



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FERNANDO COLAFRANCESCHI DA SILVA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA  
INSTALAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE  
DE VAZÃO EM CONJUNTO MOTOR-BOMBA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DA CAGEPA**

**JOÃO PESSOA  
2018**

**FERNANDO COLAFRANCESCHI DA SILVA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA  
INSTALAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE  
DE VAZÃO EM CONJUNTO MOTOR-BOMBA EM ESTAÇÃO  
ELEVATÓRIA DA CAGEPA**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal da Paraíba como um dos requisitos  
necessários para a obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.**

**JOÃO PESSOA  
2018**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S586a Silva, Fernando Colafranceschi da.

Análise de Viabilidade técnico-econômica da instalação de inversor de frequência para controle de vazão em conjunto motor-bomba em estação elevatória da CAGEPA / Fernando Colafranceschi da Silva. - João Pessoa, 2018. 52 f.

Orientação: Isaac Freitas.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Controle de vazão. 2. Inversor de frequência. 3. Sistemas de abastecimento de água. I. Freitas, Isaac. II. Título.

UFPB/BC

**FERNANDO COLAFRANCESCHI DA SILVA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE  
INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DE VAZÃO EM CONJUNTO  
MOTOR-BOMBA EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DA CAGEPA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como um dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.**

**Aprovado por:**

---

**Prof. Dr. Isaac Soares de Freitas (Orientador)**

---

**Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Avaliador)**

---

**Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez (Avaliador)**

**JOÃO PESSOA  
2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida. Com o passar do tempo passei a agradecer por todos os problemas existentes em minha vida, visto que a providência divina sempre interveio de forma a superá-los e suportá-los. Agradeço a Deus ainda pela graça de ter Carlos e Isabel como meus pais, Luiza como irmã e Maria de Lourdes e Helena como avós. Certamente esta realização seria inviável sem o imenso apoio de vocês.

Grato ainda pelo carinho e companheirismo de Raissa, cujo aconchego e conversa foram sempre motivadores e inspiradores, despertando a resiliência nos momentos mais difíceis.

Aos meus colegas Diogo e Emanuel, pelo compartilhamento da luta diária de estudos, mostrando que nunca se caminha sozinho.

Ao engenheiro eletricista Robson Azevedo Mendes e à equipe de eletrotécnicos da CAGEPA, pela inestimável oportunidade de estagiar no setor de manutenção elétrica da empresa, repassando a todo instante seus vastos conhecimentos

Por todos vocês nutro o mais singelo e humilde sentimento de gratidão.

## RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água são naturalmente superdimensionados, prevendo um aumento populacional. Ainda é comum o uso de válvulas e registros para o controle de vazão por ser um método barato e simples. Contudo, esta prática desperdiça energia elétrica uma vez que o sistema opera aquém do seu melhor rendimento (que é próximo da capacidade nominal) e as válvulas introduzem perda de carga no sistema. O encanamento de recirculação (*By-pass*), a mudança de diâmetro do rotor da bomba e o uso do conversor estático de frequência são outras formas possíveis de se ajustar a vazão à demanda. Popularmente chamado de inversor de frequência, o conversor estático de frequência é capaz de ajustar a velocidade do conjunto motor-bomba, regulando a vazão de forma gradativa, alterando a curva da bomba sem introduzir perdas de carga no sistema, o que gera uma economia de consumo energético. Este trabalho se propõe a analisar os ganhos técnico-econômicos advindos da instalação de um inversor de frequência para controle de vazão em uma estação elevatória da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA).

**.Palavras-chaves:** Sistemas de abastecimento de água. Controle de vazão. Inversor de frequência.

## **ABSTRACT**

Water supply systems are naturally oversized, predicting a population increase. It is still common to use valves and registers for flow control because it is a cheap and simple method. However, this practice wastes electrical energy as the system operates below its best efficiency (which is close to nominal capacity) and the valves introduce a loss of load in the system. By-pass piping, changing the pump rotor diameter, and using the static frequency converter are other possible ways of adjusting flow to demand. Popularly called frequency inverter, the static frequency converter is capable of adjusting the speed of the motor-pump assembly, regulating the flow gradually, changing the pump curve without introducing load losses into the system, which generates an economy of energy consumption. This paper proposes to analyze the technical and economic gains from the installation of a frequency inverter to control the flow in a lifting station of Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA).

**Keywords:** Systems of water supply. Flow control. Frequency inverter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Motor de indução trifásico. ....	15
Figura 2 – Onda resultante deformada (T) e suas componentes ( 1 e 5 ) .....	16
Figura 3 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal senoidal .....	19
Figura 4 - Circuito típico de um instrumento de valor eficaz verdadeiro.....	19
Figura 5 - Sinais com diferentes graus de distorção e valores medidos pelos instrumentos. ....	20
Figura 6 - Esquema de um inversor de frequência trifásico .....	22
Figura 7 - Esquema simplificado do chaveamento dos transistores .....	23
Figura 8 - Formas de onda de tensão resultantes no inversor trifásico.....	24
Figura 9 - Curvas da bomba para diversos diâmetros de rotor .....	26
Figura 10 - Curva vazão x potência.....	26
Figura 11 - Sistema de bombeamento convencional. ....	28
Figura 12 - Sistema de bomba afogada. ....	29
Figura 13 - Curvas características da bomba e do sistema .....	29
Figura 14 - Mudança do ponto de operação através do fechamento de válvula.....	30
Figura 15 - Controle de vazão pela recirculação .....	31
Figura 16 - Curvas da bomba para rotações de 100%, 75% e 50%.....	31
Figura 17 - Curvas características da bomba para dois diâmetros de rotor - D1 e D2.....	32
Figura 18 - Curvas Características da bomba do Sistema de abastecimento de água. ....	38
Figura 19 - Curvas de potência da bomba do sistema de abastecimento de água .....	39
Figura 20 - Curva característica da bomba e do sistema. ....	39
Figura 21 - Curva de rendimento da bomba .....	40
Figura 22 - Curva de potência da bomba.....	40
Figura 23 - Curvas de rendimento do conjunto motor - inversor .....	44
Figura 24 - Analisador MAR 722 sendo utilizado para medir consumo e potência durante 24 horas .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes térmicas de motores elétricos.....	15
Tabela 2 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas .....	16
Tabela 3 - Associação dos transistores no inversor trifásico.....	23
Tabela 4 - Subdivisão da tensão de fornecimento do grupo A.....	34
Tabela 5 - Subdivisão da tensão de fornecimento do grupo B .....	34
Tabela 6 - Tarifas vigentes em maio de 2018 na modalidade azul.....	37
Tabela 7 - Vazões médias horárias .....	41
Tabela 8 - Demanda média diária.....	41
Tabela 9 – Consumo médio diário.....	42
Tabela 10 - Rotações reduzidas .....	43
Tabela 11 - Valores de demanda horária com uso do inversor .....	44
Tabela 12 - Valores de consumo horário com uso do inversor .....	45

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Motivação .....	12
1.2 Objetivos.....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 Motores elétricos .....	13
2.1.1 Princípio de funcionamento do motor de indução .....	13
2.1.2 Rendimento do motor elétrico .....	14
2.1.3 Material isolante e classes térmicas.....	14
2.2 Harmônicas .....	16
2.2.1 Espectro harmônico.....	17
2.2.2 Taxa de distorção harmônica.....	17
2.2.3 Instrumentos convencionais de medição x Instrumentos de valor eficaz verdadeiro .....	18
2.2.4 Efeitos dos harmônicos nas instalações elétricas .....	20
2.3 Inversor de frequência .....	21
2.3.1 Princípio de funcionamento do inversor .....	21
2.3.2 Tipos de inversores de frequência .....	24
2.4 Bombas hidráulicas .....	25
2.4.1 Curva característica da bomba .....	25
2.4.2 Leis de semelhança.....	27
2.5 Sistemas de bombeamento .....	28
2.5.1 Sistemas de bombeamento .....	28
2.5.2 Curva característica de um sistema de bombeamento .....	29
2.5.3 Mudança do ponto de operação .....	30
2.5.4 Controle da vazão por regulação de válvula .....	30
2.5.5 Controle de vazão por recirculação (“By-pass”).....	30

2.5.6 Controle de vazão por ajuste de rotação da bomba.....	31
2.5.7 Controle de vazão por mudança no diâmetro do rotor.....	32
2.6 Estrutura Tarifária de Energia Elétrica.....	32
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
3.1 Curvas do sistema, da bomba, do rendimento e da potência.....	38
3.2 Estimativa de tarifa mensal na operação convencional .....	41
3.3 Estimativa de tarifa mensal na operação com o inversor de frequência.....	42
<b>4 Resultados e Discussões .....</b>	<b>46</b>
<b>5 Conclusão .....</b>	<b>48</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>51</b>

“Saudade é a unidade de medida da falta,  
resiliência é a unidade de medida da resistência,  
família é a fonte de energias renováveis,  
sorte é a unidade de medida de um evento aleatório,  
amor é a unidade de medida da quantidade de calor,  
dedicação é a unidade de medida do trabalho e  
sucesso é a unidade de medida de energia consumida.” – Autoria própria.

## 1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água é um serviço público essencial e complexo, logo merece total atenção e investimento por parte dos gestores. O crescimento populacional implica o surgimento de novos bairros e habitações e consequente necessidade de expansão do abastecimento de água e esgoto. Para que a água continue chegando com a qualidade adequada é imprescindível o uso de motores elétricos e bombas hidráulicas.

A Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA) é uma sociedade de economia mista constituída por lei estadual em 1966 com sede administrativa em João Pessoa e dividida em seis gerências regionais: Regional do litoral com sede em João Pessoa, Regional do Brejo com sede em Guarabira, Regional da Borborema com sede em Campina Grande, Regional de Espinharas com sede em Patos, Regional Rio do Peixe com sede em Sousa e Regional do Alto Piranhas com sede em Cajazeiras, atendendo um total de 2.841.101 habitantes conforme o site da empresa.

O presente trabalho foca a Regional do Litoral, unidade em que o autor estagiou por um ano no setor de manutenção elétrica. As várias unidades da CAGEPA podem ser classificadas em:

- Estações elevatórias de água bruta (EEAB);
- Estações elevatórias de água tratada (EEAT);
- Estações de tratamento de água (ETA);
- Reservatórios.

O centro de controle operacional (CCO) é o setor responsável por coordenar todo o funcionamento das várias unidades descritas acima, repassando procedimentos operacionais aos operadores como fechamento de válvulas e parada de conjuntos motor-bomba. Há o contato de hora em hora via rádio a fim de registrar dados como vazão, pressão, altura manométrica e nível dos reservatórios onde não há medição remota.

O bom desempenho operacional depende do bom desempenho do operador da unidade e quando estes erram ou negligenciam as ordens despachadas ocorre o transbordamento de reservatórios, o funcionamento de equipamentos não despachados pelo CCO (podendo haver multa pela ultrapassagem da demanda contratada) bem como a imprecisão na abertura e fechamento das válvulas para controle de vazão. Este último procedimento introduz perdas no sistema de abastecimento de água e consequentemente há um maior consumo de energia culminando em um maior custo operacional. Na grande maioria das unidades, os sistemas de

bombeamento são superdimensionados, ficando aquém da sua capacidade nominal. Com o advento da eletrônica de potência surgiu o inversor de frequência ou conversor estático de frequência, equipamento que possibilita, entre outras aplicações, alterar a rotação de um conjunto motor-bomba controlando assim a sua vazão, prescindindo a abertura ou fechamento de válvulas.

### **1.1 Motivação**

O autor, enquanto estagiário da empresa, viu-se diante de um debate salutar entre o engenheiro electricista e um grupo de eletrotécnicos a respeito da economia de energia ao se instalar um inversor de frequência para controle da vazão em um dado reservatório da empresa. A partir de então surgiu o interesse na temática a fim de aprofundar o conhecimento a respeito do assunto e poder debater e opinar com maior propriedade.

### **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o ganho técnico e econômico ao se instalar um inversor de frequência para controle de vazão em uma unidade da CAGEPA.

Os objetivos específicos são: levantar a curva do sistema e da bomba em estudo, determinar a redução do consumo de energia elétrica e verificar o prazo em que há retorno do investimento ao se instalar um inversor de frequência para reduzir a rotação do conjunto motor-bomba para controlar a vazão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Far-se-á uma revisão dos principais tópicos que fornecem o embasamento teórico necessário ao bom entendimento dos assuntos abordados posteriormente.

### 2.1 Motores elétricos

O motor elétrico é o equipamento que converte energia elétrica em energia mecânica. Bombas, ventiladores, esteiras e elevadores são alguns exemplos de equipamentos que precisam da energia mecânica fornecida pelo motor. Quando este é acoplado a uma bomba hidráulica, forma-se o conjunto motor-bomba. No Brasil, são comercializados para a frequência de 60 Hertz podendo ser monofásicos com tensões de 110, 115, 127, 220, 240, 254 ou 508 Volts. Há também os trifásicos com tensões de 220, 380, 440, 460 ou 480 Volts (Rodrigues, 2007). A figura 1 ilustra as principais partes do tipo de motor mais encontrado na indústria atualmente e que será o foco deste tópico: o motor de indução trifásico.

#### 2.1.1 Princípio de funcionamento do motor de indução

Além dos motores de corrente contínua, existem os motores de corrente alternada, que são classificados em motores síncronos e motores assíncronos ou de indução. O que diferencia o motor de indução dos demais motores é que não há a necessidade de uma corrente contínua de campo (rotor) para fazer a máquina funcionar. A tensão no rotor, que gera a corrente do rotor e esta produz o seu campo magnético, surge por indução nos enrolamentos do rotor em vez de haver uma conexão física de fios (Chapman, 2000).

