanda medida superar a contratada em 5%.	Cobradas sempre que o fator de potência (indutivo e capacitativo) seja inferior a 0,92.	ICMS + PIS + COFINS
	Azul	Diferenciado entre: - Períodos do dia: Ponta; Fora de ponta.	Para os horarios de Ponta e Fora de ponta, maior valor entre: Demanda contratada e Demanda medida.	Aplicavel quando a demanda medida superar a contratada em 5%.	Cobradas sempre que o fator de potência (indutivo e capacitativo) seja inferior a 0,92.	ICMS + PIS + COFINS
	Verde	Diferenciado entre: - Períodos do dia: Ponta; Fora de ponta.	Maior valor entre: Demanda contratada e demanda mediada	Aplicavel quando a demanda medida superar a contratada em 5%.	Cobradas sempre que o fator de potência (indutivo e capacitativo) seja inferior a 0,92.	ICMS + PIS + COFINS
B	Convencional	Total medido no mês			Cobradas sempre que o fator de potência (indutivo e capacitativo) seja inferior a 0,92.	ICMS + PIS + COFINS

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006) com valores de ultrapassagem de demanda seguindo a Resolução Normativa 414/2010

O Decreto nº 7.891 de 23 de janeiro de 2013 dispõe, entre outros itens, sobre a redução dos encargos setoriais, resumo com os descontos concedidos a cada classe/subclasse está a apresentada no quadro 2.

Quadro 2 – Descontos concedidos conforme classe de unidades consumidoras

Descontos e reduções na tarifa		
Classe/Subclasse	Grupo	%
Rural	A	10
Rural	B	30
Serviço Público de Irrigação	B	40
Cooperativa de Eletrificação Rural	B	30
Cooperativa de Eletrificação Rural	A	30
Serviço Público de água esgoto e Saneamento	A	15
Serviço Público de água esgoto e Saneamento	B	15

Fonte: BRASIL (2013)

O quadro 3 apresenta os preços praticados pela ENERGISA TOCANTINS, companhia de distribuição de energia que atende todo o estado do Tocantins, onde foi desenvolvido esse trabalho. As tarifas são homologadas pelo Decreto Homologatório nº 1.919 de 30 de junho de 2015 pela ANEEL e são válidas entre 4 de julho de 2015 e 3 de julho de 2016

Quadro 3 – Itens de faturamento de acordo com a modalidade tarifária

Subgrupo		A3a			A4			B3
Tarifa		Convencional	Horo-Sazonal		Convencional	Horo-Sazonal		Convencional
			Azul	Verde		Azul	Verde	
Consumo (R\$/kWh)	Ponta	0,233	0,34000	1,83802	0,23389	0,34000	1,91686	0,46203
	Fora Ponta	89	0,22425	0,22425		0,22425	0,22425	
Demanda (R\$/kW)	Ponta	65,43	61,78000	20,95000	67,87	65,03	22,05	
	Fora Ponta		20,95000			22,05		

Fonte: ANEEL (2015)

Grupo A3a são unidades atendidas em tensão entre 30 e 44 KV já o grupo A4 são unidades atendidas entre 2,3 e 25 KV.

## 2.2. HIDRÁULICA

Segundo (AZEVEDO NETTO, 1998) a hidráulica pode ser dividida em Hidráulica Geral e Hidráulica Aplicada:

- Hidráulica Geral

Hidroestática – trata de fluidos em repouso;

Hidrocineâmica – refere-se a velocidades e trajetórias sem levar em conta energia;

Hidrodinâmica – trata de forças, velocidades e acelerações em fluidos.

- Hidráulica Aplicada.

A hidráulica aplicada é a utilização dos conceitos teóricos em aplicações concretas tanto para fluidos em repouso como em movimento. Essa aplicação pode ser feita em vários setores como urbano, rural, predial, lazer e paisagismo, estradas, defesa contra inundações, geração de energia e navegação e obras marítimas.

A Hidráulica Aplicada tem ampla utilização no saneamento. Sua aplicação depende de variáveis tais como vazão, pressão, balanço de massa, teorema de Bernoulli e perda de carga que são apresentadas a seguir.

### 2.2.1. Vazão

O conceito de vazão em uma determinada seção pode ser definido pelo volume de líquido que atravessa essa seção em uma unidade de tempo (AZEVEDO NETTO, 1998)

$$Q = \frac{v}{t} \quad (1)$$

Onde:

$Q \Rightarrow$  vazão

$v \Rightarrow$  volume

$t \Rightarrow$  tempo

### 2.2.2. Pressão

O conceito de pressão está relacionado a uma força sobre uma unidade de área a qual ela atua (AZEVEDO NETTO, 1998). A Lei de Pascal enuncia que em um ponto no interior de um líquido em repouso, a pressão é a mesma em todas as direções.

A diferença de pressão entre dois pontos em um fluido em repouso ( $p_2-p_1$ ) é proporcional ao peso específico deste fluido e sua diferença de altura ( $h_1-h_2$ ), conforme fórmula abaixo:

$$p_2-p_1 = \gamma(h_2-h_1) \quad (2)$$

Onde:

$p \Rightarrow$  pressão

$\gamma \Rightarrow$  peso específico

$h \Rightarrow$  altura

### 2.2.3. Balanço de massa

Um tubo de corrente é um feixe de linhas de corrente que passa através de uma seção transversal (GOMES, 2009). Em um trecho de tubo de corrente com áreas  $A_1$  e  $A_2$  e velocidades  $V_1$  e  $V_2$  ao analisarmos um líquido incompressível com massa específica  $\rho$  em movimento permanente, a quantidade de líquido na área  $A_1$  é a mesma que sairia pela área  $A_2$ . Seu cálculo é definido pela equação 3:(GOMES, 2009; AZEVEDO NETTO, 1998).

$$Q = V_1A_1 = V_2A_2 \quad (3)$$

Onde:

$Q \Rightarrow$  vazão

$V \Rightarrow$  velocidade média na seção

$A \Rightarrow$  área da seção de escoamento

### 2.2.4. Teorema de Bernoulli

O princípio de Bernoulli estabelece que para fluidos incompressíveis, sem atrito em movimento permanente onde haja um incremento em sua velocidade, haverá um decréscimo

em sua energia potencial. Este teorema pode ser apresentado em forma de equação da seguinte maneira (GOMES 2009, AZEVEDO NETTO, 1998):

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Onde:

$v$  => *velocidade média*

$g$  => *aceleração da gravidade*

$z$  => *cota em relação ao nível de referência*

$p$  => *pressão do fluido*

$\gamma$  => *peso específico do fluido*

### 2.2.5. Perda de carga

Perda de carga é a dissipação de energia de um líquido que flui por uma tubulação devido ao atrito com as paredes do tubo. Essa energia dissipa-se por calor, fazendo com que as três cargas do teorema de Bernoulli não se mantenham constantes. Alguns dos fatores que influenciam diretamente na quantificação dessa perda de carga são a rugosidade da parede do tubo e o regime de escoamento do líquido laminar ou turbulento (AZEVEDO NETTO, 1998).

A perda de carga pode ser ocasionada pelo movimento do fluido na tubulação e também pela presença de peças especiais na tubulação. As duas são conhecidas como perdas de carga contínuas e localizadas, respectivamente (VILAÇA, 2012).

Há dezenas de formas de calcular perda de carga contínua, sendo as mais utilizadas as de Darcy-Weisbach e de Hazen-Willians (GOMES, 2009). De acordo com PORTO (2006) a metodologia para cálculo de perda de carga mais utilizada pela engenharia sanitária americana é a de Hazen-Willians que está na equação 5:

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (5)$$

Onde:

$J$  => *Perda de carga unitária*

$Q$  => *Vazão*

$D$  => *Diâmetro*

$C$  => *Coefficiente de rugosidade*

Para o cálculo de perda de carga localizada utiliza-se a equação 6 (PORTO, 2006):

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta h$  = perda localizada

$K$  => coeficiente de perda característico de cada equipamento

$V$  => velocidade

$g$  => aceleração da gravidade

### 2.3. BOMBAS HIDRÁULICAS

A finalidade de uso de uma bomba hidráulica é fornecer energia a um fluido para que ele possa exercer um trabalho deslocando-se de um ponto a outro. Isso ocorre através da transferência de energia de uma fonte mecânica para o líquido, que a converte em energia cinética. (MASSULO 2011, BIMESTRE 2015).

As bombas podem ser classificadas em dois grandes grupos: bombas volumétricas ou turbobombas (GOMES, 2009). Dentro do grupo de turbobombas temos as bombas centrífugas que por cobrir grandes faixas de vazões e pressões e possuir uma fácil manutenção possui ampla utilização nos processos industriais (PEREIRA, 2011). Segundo TSUTYIA (2006) esse modelo é o mais utilizado em estações elevatórias de água que recalcam água do poço de sucção para outra unidade do sistema de abastecimento. A figura 1 mostra uma bomba centrífuga do fabricante KSB.

Figura 1: Bomba Centrífuga



De acordo com a classificação de GOMES (2009) esse modelo de bomba se enquadra na categoria turbobombas.

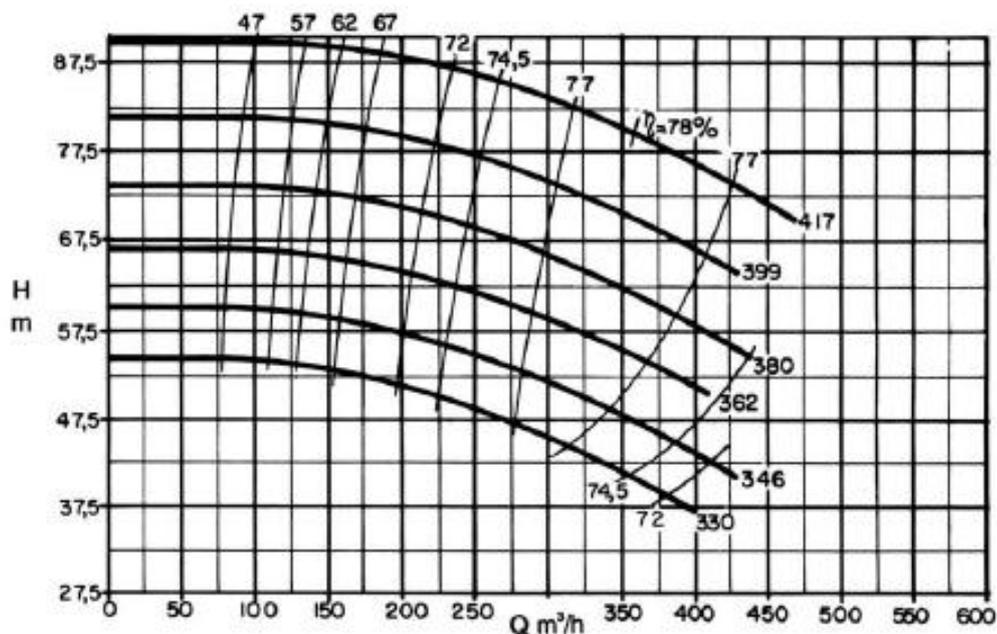
### 2.3.1. Curva da bomba

O gráfico de uma curva de bomba é constituído por pares relacionados à Altura (H) e vazão (Q). O valor de altura onde  $Q = 0$  é denominado ponto de *Shut off*. Nessa condição é obtida a maior altura disponível da bomba. Se desconsiderarmos a energia necessária para vencer as perdas na tubulação e o fornecimento de energia cinética para o fluido, um ponto onde a altura geométrica iria coincidir com a altura manométrica seria alcançado (GOMES 2009).

Segundo HIRAMA (2010) os valores a direita da curva, na figura 2 os números de 330 a 417 são os valores referentes ao tamanho de rotor. Em um processo de usinagem é possível alterar o diâmetro do rotor, obtendo assim uma nova curva para a referida bomba.

Cruzando as curvas para cara rotor possuímos o rendimento ( $\eta\%$ ) para cada ponto de trabalho da bomba.

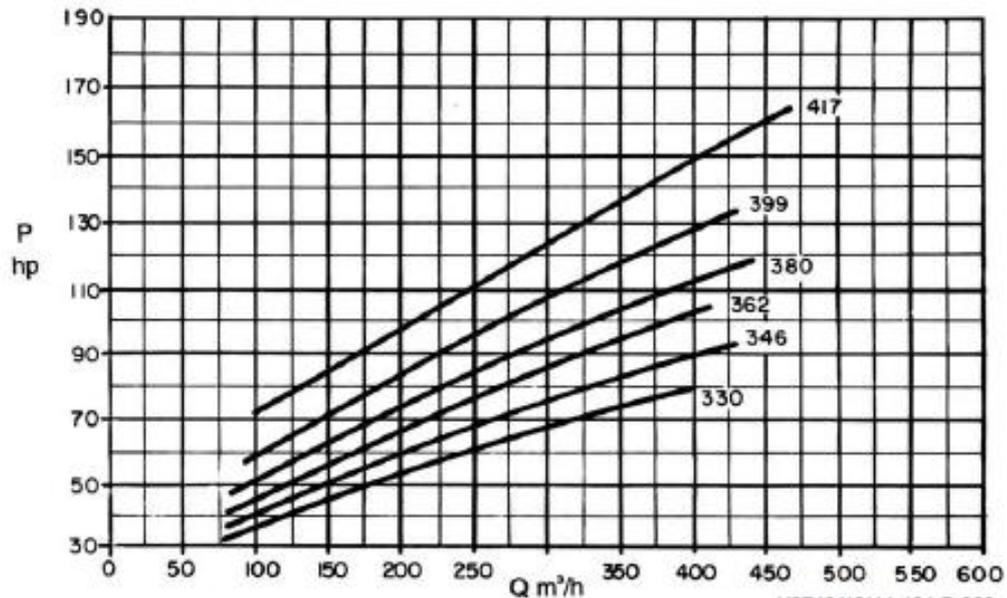
Figura 2: Curva da bomba vazão x altura



Fonte: KSB (2009)

Além da curva vazão x altura, utiliza-se potência requerida em hp x vazão, demonstrados na Figura 3.

Figura 3: Curva da bomba potência x altura



Fonte: KSB (2009)

Os aspectos apresentados na curva da bomba pelo fabricante do equipamento são de fundamental importância na escolha do equipamento a fim de se obter o melhor rendimento para o sistema em análise.

