

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica

**MODELO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO APLICADO À OPERAÇÃO DE REDES  
DE ABASTECIMENTO HÍDRICO**

João Pablo Santos da Silva

**Orientador:** Prof. Dr. José Luiz da Silva Júnior  
**Coorientador:** Prof. Dr. José Alberto Nicolau de Oliveira

Natal, RN

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica

**MODELO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO APLICADO À OPERAÇÃO DE REDES  
DE ABASTECIMENTO HÍDRICO**

João Pablo Santos da Silva

**Orientador:** Prof. Dr. José Luiz da Silva Júnior

**Coorientador:** Prof. Dr. José Alberto Nicolau de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da UFRN (Área de concentração: Sistemas Embarcados) como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Natal, RN

2019

João Pablo Santos da Silva

**MODELO DE SISTEMA DE AUTOMAÇÃO APLICADO À OPERAÇÃO DE REDES  
DE ABASTECIMENTO HÍDRICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica da UFRN (Área de concentração: Sistemas Embarcados) como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Aprovada em 17 de maio de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Luiz da Silva Júnior  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Prof. Dr. José Alberto Nicolau de Oliveira  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Prof. Dr. Rafael Nunes de Almeida Prado  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Natal, RN

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, João Pablo Santos da.

Modelo de sistema de automação aplicado à operação de redes de abastecimento hídrico / João Pablo Santos da Silva. - 2019.  
142f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Energia Elétrica, Natal, 2019.

Orientador: Dr. José Luiz da Silva Júnior.

Coorientador: Dr. José Alberto Nicolau de Oliveira.

1. Controle - Dissertação. 2. Cidades inteligentes - Dissertação. 3. Telemetria de dados - Dissertação. 4. Redes industriais - Dissertação. 5. Sistema embarcado - Dissertação. I. Silva Júnior, José Luiz da. II. Oliveira, José Alberto Nicolau de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter dado a oportunidade realizar tudo que consegui até hoje e guiado meus passos pelos melhores caminhos.

Aos meus pais, Josuérito e Jussilane, que sempre me deram apoio e me incentivaram a seguir o caminho da educação e do respeito, vislumbrando o melhor do meu potencial e meu sucesso profissional. Não medindo esforços em nenhum aspecto para ver o meu sucesso.

A minha namorada Luciana de Almeida que está sempre ao meu lado e que me acompanha nos desafios diários e na superação de barreiras, me dando forças e acreditando na caminhada até meus objetivos.

Aos meus orientadores, José Luiz e Alberto Nicolau que me proporcionaram as devidas orientações para a realização e implementação do projeto.

Agradeço ao eng. Boanerges Vitor, assim como a toda equipe da UDCN, por toda orientação, conhecimento e auxílio para executar com sucesso os novos procedimentos nas rotinas diárias e implementar as novas tecnologias. Além disso, sou grato pela confiança da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte em possibilitar a realização deste projeto.

A todos aqueles que acreditaram na realização deste trabalho e deram-me forças e estímulo para dar prosseguimento a esta pesquisa e obter sucesso. Seus nomes são inesquecíveis e por isso, dedico-lhes minha profunda admiração e respeito.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	11
<b>RESUMO</b> .....	14
<b>ABSTRACT</b> .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA E OBJETIVO .....	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	23
2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO HÍDRICO .....	23
2.2 CONTROLE DAS PERDAS HÍDRICAS .....	24
2.3 MOTORES ELÉTRICOS .....	25
2.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA .....	28
2.5 BOMBAS CENTRÍFUGAS .....	29
2.5.1 <b>Eficiência de bombas para rotação constante</b> .....	31
2.5.2 <b>Efeito da mudança da rotação da bomba</b> .....	31
2.5.3 <b>Eficiência das bombas para variação de rotação</b> .....	32
2.5.4 <b>Controle de vazão por variadores de velocidade</b> .....	32
2.6 ANÁLISE FUNCIONAL DOS VARIADORES DE VELOCIDADE .....	34
2.7 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL .....	36
2.7.1 <b>Sensores e Atuadores</b> .....	38
2.7.2 <b>Controle e Supervisão</b> .....	40
2.7.3 <i>Enterprise Production System</i> .....	40
2.7.4 <i>Enterprise Resource Planning</i> .....	40
2.8 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO <i>MODBUS</i> APLICADOS À OPERAÇÃO .....	41
2.8.1 <b>Padrão RS485 de Interface Serial</b> .....	42
2.8.2 <i>Modbus</i> .....	43

2.9 SUPERVISÃO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS .....	43
2.10 IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS .....	44
2.10.1 Etapas de Identificação de Sistemas Lineares .....	45
2.10.2 Modelo ARX.....	46
2.10.3 Modelo ARMAX.....	47
2.10.4 Modelo de Erro na Saída .....	48
2.10.5 Modelo de Box-Jenkins .....	48
2.11 WAVELET.....	49
3 METODOLOGIA.....	51
4 DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE.....	57
4.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO .....	57
4.1.1 Medidor de vazão eletromagnético .....	58
4.1.2 Medidor de vazão ultrassônico .....	63
4.1.3 Transmissor de pressão SMAR.....	65
4.2 MEDIDOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS.....	67
4.3 MEDIÇÃO DE PRESSÃO.....	69
4.3.1 Sensor capacitivo .....	69
4.4 ELEMENTO CONTROLADOR .....	70
5 SISTEMA DE TELEMETRIA DE DADOS .....	71
5.1 MODEM DE TRANSMISSÃO .....	73
5.2 TRANSMISSÃO ELETRÔNICA.....	75
5.3 TRANSMISSÃO SERIAL DE DADOS.....	76
5.4 REDES INDUSTRIAIS .....	77
5.4.1 Endereçamentos Lógicos dos Dados .....	79
5.4.2 Modos de Mensagem .....	79
5.4.3 Temporização no <i>Modbus</i> .....	80
6 SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	81

6.1 ARQUITETURA: COMPONENTES DO SISTEMA SCADABR .....	81
6.2 SCADABR .....	82
6.2.1 Funcionalidades do ScadaBR .....	83
6.2.2 Telas de aplicação e objetos .....	85
6.2.3 Bibliotecas .....	86
6.2.4 TAGS .....	86
6.2.5 Drivers .....	86
6.2.6 Alarmes.....	87
6.2.7 Relatório .....	87
6.3 DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES DE SUPERVISÃO.....	88
6.4 METODOLOGIA DA ESTRUTURA DE TELAS .....	90
6.5 BOLETIM OPERACIONAL .....	94
<b>7 SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>96</b>
7.1 PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO .....	97
7.1.1 Acionamento Remoto .....	107
<b>8 SISTEMA EMBARCADO INTELIGENTE .....</b>	<b>110</b>
8.1 SISTEMA DE PONTA NEGRA.....	112
8.2 PERFIL DO SISTEMA ESTUDADO .....	117
8.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE ANOMALIA HIDRÁULICA... 119	
<b>9 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA .....</b>	<b>122</b>
9.1 CARACTERÍSTICAS DA ANÁLISE DO INVESTIMENTO .....	122
9.2 ANÁLISE DE RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO PROPOSTO.....	123
9.3 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO.....	124
<b>10 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>11 CONCLUSÃO.....</b>	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>142</b>

## LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
API	<i>Aplication Programing Interface</i>
CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CCO	Centro de Controle Operacional
CLP	Controlador Lógico Programável
CRD	Centro de Reservação e Distribuição
DCS	<i>Digital-Coded Squelch</i>
EEAT	Estação Elevatória de Água Tratada
EERP	Estação Elevatória de Reforço de Pressão
EPS	<i>Enterprise Production Systems</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GM	<i>General Motors</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
MODICON	<i>Modular Digital Control</i>
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
OPC	<i>Open Platform Communications</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
PNDCA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
RFI	Interferência de Frequência de Rádio
RTU	<i>Remote Terminal Units</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>

SDCD	Sistemas Digitais de Controle Distribuído
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VHDL	<i>Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language</i>
VRP	Válvula reguladora de pressão

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo simplificado de infraestrutura de abastecimento. ....	23
Figura 2 - Bomba centrífuga.....	29
Figura 3 - Curvas de isoeffiência com curvas de bomba de diferentes diâmetros de rotor. ...	31
Figura 4 - Variação da curva da bomba através da variação da rotação. ....	32
Figura 5 - Curvas de isoeffiência da bomba utilizando as leis de Semelhança. ....	32
Figura 6 - Curva do sistema convencional com controle de vazão através de válvulas.....	33
Figura 7 - Pirâmide de hierarquia de automação.....	39
Figura 8 - Representação esquemática do modelo ARX.....	46
Figura 9 - Representação esquemática do modelo manipulada ARX. ....	47
Figura 10 - Representação esquemática do modelo ARMAX. ....	47
Figura 11 - Representação esquemática do modelo manipulada ARMAX.....	47
Figura 12 - Representação esquemática do modelo de erro na saída. ....	48
Figura 13 - Representação esquemática do modelo Box-Jenkins. ....	48
Figura 14 - Dimensão operacional do sistema.....	52
Figura 15 - Metodologia de projeto. ....	54
Figura 16 - Base de instrumentos analógicos. ....	55
Figura 17 - Linha temporal da tecnologia operacional.....	56
Figura 18 - Medidor de vazão eletromagnético (sensor e conversor). ....	59
Figura 19 - Placa de identificação e indicação do sentido de fluxo. ....	60
Figura 20 - Caixa de derivação na parte superior do medidor.....	60
Figura 21 - Placa de identificação do elemento conversor.....	61
Figura 22 - Display do medidor de vazão.....	62
Figura 23 - Gráfico representativo de comportamento da vazão.....	63
Figura 24 - Medidor ultrassônico <i>clamp-on</i> . ....	64
Figura 25 - Sensores instalados com destaque para área sem pintura. ....	65
Figura 26 - Diagrama funcional do medidor de vazão. ....	66
Figura 27 - Terminologia de calibração. ....	67
Figura 28 - Multimissor de grandezas elétricas. ....	67
Figura 29 - Esquema de ligação do sinal de entrada. ....	68
Figura 30 - Esquema de ligação da interface de comunicação.....	68
Figura 31 - Transmissor capacitivo NP300. ....	69
Figura 32 - Esquema elétrico do transmissor capacitivo NP300.....	70