Existem dois tipos de rotor para o motor de indução: rotor bobinado e gaiola de esquilo. O primeiro consiste em um conjunto de enrolamentos trifásicos conectados em estrela e suas três terminações conectadas aos anéis deslizantes do rotor. Por fim, escovas fecham o curto-circuito nos enrolamentos do rotor. O segundo, e mais utilizado, é constituído por várias barras condutoras que são curto-circuitadas nas duas extremidades (Chapman, 2000).

O enrolamento trifásico estático é alimentado por uma tensão trifásica, circulando então três correntes defasadas de  $120^\circ$  entre si. Um fio condutor atravessado por uma corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor, portanto surgirão três campos magnéticos de valores proporcionais às correntes, cujos fluxos se encontram entre os pólos norte e sul, atravessando o rotor. Quando somados vetorialmente, o campo resultante  $H$  tem intensidade constante, porém altera o sentido de forma cíclica, ou seja, gera um campo girante. Tal campo

girante induz correntes no rotor e estas criam um campo magnético no rotor, o qual tende a seguir o campo girante do estator e assim produz o conjugado ou torque do motor (Chapman, 2000).

### **2.1.2 Rendimento do motor elétrico**

O motor é um conversor eletro-mecânico, portanto possui perdas intrínsecas à sua construção e ao seu funcionamento. São classificadas em: perdas Joule no estator, perdas Joule no rotor, perdas no ferro, perdas por dispersão e perdas por atrito e ventilação (Elektro/Unifei/Excen/Fupai, 2012). Logo, o rendimento do motor elétrico é dado pela equação (1):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{P_m}{P_m + \sum Perdas} \quad (1)$$

Onde:

$\eta$  = Rendimento;

$P_m$  = Potência mecânica no eixo;

$P_{el}$  = Potência elétrica;

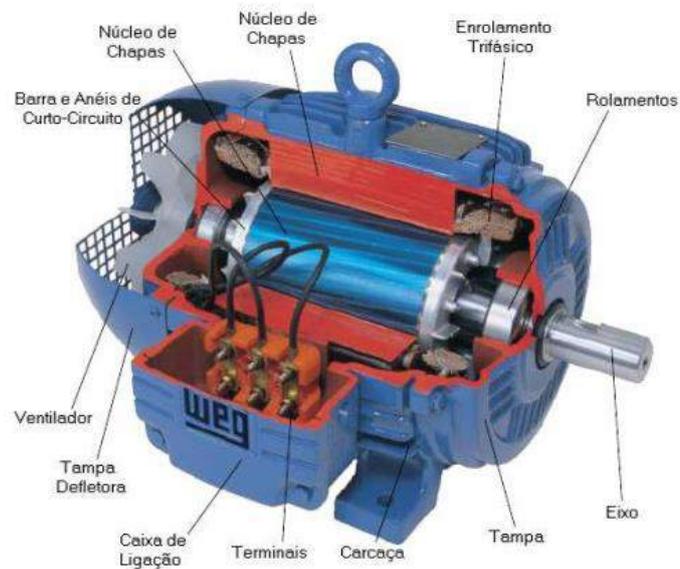
$\sum Perdas$  = Somatório das perdas.

Caso não se disponha das perdas, a forma direta é verificar a potência no eixo e dividir pela potência que é demandada da rede.

### **2.1.3 Material isolante e classes térmicas**

Durante a operação, o conjunto motor-bomba esquentará devido às perdas que existem no equipamento. Quanto maior o rendimento do motor, menores são essas perdas. O calor no estator é dissipado na carcaça, porém o rotor transmite o fluxo de calor diretamente ao eixo girante e, portanto, o mesmo deve ser dimensionado para suportar este aumento de temperatura conforme o catálogo de motores da fabricante WEG.

**Figura 1– Motor de indução trifásico.**



**Fonte: Catálogo de motores WEG, 2016.**

O material isolante impede, limita e direciona os fluxos de corrente elétrica, impedindo que o mesmo escoe para a terra ou flua para um ponto de menor potencial. O motor de indução é uma máquina robusta e sua vida útil depende basicamente da isolação dos enrolamentos, a qual é afetada por fatores como: vibrações, umidade, ambientes corrosivos e o calor, que é o mais severo deles. A temperatura de operação contínua que não causa redução da vida útil do equipamento é muito menor do que a temperatura de derretimento do material isolante e refere-se ao ponto mais quente da isolação e não ao enrolamento como um todo. Diante disso, há classes internacionalmente conhecidas e úteis quanto à classificação térmica conforme a tabela 1 retirada do catálogo de motores do fabricante WEG.

**Tabela 1 – Classes térmicas de motores elétricos.**

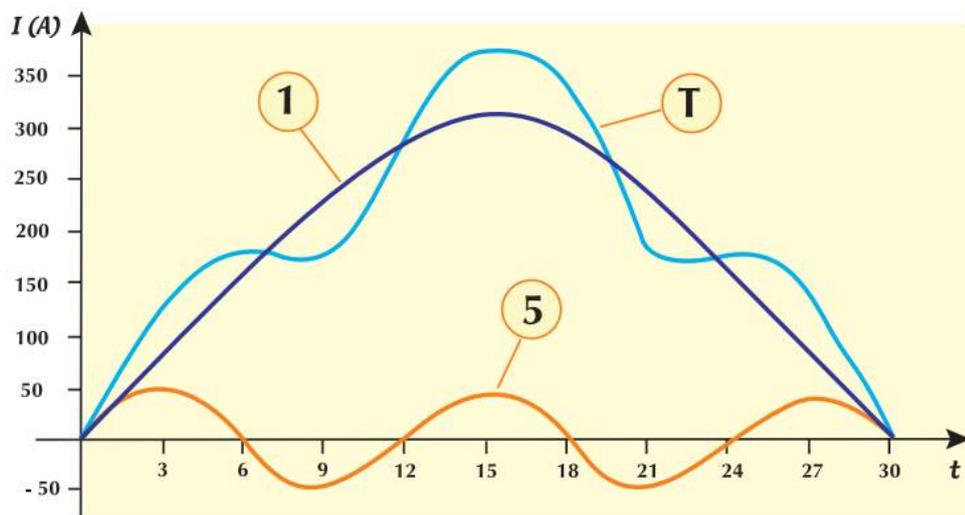
Temperatura (°C)	Classes de temperatura	
	IEC 60085	UL 1446
90	Y (90 °C)	-
105	A (105 °C)	-
120	E (120 °C)	120 (E)
130	B (130 °C)	130 (B)
155	F (155 °C)	155 (F)
180	H (180 °C)	180 (H)
200	N (200 °C)	200 (N)
220	R (220 °C)	220 (R)
240	-	240 (S)
acima de 240°C	-	Acima de 240 (C)
250	250	

**Fonte: catálogo de motores WEG, 2016.**

## 2.2 Harmônicas

Uma tensão ou corrente harmônica é um sinal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência de alimentação. A figura 2 ilustra o que ocorre de forma prática quando há a presença de harmônicos. O sinal T é obtido pela soma ponto a ponto dos sinais 1 e 5. O sinal 1 corresponde a frequência fundamental (60 Hz) enquanto o sinal 5 corresponde a presença de um harmônico de quinta ordem ( $5 \times 60 = 300$  Hz). A tabela 2 apresenta as harmônicas, que são classificadas de acordo com a sua ordem, frequência e sequência.

Figura 2 – Onda resultante deformada (T) e suas componentes (1 e 5).



Fonte: Moreno, 2001.

Tabela 2 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n \cdot 60$	—

Fonte: Moreno, 2001.

A situação ideal (que dificilmente ocorre) seria aquela em que existe apenas a harmônica da frequência de alimentação, conhecida como frequência fundamental. Na maioria das instalações elétricas no Brasil a frequência fundamental é de 60 Hertz.

As harmônicas de sequência positiva tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido de rotação, causando um aumento de temperatura e sobrecorrente nos enrolamentos. As harmônicas de sequência negativa por sua vez, provocam um giro em sentido contrário, ou seja, freiam o motor, reduzindo sua rotação e também causando aquecimento. As harmônicas de sequência zero não alteram a rotação do motor, porém se somam no condutor neutro, podendo vir a atuar proteções de fuga de corrente, caso existam (Moreno, 2001).

### **2.2.1 Espectro harmônico**

Após ter compreendido o que são as harmônicas, faz-se necessário compreender a forma pela qual se analisa a presença delas em uma instalação. O espectro harmônico é um gráfico de barras onde cada barra representa a frequência de uma harmônica, seu valor eficaz e defasagem.

### **2.2.2 Taxa de distorção harmônica**

A Agência Nacional de Engenharia Elétrica (ANEEL) publicou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, composto por onze módulos, os quais normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Segundo o módulo 8, que versa sobre a qualidade da energia elétrica, a distorção harmônica total de tensão (DDT %) em porcentagem é dada pela equação (2):

$$DDT \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$V_h$  = é a tensão harmônica de ordem h;

$V_1$  = é a tensão fundamental.

Ainda conforme o referido módulo, para tensões de fornecimento menores que 1 kV, estão dentro da norma os valores de DDT% menores que 10%. Para tensões entre 1 kV e 69

kV são aceitos valores menores que 8%. E para valores de tensão maiores que 69 kV são aceitos apenas valores de distorção menores que 5% (ANEEL, 2018).

### ***2.2.3 Instrumentos convencionais de medição x Instrumentos de valor eficaz verdadeiro***

Dentre os instrumentos portáteis mais usuais estão os multímetros e alicates amperímetros, ambos projetados e fabricados em uma época em que a questão das harmônicas era pouco conhecida e seus efeitos eram praticamente imperceptíveis. Ou seja, esses equipamentos estão aptos a medir sinais senoidais, obviamente com um erro associado à sua classe de exatidão. Os instrumentos convencionais de medição utilizam a relação entre o valor eficaz e o valor médio em meio período para calcular o valor eficaz de um sinal senoidal (Moreno, 2001). Tal relação é obtida matematicamente a seguir. Adota-se um sinal senoidal do tipo  $f(x) = V_{\max} * \text{sen}(x)$ , onde  $V_{\max}$  é o valor de pico da tensão. O cálculo do valor eficaz é dado pela equação (3) (Lathi, 2007):

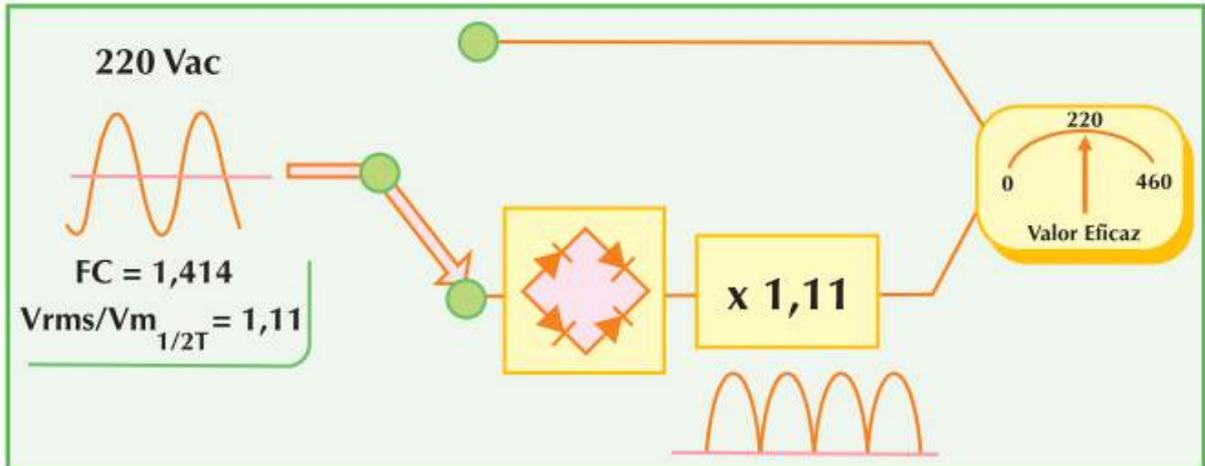
$$\text{Valor eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(x) dx} \quad (3)$$

Onde T é o período. Já o valor médio por sua vez é dado pela equação (4):

$$\text{Valor médio} = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \quad (4)$$

Ainda conforme (Lathi, 2007) para um sinal senoidal os valores eficaz e o médio são respectivamente  $\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$  e  $\frac{2V_{\max}}{\pi}$ . Portanto, a relação entre o valor eficaz e o valor médio é aproximadamente 1,1107. A figura 3 ilustra um circuito típico de medição presente em equipamentos convencionais. Basicamente é composto por um retificador de ponte completa, um amplificador que multiplica pelo coeficiente 1,1107 e um outro circuito que calcula o valor médio. Assim, tem-se a medição do valor eficaz de um sinal senoidal, independentemente da frequência e do valor do sinal.