### 2.3.2. Rendimento de bombas e potência absorvida

A energia transmitida do fluido para a bomba é a altura manométrica (H) ou altura manométrica total (ATM) é representada pela seguinte fórmula:

$$H = Hg_a + Hg_r + Hf_a + Hf_r + \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

Onde:

$H \Rightarrow$  Altura Manométrica

$Hg_a \Rightarrow$  Altura geométrica de aspiração

$Hg_r \Rightarrow$  Altura geométrica de recalque

$Hf_a \Rightarrow$  Perda de carga na aspiração

$Hf_r \Rightarrow$  Perda de carga no recalque

$v \Rightarrow$  Velocidade média

$g \Rightarrow$  Aceleração da gravidade

Essa fórmula deve ser adequada para deixar de indicar energia/peso do fluido, para energia/tempo na forma de potência. Para isso deve ser feita uma simples multiplicação pela

vazão gravimétrica  $\gamma Q$ , resultando na seguinte fórmula para potência hidráulica expressa em Watts.

$$P_{hid} = \gamma QH \quad (8)$$

Onde:

$P_{hid}$  => Potência útil

$\gamma$  => Peso específico do líquido

$Q$  => Vazão

$H$  => Altura manométrica

As bombas apresentam perdas durante o seu funcionamento, tanto internas (volumétricas e hidráulicas) como externas (mancais e elementos de vedação). Devido a essas perdas, a potência motriz ( $P_m$ ) deve ser calculada levando em conta a potência hidráulica e o rendimento da bomba, resultando na equação abaixo:

$$P_m = \frac{\gamma QH}{\eta_b} \quad (9)$$

Onde:

$P_m$  => Potência motriz

$\eta_b$  => rendimento da bomba

$\gamma$  => Peso específico do líquido

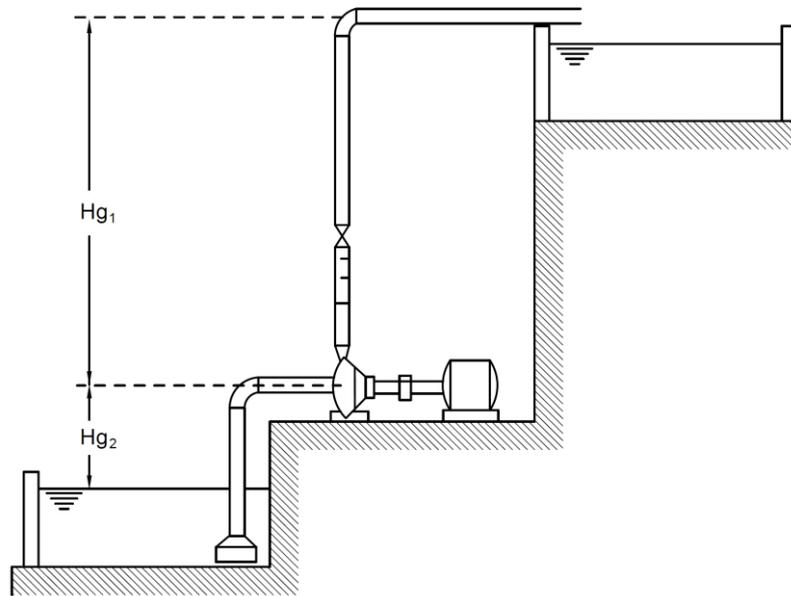
$Q$  => Vazão

$H$  => Altura manométrica

## 2.4. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Em linhas gerais um sistema de bombeamento é composto por apenas três elementos que são a tubulação de aspiração, o conjunto motobomba (CMB) e a tubulação de recalque. A posição da bomba acontece de duas maneiras distintas acima ou abaixo do nível de água do reservatório inferior (GOMES 2009). A figura 4 ilustra a posição da bomba acima do reservatório em relação ao reservatório. Para evitar o fenômeno da cavitação o valor máximo de  $H_{g2}$  na figura 4 deve ser menor do que 7 metros. Nesse modelo de aplicação é necessário a instalação de válvula de pé que tem como função reter a coluna de água, facilitando assim a retomada do sistema pois a tubulação já está com o fluido.

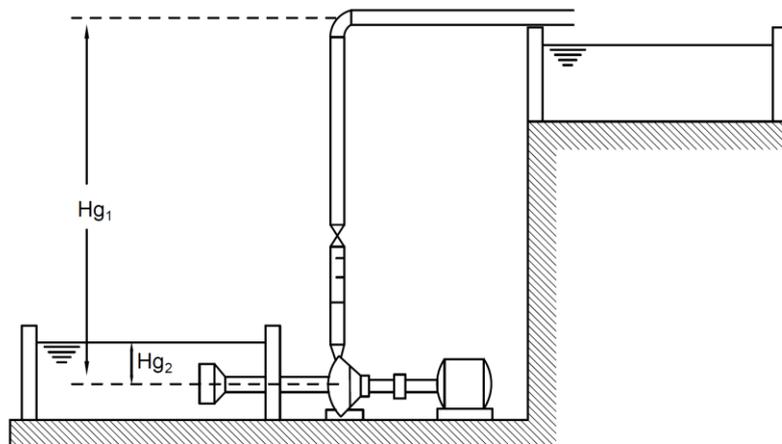
Figura 4: Bomba acima do nível do reservatório



Fonte: GOMES (2009)

Na figura 5 a bomba está abaixo do nível do reservatório, sendo chamada de bomba afogada.

Figura 5: Bomba abaixo do nível do reservatório

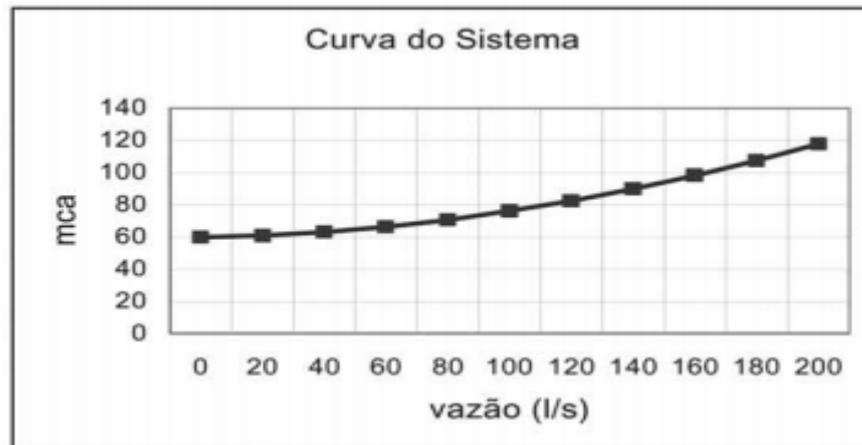


Fonte: GOMES 2009

### 2.4.1. Curva do Sistema

A curva do sistema mostra a altura manométrica da instalação *versus* a vazão, que varia de 0 (zero) até um valor superior ao ponto de vazão operacional. Sua inclinação está ligada as perdas, tanto lineares, como localizadas. Podemos observar na figura 6 a curva de um sistema.

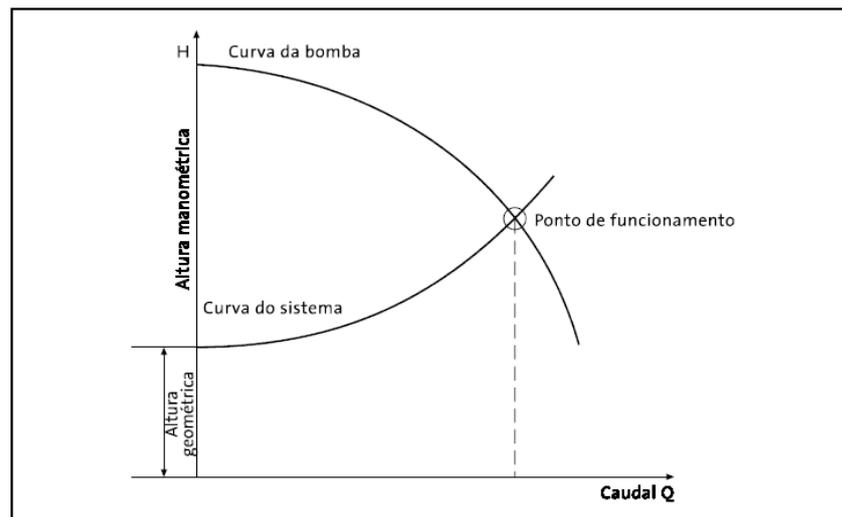
Figura 6: Curva do Sistema



Fonte: ELETROBRAS (2005)

Quando ocorre a sobreposição da curva do sistema com a curva da bomba é localizado o ponto de funcionamento.

Figura 7: Ponto de trabalho



Fonte: GRUNDFOS (2005)

Uma vez conhecido o ponto de funcionamento é possível determinar o volume bombeado, a potência absorvida pelo equipamento e seu rendimento. (GRUNDFOS, 2005).

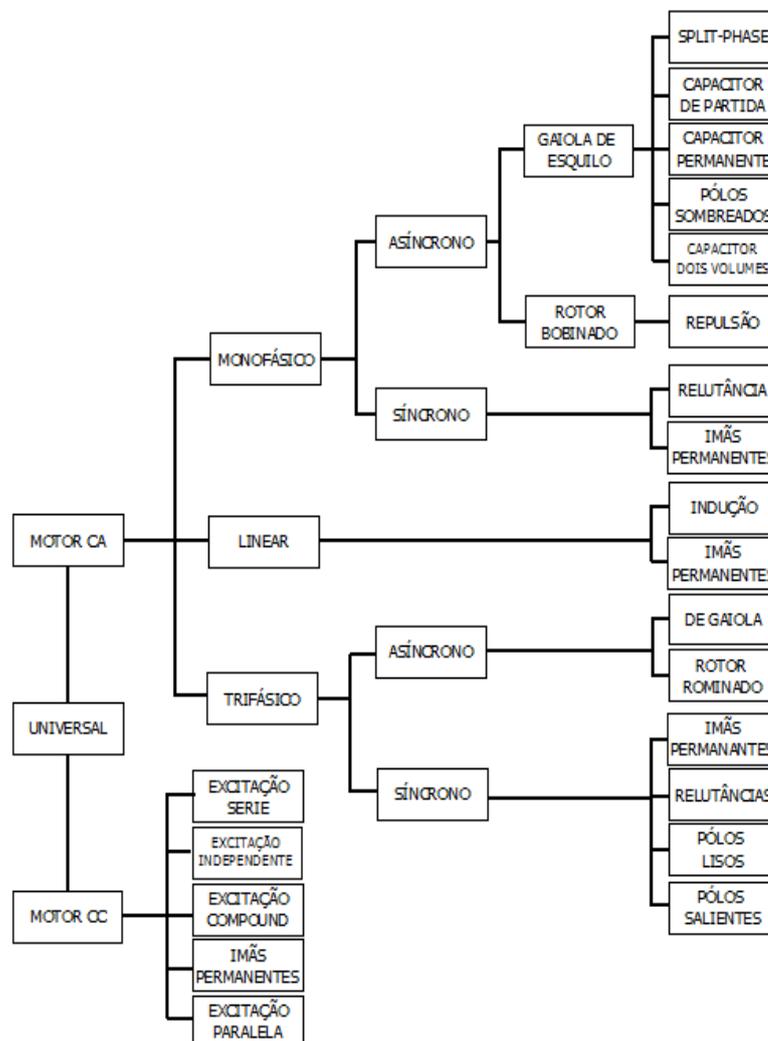
## 2.5. MOTOR ELÉTRICO

O motor elétrico é uma máquina que utiliza energia elétrica para produzir movimento de rotação. Ele pode ser dividido em dois grandes grupos de acordo com o tipo de alimentação utilizada (SILVA, 2009) sendo os motores de corrente contínua ou alternada.

Por possuir um custo mais elevado desde a instalação à manutenção o motor de corrente contínua tem seu uso restrito a aplicações onde seu uso se faz realmente necessário. Devido ao seu baixo custo, facilidade de transporte e limpeza, além da simplicidade de comando o motor de indução é mais utilizado entre todos os tipos de motores. Já os motores síncronos funcionam com a velocidade fixa sendo sua aplicação mais comum em equipamentos de grandes potências. (WEG, 2016)

Os principais tipos de motores estão apresentados na figura 8, sua separação é feita de acordo com o tipo de alimentação.

Figura 8: Tipos de motores elétricos

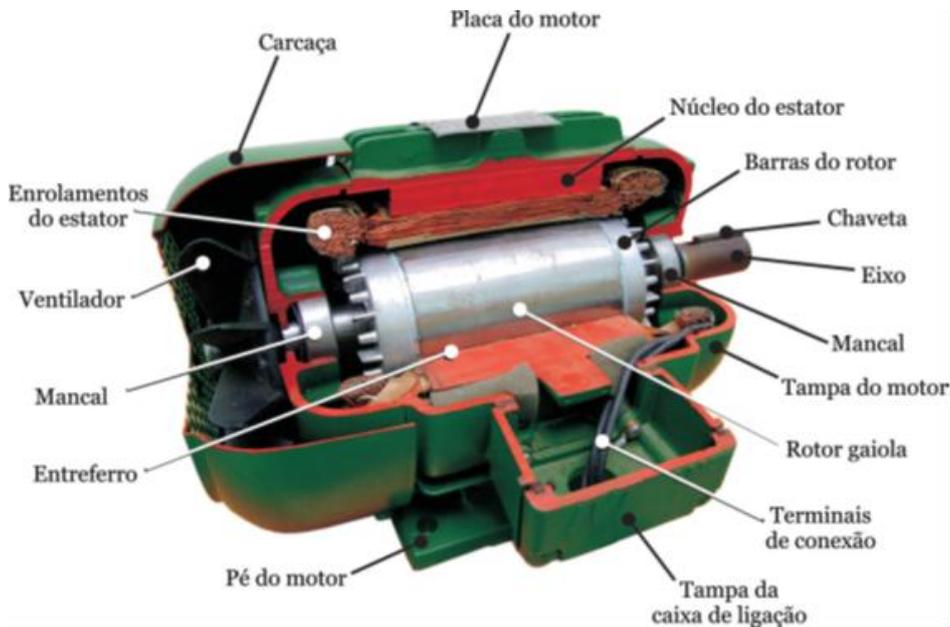


Fonte: WEG (2016)

Devido sua ampla utilização no mercado de saneamento, e por ser o modelo utilizado no estudo de caso do presente trabalho o único modelo analisado será o motor assíncrono de indução.

A figura 9 apresenta os principais componentes do motor de indução, que através de princípios eletromagnéticos transforma energia elétrica em mecânica. (ELEKTRO/UNIFEI/EXCEN/FUPAI, 2012).

Figura 9: Motor elétrico de indução



Fonte: ELEKTRO (2012)

Algumas perdas que existem durante o processo são responsáveis para que nem toda potência elétrica absorvida da rede seja transformada em energia mecânica. Essas perdas são classificadas como: perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor, perdas no ferro, perdas por dispersão e perdas por atrito e ventilação. Conhecidas essas perdas pode-se calcular o rendimento do motor elétrico é através da equação (10) (ELEKTRO/UNIFEI/EXCEN/FUPAI, 2012).