Figura 33 - Controlador N1540. ....	70
Figura 34 - Esquema funcional do sistema de telemetria de dados. ....	71
Figura 35 - Painel frontal do modem celular. ....	75
Figura 36 - Tela de login do sistema. ....	90
Figura 37 - Tela de monitoramento dos <i>links</i> de comunicação. ....	90
Figura 38 - Tela de monitoramento do nível dos reservatórios. ....	91
Figura 39 - Tela de monitoramento de um sistema produtor. ....	92
Figura 40 - Tela de monitoramento de status das unidades produtoras. ....	93
Figura 41 - Tela de monitoramento individual da unidade de produção. ....	93
Figura 42 - Tela de monitoramento das variáveis internas do ScadaBR. ....	94
Figura 43 - Curva corrente x torque de um sistema de recalque com <i>soft starter</i> . ....	99
Figura 44 - Relação do custo do inversor de frequência pela potência do motor. ....	101
Figura 45 - Diagrama de controle manual. ....	102
Figura 46 - Área e pontos críticos de abastecimento. ....	103
Figura 47 - Diagrama de controle automático. ....	104
Figura 48 - Diagrama funcional de controle. ....	104
Figura 49 - Comparativo dos comportamentos de pressão. ....	105
Figura 50 - Diagrama de potência de uma partida direta. ....	108
Figura 51 - Diagrama de comando de uma partida direta. ....	109
Figura 52 - Banco de filtros. ....	111
Figura 53 - Diagrama funcional do sistema de Ponta Negra. ....	113
Figura 54 - Esquema de ligação dos medidores em campo. ....	114
Figura 55 - Esquema funcional do fluxo de dados. ....	115
Figura 56 - Topologia de ligação de campo 01. ....	116
Figura 57 - Topologia de ligação de campo 02. ....	117
Figura 58 - Perfil da zona de abastecimento. ....	117
Figura 59 - Comportamento do sistema de bombeamento a partir de variações de carga. ....	118
Figura 60 - Comportamento de descontinuidades de abastecimento. ....	118
Figura 61 - Processo de filtragem em cascata do sinal. ....	120
Figura 62 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível. ....	120
Figura 63 - Coeficientes de detalhe do segundo nível. ....	121
Figura 64 - Coeficientes de detalhe do terceiro nível. ....	121
Figura 65 - Fluxo de caixa para o investimento proposto. ....	123
Figura 66 - Comparativo de consumo de energia elétrica com controle e sem controle. ....	125

Figura 67 - Comparativo do custo total da fatura de energia com controle e sem controle...	126
Figura 68 - Evolução da quantidade de horas trabalhadas. ....	127
Figura 69 - Número de acionamentos da unidade operacional. ....	127
Figura 70 - Comportamento da pressão de recalque. ....	128

## RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de automação para operação de redes de abastecimento hídrico presentes na Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), através da utilização de instrumentação adequada para monitoramento das variáveis de campo, unidades de controle para otimização do sistema de abastecimento, telemetria de dados, implantação de sistema supervisório e proposta de um método para detecção de anomalias hidráulicas. O desenvolvimento do projeto proposto tomou como base conceitos de cidades inteligentes para o estabelecimento de um controle sustentável e gestão eficiente, além da utilização de redes industriais. Para o incremento da eficiência operacional o trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema embarcado inteligente para detecção de anomalias hidráulicas que utiliza a transformada *wavelet*. A partir de sua implementação será possível observar melhorias na operação do sistema, permitindo tomadas de decisão mais rápidas com base em variáveis monitoradas em tempo real, bem como a geração de informações até então desconhecidas tendo em vista o baixo índice de instrumentação atual e ausência da telemetria de dados.

**Palavras-chave:** Controle, Cidades Inteligentes, Telemetria de Dados, Redes Industriais, Sistema Embarcado.

## ABSTRACT

This work presents the implementation of an automation system for the operation of water supply networks present at the Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), through the use of adequate instrumentation to monitor the field variables, control units for optimization of the supply system, data telemetry, implementation of supervisory system and the proposal of a method for detecting hydraulic anomalies. The development of the project was based on concepts of intelligent cities for the establishment of sustainable control and efficient management, in addition to the use of industrial networks. In order to increase the operational efficiency, the work addresses the development of an intelligent embedded system for the detection of hydraulic anomalies that uses the wavelet transform. From the implementation it was possible to observe a substantial improvement in the operation of the system, allowing faster decision making based on variables monitored in real time. In addition to the generation of information that was not known due to the low index of initial instrumentation and absence of data telemetry.

**Keywords:** Process Control, Smart Cities, Data Telemetry, Industrial Networks, Embedded System.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria moderna necessita cada vez mais de criação e utilização de sistemas integrados, tendo em vista a emergente requisição gerencial de que o fluxo de informações advindas do chão de fábrica siga até os sistemas de tomada de decisão de forma otimizada e com a menor taxa de erro possível no que diz respeito à integração e interoperabilidade<sup>1</sup>.

A automação industrial possui uma estrutura regida por uma pirâmide organizacional constituindo uma composição de informações isoladas, sendo estas conectadas muitas vezes por *softwares* proprietários, fornecidos por apenas um fabricante, construindo uma vinculação fechada com o fornecedor. Dessa forma, a integração entre os diversos níveis operacionais e gerenciais fica prejudicada, impossibilitando conexões simples de serem realizadas, principalmente devido ao alto custo de implementação e incompatibilidade técnica.

O advento e popularização dos computadores pessoais no cotidiano industrial trouxe mudanças significativas para as áreas de análise e monitoramento de dados, assim como na otimização de atuação em sistemas dinâmicos. A partir dessa mudança de paradigma de atuação operacional surgiram os sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) que se tornaram elementos fundamentais na supervisão de processos de automação, principalmente por permitir a aquisição de dados advindos dos processos de campo e a disponibilização de forma visual adequada para operadores das plantas. Duas ferramentas adicionais se tornaram essenciais para o sucesso do uso dos sistemas SCADA: a geração de relatórios e de gráficos *online*. No entanto, ambas possuem uma limitação relevante na utilização cotidiana que é a capacidade de armazenamento de dados históricos por um longo período.

Unidades industriais, cujos processos envolvem fluidos, são denominadas indústrias de processo. Esse tipo de indústria utiliza equipamentos estáticos, dinâmicos, elétricos e acessórios para compor sua unidade. Para o seu funcionamento, de acordo com a qualidade exigida por normas e regulamentos, é necessária a existência de um controle permanente, sendo fundamental manter estáveis a pressão, a vazão e o nível. A partir disso, os processos industriais exigem controle de fabricação de seus produtos, seja petróleo, gás natural ou água. Nesse âmbito, os instrumentos de medição e controle permitem melhorar a qualidade, aumentar a quantidade de produto ofertado e a sua segurança.

A Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) está contida na definição de unidade industrial. Tendo em vista as correlações existentes entre os processos,

---

<sup>1</sup> Interoperabilidade é a capacidade de um sistema de se comunicar de forma transparente com outro sistema. Para um sistema ser considerado interoperável, é muito importante que ele trabalhe com padrões abertos.

equipamentos e variáveis utilizadas na área de saneamento e na área de engenharia de uma forma geral, será desenvolvido um trabalho baseado em sistemas de controle, instrumentação, automação e análise de dados na CAERN. Diante da complexidade do sistema de saneamento não basta a simples aquisição de dados, é necessário o estabelecimento da conexão desses equipamentos através da telemetria com um sistema supervisorio que pode ser acompanhado numa central de controle operacional.

Os sistemas públicos de abastecimento de água sempre apresentaram um modo operacional relativamente complexo em função da grande distribuição geográfica de suas plantas industriais. Além disso, o crescimento desordenado dos grandes centros urbanos é apontado como o principal responsável pela complexidade operacional mencionada, obrigando as companhias de saneamento a incrementarem seus sistemas a fim de atender a todas as condições e demandas impostas pelas distâncias e topografias adversas.

Por outro lado, a ausência de investimentos no setor energético, nas últimas décadas, levou este sistema a uma situação bastante crítica, resultando em medidas que foram desde a criação do Programa de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (1985), depois alterado para Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (1995), até a elevação do custo da energia elétrica. Este custo era fortemente subsidiado nas décadas de 60 e 70, chegando em 1968 a um índice de 80 % de subsídio nas tarifas de energia elétrica para as empresas de saneamento. A partir da década de 90, houve uma redução gradativa desse subsídio até o índice atual de 15 %.