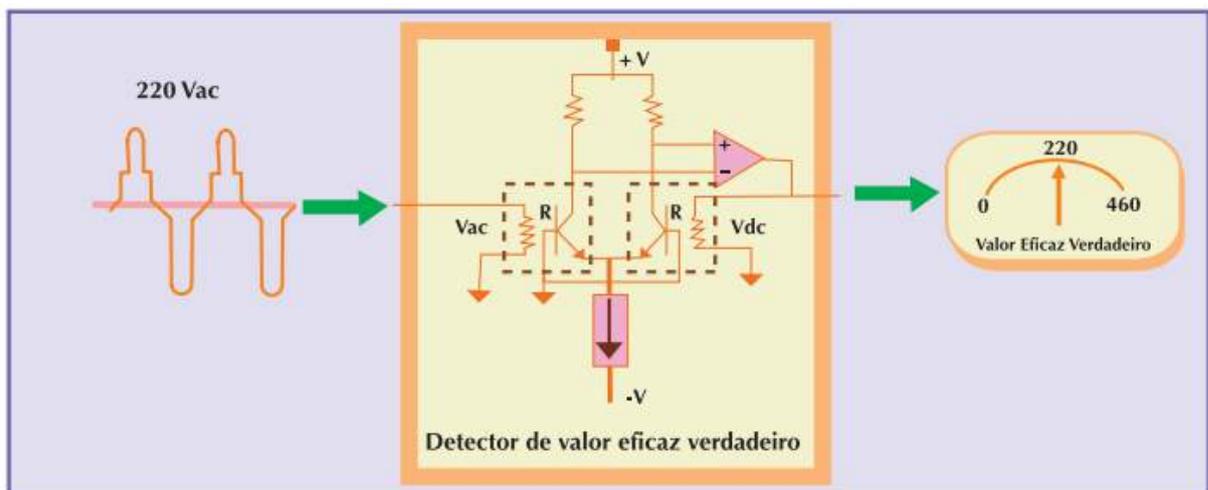
Figura 3 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal senoidal.



Fonte: Moreno, 2001.

Os instrumentos de valor eficaz verdadeiro (ou *true RMS*) por sua vez foram projetados para circuitos que contenham distorções na forma de onda. A forma pela qual se dá a medição varia conforme o fabricante. A figura 4 apresenta um circuito que pode ser utilizado para medir o valor eficaz verdadeiro. Em suma, quando o efeito Joule decorrente do sinal em corrente contínua é equivalente àquele provocado pelo sinal em corrente alternada, o amplificador operacional permite a passagem do valor de corrente contínua, que é o valor eficaz verdadeiro do sinal (Moreno, 2001).

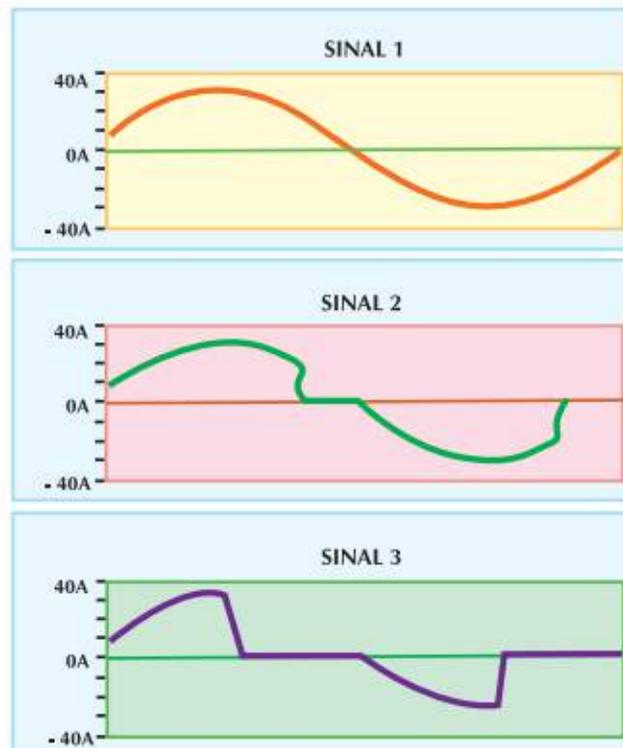
Figura 4 - Circuito típico de um instrumento de valor eficaz verdadeiro.



Fonte: Moreno, 2001.

A figura 5 ilustra três sinais que foram medidos com instrumentos de valor eficaz e de valor médio, ambos com a mesma classe de exatidão. O constante crescimento de cargas não-lineares (transistores, IGBT's, fontes chaveadas, etc) requer o uso de equipamentos de medição de valor eficaz verdadeiro para que não haja erros de leitura.

**Figura 5 - Sinais com diferentes graus de distorção e valores medidos pelos instrumentos.**



	Sinal		
	1	2	3
Instrumento de valor eficaz verdadeiro (A)	22,0	21,3	16,8
Instrumento de valor médio (A)	22,0	19,5	12,4

Fonte: Moreno, 2001.

#### 2.2.4 Efeitos dos harmônicos nas instalações elétricas

Dentre os principais efeitos causados pela presença de harmônicos cabe ressaltar: aquecimento excessivo, atuação da proteção, ressonância, vibrações, queda de tensão e redução do fator de potência.

O aquecimento decorre do efeito *skin*. Quanto maior a frequência (ordem da harmônica) mais a corrente tende a circular pela periferia do condutor. Uma vez que a área útil do condutor se encontra reduzida, há o aumento da resistência, resultando aumento das perdas por efeito Joule (Moreno, 2001).

Em circuitos com grande quantidade de equipamentos eletroeletrônicos, os sinais harmônicos podem possuir pequenos valores eficazes mas grandes valores de pico, podendo atuar dispositivos de proteção. Além do mais, há maior queda de tensão e redução do fator de potência. Portanto, para evitar que isto ocorra, recomenda-se que sejam previstos circuitos separados (Moreno, 2001).

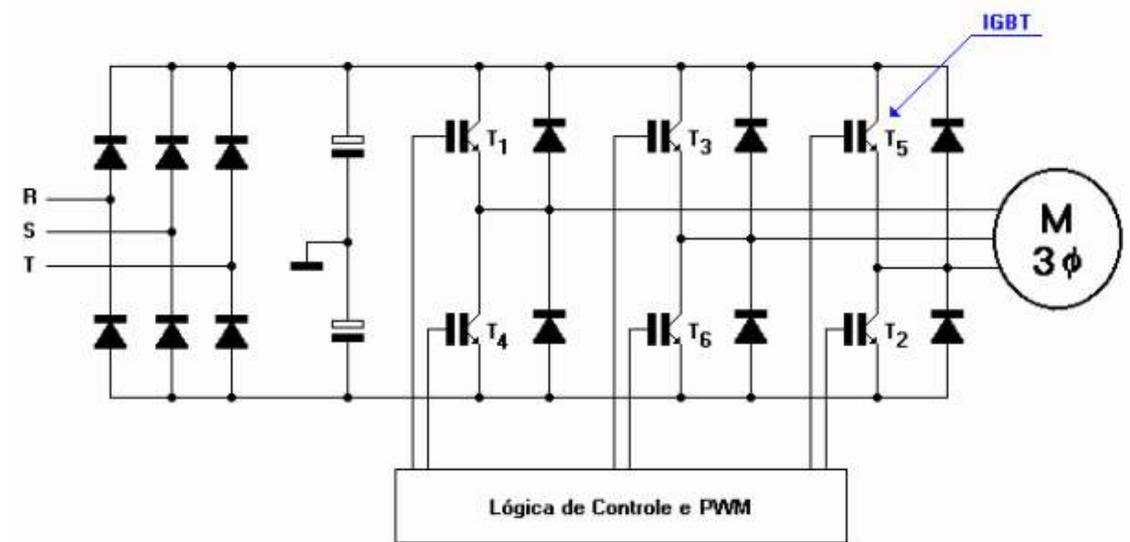
Ressonância é o efeito que amplifica sinais de uma dada frequência quando se tem um capacitor e um indutor em paralelo. A correção do fator de potência consiste na instalação de um banco de capacitores em uma instalação elétrica (que é de natureza indutiva). Logo, deve-se quantificar as harmônicas e garantir que elas sejam mínimas, sob o risco de haver queimas e explosões dos capacitores (Moreno, 2001).

## **2.3 Inversor de frequência**

### ***2.3.1 Princípio de funcionamento do inversor***

A figura 6 esquematiza o circuito de potência de um inversor trifásico, formado por uma ponte retificadora, dois capacitores de filtro que alimentam um barramento de corrente contínua, o qual alimenta transistores IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) que são comandados por uma lógica de controle que dispara três a três sequencialmente, de forma a alterar a corrente que circula no motor (Capelli, 2002).

Figura 6 - Esquema de um inversor de frequência trifásico.



Fonte: Capelli, 2002.

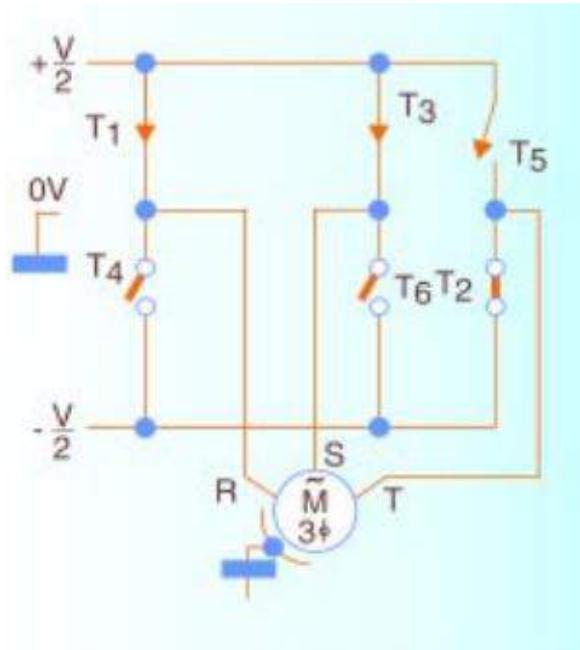
A figura 7 mostra de forma simplificada os transistores de potência como contatos do tipo abre e fecha, a fim de facilitar o entendimento. Neste exemplo, são acionados T1, T2 e T3. As tensões presentes são  $V/2$  e  $-V/2$ , uma vez que há a derivação central. A tensão entre duas fases é dada pela subtração da tensão de uma fase com a da outra, conforme as equações (5), (6) e (7) abaixo:

$$V_{rs} = V_r - V_s = V/2 - V/2 = 0 \quad (5)$$

$$V_{st} = V_s - V_t = V/2 - (-V/2) = V \quad (6)$$

$$V_{tr} = V_t - V_r = -V/2 - V/2 = -V \quad (7)$$

**Figura 7 - Esquema simplificado do chaveamento dos transistores.**



**Fonte: Capelli, 2002.**

As outras combinações de trincas de transistores são analisadas de forma semelhante, excetuando-se as associações T1, T3, T5 e T2, T4 e T6 pois estas resultam o mesmo potencial em todas as fases do motor e não há movimentação do mesmo. A tabela 3 sintetiza as tensões entre as fases proveniente das possíveis combinações.

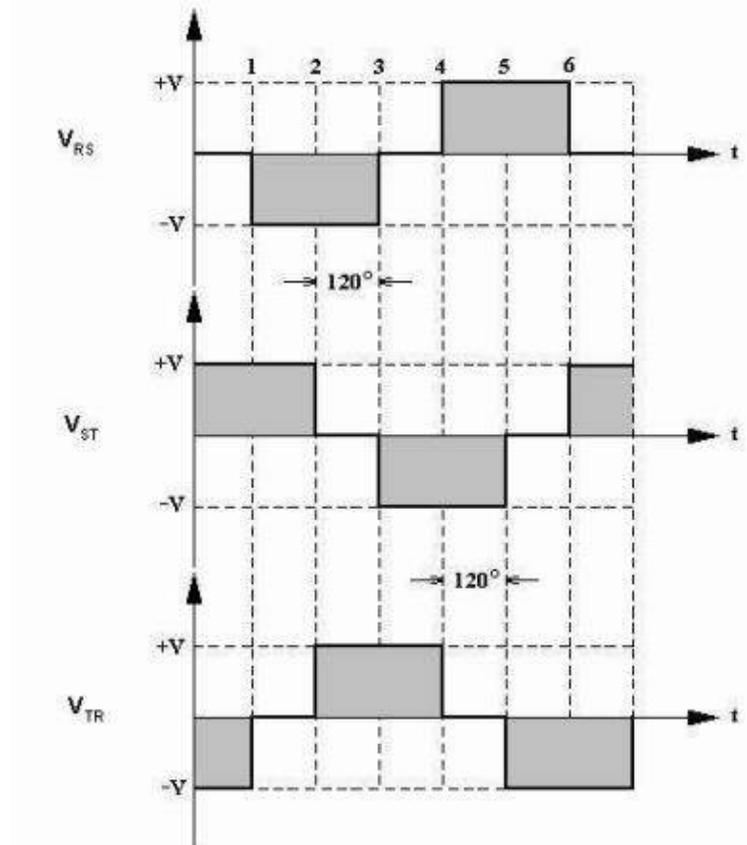
**Tabela 3 - Associação dos transistores no inversor trifásico.**

Tempo	Chaveamentos	Tensões		
		$V_{RS}$	$V_{ST}$	$V_{TR}$
1º	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub>	0	+V	-V
2º	T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub>	-V	+V	0
3º	T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub>	-V	0	+V
4º	T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub>	0	-V	+V
5º	T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , T <sub>1</sub>	+V	-V	0
6º	T <sub>6</sub> , T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub>	+V	0	-V

**Fonte: Capelli, 2002.**

A figura 8 ilustra as formas de onda de tensão resultantes da soma das tensões obtidas na tabela 3. Note que há defasamento de 120 graus entre as fases.

Figura 8 - Formas de onda de tensão resultantes no inversor trifásico.