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{P_m}{P_m + \sum P} = \frac{P_{el} - \sum P}{P_{el}} \quad (10)$$

Onde:

$\eta$  => Rendimento

$P_m$  => Potência mecânica

$P_{el}$  => Potência elétrica

$\sum P$  => Perdas

Segundo SILVA (2009) o funcionamento operacional do motor é regido pelas relações entre as seguintes grandezas:

- Conjugado ou torque (C)
- Corrente (I)
- Fator de Potência (fp)
- Fator de carregamento (fc)
- Escorregamento (s)

Conjugado (C) é a força que tender a girar objetos em torno de um eixo (SILVA, 2009), definida pela equação (11).

$$C = Fd \quad (11)$$

Onde:

$C \Rightarrow$  Conjugado

$F \Rightarrow$  Força

$d \Rightarrow$  distância

Corrente (I) é o fluxo de cargas dentro de um material. Sua intensidade é definida pela carga transferida por intervalo de tempo (VILLATE, 2011). Definido pela equação (12).

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (12)$$

Onde:

$I \Rightarrow$  Corrente

$Q \Rightarrow$  Carga

$t \Rightarrow$  tempo

O fator de potência é indica a proporção entre a energia ativa e energia total absorvida por um equipamento (SILVA, 2009), representa o co-seno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente (GOMES, 2009).

O fator de carregamento (fc) segundo SILVA (2009) é a relação entre a potência mecânica desenvolvida no eixo e a potência nominal, expressa em porcentagem (%).

O escorregamento (s) é a diferença entre a velocidade síncrona e a do motor, medida em rpm (FITZGERALD, 2006). Ele é calculado de acordo com a equação (13).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (13)$$

Onde:

$s$  => *escorregamento*

$n_s$  => *velocidade síncrona*

$n$  => *velocidade*

A velocidade síncrona segundo (FITZGERALD, 2006) pode ser calculada em termos da frequência elétrica  $f_e$  aplicada. A expressão matemática para o seu cálculo está descrita na equação (14).

$$n_s = \left( \frac{120}{\text{polos}} \right) f_e \quad (14)$$

Onde:

$n_s$  => *velocidade síncrona*

*polos* => *n° de polos*

$f_e$  => *frequência elétrica em Hz*

Um último aspecto relevante que merece ser abordado é o cálculo da Potência do motor de indução trifásico, que está associado com a potência elétrica e o rendimento ( $\eta$ ) do motor (GOMES 2009). Seu cálculo está demonstrado na equação (15).

$$P_m = \eta_{me} VI\sqrt{3} \cos \varphi \quad (15)$$

Onde:

$P_m$  => *potência do motor*

$\eta_{me}$  => *rendimento do motor elétrico*

$V$  => *tensão*

$I$  => *corrente*

$\cos \varphi$  => *fator de potência*

## 2.6. TIPOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES

Durante o uso de um motor de indução trifásico um momento que requer muita atenção é o seu acionamento. Por apresentar um alto escorregamento a corrente se eleva muito podendo chegar a 8 (oito) vezes a corrente nominal (MESQUITA, 2009). Os métodos mais comuns segundo GRUNDFOS (2005) são:

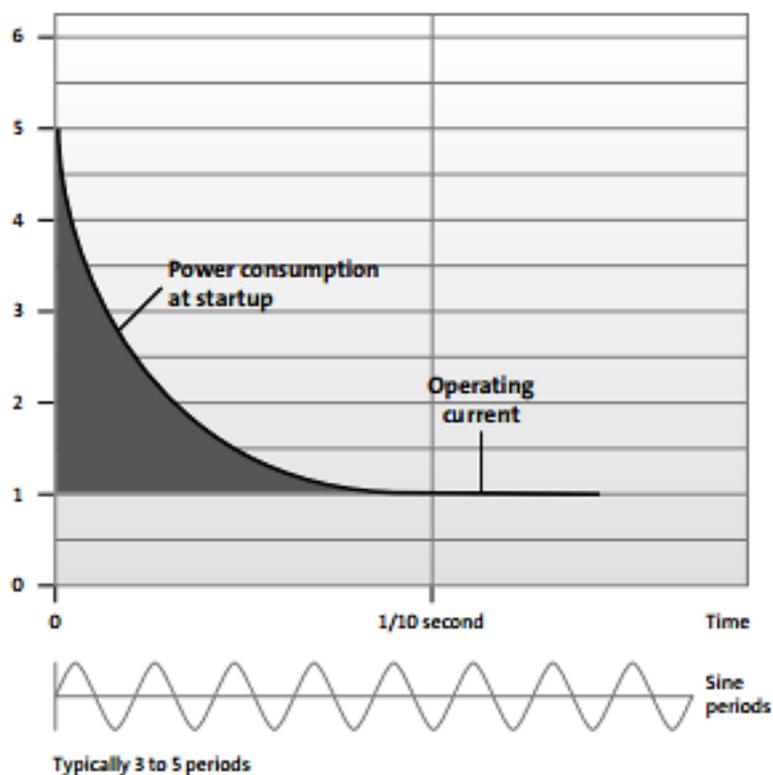
- a) Partida Direta;
- b) Partida com chave estrela triângulo;

- c) Autotransformador;
- d) Soft Starter;
- e) Inversor de Frequência.

#### a) Partida Direta

Método mais simples, barato e comum para partida de um motor. Por fornecer menos calor ao motor, proporciona uma maior vida útil para o equipamento (GRUNDFOS, 2005). Nesse método a rede de alimentação é conectada diretamente no equipamento (GOMES 2009). A figura 10 apresenta a potência consumida por um motor ao utilizar a partida direta como método de acionamento.

Figura 10: Potência consumida por um motor em partida direta



Fonte: GRUNDFOS 2005

Pode-se observar uma potência muito alta no momento de partida do equipamento, chegando a 5 (vezes) a potência nominal.

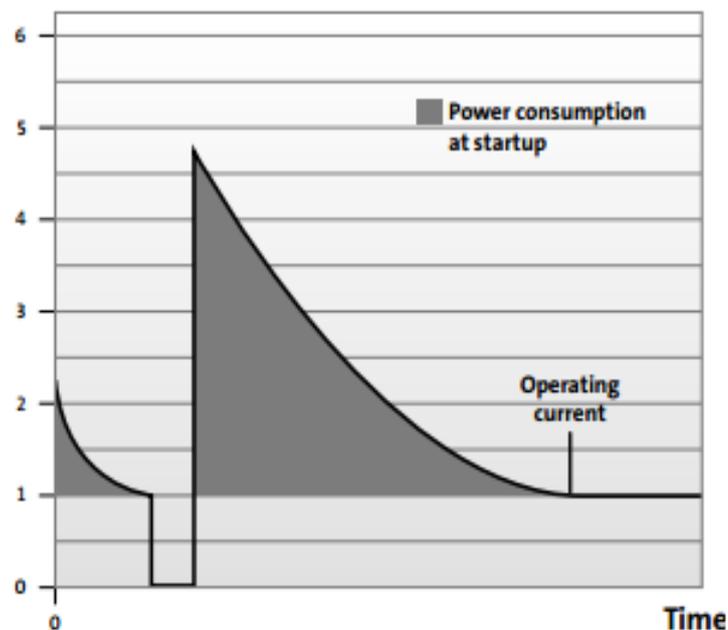
#### b) Partida com chave estrela triângulo

Com esse método a ligação inicial é feita em estrela, e a medida que o motor ganha velocidade ela é comutada para triângulo. O objetivo do uso dessa alternativa é a redução da

corrente de partida (GRUNDFOS, 2005). Em comparação com a partida direta, na posição estrela o valor da corrente representa apenas um terço (MESQUITA, 2009). Deve-se fazer uma análise do conjugado resistente afim de verificar se o conjugado de aceleração disponível será o necessário para retirar o motor da inércia. (GOMES, 2009).

As desvantagens do uso desse tipo de partida são o uso de cabo adicional e que no momento de comutação de estrela para triângulo o estator é desconectado por um breve período da rede, tipicamente entre 0,1 e 0,3 segundos, e esse desligamento pode ocasionar surtos transitórios de corrente (MESQUITA 2009, GOMES 2009). A figura 11 mostra a potência consumida por um motor de indução trifásico acionado por partida estrela triângulo.

Figura 11: Potência consumida por um motor em partida estrela triângulo



Fonte: GRUNDFOS 2005

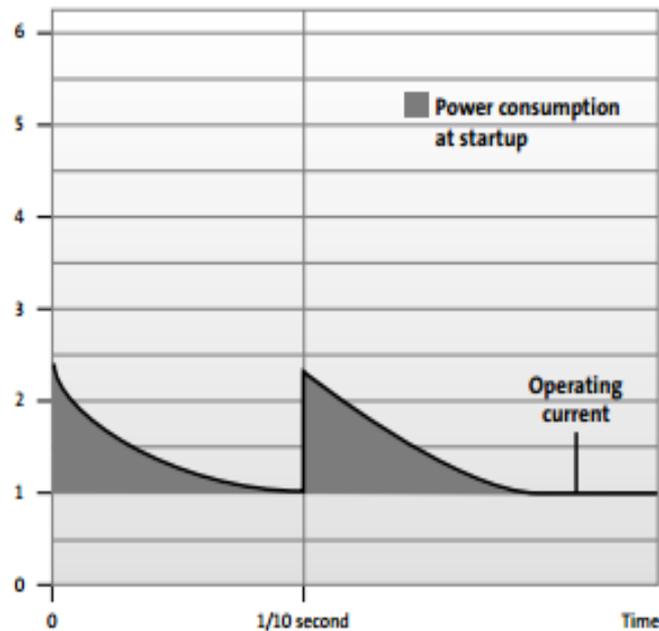
Pode-se perceber na figura o momento onde há a comutação de estrela para triângulo deixa de existir um consumo de energia.

### c) Autotransformador

Nesse método de partida, a corrente da rede de alimentação é reduzida em uma relação quadrática a quantidade de espiras do autotransformador, enquanto que a corrente no motor é reduzida proporcionalmente à quantidade de espiras. Os autotransformadores costumam ter *tapes* de 50%, 65% e 80% o que permite ajustes de tensão e corrente (GOMES, 2009). Apenas um *tap* pode ser usado, e ele deve ser definido de acordo com a relação torque/corrente

necessária (GRUNDFOS, 2005). A figura 12 mostra a potência consumida por um motor onde seu acionamento é dado através de um autotransformador.

Figura 12: Potência consumida por um motor em partida com autotransformador



Fonte: GRUNDFOS 2005

Comparado aos dois métodos anteriores o consumo de energia é menor por que o mecanismo de partida trabalha com uma corrente menor, devido ao número de espiras do transformador.

#### d) Soft Starter

Esse mecanismo de partida controla a tensão enviada ao estator do motor através de comando micro-processado. Seu funcionamento se dá pelo ajuste do ângulo de disparo de tiristores que passam a controlar a tensão aplicada no motor. Em seu correto funcionamento a corrente e o conjugado são controlados de modo a fornecer apenas o necessário para a partida da carga (GOMES, 2009). Após o período de partida usualmente entre 2 e 30 segundos a tensão atinge seu nível pleno, em uma curva suave reduzindo assim picos repentinos (WEG, 2016). Esse controle faz com que sejam evitados choques mecânicos na carga e surtos de corrente na rede.

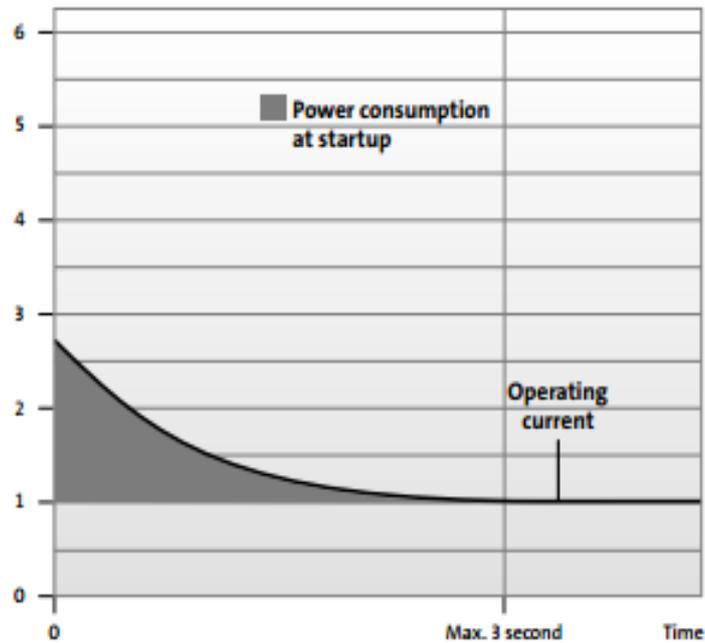
Os principais recursos deste equipamento são:

- Proteção do motor através de dispositivos e relés para monitoramento de falta de fase, sobrecorrente e subcorrente;

- Economia de energia por meio de um circuito que busca a redução na tensão em momentos que o motor está trabalhando sem carga. Essa economia é muito visível em equipamentos que operam com menos de 50% da potência do motor.

A figura 13 mostra a potência consumida por um motor ao ser acionado com uma chave soft starter.

Figura 13: Potência consumida por um motor em partida com soft starter



Fonte: GRUNDFOS 2005

A partida em rampa feita através faz com que o consumo de energia para retirar o motor da inercia seja menor do que métodos tradicionais como partida direta e estrela triangulo.

#### e) Inversor de Frequência

O inversor de frequência é um equipamento eletrônico que pode controlar a velocidade de rotação do motor providenciando assim uma partida suave (GOMES, 2009). São os equipamentos mais empregados para essa finalidade atualmente. O princípio para esse controle é através da modulação por largura de pulso, em inglês PWM (Pulse-Width Modulation) (HIRAMA 2010).