Porém, tudo isso não foi o suficiente e ainda no ano de 2000, já se podia fazer previsões nada otimistas para o setor energético cuja possibilidade de um racionamento iminente só seria afastada caso as chuvas e os níveis operacionais dos reservatórios das centrais energéticas viessem a melhorar, conforme Amigo (2000). Diante desse panorama, a palavra de ordem na atualidade tem sido o uso racional da energia elétrica, que se soma no combate ao desperdício e a perda física de água ao cotidiano das empresas de saneamento. Em condições tão desfavoráveis, os inversores de frequência nunca foram tão importantes como agora, com a missão de racionalizar o uso da energia elétrica sem afetar a operação do sistema de abastecimento.

A proposta de investigação será centrada nos aspectos da implantação de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água, visando extrair o máximo potencial deste dispositivo, principalmente no que tange a otimização operacional do sistema e a redução do consumo de energia elétrica, motivado pelo forte apelo da realidade atual do setor energético do país. Com o escopo baseado na linha de eficiência energética será concebido um projeto que

possui como área de interesse principal as empresas de saneamento, tendo-se estabelecido como referência para o desenvolvimento do trabalho a empresa CAERN, especificamente na Superintendência de Natal.

Neste contexto, o presente estudo irá propor o estabelecimento de parâmetros de referência para o emprego de inversores, tendo como base uma análise crítica dos aspectos operacionais relacionados à sua implantação, aspectos referentes às máquinas a que esse dispositivo será acoplado (motor elétrico e bomba centrífuga) e ao sistema de tarifação de energia elétrica.

Como forma de avaliação e definição das proposições ora estabelecidas pretende-se desenvolver estudos de caso de instalações que empregam inversores de frequência, o que permitirá alcançar o objetivo final delineado para este trabalho. A síntese final de conclusão dessa pesquisa visa a elaboração de um fluxograma que contemple os tópicos principais para aplicação adequada de inversores de frequência em sistema de bombeamento.

Nos sistemas de abastecimento hídrico, a degradação de desempenho de equipamentos é vista como resultado do uso, exposição ao ambiente, passagem do tempo e desgaste de peças. Estes fatores diminuem a confiabilidade do sistema de distribuição de água e aumentam a probabilidade de falhas. Assim, a detecção do comportamento de sistemas é útil para avaliar os efeitos provocados pela degradação, sustentar o correto funcionamento dos equipamentos e diminuir a ocorrência de defeitos e falhas (DJURDJANOVIC et al., 2003). Aliado a isso, a complexidade cada vez maior dos sistemas, com a aceleração da automação, transformou a confiabilidade e a disponibilidade em fatores primordiais para um bom desempenho operacional.

Entre as ferramentas matemáticas atualmente utilizadas para o desenvolvimento de sistemas de detecção de padrões citam-se as da área de processamento de sinais, de inteligência artificial e de filtragem adaptativa. O processamento de sinais compreende a análise de sinais de modo a capturar informações destes e deixá-los mais adequados a alguma aplicação. Entre as técnicas de processamento de sinais mais utilizadas pode-se citar a transformada de Fourier e a transformada *wavelet* (LATHI, 1998; SARKAR, 1998).

Estas técnicas podem ser empregadas, por exemplo, na decomposição do sinal de sensores, instalados em máquinas, no domínio do tempo e frequência, localizando o espectro de frequências destes sinais (PARRAGA, 2002); podem também ser usadas para o reconhecimento de padrões (QUISPE, 2005); ou na detecção de falhas. As ferramentas de processamento de sinais são muito utilizadas na extração de características, no reconhecimento

de padrões e na detecção de anomalias hidráulicas, por exemplo, geralmente em conjunto com técnicas estatísticas ou de filtragem adaptativa.

Um sistema de detecção de anomalias embarcado é projetado para coletar informações de sensores, processar dados e atuar sobre o equipamento a ele conectado. Neste trabalho, pretende-se desenvolver em *hardware* um conjunto de ferramentas para a implementação de um sistema inteligente de detecção de anomalias hidráulicas. Para isto, serão utilizadas plataformas que possuam elementos programáveis. A ideia básica é embarcar as ferramentas matemáticas, além de outras funcionalidades, em FPGA (*Field Programmable Gate Array*) e usá-las em uma placa para auxiliar no controle de atuadores elétricos. O embarque se faz necessário visto que, por meio dos sistemas embarcados, é possível realizar tarefas específicas, em especial, em tempo real. Além disso, é possível alterar rapidamente as especificações, aumentar a confiabilidade e reduzir custos com o uso de sistemas embarcados. Sendo assim, será desenvolvido em VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*) um sistema embarcado, voltado para a detecção de anomalias hidráulicas, baseado em ferramentas de processamento de sinais.

As ferramentas de processamento de sinais analisadas serão: a transformada de Fourier, a transformada de Fourier com janelamento e a transformada *wavelet*. Através do uso destas técnicas será possível extrair as informações características dos sinais dos sensores de pressão e nível para cada tipo de comportamento (extravasamento de reservatório de armazenamento, entrada e saída de carga de grande porte e vazamento na rede de distribuição), permitindo a detecção de uma falha operacional. Além disto, o uso correto destas ferramentas de processamento de sinais permitirá o incremento da confiabilidade e disponibilidade dos sistemas de abastecimento, tendo em vista a redução na carga de análise e filtragem de sinais executada no sistema supervisor.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA E OBJETIVO

A ineficiência das companhias de saneamento reduz a capacidade de investimento tornando tardia a expansão e a melhoria dos sistemas de abastecimento hídrico através da implantação de novas tecnologias e técnicas. Além disso, o quadro de escassez de recursos hídricos devido à poluição dos mananciais, à irregularidade na distribuição demográfica e à indisponibilidade de água em certas regiões do país, vem se agravando e comprometendo as necessidades básicas da sociedade (MORENO, 2009).

A redução dos índices de perdas em sistemas de abastecimento promove a redução dos custos de produção para a mesma quantidade de água entregue para os consumidores, tendo em vista que o volume hídrico captado, tratado e transportado diminui, possibilitando a redução, também, da quantidade de produtos químicos utilizados no tratamento (BRION, 1991). Ações voltadas para a melhoria da eficiência das distribuidoras tornaram-se prioridade e por isso estão contempladas no escopo das atividades de maior importância das principais companhias de saneamento. Apesar disso, o desenvolvimento destas atividades exige a utilização de mão de obra técnica especializada somado ao grande investimento em intervenções nas redes de abastecimento.

Atualmente, grande parte das atividades de detecção de anomalias é realizada de maneira pontual e em situações críticas, demandando paradas operacionais que provocam o desabastecimento de grandes áreas. Deste modo, um sistema embarcado de detecção de anomalias pode contribuir para o incremento na eficiência destas análises, ainda mais pelo fato de realizar esta tarefa em tempo real e de forma distribuídas nas plantas industriais.

Levando em consideração a dimensão dos sistemas automáticos que controlam as redes de distribuição, características como supervisão remota, autonomia e redundância automática dos dispositivos tornam-se imprescindíveis, já que possibilitam o gerenciamento do conjunto com uma reduzida necessidade de intervenção humana. A automação dos sistemas de abastecimento hídrico consiste em coletar, concentrar e analisar as informações do processo através do auxílio de ferramentas de tecnologia da informação. E baseado nos resultados fornecidos pelos instrumentos de campo, os sistemas de automação agem de maneira autônoma sobre as grandezas do processo para obtenção dos padrões operacionais desejados.

A autonomia dos sistemas é possibilitada pela inserção de parâmetros desejados nos dispositivos de controle que compõem a planta. Tais parâmetros são baseados em dados e estudos empíricos, obtidos por meio da coleta de informações em diversos pontos do sistema de abastecimento por meio da telemetria dos dados de campo. Após a parametrização dos dispositivos, estes podem tomar decisões e controlar, de forma autônoma, a malha da qual fazem parte, viabilizando o gerenciamento efetivo de variáveis como pressão e vazão (SILVA, 2017). A convergência de mecanismos como a autonomia e o gerenciamento online dos dados de campo em uma mesma tecnologia aplicada a sistemas de controle industriais é relativamente recente, tendo surgido a partir do advento dos instrumentos industriais microprocessados operando por meio de protocolos digitais de comunicação.

No entanto, o aumento substancial da instrumentação que utiliza esta tecnologia só ocorreu recentemente, com a adoção de protocolos digitais abertos pelos grandes fabricantes

objetivando o estabelecimento de padrões para a comunicação dos equipamentos de campo. Apesar disso, há um baixo desenvolvimento de pesquisas voltadas à exploração de recursos avançados disponibilizados por essa tecnologia, além de uma reduzida aplicação destes recursos na resolução de deficiências e melhoria da eficiência de sistemas automáticos utilizados para o controle do sistema hídrico de abastecimento (PEREIRA, 2003).

Por meio deste estudo serão apresentadas soluções orientadas à automação de sistemas de abastecimento hídrico aplicadas à eficiência energética e controle de sistemas fazendo-se uso de recursos disponibilizados pelo protocolo digital para aplicação industriais *Modbus* e pelos inversores de frequência. Estas soluções, que se baseiam em um estudo de caso realizado em instalações da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), por serem percebidas como ímpares e peculiares a sistemas dessa natureza, constituem a contribuição original deste trabalho.

