

Felipe Bernardo Coelho

**ESTUDO DE OPERAÇÃO DO CONTROLE POR VARIAÇÃO  
DE VELOCIDADE EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS  
EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA TIPO “*BOOSTER*”  
OPERANDO ATRAVÉS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Jean Viane Leite,  
Dr.

Florianópolis  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária  
da UFSC.

Coelho, Felipe Bernardo

Estudo de operação do controle por variação de velocidade em motores de indução trifásicos em estações elevatórias de água tipo "booster" operando através de inversores de frequência / Felipe Bernardo Coelho ; orientador, Jean Vianeí Leite, 2020.

102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

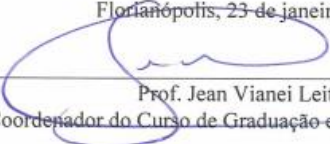
1. Engenharia Elétrica. 2. Inversor de frequência. 3. Booster. 4. Água. 5. Consumo. I. Leite, Jean Vianeí. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Felipe Bernardo Coelho

**ESTUDO DE OPERAÇÃO DO CONTROLE POR VARIAÇÃO DE VELOCIDADE EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA TIPO "BOOSTER" OPERANDO ATRAVÉS DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

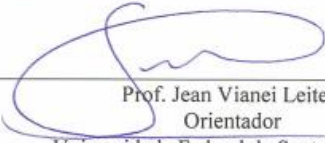
Florianópolis, 23 de janeiro de 2020.



---

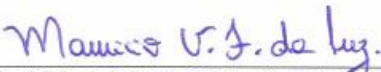
Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**




---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Mauricio Valência Ferreira da Luz, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Eng. Elet. Cristhian Marcelo Becker Cares, Me.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade e capacidade de desempenhar meus estudos sempre com saúde e disposição.

Aos meus pais, que me instruíram desde a infância a buscar novos horizontes e oportunidades através dos estudos, proporcionando sempre o suporte e condições necessárias para tal.

À minha esposa Thaisy, que, desde o início da graduação, foi minha parceira e confidente, trazendo conselhos e todo o apoio necessário para seguir em frente mesmo nas horas mais difíceis.

Aos meus avós, que foram peças chaves na minha trajetória estudantil, cedendo sempre suas casas para pousar e transmitindo todo carinho no dia-a-dia intenso da graduação.

Ao grupo de amigos “Atlético Thevénin”, que estiveram presentes em cada etapa dessa jornada, com estudos em grupos essenciais que proporcionaram o fim dessa caminhada.

Aos meus sogros, cunhado e irmão Natan, que sempre me deram suporte e entenderam minha ausência em muitas ocasiões nos últimos anos.

À empresa CASAN, que participou cedendo espaço para minhas pesquisas, medidas e estudos durante boa parte da graduação.

E por fim à UFSC, com sua educação gratuita e de qualidade fazendo jus à contribuição de todos os brasileiros que a financiam.



## RESUMO

Em vista do crescimento populacional acelerado na cidade de Florianópolis, cada vez mais se tornam necessárias técnicas de modernização para o abastecimento de água. Diante disso, a utilização dos inversores de frequência em sistemas de distribuição de água vem se popularizando nos últimos anos. Em uma de suas aplicações estão inseridos os *boosters*, estações de recalque de água que pressurizam a rede em locais com baixa pressão devido à altura ou perdas de carga. Dotados de um controle para regular a pressão recalcada do bombeamento, trazem uma série de benefícios para o sistema. Este trabalho propõe um estudo detalhado da operação dos *boosters*, abordando aspectos construtivos, consumo, dados de operação real e padrão de comportamento diário através de medidas em campo e obtenção de dados por meio de sistema supervisorio. Constatou-se através da realização do trabalho proposto uma série de vantagens em relação ao abastecimento de água proporcionados pela utilização do método, trazendo evidências que comprovam a eficiência energética que é oferecida pelo seu uso.

**Palavras-chave:** Inversor de frequência. *Booster*. Água. Consumo.





## ABSTRACT

Given the fast growth of the population in the city of Florianópolis, it is becoming necessary to modernize and improve the water supply system. That said, in recent years the use of frequency inverters is getting more popular in those systems. One of its applications, the boosters, are used in water stations to pressurize the water in low-pressure areas due to height difference or load loss. They consist of a controller to regulate the pressure of the pumped water and bring a series of benefits to the system. This work presents a detailed study of the booster's operation in water supply systems along with its constructive aspects, consumption, real operational datas and daily behavior pattern obtained through local measurements and real-time supervisory system. It was found through the elaboration of the proposed work a series of advantages in relation to water supply, showing evidences that corroborates with the energy efficiency provided by its use.

**Keywords:** Frequency inverters. Booster. Water. Consumption.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rio Vargem do Braço .....	21
Figura 2: Diagrama motor de indução trifásico “gaiola de esquilo” em corte.....	27
Figura 3: Curva conjugado x velocidade MIT.....	29
Figura 4: Curva típica de rendimento de um motor de indução .	30
Figura 5: Curva típica de fator de potência de um motor de indução.....	31
Figura 6: Relação entre o grau de desequilíbrio de tensão e o grau de desequilíbrio de corrente (valores típicos).....	32
Figura 7: Relação entre a perda de vida útil e o grau de desequilíbrio de tensão (valores típicos) .....	32
Figura 8: Módulos de operação interna de um inversor de frequência.....	33
Figura 9: Ponte retificadora .....	34
Figura 10: Acoplamento do retificador, filtro e inversor.....	35
Figura 11: Região de enfraquecimento de campo .....	35
Figura 12: Blocos de operação inversor de frequência.....	36
Figura 13: Curva típica de um sistema de recalque.....	38
Figura 14: Curva HxQ típica de uma bomba.....	39
Figura 15: Curva $\eta$ xQ bomba da linha KSB WKL .....	40
Figura 16: Ponto de operação com curvas do sistema e bombeamento .....	41
Figura 17: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por estrangulamento de válvula.....	42
Figura 18: Sistema de bombeamento localizado no município de São José, Santa Catarina.....	43
Figura 19: Operação bomba 1 do Sistema de recalque localizado no município de São José.....	44
Figura 20: Operação bomba 2 do Sistema de recalque localizado no município de São José.....	44
Figura 21: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por utilização de <i>by-pass</i> .....	45
Figura 22: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por variação de rotação.....	45
Figura 23: <i>Booster</i> Fortaleza da Barra.....	47
Figura 24: Barrilete de medição de pressão do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra.....	48
Figura 25: Vista exterior quadro Fortaleza da Barra .....	50
Figura 26: Ilustração <i>booster</i> Fortaleza da Barra.....	51

Figura 27: Ilustração <i>booster</i> Fortaleza da Barra inserido no mapa	51
Figura 28: Moto-Bomba <i>booster</i> Fortaleza da Barra	52
Figura 29: Características H x Q bomba <i>booster</i> Fortaleza da Barra	53
Figura 30: Ilustração <i>booster</i> Graciliano Gomes	54
Figura 31: Ilustração <i>booster</i> Graciliano Gomes inserido no mapa	54
Figura 32: Características H x Q bomba <i>booster</i> Graciliano Gomes	55
Figura 33: Ilustração <i>booster</i> Muquém	56
Figura 34: Ilustração <i>booster</i> Muquém inserido no mapa	57
Figura 35: Bomba <i>booster</i> Muquém	57
Figura 36: Modem ABS CEL IO	58
Figura 37: Vista frontal Modem ABS CEL IO	59
Figura 38: Terminal E/S inversor ABB	60
Figura 39: Curva de pressão de sucção do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	62
Figura 40: Curva de pressão de sucção do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra por 5 dias	62
Figura 41: Curva de pressão de recalque do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	63
Figura 42: Frequência de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	63
Figura 43: Velocidade de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	63
Figura 44: Corrente de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	64
Figura 45: Potência Ativa de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	65
Figura 46: Potência Aparente de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	66
Figura 47: Módulo da Potência Reativa de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	66
Figura 48: Fator de Potência de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	67
Figura 49: Tensões de linha e fase de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	67
Figura 50: Correntes de operação do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	68
Figura 51: Consumo do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	69
Figura 52: Faturas de energia do <i>Booster</i> Fortaleza da Barra	69

Figura 53: Consumo do <i>Booster</i> José Nitro.....	70
Figura 54: Faturas de energia do <i>Booster</i> José Nitro.....	70
Figura 55: Consumo da Estação de recalque de água Pedregal..	70
Figura 56: Faturas de energia Estação de recalque de água Pedregal.....	71
Figura 57: Curva do padrão de pressão de sucção do <i>Booster</i> Graciliano Gomes.....	71
Figura 58: Curva de pressão de sucção do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	72
Figura 59: Curva de pressão de recalque do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	72
Figura 60: Frequência de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	73
Figura 61: Velocidade de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	73
Figura 62: Corrente de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes	74
Figura 63: Potência de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes	74
Figura 64: Fator de Potência de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	75
Figura 65: Módulo Potência reativa de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes.....	75
Figura 66: Potência aparente de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	76
Figura 67: Média tensões de linha e fase de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes.....	76
Figura 68: Correntes de operação do <i>Booster</i> Graciliano Gomes .....	77
Figura 69: Curva de pressão de sucção do <i>Booster</i> Muquém.....	77
Figura 70: Curva de pressão de recalque do <i>Booster</i> Muquém ..	78
Figura 71: Curva de vazão do <i>Booster</i> Muquém .....	78
Figura 72: Frequência de operação do <i>Booster</i> Muquém.....	79
Figura 73: Velocidade de operação do <i>Booster</i> Muquém.....	79
Figura 74: Corrente de operação do <i>Booster</i> Muquém.....	80
Figura 75: Potência Ativa de operação do <i>Booster</i> Muquém .....	80
Figura 76: Potência reativa de operação do <i>Booster</i> Muquém ...	81
Figura 77: Potência aparente de operação do <i>Booster</i> Muquém.	81
Figura 78: Fator de Potência de operação do <i>Booster</i> Muquém.	82
Figura 79: Média tensões de linha e fase de operação do <i>Booster</i> Muquém .....	82
Figura 80: Correntes de operação do <i>Booster</i> Muquém .....	83
Figura 81: Consumo do <i>Booster</i> Muquém.....	83

Figura 82: Faturas de energia do <i>Booster</i> Muquém .....	84
Figura 83: Consumo do <i>Booster</i> Praia do forte .....	85
Figura 84: Faturas de energia do <i>Booster</i> Praia do forte .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características hidráulicas bomba instalada no <i>booster</i> Fortaleza da Barra .....	52
---	----





## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES**

- CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento  
CC – Corrente Contínua  
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina  
CLP – Controlador Lógico Programável  
CPU – Unidade Central de Processamento  
DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos  
ETA – Estação de Tratamento de Água  
IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Porta Isolada)  
IHM – Interface Homem-Máquina  
MIT – Motor de Indução Trifásico  
NH – Niederspannungs Hochleistungs (Baixa Tensão e Alta Capacidade de Interrupção)  
PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)  
UPS – (Uninterruptible Power Supply) (Fonte de Alimentação Ininterrupta)
- A – Amper  
bar – Bars  
cv – Cavalo-vapor  
kW – Kilowatt  
m<sup>3</sup>/h – Metro Cúbico por Hora  
mca – Metro de Coluna de Água  
PSI – Libra-força  
V – Volt



## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_s$  – Campo magnético

$f_{se}$  – Frequência do sistema aplicada ao estator

$n_{sinc}$  – Velocidade síncrona

$P$  – Potência

$s$  – Escorregamento

$\tau_{ind}$  – Conjugado induzido

$P_{conv}$  – Potência convertida

$P_{EF}$  – Potência disponível no entreferro

$\omega$  – Frequência angular

$H$  – Altura

$Q$  – Vazão

$H_{man}$  – Altura manométrica

$\eta$  – Rendimento

$\gamma$  – Peso específico do líquido a ser elevado



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E OBJETIVO PRINCIPAL .....	22
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO</b> .....	<b>27</b>
3.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO - ROTOR COM BOBINAS MAÇIÇAS .....	27
3.1.1	Conjugado em um motor de indução .....	28
3.1.2	Conjugado x Velocidade .....	29
3.1.3	Rendimento .....	30
3.1.4	Fator de Potência .....	30
3.1.5	Fator de Serviço .....	31
3.1.6	Desequilíbrio de Tensão .....	32
<b>4</b>	<b>INVERSORES DE FREQUÊNCIA</b> .....	<b>33</b>
4.1	FUNCIONAMENTO .....	33
4.2	BLOCOS DO INVERSOR .....	36
<b>5</b>	<b>SISTEMAS DE BOMBEAMENTO</b> .....	<b>37</b>
5.1	BOMBAS DE FLUXO RADIAL .....	38
5.2	CURVAS CARACTERISTICAS DAS BOMBAS .....	38
5.3	RENDIMENTO DA BOMBA .....	39
5.4	RENDIMENTO DO CONJUNTO MOTO-BOMBA .....	40
5.5	PONTO DE OPERAÇÃO .....	41
5.6	MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO .....	41
5.6.1	Estrangulamento por válvula .....	41
5.6.2	Liga/Desliga .....	42
5.6.3	<i>By-pass</i> .....	44
5.6.4	Controle por variação de velocidade do motor .....	45
<b>6</b>	<b>FUNCIONAMENTO DO CONTROLE POR VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DO MOTOR</b> .....	<b>47</b>
6.1	COMPOSIÇÃO DE UM BOOSTER .....	47
6.1.1	Quadro elétrico .....	48

6.2	<i>BOOSTER</i> FORTALEZA DA BARRA .....	51
6.3	BOOSTER GRACILIANO GOMES .....	54
6.4	BOOSTER MUQUÉM .....	56
6.5	TELEMETRIA .....	58
6.6	INSTALAÇÃO E PROGRAMAÇÃO PID .....	59
<b>6.6.1</b>	<b>Ligação dos cabos de controle.....</b>	<b>60</b>
<b>6.6.2</b>	<b>Programação dos parâmetros.....</b>	<b>61</b>
6.7	DADOS DE OPERAÇÃO.....	61
<b>6.7.1</b>	<b><i>Booster</i> Fortaleza da Barra .....</b>	<b>61</b>
<b>6.7.2</b>	<b><i>Booster</i> Graciliano Gomes.....</b>	<b>71</b>
<b>6.7.3</b>	<b><i>Booster</i> Muquém .....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>87</b>
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	88
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A – Dimensionamento de fusíveis e cabos, Inversores ACS355.....</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO B – Programação Base parametrizada nos <i>boosters</i> estudados.....</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em 1651 iniciou-se a povoação de Florianópolis, chamada, na época, de Nossa Senhora do Desterro. Foram necessários, nos anos iniciais ao povoamento, para atender as necessidades básicas dos habitantes, meios para obter água doce de forma facilitada. Inicialmente, o abastecimento de água se dava pelo atual Rio da Hercílio Luz, mas ainda de forma precária: apenas com recipientes e transportes com animais. A partir de 1837, iniciou-se a construção de fontes públicas, trazendo a proposta de aproximar os pontos de obtenção de água da população, operando assim por um tempo considerável. Somente em 1909 começaram as instalações das primeiras redes de água de Florianópolis. O principal sistema que abastece a cidade atualmente, que provem do Rio Vargem do Braço, figura 1, foi construído em 1945. Desde então, adutoras novas foram instaladas, estações de tratamento de água, uma série de reservatórios e sistemas de bombeamento. (RAMOS, 1986)

Figura 1: Rio Vargem do Braço



Fonte: CASAN (2019).

O relevo de Florianópolis é bastante acidentado, formado por cristas montanhosas e descontínuas. Faz-se necessária, portanto, a utilização de diversos sistemas de bombeamento pela cidade, a fim de alcançar os mais altos pontos de rede e ultrapassar morros que servem como caminhos de adutoras. Nos últimos anos, os sistemas elétricos e mecânicos de acionamento e controle destes bombeamentos têm

evoluído, ao ponto de ser possível realizar uma supervisão bastante precisa e eficiente. Como prova disso, tem-se a difusão de inversores de frequência, que, neste caso, são utilizados como meio de unificar as tecnologias de controle, supervisão, partida e até mesmo utilização de lógicas programáveis, trazendo proteção ao motor e equipamentos e, principalmente, economia de energia. Além disso, os *boosters*, como são chamados os sistemas de bombeamento, quando dotados dos inversores, permitem também uma economia indireta, com evidências que serão abordadas à frente. A principal característica que difere os *boosters* das estações de recalque de água são a possibilidade de bombearem água direto na rede de abastecimento dos consumidores em geral. Por isso, a necessidade ainda maior de um controle preciso.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO PRINCIPAL

Após a participação em diversas montagens, instalações e manutenções de *boosters* durante a execução de estágio na empresa CASAN, surgiu o interesse de examinar o tema de forma mais aprofundada e estudá-lo mais amplamente, buscando entender melhor cada detalhe do seu uso e o que ele pode proporcionar. É bastante evidente a importância dessas instalações no contexto do abastecimento de água, e, somada ao fato de serem baseadas em uma tecnologia eletromecânica amplamente estudada durante a graduação, impulsionaram o início dos estudos os quais serão apresentados nos capítulos à frente.

O objetivo principal do trabalho desenvolvido é demonstrar, através dos detalhes construtivos e de operação dos *boosters*, suas principais vantagens e desvantagens não só para a Companhia, mas também para a população que desfruta do uso de água.

O resultado a ser alcançado é único: abastecimento de água em pontos pré-determinados, trazendo maior eficiência enquanto utiliza a menor quantidade de energia possível, aliada à economia de custos em processos adjacentes.

A função utilizada nos inversores que melhor destaca a economia de energia está no controle PID, que traz consigo a leitura de grandezas e medidas subsequentes ao bombeamento e comanda a rotação do motor através de uma malha fechada. Há horários nos quais não é necessária a rotação nominal da bomba hidráulica, desperdiçando energia para manter uma rede de água cheia. Desta forma, o controle entra em ação, reduzindo a velocidade.



Há outros fatores que trazem também uma economia indireta proporcionada pelo controle variável. Há uma queda drástica de quebras de redes de água, no momento em que as pressões internas se mantêm constantes. Paralelo a isso, a quantidade de chamados emergenciais por parte da companhia de água reduz assim como o desperdício de água.



## 2 METODOLOGIA

Inicialmente as características dos motores de indução trifásicos e sua teoria serão abordadas sucintamente a fim de entender seu funcionamento. Pretende-se após isso explicar alguns detalhes do inversor de frequência no que se refere ao seu funcionamento interno, e a utilização do controle PID. Por fim detalhes técnicos da aplicação do conjunto moto-bomba com curvas de rendimento para diferentes propostas e motores, trazendo uma ideia de como é realizado o projeto de um *booster*.

Após o embasamento teórico, serão apresentados estudos referentes a três *boosters* localizados na cidade de Florianópolis, operados pela empresa CASAN, a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento, apresentando sua composição, tipo de bomba, motor, quadro elétrico, região de abastecimento, curva de operação e vazão. Em seguida, dados reais de operação serão expostos, a fim de identificar seus padrões de operação e possíveis anomalias. Dados de consumo de energia, fator de potência, corrente, tensão serão utilizados para discutir seu desempenho e comprovar suas vantagens.