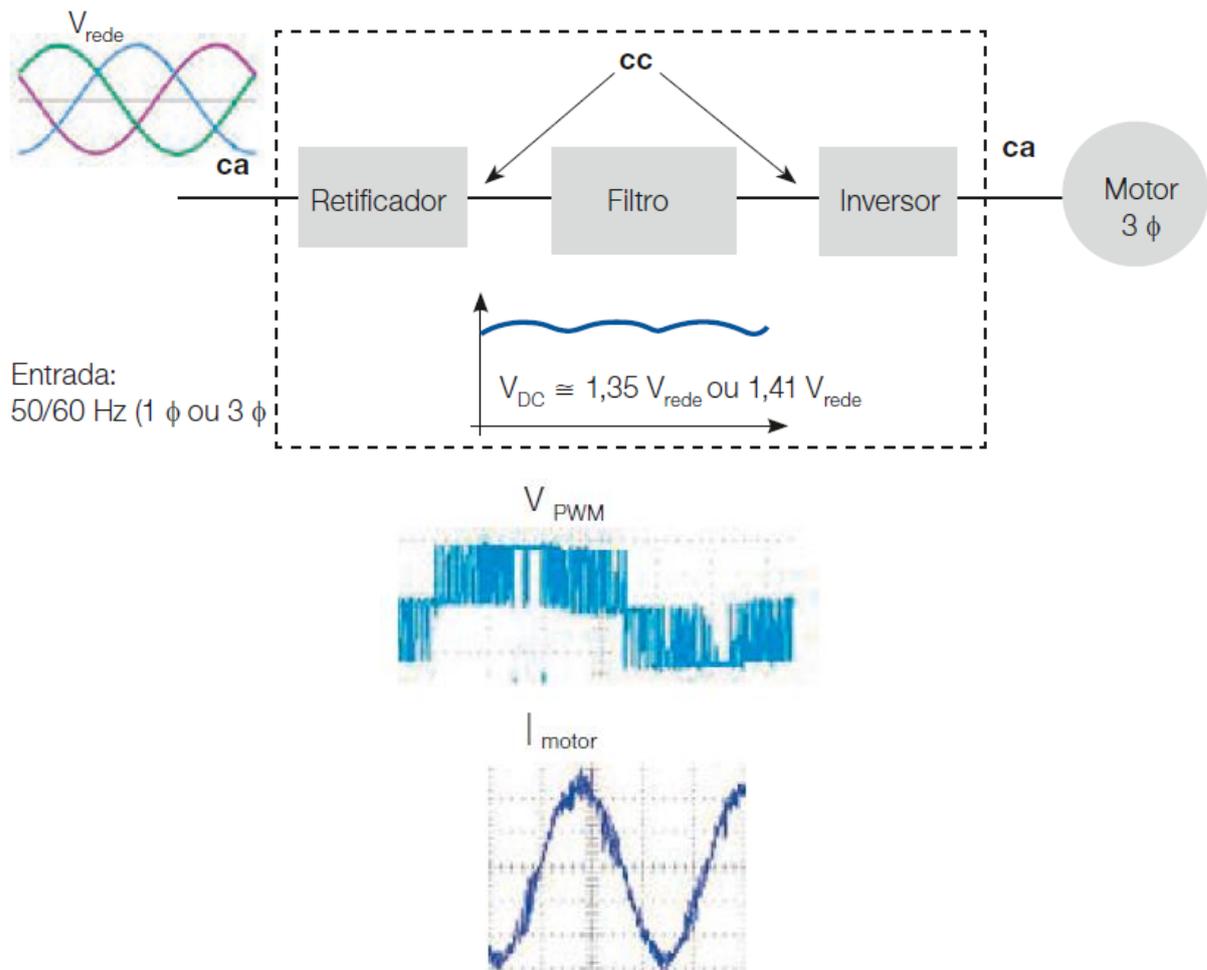
O processo se dá por equipamentos através de três estágios descritos a seguir (WEG, 2016):

- Pontes de diodo: responsáveis pela retificação do sinal da rede de alimentação
- Filtro ou link DC: Regulação da tensão com armazenamento da energia em banco capacitores

- Transistores IGBT: Inversão da tensão contínua para alternada com tensão e frequência variáveis.

Segue de forma ilustrativa pela figura 14 a forma de funcionamento do equipamento:

Figura 14: Estágios do funcionamento de um inversor de frequência



Fonte: Adaptado de WEG 2016

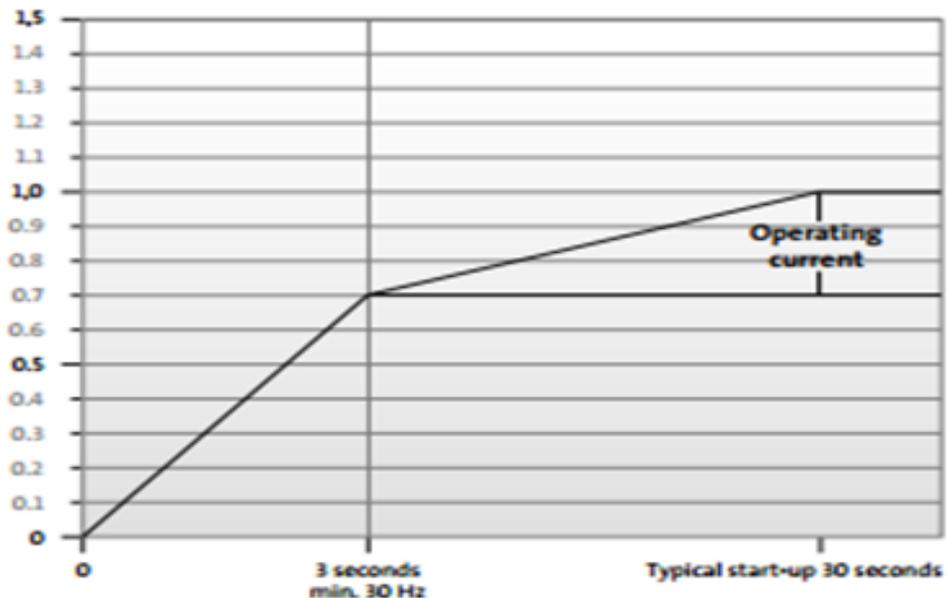
Um inversor de frequência não deve apenas variar a velocidade de rotação de um motor, ele deve também controlar o seu torque (CAPELLI, 2002).

Como vimos anteriormente na seção 2.5 a velocidade de rotação de um motor está relacionada à sua frequência e número de polos. Considerando o número de polos constantes ao se variar a frequência, varia-se proporcionalmente a velocidade de rotação deste motor.

Existem dois tipos de controles possíveis escalar e vetorial. O funcionamento do controle escalar é feito através de uma imposição da relação tensão/frequência. Ele é comumente utilizado quando não há necessidade de respostas rápidas a comando de torque e

velocidade. É o mais utilizado devido a sua simplicidade. O controle vetorial apresenta auto grau de precisão de velocidade, conseguida através do uso de sensores de velocidade, quando a opção pela não utilização de sensores, são encontradas limitações a baixa rotação. A potência consumida é demonstrada na figura 15 percebe-se que o crescimento.

Figura 15:Potência consumida por um motor em partida com inversor de frequência



Fonte: GRUNDFOS Manual de Engenharia

As vantagens da utilização do inversor de frequência são: (ARAÚJO, 2000; GOMES, 2009; WEG, 2016)

- Controle a distância;
- Redução de custos;
- Aumento de produtividade;
- Eficiência Energética;
- Versatilidade;
- Maior qualidade;
- Obter elevado conjugado de partida;
- Executar frenagens com recuperação de energia;
- Operar com fator de potência próximo da unidade;
- Proteção contra falta de fase, sobrecorrente e subcorrente.

A figura 16 mostra um inversor de frequência instalado em um quadro de comando.

Figura 16: Inversor de frequência



Fonte: CAPELLI, 2002

Para o dimensionamento do inversor de frequência deve-se conhecer a carga que ele irá acionar. Através da potência do motor e tensão de alimentação deve ser calculada a corrente de trabalho e então selecionando o porte do inversor. Em relação ao tipo de controle seleciona-se escalar para equipamentos que necessita-se de extrema precisão como guindastes, elevadores, pontes rolantes ou quando a rotação será muito baixa, para as outras aplicações pode-se utilizar o controle vetorial (CAPELLI, 2002).

Segundo GOMES (2009) o uso de inversor de frequência causa distorções harmônicas na rede elétrica que, quando em altos valores, podem causar redução da vida útil de capacitores, na operação de equipamentos, aumento de perdas e altos níveis de ruídos. Essas distorções devem ser corrigidas com o uso de filtros.

## 2.7. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO

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.

O PROCEL conta com vários subprogramas um deles, o PROCEL – Sanear é direcionado para ações de eficiência energética no saneamento e tem como principais áreas de atuação a capacitação em eficiência energética dos profissionais do setor, o incentivo ao desenvolvimento de projetos que busquem a eficiência energética e o combate ao desperdício

de energia no setor de saneamento ambiental e por último ações de pesquisa aplicada, desenvolvimento e inovação, revisão e edição de publicações voltadas ao tema de eficiência energética, controle e redução de perdas no setor de saneamento básico.

O programa identificou o potencial de economia de energia elétrica para o setor em 1.557 MWh/ano.

Podem ser tomadas medidas administrativas e operacionais para reduzir o custo com energia elétrica, essas medidas estão detalhadas a seguir:

### **2.7.1. Medidas Administrativas**

As medidas administrativas são ações que podem ser tomadas pela companhia de saneamento que tem como objetivo reduções no custo com energia elétrica. Essas ações não tem custo para a empresa e são obtidas ajustando o contrato junto a concessionária de energia elétrica (GOMES, 2009). 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.

### **2.7.2. Medidas Operacionais**

Outras ações operacionais, agora já envolvendo custos e soluções de engenharia, também trazem resultados, porém para execução dessas ações devem ser levadas em conta aspectos técnicos e econômicos para cada caso. Algumas alternativas de soluções de eficiência energética no saneamento estão listadas abaixo:

- Correção do fator de potência (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. Seu valor varia entre 0 e 1 indutivo ou capacitivo (SILVA, 2009). 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 apresente um consumo diferente do apresentado 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).

- Redução de altura manométrica de bombeamento (GOMES, 2009)  
A redução de altura manométrica pode ser obtida através da construção 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 resultado 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 reconfiguração de barriletes e por substituição de peças válvulas de controle.
- Melhoria no rendimento no conjunto motor bomba (GOMES, 2009)  
O rendimento do CMB tem relação com o rendimento elétrico e hidráulico do conjunto. Situações onde são encontrados equipamentos com baixo rendimento podem ser atribuídos a rotores mal dimensionados ou desgastados, motores subdimensionados, superdimensionados ou rebobinados, excesso de vibração, além de projetos mal dimensionados.
- Otimização da reservação com aumento do bombeamento fora do horário de ponta (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 se utilizar dessa técnica é fundamental que se conheça a demanda do sistema a ser analisado.
- Uso de reservatório de jusante e abastecimento em marcha (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, e o abastecimento da população ocorre quando a esse consumo supera a produção.
- Uso de mais de um reservatório (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, utilizando dos conceitos de zona de pressão.

### 2.7.3. Uso de inversor de frequência para controle de velocidade

A alteração da rotação da velocidade do motor irá afetar a curva de funcionamento da bomba alterando assim a curva do sistema e seu ponto de trabalho (RODRIGUES 2007). A forma como ocorre essa alteração é definida pela Lei de afinidade ou semelhança descrita a seguir: (GOMES 2009, Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA 2010, TSUTYA 2006, RODRIGUES 2007, HIRAMA 2010, MESQUITA 2009, GRUNDFOS, PEREIRA 2011):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (17)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (18)$$

Onde,

$Q \Rightarrow$  vazão da bomba

$N \Rightarrow$  rotação da bomba

$H \Rightarrow$  Altura manométrica da bomba

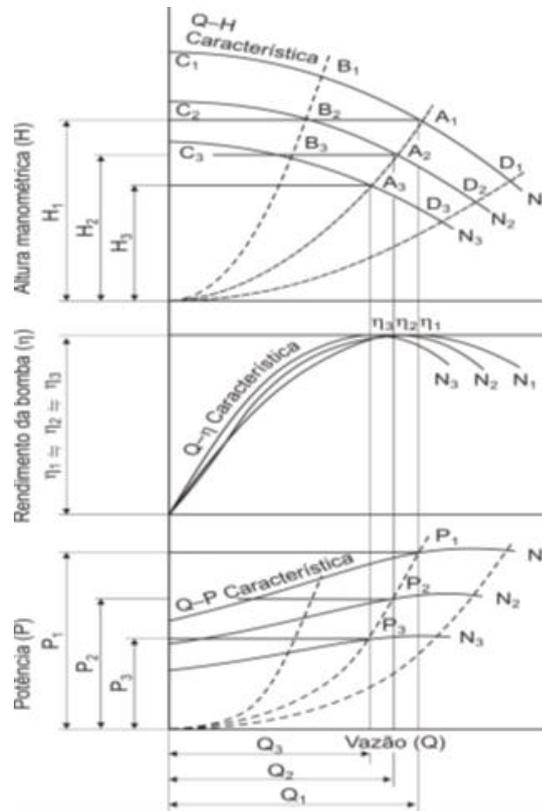
$P \Rightarrow$  Potência da bomba

Essa lei representa que a variação da vazão é proporcional a variação de velocidade, a variação da altura manométrica é proporcional ao quadrado da variação da velocidade enquanto a variação de potência possuem é proporcional ao cubo da variação da velocidade do motor.

Segundo GOMES 2009 essas relações devem ser utilizadas com cautela uma vez que a relação de potência se refere à potência hidráulica, devendo ser levada em consideração rendimento de motor e bomba. E se tratando da variação de altura manométrica apenas a parcela referente a perda de carga pode ser reduzida, uma vez que a variação geométrica não será afetada pela variação de rotação do equipamento.

A figura 17 mostra a variação da curva da bomba (vazão *versus* altura), do seu rendimento e da potência requerida de acordo com a variação de velocidade do motor.

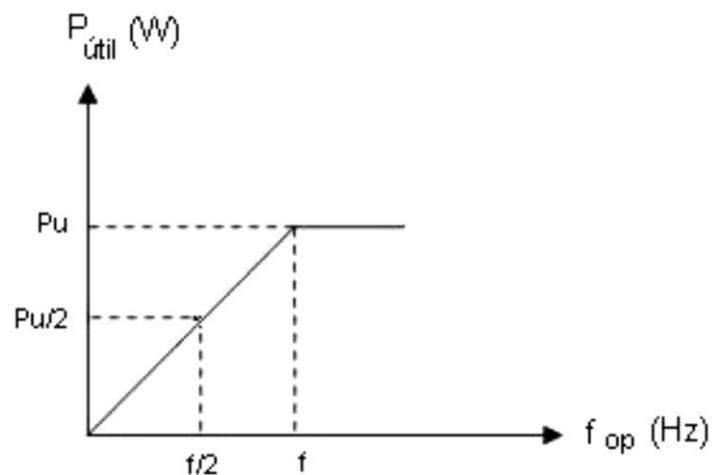
Figura 17: Impacto na variação de velocidade na curva da bomba



Fonte: Tsutiya 2006

A variação da potência do motor de acordo com a variação da frequência e consequentemente da velocidade pode ser observada na figura 18 (WEG, 2016).