O objetivo, com a descrição dessas soluções, é fornecer subsídios para a atualização tecnológica do sistema digital com base em instrumentação eletrônica advinda de sistemas *Digital-Coded Squelch* (DCS), utilizado pela CAERN por consistir na opção de melhor custo benefício na época em que o sistema foi planejado e estimular sua implantação em regiões em que os sistemas de abastecimento ainda não possuem estudos nessa linha.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o objetivo de apresentar soluções de automação aplicadas ao controle e operação de redes de abastecimento hídrico, o trabalho será estruturado de forma a ser estabelecido o conjunto de conceitos básicos relacionado às redes de abastecimento, enfatizando-se as melhorias proporcionadas pelo uso de recursos de automação aplicados à técnica de controle de pressões e vazões de água destas redes.

Para que possam ser compreensíveis os métodos tradicionais de automação de sistemas, na seção 2 serão abordados os parâmetros associados aos sistemas de abastecimento hídrico, fornecendo uma base de informação para o processo de implantação desde a descrição de operação de bombas até a influência das redes industriais na redução das perdas e aumento da eficiência produtiva. Além disso, também será abordada a teoria sobre bombas centrífugas, motores elétricos, inversores de frequência, redes industriais, modelagem de processos e *wavelet*. Na seção 3, será feita uma descrição metodológica da etapa de implantação, explicitando o escopo de projeto que foi levado em consideração para nortear sua execução.

Já na seção 4 será mostrada a etapa de projeto dos sistemas de medição e controle, destacando suas características e dificuldades para, tendo por base esses sistemas, analisar como o método de implantação proposto pode auxiliar na resolução do problema e otimização operacional.

Na seção 5 será destacada a etapa de implantação do sistema de telemetria de dados que permitiu a otimização de rotinas operacionais, melhorando a qualidade do serviço prestado e aumentando a eficiência produtiva do setor operacional. Além disso, destaca-se a importância da geração de informações das variáveis de campo, fundamentais para as equipes de operação e manutenção.

A seção 6 destacará o processo de implementação do sistema supervisório ScadaBR na companhia, como foi estruturada a metodologia e hierarquia de telas. Sendo apresentada detalhadamente a construção das principais telas e alteração da rotina de geração de relatórios.

Na seção 7 será abordado o aspecto de projeto do sistema de controle na unidade de reforço de pressão de Nova Descoberta, descrevendo instrumentação utilizada, configuração da malha de controle e metodologia de implantação.

Em seguida, a seção 8 abordará os aspectos de desenvolvimento do sistema embarcado inteligente. A utilização da *wavelet* será descrita como elemento fundamental para o sucesso da técnica de detecção e as técnicas operacionais utilizadas para o levantamento das características do sistema de abastecimento hídrico de Ponta Negra. Além disso, como argumentação final desta seção, serão elucidados os motivos pelos quais são utilizados sinais de pressão para a implementação do sistema embarcado de detecção de anomalias hidráulicas, mesmo com as dificuldades dos métodos tradicionais.

Na seção 9 será efetuada uma análise dos benefícios operacionais obtidos a partir da implementação do sistema de automação, além do retorno econômico sobre o investimento promovido.

Na seção 10, por fim, serão apresentados os resultados e discussões quanto ao projeto desenvolvido, destacando os benefícios e dificuldades encontradas durante o processo de implantação das etapas do projeto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados referenciais teóricos relacionados ao projeto desenvolvido, destacando aspectos hidráulicos, elétricos e computacionais.

### 2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO HÍDRICO

A infraestrutura de um sistema de abastecimento hídrico é composta por inúmeras estações, seguindo o fluxo produtor da água desde a estação de captação até o local de monitoramento do consumo pelo cliente final. Tais estações podem ser classificadas como estações de captação, de elevação, de tratamento, de adução hídrica, de armazenamento e de distribuição pública. A Figura 1 apresenta um modelo simplificado dessa infraestrutura.

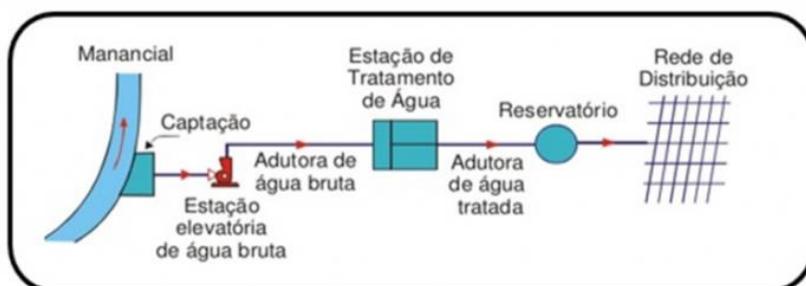


Figura 1 - Modelo simplificado de infraestrutura de abastecimento.

O sistema de captação tem a função de recolher, em meio superficial ou subterrâneo, água em quantidade suficiente e com características físicas, químicas e bacteriológicas minimamente aceitáveis em função da legislação vigente.

O sistema de elevação transmite energia à água de modo que ela adquira pressão suficiente para circular nas tubulações e consiga superar desníveis topográficos, garantido pressões de abastecimento mínimas nos pontos de consumo.

Já o sistema de tratamento tem a função de conferir à água características físicas, químicas e bacteriológicas compatíveis com as exigências do Ministério da Saúde, em sua portaria nº 518, de 25 de março de 2004, aplicável em todo o território nacional.

O sistema de adução é o responsável pelo transporte da água para as zonas de consumo, por vezes muito afastadas do local de captação.

O sistema de armazenamento tem a função de acumular água por períodos variáveis e em locais especialmente destinados a isso, seja para regularização dos mananciais ou para garantir reservas de incêndio e de avaria.

E por último, o sistema de distribuição pública tem o objetivo de realizar a distribuição na zona que se deseja abastecer, garantindo que diversos pontos de consumo recebam água com pressões convenientes. Este sistema é o que apresenta a maioria dos casos de vazamento que aumentam substancialmente as estatísticas das perdas hídricas, fato que o fez se constituir em foco nas pesquisas que originaram este trabalho.

## 2.2 CONTROLE DAS PERDAS HÍDRICAS

A redução das perdas hídricas com a diminuição das pressões de operação da rede de distribuição é um fenômeno conhecido há muito tempo pelas companhias de saneamento e distribuição de água. Em 1980, foi publicado um extenso relatório sobre controle de pressão como parte da *National Leakage Initiative*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre pressão e volume de vazamento em sistemas de abastecimento urbano.

O efetivo controle de perdas hídricas é feito por meio de quatro atividades citadas pelo documento técnico de apoio D1 do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNDCA – D1, 1999, p.11):

- a) gerenciamento da pressão das zonas pitométricas;
- b) controle ativo de vazamentos;
- c) velocidade e qualidade dos reparos;
- d) gerenciamento da infraestrutura.

Considerando a natureza operacional destas atividades, a automação surge como um mecanismo poderoso na melhoria da gestão do saneamento, pois além de aumentar a qualidade do processo, possibilita o controle preciso da redução das pressões de operação da rede de distribuição.

O gerenciamento de pressões das zonas pitométricas visa controlar as pressões destas zonas e assegurar padrões mínimos de abastecimento aos ramais consumidores. Estes objetivos duais são alcançados pelo projeto específico de setorização dos sistemas de distribuição, que envolve o controle de bombeamento direto na rede por meio de estações de reforço (*booster*) ou pela introdução de válvulas redutoras de pressão (VRP) em pontos estratégicos da rede de distribuição.

O controle ativo de vazamentos contrapõe o controle passivo que é basicamente a atividade de reparar vazamentos apenas quando se tornam visíveis. A metodologia mais utilizada no controle ativo de vazamentos é a pesquisa de vazamentos não visíveis, realizada por meio da sua escuta por geofones mecânicos ou eletrônicos e correlacionadores. Essa

atividade reduz o tempo da perda hídrica, ou seja, quanto maior for a frequência da pesquisa, maior será a taxa de vazão anual recuperada. Uma análise de custo benefício pode definir a melhor frequência de pesquisa a ser realizada em cada área. Desde o conhecimento da existência de um vazamento, o tempo gasto para sua efetiva localização e seu estancamento é um ponto chave do gerenciamento de perdas hídricas. Logo, tendo como referência a necessidade de uma rápida resposta no controle ativo de vazamentos será desenvolvida uma solução embarcada inteligente capaz de detectar anomalias hidráulicas em tempo real e de forma distribuída nas plantas industriais da companhia.

A práticas das atividades mencionadas já traz melhorias à infraestrutura do sistema de abastecimento permitindo que a substituição de trechos da rede de água seja realizada apenas quando, após a realização das outras atividades, ainda se detectar índices de perdas elevados na área, evitando-se assim custos mais altos. Ainda assim, para que seja possível a implementação efetiva destas atividades, é necessária a segmentação da rede de abastecimento em setores, técnica denominada setorização.

### 2.3 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica ativa em energia mecânica disponível em seu eixo. Na maioria dos segmentos econômicos rurais e industriais, os motores elétricos são a principal forma de uso final da energia elétrica. No Brasil, os motores elétricos representam mais de 50% do uso final da energia elétrica da indústria (OLIVEIRA FILHO et al., 2010).