### 3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

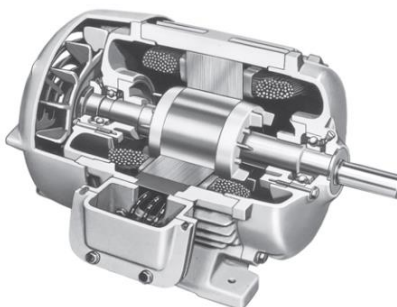
Os motores de indução trifásicos são máquinas elétricas que convertem energia elétrica em mecânica. Suas partes principais são compostas pelo estator e pelo rotor. Através de uma tensão alternada aplicada aos enrolamentos do estator, ter-se-á uma indução de tensão nos enrolamentos do rotor. Há dois tipos principais de motores deste tipo: rotor bobinado ou de anéis e rotor com bobinas maciças ou tipo gaiola de esquilo. (Pacheco, 2010)

Em geral, têm-se os enrolamentos da armadura ligados em delta ou estrela, dependendo das características e aplicações dos motores. Tratando-se da aplicação utilizada nesta análise, o foco será nos motores com rotor em bobinas maciças, onde há maior uso. Para entender de que forma se comportam durante seu funcionamento alguns detalhes construtivos e teóricos serão abordados.

#### 3.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO - ROTOR COM BOBINAS MAÇIÇAS

A particularidade desses motores encontra-se na construção do rotor. Barras condutoras são fundidas nas ranhuras da superfície do rotor além de ter suas extremidades curto-circuitadas. (CHAPMAN, 2013). Conforme Pacheco (2010), a fim de produzir um torque melhor e mais uniforme, as barras podem ser deslocadas com pequenas angulações, fator esse que contribui também para a diminuição de ruídos e vibração.

Figura 2: Diagrama motor de indução trifásico “gaiola de esquilo” em corte



Fonte: CHAPMAN (2013).

Tem-se que, ao aplicar uma tensão alternada trifásica nas bobinas do estator, ocorrerá a circulação de correntes trifásicas nestes enrolamentos, e, como consequência disso, a formação de uma indução magnética  $B_s$ . A equação 1 relaciona a rotação do campo magnético com o número de polos  $P$  e a frequência do sistema aplicada ao estator,  $f_{se}$ , em hertz.

$$n_{sinc} = 120 \frac{f_{se}}{P} \quad (1)$$

De acordo com a lei de Lenz, será induzida uma tensão nas barras do rotor, curto-circuitado, onde produzirá um campo que irá se opor ao campo girante do estator. A interação entre os campos, através de suas forças, fornecerá ao rotor o que é chamado de torque. Nunca a velocidade do rotor poderá ser a mesma do campo magnético do estator pois não haveria tensão induzida no rotor. Portanto, o conceito do escorregamento é algo bastante importante para entender o funcionamento dos motores de indução. É expresso geralmente em porcentagem, obtido com a expressão 2:

$$s = \frac{\text{velocidade}_{\text{campo girante}} - \text{velocidade}_{\text{rotor}}}{\text{velocidade}_{\text{campo girante}}} \quad (2)$$

Quando o rotor está parado tem-se  $s=1$ , quando em  $s=0$ , velocidade síncrona, torque nulo e sem indução de campo. É importante destacar também que no rotor gaiola de esquilo tem-se induzida a mesma quantidade de polos do estator. (CHAPMAN, 2013; PACHECO, 2010)

### 3.1.1 Conjugado em um motor de indução

Através da conversão interna de potência elétrica em mecânica, chega-se a um indicador chamado de conjugado: o torque. Ao passo que se tem a potência convertida, tem-se também o torque induzido, pois há ainda perdas referentes ao atrito e ventilação. O conjugado induzido, dado em Nm, é calculado através da equação 3:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (3)$$

Onde  $P_{conv}$  é a potência convertida, dada em watts e  $\omega_m$ , a velocidade do rotor, dada em rad/s.

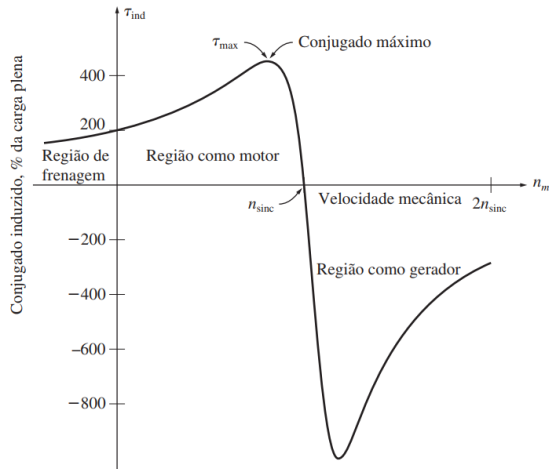
De acordo com Chapman (2013), o conjugado pode, ainda, ser expresso em termos da potência disponível no entreferro  $P_{EF}$ , dada em watts e a velocidade síncrona  $\omega_{sinc}$ , dada em rad/s a qual não varia:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{EF}}{\omega_{sinc}} \quad (4)$$

### 3.1.2 Conjugado x Velocidade

Quando um motor de indução trifásico está operando a vazio, o movimento relativo entre os campos do rotor e estator é muito baixo, fazendo com que o conjugado também tenha valor muito baixo, devido à baixa indução de tensão no rotor. Apresenta-se um cenário em que o torque aplicado ao rotor é suficiente apenas para superar as perdas rotacionais do motor. À medida que se aplica uma carga, a velocidade do rotor é diminuída, gerando um aumento de escorregamento, que, por sua vez, infere em uma tensão induzida maior no rotor e, conseqüentemente, em uma indução magnética também maior. E as interações entre as forças, que agora são maiores, induzem um torque elevado no eixo do rotor. Analisando a figura 3 a seguir, pode-se observar a curva para os cenários discutidos.

Figura 3: Curva conjugado x velocidade MIT



Fonte: CHAPMAN (2013).

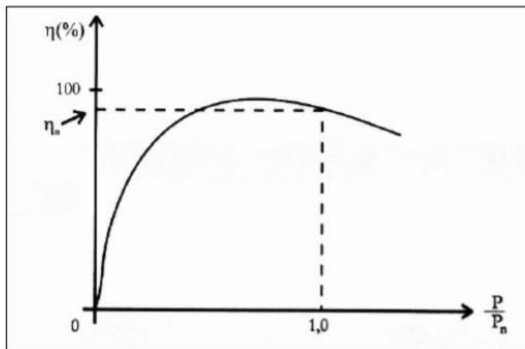
### 3.1.3 Rendimento

O rendimento do motor refere-se à medida de quanto da energia elétrica consumida foi efetivamente convertida em energia mecânica no eixo do rotor. A  $P_{saída}$  é a potência disponível no eixo, em watts, e  $P_{entrada}$  o que entra nas bobinas do estator, absorvido da rede, também em watts. O rendimento  $\eta_m$  é dado por:

$$\eta_m = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (5)$$

Um exemplo de curva de rendimento pode ser observado na figura 4. É possível notar que, quando o motor está com uma carga baixa em relação aos valores nominais de placa, o seu rendimento também é baixo. Isso ocorre devido às perdas naturais, fixas, e à potência despendida para isso, que acabam sendo maiores que a potência mecânica fornecida ao eixo. Com a elevação de carga, o rendimento tende a se aproximar dos valores nominais.

Figura 4: Curva típica de rendimento de um motor de indução



Fonte: PROCEL (2019)

### 3.1.4 Fator de Potência

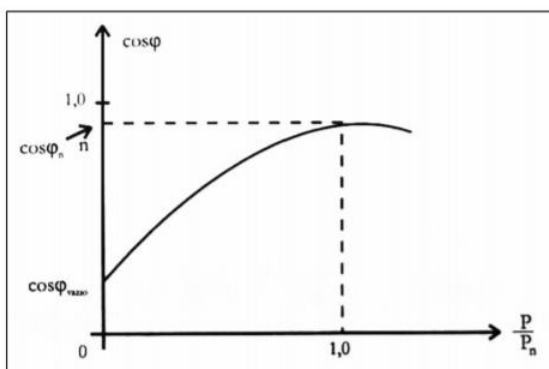
O fator de potência é algo necessário de se entender e estudar na área de motores e, conseqüentemente, na aplicação do método discutido no presente trabalho. Como o motor de indução consome potência reativa, necessária para a magnetização, sua potência aparente tende a se fracionar. O fator de potência pode ser calculado através da defasagem



da tensão e corrente, e da relação entre potência ativa e aparente. Busca-se sempre um alto fator de potência, a fim de diminuir a potência aparente absorvida da rede. De acordo com o catálogo de motores elétricos da WEG, 2019: “a energia reativa limita a capacidade de transporte de energia útil (ativa) nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição, em outras palavras quanto maior o fator de potência, maior a disponibilidade de potência ativa no sistema e maior é o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro” (pg 9).

Como os motores elétricos representam cerca de 68% do consumo nas indústrias, é necessária uma atenção especial no seu dimensionamento. Na figura 5 observa-se uma curva de fator de potência típica. Uma vez que se tem uma carga baixa, o fator de potência também é bastante baixo e atinge valores razoáveis com cerca de 75% da potência nominal do motor. (FREITAS, 2013; WEG, 2019)

Figura 5: Curva típica de fator de potência de um motor de indução



Fonte: PROCEL (2019)

### 3.1.5 Fator de Serviço

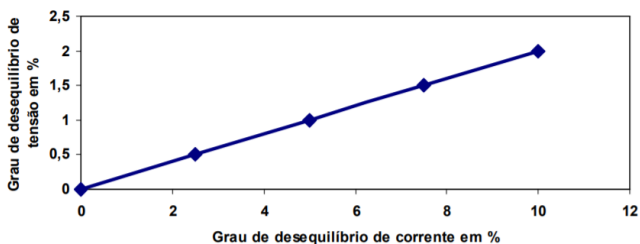
Explícito na placa de identificação do motor, o fator de serviço expressa o limite de carga aplicada ao motor quando aplicado à sua tensão e frequência nominal. Para obter os valores, deve-se multiplicar o fator pelos valores nominais. Fica evidente que, ao utilizar o motor no seu limite de fator de serviço, ocorre a queda da vida útil do mesmo. Os fabricantes sugerem seu uso somente para situações esporádicas, e não contínuas.

Quando não há especificação sobre tal unidade na placa do motor, sugere-se o uso de fator de serviço unitário.

### 3.1.6 Desequilíbrio de Tensão

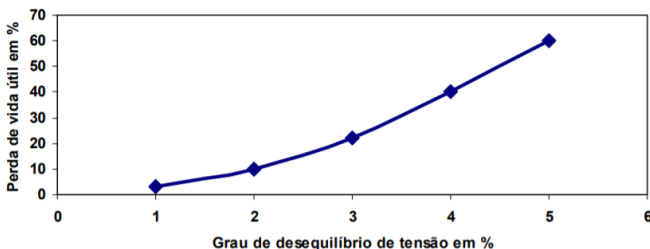
Devido à falta de planejamento das redes elétricas e má utilização da mesma, com erros bastante comuns, ocorre em larga escala o desequilíbrio de tensão em redes trifásicas. Fatores comuns que provocam essa assimetria são: impedâncias do sistema elétrico, cargas monofásicas desequilibradas entre as fases e também a tensão nos terminais dos geradores. Os motores de indução absorvem esse desequilíbrio de maneira bastante negativa, ocorrendo fenômenos de alguns tipos: redução da eficiência, redução do conjugado disponível, torque pulsante, redução da vida útil e aumento da temperatura. As figuras 6 e 7 trazem valores aproximados em comparação de desequilíbrios de tensão, corrente e perda de vida útil dos motores. (FREITAS, 2013; ROCHA, 2012)

Figura 6: Relação entre o grau de desequilíbrio de tensão e o grau de desequilíbrio de corrente (valores típicos)



Fonte: ROCHA (2012)

Figura 7: Relação entre a perda de vida útil e o grau de desequilíbrio de tensão (valores típicos)



Fonte: ROCHA (2012)

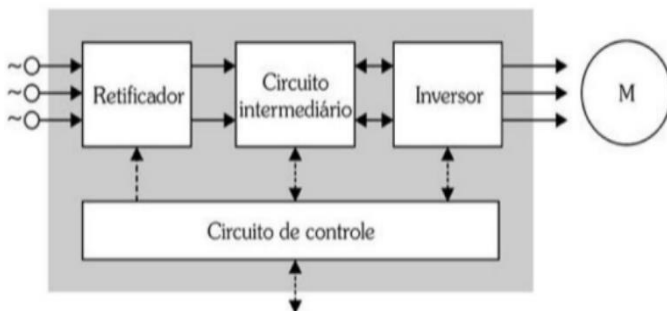
## 4 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

De forma resumida, o inversor de frequência é um dispositivo capaz de alterar a frequência absorvida da rede elétrica e aplicá-la ao motor. Dentre as inúmeras formas de utilização, podem-se destacar três principais que serão utilizadas para analisar as variáveis dos processos e identificar as vantagens e desvantagens. A primeira delas refere-se à partida, pois o acionamento suave do motor, com rampas específicas, traz benefícios não somente para o conjunto moto-bomba e o processo como um todo, mas também para a rede elétrica em geral. Outro quesito está na possibilidade de variar a rotação do motor constantemente, evitando variações bruscas nas tubulações de água e permitindo um total controle da pressão de recalque. E, por fim, o controle do conjunto e a forma como ele impacta o produto final. A utilização do PID, com inúmeras particularidades, traz a automação completa do *Booster*, além de uma série de economias que serão abordadas à frente.

### 4.1 FUNCIONAMENTO

O desenvolvimento dos inversores nos últimos anos foi possível, principalmente, devido ao avanço dos transistores, em especial o IGBT, pois são peças fundamentais no processo da conversão. Algumas etapas são necessárias até se obter a tensão alternada final, a retificação, filtragem e conversão final da frequência. Com o diagrama apresentado na figura 8, pode-se observar a divisão dos módulos.

Figura 8: Módulos de operação interna de um inversor de frequência

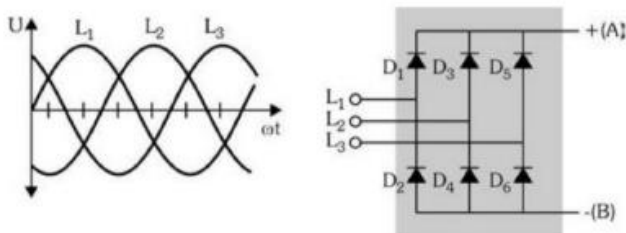


Fonte: FRANCHI (2009)

Inicialmente, o inversor colhe a tensão da rede trifásica e a transforma em tensão contínua através de um retificador de onda

completa. Para tal feito, são utilizados diodos que permitem a passagem da corrente em apenas uma direção. A ponte retificadora pode ser vista na figura 9.

Figura 9: Ponte retificadora



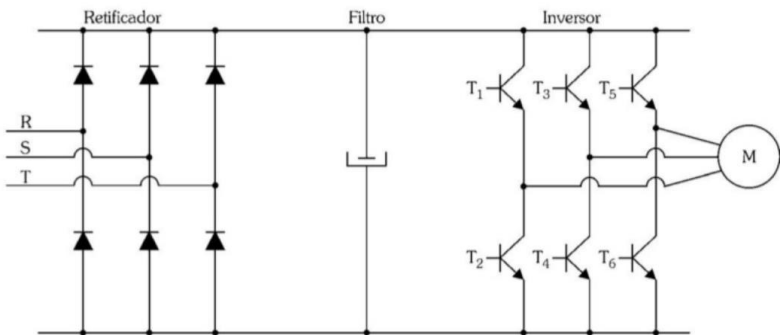
Fonte: FRANCHI (2009)

Como resultados dessa operação, tem-se uma onda com formato pulsante. É necessário, portanto, um filtro capacitivo, com a finalidade de trazer uma simetria para o formato da onda. Nesta partição encontra-se o link CC ou filtro, o circuito intermediário. Esse barramento estará alimentando o bloco inversor, constituído por IGBTs. A divisão pode ser observada na figura 10 por outra perspectiva. A função desses dispositivos é controlar a tensão contínua para obter-se uma tensão trifásica alternada e defasada de  $120^\circ$ . Fica clara a possibilidade de alterar a frequência e a tensão independentemente da rede elétrica. Isso se dá através do chaveamento com valores pré-determinados na programação do inversor, aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação do motor proporcionalmente a variação da frequência chaveada. O chaveamento dos inversores é realizado por uma técnica chamada PWM, onde se tem uma modulação por largura de pulso. Procura-se alcançar uma forma de onda senoidal sempre e, para isso, os pulsos são alargados ou estreitados, permitindo um aumento ou diminuição da corrente do motor. Quanto maior for a frequência aplicada no chaveamento maior será a aparência de uma onda senoidal, embora têm-se também maiores ruídos provenientes desse chaveamento. (FRANCHI, 2009)

Quando a frequência é aumentada o torque também é alterado. Para evitar alterações na velocidade do motor quando estiver em carga, faz-se o uso do controle escalar do inversor de frequência. Para manter o torque constante, a razão V/F também precisa ser constante. Um fato que deve ser observado é o limite de frequência aplicado ao motor. Os

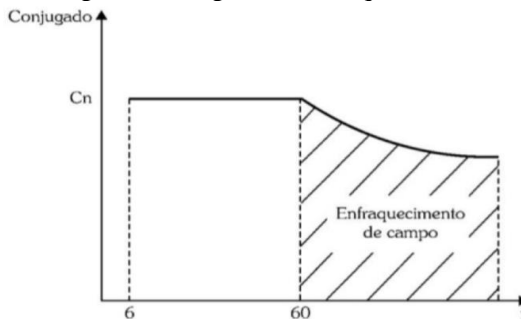
fabricantes em geral apresentam curvas em que, a partir do momento em que se ultrapassa a frequência nominal da máquina, o motor perde torque, fato que pode ser explicado pela queda da corrente de magnetização e, conseqüentemente, do fluxo magnético. Chama-se essa região de “enfraquecimento de campo”, conforme ilustrada na figura 11. Há também a utilização de controle vetorial em outras aplicações. Desta forma, mais complexa que a escalar, o torque é otimizado a todo o momento, buscando uma nova curva V/F através das correntes de magnetização e rotórica do motor. Não tem-se, portanto, um valor fixo, sendo utilizado para a execução deste controle um *encoder* ou tacômetro para responder a sensibilidade da velocidade aplicada, fechando uma malha. (FRANCHI, 2009)

Figura 10: Acoplamento do retificador, filtro e inversor



Fonte: FRANCHI (2009)

Figura 11: Região de enfraquecimento de campo

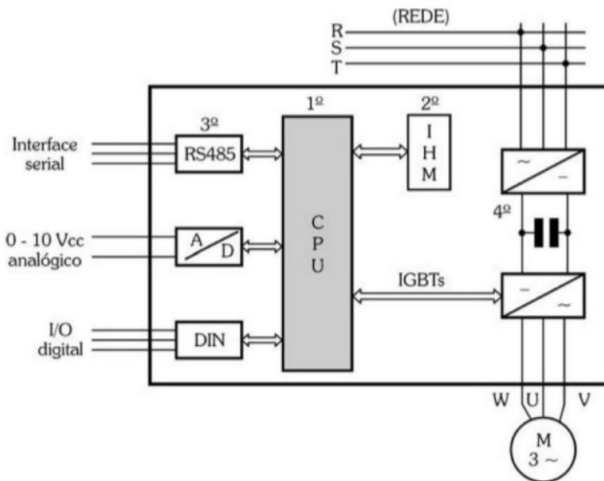


Fonte: FRANCHI (2009)

## 4.2 BLOCOS DO INVERSOR

Além da partição do inversor destinado à potência, tem-se outros três blocos que permitem a operação completa do sistema, figura 12. A CPU é onde se localiza a lógica de processamento e controle do dispositivo, podendo ser utilizados microprocessadores ou CLP's. Através dos comandos ordenados pela CPU é que operam os disparos dos transistores, obedecendo a lógica pré-estabelecida pelo usuário. Outro bloco refere-se à IHM, onde ocorre a visualização de parâmetros de leitura, bem como se executa a parametrização da lógica escolhida. Por fim, têm-se as interfaces que, atreladas ao meio externo, trazem dados e respostas que completam o controle, utilizando-se tanto entradas analógicas como digitais. (FRANCHI, 2009)

Figura 12: Blocos de operação inversor de frequência



Fonte: FRANCHI (2009)

## 5 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Para o estudo do controle PID como um todo, é necessário entender o macro funcionamento do sistema de bombeamento, suas características e o que é preciso levar em conta para o projeto de um novo sistema ou melhoria de um já existente.