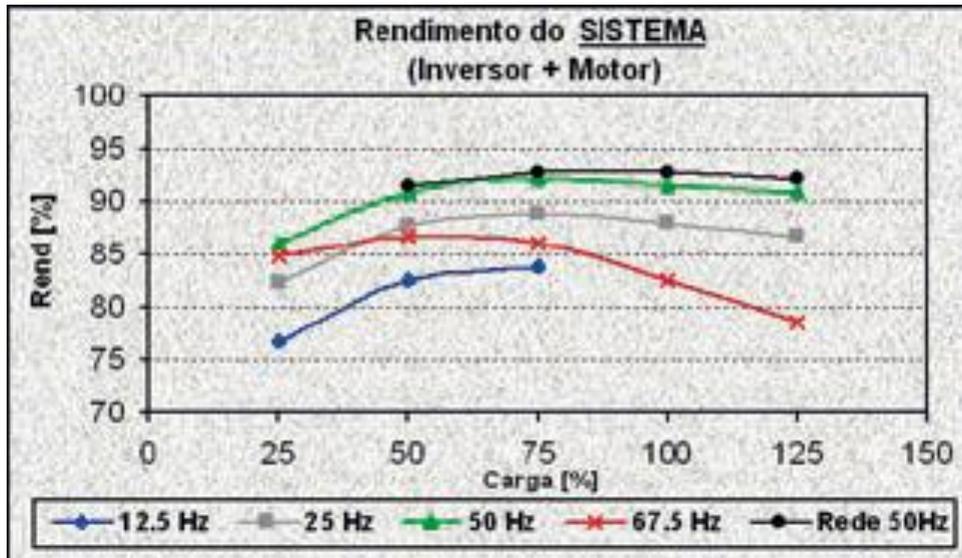
Figura 18: Variação da potência útil variando a rotação



Fonte: WEG 2016

A variação de frequência através de inversor de frequência, traz mudanças no rendimento do sistema (Motor + Inversor), um estudo realizado pela WEG (2016) para um motor de 75cv, 6 polos, tensão de alimentação de 400 V e 50 Hz está demonstrado na figura 19.

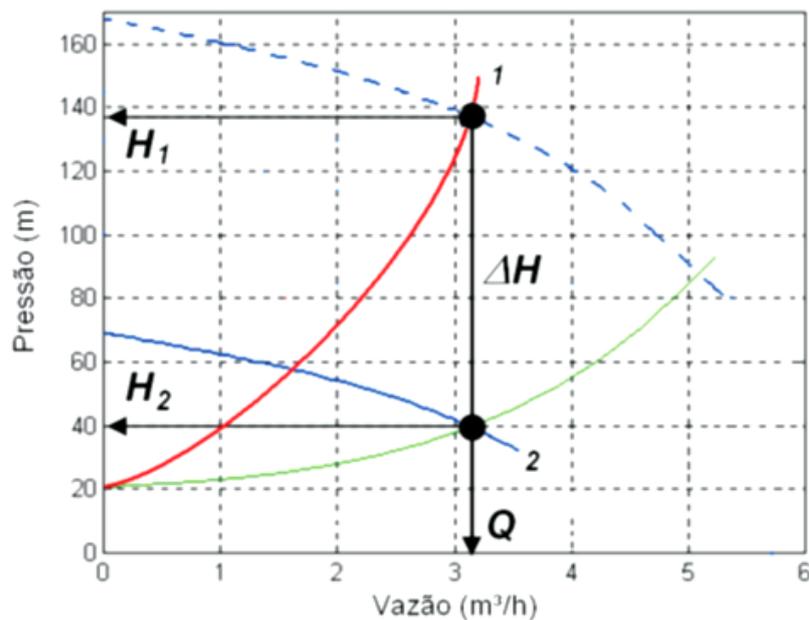
Figura 19: Variação do rendimento do sistema (motor – inversor) com carga



Fonte: WEG 2016

A figura 20 apresenta a economia de energia que se tem ao substituir o controle de vazão por um método de controle de válvula para o método de variação de velocidade.

Figura 20: Economia de energia através do uso de inversor de frequência



Fonte: ELEKTRO/UNIFEI/EXCEN/FUPAI

Na figura 20 o pontos 1 e 2 correspondem a vazão requerida, porém em alturas diferentes devido ao método de controle de vazão. O ponto 1 por utilizar restrição por válvula apresenta maior perda de carga e uma pressão maior, conseqüentemente será demandado um maior consumo de energia. A variação de energia pela mudança  $\Delta E$ , tem relação com  $\Delta H$ , e do número de horas de funcionamento do sistema, essa variação pode ser calculada segundo a equação (19) (ELEKTRO/UNIFEI/EXCEN/FUPAI, 2012):

$$\Delta E = \frac{P g Q t}{3,6 \cdot 10^6 \eta_m \eta_b} = \Delta H \quad (19)$$

Onde,

$\Delta E \Rightarrow$  Variação de energia

$\Delta H \Rightarrow$  Variação de pressão

$P \Rightarrow$  potência elétrica

$g \Rightarrow$  aceleração da gravidade

$Q \Rightarrow$  vazão

$t \Rightarrow$  período de funcionamento em horas

$\eta_m \Rightarrow$  rendimento do motor

$\eta_b \Rightarrow$  rendimento da bomba

## 2.8. VIABILIDADE ECONÔMICA

Para buscar eficiência energética é necessário tomar decisões que envolvam custos. Quatro métodos elementares para essa análise são (Eletrobrás et al., 2008):

- Valor presente líquido (VPL);
- Taxa interna de retorno (TIR).
- Valor anual líquido (VAL);
- Tempo de retorno de capital (*payback* não descontado e *payback* descontado).

O conceito de VPL é a soma algébrica dos valores de entrada de caixa e investimento descontados do fluxo de caixa a ele associado (ZAGO 2009; ELETROBRÁS, 2012). Nesse método a escolha ou não do projeto é a constatação que o VPL é maior que 0 (zero), sendo mais atrativa quanto maior for seu valor (FILHO, 2012).

O método matemático a fim de definir o valor do VPL se faz com a equação (21) (Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA, 2012).

$$VPL = \sum_1^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (20)$$

Onde:

$FC$  = fluxo de caixa líquido

$j$  = período

$i$  = taxa

$n$  = número de períodos

A TIR é a taxa de desconto que anula o VPL. Esta é a taxa que encontra o ponto de equilíbrio do investimento onde não há lucro nem prejuízo. Esta taxa pode ser calculada pela equação 22 (Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA, 2012; Eletrobrás et al., 2008):

$$\sum_1^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} = 0 \quad (21)$$

Onde:

$FC$  = fluxo de caixa

$j$  = período

$i$  = taxa

$n$  = número de períodos

Segundo (Eletrobrás et al., 2008) o método de valor anual líquido deve ser utilizado para comparar duas ou mais situações onde há diferença no seu período de duração. Situação essa não encontrada no estudo de caso, logo esse método não será utilizado.

O último método a ser avaliado é o tempo de retorno de capital que pode ser simples ou um fluxo de caixa descontado. De acordo com Eletrobrás/FUPAI/EFFICIENTIA (2012) utiliza-se o payback simples para projetos cujo benefício é em um tempo inferior a 4 (quatro) anos.

Para calcular alguns dos indicadores é necessário utilizar uma taxa de desconto. Para os cálculos deste trabalho foi utilizada a taxa SELIC que em abril/2016 era de 14,25%/ano segundo o Banco Central do Brasil.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

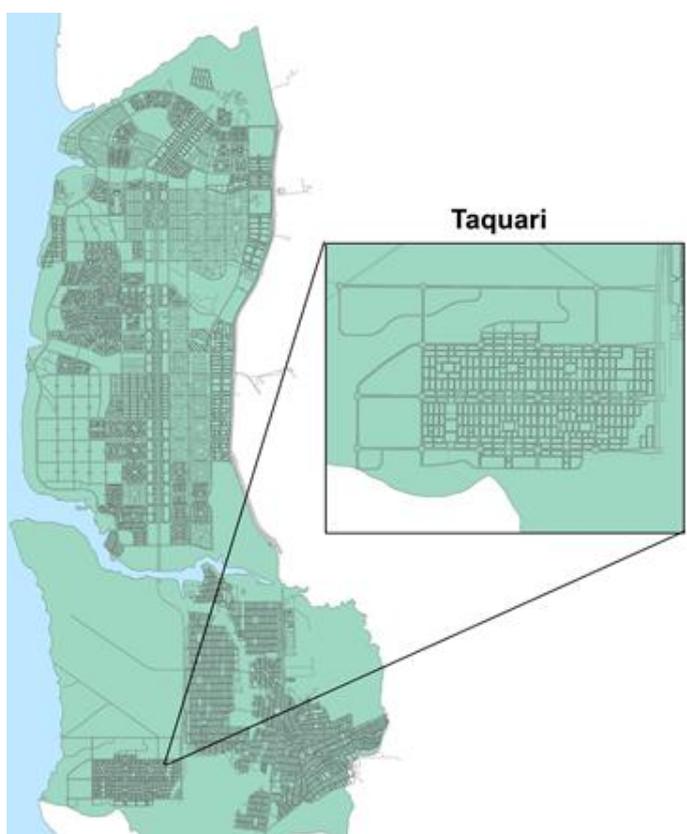
Neste capítulo será apresentado o local onde foi feito o estudo de caso (a Unidade de Tratamento Simplificado (UTS) II no município de Palmas – TO), a metodologia de medição e os equipamentos utilizados na coleta de dados.

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

O município de Palmas possui 99% da população urbana atendida com abastecimento de água tratada, seguindo os padrões de qualidade no abastecimento.

O *Sistema de Abastecimento de Água – SAA* está em sua maior parte integrado à Estação de Tratamento de Água (ETA) 006, ETA 003, e UTS II que abastecem parte da região central de Palmas (Plano Diretor) e da região Sul (Aureny, Taquaralto, Taquari). O SAA é responsável ainda pelo abastecimento dos Distritos de Buritirana e Taquarussu, que possuem sistemas de produção e distribuição independentes. A figura 21 mostra o município de Palmas com destaque para a região do Taquari, objeto do estudo de caso deste trabalho.

Figura 21: Município de Palmas



A região do Taquari, a qual é abastecida exclusivamente pela UTS II, possui 3.718 ligações. A rede de distribuição dessa área possui 73.165m, que estão especificados por diâmetro e material na tabela 1.

Tabela 1 – Redes de distribuição no bairro Taquari em Palmas-TO

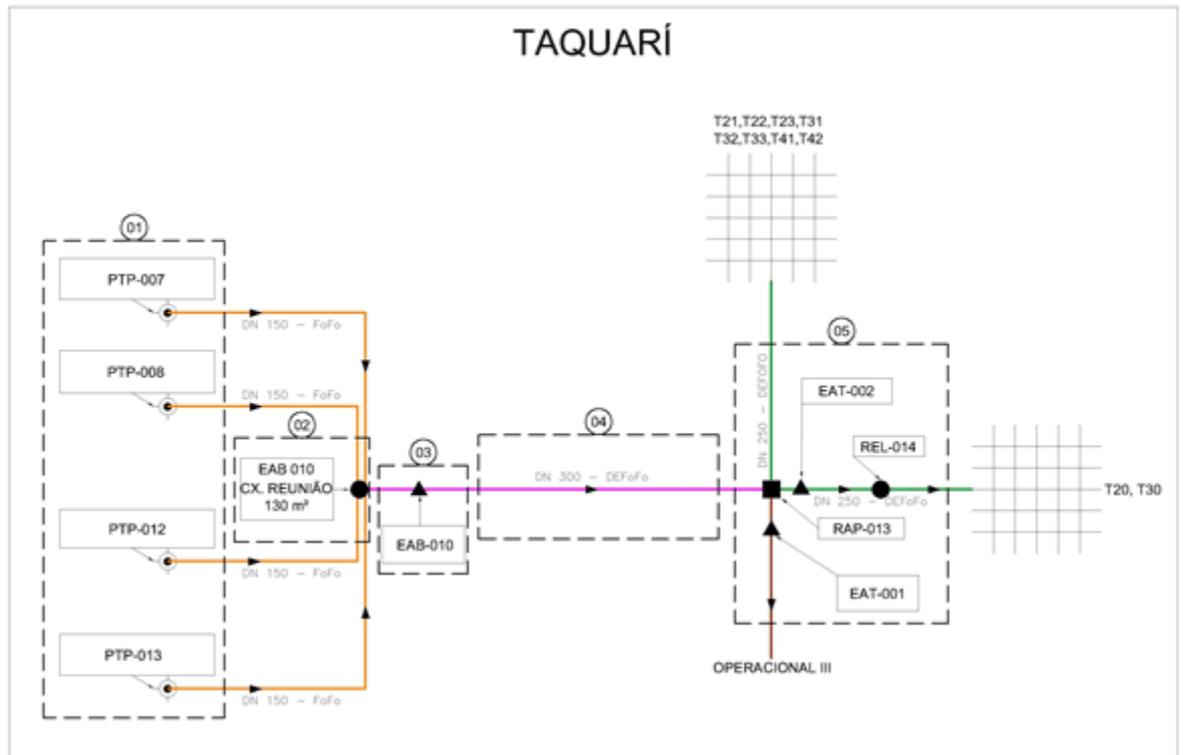
Material	Diâmetro (mm)	Tamanho da rede (m)
PVC	50	53.214,38
PVC	75	75,71
PVC	100	18.160,24
PVC	150	69,52
PVC DEFOFO	150	1.303,15
PVC DEFOFO	200	259,92
PVC DEFOFO	250	82,98

O sistema estudado foi o da UTS II, o qual é constituído por 4 partes principais:

- 1- Captação subterrânea: Composta por 4 (quatro) poços tubulares profundos – PTP 007, PTP 008, PTP 012 e PTP 013, cujas vazões máximas de exploração em conjunto são 369 m<sup>3</sup>/h.
- 2- Caixa de reunião de 130 m<sup>3</sup> de capacidade, onde é armazenada a água bruta proveniente dos poços.
- 3- Elevatória de água bruta composta por 2 CMB de 100 cv (1 em operação e 1 reserva) com acionamento feito através de chave *soft starter*. Os CMBs estão instalados abaixo da cota de reservação da caixa de reunião, logo trabalham afogados à 227 metros acima do nível do mar.
- 4- A linha de recalque é de PVC rígido DEFOFO e possui 2.034 metros de comprimento.
- 5- A unidade de tratamento simplificado possui uma capacidade de tratamento de 100 l/s e dois reservatórios o RAP 013 e REL 014 que somados possuem uma capacidade de 605m<sup>3</sup>. A UTS II ainda possui interligação com os RAPs 005 e 017 feita através de uma adutora de 4.011 metros de PVC rígido DEFOFO e bombeamento através de um CMB de 100 cv de potência. O RAP 013 está na cota 251m e possui 8 metros de altura e a chegada de água é feito pelo topo do reservatório.

A fim de ilustrar o sistema que acaba de ser descrito a figura 22 apresenta um croqui esquemático de uma parte do Sistema de Abastecimento de Água de Palmas-TO, com foco na UTS II, redes de distribuição e reservatórios.