Oliveira (2010) estima que 75% dos motores existentes no Brasil correspondem a motores de indução, trifásicos, com rotor em gaiola de esquilo. Esse autor estima que os 25% restantes seriam constituídos por motores menores, dos quais grande número se constitui de motores com potência abaixo que 1 cv, monofásicos, com aplicação em equipamentos residenciais (geladeira, ar condicionado, máquina de lavar, ventiladores etc.).

Conforme indicado pelo nome, os motores de indução utilizam o princípio da indução para transferir energia do estator (parte fixa do motor) para o rotor (parte móvel que contém o eixo). Quando energizado, o estator produz um campo magnético rotativo cuja velocidade de rotação, que é conhecida como velocidade síncrona, depende da frequência da rede elétrica de alimentação do motor e do número de pares de polos, por fase, do estator, segundo a equação 1:

$$\eta_s = \frac{60 * f}{np} \quad (1)$$

Em que:

f = frequência da rede de alimentação (Hz);

np = número de pares de polos, por fase, no estator;

$\eta_s$  = velocidade síncrona de rotação do motor (rpm).

Quando não existem perdas ou cargas solicitadas no eixo, o eixo do motor teria velocidade bem próxima à síncrona. Entretanto, ao ser aplicada uma carga no seu eixo, o rotor diminui a sua velocidade na proporção necessária para que a corrente induzida, pela diferença de rotação entre o campo girante do estator e do rotor passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado aplicado no seu eixo (LOBOSCO; DIAS 1988).

A diferença entre a velocidade de rotação do campo magnético girante do estator e a velocidade de rotação do eixo do motor é chamada de deslizamento (equação 2), ou escorregamento (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008; MCINTYRE, 1987).

$$s = \frac{\eta_s - \eta_e}{\eta_s} \quad (2)$$

s = escorregamento ( $0 < s < 1$ ).

A velocidade de rotação do eixo de um motor, equação 3, pode ser transformada em velocidade angular:

$$\omega = \frac{\eta_s}{60} * 2\pi \quad (3)$$

Quando os valores nominais de frequência e tensão da rede elétrica de alimentação de um motor de indução trifásico são atendidos, a linearização da curva do conjugado versus rotação do motor permite estimar com precisão o conjugado, equação 4, em função do valor da rotação do motor (PEREIRA, 2011; SILVA, 1999).

$$\tau = \tau_N \left( \frac{\eta_s - \eta_e}{\eta_s - \eta_N} \right) \text{ para } \eta_n \leq \eta_e \leq \eta_s \quad (4)$$

Em que:

$\eta_n$  = velocidade nominal de rotação do motor (rpm);

$\tau$  = torque ou conjugado no eixo do motor (Nm);

$\tau_N$  = torque ou conjugado nominal do motor (Nm).

O torque nominal, por sua vez, pode ser estimado pela equação 5:

$$\tau_N = \frac{P_{MEN}}{\omega_N} \quad (5)$$

Em que:

$P_{MEN}$  = potência mecânica nominal no eixo (W);

$\omega_N$  = velocidade angular nominal do motor (rad/s).

De acordo com Saidur (2010), a análise de desempenho de motores elétricos é feita com base no rendimento e no fator de potência; este é o cosseno do ângulo de defasagem entre a onda de tensão e a onda de corrente do circuito. O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente.

A potência ativa é a capacidade que o circuito tem de produzir trabalho, ou seja, é a potência elétrica que chega ao motor que realmente é convertida em potência mecânica. Em contrapartida, uma parcela dessa potência é transferida e armazenada nos elementos indutivos e capacitivos do circuito, a chamada potência reativa. Já a potência total, também chamada de potência aparente, é o somatório dessas duas potências.

O rendimento do motor é a relação existente entre a potência útil e a potência ativa. Pereira (2011) afirma que os motores elétricos de indução convertem 80-90 % da potência aparente absorvida em trabalho útil e o índice de carregamento de um motor elétrico expressa a fração da sua potência mecânica nominal que está disponível no seu eixo.

O conhecimento do percentual de carregamento do motor é importante porque o rendimento, o escorregamento, o fator de potência e a corrente absorvida variam com essa grandeza. Nos catálogos dos motores elétricos é comum a apresentação de valores de rendimento e de fator de potência em três diferentes condições: 50 %, 75 % e 100 % de plena carga (WEG, 2005).

Sirak e Pillay (2012) ressaltam que a eficiência de um motor elétrico pode ser afetada também por outros fatores, além do índice de carregamento, tais como: desbalanceamento da tensão entre as fases de alimentação do motor; elevação ou redução da tensão da linha de alimentação em relação ao valor nominal; temperatura do motor e problemas internos do motor relacionados aos rolamentos e a seu enrolamento.

Nas condições normais de trabalho dos motores elétricos, é muito difícil determinar diretamente no eixo do motor o valor do torque fornecido pelo motor. Visando superar essa dificuldade, diversos pesquisadores desenvolveram diferentes metodologias para a estimativa da potência mecânica disponível no eixo do motor. De acordo com a portaria 488 do Inmetro (BRASIL, 2010), para o ponto de 100 % de carga do motor, a diferença entre o valor de potência ativa nominal declarada pelo fabricante e o valor de potência ativa determinada em ensaio não deve exceder  $\pm 0,5$  %, da potência ativa nominal declarada.

## 2.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Segundo Camoirano e Dellepiane (2005), o inversor de frequência pode ser considerado como uma caixa preta que recebe uma corrente elétrica, em uma dada frequência e tensão e é capaz de gerar uma frequência diferente e ajustável à tensão. Sendo assim, o inversor é uma função de tensão e frequência, não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação, não da tensão (GUIMARÃES, 2008).

O encontro das curvas de conjugado em função de rotação, do motor elétrico e da carga define o ponto de funcionamento do conjunto. Nos motores elétricos assíncronos submetidos a uma carga constante, a velocidade de trabalho é praticamente invariável. De acordo com Guimarães (2008), ao se variar a frequência de alimentação de um motor de corrente alternada, varia-se a velocidade do rotor.

O comportamento do motor permanece da mesma forma, entretanto, deslocado na rotação conforme a frequência. Christiman (2010) estima a potência mecânica no eixo acionado por um inversor de frequência, pela equação 6.

$$\eta_M * PMN_{eixo} = PM_{eixo} = PMN_{eixo} * \frac{\eta_e}{\eta_N} * \frac{\eta_{SF} - \eta_e}{\eta_{SF} - \eta_N} \quad (6)$$

$\eta_{sf}$  = rotação síncrona na frequência f (rpm).

Bernier e Bourret (1999) afirmam, pela equação 7, que o rendimento do inversor de frequência é dado pela relação existente entre a potência hidráulica ativa e os rendimentos de motor e bomba.

$$\eta_{if} = \frac{P_h}{P_{at} * \eta_M * \eta_B} \quad (7)$$

$\eta_{if}$  = rendimento do inversor na frequência f.

Com o avanço da eletrônica de potência, as aplicações diversas dos *drivers* de controle de velocidade de motores elétricos de indução, e recentes pesquisas concluíram que a redução da velocidade de um motor elétrico proporciona maior economia de energia elétrica do que o controle *on/off* (SILVA; SILVA; CRUZ, 2013; TSUTIYA, 2008; WEG, 2013).

Os autores Burt et al. (2008) relatam que em média a eficiência relativa do sistema elétrico com o inversor de frequência pode ser de aproximadamente 8 % mais baixa do que a eficiência relativa de um sistema sem o uso do inversor de frequência. Se for considerado o campo real operacional, essa condição de 8 % é enganadora, porque a energia poupada pode ser obtida com o inversor de frequência, devido à sua capacidade para ajustar as velocidades para atender às condições reais do campo.

Azevedo (2003) ressalta na análise de oito sistemas de irrigação que a economia de energia proporcionada pelo uso do inversor de frequência assume valores na faixa de 15,9 % a 32,2 % daquele estimado sem o uso de inversor de frequência. Também foi reportado que a economia de energia propiciada pelo uso de inversores de frequência depende principalmente de três fatores: o superdimensionamento da unidade de bombeamento, o desnível geométrico ao longo da lateral e a perda de carga ao longo da lateral móvel.

Moraes et al. (2011) simularam o gasto com energia elétrica e lâminas de irrigação para um perímetro irrigado hipotético na região do Jaíba-MG. Os autores concluíram que o uso do inversor de frequência e o gerenciamento do número de horas de disponibilidade da irrigação no sistema de fornecimento de água para irrigação no perímetro estudado, garantiram economia de energia elétrica, que variou em torno de 7 % a 62 % do valor total da fatura de energia.

## 2.5 BOMBAS CENTRÍFUGAS

As bombas centrífugas também conhecidas como turbomáquinas impulsoras ou bombas rotodinâmicas são aquelas em que a transferência de energia da bomba para o fluido é feita pela ação de um órgão propulsor, denominado rotor, desenvolvendo na massa fluida forças responsáveis pelo escoamento. A finalidade do rotor, também chamado impulsor ou impelidor, é comunicar à massa líquida a aceleração devido à transformação em energia mecânica (CARVALHO et. al, 2008). Os componentes básicos podem ser visualizados na Figura 2.