A principal função do *booster* é o transporte de água para diferentes níveis de altura por meio de tubulações. Tem-se, portanto, uma tubulação de sucção e outra de recalque, com características de comprimento e diâmetro necessárias para atingir certa vazão e altura manométrica que satisfaçam o sistema. Outros acessórios também compõem o sistema, como curvas, joelhos, válvulas etc. A bomba tem como função vencer as resistências impostas de canos, acessórios e desníveis, fornecendo energia para a água. (DUTRA, 2005).

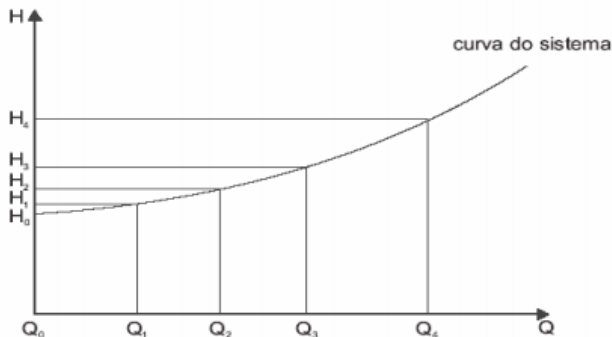
Inicialmente, é determinada a demanda de água para a região, pois, através dela, pode-se calcular a vazão  $Q$  necessária para suprir o abastecimento. Em uma segunda etapa, é preciso projetar o diâmetro dos encanamentos de sucção e recalque para suportar a vazão calculada anteriormente. Uma das partes mais importantes e que interfere em cada etapa do projeto é o cálculo da altura manométrica total ( $H_{man}$ ), que compreende, além do desnível geométrico, as perdas de carga por atrito em peças e tubulações. Concluindo o cálculo de dados iniciais, é necessário estar atento à probabilidade de cavitação, onde ocorre a ebulição da água e a formação de bolhas nas peças e tubulações, e prontamente projetar a melhora do sistema. (JUSTINO, 2013; NOGUEIRA, 2013).

Através de ensaios e curvas disponibilizadas por fabricantes, pode-se verificar uma série de informações e detalhes pertinentes à situação discutida aqui. A figura 13 representa uma curva típica de um sistema de bombeamento, onde tem-se que, ao aumentar a vazão fornecida maior será a altura manométrica total a ser vencida, ou seja, maiores perdas de carga. Encontrar a curva do sistema a ser instalado é o ponto de partida para o dimensionamento da bomba, motor e acessórios. (DUTRA, 2005).

É importante destacar que, nos cálculos de altura geométrica total, é sempre levada em conta a altura de sucção na soma total. Nos *boosters* que serão apresentados aqui, sempre há uma pressão de sucção quando há presença de água. Porém, o dimensionamento é realizado de forma que a expectativa de pressão de água seja mínima (pior cenário), para alcançar o destino de abastecimento final, justamente pelo fato de se ter uma pressão de sucção variável de acordo com o consumo.

Lembra-se que as curvas características das bombas apresentadas pelos fabricantes estimam uma pressão de sucção com altura mínima.

Figura 13: Curva típica de um sistema de recalque



Fonte: Manual fornecido por KSB

## 5.1 BOMBAS DE FLUXO RADIAL

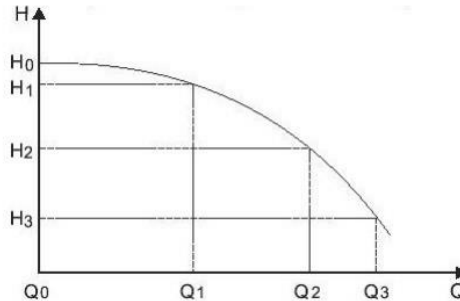
Dentre as bombas existentes no mercado, a que é utilizada em grande parte dos *boosters* caracteriza-se pelo rotor no sentido centrífugo radial, classificada, portanto, como uma bomba centrífuga com fluxo radial. Seu emprego é focado onde se exige alturas elevadas e vazão pequena. (GURGEL, 2006).

## 5.2 CURVAS CARACTERISTICAS DAS BOMBAS

As bombas em geral apresentam curvas de trabalho de forma semelhante, comparando a perda de carga com a vazão fornecida. Pode-se notar, através da figura 14, uma curva padrão,  $H \times Q$ , descrevendo seu funcionamento para diferentes valores de vazão. Nota-se como característica principal que, ao aumentar a vazão a ser fornecida, perde-se a capacidade de vencer as resistências impostas pela altura  $H$ . (DUTRA, 2005).



Figura 14: Curva HxQ típica de uma bomba



Fonte: Manual fornecido por KSB

### 5.3 RENDIMENTO DA BOMBA

A bomba é um dispositivo dependente de um motor elétrico, portanto, tem a função de extrair a energia mecânica do eixo do motor aplicado a ela e ceder, em forma de energia hidráulica, à água. No entanto, nesse processo há perdas, e é sempre importante estar atento às características de rendimento da bomba, ou seja, o quanto da energia do eixo foi efetivamente transformada na sua atividade fim. Segundo Dutra (2005), o rendimento da bomba  $\eta$ , é a relação entre a potência hidráulica  $P_h$ , dada em watts e a potência mecânica  $P$ , dada também em watts.

$$\eta = \frac{P_h}{P} \quad (6)$$

A potência hidráulica pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$P_h = \frac{\gamma QH}{270} \quad (7)$$

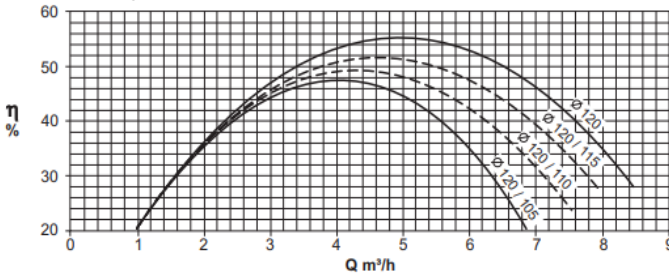
Onde  $\gamma$  é o peso específico da água,  $(1000 \cdot 9,81)\text{N/m}^3$ ,  $Q$  a vazão, dada em  $\text{m}^3/\text{s}$  e  $H$  a altura manométrica, dada em mca.

Já a potência consumida pela bomba, ou seja, a potência do motor utiliza-se:

$$P = \frac{\gamma QH}{270\eta} \quad (8)$$

Como exemplo tem-se na figura 15, extraída do manual de uma bomba centrífuga de alta pressão as características de rendimento para cada vazão, uma ferramenta que auxilia de forma muito precisa a obtenção do ponto ótimo, a fim de obter os melhores rendimentos da bomba e conseqüentemente do sistema. (DUTRA, 2005).

Figura 15: Curva  $\eta \times Q$  bomba da linha KSB WKL



Fonte: Manual fornecido por KSB

#### 5.4 RENDIMENTO DO CONJUNTO MOTO-BOMBA

Como já abordado em capítulos anteriores, o motor elétrico possui seu rendimento próprio  $\eta_m$ , assim como a bomba  $\eta_b$ , que pode ser calculado com a relação da transformação de energia elétrica em energia mecânica aplicada ao eixo. Fazendo o produto dos dois rendimentos, chega-se ao rendimento do conjunto moto bomba, facilitando o entendimento do funcionamento e da eficiência do sistema. (DUTRA, 2005).

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e} \quad (9)$$

$$\eta_b = \frac{P_h}{P_m} \quad (10)$$

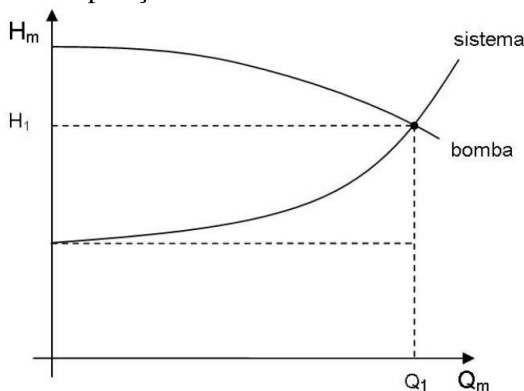
$$\eta_m \cdot \eta_b = \frac{P_h}{P_e} \quad (11)$$

Onde  $P_m$  é a potência do motor, dada em watts,  $P_h$  a potência hidráulica, dada em watts e  $P_e$  a potência de entrada de ambos, dada também em watts.

## 5.5 PONTO DE OPERAÇÃO

Ao concluir a obtenção dos dados do sistema e decidir o conjunto moto-bomba, é possível, através de uma sobreposição de curvas, encontrar o ponto de operação do sistema, figura 16, operando em determinada vazão  $Q$ , e vencendo determinada altura com perdas de carga  $H$ . (DUTRA, 2005).

Figura 16: Ponto de operação com curvas do sistema e bombeamento



Fonte: FERREIRA (2008).

## 5.6 MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO

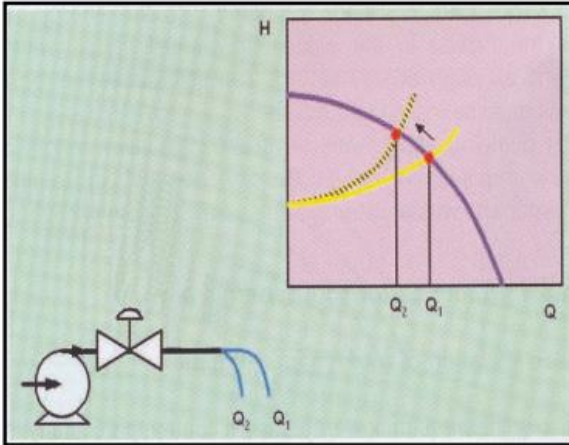
Alguns métodos são utilizados para controlar a vazão em bombeamentos de água, alguns deles mais antigos e pouco eficientes já outros modernos, que trazem benefícios para o sistema como um todo. Os métodos mais utilizados serão apresentados à frente.

### 5.6.1 Estrangulamento por válvula

Método utilizado principalmente por sua facilidade. Reduzindo o diâmetro da tubulação, tem-se uma diminuição na vazão do sistema, o que altera também a operação da bomba. Como falado anteriormente, diminuindo a vazão da bomba tem-se um aumento na altura manométrica. Segundo Tsutiya (2001 apud Gurgel, 2006, pag. 51), deve-se limitar a vazão mínima a valores que não ultrapassem o limite inferior de 25% – 30% da vazão do ponto de operação com rendimento ótimo em rotação máxima. Reduções excessivas da vazão provocam

recirculação de água na carcaça das bombas e provocam vibrações, cargas excessivas nos mancais e aquecimento no conjunto, diminuindo sua vida útil. (GURGEL, 2006). A figura 17 ilustra a alteração da curva do sistema em amarelo junto à alteração do ponto de operação.

Figura 17: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por estrangulamento de válvula



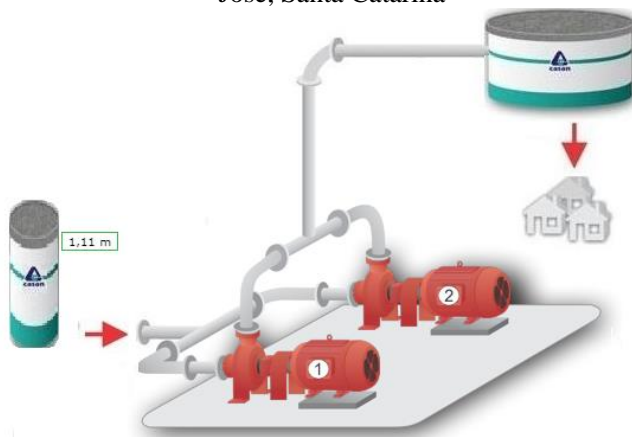
Fonte: EUROPUMP e HIDRAULIC INSTITUTE (2004); GURGEL, 2006; PG 51.

### 5.6.2 Liga/Desliga

O controle “liga-desliga” opera através da percepção de pressão alta no recalque do bombeamento. Quando ela excede um limite pré-estabelecido, a bomba é desligada. Isso pode ser feito através de transdutores de pressão junto a um controlador ou com pressostatos. O grande empecilho desse método é a quantidade de partidas excessivas da bomba além da necessidade da utilização de um método de partida suave adicional ao controle.

Em um dos sistemas de recalque de água da CASAN, figura 18, localizado em São José, o controle da vazão é realizado por dois métodos em conjunto, estrangulamento de válvula e liga e desliga.

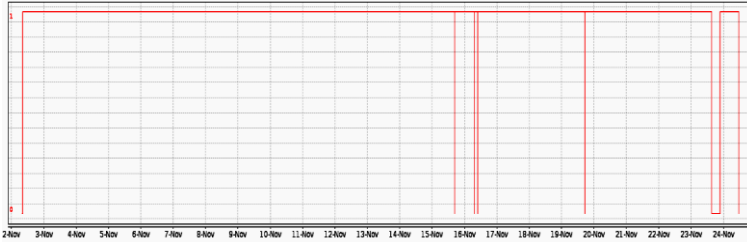
Figura 18: Sistema de bombeamento localizado no município de São José, Santa Catarina



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN

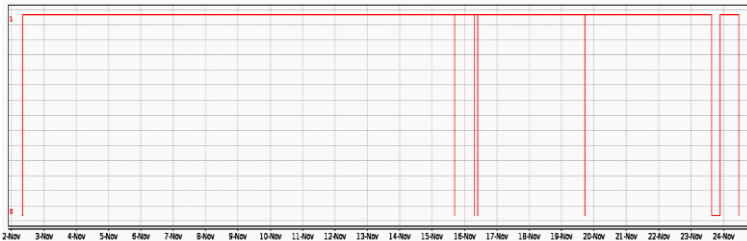
O sistema é composto por duas bombas, uma de 25 cv e outra de 30cv, que recalcam água de uma cisterna para um reservatório superior. O acionamento das bombas é realizado por *Softstarter* para evitar picos de corrente na partida e garantir também uma rampa que não prejudique as tubulações de recalque com o aumento repentino de pressão. Há também o controle liga e desliga através de um controlador de pressão de recalque, ou seja, um transdutor mede a pressão de recalque e, em momentos de pouco consumo do reservatório, sua pressão excede um limite fazendo com que as bombas desliguem, evitando quebra de rede e perdas de operação. Neste caso específico as válvulas de recalque operam estranguladas, diminuindo a vazão das bombas. Através dos gráficos das figuras 19 e 20 é possível observar como o estrangulamento de válvulas interfere no sistema liga (1) e desliga (0). Visto que a redução da vazão faz com que não haja excessos de pressão, observa-se que, no período de um mês, aproximadamente, obteve-se o desligamento das bombas em poucas vezes por pressão alta no recalque.

Figura 19: Operação bomba 1 do Sistema de recalque localizado no município de São José



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN

Figura 20: Operação bomba 2 do Sistema de recalque localizado no município de São José

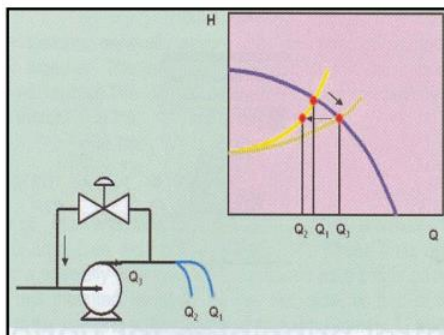


Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN

### 5.6.3 By-pass

Prática pouco utilizada na CASAN, o controle por *by-pass*, figura 21, consiste na abertura variável de uma válvula paralela ao bombeamento. Com a abertura da válvula ocorre a redução da vazão de recalque total, visto que uma parte é retornada. A alteração da curva pode ser vista na figura 21, onde Q3 corresponde à vazão total. (GURGEL, 2006).

Figura 21: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por utilização de *by-pass*

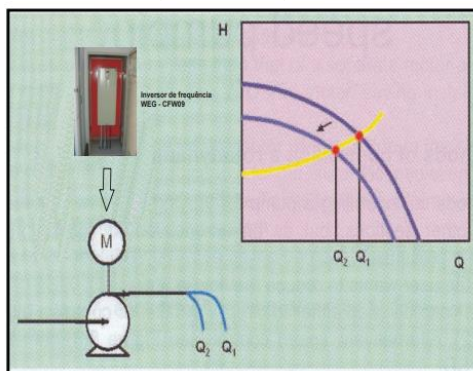


Fonte: EUROPUMP e HIDRAULIC INSTITUTE (2004); GURGEL, 2006; PG 52.

#### 5.6.4 Controle por variação de velocidade do motor

Refere-se ao modo de controle proposto a ser estudado neste trabalho. Caracteriza-se pela utilização do inversor de frequência para alteração da velocidade do conjunto motor e bomba. Observa-se que, com a alteração da rotação da bomba, figura 22, e, conseqüentemente, da vazão, como será apresentado a seguir, a curva da bomba se desloca de maneira bastante simples sobre a curva do sistema, perdendo a capacidade de vencer perdas de carga maiores com o aumento da vazão.

Figura 22: Curva HxQ bombeamento após redução da vazão por variação de rotação



Fonte: EUROPUMP e HIDRAULIC INSTITUTE (2004); GURGEL, 2006; PG 53.