Fonte: Capelli, 2002.

O controle dos estados de condução é feito pela modulação por largura de pulso, do inglês - *Pulse Width Modulation* (PWM), que consiste na comparação de uma tensão de referência com um sinal triangular cuja frequência determina a frequência do chaveamento. A onda triangular que determina este tempo de chaveamento é denominada portadora e deve possuir frequência mínima dez vezes superior à máxima frequência do sinal de referência, garantindo uma reprodução aceitável do sinal. Esta estratégia permite variar a frequência com resolução de 0,01 Hertz. Quando os pulsos se alargam há o aumento de tensão e quando se estreitam há a diminuição da mesma (Ahmed, 2000).

### 2.3.2 Tipos de inversores de frequência

Existem dois tipos de inversores de frequência comercializados atualmente: o escalar e o vetorial. O inversor escalar tem por base a curva tensão x frequência. Para que o torque seja constante na carga, ambas grandezas devem variar de forma que a relação entre elas se mantenha constante. O inversor vetorial por sua vez não possui uma curva parametrizada, na verdade essa curva varia com a variação da carga e conseqüentemente do torque. Esta variação se dá através do controle das correntes de magnetização e das correntes do rotor

(Rodrigues, 2007). Este tipo de inversor é indicado para torque elevado com baixa rotação, com controle de velocidade e torque regulável. Conforme (Capelli, 2002) o inversor é classificado em 4 blocos:

1° Bloco - CPU (Unidade Central de Processamento): formada por um controlador lógico programável (CLP) ou um microprocessador, onde são armazenados os parâmetros e gerados os pulsos de disparo dos IGBTs;

2° Bloco - IHM (interface homem máquina): permite visualizar dados do aparelho bem como parametrizá-lo;

3° Bloco - Interfaces: Permitem a conexão externa com sinais analógicos ou digitais;

4° Bloco - Circuito de potência: é o circuito descrito na seção 2.3.1 (funcionamento do inversor).

Vale ressaltar que existem diversos fabricantes que já disponibilizam as funções escalar e vetorial conjuntamente, cabendo ao usuário apenas fazer a parametrização.

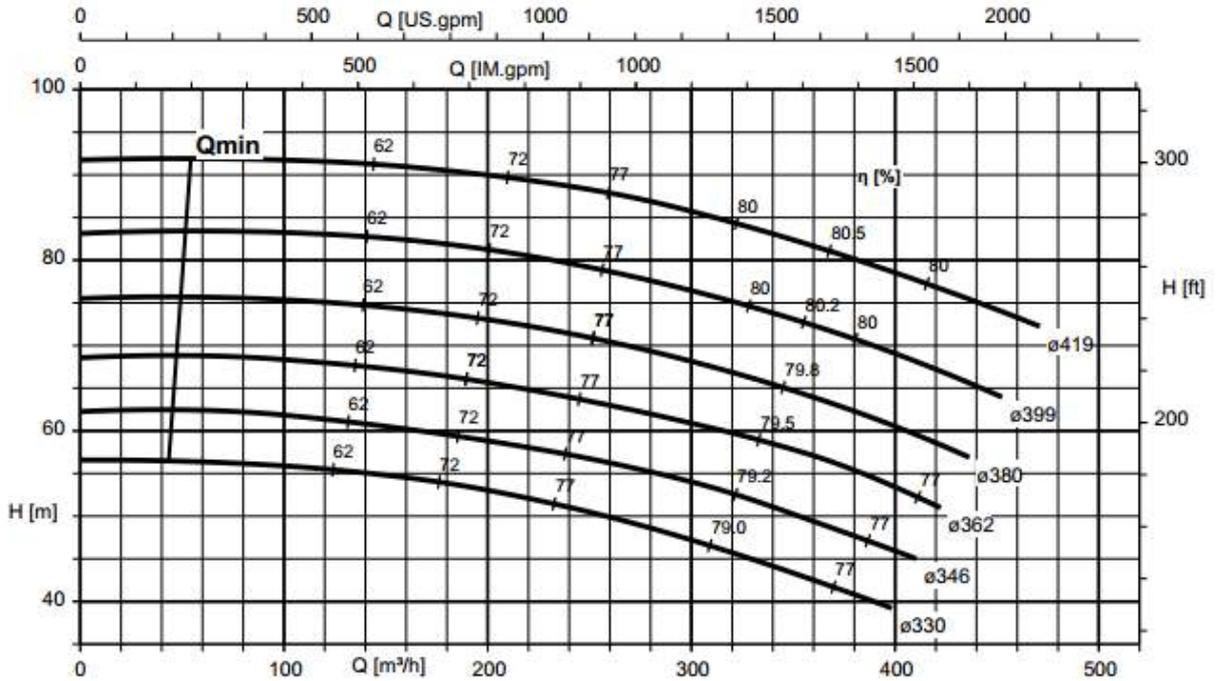
## **2.4 Bombas hidráulicas**

Este equipamento fornece energia ao fluido para que o mesmo realize trabalho, deslocando-o de um ponto a outro. Existem dois grandes grupos de bombas: volumétricas e turbobomba. Dentro da segunda categoria estão as bombas centrífugas que são amplamente usadas em processos industriais por cobrir grandes faixas de vazões e pressões, além de possuir fácil manutenção (Pereira, 2001).

### ***2.4.1 Curva característica da bomba***

A curva característica da bomba é formada pelo conjunto de pontos que relacionam a altura manométrica com a vazão. Caso não houvesse perdas na tubulação, a altura manométrica coincidiria com a altura geométrica, que é o desnível entre o reservatório superior e o inferior. A figura 9 foi retirada do catálogo de bombas do fabricante KSB. Os valores a direita de cada curva são os diâmetros do rotor ( $\varnothing$ ). É possível alterá-los por meio de usinagem, obtendo assim uma nova curva para a bomba. As linhas que cortam as curvas da bomba são os rendimentos. Vale salientar que o rendimento é inerente a rotação nominal da bomba. Caso mude a velocidade de rotação, também muda o seu rendimento (Pereira, 2001).

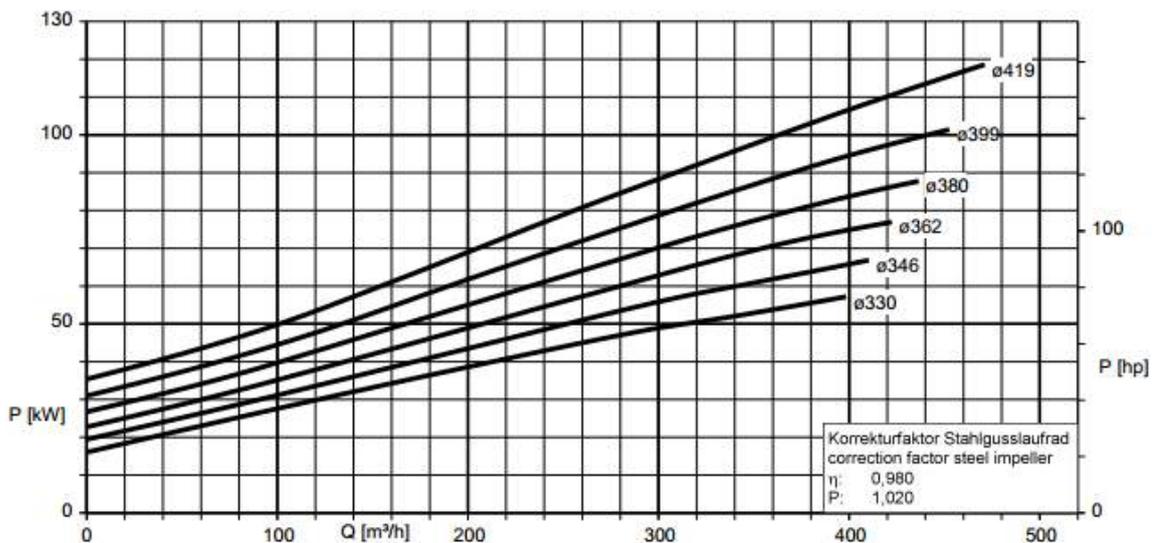
Figura 9 - Curvas da bomba para diversos diâmetros de rotor.



Fonte: catálogo de bombas KSB, 2013.

A figura 10 ilustra a potência motriz requerida pela bomba, ou seja, a potência solicitada no eixo da bomba. Chama-se de conjunto moto-bomba o acoplamento do eixo da bomba ao do motor.

Figura 10 - Curva vazão x potência



Fonte: catálogo de bombas KSB, 2013.

### 2.4.2 Leis de semelhança

Ao se alterar a rotação de uma bomba hidráulica, há mudanças também no seu ponto de trabalho. As equações de (8) a (10) relacionam a mudança na vazão, altura manométrica e potência com a mudança na rotação (Allen, 1995; Wilk, 2000; Crespo, 2001).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \quad (10)$$

Onde:

$Q$  é a vazão;

$H$  é a altura manométrica;

$P$  é a potência no eixo;

$N$  é a velocidade de rotação.

A alteração da rotação da bomba acarreta uma mudança em seu rendimento. A equação empírica (11) permite o cálculo do novo rendimento da bomba para uma rotação diferente da nominal (Comolet, 1961):

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + (1 - \eta_1) * \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{0,17}} \quad (11)$$

Onde:

$\eta_1$ – Rendimento do conjunto moto-bomba para a rotação  $N_1$ ;

$\eta_2$ – Representa o rendimento do conjunto moto-bomba correspondente à rotação  $N_2$ .

Portanto, para um resultado mais preciso, deve-se incorporar os novos rendimentos à equação (10). Assim, de forma mais precisa a relação entre as potências na bomba é dada pela equação (12) (Rodrigues, 2007).

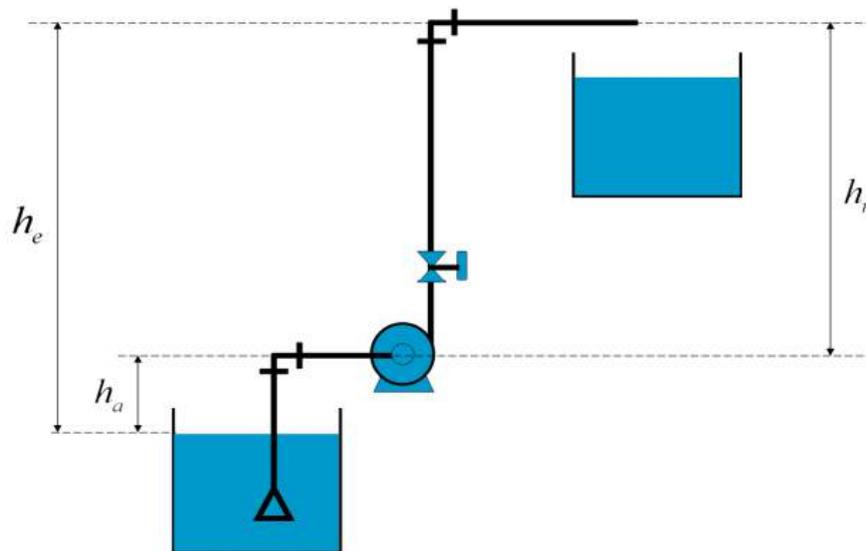
$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \times \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (12)$$

## 2.5 Sistemas de bombeamento

### 2.5.1 Sistemas de bombeamento

Existem basicamente dois tipos de sistemas de bombeamento: o convencional e o de bomba afogada. A figura 11 ilustra um sistema convencional, onde a bomba se encontra acima do nível do reservatório. Neste caso, a altura geométrica ou altura estática ( $h_e$ ) é dada pela soma da altura do nível inferior ( $h_a$ ) até a bomba com a altura da bomba até o nível superior ( $h_r$ ).

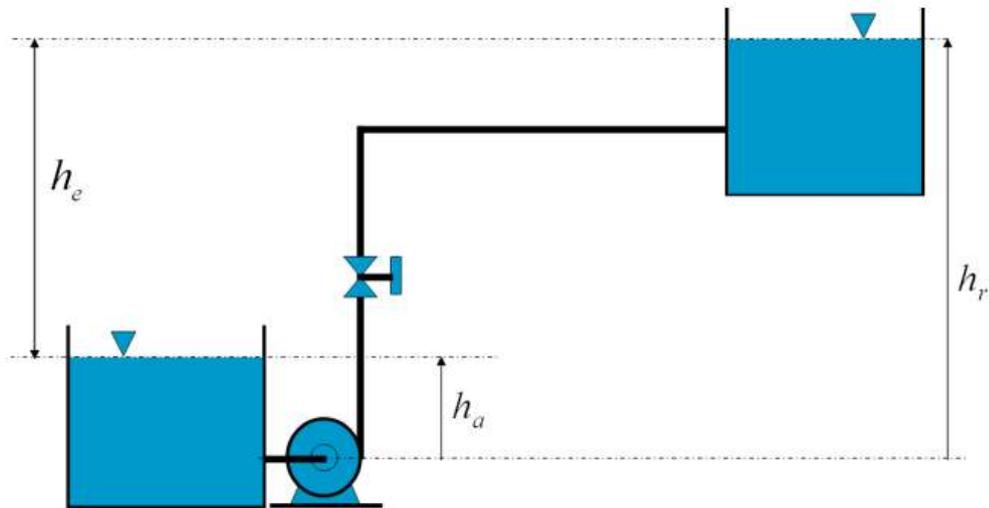
Figura 11 - Sistema de bombeamento convencional.



Fonte: Alé, 2011.