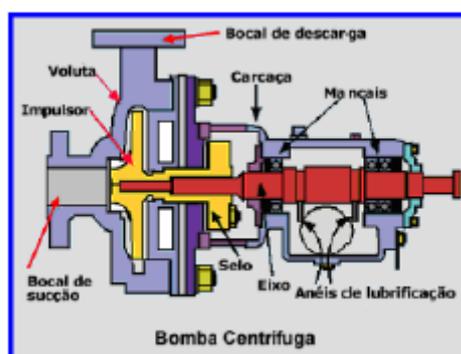


Figura 2 - Bomba centrífuga.

A seleção de uma bomba centrífuga é realizada com base na curva característica que relaciona a vazão ( $Q$ ) versus a altura manométrica total (HMT) de bombeamento. Para facilitar a seleção da bomba, os fabricantes disponibilizam gráficos de cobertura hidráulica que mostram toda a região de vazão versus altura manométrica de bombeamento, compreendida por seus diferentes modelos de bombas e que podem ser disponibilizados para diferentes diâmetros de rotores (OLIVEIRA et. al 2010).

As curvas características de uma máquina hidráulica podem ser apresentadas de forma adimensional ou dimensional. Os fabricantes de bombas apresentam as curvas dimensionais da altura de elevação, potência e rendimento em função do caudal. Calculam-se as alterações nos valores dimensionais das curvas características de bombas centrífugas (vazão x altura manométrica e vazão x rendimento) decorrentes de alterações nos valores de diâmetro e/ou de velocidade de rotação do rotor, com base em valores adimensionais de vazão e da altura manométrica dados pelas equações 8 e 9 (AZEVEDO, 2014):

$$\lambda Q = \frac{Q}{\phi^3 \omega} \quad (8)$$

$$\lambda H = \frac{g * HMT}{\phi^2 \omega^2} \quad (9)$$

Em que:

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

HMT = Altura manométrica total (m);

$Q$  = Vazão bombeada (m<sup>3</sup>/s);

$\lambda H$  = Altura manométrica total adimensional;

$\lambda Q$  = Vazão bombeada adimensional;

$\phi$  = Diâmetro do rotor (m);

$\omega$  = Velocidade angular do rotor (rad/s).

Abadia, Rocamora e Vera (2012) e Mahar e Singh (2014) utilizaram polinômio quadrático para a representação das curvas características das bombas centrífugas. Esses mesmos autores adimensionalizaram essas curvas, seguindo as recomendações propostas por Alcântara (1988) e Pereira (2011) para representar as curvas de altura manométrica total e rendimento.

O rendimento de uma bomba é a razão entre a potência útil cedida ao fluido (potência hidráulica) e a potência absorvida pela bomba (potência mecânica no eixo), ou seja, é a eficiência da máquina hidráulica na transformação de energia (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008).

A potência mecânica é a grandeza física que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008). Nem toda potência fornecida ao eixo da bomba é aproveitada na transmissão de energia ao líquido pelo rotor. Uma parte dessa energia se perde por atrito mecânico nos mancais e gaxetas (MACINTYRE, 1987).

### 2.5.1 Eficiência de bombas para rotação constante

A eficiência das bombas é um parâmetro fundamental na análise de viabilidade econômica, uma vez que essa característica pode variar bastante com o ponto de operação da bomba. Embora o rendimento operacional seja especificado no projeto da bomba, o fabricante deve fornecer as curvas de eficiência do equipamento, como mostrado na Figura 3.

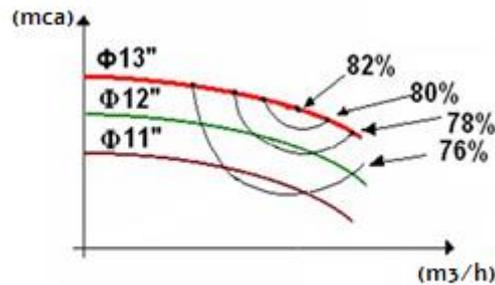


Figura 3 - Curvas de isoeeficiência com curvas de bomba de diferentes diâmetros de rotor.

### 2.5.2 Efeito da mudança da rotação da bomba

Existe uma proporcionalidade entre os valores de vazão ( $Q$ ), altura manométrica total ( $H$ ) e potência ( $P$ ) com a rotação. Sendo assim, ao alterarmos a rotação de uma bomba haverá, em consequência, a alteração nas curvas características, sendo a correção para a nova rotação feita a partir das seguintes proporções levando em consideração o diâmetro do impelidor constante:

1. A vazão é proporcional à rotação:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1} \quad (10)$$

2. A altura manométrica varia com o quadrado da rotação:

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{N}{N_1}\right)^2 \quad (11)$$

3. A potência absorvida varia com o cubo da rotação:

$$\frac{P}{P_1} = \left(\frac{N}{N_1}\right)^3 \quad (12)$$

Desta forma, sempre que variar a rotação deve ser feita a correção das curvas características de bombas através das equações citadas acima, denominadas de leis de semelhança, para determinação do novo ponto de operação.

A Figura 4 apresenta as novas curvas obtidas pelo efeito da variação da rotação da bomba. E nota-se que, ao contrário do controle por válvulas controladas, na medida em que a vazão diminui a pressão de descarga também diminui.

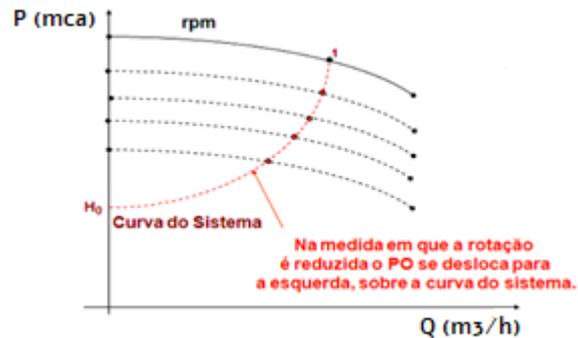


Figura 4 - Variação da curva da bomba através da variação da rotação.

### 2.5.3 Eficiência das bombas para variação de rotação

A mudança do ponto de operação decorrente da variação da rotação da bomba implica em modificação dos valores de rendimento da mesma. Segundo Bernier (1999), uma vez que se tenham os valores de rendimento para uma dada rotação da bomba, é possível mapear curvas de eficiência para outras rotações a partir da aplicação das leis de semelhança para obtenção de pontos de igual rendimento, conforme Figura 5.

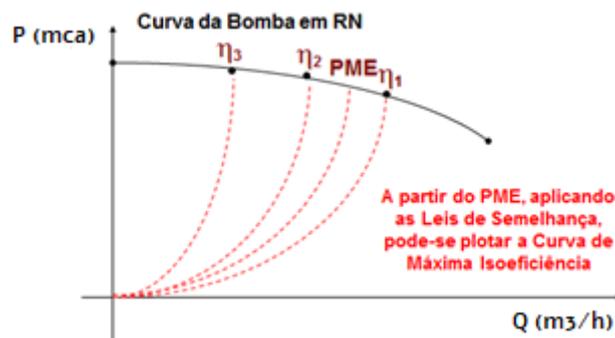


Figura 5 - Curvas de isoeffiência da bomba utilizando as leis de Semelhança.

### 2.5.4 Controle de vazão por variadores de velocidade

Os sistemas de bombeamento convencionais são operados usualmente através do controle da vazão obtido por válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta, sendo manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda.

Nessa operação o que se faz é o deslocamento do ponto de operação (interseção da curva da bomba com a curva do sistema) através do aumento da perda de carga, progressivamente sobre a curva da bomba até se encontrar o ponto desejado para uma determinada vazão, conforme Figura 6, com a bomba operando com rotação constante  $\eta$ .

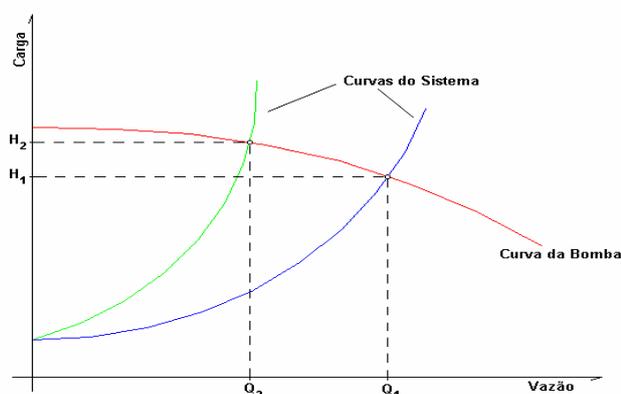


Figura 6 - Curva do sistema convencional com controle de vazão através de válvulas.

O uso dessa rotina operacional penaliza de forma drástica o sistema de bombeamento acarretando diversas desvantagens, uma delas é que a vazão máxima possível a ser controlada é aquela que passa pela tubulação quando o sistema não atua, ou seja, com a válvula de regulagem totalmente aberta, não possibilitando assim nenhum incremento de vazão. Outra desvantagem e talvez a principal delas, é que a ação de regulagem da válvula vai aumentando a perda de carga local e elevando, por conseguinte, a carga a montante da válvula de controle. Como a potência consumida pela bomba é proporcional à vazão e à carga, o que se tem é uma redução gradativa da vazão bombeada com um aumento de consumo. Naturalmente, a vida útil dos equipamentos será comprometida, além do que toda essa energia excedente pode ser transmutada em vibração, provocando danos ao sistema de bombeamento, tubulações e válvulas.

Macintyre (1987) define muito bem esse tipo de operação dizendo ser o mesmo que “[...] conduzir um carro com o freio de mão acionado: o resultado é o desperdício desnecessário de energia”.