Figura 22: Croqui do sistema da UTS II



O objeto de análise deste trabalho foi desenvolvido na etapa 3, com a substituição da chave *soft starter* por um inversor de frequência. A figura 23 mostra a caixa de reunião, CMB e o barrilete do sistema estudado.

Figura 23: Caixa de reunião, CMB e barrilete



Na figura 24 observa-se a adutora que interliga a caixa de reunião, na cota 227 ao REL 013 com 8m de altura na área da UTS II que está na cota 257.

Figura 24: Adutora entre caixa de reunião e UTS II



O equipamento responsável pelo recalque é uma bomba KSB Meganorm modelo 125-400, figura 25 com um rotor de diâmetro igual a 377mm acoplada mecanicamente a um motor Weg W22 Plus de 100cv de potência, figura 26.

Figura 25:Bomba KSB Meganorm modelo 125-400



Figura 26:Motor WEG W22 Plus

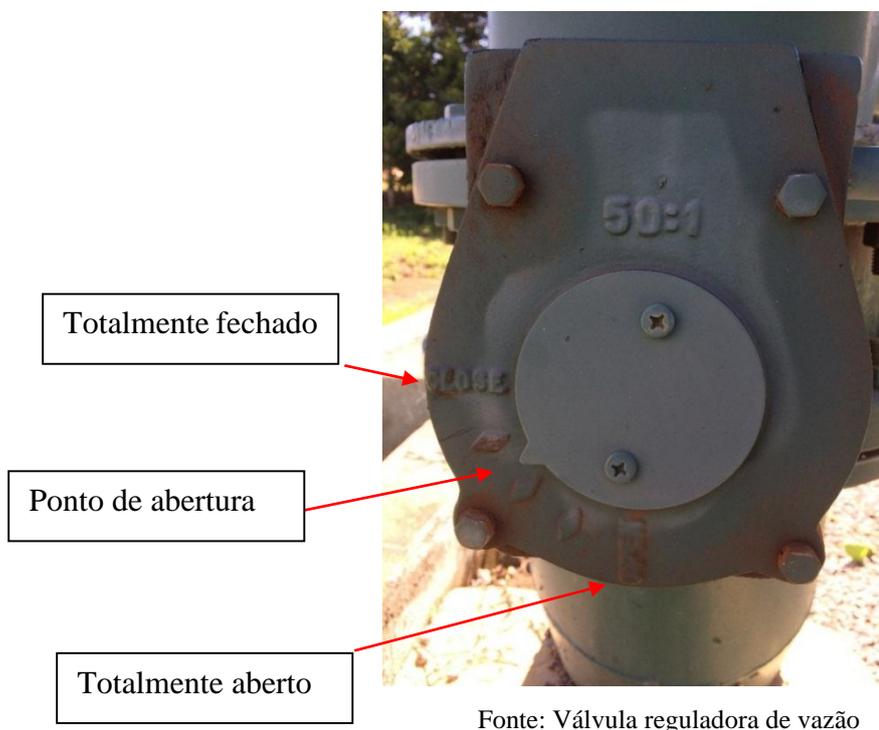


### 3.2. METODOLOGIA

A fim de determinar a curva do sistema e seu consumo de energia foram monitorados *in loco*, por 3 (três) horas consecutivas, a potência elétrica, a vazão e a pressão, com o armazenamento dos dados nos equipamentos e em planilhas. A cada intervalo de 1 (uma) hora foram coletados os dados de volume bombeado e consumo de energia.

Em um primeiro momento os dados foram coletados para o CMB sendo acionado por uma chave *soft starter* tendo sua vazão controlada por uma válvula reguladora de vazão cuja relação entre aberta/fechada pode ser visualizada na figura 27.

Figura 27: Válvula controladora de vazão



Após medições citadas anteriormente foi feita a substituição da chave *soft starter* por um inversor de frequência da marca WEG modelo CFW 09. Toda a válvula foi aberta e a rotação do motor foi controlada via a IHM (Interface Homem Máquina) de modo que a vazão de bombeamento não fosse alterada.

Com o novo sistema instalado pela equipe de manutenção eletromecânica e validado pela equipe operacional, foram realizadas medições para o novo sistema de operação nos mesmo moldes realizados anteriormente (medição de vazão, pressão e potência elétrica dos equipamentos a cada 3 minutos durante 3 horas). Vale lembrar que não foram realizadas alterações no modo operacional do sistema de distribuição e produção de água. Nenhum parâmetro operacional foi modificado durante os ensaios.

Adotou-se para esse trabalho a nomenclatura sistema antigo para o modo operacional com a chave *soft starter* e uma válvula reguladora de vazão e sistema atual a operação com inversor de frequência como método de acionamento do motor elétrico.

A medição de vazão foi realizada pelo tubo sensor OPTIFLUX 2000 do fabricante **Conaut**, equipamento ilustrado na figura 28. De acordo com o fabricante, o princípio de medição é através da Lei de Faraday. O medidor está instalado no trecho final da adutora na chegada do REL 013, dentro da UTS II. Quando utilizado junto com o conversor ICF 050 (o do estudo de caso), o erro de sua medição para velocidade acima de 0,5m/s é de 0,5%.

Figura 28:Tubo sensor modelo OPTFLUX 2000



Fonte: Manual do Fabricante Conaut

As medições de pressão foram feitas no recalque da bomba com o *DATALOGGER* DMP-01-DPP do fabricante *Lamon*, A faixa de pressão medida é de 0 a 200 M.C.A e sua faixa de precisão 0,1 FS. O equipamento em questão é o apresentado na figura 29:

Figura 29:DATALOGGER DMP-01-DPP



Fonte: Lamon

A medição de energia foi feita no quadro de comando na saída dos acionadores do motor, *soft starter* e inversor de frequência de modo que apenas esse equipamento fosse monitorado, isolando assim os outros pontos de consumo da unidade. O equipamento utilizado foi o MAR715L do fabricante MEGABRAS. Foram monitoradas a corrente de trabalho, a tensão, potência e também o consumo de energia acumulado. A classe de exatidão para esse equipamento é de 0,5% da leitura para tensão e corrente e 1,0% da leitura para potência ativa e potência reativa.

#### 4. RESULTADOS

Após medições em campo foram avaliados a viabilidade técnica e econômica da substituição da chave soft starter pelo inversor de frequência. Os resultados estão apresentados no decorrer deste capítulo.

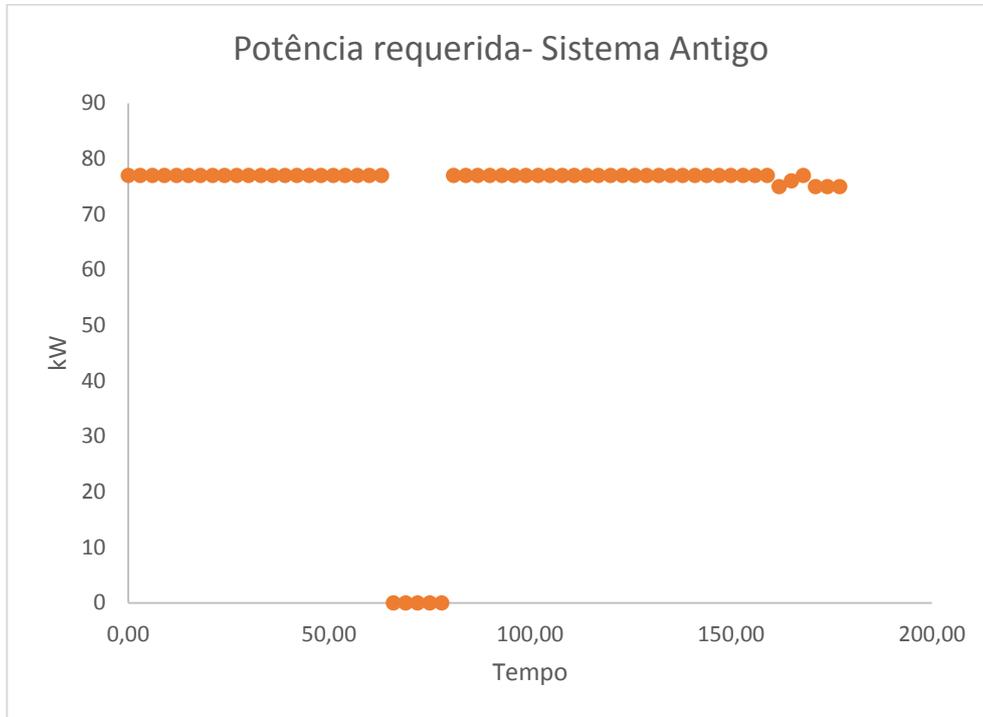
Uma vez que conhecida a vazão e a pressão de trabalho é possível avaliar comparativamente o sistema antigo (soft starter) com o sistema atual (inversor de frequência), sendo essas as situações avaliadas. Adotou-se os valores médios de vazão e potência, excluindo-se os momentos em que o sistema ficou parado. Na tabela 2 têm-se os dados de vazão e pressão.

Tabela 2 – Medições de vazão e pressão no estudo de caso

Tempo (min)	Sistema antigo		Sistema atual		Tempo (min)	Sistema antigo		Sistema atual	
	Vazão (m <sup>3</sup> )	Pressão (m.c.a)	Vazão (m <sup>3</sup> )	Pressão (m.c.a)		Vazão (m <sup>3</sup> )	Pressão (m.c.a)	Vazão (m <sup>3</sup> )	Pressão (m.c.a)
0	306,56	45	284,5	42,9	90	300,88	45,2	293,85	43,4
3	296,22	44,8	281,23	43	93	299,21	45,3	302,02	43,4
6	295,34	44,9	288,49	42,8	96	300,15	45	290,53	43,6
9	292,83	45,1	285,27	42,8	99	310,7	45,1	287,21	43,4
12	297,44	45,1	289,51	42,6	102	299,57	45,3	283,69	43,4
15	296,37	44,9	281,16	42,8	105	298,81	45,1	282,87	43,5
18	300,62	44,8	277,14	42,7	108	299,4	45,2	278,56	41,7
21	295,79	45,4	284,47	42,8	111	296,57	44,9	285,21	41,8
24	293,22	46,8	282,15	42,6	114	293,12	45,3	287,3	42,1
27	294,62	45	276,97	42,7	117	300,44	45,1	290	41,9
30	293,22	44,9	274,76	40	120	299,76	45	298,01	42,3
33	293,44	44,9	266,11	43,1	123	297,09	45	285,45	43,8
36	295,21	44,9	268,49	44	126	304,44	45	270,51	44,3
39	287,41	44,7	276,19	44,9	129	298,04	45,2	318,57	44,1
42	292,59	45	268,66	42,4	132	298	45,1	351,37	44
45	298,26	45	275,03	41,5	135	292,25	44,8	341,2	43,9
48	293,5	44,9	269,96	43	138	289,25	45	333,44	44,1
51	295,09	44,8	261,13	44,1	141	299,23	45	270,57	43,6
54	294,72	44,7	287,14	42,6	144	294	44,9	273,61	43,5
57	293,02	44,7	284,03	42,7	147	289,12	44,6	280,71	43,1
60	286,19	44,7	0	31	150	291,22	45	262,6	43,2
63	290,53	44,7	3	29,7	153	297,64	45	287,14	43,2
66	0	30,2	7,42	30	156	294,72	43,9	284,03	44,1
69	0	35,4	0	30	159	294,67	44,8	283,97	43,7
72	10,42	31,8	4,59	30	162	295,09	45	274,76	43,4
75	7,2	30,7	306,73	45,7	165	289,04	44,7	287,66	44
78	10,3	31,6	313,78	45	168	286,52	44,7	271,08	43,9
81	309,15	45,5	302,71	43,5	171	287,92	44,7	301,14	43,2
84	292,45	45,3	297,9	43,8	174	292,6	44,9	284,52	42,9
87	297,35	45,4	297,01	43,1	177	286,55	45,1	298,77	43,1

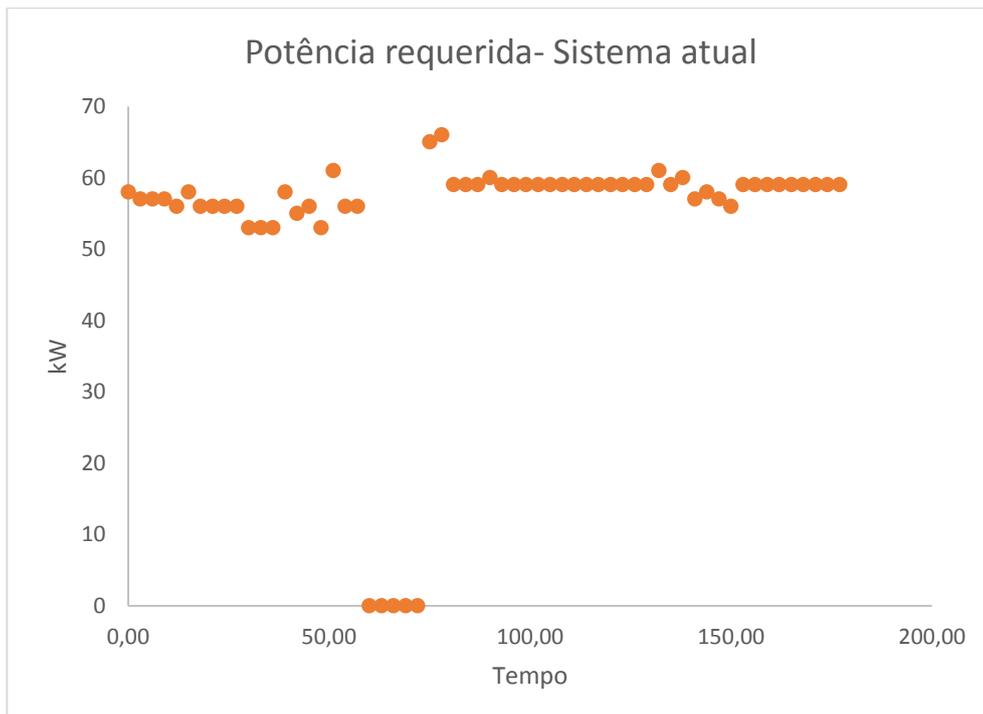
A figura 30 mostra a potência requerida pelo CMB ao longo das 3 (três) horas de monitoramento do sistema antigo.