Segundo MACINTYRE (1987), SANKS (1998) e TSUTIYA (2004 apud GURGEL, 2006, pag. 19) algumas relações são válidas referentes a uma bomba centrífuga girando com velocidades diferentes e com o mesmo rotor. São chamadas de “leis da semelhança” e podem ser utilizadas no estudo das variações referentes a um sistema de bombeamento:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (13)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (14)$$

Onde N = Velocidade de rotação da bomba;

Q = Vazão da bomba;

H = Altura manométrica total da bomba;

P = Potência consumida referente a rotação da bomba.



## 6 FUNCIONAMENTO DO CONTROLE POR VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DO MOTOR

Neste capítulo serão apresentadas as características das estações elevatórias que foram estudadas, seus detalhes construtivos, as formas de análise em tempo real, a programação de seus controles e as suas individualidades, concluindo com seus dados obtidos em campo, através de medidas realizadas com um analisador de energia. Busca-se, através desses dados com valores reais, discutir a eficácia ou ausência dela no método aqui estudado.

Foram escolhidos três *boosters* da cidade de Florianópolis. Dois deles localizados na região norte da ilha e outro na região leste. Todos eles operam 24 horas por dia, sendo de extrema importância para a região à qual abastecem.

### 6.1 COMPOSIÇÃO DE UM BOOSTER

O *booster* é um tipo de estação elevatória de água de menor porte. Caracteriza-se pela pressurização de redes de abastecimento de água e pelo fato de que podem ser instalados em quase qualquer lugar que necessite de uma pressão maior do que a rede comum.

É composto principalmente por um conjunto motor e bomba e um quadro elétrico para acionamento e o controle. Na figura 23, do *booster* “Fortaleza da Barra”, um dos escolhidos para o estudo, pode-se ver a composição da caixa do pressurizador, que é semelhante aos outros.

Figura 23: *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria

O motor é apoiado em uma base, montado junto à bomba e, juntos, são acoplados aos encanamentos de sucção, localizado embaixo, e recalque, na parte de cima. Percebe-se também a instalação de uma válvula de retenção, a fim de evitar o retorno de água por eventuais desligamentos da bomba. Tanto no duto de recalque quanto no de sucção, derivam mangueiras para as medidas de pressão. São instalados em um barrilete de medição, conforme a figura 24, os manômetros, com leituras em psi e bar, junto aos transdutores. Além do exaustor localizado dentro do quadro elétrico, há também um de maior porte instalado dentro da caixa, com o objetivo de retirar o calor excessivo formado dentro do *booster*.

Figura 24: Barrilete de medição de pressão do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria

### 6.1.1 Quadro elétrico

O principal item do quadro é o inversor de frequência, seu funcionamento foi abordado em capítulos anteriores, e é peça chave na operação da bomba. Sua escolha é feita a partir da potência a ser acionada. O fabricante do inversor é que indica e sugere os tipos de proteção a serem utilizadas junto a uma nova peça. Os inversores dos

quadros estudados são da marca ABB, linha ACS355. Em seu manual, há uma tabela de dimensionamento de fusíveis, a qual encontra-se no anexo A deste documento. Além da proteção dos cabos de entrada, os fusíveis diminuem os danos de acionamento. Como recomendado pelo fabricante, nos locais estudados há fusíveis gG, do tipo NH, que protegem contra sobrecargas e curto-circuito, cada um com sua categoria de acordo com correntes de trabalho. Há outras recomendações bastante interessantes que buscam aumentar a vida útil do inversor e que são especificadas nos manuais, tais como tamanho dos cabos de proteção, dimensões de espaço livre para ventilação e dados de refrigeração.

Outro tipo de proteção presente no quadro refere-se ao DPS, que protege os circuitos contra surtos de tensão transitória provenientes da rede. Geralmente os surtos são decorrentes de descargas atmosféricas ou manobras de redes. Ficam, portanto, responsáveis por desviar as correntes pelo cabo de aterramento, sendo conectado com cada uma das três fases e com o fio terra.

No mesmo trilho é possível observar os módulos referentes à telemetria, que será abordada a frente e realiza a supervisão da operação do *booster*. Em sua composição possui ainda uma bateria de 12V que alimenta o circuito de leitura em caso de falta de energia da rede.

Na parte superior direita da figura 23 fica evidente, também, a presença de um ventilador dentro do quadro, o qual retira o calor proveniente da operação do inversor no que se refere à retificação da tensão e o calor provocado por ele.

Por fim, é sempre importante destacar a presença de um timer para controlar a operação no sistema e desligá-lo por completo em eventuais manutenções de rede ou outra necessidade particular.

Na parte exterior do quadro, há dois leds indicativos que indicam informações básicas, como a falta de água nos dutos de sucção ou falha no inversor. Uma botoeira de três estágios permite a operação em modo local do inversor, desligado (zero) ou em modo remoto, permitindo o acionamento de forma remota, por meio do sistema supervisor.

Figura 25: Vista exterior quadro Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria

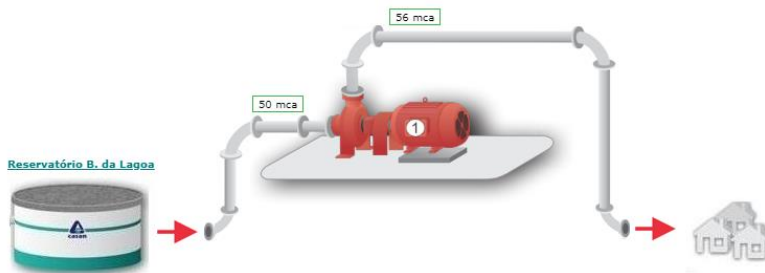
Para utilização do controle PID é necessária a utilização de sensores de pressão para medir as variáveis de sucção e recalque. Nos *boosters* estudados, os transdutores são do tipo saída de corrente de 4 a 20mA, ficando, portanto, responsáveis por converter a pressão de água em um sinal analógico através da deformação interna nos sensores que causam uma alteração na resistência acoplada a uma ponte de *Wheatstone*.

A seguir serão abordadas as características construtivas particulares de cada *booster* estudado, com informações do inversor, tipo de bomba e motor com suas respectivas curvas de operação, assim como a forma como se inserem no sistema de abastecimento da região.

## 6.2 BOOSTER FORTALEZA DA BARRA

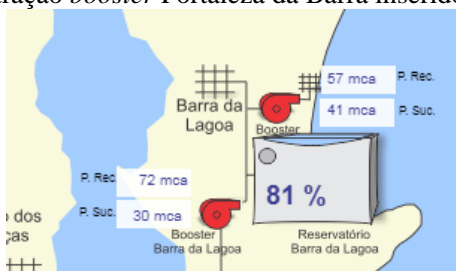
Inserido no sistema do leste da ilha, na região da Barra da Lagoa (figuras 26 e 27), a sucção recebe água do reservatório da Barra da Lagoa e o recalque abastece as residências que, sem o *booster*, teriam a pressão de chegada reduzida.

Figura 26: Ilustração *booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN

Figura 27: Ilustração *booster* Fortaleza da Barra inserido no mapa



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN

A altura manométrica necessária para abastecer a região com eficácia está na faixa de 58 a 60 mca. O *setpoint* de operação, ou seja, o valor que o controle do conjunto moto-bomba está sempre buscando atender está nesta faixa. A bomba instalada no local para tal função pode ser vista na figura 28.

Figura 28: Moto-Bomba *booster* Fortaleza da Barra

Fonte: Autoria própria

O modelo é o ME-2275 V de 7,5 cv, com rotor de 135 mm e 3 estágios. Em seu site, o fabricante, a Schneider, disponibiliza uma série de documentos e tabelas como a da tabela 1, que auxiliam na obtenção de dados de operação da bomba. Inicialmente, encontra-se, através das características hidráulicas, o modelo e a potência. Na altura manométrica de 60 mca a vazão máxima é de 18,8 m<sup>3</sup>/h com o modelo instalado.

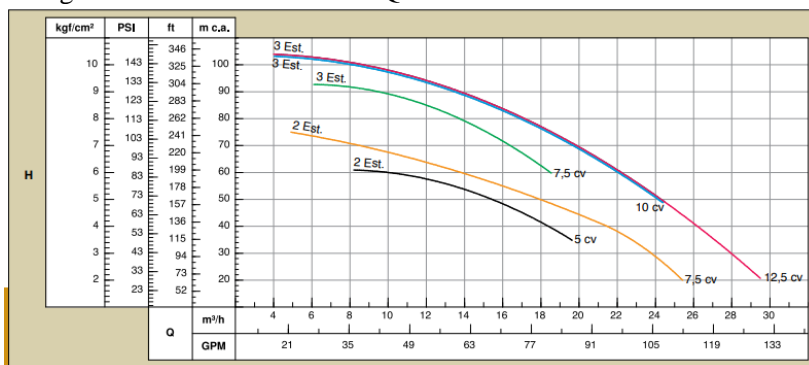
Tabela 1: Características hidráulicas bomba instalada no *booster* Fortaleza da Barra

Modelo	Potência (cv)	Características Hidráulicas																			
		Altura Manométrica Total (m.c.a.)																			
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110
		Vazão em m <sup>3</sup> /h válida para sucção de 0 m.c.a.																			
ME-2230	3	14,9	14,2	13,4	12,5	11,5	10,4	9,1	7,5	4,7											
ME-2240	4	*	*	*	14,7	14	13,2	12,3	11,3	10,2	8,8	6,6									
ME-2340	4	*	*	*	*	*	*	*	11,6	11	10,2	9,4	8,6	7,5	6,1	3,5					
ME-2250 V	5	*	*	*	*	*	19,6	18,4	17	15,4	13,4	9,9									
ME-2250	5	*	*	*	*	*	15	14,4	13,8	12,9	11,8	10,1	7,8	4,9							
ME-2350	5	*	*	*	*	*	*	*	*	11,6	11	10,3	9,6	8,7	7,6	6,1					
ME-2450	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	6,7	5,9	5	3,9	0,7		
ME-2275 V	7,5	*	*	25,4	24,6	23,8	22,8	21,5	19,8	17,9	16	13,8	11,3	8,5	4,8						
ME-2375 V	7,5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	18,5	17,5	16,4	15,2	13,7	12	9,5				
ME-2375	7,5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	11,8	11,2	10,6	10	9,2	8,4	7,5	4,2			
ME-23100 V	10	*	*	*	*	*	*	*	*	24,3	23,3	22,2	21,1	19,9	18,6	17,1	15,6	13,8	11,6	8,7	
ME-23125 V	12,5	*	*	*	28,8	28	27,1	26,2	25,3	24,3	23,3	22,2	21,1	19,9	18,6	17,1	15,6	13,8	11,6	8,7	

Fonte: manual Schneider

Na curva da figura 29 percebe-se como uma mudança de altura manométrica contribui para a mudança de vazão, na curva de cor verde, referente à bomba de três estágios. Importante destacar que os dutos de recalque estão dispostos conforme orientam os manuais do fornecedor, 1 ½”.

Figura 29: Características H x Q bomba *booster* Fortaleza da Barra



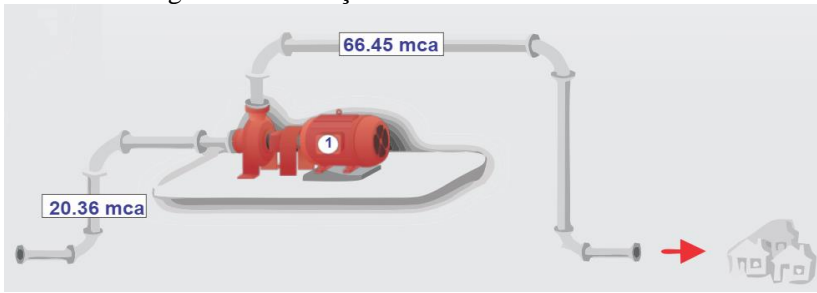
Fonte: manual Schneider

O motor, tipo gaiola de esquilo (dois polos), que fornece a potência necessária para a bomba, possui corrente nominal de placa de 10,9 A com rotação também nominal em uma rede trifásica com 380 V. O fator de potência é de 0,87 e rendimento de 88,7%. Para alimentar e realizar o controle dessa carga, está instalado um inversor trifásico ABB ACS 355 de 5,5 kW ou 7,5 cv. Entre os atributos deste inversor, é importante destacar as correntes limites e de operação. O modelo 03x-12A5-4 suporta uma corrente de 12,5A constantes de saída e 18,8 A durante um minuto a cada dez trabalhos. Percebe-se que as correntes de operação do motor ficam bem abaixo das correntes de projeto do inversor, o que garante maior vida útil.

### 6.3 BOOSTER GRACILIANO GOMES

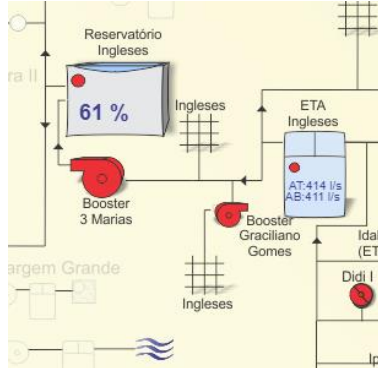
O *booster* Graciliano Gomes está localizado na região norte da ilha, no bairro Ingleses, figuras 30 e 31. A chegada de água para a sucção provém da Estação de Tratamento de Água (ETA) dos Ingleses, a qual fornece água para a rede de abastecimento da região. A necessidade do *booster* é devido às regiões mais altas, com altura manométrica superior à da ETA.

Figura 30: Ilustração *booster* Graciliano Gomes



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Figura 31: Ilustração *booster* Graciliano Gomes inserido no mapa



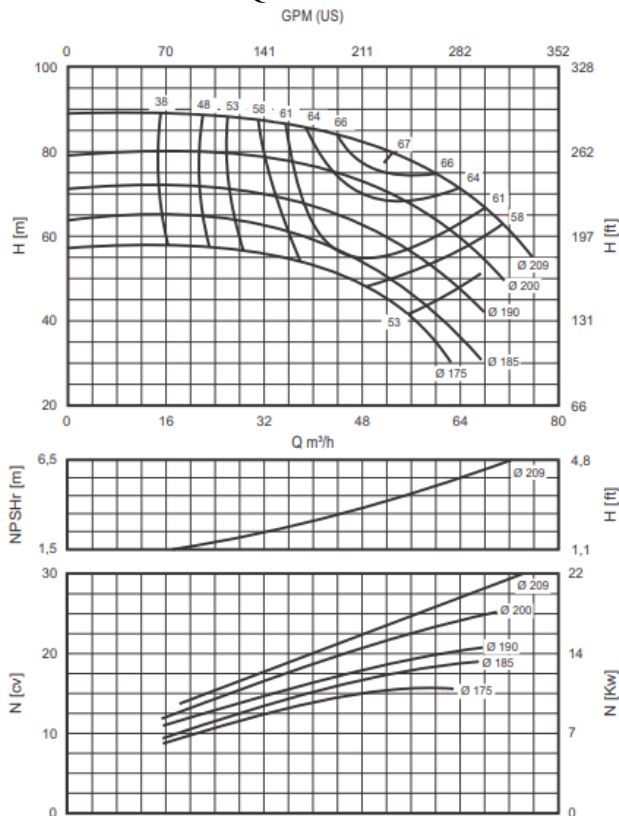
Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

A altura necessária encontra-se na faixa de 65 a 68 mca a qual está programada como *setpoint*. A bomba instalada no local é da marca Imbil, modelo INI 40-200. O respectivo fabricante apresenta de forma



diferente as curvas de trabalho. Na figura 32 pode-se encontrar informações relevantes para obter os dados de trabalho do conjunto.

Figura 32: Características H x Q bomba *booster* Graciliano Gomes



Fonte: Manual Imbil.

O motor instalado no local possui 20 cv de potência. As dimensões da bomba permitem, de acordo com a Imbil, o acoplamento com motores de 20 e 25 cv de 2 polos. Sabendo disso percebe-se que, com a potência disponível e um rotor de 190 mm, pode-se obter uma vazão de até 60 m³/h, porém com uma altura manométrica de apenas 53 mca. Todavia, como a bomba trabalha com cerca de 68 mca sua vazão gira em torno de 33 m³/h.

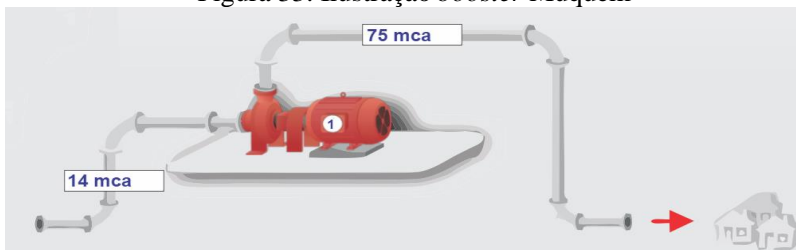
O motor acoplado à bomba, da marca WEG, possui 20 cv e corrente nominal de 28,8 A quando ligado em duplo estrela. Do tipo gaiola de esquilo, rendimento de 90,8% e fator de potência de 0,87.

Diferente do *booster* Fortaleza da Barra, o inversor aqui instalado está dimensionado exatamente na potência do motor. Não há contra indicações do fabricante, contudo, percebe-se um aumento considerável da temperatura de trabalho. O modelo do inversor é ABB ACS 355 com potência de 20 cv possui corrente constante de 31 A e 46,5 A de sobrecarga.

#### 6.4 BOOSTER MUQUÉM

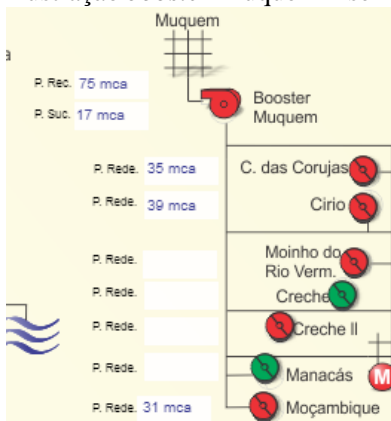
O *booster* Muquém, figura 33 e 34, tem uma característica especial que o diferencia dos dois primeiros, que é a procedência da água da sucção. Há uma malha de abastecimento antes dele com diversos poços, os quais abastecem a região próxima a eles e levam água até próximo ao bairro Muquém. No entanto, a pressão para o bairro, que possui alguns pontos com alturas mais elevadas, já sofreu perdas durante o trajeto, tornando-a baixa, trazendo à tona a necessidade do *booster* no local.

Figura 33: Ilustração *booster* Muquém



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Figura 34: Ilustração *booster* Muquém inserido no mapa



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

A pressão de set point do *booster* é de 75 mca e para alcançar a pressão projetada, está instalada uma bomba Flowserve D-820. Não foi possível encontrar as curvas de operação da bomba, mesmo depois da tentativa de contato com o representante do fabricante, que possui filial no Brasil na cidade de São Caetano do Sul – SP. Alimentada por um motor WEG de 15 cv que trabalha com 21 A ligado em 380 V estrela, seu fator de potência é de 0,88 e rendimento de 90,5%.