A figura 12 ilustra um sistema de bomba afogada. Neste caso a altura estática ( $h_e$ ) é dada pela subtração da altura da bomba ao nível superior ( $h_r$ ) com a altura do nível inferior à bomba ( $h_a$ ) (Alé, 2011).

**Figura 12 - Sistema de bomba afogada.**

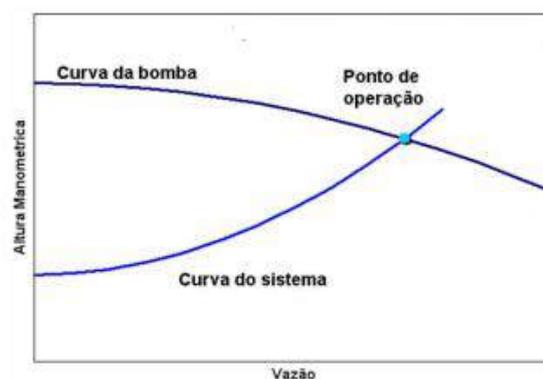


Fonte: Alé, 2011.

### 2.5.2 Curva característica de um sistema de bombeamento

A curva característica de um sistema de bombeamento é dada pela contribuição de três componentes: a altura estática, a perda de carga distribuída e a perda de carga localizada. A primeira está relacionada com a tubulação (diâmetro, comprimento, rugosidade, tempo de uso) enquanto a segunda tem relação com os acessórios da tubulação (válvulas, registros, etc). Ambas perdas de carga são diretamente proporcionais ao quadrado da velocidade do fluido na tubulação e, portanto, também proporcional ao quadrado da vazão ( $Q$ ) (Alé, 2011). Diante do exposto, a figura 13 representa uma curva característica do sistema e a curva da bomba citada na seção 2.4.1. A intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba define o ponto de operação. Note que o ponto onde a vazão é nula representa a altura estática do sistema. Geralmente, tais dados são guardados pelo projetista da rede de tubulação.

**Figura 13 - Curvas características da bomba e do sistema.**



Fonte: Alé, 2011.

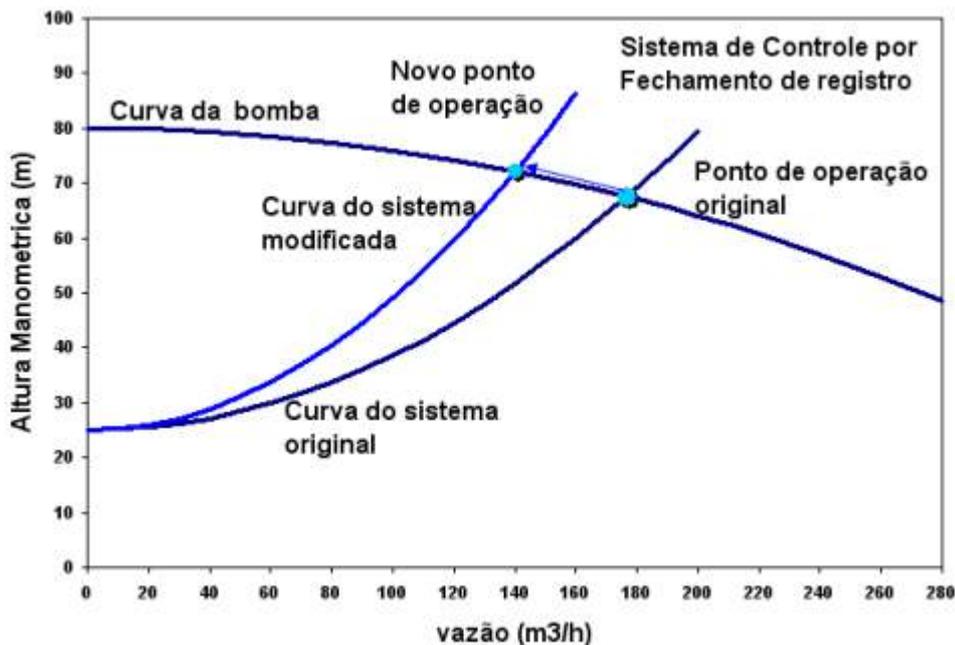
### 2.5.3 Mudança do ponto de operação

Existem quatro meios de se alterar o ponto de operação de um sistema de bombeamento e assim controlar a vazão de acordo com a demanda: uso de válvulas (globo, gaveta ou borboleta), encanamento de recirculação (“By-pass”), alteração de diâmetro do rotor e alteração de rotação da bomba.

### 2.5.4 Controle da vazão por regulação de válvula

Caso seja necessário reduzir a vazão, pode-se fechar (estrangular) uma válvula. Esta obstrução de escoamento aumenta a perda de carga, modificando a curva do sistema conforme a figura 14. Hodiernamente este é o método mais utilizado pela empresa.

Figura 14 - Mudança do ponto de operação através do fechamento de válvula.

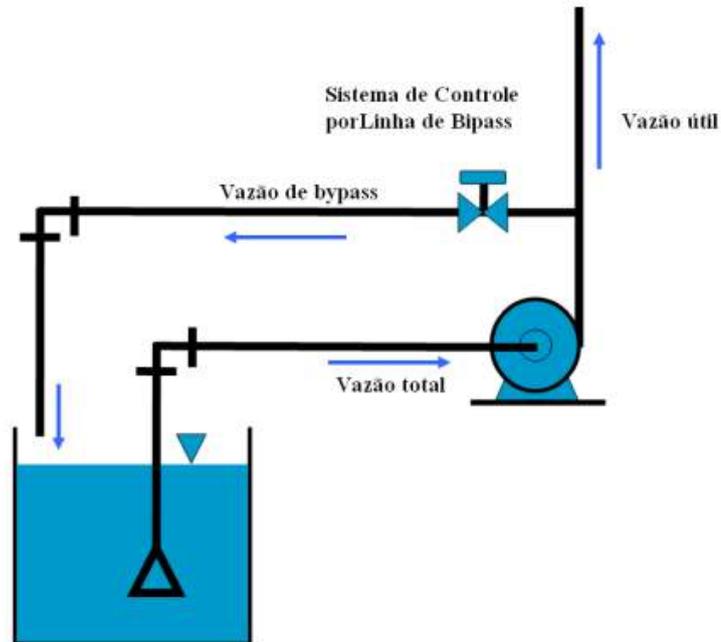


Fonte: Alé, 2011.

### 2.5.5 Controle de vazão por recirculação (“By-pass”)

Conforme a figura 15, o encanamento que deriva para a esquerda permite uma recirculação do fluido, permitindo assim uma restrição da vazão. Este método pode ser mais eficiente do que o uso de válvulas ou o ajuste de rotação do motor em sistemas onde a altura geométrica ou estática é dominante (Alé, 2011).

Figura 15 - Controle de vazão pela recirculação.

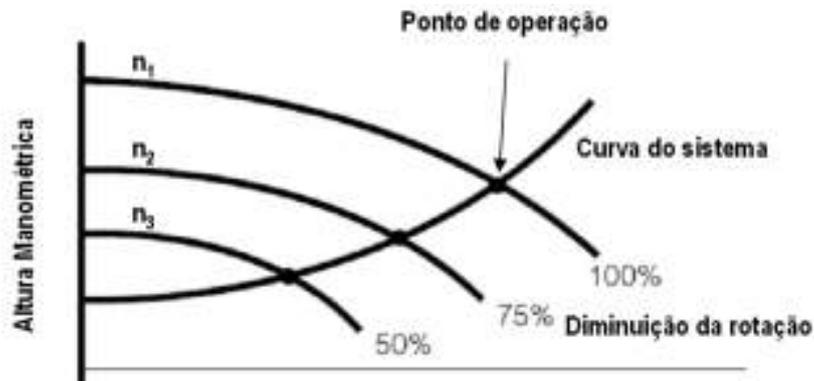


Fonte: Alé, 2011.

### 2.5.6 Controle de vazão por ajuste de rotação da bomba

Ao se alterar a velocidade do motor, altera-se a rotação da bomba e conseqüentemente suas características, conforme descrito pelas equações 8, 9 e 10. Por exemplo, para uma redução de 50% da rotação a bomba fornece a metade da vazão, uma altura manométrica de 25% da sua altura original e absorvendo 12,5% da potência (Alé, 2011). A figura 16 mostra as curvas para a bomba rotacionando com velocidades  $n_1$ ,  $n_2$  e  $n_3$ . Note que não há mudança na curva característica do sistema, uma vez que a tubulação permanece a mesma e não há abertura ou fechamento de válvulas.

Figura 16 - Curvas da bomba para rotações de 100%, 75% e 50%.

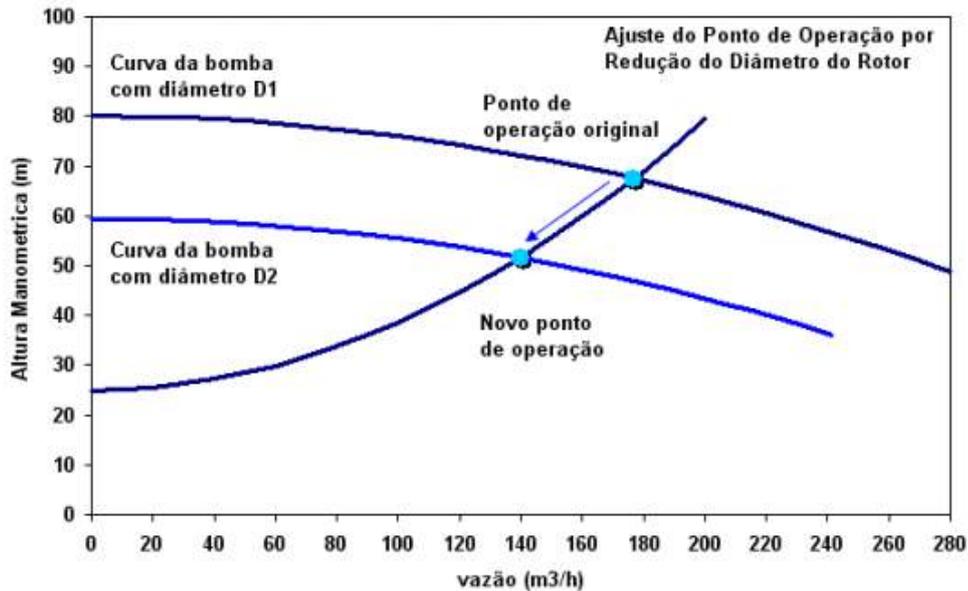


Fonte: Alé, 2011.

### 2.5.7 Controle de vazão por mudança no diâmetro do rotor

A curva da bomba também pode ser modificada pelo ajuste do diâmetro do rotor, podendo este ser trocado ou cortado. A figura 17 mostra a mudança da curva da bomba a partir da troca do diâmetro do rotor.

Figura 17 - Curvas características da bomba para dois diâmetros de rotor - D1 e D2.



Fonte: Alé, 2011.

## 2.6 Estrutura Tarifária de Energia Elétrica

Para o melhor entendimento das modalidades existentes de tarifação energética no Brasil, faz-se necessário consolidar alguns conceitos. Conforme (Tsutiya, 2001.):

**Demanda:** é a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela de carga instalada em operação, durante um intervalo de tempo especificado.

**Demanda Contratada:** é a demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valorem período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, sendo ou não utilizada durante o período de faturamento. Usualmente expressa em quilowatts (kW).

**Demanda de Ultrapassagem:** parcela da demanda medida que excede a demanda contratada, expressa em quilowatts (kW).

**Demanda Medida:** é a maior demanda de potência ativa, verificada por medição e integralizada no intervalo de 15 minutos, expressa em quilowatts (kW).

**Energia Elétrica Ativa:** é a energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia, ou seja, é a energia capaz de produzir trabalho. Expressa normalmente em quilowatts-hora (kWh).

**Estrutura Tarifária Convencional:** é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.

**Estrutura Tarifária Horo-Sazonal:** é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme segue:

a) **Tarifa Azul** – modalidade de aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia;

b) **Tarifa Verde** – modalidade de aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como uma única tarifa de demanda de potência;

c) **Horário de Ponta (HP)** – período definido pelas concessionárias de 3 horas diárias consecutivas, exceção feita aos Sábados, Domingos e os demais feriados definidos por lei federal. Esse período de 3 horas é definido pelas concessionárias;

d) **Horário Fora de Ponta (HF)** – período composto pelas horas diárias complementares àquelas definidas no horário de ponta.

**Tensão Primária de distribuição:** é a tensão disponibilizada no sistema elétrico da concessionária com valores padronizados iguais ou superiores a 2,3 kV.

**Tensão secundária de distribuição:** é a tensão disponibilizada no sistema elétrico da concessionária com valores padronizados inferiores a 2,3 kV. **Tarifa de Ultrapassagem:** é a tarifa aplicada sobre a diferença entre a demanda medida e a contratada, quando exceder os limites estabelecidos.

A Resolução nº 456 de 20/11/2.000 da ANEEL, enquadra as unidades consumidoras em dois grupos: A e B. O grupo A abrange os consumidores de alta tensão, aqueles cujo fornecimento seja igual ou superior a 2,3 kV ou que sejam atendidos com tensão inferior a 2,3

kV a partir de sistema subterrâneo nos termos de Artigo 82 desta resolução, desde que o consumo seja igual ou superior a 30 MWh, em no mínimo, 3 ciclos completos e consecutivos de 6 meses anterior à opção ou o contrato de fornecimento tenha demanda contratada igual ou superior a 150 kW. Esse grupo ainda é caracterizado pela estruturação tarifária binômia, ou seja, o faturamento é composto pela energia elétrica ativa medida e a demanda faturável (Resolução nº 456 da ANEEL). A Tabela 4 apresenta a subdivisão desse grupo.