Ainda segundo Brignol (2000), estima-se que de toda energia elétrica utilizada pela indústria, 65 % seja destinada a motores elétricos e que, do montante relativo a esse percentual, 20 % seja desperdiçado por mecanismos de controle (ex.: válvula).

Em contraposição a operação anteriormente descrita, o inversor de frequência, através do controle da rotação do motor, promove a alteração da curva da bomba mantendo-se constante a curva do sistema ou instalação. Isso faz com que o consumo de energia seja proporcional à rotação do motor, ou seja, nem mais nem menos, apenas o necessário.

Ainda com relação ao consumo de energia, nos projetos com inversores de frequência geralmente tem-se a preocupação de se analisar cuidadosamente as curvas de rendimento das bombas. Ilinski et al. (2002) e Jowitt et al. (1992) sugerem, para o melhor aproveitamento do rendimento da bomba, que o ponto referente à demanda máxima esteja situado à direita da curva de melhor rendimento, com isso na maior parte do tempo de operação o sistema de bombeamento se encontrará nas máximas possibilidades de eficiência do equipamento.

Brion (1991) sugere, como linha de conduta, em primeiro lugar a seleção adequada das bombas para as condições de trabalho desejadas, escolhendo aquelas de melhor rendimento. No quesito conservação de energia, esse mesmo autor enfatiza que um grande erro é a seleção da máquina superdimensionada, ou seja, muito além do que seria necessário para o sistema projetado, gerando um consumo excessivo de energia. Entretanto, essa sempre foi uma prática comum dos projetistas, cuja justificativa se baseia na garantia de uma margem de segurança ao sistema, conforme citado anteriormente por Rodrigues (2003).

O controle de vazão realizado através de inversores de frequência busca modificar a curva característica da bomba. A modificação da curva de uma bomba pode ser obtida pela variação de alguns principais fatores, conforme abaixo:

- a) rotação da bomba;
- b) diâmetro do rotor da bomba.

Pelo fato de o diâmetro do rotor ser um parâmetro físico, torna-se difícil modificá-lo continuamente, sendo assim, inviabilizando o controle variável de vazão na bomba, atuando somente pela adequação do diâmetro do rotor. Em contrapartida, a rotação ( $\eta$ ) da bomba pode ser continuamente modificada, conforme apresentado anteriormente.

## 2.6 ANÁLISE FUNCIONAL DOS VARIADORES DE VELOCIDADE

As vantagens, segundo Abadia et al. (2012), Azevedo (2014), Marchi et al. (2013), Mashar et al. (2014), Jowitt (1992), Mirabella et al. (2008), Ilinski (2000) e Garcia (2003), são:

- a) Boa eficiência: estudos mostram que o uso associado de inversores de frequência sugere a avaliação do ponto ou faixa de operação em que o sistema mais opera e sua relação com as curvas de rendimento do conjunto motor bomba, buscando assim explorar a maior possibilidade de ganho. Testes de rendimento do motor, do *driver* de inversor de frequência e do conjunto associado apresentaram excelentes índices. Somente os inversores de frequência apresentaram rendimento acima de 95 %.
- b) As perdas físicas, diretamente ligadas à pressão, se minimizam.

- c) Melhor resposta em situações emergenciais: aumento de vazão para atendimento a incêndio, fechamentos em casos de rompimentos com minimização dos efeitos do regime transitório etc.
- d) *By-pass* de operação em caso de falha do inversor. Se o inversor falhar, o motor pode ser operado diretamente na linha de entrada em operação contínua convencional.
- e) Manutenção sem necessitar estar conectado ao sistema, bem como a redução desses custos.
- f) Alimenta tanto motores assíncronos como síncronos.
- g) O sistema de pulsos (PWM – *Pulse Width Modulation*) permite uma faixa de variação de frequência de 0 à 100 %.
- h) A tensão constante no circuito intermediário alimenta um barramento de corrente contínua onde é possível conectar vários inversores de frequência em paralelo, um banco de baterias ou um banco de capacitores para suprimento de energia em caso de queda da rede.
- i) Operação simultânea com vários motores.
- j) Emprego em áreas e ambientes sensíveis, como aquelas em que se requerem motores a prova de explosão, resistência a ambientes e atmosferas químicas agressivas, entre outras.
- k) Redução da emissão de CO<sub>2</sub> e gases na atmosfera, quando se avalia o processo industrial como um todo: a queda no consumo de energia elétrica conduzirá a menor necessidade de geração, principalmente quando isso se dá por termelétricas ou aeradores a óleo diesel. Com isso os impactos ao meio ambiente tendem a se reduzirem.

Já as desvantagens, segundo Abadia et al. (2012), Azevedo (2014), Marchi et al. (2013), Mashar et al. (2014), Jowitt (1992), Mirabella et al. (2008), Ilinski (2000) e Garcia (2003), são:

- a) O inversor de frequência requer conversores de potência além de técnicos especializados, devido aos circuitos sofisticados.
- b) Elevação da temperatura na superfície dos motores localizados em áreas de risco, ultrapassando o limite máximo de temperatura permitida para o local: estando a ventilação acoplada ao eixo do motor, a redução da rotação promoverá um aumento na temperatura do mesmo o que poderá causar explosões se instalado em locais ou atmosferas de risco (produtos inflamáveis). Esse é um problema muito comum em indústrias petroquímicas.
- c) Atenção especial deve ser dedicada aos cabos que devem ser de baixa impedância para alta frequência: como a frequência de chaveamento ou acionamento dos *Insulated Gate*

*Bipolar Transistor* (IGBT) é alta, alguns tipos de cabos podem não suportar provocando a queima por aquecimento.

- d) Limitação do uso em sistemas de bombeamento de líquidos com partículas em suspensão: esse tipo de sistema requer uma velocidade mínima de bombeamento e sem a qual haverá deposição de partículas ao longo da tubulação, podendo vir a ocorrer o comprometimento da capacidade de transporte pela obstrução parcial da seção da tubulação de recalque.
- e) Alteração dos parâmetros da bomba: a operação com o inversor de frequência afetará parâmetros significativos da bomba com a mudança de velocidade como: o rendimento, o *Net Positive Suction Head* (NPSH), a potência etc.
- f) Possibilidade de danos na isolação dos motores, provocado pelos altos picos de tensão decorrentes da rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor de frequência, bem como a alta frequência com que esses pulsos são produzidos. O aumento da temperatura decorrente da redução de velocidade e conseqüente queda na ventilação também poderá afetar os materiais isolantes do motor.

De qualquer maneira, tão importante quanto as análises técnicas, são as análises dos custos relacionados com o consumo operacional. Lembrando Pereira (2011) quando diz “[...] custos iniciais, muitas vezes, podem ser altos para que o operacional (custo), ao longo de um tempo, torne-se baixo”. Logo, os principais benefícios quanto ao uso do inversor de frequência são:

1. Economia de energia.
2. Melhoria do desempenho, devido à adaptação da velocidade aos requisitos do processo.
3. Elimina o pico de corrente na partida do motor.
4. Reduz a frequência de manutenção.

## 2.7 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

A história recente da automação industrial começa na década de 20 quando Henry Ford criou uma linha de produção para a fabricação de automóveis. Isto fez com que aumentasse a produção de automóveis e os preços fossem gradativamente diminuídos. A utilização de automação nas indústrias tem sido cada vez maior, proporcionando um aumento na qualidade e quantidade da produção e, cada vez mais, oferecendo preços atrativos. Assim, a utilização da automação aumenta a eficiência, tornando as empresas mais competitivas no mercado.

A automação de um processo industrial, ou de apenas uma operação do mesmo, pode justificar-se economicamente com base nos seguintes critérios (CARVALHO, 2003):

- a) qualidade: fabricação em faixas de tolerância estreitas, através da utilização de controle de qualidade eficiente e pelo uso de processos de fabricação sofisticados;
- b) flexibilidade: admissão com facilidade e rapidez alterações nos parâmetros do processo de fabricação, seja em função de inovações frequentes no produto, atendimento a especificidades do cliente ou produção de pequenos lotes;
- c) produtividade: utilização mais eficiente da matéria prima, energia, equipamentos e instalações;
- d) viabilidade técnica: execução de operações impossíveis de realizar por métodos convencionais, em função de limitações do homem para executar a operação ou condições desumanas de trabalho.

O avanço da automação industrial está ligado, em grande parte, ao avanço da microeletrônica que se deu nos últimos anos. Pouco a pouco, a microeletrônica invadiu os setores produtivos das indústrias, propiciando a automação em larga escala. O processo de automação não atinge apenas a produção em si, substituindo o trabalho braçal por robôs e máquinas computadorizadas, mas permite enormes ganhos de produtividade ao integrar tarefas distintas como a elaboração de projetos, o gerenciamento administrativo e a produção (CARVALHO, 2003).

Pode-se considerar, no entanto, que o primeiro grande impulso para a automação se deu com o aparecimento dos transistores na década de 60. No final daquela mesma década surgiu o primeiro Controlador Lógico Programável (CLP), quando a Associação BedFord, uma companhia em Bedford, desenvolveu um dispositivo chamado Controlador Modular Digital para a General Motors (GM). O sistema *Modular Digital Control* (MODICON, 2018), como foi chamado, foi desenvolvido para a GM eliminar o tradicional sistema de controle das máquinas baseado na lógica de relés. Como os relés são dispositivos eletromecânicos, possuem sua vida útil limitada sendo, dessa forma, um tipo de obstáculo. À medida que se precisava aumentar o número de relés para trabalhar, o cabeamento e os problemas com falhas e consumo de energia iam se multiplicando.