Figura 35: Bomba *booster* Muquém



Fonte: Autoria própria

A alimentação do conjunto está por conta de um inversor ABB modelo igual aos dois *boosters* anteriores, com potência máxima de 20 cv, com corrente constante de 31 A e 46,5 A de sobrecarga. De maneira diferente do *booster* Graciliano Gomes, este possui potência máxima

acima da potência de trabalho, provocando um índice de aquecimento menor.

## 6.5 TELEMETRIA

A fim de realizar a análise em tempo real do sistema de abastecimento de água da cidade, os painéis de *booster* possuem, como descrito anteriormente, um sistema de telemetria. Através de modems industriais, como o das figuras 36 e 37, os dados são lidos e transmitidos instantaneamente para um software de leitura através da rede 3G.

Figura 36: Modem ABS CEL IO



Fonte: Datasheet ABS

Podem ser obtidos dados por sinais analógicos ou digitais, através dos inversores, controladores ou transdutores de pressão. Sendo que nos circuitos analógicos há a necessidade da utilização de fusíveis para proteção do modem. A interface utilizada é a RS485 com comunicação serial.

Figura 37: Vista frontal Modem ABS CEL IO



Fonte: Datasheet ABS

Prevenindo uma possível falha da rede CELESC, há a utilização de uma bateria instalada junto aos módulos e uma fonte UPS para controle da entrada de energia.

Para síntese dos dados colhidos pelos conjuntos de modems, é necessário um software a fim de exibir de forma clara e objetiva, até mesmo para leigos, todas as informações do sistema. Para isso é utilizado o SCADA BR, que é um *software* livre, de código-fonte aberto, utilizado amplamente em automações industriais.

Há um setor na empresa responsável por acompanhar 24 horas todos os dados. Destacam-se os dados de pressão de sucção e recalque, operação da bomba, corrente, rotação e frequência. Através desse material, uma série de problemas podem ser diagnosticados previamente, otimizando o tempo na solução de contratemplos.

## 6.6 INSTALAÇÃO E PROGRAMAÇÃO PID

O controle para manter a pressão de recalque constante por meio da alteração de rotação é realizado através do PID. Consiste em um controlador proporcional integral derivativo que, através de modelos matemáticos, objetiva a minimização do sinal de erro entre o *setpoint* e o funcionamento momentâneo.

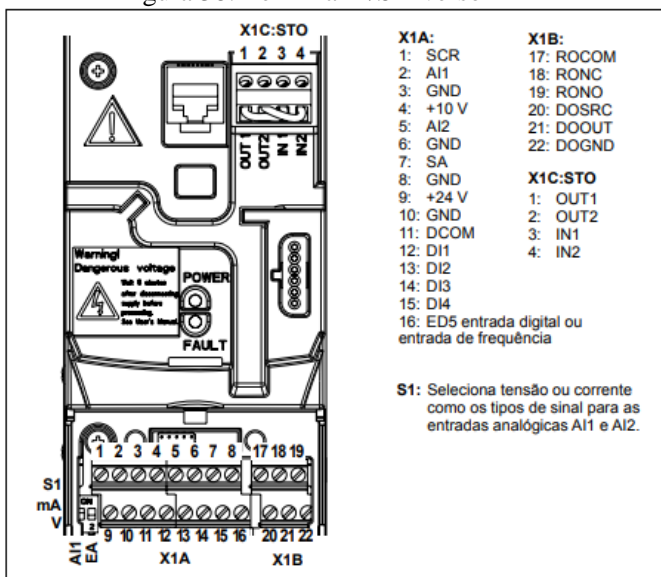
Os modelos já vêm pré-definidos de fábrica pelos inversores, sendo necessário alterar alguns dados para realizá-lo através de uma malha fechada. No entanto, cada situação demanda uma série de detalhes que devem ser levados em conta pelo usuário. As individualidades dos *booster* são alteradas nos parâmetros de programação dos inversores, que geralmente são dotados de

controladores lógicos programáveis. A programação padrão dos três *boosters* estudados aqui serão apresentadas a seguir, bem como as instalações físicas que devem ser preparadas em consequência da sua utilização.

### 6.6.1 Ligação dos cabos de controle

Além da ligação dos cabos de força de entrada e saída do inversor de frequência, é necessária a ligação dos cabos de comando, os quais o inversor responderá com os respectivos sinais. O fabricante ABB nomeia o módulo de ligação desses cabos de “Terminais E/S”.

Figura 38: Terminal E/S inversor ABB



Fonte: Manual ABB

Na figura 38, destaca-se a numeração atribuída a cada terminal, cada qual com sua função. Os terminais doze ao dezois são destinados a entradas digitais e são utilizados a partir do treze, da seguinte forma:

ED2: Manual (0), PID (1)

ED3: Reset de falha remoto através da telemetria.

ED4: Permissão de funcionamento, para segurança.

## ED5: Parar (0), Arrancar PID (1)

O sinal digital de todas as entradas provém do próprio inversor que possui uma saída de 24 V no terminal nove. Nos terminais dois e cinco são conectadas as entradas analógicas referentes aos valores de pressão da sucção e recalque, respectivamente. Por fim, do dezessete ao vinte e dois, são utilizados relés que indicam falta de água na sucção além do acionamento do horímetro.

### 6.6.2 Programação dos parâmetros

Os parâmetros podem ser acessados pela própria IHM do inversor e alterados por ali também. Há uma série de conjuntos, cada qual com seus atributos. O anexo B deste trabalho apresenta uma tabela de programação como exemplo, a qual está inserida nos três *boosters* estudados. Cada um com suas alterações específicas em cada uso, como pressão de *setpoint*, dados do motor ou até mesmo proteção de pressão de sucção.

## 6.7 DADOS DE OPERAÇÃO

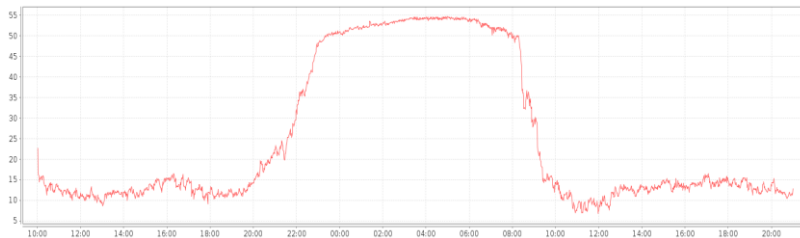
As medidas realizadas em campo nos três *boosters* serão apresentadas nos itens em sequência. O objetivo da obtenção dos dados é observar como se dá o comportamento do conjunto ao longo do dia. Além dos dados obtidos através de um medidor de energia, utilizou-se das informações disponíveis do sistema supervisorio, a fim de realizar comparações, identificar padrões de operação e observar a economia ou não de energia.

### 6.7.1 *Booster* Fortaleza da Barra

Os dados obtidos compreendem o período do dia vinte um de dezembro, das dez horas da manhã até o dia vinte dois de dezembro, às vinte e uma horas, somando cerca de trinta e cinco horas de medidas. O medidor de energia realiza uma medida a cada dois minutos e o sistema supervisorio armazena e dispõe seus dados a cada um minuto.

Inicialmente, observa-se a quantidade de água disponível na sucção, através da pressão, em mca, durante o período estudado na figura 39.

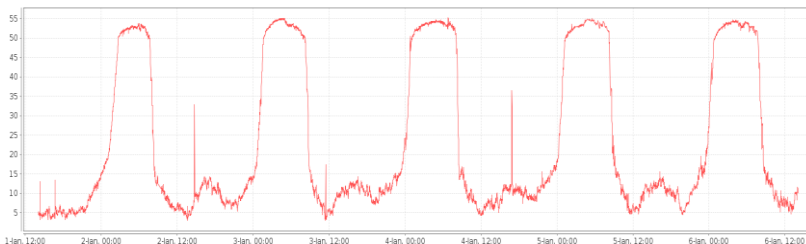
Figura 39: Curva de pressão de sucção do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

A partir das 20 horas, a pressão aumenta gradativamente e chega a ultrapassar 50 mca. Esse aumento se deve ao horário de baixo consumo em toda região que antecede os canos de chegada de água ao *booster*. Percebe-se que, ao amanhecer, esse valor tende a diminuir novamente, tornando-se esse um padrão diário, conforme mostra a figura 40, que apresenta valores de pressão em alguns dias consecutivos.

Figura 40: Curva de pressão de sucção do *Booster* Fortaleza da Barra por 5 dias

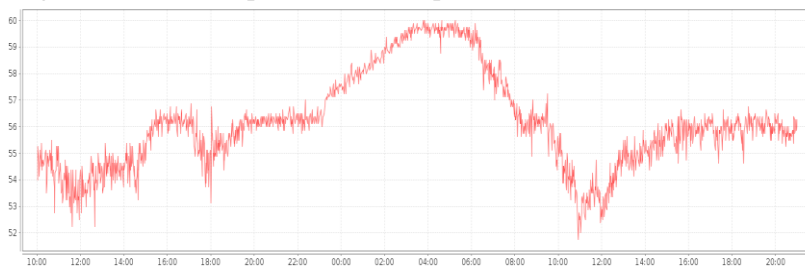


Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

A partir da chegada de água e realizando o PID já explanado nos capítulos anteriores, o *booster* trabalha visando o *setpoint* de 58 mca, figura 41. A frequência (em Hz) fornecida ao motor, bem como a velocidade (em rpm), para o controle em malha fechada durante o período estudado podem ser vistas nas figuras 42 e 43.

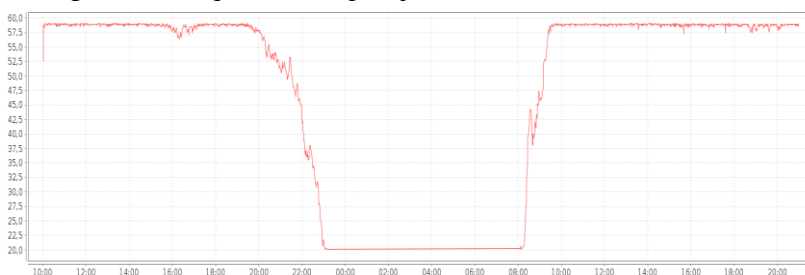


Figura 41: Curva de pressão de recalque do *Booster* Fortaleza da Barra



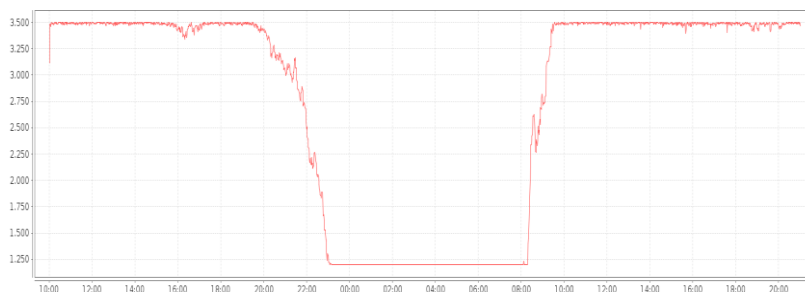
Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Figura 42: Frequência de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Figura 43: Velocidade de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

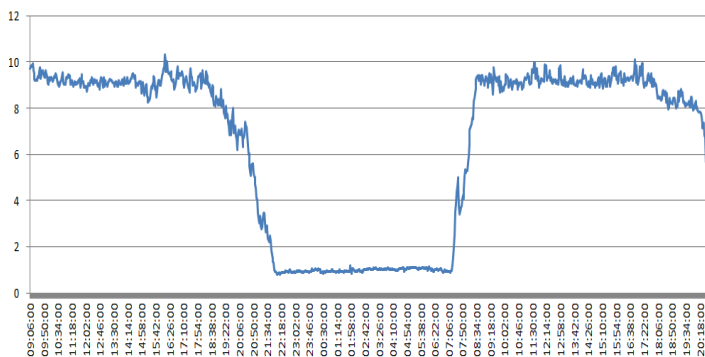
Durante a madrugada, há dois fatos que devem ser levados em conta para entender a diminuição considerável da rotação do conjunto, chegando a valores mínimos para resfriamento do motor. O primeiro, como já falado, refere-se à alta da sucção, a qual contribui fortemente para a pressão do recalque no cálculo da altura de fornecimento. O segundo fato deve-se à mesma lógica, ao passo que a região que fornece

água para o abastecimento está com o consumo baixo, a região “pós *booster*” encontra-se com seus reservatórios em sua maioria completos, o que acaba pressurizando a rede, fazendo, portanto, com que não haja necessidade de operação da bomba em altas rotações.

Com os resultados dos dados de funcionamento do motor algumas constatações também puderam ser observadas. Destaca-se que as medidas são realizadas antes do inversor de frequência, visto que, pela característica quadrática das ondas de saída, as medidas não são realizadas adequadamente com o modelo utilizado.

A corrente de operação do motor ficou em grande parte do tempo abaixo da nominal, 10,9 A, e comportou-se conforme mostrado na figura 44.

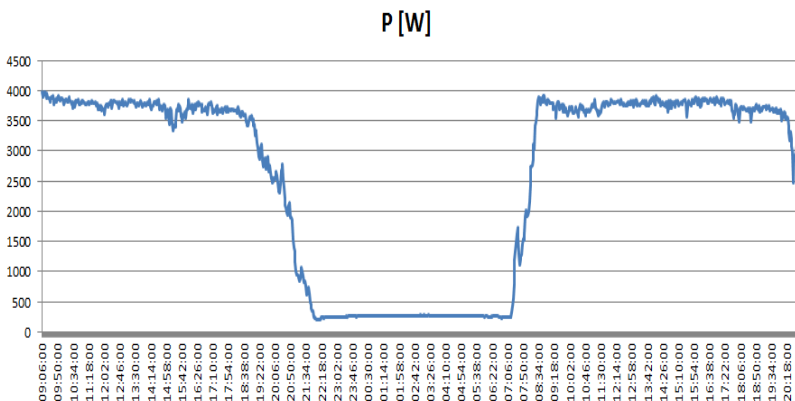
Figura 44: Corrente de operação do *Booster* Fortaleza da Barra  
I de Operação [A]



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Acompanhando a queda da velocidade da bomba, a corrente tende a diminuir junto, assim como a potência despendida, conforme mostrado na figura 45.

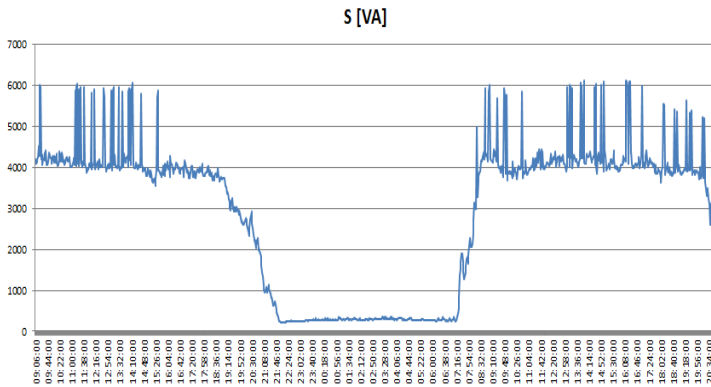
Figura 45: Potência Ativa de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

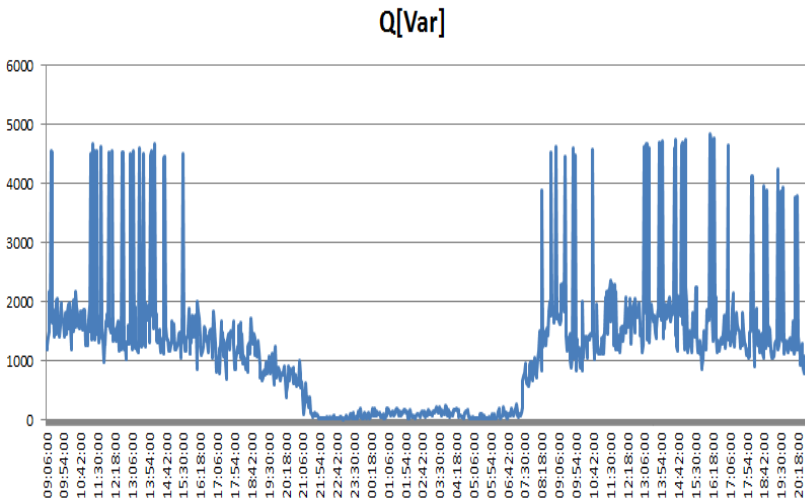
Em relação à potência, percebe-se, também que ela opera sempre abaixo da nominal. A variação da pressão de sucção faz com que seja difícil dimensionar com exatidão um bombeamento ligado direto a rede e não a uma cisterna própria. Ocasionalmente, por exemplo, em certos momentos neste caso, um superdimensionamento. Nas figuras 46 e 47, respectivamente, os dados de potência aparente e de potência reativa podem ser observados. Destacam-se nestas medidas, eventuais picos de potência reativa, que duram aproximadamente 8 minutos e que ocasionam diminuição do fator de potência (figura 48), e aumento da potência aparente. Há algumas hipóteses para explicar tais medidas, podem haver anomalias físicas instantâneas na operação do sistema moto bomba, filtro do inversor com ação de harmônicas ou, simplesmente, problemas de medição. Porém, no contexto geral, o sistema apresentou um fator de potência satisfatório durante o período estudado. Principalmente levando em conta a não utilização de indutores para correção de harmônicas causadas pelo funcionamento do inversor.

Figura 46: Potência Aparente de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



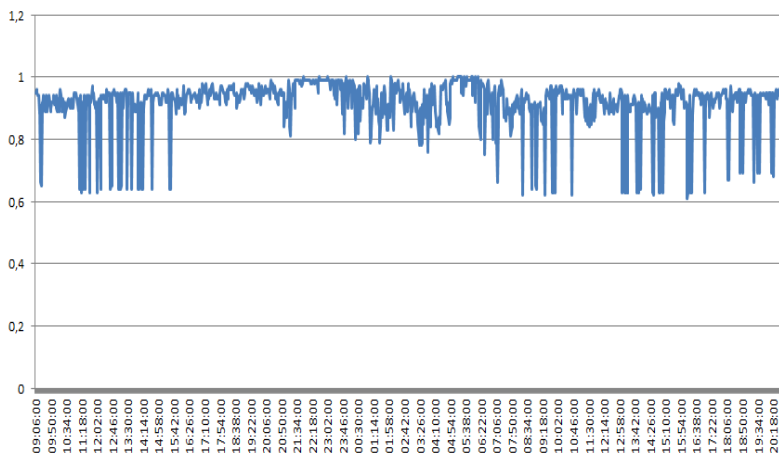
Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Figura 47: Módulo da Potência Reativa de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

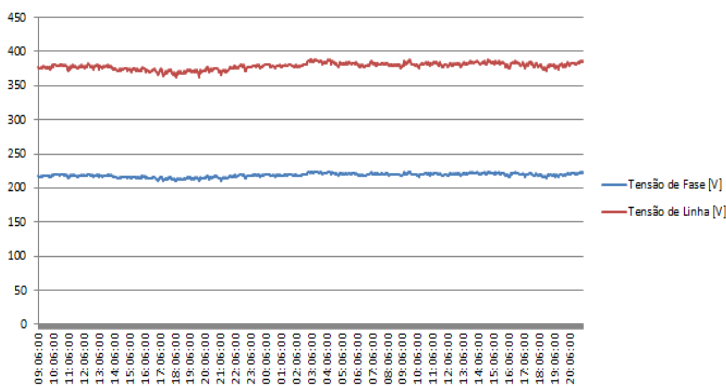
Figura 48: Fator de Potência de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Referente à tensão de alimentação do inversor de frequência, as medidas mostram um nível constante e dentro dos limites de fornecimento da concessionária CELESC. Na figura 49 estão apresentados, no mesmo gráfico, uma média de valores de tensão de linha e de fase.