**Tabela 4 - Subdivisão da tensão de fornecimento do grupo A.**

Subgrupos	Tensão de Fornecimento
A <sub>1</sub>	Igual ou superior a 230 kV
A <sub>2</sub>	de 88 kV a 138 kV
A <sub>3</sub>	de 69 kV
A <sub>3A</sub>	de 30 kV a 44 kV
A <sub>4</sub>	de 2,3 kV a 25 kV
AS	Consumidores de Baixa Tensão ligados em área de distribuição subterrânea, desde que satisfeitas algumas condições.

**Fonte: Resolução nº 456 da ANEEL, 2.000.**

Já o grupo B abrange os consumidores de Baixa Tensão, aqueles cuja tensão é inferior a 2,3 kV ou que possuem potência instalada inferior a 75 kVA ou ainda atendidos com tensão superior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo e desde que a potência instalada em projetores de iluminação não seja superior a  $\frac{2}{3}$  (dois terços) da carga total instalada. Esse grupo é caracterizado ainda pela estruturação tarifária monômia, ou seja, o faturamento é dado simplesmente pelo consumo de energia elétrica ativa (Tsutiya, 2001). A Tabela 5 apresenta a subdivisão desse grupo B.

**Tabela 5 - Subdivisão da tensão de fornecimento do grupo B.**

Subgrupos	Classificação
B <sub>1</sub>	Residencial e Residencial de Baixa Renda
B <sub>2</sub>	Rural, Coop. Rural de Eletrificação, Irrigação
B <sub>3</sub>	Demais Classes
B <sub>4</sub>	Iluminação Pública
B <sub>4A</sub>	Rede de Distribuição
B <sub>4B</sub>	Bulbo de Lâmpada
B <sub>4C</sub>	Nível de IP acima do Padrão
AS	Subterrâneo

**Fonte: Resolução nº 456 da ANEEL, 2.000.**

A diferença entre os dois grupos, além dos grupos de faturamento (alta e baixa tensão), tem início a partir do pedido de fornecimento, o qual sendo do grupo A deverá celebrar um contrato de fornecimento, enquanto que os do grupo B aceitam simplesmente os termos do contrato de adesão. As tarifas de energia elétrica podem ser: convencional ou horo-sazonal, subdividindo-se ainda esta última em tarifa azul e verde. A tarifa convencional se caracteriza pelo preço único praticado independentemente do horário de consumo, sendo aplicada aos dois grupos (A e B), porém normalmente utilizada para unidades enquadradas no grupo B (baixa tensão). Já a tarifa horo-sazonal, que tem como característica básica a prática diferenciada de tarifas em função dos horários de consumo, também pode ser aplicada a qualquer unidade enquadrada nos dois grupos (A e B). Essa opção tarifária subdivide-se ainda em outras duas categorias de tarifas, azul e verde, tendo atrativos que podem compensar o consumidor, dependendo do seu perfil de consumo (Tsutiya, 2001).

A tarifa azul é definida como uma modalidade tarifária para aplicação de preços diferenciados de demanda de potência e de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano. Conforme o Artigo 50 da Resolução n° 456 da ANEEL, os preços para esta tarifa são compostos da seguinte forma:

Demanda de Potência (kW):

- a) Um preço definido para o horário de ponta (HP);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta (HF).

Consumo de Energia (kWh):

- a) Um preço definido para o horário de ponta em período úmido (HPPU);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta em período úmido (HFPU);
- c) Um preço definido para o horário de ponta em período seco (HPPS);
- d) Um preço definido para o horário fora de ponta em período seco (HFPS).

A tarifa verde, por sua vez, é definida como a modalidade tarifária para aplicação de um preço único de demanda e de preços diferenciados de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano. Conforme o Artigo 51 da Resolução n° 456 da ANEEL, os preços para esta tarifa são compostos da seguinte forma:

Demanda de Potência (kW):

- a) Um preço único.

Consumo de Energia (kWh):

- a) Um preço definido para o horário de ponta em período úmido (HPPU);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta em período úmido (HFPU);
- c) Um preço definido para o horário de ponta em período seco (HPPS);
- d) Um preço definido para o horário fora de ponta em período seco (HFPS).

A Resolução apresenta ainda em seu Artigo 56 as considerações referentes aos limites da tarifa de ultrapassagem, ou seja, trata da parcela de demanda de potência efetivamente medida, que supera a respectiva demanda de potência contratada, sobre a qual será aplicada a tarifa de ultrapassagem. Nesse caso específico, será aplicada tarifa de ultrapassagem quando:

- a) Superar em mais de 5% para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;
- b) Superar em mais de 10 % para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento inferior a 69 kV.

O Artigo 49 estabelece sobre o faturamento das unidades consumidoras do Grupo A:

- a) Demanda Faturável - Um único valor, sendo o maior entre a demanda medida e a demanda contratada;
- b) Consumo de Energia Elétrica Ativa - Um único valor, sendo o maior entre a energia elétrica contratada (se existir) e a energia elétrica efetivamente medida;
- c) Consumo de Energia Elétrica e demanda de potências reativas excedentes - Quando o fator de potência é inferior a 0,92. A concessionária Energisa cobra um acréscimo percentual no faturamento em função do fator de potência caso este seja inferior a 0,92.

Diante dessa exposição sobre o sistema tarifário vigente no Brasil, é nítido que para escolher uma das modalidades existentes há condições, restrições e exigências que devem ser cuidadosamente avaliadas, evitando-se assim gastos adicionais com uma escolha equivocada. A concessionária de energia que supre a CAGEPA é a ENERGISA, cujas tarifas da modalidade adotada atualmente (azul) estão na tabela 6.

**Tabela 6 - Tarifas vigentes em maio de 2018 na modalidade azul.**

MODALIDADE TARIFÁRIA HORÁRIA AZUL							
SUBGRUPO	CLASSES	TUSD + TE				CONSUMO (RS/KWH)	
		DEMANDA (RS/KW)		ULTRAPASSAGEM		PONTA	FORA PONTA
		PONTA	FORA PONTA	PONTA	F. PONTA		
A3 (69 KV)	SERVIÇO PÚBLICO	14,92	6,18	35,12	14,56	0,30202	0,20213
	RURAL	15,80	6,55	35,12	14,56	0,31978	0,21402
	DEMAIS CLASSES	17,56	7,28	35,12	14,56	0,35532	0,23780
A4 (13,8 KV)	SERVIÇO PÚBLICO	45,27	15,12	106,52	35,58	0,31115	0,21126
	RURAL IRRIGAÇÃO	47,93	16,01	106,52	35,58	0,32946	0,02485
	RURAL	47,93	16,01	106,52	35,58	0,32946	0,22369
	DEMAIS CLASSES	53,26	17,79	106,52	35,58	0,36607	0,24855

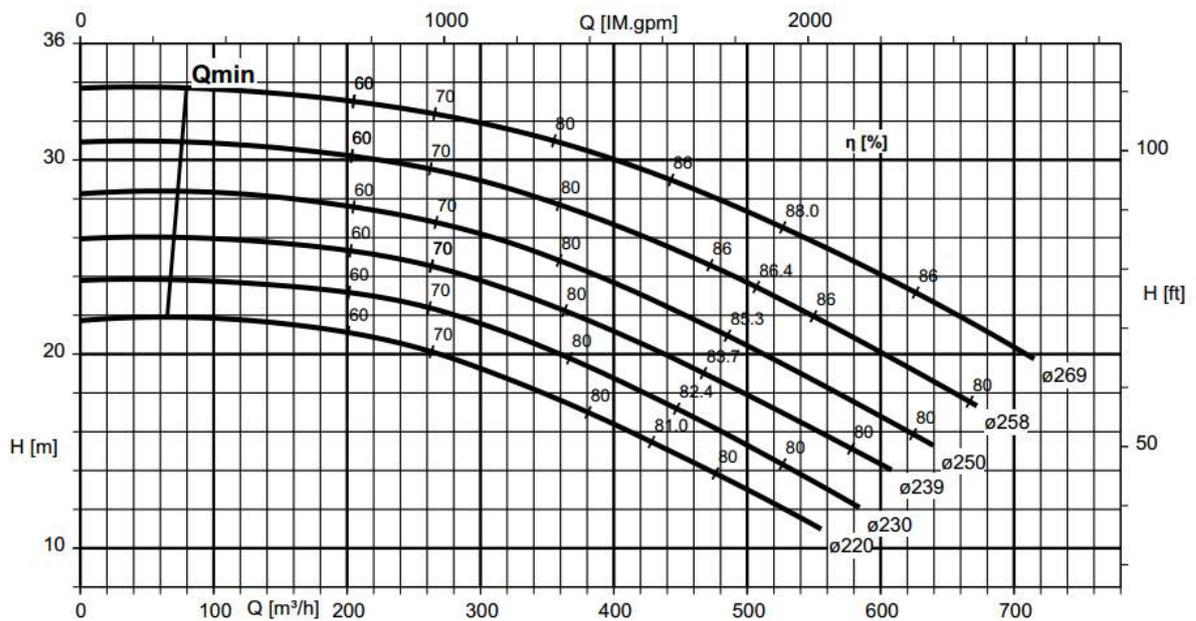
Fonte: <https://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/grandes-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Curvas do sistema, da bomba, do rendimento e da potência

A análise deste trabalho é para o sistema de Abastecimento de água de Santa Rita. O sistema possui uma altura geométrica de 8,2 metros e alimentados por um nível de tensão primária de 13.8 kV. A bomba é a KSB Meganorm 200-150-250 com diâmetro do rotor de 269 mm, 1750 RPM, acoplada ao eixo de um motor WEG W22 IR2 75 CV, 4 pólos, carcaça 225S/M. As curvas características desta bomba para diversos diâmetros de rotor estão na figura 18. Os traços existentes nas curvas características são valores de rendimento para aquela vazão e altura manométrica.

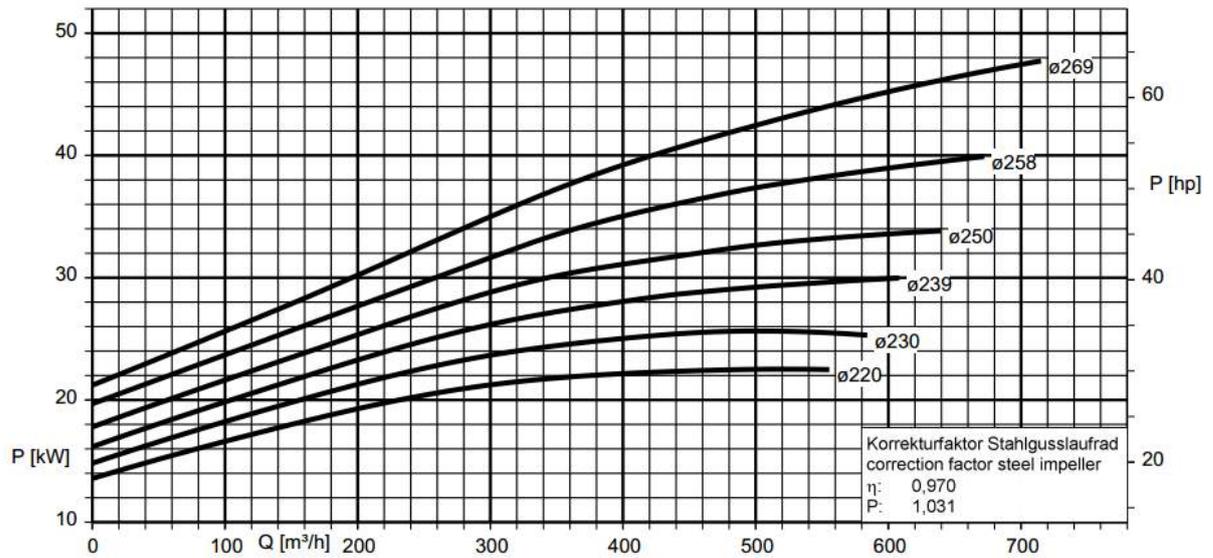
Figura 18 - Curvas Características da bomba do Sistema de abastecimento de água.



Fonte: Catálogo do Fabricante KSB, 2013.

A figura 19 presente no catálogo do fabricante mostra a curva de potência em função da vazão para diversos diâmetros de rotor.