Figura 30: Potência x tempo - sistema antigo



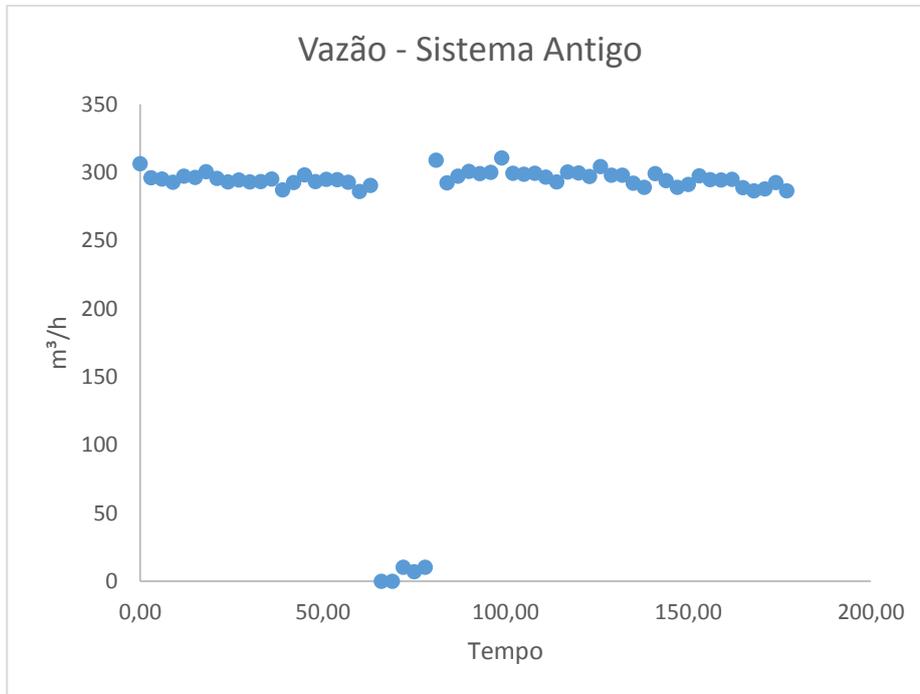
A figura 31 mostra a potência requerida pelo CMB ao longo das 3 (três) horas de monitoramento do sistema atual.

Figura 31: Potência x tempo - sistema atual



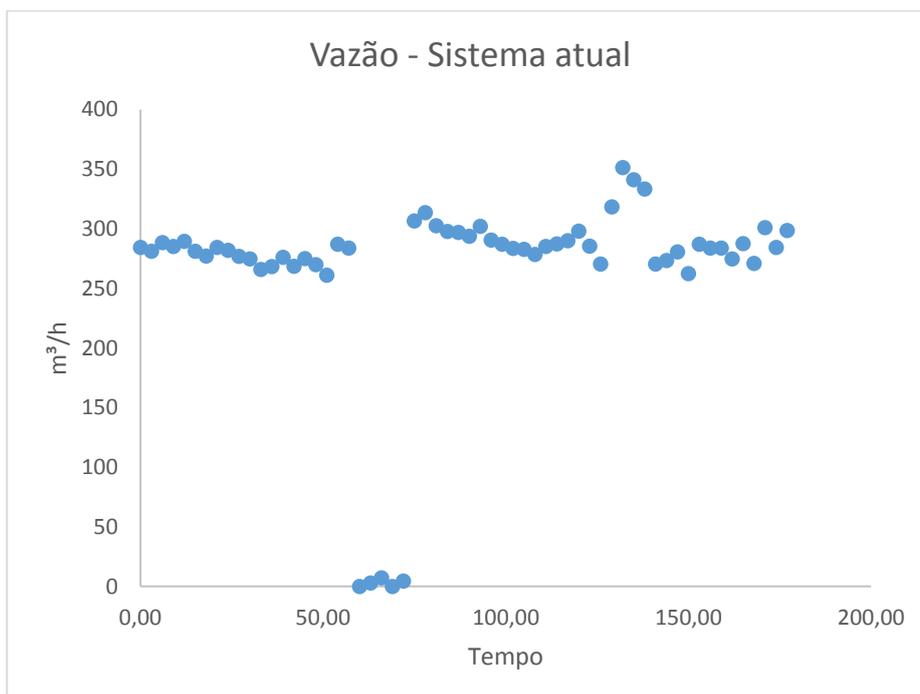
A figura 32 mostra a vazão bombeada pelo CMB ao longo das 3 (três) horas de monitoramento do sistema antigo.

Figura 32: Potência x tempo - sistema atual



A figura 33 mostra a vazão bombeada pelo CMB ao longo das 3 (três) horas de monitoramento do sistema atual.

Figura 33: Vazão x tempo - sistema atual



Pode-se observar uma regularidade maior no sistema operando com a *soft starter* em comparação ao sistema com inversor de frequência que apresentou entre as medições nos minutos 132 e 138 um crescimento de vazão sem que houvesse aumento na potência. Isso pode ser explicado pelo alto nível do reservatório no momento.

A média das vazões durante o primeiro ensaio foi de 295,58m<sup>3</sup>/h e uma pressão de 45m.c.a. Ao utilizar o inversor de frequência a vazão média foi de 287,65m<sup>3</sup>/h e a pressão reduziu para 43,2m.c.a.

Tabela 3 – Medições de potência no estudo de caso

Medição	Sistema antigo Potência (kW)	Sistema atual Potência (kW)	Medição	Sistema antigo Potência (kW)	Sistema atual Potência (kW)
0	77	58	90	77	60
3	77	57	93	77	59
6	77	57	96	77	59
9	77	57	99	77	59
12	77	56	102	77	59
15	77	58	105	77	59
18	77	56	108	77	59
21	77	56	111	77	59
24	77	56	114	77	59
27	77	56	117	77	59
30	77	53	120	77	59
33	77	53	123	77	59
36	77	53	126	77	59
39	77	58	129	77	59
42	77	55	132	77	61
45	77	56	135	77	59
48	77	53	138	77	60
51	77	61	141	77	57
54	77	56	144	77	58
57	77	56	147	77	57
60	77	0	150	77	56
63	77	0	153	77	59
66	0	0	156	77	59
69	0	0	159	77	59
72	0	0	162	75	59
75	0	65	165	76	59
78	0	66	168	77	59
81	77	59	171	75	59
84	77	59	174	75	59
87	77	59	177	75	59

Tão importante como avaliar a vazão e a pressão do sistema antes e após a mudança é fazer uma avaliação criteriosa da potência requerida do CMB a fim de recalcar o volume de água exigido. Para essa demonstração apresenta-se uma tabela com os 60 pontos de medição e a potência demandada no momento em kW.

Analisando as informações anterior, onde a média da potência consumida no modelo anterior foi de 77 kW e para o novo sistema (com inversor de frequência) foi 58,09kW é possível fazer uma análise comparativa entre os dois sistemas.

Devido à impossibilidade de realizar mais testes nos sistemas devido a aspectos operacionais será considerada o erro dos equipamentos a fim de fazer uma análise mais precisa dos resultados obtidos.

Um resumo com o erro de medição para cada equipamento e a faixa da medição que deve ser considerada está representado no quadro 4:

Quadro 4 – Descontos concedidos conforme classe de unidades consumidoras

Equipamento (unidade)	Erro	Sistema antigo			Sistema novo		
		Medição	Limite inferior	Limite superior	Medição	Limite inferior	Limite superior
Medidor de vazão (m <sup>3</sup> /h)	0,50%	295,58	294,10	297,06	287,65	286,21	289,09
Medidor de pressão (m.c.a.)	2 m.c.a	45	43	47	43,2	41,2	45,2
Analizador de Energia (kWh)	1,00%	77	76,23	77,77	58,09	57,51	58,67

Conforme apresentado na equação 8 no capítulo 2 pode-se calcular a potência motriz dispendida pela bomba. Para seu cálculo em cavalo-vapor (cv) deve-se utilizar a equação 20 (GOMES, 2009):

$$P_m = \frac{\gamma H \frac{Q}{3600}}{75\eta_b} \quad (22)$$

Calculando a potência requerida para as duas situações temos:

- 1) Sistema com soft starter e válvula controladora de vazão

$$P_m = \frac{1000 \times 45 \times \frac{295,58}{3600}}{75 \times 78\%}$$

$$P_m = 63,15 \text{ cv} = 46,48 \text{ kW}$$

2) Sistema com inversor de frequência

$$P_m = \frac{1000 \times 43,2 \times \frac{287,65}{3600}}{75 \times 78\%}$$

$$P_m = 59,00 \text{ cv} = 43,42 \text{ kW}$$

O rendimento do sistema com a válvula controladora de vazão é:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} = \frac{46,48}{77,00} = 0,60$$

O rendimento do sistema com a inversor de frequência é:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} = \frac{43,42}{58,09} = 0,75$$

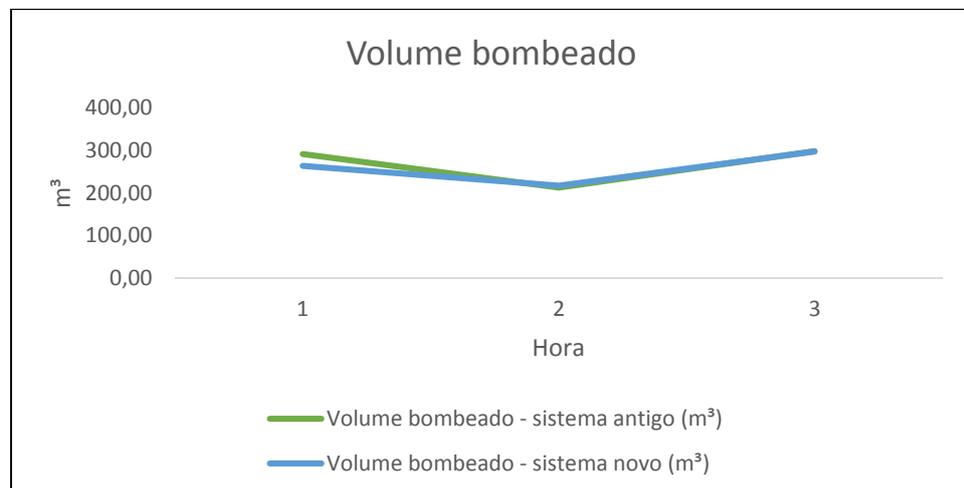
Durante as 3 horas em que cada sistema foi monitorado foram adquiridos dados de volume de água bombeada em  $m^3$  e o consumo de energia elétrica requerida pelo CMB para executar esse bombeamento. Os dados medidos estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Medições de energia no estudo de caso

Tempo (h)	Sistema antigo		Sistema atual	
	Volume ( $m^3$ )	Consumo (kWh)	Volume ( $m^3$ )	Consumo (kWh)
1	291	74,75	263	56,52
2	212	59,43	217	44,57
3	298	77,95	297	59,76
Total	801	212,13	777	160,85

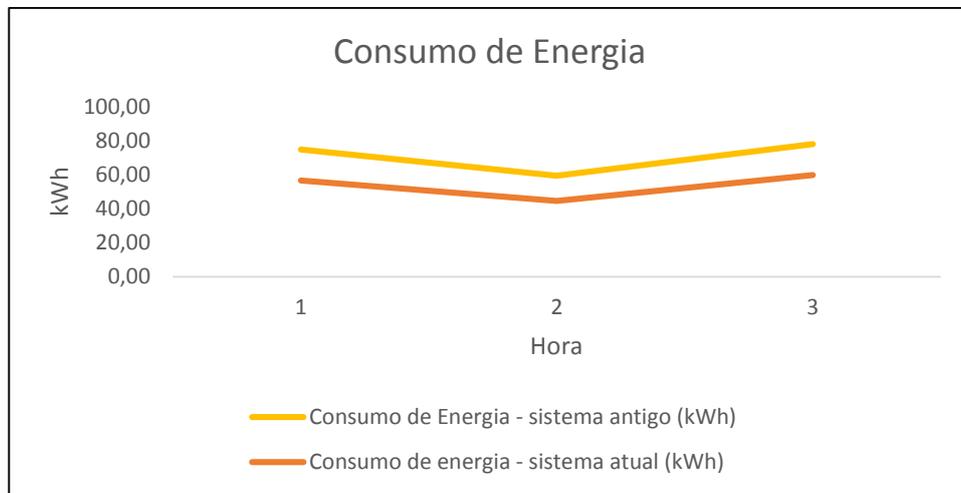
A figura 34 apresenta graficamente o volume bombeado para as duas situações analisadas.

Figura 34: Volume bombeado nos sistemas antigo e atual



A figura 35 apresenta graficamente o volume bombeado para as duas situações analisadas.

Figura 355:Consumo de energia nos sistemas antigo e atual

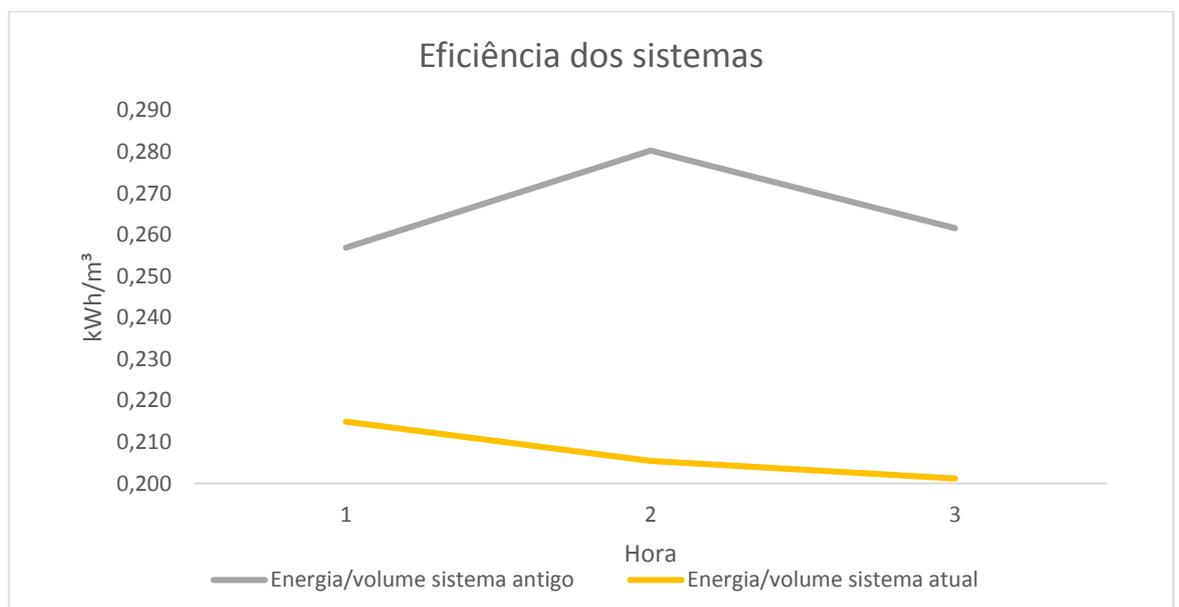


Como pode ser observado nos dados apresentados o volume produzido no sistema anterior foi superior em  $24\text{m}^3$  o que representa 3% a mais ao comparar com o sistema atual. Já o consumo de energia do sistema atual foi  $51,28\text{ kWh}$  menor do que o medido anteriormente, o que representa uma economia de 25%.