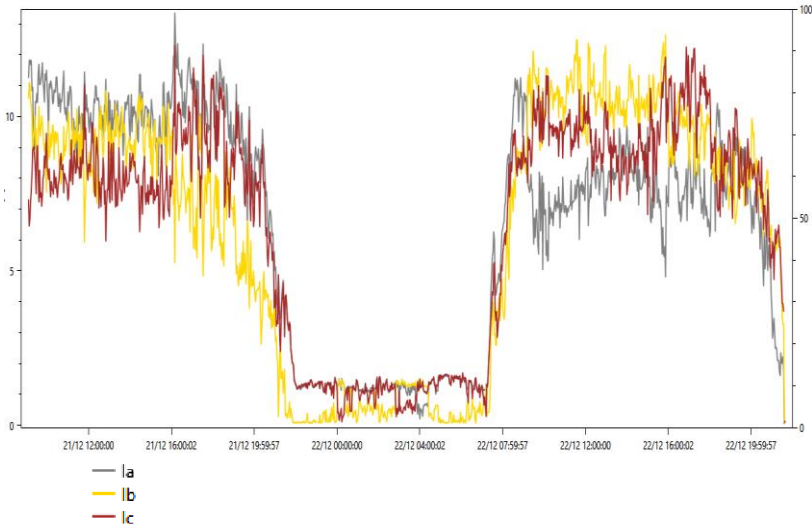
Figura 49: Tensões de linha e fase de operação do *Booster* Fortaleza da Barra



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

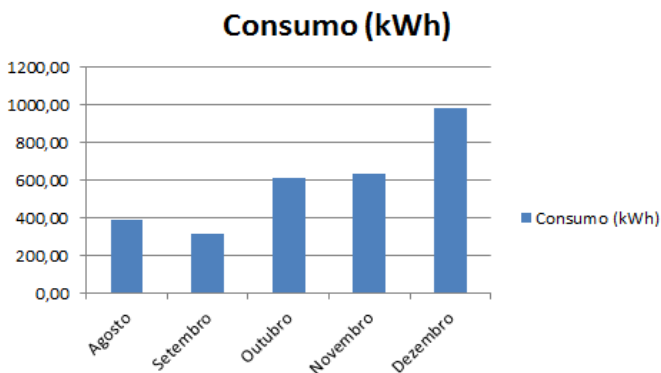
Quanto às correntes, percebe-se um desequilíbrio considerável entre fases, conforme figura 50, provavelmente motivado por falhas de isolamento no estator, visto que o inversor procura manter as tensões de fase dentro da mesma faixa, diminuindo o desequilíbrio de tensão.

Figura 50: Correntes de operação do *Booster* Fortaleza da Barra

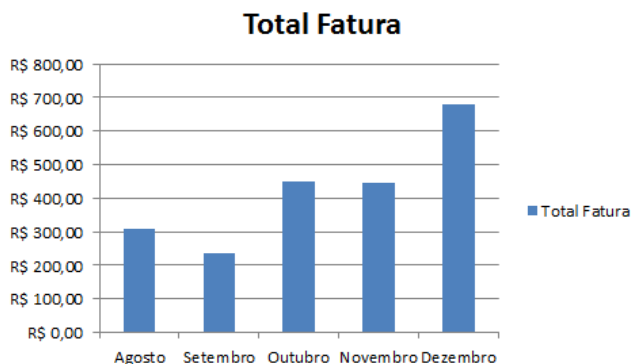


Fonte: Software do Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Nos últimos cinco meses de 2019, o *booster* apresentou os seguintes dados de consumo e faturamento de energia, conforme mostram as figuras 51 e 52. Com a chegada do verão e seus dias mais quentes, o consumo teve um aumento considerável, obtendo, mesmo assim, uma média bem abaixo do padrão de outros bombeamentos que operam sem o controle PID, ou seja, apenas através de partida direta.

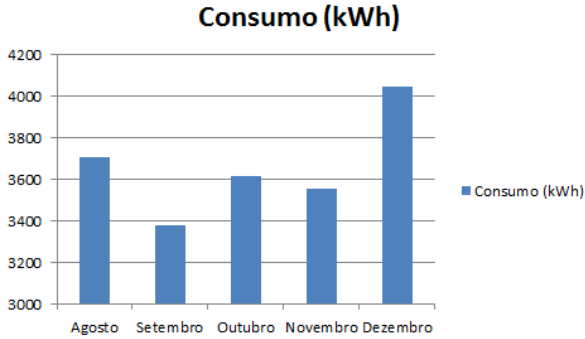
Figura 51: Consumo do *Booster* Fortaleza da Barra

Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN

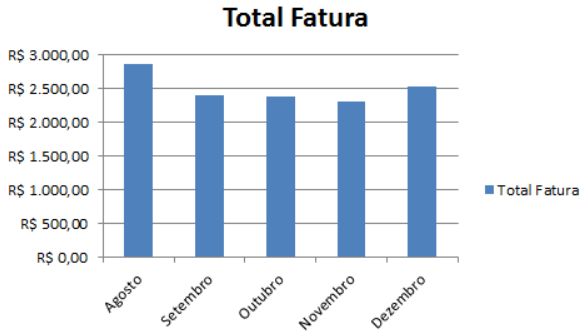
Figura 52: Faturas de energia do *Booster* Fortaleza da Barra

Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN

Apenas para efeito de superficial comparação, têm-se, nas figuras 53 a 56, dados de consumo de outros dois bombeamentos que utilizam o mesmo modelo de bomba e motor. Os mesmos apresentam valores muito superiores ao *booster* Fortaleza da Barra, uma evidência bastante interessante que comprova a economia com a utilização do método aqui estudado. Se faz importante salientar que as alturas manométricas são diferentes, tanto de sucção como recalque, assim como a vazão. Ou seja, utilizando o PID, ter-se-ia valores de consumo diferentes, mas, provavelmente, com uma economia consideravelmente alta.

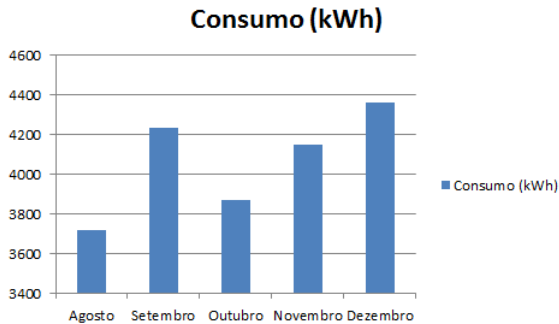
Figura 53: Consumo do *Booster* José Nitro

Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN.

Figura 54: Faturas de energia do *Booster* José Nitro

Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN.

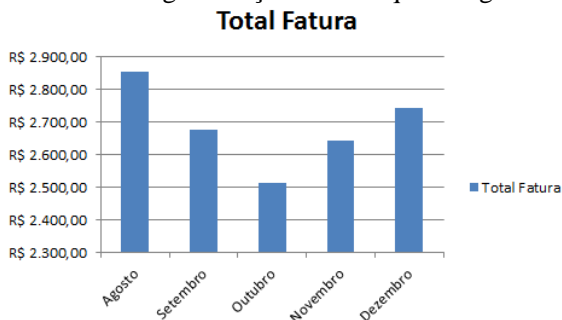
Figura 55: Consumo da Estação de recalque de água Pedregal



Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN.



Figura 56: Faturas de energia Estação de recalque de água Pedregal



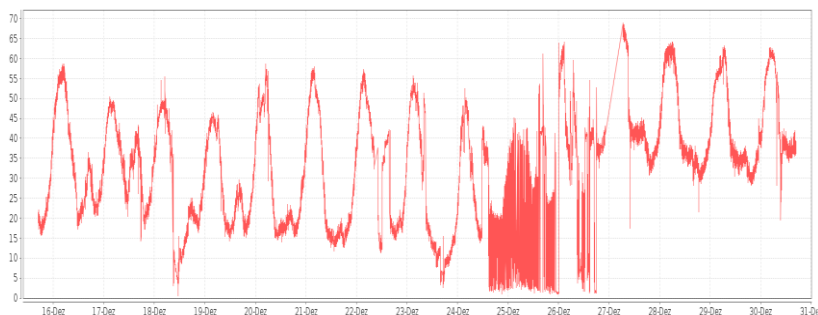
Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN.

### 6.7.2 *Booster Graciliano Gomes*

As medidas foram realizadas no período entre o dia vinte três de dezembro, das vinte e uma horas e trinta minutos até o dia vinte cinco de dezembro, às vinte e uma horas e trinta minutos, totalizando cerca de quarenta e oito horas de medições. Da mesma forma que a primeira, o medidor de energia realiza uma medida a cada dois minutos, e o sistema supervisorio armazena e dispõe seus dados a cada um minuto.

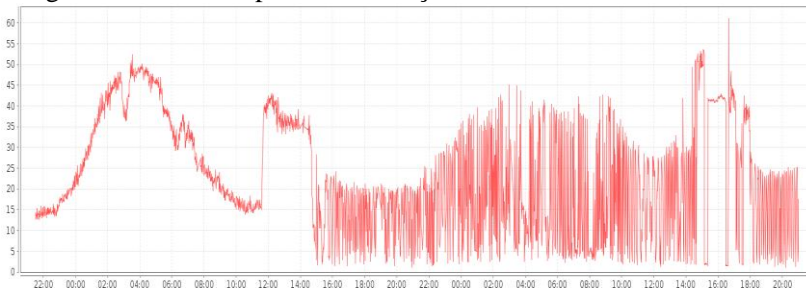
Ao identificar o padrão de abastecimento da sucção, notou-se uma avaria na distribuição de água que antecede o *booster* durante o período estudado. Nas Figuras 57 e 58 podem-se identificar o padrão durante os dias anteriores às medidas e após as mesmas e, em seguida, o padrão aproximado dos dias 23 ao 25.

Figura 57: Curva do padrão de pressão de sucção do *Booster Graciliano Gomes*



Fonte: Sistema Supervisorio da empresa CASAN.

Figura 58: Curva de pressão de sucção do *Booster* Graciliano Gomes

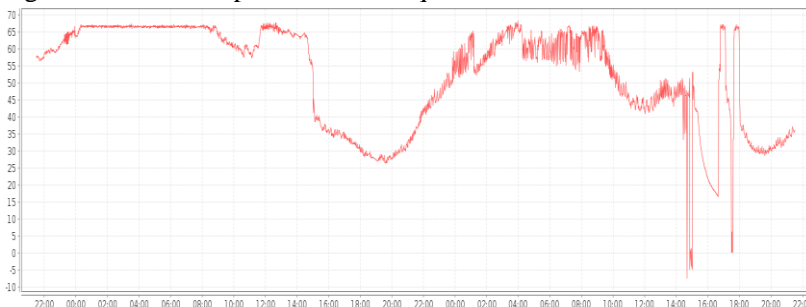


Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Infere-se, através dos gráficos, que houve uma baixa considerável da pressão de sucção a partir das quatorze horas do dia 24 de dezembro. Percebe-se, ainda, a seqüência de picos sem constância de pressão. Isso se deve às inúmeras tentativas de partida do motor a fim de pressurizar o recalque. Porém, quando ocorre a partida da bomba, após certo tempo, novamente ocorre a depressurização do sistema de sucção, fazendo com que a bomba seja desligada por inércia, conforme programado no inversor de frequência.

A falta de água constante na sucção provocou uma série de alterações nas medidas, as quais não são estáveis, mas representam uma situação ocasional de um *booster*.

Figura 59: Curva de pressão de recalque do *Booster* Graciliano Gomes

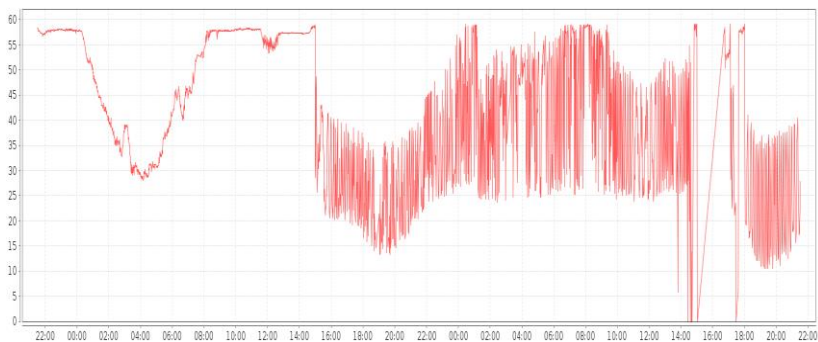


Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

O gráfico da pressão de recalque da figura 59 ilustra bem a situação ocorrida, onde o sistema moto bomba tenta manter a pressão programada no *setpoint* de 65 mca e, no decorrer do dia, não consegue manter a altura manométrica.

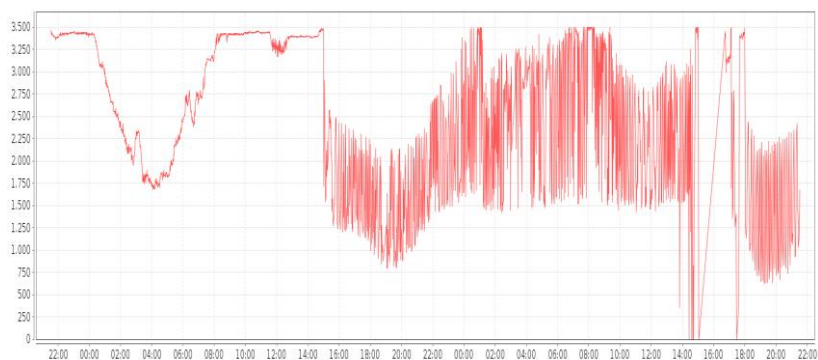
Nas medidas de frequência e velocidade do motor apresentadas nas figuras 60 e 61, é possível identificar que, dificilmente, o mesmo alcança a rotação nominal, visto que, antes disso, ocorre a falta de pressão, que ocasiona uma série de picos no gráfico, deixando-o sem qualquer constância.

Figura 60: Frequência de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

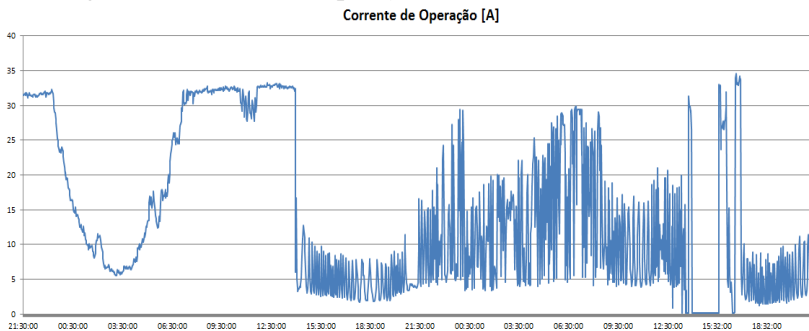
Figura 61: Velocidade de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

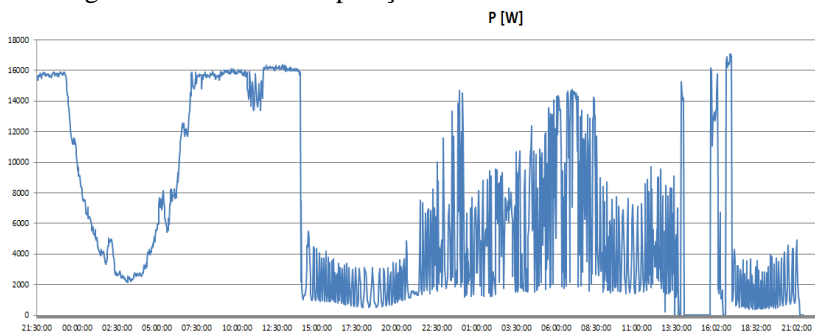
Da mesma maneira, a irregularidade se manteve nos gráficos de corrente e potência do motor mostrado nas figuras 62 e 63.

Figura 62: Corrente de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

Figura 63: Potência de operação do *Booster* Graciliano Gomes

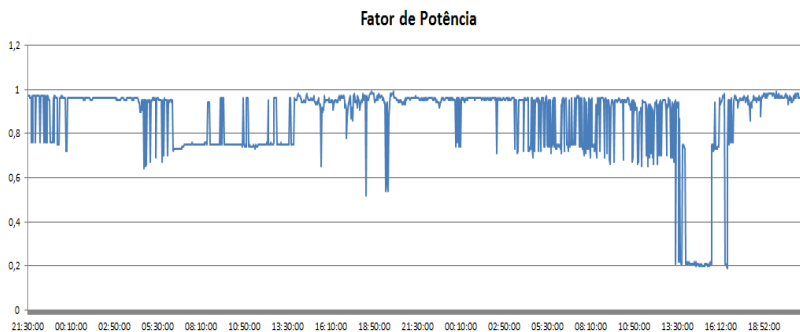


Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

Os picos de potência reativa presentes nas medidas do *booster* Fortaleza da Barra também apareceram nos dados de operação obtidos no *booster* Graciliano Gomes, mostrados na figura 65, e em maior escala. Destaca-se que, geralmente, estão acompanhadas pelas constantes desacelerações por inércia e repentinas partidas, visto que, em alguns momentos, quando ocorreram variações de corrente, a potência reativa segue a variação, aumentando repentinamente e variando o fator de potência, figura 64, o qual também não apresentou um desempenho satisfatório. Importante ser frisado que não há, no local, qualquer controle de acompanhamento de harmônicas que possam estar causando tal desequilíbrio. Um medidor de energia com um melhor

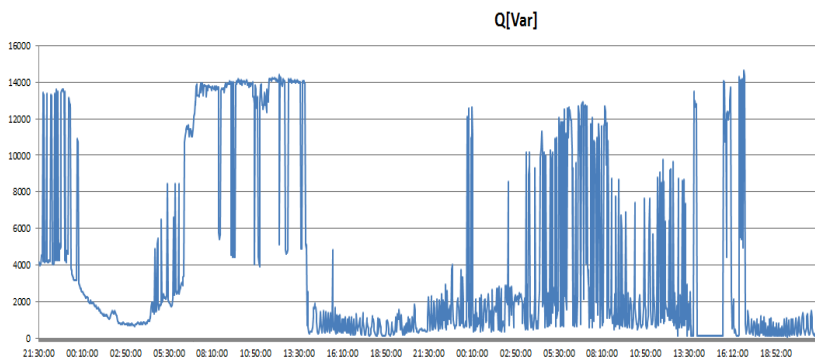
fracionamento de medidas possibilitaria um estudo mais detalhado da situação.