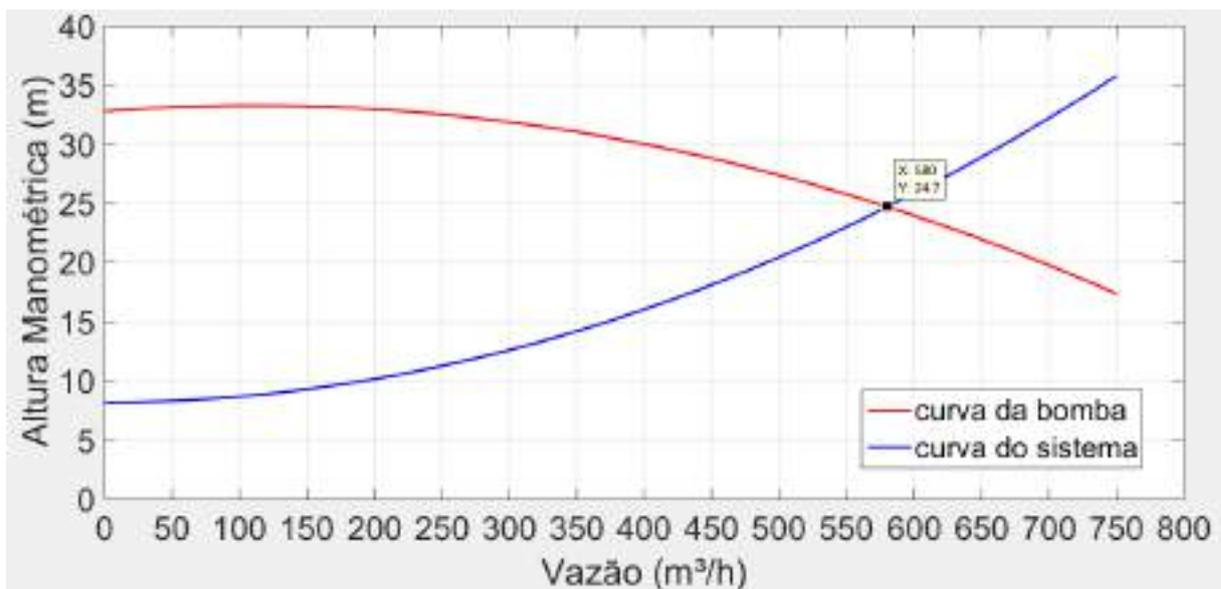
**Figura 19 - Curvas de potência da bomba do sistema de abastecimento de água.**



**Fonte: Catálogo do Fabricante KSB, 2013.**

A curva do sistema foi obtida juntamente ao Centro de Controle Operacional (CCO) e as curvas da bomba e do sistema foram reproduzidas na figura 20 a partir de pontos estratégicos do catálogo do fabricante e utilizando a função *polyfit* existente no Matlab®. A figura 20 mostra ainda a intersecção da curva do sistema com a curva da bomba, que é o ponto de operação, com uma vazão de 580 m<sup>3</sup>/h e altura manométrica de 24,7 metros.

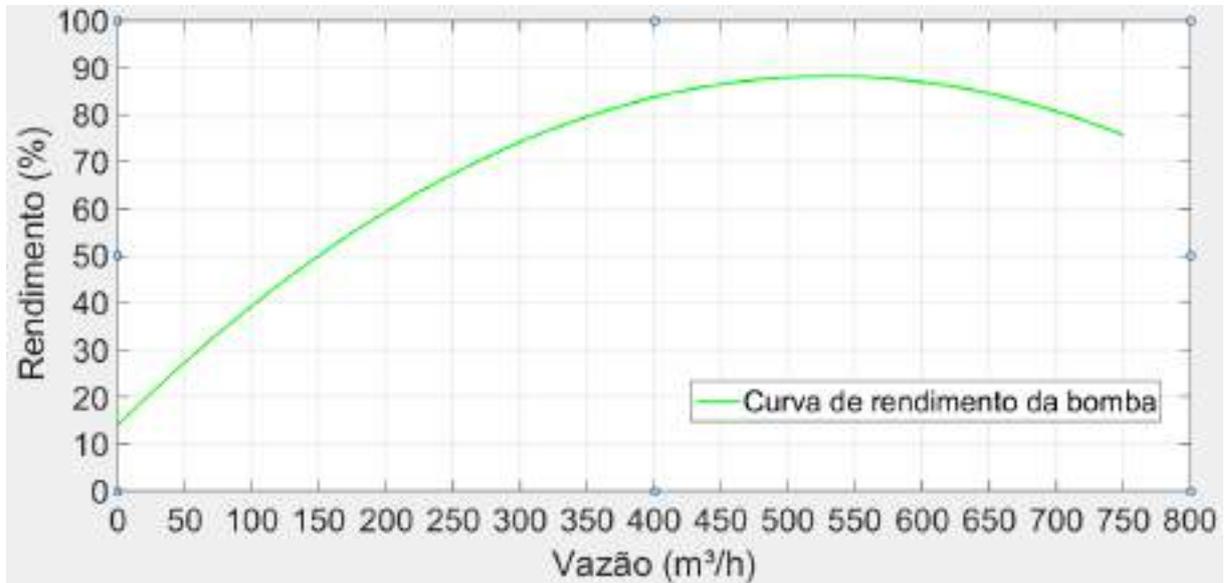
**Figura 20 - Curva característica da bomba e do sistema.**



**Fonte: Próprio autor.**

A figura 21 é a curva de rendimento da bomba para o rotor de 269 mm, obtida por regressão quadrática a partir dos pontos fornecidos pelo fabricante.

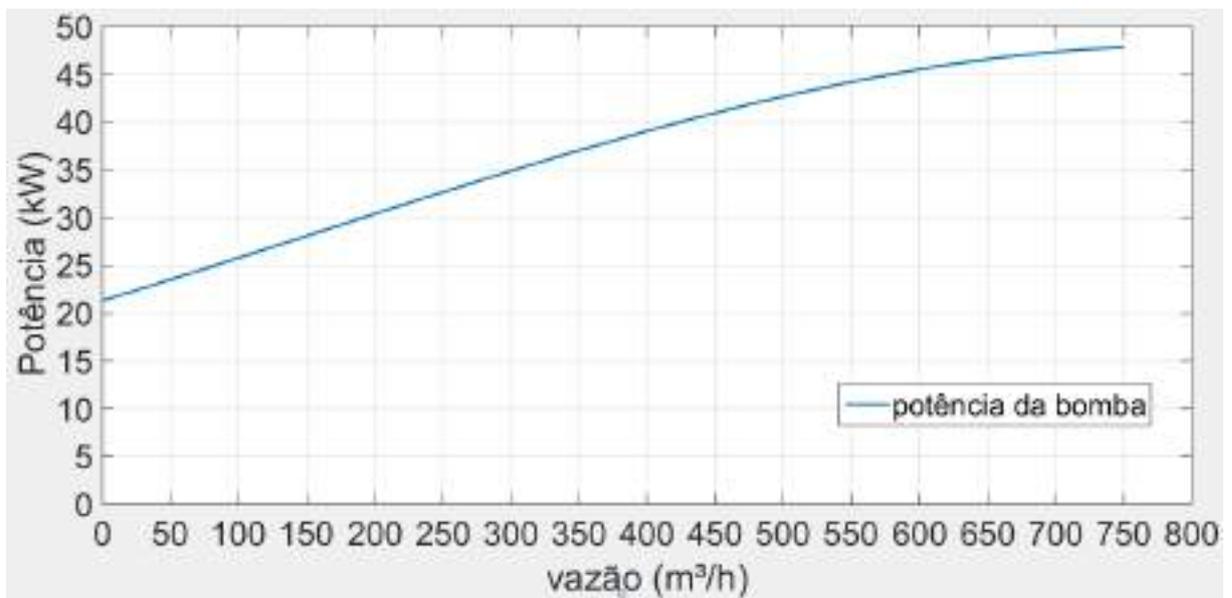
**Figura 21 - Curva de rendimento da bomba.**



Fonte: Próprio autor.

A figura 22 é a curva de potência da bomba para o rotor de 269 mm, obtida por regressão cúbica no Matlab a partir dos pontos fornecidos pelo fabricante.

**Figura 22 - Curva de potência da bomba.**



Fonte: Próprio autor.

### 3.2 Estimativa de tarifa mensal na operação convencional

A fim de estimar a quantia paga mensalmente pela operação com abertura e fechamento de válvula, solicitou-se ao CCO os valores médios de vazão horária para esta unidade, presentes na tabela 7. Inserindo estes dados na curva de potência da bomba através da função *polyval* são obtidos os valores de potência mecânica no eixo. Dividindo esta potência pelo rendimento do motor (94,4%) é possível obter os valores de demanda, que estão na tabela 8. Por fim, pode-se calcular o consumo, que é dado pela média aritmética entre as demandas horárias, cujos valores estão na tabela 9.

**Tabela 7 - Vazões médias horárias.**

Vazões médias (m <sup>3</sup> /h)			
<b>01:00</b>	476	<b>13:00</b>	508
<b>02:00</b>	478	<b>14:00</b>	498
<b>03:00</b>	479	<b>15:00</b>	499
<b>04:00</b>	482	<b>16:00</b>	504
<b>05:00</b>	488	<b>17:00</b>	512
<b>06:00</b>	496	<b>18:00</b>	519
<b>07:00</b>	504	<b>19:00</b>	522
<b>08:00</b>	501	<b>20:00</b>	515
<b>09:00</b>	496	<b>21:00</b>	508
<b>10:00</b>	494	<b>22:00</b>	502
<b>11:00</b>	506	<b>23:00</b>	495
<b>12:00</b>	509	<b>00:00</b>	483

Fonte: próprio autor.

**Tabela 8 - Demanda média diária.**

Demanda (kW)			
<b>01:00</b>	44,341	<b>13:00</b>	45,468
<b>02:00</b>	44,414	<b>14:00</b>	45,125
<b>03:00</b>	44,45	<b>15:00</b>	45,159
<b>04:00</b>	44,558	<b>16:00</b>	45,332
<b>05:00</b>	44,773	<b>17:00</b>	45,603
<b>06:00</b>	45,055	<b>18:00</b>	45,836
<b>07:00</b>	45,332	<b>19:00</b>	45,935
<b>08:00</b>	45,229	<b>20:00</b>	45,704
<b>09:00</b>	45,055	<b>21:00</b>	45,468
<b>10:00</b>	44,985	<b>22:00</b>	45,263
<b>11:00</b>	45,4	<b>23:00</b>	45,020
<b>12:00</b>	45,502	<b>00:00</b>	44,594

Fonte: próprio autor.

Tabela 9 – Consumo médio diário.

Consumo (kWh)			
01:00↔02:00	44,377	13:00↔14:00	45,296
02:00↔03:00	44,432	14:00↔15:00	45,142
03:00↔04:00	44,504	15:00↔16:00	45,246
04:00↔05:00	44,666	16:00↔17:00	45,467
05:00↔06:00	44,914	17:00↔18:00	45,72
06:00↔07:00	45,193	18:00↔19:00	45,885
07:00↔08:00	45,28	19:00↔20:00	45,819
08:00↔09:00	45,142	20:00↔21:00	45,586
09:00↔10:00	45,02	21:00↔22:00	45,366
10:00↔11:00	45,193	22:00↔23:00	45,141
11:00↔12:00	45,451	23:00↔24:00	44,807
12:00↔13:00	45,485	24:00↔01:00	44,468

Fonte: próprio autor.

O valor de rendimento 94,4% foi adotado pois, observando o catálogo do fabricante, o rendimento do motor sofre pouca variação para uma grande variação na carga. Para um estudo conservador, adotou-se este rendimento que corresponde a 100% da potência nominal. Considerando os horários ponta e fora ponta mencionados na seção 2.6, computando-se os consumos ponta e fora ponta e a demanda contratada de 45 kW ponta e fora ponta com as tarifas da tabela 4, estima-se uma fatura mensal de **nove mil, oitocentos e oitenta e sete reais e vinte centavos (R\$ 9.887,20)**.

### 3.3 Estimativa de tarifa mensal na operação com o inversor de frequência

Nesta forma de operação, conforme visto na seção 2.5.6, a curva do sistema se mantém e, através da mudança de rotação e conseqüentemente da curva característica da bomba, é alcançado um ponto de operação com menor altura manométrica em relação ao sistema de operação convencional (válvulas). Esta seção estimará a economia mensal proveniente do uso do inversor. A partir da curva do sistema e sabendo que a rotação nominal é de 1750 RPM, a função *polyfit* retornou as alturas manométricas requeridas pela curva do sistema e utilizando a equação (9) é possível determinar as novas rotações reduzidas, que estão presentes na tabela 10.

**Tabela 10 - Rotações reduzidas**

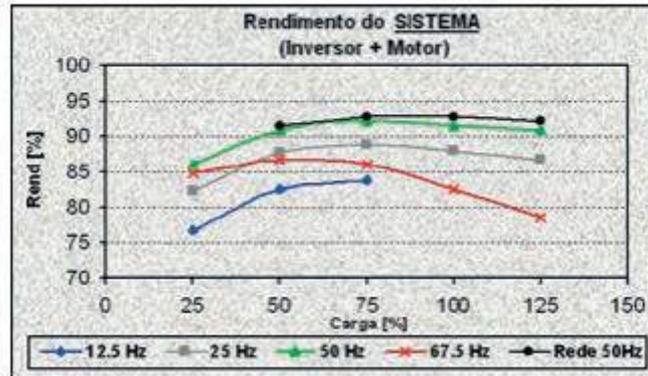
<b>Rotações médias (RPM)</b>			
<b>01:00</b>	1451	<b>13:00</b>	1508
<b>02:00</b>	1454	<b>14:00</b>	1490
<b>03:00</b>	1456	<b>15:00</b>	1491
<b>04:00</b>	1461	<b>16:00</b>	1500
<b>05:00</b>	1472	<b>17:00</b>	1515
<b>06:00</b>	1486	<b>18:00</b>	1528
<b>07:00</b>	1500	<b>19:00</b>	1533
<b>08:00</b>	1495	<b>20:00</b>	1520
<b>09:00</b>	1486	<b>21:00</b>	1508
<b>10:00</b>	1482	<b>22:00</b>	1497
<b>11:00</b>	1504	<b>23:00</b>	1484
<b>12:00</b>	1509	<b>00:00</b>	1463

**Fonte: próprio autor.**

O objetivo é manter a vazão horária constantes (tabela 7), portanto foi utilizada a função *polyval* para calcular: as alturas manométricas com a bomba em rotação nominal e em rotação reduzida bem como as potências e os rendimentos à rotação nominal. Os rendimentos da bomba às rotações reduzidas foram obtidos por meio da equação 11. De posse destes dados é possível calcular a nova potência mecânica que é solicitada pela bomba. Por fim, para calcular a potência elétrica solicitada da rede é necessário dividir a potência mecânica pelo rendimento do conjunto motor-inversor. Não há até o presente momento uma metodologia simples para o cálculo do rendimento do conjunto motor-inversor. Segundo a IEC 60034-17: “As características de desempenho das aplicações com motores de indução alimentados por conversores de frequência são influenciadas por todo o sistema, compreendendo a fonte de alimentação, o conversor, o motor, a carga mecânica e o equipamento de controle. Devido à complexidade das interações técnicas entre o sistema e as várias condições de operação, está fora do escopo da especificação técnica a quantificação de valores numéricos relacionados aos rendimentos com tais aplicações. Não existe método simples para calcular as perdas adicionais e não pode ser feita qualquer afirmação genérica sobre o seu valor”.