Para efeitos de comparação entre os dois sistemas faz-se necessário trazer tudo para uma mesma base a fim de medir os ganhos ou prejuízos com a alteração. Para isso optou-se em usar o indicador da quantidade de energia gasta a fim de bombear um  $\text{m}^3$  de água ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) Sendo esse o principal parâmetro utilizado para medir a eficiência do sistema estudado.

Essa relação está apresentada na figura 36.

Figura 36:Comparativo entre sistemas



O sistema antigo com uma média de 0,266kWh/m<sup>3</sup> bombeado o apresentou um consumo de 0,059 kWh a mais que o sistema atual com o inversor de frequência que consumiu 0,207 kWh de energia para bombear 1 (um) m<sup>3</sup> de água. Comparando então os dois sistemas percebendo-se uma redução no consumo de energia na ordem de 22%.

#### 4.1. RESULTADOS ECONÔMICOS

Com o objetivo de quantificar o valor de cada um dos métodos é importante conhecer o valor que será economizado com a substituição baseado no volume produzido no ano, energia economizada e também no custo de substituição da chave *soft starter* pelo inversor de frequência através da compra do novo equipamento e custos de substituição.

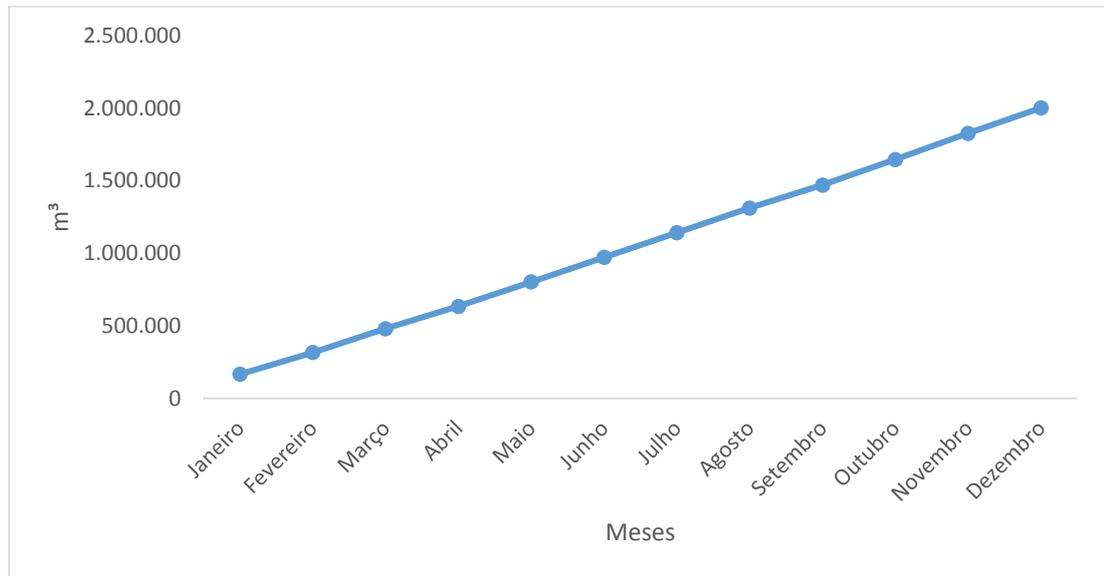
De acordo com dados fornecidos pela empresa Odebrecht Ambiental | Saneatins, que opera o sistema estudado, o tempo de funcionamento (sempre fora do horário de ponta) e volume produzido pelo sistema estudado no ano de 2015, apresentam distribuição listados mês a mês na tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de funcionamento e volume produzido em 2015

Mês	Tempo de funcionamento (h)	Volume produzido (m <sup>3</sup> )
Janeiro	469,48	166.806
Fevereiro	421,10	149.000
Março	456,50	164.139
Abril	428,60	154.296
Maio	504,00	168.446
Junho	523,00	169.578
Julho	515,80	168.849
Agosto	490,40	171.139
Setembro	454,70	158.615
Outubro	491,70	175.643
Novembro	497,40	180.229
Dezembro	502,03	175.559

Pode-se perceber pelos dados apresentados na tabela 5 que a média de funcionamento do sistema estudado foi de 479h/mês com um volume acumulado produzido de 2.002.299 m<sup>3</sup>/ano, que pode ser vista figura 37.

Figura 37: Volume bombeado no ano de 2015



De acordo com os dados avaliados anteriormente para cada m<sup>3</sup> de água produzido com o novo sistema, há uma economia de 0,059kWh. Logo para todo o volume produzido no ano de 2015 a economia de energia seria de 118.136kWh.

Foi visto na tabela 3, do capítulo 2 que o valor do kWh para o grupo A4 - Tarifa Hora Sazonal Verde é de R\$ 0,22425. Com o desconto de 15% por se tratar de um Serviço Público de Saneamento essa tarifa é de R\$0,1906125. Aplicando os impostos ICMS (25%), PIS e COFINS (5%) que incidem sobre a tarifa de energia, a alíquota do kWh seria de R\$ 0,2723036. A economia anual com essa substituição é de R\$ 32.168,76. Outra economia que é alcançada através da redução na demanda contratada de 19 kW, uma vez que a potência exigida pelo motor reduziu de 77kW em média para 58kW. Como o custo do kW de demanda contratada para essa categoria (A4 Horosazonal Verde) já aplicado impostos para uma unidade de serviço público no saneamento é de R\$ 26,775/kW, e a economia anual com essa redução é de R\$ 6.104,70.

O custo de aquisição do inversor de frequência pela empresa no ano de 2015 foi de R\$ 28.150,00. Os custos para implementação (mão de obra, cabos e conexões) foram orçados em torno de R\$ 1.000,00, totalizando um custo de R\$ 29.150,00.

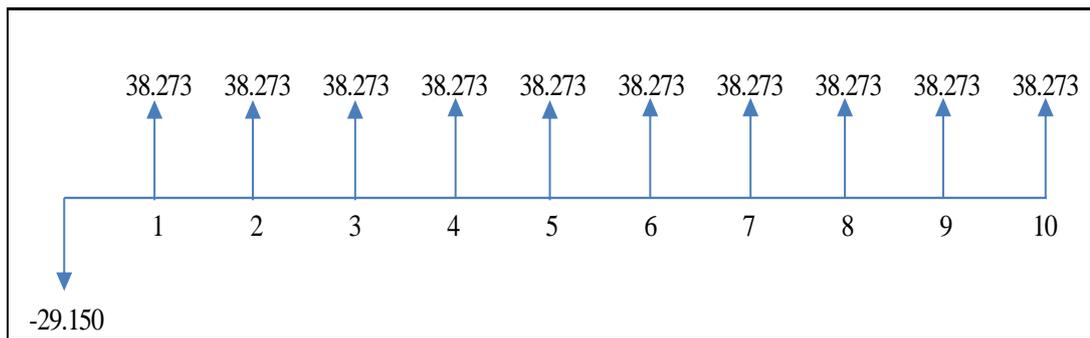
Um resumo com os dados financeiro relatados estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultado financeiro da substituição do sistema de partida

Valor investido	R\$ 29.500,00
Economia de energia anual (kWh)	118.136
Economia de demanda mensal (kW)	19
Tarifa de energia com impostos	R\$ 0,272/kWh
Tarifa de demanda com impostos	R\$ 26,775/kW
Economia com redução de energia	R\$ 32.168,76
Economia anual com redução de demanda	R\$ 6.104,70
Economia total	R\$ 38.273,46

O período de ganhos deste sistema foi limitado em 10 anos, uma vez que de acordo com BARROS (2012), alguns dos componentes deste equipamento tem vida útil entre 9 e 11 anos. O fluxo de caixa desse projeto está ilustrado na figura 38.

Figura 38: Fluxo de Caixa



Conhecendo o fluxo de caixa, a taxa e o período a ser analisado pode-se calcular o VPL que para esse projeto é igual a R\$ 168.556,16.

Para o estudo de caso deste trabalho a TIR é de 131,27%

O cálculo desse benefício se dá no momento em que os benefícios acumulados superam o investimento inicial. Para o projeto deste trabalho o período é de 10 meses.

## 5. DISCUSSÕES

A partir dos experimentos observou-se que a utilização de inversor de frequência para acionamento de motor no saneamento pode ser viável economicamente desde que o sistema trabalhado apresente características operacionais para isso. Como uso de válvula controladora de vazão de modo a restringir o fluxo de água em determinados momentos da operação.

A utilização do inversor de frequência traz várias vantagens desde hidráulicas, a elétricas e econômicas. Alguns exemplos dessas vantagens são:

- Redução da pressão na tubulação;
- Diminuição do chamado golpe de aríete, pois o desligamento do CMB passa a ocorrer em rampa;
- Melhoria no fator de potência;
- Redução na corrente de partida;
- Possibilidade na integração com sistema de automação;
- Redução no consumo de energia e conseqüentemente no custo com energia elétrica.

Para o estudo de caso apresentado, buscando a manutenção da vazão constante houve uma redução na altura manométrica de trabalho que ocasionou uma redução de potência mecânica.

Em uma eventual necessidade de incremento de vazão, não seria possível no sistema antigo uma vez que o motor já estava trabalhando em sua corrente nominal, ficando inviável sua exploração. Já no uso do conversor de frequência esse aumento de vazão pode ser conseguido através do aumento na rotação do motor.

Pode ser observado ao analisar o sistema de abastecimento que este apresentava um período de atividade associado a um curto momento parado (aproximadamente 20 minutos). Propõe-se que através da utilização do inversor de frequência associado ao consumo e produção de água, a vazão de trabalho seja ajustada de modo a reduzir a quantidade de interrupções no sistema que causam desgastes aos equipamentos eletromecânicos e hidráulicos.

## 6. CONCLUSÕES

O uso do inversor de frequência mostrou-se viável tanto técnica quanto economicamente ao comparar com a chave *soft starter* e uma válvula controlando a vazão do sistema. A redução no consumo específico ao fazer essa substituição foi de 22,19%.

A análise do conjunto, mecânico e elétrico, mostra que o rendimento passou de 0,60 para 0,75. Logo, a utilização do inversor de frequência mostrou-se 15% mais eficiente, quando comparada ao uso da chave *soft starter* e uma válvula controladora de vazão.

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 elétrica por volta de 118.136 kWh/ano, o que representaria em valores atuais uma economia de R\$ 32.168,76. Valor esse suficiente para a aquisição do inversor de frequência, sendo seu custo de aquisição amortizado em 10 meses e trazendo um retorno para a companhia R\$168.556,16 considerando um horizonte de 10 anos de operação.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Como sugestão para a operação do sistema avaliado recomenda-se:

- 1) Redução na vazão de bombeamento do sistema avaliado de modo que o equipamento trabalhe de forma contínua respeitando o período do horário de energia elétrica mais cara e o período em que os poços subterrâneos devem permanecer desligados;
- 2) Utilização de motor de alto rendimento.

Para futuros trabalhos recomenda-se:

- 1) Avaliar o rendimento do CMB levando em conta a variação de nível da caixa de reunião.
- 2) A associação do equipamento principal e reserva trabalhando a baixas rotações, buscando assim um consumo de energia ainda menor.

## BIBLIOGRAFIA

ABDELAZIZ, E.A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. **A review on energy saving strategies in industrial sector**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 150-168. 02 set. 2010.

ARAUJO, J. A. B. **Aplicação Do Inversor De Frequência Para Acionamento De Sistemas De Bombeamento Em Irrigação Por Aspersão**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu – UNESP. 2000.

AZEVEDO NETTO, J. M.; et al. **Manual de Hidráulica**. 8ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher. 1998

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 02/02/2016.

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 02/07/2015.

BARROS, M. **Ciclo de vida de inversores de frequência História dos Inversores ABB**. ABB. 2012.

BIMESTRE, T. A. **Proposta De Metodologia Para Aplicação De Eficiência Energética Em Uma Usina Hidrelétrica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. 2015.

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

CONAUT. **Medidores de Vazão Eletromagnéticos**. 2016. Disponível em: <<http://www.conaut.com.br/>> Acessado em 17/04/2016.

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.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Balanco Energético Nacional 2015**. Brasil, 2015. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>> Acessado em: 02/04/2016

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6ª Ed. Bookman, 648p. 2006.

FILHO, A. Q. S. **Estudo de Diagnóstico Energético em Sistemas de Abastecimento**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia Itajubá. 2012.

GOMES, H.P. **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 2ª Ed. Editora Universitária – UFPB. Joao Pessoa- PB. 460p. 2009.

GRUNDFOS. **Manual de Engenharia Sistemas de Pressurização**. Bombas Grundfos Portugal S.A. 2005.

KSB. **Manual de curvas características Nº A2740/42/44.1P.E.S/6**. Várzea Paulista: KSB. 75p. 2009.

KSB. **Manual de Treinamento: Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. Várzea Paulista: KSB. 215 p. 2003.

KSB. **Manual Técnico Meganorm**. Frankenthal. 2013 Disponível em: <<http://www.ksb.com.br/>> Acessado em 04/04/2016.

LAMON. **Produtos DataLogger de Pressão sem Display**. Disponível em: <<http://www.lamon.com.br/Produtos/detalhes/15/0/0/>> Acessado em 12/04/2016.

MASSULO, A. M. **Eficiência Energética Em Estações Elevatórias De Esgotos: Estudo De Caso Na Cidade De Uberlândia-MG**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2011.

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.

MOURA, G. N. P. **A Relação Entre Água e Energia: Gestão Energética nos Sistemas de Abastecimento de Água das Companhias de Saneamento Básico do Brasil**. Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético. 2010.

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.

PEREIRA, F. N. **Determinação Experimental Da Curva Do Sistema E Da Potência Consumida Em Unidade De Bombeamento Alimentando Dois Tanques Em Desnível Com Fluidos Diferentes.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. 2011.

PORTO, R M. **Hidráulica Básica.** 2006.4ª Ed. São Carlos: EESC-USP

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água.** Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. 2007.

SILVA, M. C. I. **Correção Do Fator De Potência De Cargas Industriais com dinâmica Rápida.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG (PPGEE). 2009.

SILVA, B. A. **GEE Eficiência Energética em Cargas Motrizes.** (Apostila). Efficientia. 2009.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO [SNIS]. **Banco de Dados. Aplicativo Série Histórica.** Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>> Acesso em: 01/04/2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO [SNIS]. **Banco de Dados. Aplicativo Série Histórica.** Brasil, 2014. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>> Acesso em: 01/04/2016.

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

TSUTIYA, M. T. **Utilização de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento.** VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de água. João Pessoa. Paraíba, junho de 2006.

VILAÇA, F. N. **Perda de Carga em conectores iniciais da irrigação Localizada.** Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2012.

VILLATE J. E. **Física 2 Eletricidade e Magnetismo.** Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. 2011.

WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos.** Jaraguá do Sul. 2016.

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