Figura 64: Fator de Potência de operação do *Booster* Graciliano Gomes



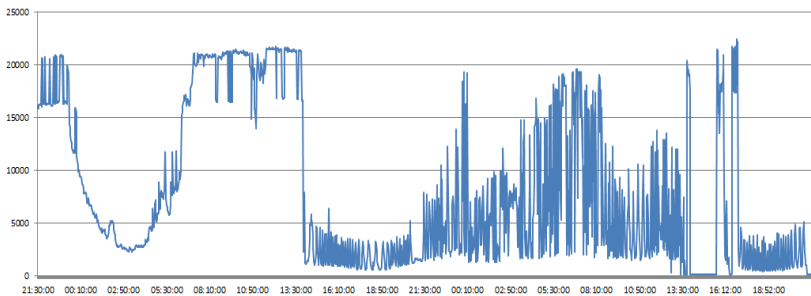
Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

Figura 65: Módulo Potência reativa de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

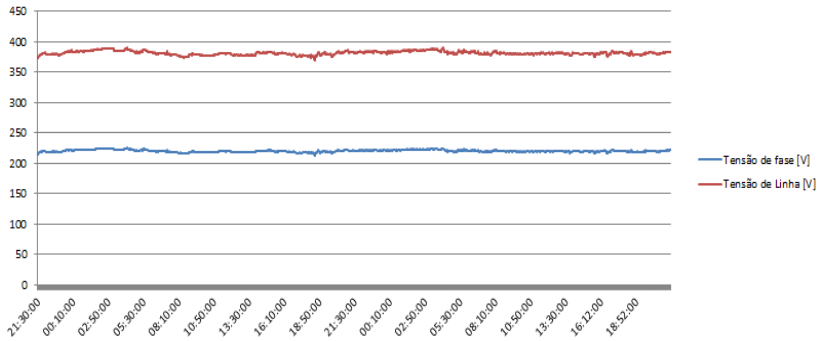
Figura 66: Potência aparente de operação do *Booster* Graciliano Gomes  
S [VA]



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

As médias das tensões de linha e fase mantiveram-se dentro dos limites conforme figura 67.

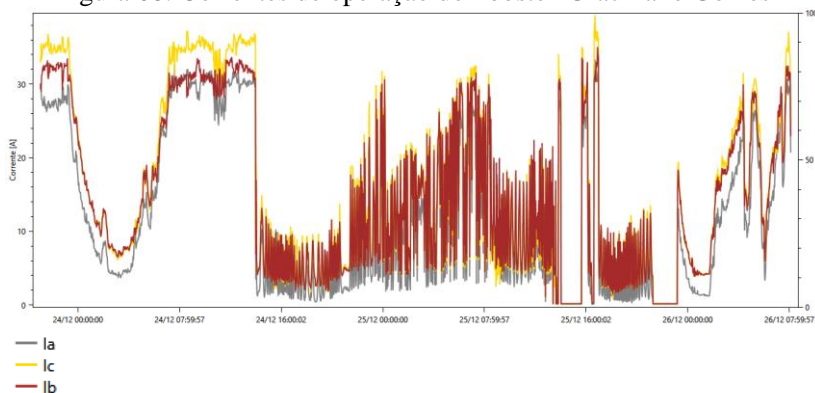
Figura 67: Média tensões de linha e fase de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

O desequilíbrio entre as correntes também pode ser visto, principalmente quando em operação com valores próximos aos nominais.

Figura 68: Correntes de operação do *Booster* Graciliano Gomes



Fonte: *Software* do Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Não foi possível obter o acesso aos dados de faturamento e consumo do *booster* Graciliano Gomes.

### 6.7.3 *Booster* Muquém

Os dados obtidos compreendem o período entre o dia nove de dezembro, da hora zero até o dia dez de dezembro, às oito horas da manhã, totalizando cerca de trinta e duas horas de medições. O medidor de energia realiza uma medida a cada dois minutos e o sistema supervisório armazena e dispõe seus dados a cada um minuto.

Através da figura 69 pode-se observar o padrão da pressão de sucção do sistema, apresentando um nível mais alto durante a madrugada e oscilando na continuação do dia.

Figura 69: Curva de pressão de sucção do *Booster* Muquém



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Dentre as três medidas realizadas no estudo aqui relatado, o *booster* Muquém apresentou o melhor desempenho de abastecimento, mantendo a pressão de recalque em uma faixa bastante restrita, obedecendo ao setpoint de 75 mca. Percebe-se, através do gráfico da pressão de recalque da figura 70, que houve apenas um desligamento do *booster* por falta de água, por volta das treze horas do dia nove de dezembro.

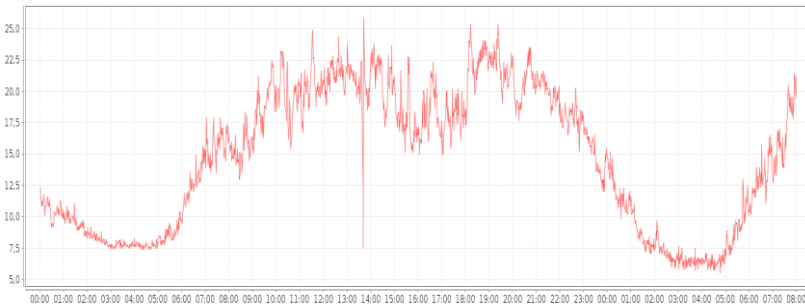
Figura 70: Curva de pressão de recalque do *Booster* Muquém



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

Como comentado anteriormente, as curvas da bomba instalada não foram encontradas ou fornecidas pelo fabricante, porém, no local, há um medidor de vazão, onde é possível verificar em tempo real dados da vazão fornecida, conforme mostra a figura 71.

Figura 71: Curva de vazão do *Booster* Muquém

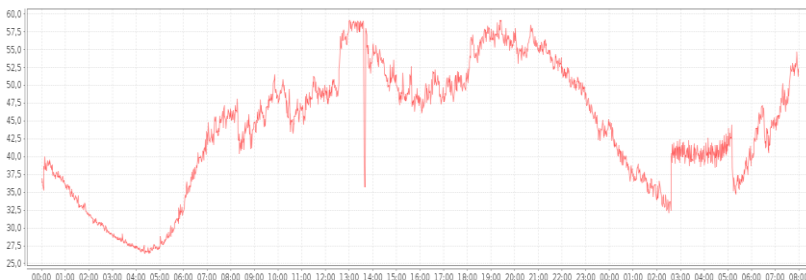


Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.



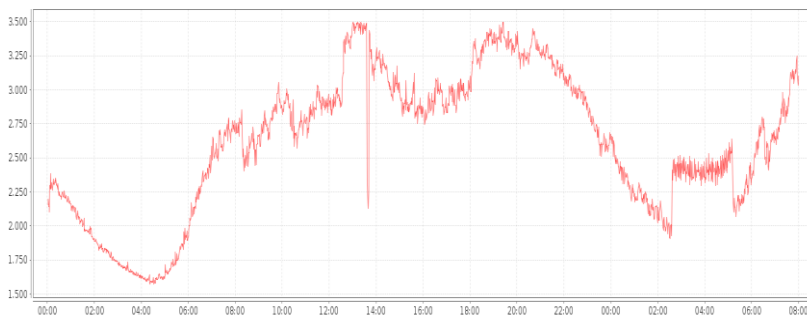
Em relação aos valores de frequência e velocidade de rotação da bomba, percebe-se um padrão de diminuição ao longo da madrugada devido ao baixo consumo e à forte pressão de sucção.

Figura 72: Frequência de operação do *Booster Muquém*



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

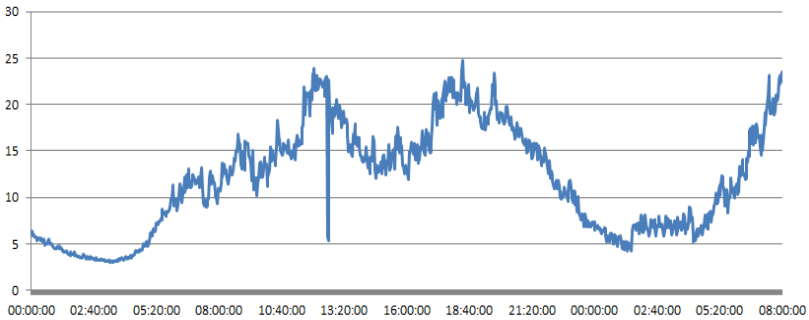
Figura 73: Velocidade de operação do *Booster Muquém*



Fonte: Sistema Supervisório da empresa CASAN.

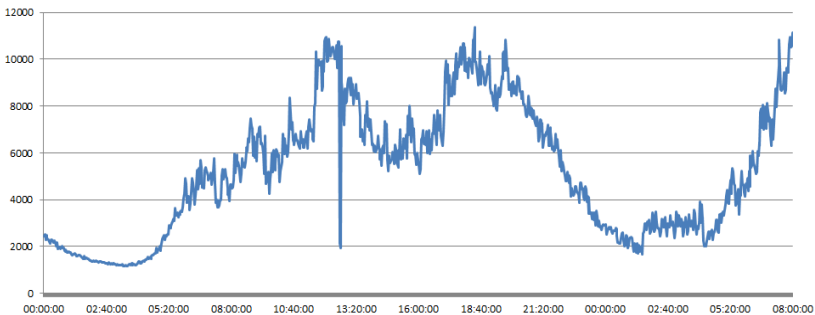
Quanto aos valores de corrente de operação e potência ativa, observa-se nas figuras 74 e 75 o fato de que ficam, na maioria do tempo, abaixo dos valores nominais, 21 A e 15 cv, variando conforme o controle em malha fechada, alcançando seus valores máximos em períodos do dia de alto consumo: ao meio dia e ao fim do dia.

Figura 74: Corrente de operação do *Booster* Muquém  
**Corrente de Operação [A]**



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

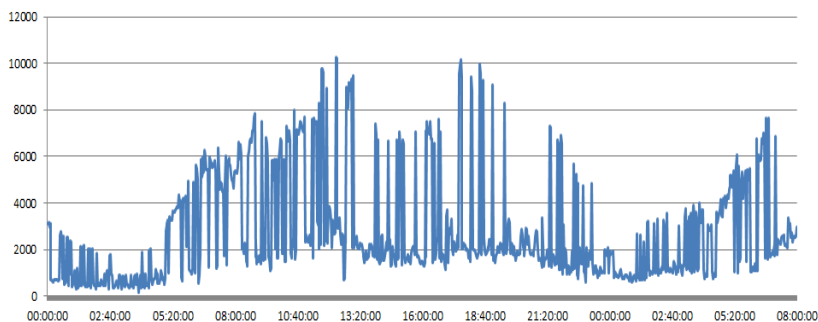
Figura 75: Potência Ativa de operação do *Booster* Muquém  
**P [W]**



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

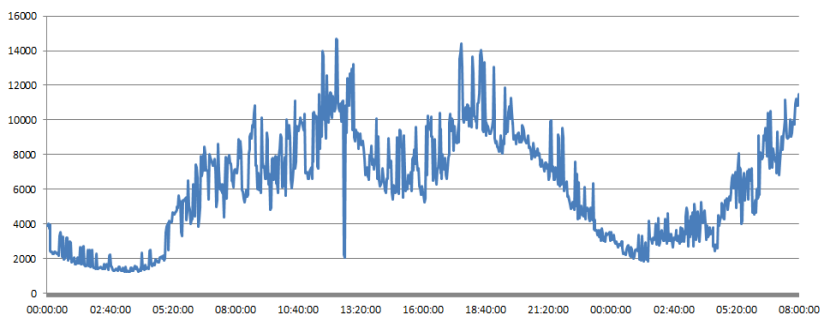
Há, novamente, a presença de picos de potência reativa, cominando, portanto, em picos de potência aparente, conforme figuras 76 e 77.

Figura 76: Potência reativa de operação do *Booster* Muquém  
Q [VAr]



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

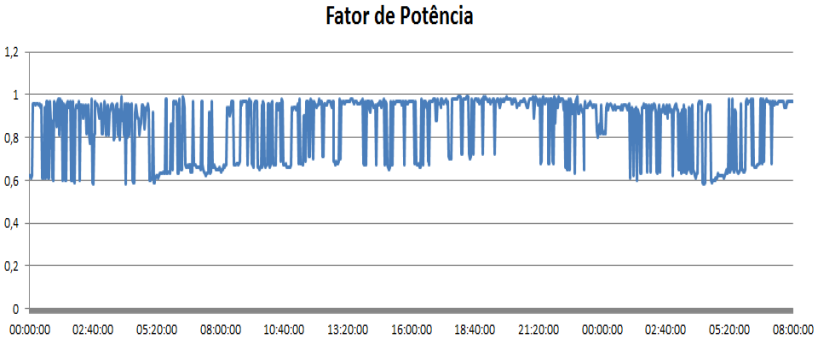
Figura 77: Potência aparente de operação do *Booster* Muquém  
S [VA]



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

Da mesma maneira, o fator de potência, mostrado na figura 78, obteve uma média baixa, motivado pelos constantes aumentos de potência reativa.

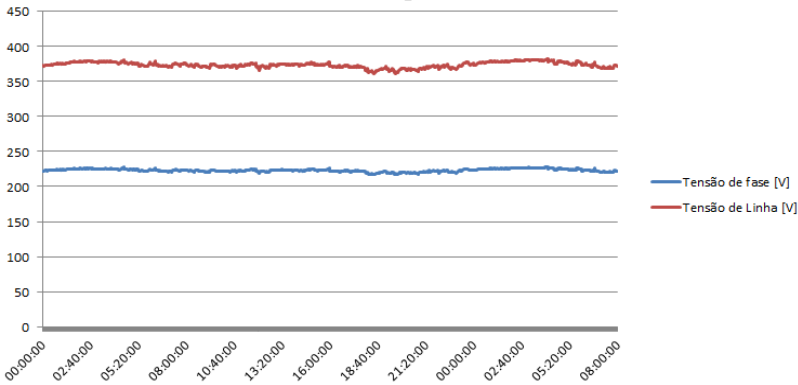
Figura 78: Fator de Potência de operação do *Booster* Muquém



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

As tensões de linha e fase estão dentro dos padrões de fornecimento como pode ser observado na figura 79.

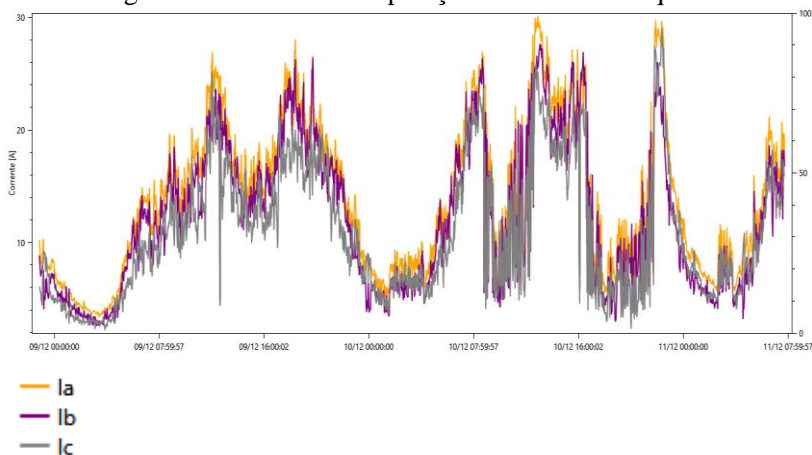
Figura 79: Média tensões de linha e fase de operação do *Booster* Muquém



Fonte: Autoria própria através de medidas realizadas pelo Analisador de Qualidade de Energia IMS P600.

Diferentemente dos outros dois *boosters*, as correntes trifásicas apresentaram um equilíbrio maior, sem muita disparidade de valores entre elas, conforme mostrado na figura 80.

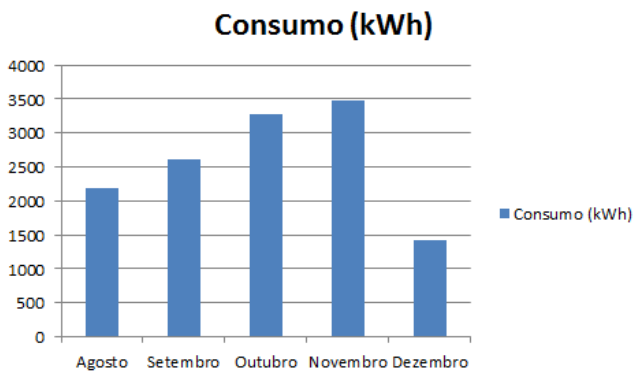
Figura 80: Correntes de operação do *Booster* Muquém



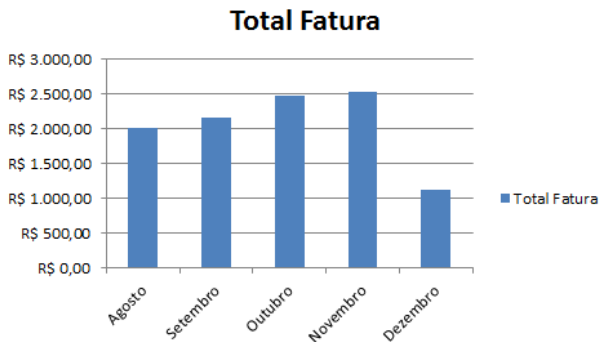
Fonte: *Software* do Analisador de Qualidade de Energia IMS P600

Em relação ao consumo e gastos com energia dos últimos cinco meses, obtiveram-se os valores apresentados nas figuras 81 e 82.