Contudo, conforme a figura 23, o manual técnico da fabricante WEG garante o rendimento de aproximadamente 88% para 75% da carga nominal com a rotação reduzida pela metade (25 Hertz) em um motor de 75 CV. Este caso é mais extremo do que o caso em estudo, onde a menor rotação é de 49,7 Hertz e toda a carga está acima de 75% da carga nominal. Como se trata de um estudo conservador, adotar-se-á o valor de 88% de rendimento para o conjunto motor-inversor a fim de não gerar resultados ilusórios para posterior análise.

**Figura 23 - Curvas de rendimento do conjunto motor - inversor**



Fonte: guia WEG de motores de indução alimentados por inversor de frequência.

A tabela 11 traz a demanda reduzida. A média aritmética entre as demandas horárias gera os valores de consumo reduzido que estão na tabela 12.

**Tabela 11 - Valores de demanda horária com uso do inversor.**

Demanda reduzida (kW)			
<b>01:00</b>	28,59	<b>13:00</b>	32,937
<b>02:00</b>	28,848	<b>14:00</b>	31,526
<b>03:00</b>	28,977	<b>15:00</b>	31,665
<b>04:00</b>	29,368	<b>16:00</b>	32,367
<b>05:00</b>	30,163	<b>17:00</b>	33,515
<b>06:00</b>	31,249	<b>18:00</b>	34,545
<b>07:00</b>	32,367	<b>19:00</b>	34,995
<b>08:00</b>	31,944	<b>20:00</b>	33,954
<b>09:00</b>	31,249	<b>21:00</b>	32,937
<b>10:00</b>	30,975	<b>22:00</b>	32,084
<b>11:00</b>	32,651	<b>23:00</b>	31,112
<b>12:00</b>	33,081	<b>00:00</b>	29,5

Fonte: próprio autor

Tabela 12 - Valores de consumo horário com uso do inversor.

Consumo reduzido (kWh)			
01:00:↔02:00	28,719	13:00↔14:00	32,231
02:00:↔03:00	28,913	14:00↔15:00	31,595
03:00:↔04:00	29,173	15:00↔16:00	32,016
04:00:↔05:00	29,766	16:00↔17:00	32,941
05:00:↔06:00	30,706	17:00↔18:00	34,030
06:00:↔07:00	31,808	18:00↔19:00	34,770
07:00:↔08:00	32,155	19:00↔20:00	34,474
08:00:↔09:00	31,597	20:00↔21:00	33,445
09:00:↔10:00	31,112	21:00↔22:00	32,510
10:00:↔11:00	31,813	22:00↔23:00	31,598
11:00:↔12:00	32,866	23:00↔24:00	30,306
12:00:↔13:00	33,009	24:00↔01:00	29,045

Fonte: próprio autor.

Adotando agora uma demanda de 35 kW, tem-se um gasto mensal em torno de **sete mil, cento e sessenta e um reais e onze centavos (R\$ 7.161,11)**. Tem-se então uma economia mensal de **dois mil, setecentos e vinte e seis reais e oito centavos (R\$ 2.726,08)**. O código escrito para plotar o gráfico das curvas bem como calcular os valores de demanda e consumo nos modos convencional e reduzido está no Apêndice A.

## 4 Resultados e Discussões

De posse da economia calculada na seção 3.3 é possível averiguar o custo-benefício da implementação do inversor. O valor médio deste equipamento foi orçado em vinte e oito mil reais (R\$ 28.000) e a estrutura e cabeamento orçados juntamente aos eletrotécnicos em mil e quinhentos reais (R\$ 1.500). Uma vez que a economia mensal é de dois mil, setecentos e vinte e seis reais e oito centavos (R\$ 2.726,08) o investimento será pago em aproximadamente 11 meses e a partir de então a empresa terá lucro.

Caso seja decidido pela instalação do mesmo, algumas observações são importantes. Primeiramente, deve-se buscar um fornecedor que possua uma boa assistência técnica, dada a complexidade dos circuitos, nem todos os defeitos poderão ser resolvidos pela equipe de eletrotécnicos da CAGEPA. Quanto à instalação, deve-se verificar o índice IP, que é um padrão definido pela norma internacional IEC 60529 que classifica o grau de proteção fornecido por um compartimento de equipamento elétrico contra objetos sólidos (como poeira) e líquidos (água, óleo, etc.). Por ser um ambiente úmido, é preciso que o equipamento suporte tais condições. Outro quesito a ser verificado após a instalação é a presença de harmônicos, cuja importância foi destacada na seção 2.2. Sabe-se que a medição não pode ser feita por instrumentos convencionais, uma vez que a forma de onda tende a ser distorcida. A empresa dispõe do analisador de energia MAR722 da Megabras (figura 24), cuja capacidade de medição atinge a 50ª harmônica. Durante o período de estágio, o autor deste trabalho elaborou um *Workshop* a fim de instruir os eletrotécnicos quanto ao bom uso do equipamento. Deve-se ainda verificar também o rendimento do conjunto-inversor, visto que, conforme a seção 3.3, não há método simplificado para a determinação do mesmo.

**Figura 24 - Analisador MAR 722 sendo utilizado para medir consumo e potência durante 24 horas**



**Fonte: próprio autor.**

Como propostas para trabalhos futuros, tem-se o mapeamento de unidades superdimensionadas da CAGEPA cuja instalação de um inversor traria grande economia de energia. Pode-se ainda generalizar o código em Matlab ou elaborá-lo em outra linguagem de programação de forma que fique generalizado, recebendo dados de entrada de curva da bomba, do sistema, dados do motor, rendimentos e demanda de vazão, retornando ao usuário uma estimativa de economia obtida com a instalação do inversor. Observa-se ainda que o uso de um maior banco de dados em vez de valores médios certamente trará um resultado mais preciso. Como última proposta de trabalho está a validação dos cálculos com o programa simulacional de redes de abastecimento Epanet.

## **5 Conclusão**

Pelo que foi exposto, conclui-se que a instalação do inversor de frequência é um investimento viável técnica e economicamente. A parte técnica se justifica pelo aumento da vida útil do motor, que passará a partir, parar e ter variações de forma suave. Mesmo que o inversor falhe o sistema pode continuar a operar de forma convencional. A diminuição da perda de carga também diminui a pressão e as vibrações nos encanamentos, aumentando também a sua vida útil. Ainda há também um ganho operacional, visto que por vezes ocorrem erros por parte dos operadores (principalmente nos turnos noturnos) e os reservatórios transbordam devido a vazão elevada. Pela parte econômica também demonstra ser um investimento viável, uma vez que em menos de um ano a empresa já estará obtendo lucro com a economia de consumo. A empresa já possui um analisador de qualidade de energia, o qual servirá para mensurar a real economia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, ASHFAQ. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Pearson, 2000. 440 p.

ALÉ, J.A.V. **Sistemas de bombeamento**. PUCRS, 2011. Disponível em: <[https://issuu.com/jorgeantoniovillarale/docs/apostila\\_sistemas\\_de\\_bombeamento\\_\\_2/192](https://issuu.com/jorgeantoniovillarale/docs/apostila_sistemas_de_bombeamento__2/192)> Acesso em 28 de Março de 2018.

ALLEN, BRADLEY. **Economia de Energia com Inversores de Frequência**. Rockwell Automation, catálogo do Fabricante, Outubro de 1995.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, revisão de 2018.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 456 de 29/11/2.000**. Brasília – DF, 2000.

CAGEPA. **Apresentação**. Disponível em: <<http://www.cagepa.pb.gov.br/institucional/apresentacao/>>. Acesso em 05 de Março de 2018.

CAPELLI, A. **Inversores de Frequência**. Revista Mecatrônica Atual nº 2, p. 7-15, Fevereiro de 2002.

CHAPMAN, S.J. **Máquinas Elétricas**. 3 ed., McGraw-Hill, Inc., Colômbia, 2000.

COMOLET, R.; BONNIN, J. **Mecanique Experimentale des Fluides**. Ed. Masson – Vol. 3, Paris, 1961.

CRESPO, P. G. **Elevatórias nos Sistemas de Esgotos** – Editora UFMG, Belo horizonte – MG, 2001.

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

ENERGISA. **Tipo de tarifas**. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/grandes-empresas/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>> Acesso em 13 de Abril de 2018.

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

KSB. **Folheto de Curvas Características Meganorm**. Catálogo do fabricante de 2013. Disponível em: <<http://www.ksb.com.br>>. Acesso em 29 de Março de 2018.

LATHI, B.P. **Sinais e sistemas lineares**. Segunda edição, Editora Bookman, 2007.

MORENO, HILTON. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas efeito e soluções**. 1ª edição, São Paulo, novembro de 2001.

PEREIRA JR., L. M. **Uso Eficiente de Energia Aplicado a Sistemas de Ar Comprimido**. Anais do IVº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, Outubro de 2001.

RODRIGUES, WLAMIR. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

TSUTIYA, M. T. **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**. ABES, 1ª Edição, São Paulo – SP, 2001.

WEG. **Guia de especificação de motores elétricos**. Catálogo do Fabricante, Novembro de 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 04 de Abril de 2018.

WEG. **Guia técnico de motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**. Catálogo do fabricante, janeiro de 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>> Acesso em 07 de Maio de 2018.

WILK, M. **Emprego de Variador de Velocidade na Economia de Energia em uma Bomba Centrífuga Radial**. Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, 2000.

## APÊNDICE A

Aqui se encontra o código escrito no Matlab para poder calcular as curvas da bomba, do sistema, os rendimentos e por fim as potências pelo modo convencional e com uso do inversor de frequência.

```
% Fernando Colafranceschi da Silva - UFPB
%cálculo de potências nos modos de operação convencional e com rotação
reduzda
```

```
Q1 = [200 290 400 485 540 600]
h1 = [33 32 30 28 26 24]
Q2 = [205 265 355 440 525 625]
rendimento = [60 70 80 86 88 86]
curva_bomba = polyfit(Q1, h1, 2)
Q2 = [205 265 355 440 525 625]
curva_rendimento = polyfit (Q2, rendimento, 2)
Q3 = [0 580]
h2 = [8.2 24.7]
curva_sistema = polyfit (Q3, h2, 2)
x = 0:1:750
H1 = polyval(curva_bomba, x)
H2 = polyval(curva_sistema, x)
plot (x, H1, 'r', x, H2, 'b')
rend = polyval(curva_rendimento, x)
plot (x, rend, 'g')
Q4 = [0 20 100 200 280 320 420 480 550 630 700]
p = [21.5 22 25.8 30.1 34 36 40 42 44 46 47.5]
curva_pot = polyfit (Q4, p, 3)
pot = polyval (curva_pot, x)
plot (x, pot)
qmed = [476
478
479
482
488
496
504
501
496
494
506
509
508
498
499
504
512
519
522
515
508
502
495
483]
```

```
demanda_media = polyval(curva_pot, qmed)
```

```
%cálculo de alturas manométricas sem o inversor (usando a curva da bomba):
```

```
H_med = polyval(curva_bomba, qmed)
```

```

% cálculo de alturas manométricas com o inversor (usando a curva do
sistema):
h_med = polyval(curva_sistema, qmed)

% a nova rotação é dada pela lei de semelhança:
rotacao_med = 1750*sqrt(h_med/H_med)

% rendimento à rotação nominal:
rendimento_nominal = polyval(curva_rendimento, qmed)

% rendimentos corrigidos:
for i = 1:24
    rendimento_corrigido(i) =
    (rendimento_nominal(i)/100)/((rendimento_nominal(i)/100)+(1-
    (rendimento_nominal(i)/100))*(1750/rotacao_med(i,1))^0.17)
end
% novas potências mecânicas da bomba para rotações reduzidas:
demanda_med = [44.34081892
44.4136581
44.4499622
44.55840963
44.77319132
45.05510856
45.33181898
45.22867047
45.05510856
44.98511263
45.40016876
45.50206483
45.4681836
45.12477906
45.15949168
45.33181898
45.60320088
45.8361933
45.93474959
45.70357049
45.4681836
45.26313617
45.02015115
44.59440304]
for i = 1:24
    potencia_reduzida (i) =
    100*demanda_med(i)*(rotacao_med(i)/1750)^3*(rendimento_corrigido(i)/rendime
nto_nominal(i))
end
potencia_reduzida = transpose (potencia_reduzida)

```