Figura 81: Consumo do *Booster* Muquém



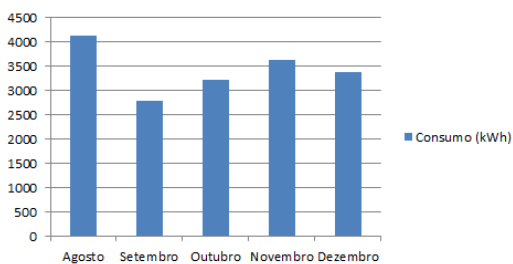
Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN

Figura 82: Faturas de energia do *Booster* Muquém

Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN

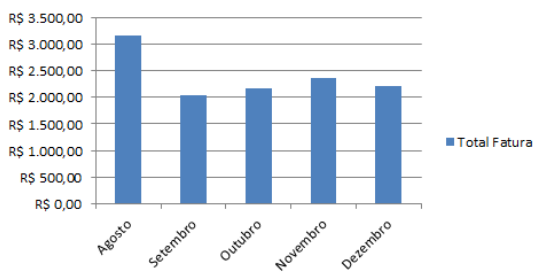
Fazendo novamente uma comparação, reuniram-se os valores referentes ao consumo e faturamento do *booster* Praia do Forte, mostrado nas figuras 83 e 84, o qual possui características de bomba e motor iguais ao Muquém e opera com partida através de chave *softstarter*. Buscou-se um local em que o consumo fosse semelhante para exemplificar o caso. Este *booster* trabalha com um controle clássico de acionamento por boia para enchimento de um reservatório que abastece o bairro, ou seja, sempre que o reservatório diminui seu nível a bomba entra em operação, sem qualquer controle de rotação. Como destacado anteriormente, as macro características do sistema são diferentes, fazendo com que não seja possível uma comparação com exatidão válida. Percebe-se, no entanto, desta vez, uma diferença sutil de consumo e faturamento entre os dois *boosters*, o que prova, portanto, que cada caso precisa ser estudado isoladamente e que, nesse projeto específico, um sistema clássico de bombeamento cumpre bem a função proposta em relação à diminuição do consumo, devendo outros fatores serem analisados individualmente, tais como perdas de carga, índices de manutenção na rede de água, índices de manutenção no conjunto moto-bomba, e a necessidade ou não de um controle remoto. Todos esses são fatores que devem ser ponderados para uma possível escolha de investimentos e melhorias ou seguimento da operação atual.

Figura 83: Consumo do *Booster* Praia do forte  
**Consumo (kWh)**



Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN

Figura 84: Faturas de energia do *Booster* Praia do forte  
**Total Fatura**



Fonte: Autoria própria através de dados cedidos pela CASAN





## 7 CONCLUSÃO

Através do estudo realizado com medidas em campo dos três *boosters*, e um aprofundamento teórico referente ao comportamento hidráulico dos bombeamentos, uma série de informações pôde ser constatada, observando sempre a necessidade não só da análise individual de cada local, mas também de um conhecimento amplo da rede de abastecimento de água para obter os melhores resultados e desfrutar das vantagens que a utilização do método pode proporcionar.

A implementação dos inversores com a realização do PID controlando a pressão de recalque traz uma série de vantagens. Inicialmente, pode-se abordar a principal: economia de energia. Com os relatos dos estudos realizados, tornou-se evidente que, quando o *booster* é bem projetado, respeitando as características da bomba, as suas curvas de vazão e a altura manométrica, bem como a rede que será abastecida, os resultados são bastante expressivos. Ressalta-se a importância da análise prévia, pois, como já citado, há sistemas em que outros métodos de partida ou controle, cumprem bem sua função. Evidentemente que, quando se pretende analisar uma operação e verificar se a mesma está funcionando da melhor forma possível não se deve utilizar embasamento apenas no consumo e faturamento de energia, pois existem fatores secundários de extrema importância que podem ser encarados como vantagens secundárias do método. Quando a pressão de recalque é mantida, os canos não precisam suportar níveis maiores de pressão, o que reduz o número de quebra de redes. Isso faz com que diminuam os chamados de manutenção, gastos com maquinário para obras no local, gastos com peças de reposição, deslocamento de funcionários (próprios e terceirizados) e com revitalização pós-obra, além de evitar desperdícios decorrentes de vazamentos subterrâneos ou aparentes de água já tratada, para a qual já se empenharam gastos com os processos de tratamento.

No que diz respeito à operação do motor e bomba, outra vantagem bastante importante refere-se ao trabalho mecânico das peças, que operam de maneira suave através do controle de rotação, prevenindo as constantes trocas de peças como rolamentos, selo mecânico e avarias no acoplamento do eixo. Novamente trazendo economia referente à manutenção e o que ela engloba.

O sistema de supervisor, através da telemetria com acesso remoto, é outro ponto bastante interessante e de importante utilização, sugerindo um aspecto tecnológico ao sistema de operação, permitindo que qualquer pessoa que tenha permissão, mesmo que leiga em relação a

inversores de frequência, possa realizar alterações remotamente, como velocidade de rotação, desligamento e acionamento do conjunto, verificar dados de operação, entre outros.

Algumas desvantagens da utilização dos inversores também são relevantes. Inicialmente, o investimento para instalação dos mesmos é bastante alto em comparação aos métodos tradicionais. Além da necessidade de estudos prévios realizados por pessoal capacitado com conhecimentos não só elétricos ou mecânicos, mas que tenham noção de sistemas hidráulicos e capacidade de realizar cálculos de alturas manométricas e perdas de carga, fato principalmente motivado pelas mudanças de parâmetros e curvas dos bombeamentos com a rotação variável. O investimento na mão de obra qualificada torna-se, portanto, imprescindível.

Há outras observações que podem ser enfrentadas como desvantagens, as quais são referentes ao funcionamento elétrico do método. Inversores costumam ter um aquecimento bastante intenso, ao ponto de ser necessário retirá-lo de dentro da caixa do *booster*, o que gera um investimento adicional para colocá-lo em um quadro separado e ventilado separadamente, além da falta de ventilação do próprio motor quando operando em rotações muito baixas, sendo de suma importância a função “dormir”.

A presença de harmônicas no sistema é algo bastante comum e que precisa ser contornada com ações de controle, principalmente para não prejudicar o funcionamento de outros equipamentos ligados à rede.

Conclui-se, portanto, que, através da análise dos três *boosters*, foi possível identificar sua forma de operação, como o sistema se comporta através das pressões de recalque e sucção ao longo do dia, e seus aspectos elétricos de forma geral, comprovando, assim, suas principais vantagens e desvantagens com a operação real em campo.

## 7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Destaca-se, através das medidas, uma possível necessidade de melhora nos índices de fator de potência, sugestão esta que pode nortear trabalhos futuros em estudo individualizado para cada local, analisando com escala apropriada e com maior precisão de medição dos momentos de aumento de potência reativa, a fim de descobrir suas causas e corrigi-las. Métodos que utilizam o controle de vazão para o PID também podem ser estudados a fim de comparar com os resultados obtidos neste trabalho, o qual é controlado por pressão e verificar os melhores desempenhos. Sugere-se também a análise de harmônicas na rede

proveniente dos inversores de frequência nos *boosters* e o estudo das melhores formas de atenuá-las.



## REFERÊNCIAS

AAB LIBRARY. **Manual do Utilizador:** Conversores de Frequência ACS355. 2018. Disponível em: <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000071763&LanguageCode=pt&DocumentPartId=1&Action=Launch>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

CHAPMAN, S. J. **Fundamento de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **História do Saneamento Básico de Florianópolis:** Água - Esgotos - Lixo. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/historia-do-saneamento-basico-de-florianopolis-agua-esgotos-lixo-2#0>>. Acesso em: 14 out. 2019.

DUTRA, R. F. **Análise de Melhorias em um Sistema de Bombeamento Municipal Visando à Eficiência Energética.** Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1859/TCC%20Rafael%20Fernando%20Dutra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 25 out. 2019.

ESCOLA POLITÉCNICA USP. **Roteiro de Experiência em Laboratório:** Estudo das Bombas: Aplicação da Análise Dimensional e da Teoria da Semelhança. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pme2237/lab/pme2237-rl-bombas-site.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2019.

FERREIRA, R. A. et. al. **Metodologia de Eficiência Energética Aplicada em Sistemas de Bombeamento.** Uberlândia, 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/figure/Curvas-caracteristicas-da-bomba-e-do-sistema-indicando-o-ponto-de-operacao\\_fig4\\_264037349](https://www.researchgate.net/figure/Curvas-caracteristicas-da-bomba-e-do-sistema-indicando-o-ponto-de-operacao_fig4_264037349)>. Acesso em: 29 out. 2019.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FLOWSERVE. **D800 Series:** Frame Mounted and Close Coupled General Industry Pumps. USA, 2008. Disponível em: <<https://www.flowserve.com/sites/default/files/2016-07/pss-10-6.1-e.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2019.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos.** 4ª Edição. São Paulo: Editora Érica, 2008. Disponível em: <<http://evtech.com.br/usuario/LIVRO%20Acionamentos%20El%C3%A9tricos%20-%20Claiton%20Moro%20Franchi.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2019.

FREITAS, G. V. C. de. **Eficiência Energética em Motor de Indução Trifásico do Através do Uso de Inversor de Frequência.** 2013. 85 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. RS, 2013. Disponível em: <[PWMhttp://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2237/TCC%20-%20Gabriel%20Freitas%20-%20oficial%29.pdf?sequence=1](http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2237/TCC%20-%20Gabriel%20Freitas%20-%20oficial%29.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 10 nov. 2019.

GRUPO WEG. **Guia de Especificação:** Motores Elétricos. Jaraguá do Sul, 2019. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2019.

GURGEL, B. B. F. A. **Proposição de uma Metodologia para Avaliação de Inversores de Frequência em Estações Elevatórias de Água:** Estudo de Casos no Sistema de Abastecimento de Água de São José dos Campos. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-13032007-011128/publico/MestradoBrenoGurgel.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

IMBIL. **Catálogo Linha INI.** 2015. Disponível em: <[http://www.imbil.com.br/Imbil/upload/produto/Portugues/INI\\_web.pdf](http://www.imbil.com.br/Imbil/upload/produto/Portugues/INI_web.pdf)>

>. Acesso em: 26 out. 2019.

JUSTINO, D.; NOGUEIRA, E. Dimensionamento do Sistema de Recalque para abastecimento de água da comunidade de Macundú, distrito de São João Marcos, município de Rio Claro, Rio de Janeiro. **Cadernos UniFOA**. Volta Redonda, Ano VII, n. 18, abril 2012. Disponível em: <<http://moodlead.unifoa.edu.br/revistas/index.php/cadernos/article/download/1080/942>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

KSB BRASIL. **Manual Técnico e Curvas Características KSB WKL**. Várzea Paulista, 2013. Disponível em: <[http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=mt\\_a177\\_0\\_0p\\_13.pdf&tipo=tecnicos](http://www.ksb.com.br/php/produtos/download.php?arquivo=mt_a177_0_0p_13.pdf&tipo=tecnicos)>. Acesso em: 01 nov.. 2019.

MAKINO, D. L. **Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água Usando Bombas de Rotação Variável**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, SP, 2012.

PACHECO, R. L. et. al. **Conversão Eletromecânica de Energia B**. Apostila do curso de EEL 7073 do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, 2010.

PENA, J. S. **Eficiência Energética por meio de um Controlador PI Autossintonizado por Lógica Fuzzy em Sistema de Distribuição de Água de um Setor da Grande Curitiba**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Sistemas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2018. Disponível em: <[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3116/1/CT\\_CPGEI\\_M\\_Pena%20Jailson%20Silv%C3%A9rio\\_2018.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3116/1/CT_CPGEI_M_Pena%20Jailson%20Silv%C3%A9rio_2018.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2019.

ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Curitiba, 2016.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Curvas ME-2 AP-27**. Disponível em: <<https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/203599/Curvas-ME-2.pdf>>. Acesso em: 25 out 2019.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Manual de Instruções:**

Bombas e Motobombas Franklin Electric. Joinville, 2019. Disponível em:

<[https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/255529/schneider\\_manual\\_instru%C3%A7%C3%B5es\\_geral\\_02-2019.pdf](https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/255529/schneider_manual_instru%C3%A7%C3%B5es_geral_02-2019.pdf)>.

Acesso em: 25 out. 2019.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Tabela de Seleção de Bombas e Motobombas Franklin Electric**. Revisão 08. Joinville, 2019. Disponível em:

<[https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/264019/schneider\\_tabela\\_selecao\\_01-2019\\_rev08.pdf](https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/264019/schneider_tabela_selecao_01-2019_rev08.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2019.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Tabela de Seleção ME-2**. Joinville, SC. Disponível em:

<<https://schneider.ind.br/produtos/motobombas-de-superf%C3%ADcie/large/multiest%C3%A1gios-horizontal/me-2/#TabeladeSeleo>>. Acesso em: 26 out. 2019.

STEFANELLI, R. et. al. **CASAN 45 Anos: Uma história cheia de futuro**. Florianópolis, SC: Fábrica de Comunicação, 2016. Disponível em:

<[https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/images/Noticias\\_Conteudo/LIVRO\\_CASAN\\_WEB\(1\).pdf](https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/images/Noticias_Conteudo/LIVRO_CASAN_WEB(1).pdf)>. Acesso em: 14 out. 2019.

TSUTIYA, M. T. Utilização de Inversores de Frequência para Diminuição do Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Bombeamento. In: VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa: 2006. **Palestra**. P. 05. Disponível em:

<<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/conferencia/VI%20serea%20palestra/p05.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2019.



## ANEXO A – Dimensionamento de fusíveis e cabos, Inversores ACS355.

Tipo ACS355-  x = E/U	Fusíveis		Tamanho do condutor de cobre em cablagens							
	gG	UL Classe T ou CC (600 V)	Alimentação (U1, V1, W1)		Motor (U2, V2, W2)		PE		Travão (BRK+, BRK-)	
	A	A	mm <sup>2</sup>	AWG	mm <sup>2</sup>	AWG	mm <sup>2</sup>	AWG	mm <sup>2</sup>	AWG
Trifásico $U_N = 380 \dots 480 \text{ V}$ (380, 400, 415, 440, 460, 480 V)										
03x-01A2-4	10	10	2,5	14	0,75	18	2,5	14	2,5	14
03x-01A9-4	10	10	2,5	14	0,75	18	2,5	14	2,5	14
03x-02A4-4	10	10	2,5	14	0,75	18	2,5	14	2,5	14
03x-03A3-4	10	10	2,5	12	0,75	18	2,5	12	2,5	12
03x-04A1-4	16	15	2,5	12	0,75	18	2,5	12	2,5	12
03x-05A6-4	16	15	2,5	12	1,5	14	2,5	12	2,5	12
03x-07A3-4	16	20	2,5	12	1,5	14	2,5	12	2,5	12
03x-08A8-4	20	25	2,5	12	2,5	12	2,5	12	2,5	12
03x-12A5-4	25	30	6	10	6	10	6	10	2,5	12
03x-15A6-4	35	35	6	8	6	8	6	8	2,5	12
03x-23A1-4	50	50	10	8	10	8	10	8	6	10
03x-31A0-4	80	80	16	6	16	6	16	6	10	8
03x-38A0-4	100	100	16	4	16	4	16	4	10	8
03x-44A0-4	100	100	25	4	25	4	16	4	10	8

Fonte: manual ABB ACS355



**ANEXO B – Programação Base parametrizada nos *boosters* estudados.**

Conjunto	Parâmetro	Descrição
99	9901	Escolha do idioma, 5 Português
	9902	Define qual será a utilização base do inversor e para cada opção altera as ligações dos terminais E/S, para PID 6.
	9904	Modo de controle, Vetorial, 1
	9905	Tensão nominal do motor
	9906	Corrente nominal do motor
	9907	Frequência nominal do motor
	9908	Velocidade nominal do motor
	9909	Potência nominal do motor
	11	1104
1105		Rotação máxima do motor para corrente máxima.
13	1301	Defini a faixa de valores de corrente para a entrada analógica EA1, 20% será assumido como de 4 a 20mA.
	1304	Defini a faixa de

		valores de corrente para a entrada analógica EA2, 20% será assumido como de 4 a 20 mA.
	1305	Valor máximo para EA2, necessário visto que será a leitura constante para o PID. Parametrizado com 100%, correspondente a 20 mA.
14	1401	Define o fechamento ou abertura da saída à relé, indicando uma anomalia por exemplo. Valor 9, indicando uma supervisão, ou seja, estará supervisionando a entrada analógica EA1, a sucção. Quando o valor estiver abaixo do pré-determinado, falta de água na sucção, irá desligar.
16	1604	Seleciona uma entrada digital para rearme de falhas, como padrão utiliza-se a entrada digital 3.
20	2001	Velocidade Mínima
	2002	Velocidade Máxima, nominal
	2003	Corrente Máxima do motor, nominal somada ao fator de serviço.
	2017	Torque máximo,

		em torno de 110%
21	2102	Seleciona o tipo de paragem do motor, numero 2, por rampa.
	2103	Tempo de magnetização do motor, 0,3 s.
22	2202	Define o tempo de rampa de aceleração, padrão: 5s.
	2203	Define o tempo de rampa de desaceleração, padrão: 5 s.
	2204	Seleciona o tipo de curva, no caso S, caracterizada por transição uniforme.
30	3001	Valor 1, desliga o motor no caso de perda do sinal do transmissor para segurança.
	3003	Valor 1, habilita EAD1 como falha externa.
	3013	Valor 1, habilita a função de subcarga, com parada por inércia do motor.
	3014	Tempo para gerar a falha de subcarga, padrão: 120 s.
	3015	Valor 1, escolha da curva de subcarga de acordo com gráfico disponível em manual.
	3021	Limite mínimo de falha do transmissor EA1, padrão: 17,5%

	3022	Limite mínimo de falha do transmissor EA2, padrão: 17,5%
31	3101	Numero de tentativas de rearme automático, padrão: 3.
	3102	Tempo entre tentativas 30s.
	3103	Tempo entre detecção e rearme, padrão: 10 s.
	3104	Valor 1 para rearme por sobrecorrente
	3105	Valor 1 para rearme por sobretensão
	3106	Valor 1 para rearme por subtensão
	3107	Valor 1 para rearme por perda transmissor
	3108	Valor 1 para rearme por falha externa
32	3201	Valor 120, habilita a EA1 como supervisão 1.
	3202	Parâmetro para indicar a pressão limite inferior para a bomba desligar por baixa pressão e evitar cavitação. Depende de cada local, expressa em percentagem.
	3203	Limite para a bomba religar com volta da pressão de sucção.
40	4002	Tempo de

		integração, quanto menor o valor mais rápido ocorre a correção do erro. Um valor muito baixo, no entanto, pode causar instabilidade no controle. Padrão: 5 s.
	4003	Tempo de derivação, quanto maior o tempo de derivação maior o reforço da saída do controlador referente à velocidade no momento da alteração. Padrão: 5 s.
	4006	Unidade utilizada, BAR. Padrão: 22
	4010	Referência PID, diz respeito ao set point interno. Padrão: 19
	4011	Setpoint, valor referente a saída analógica 2, recalque. A qual a bomba irá trabalhar para manter a pressão ajustada. Depende de cada local, expressa em percentagem da faixa de corrente do transmissor.
	4022	Ativar a opção dormir, ou seja, pressão de recalque já no nível ideal e rotação abaixo da pré-definida para dormir, não tendo a necessidade da operação da bomba. Ocorre em alguns locais

		em horários de pouco ou nenhum consumo. Padrão: 7.
	4023	Rotação para iniciar a função dormir.
	4024	Tempo com rotação abaixo da pré-definida como mínima para dormir.
	4025	Percentual de pressão abaixo do setpoint para iniciar a operação da bomba novamente.
	4026	Tempo para iniciar operação após ultrapassar limite inferior do setpoint.

Fonte: Autoria própria, utilizando programação base da empresa TecnoControl.