Com o desenvolvimento dos microprocessadores na década de 70, o uso de computadores foi introduzido nas fábricas com a função de controlar e monitorar os sistemas de instrumentos a partir de uma estação central. Nesta fase, também surgem os sistemas SCADA suportados por diversos sistemas operacionais e com diversos repertórios de funcionalidades, tais como (MENZ, 1997):

- a) aquisição de dados;
- b) visualização de dados;
- c) processamento de alarmes;
- d) tolerância a falhas.

Na área de instrumentação industrial a revolução também se deu com a chegada da tecnologia de microprocessadores, que foi a responsável por dotar os sensores de inteligência. Essa inteligência corresponde à capacidade de processamento digital local dos dispositivos. Esse avanço proporcionou a mudança de comunicação, ou seja, a mudança do antigo padrão 4-20 mA da transmissão de sinais analógicos para a transmissão digital. A princípio foi desenvolvido um protocolo que aproveitava o cabeamento já existente, fazendo transitar sinais digitais sobre sinais analógicos 4-20 mA. Este protocolo (HART) não foi mais que um paliativo, embora permaneça até hoje em sua interinidade. Depois surgiram uma profusão de padrões e protocolos, onde cada um pretendia ser o único e melhor barramento de campo.

Os barramentos de campo trouxeram um novo conceito de controle. A capacidade de qualquer equipamento de campo poder assumir o papel de controlador possibilita uma troca de paradigma, saindo da estratégia de controle centralizado feito pelos CLP's para controle descentralizado exercido por diferentes instrumentos (OZDEMIR, 2006).

A integração digital dos dados por meio de uma rede de computadores entre os diferentes níveis de um sistema de automação possibilita a redução de custos de fabricação, aumentando a produtividade. Esse fator possibilita o surgimento de um novo conceito: a interoperabilidade de seus componentes nos mais diferentes níveis. Para melhor representar uma arquitetura de um sistema de automação, podemos dividi-lo nos seguintes níveis: sensores e atuadores, controle e supervisão, *Enterprise Production Systems* (EPS) e *Enterprise Resource Planning* (ERP).

### **2.7.1 Sensores e Atuadores**

Na base da pirâmide da Figura 7 encontram-se os sensores de nível, pressão, temperatura, fins de curso, válvulas, inversores de frequência etc. Esta é a base fundamental do sistema, sendo possível encontrá-la em todos os processos de automação. Os sensores são elementos que sentem a variável a ser medida. Os transmissores, condicionam o sinal do sensor e o convertem para um sinal adequado para a transmissão aos controladores. Esses sinais de transmissão são normalmente elétricos e podem classificar-se em digitais e analógicos.

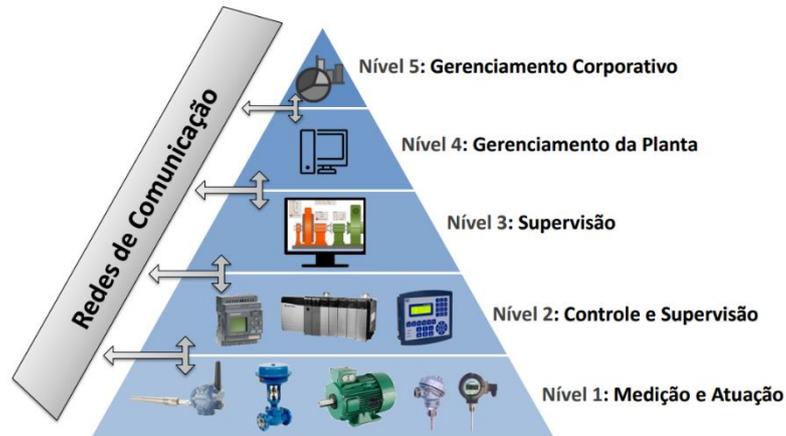


Figura 7 - Pirâmide de hierarquia de automação.

Os atuadores são responsáveis por executar as tarefas enviadas pelo controlador e permitem o controle da variável de processo. Diante do exposto, pode-se dizer que o nível de sensores e atuadores é a interface direta entre o processo físico e o sistema de controle.

A interligação dos instrumentos ao nível de controle é feita através das redes de campo que podem ser classificadas da seguinte forma (OZDEMIR, 2006):

- a) Redes de sensores ou *Sensorbus* - São redes apropriadas para interligar sensores e atuadores discretos, tais como chaves limites (*limit switches*), contactores, desviadores etc. São exemplos de rede *Sensorbus*: ASI da Siemens, Seriplex, CAN e *LonWorks*.
- b) Redes de Dispositivos ou *Devicebus* - São redes capazes de interligar dispositivos mais genéricos como CLP's, unidades remotas de aquisição de dados e controle, conversores AC/DC, relés de medição inteligentes etc. Exemplos: Profibus-DP, DeviceNet, Interbus-S, *LonWorks*, CAN, ControlNet, ModbusPlus.
- c) Redes de instrumentação ou *fieldbus* - São redes concebidas para integrar instrumentos analógicos no ambiente industrial, como transmissores de vazão, pressão, temperatura, válvulas de controle etc. Exemplos: IECSP50-H1, HART, WorldFIP, Profibus-PA.

Com a integração de microprocessadores aos instrumentos de campo, pode-se observar o surgimento dos instrumentos inteligentes. Estes são capazes de se comunicar através de um barramento de campo, permitindo o acesso a dados como valor medido, qualidade do sinal e de medição, entre outros.

### **2.7.2 Controle e Supervisão**

Neste nível estão localizados os controladores de malhas, os Controladores Lógicos Programáveis e os Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD). Toda a lógica de controle, as ações a serem tomadas e os tipos de controle (PID, *Fuzzy*, Preditivo, etc.) são implementadas nestes dispositivos. Os dados são lidos através da instrumentação do nível inferior (os sensores e atuadores) e procedimentos são executados através dos atuadores (SILVA, 2017).

Os sistemas de supervisão são geralmente implementados através de sistemas SCADA, com suporte de interface homem máquina (IHM), processando as informações do processo e tornando-as disponíveis para o operador do processo (MIRABELLA, 2008). É possível, também, realizar atividades de controle em nível de supervisão, tomar decisões e executar ações sobre o processo, além de possibilitar a configuração de arquivos de alarmes e eventos, além da geração de relatórios.

### **2.7.3 Enterprise Production System**

O gerenciamento de toda cadeia de produção é realizado por sistemas que são englobados no termo geral de EPS. Neles estão incluídos, basicamente, o MES - *Manufacturing Execution System* e o PIMS - *Plant Information Management System*. Eles são responsáveis por concentrar todas as informações relevantes da célula de produção diretamente ligadas aos sistemas de supervisão e controle. Dessa forma, passam a coletar os dados dos sistemas SCADA, SDCD e sistemas legados e os armazenam em uma base de dados em tempo real para que esta possa ser acessada posteriormente com o intuito de tomada de decisões estratégicas de caráter econômico-financeiro (MIRABELLA, 2008).

### **2.7.4 Enterprise Resource Planning**

Uma vez disponibilizados os dados da produção, desde o chão de fábrica até o produto final, podemos subir mais um nível na pirâmide transformando esses dados em informação de negócio. O ERP é um amplo sistema de soluções e informações, uma arquitetura de software multimodular com o objetivo de facilitar o fluxo de informações entre todas as atividades da empresa como fabricação, compras, estoque, logística, finanças, interação com fornecedores, vendas, serviços a clientes e recursos humanos.

A integração negócio-manufatura é um processo chave para as indústrias de manufatura. Essa integração requer trocas de informações de entendimento comum entre os processos de negócio e os sistemas de manufatura. Tipicamente, um sistema ERP está integrado a uma base de dados única, operando em uma plataforma comum que interage com um conjunto integrado de aplicações, consolidando todas as operações do negócio em um único ambiente computacional.

Dentre os vários benefícios existentes na interação negócio-manufatura podemos destacar: a disponibilidade para comprometimento; redução do tempo do ciclo de produção e a eficiência dos recursos; implantação da otimização da cadeia de suprimento e redução de estoque operacional.

Não se pode deixar de ressaltar, ainda, a importância da Internet neste nível, pois as novas oportunidades de negócio e aplicações propiciadas por essa tecnologia são extremamente vastas. Por exemplo, os clientes podem consultar a qualquer instante o status de suas ordens de compra numa linha de produção e ter a previsão de prazo de entrega em tempo real. Dessa forma, grandes benefícios podem advir da integração negócio-manufatura, uma vez que as razões para a integração são motivadas por razões de negócio.

## 2.8 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO *MODBUS* APLICADOS À OPERAÇÃO

A implantação de um sistema de automação baseado em protocolos digitais de comunicação, segundo Coelho (2006), requer um estudo para determinar qual tipo de tecnologia possui as maiores vantagens de implementação ao usuário final. Este, por sua vez, deve buscar uma plataforma compatível com a base tecnológica instalada no processo industrial do qual esse sistema fará parte, além de que esta deve contemplar uma gama variada de fornecedores de equipamentos e dispositivos que atendam às necessidades da aplicação considerada.

Impõe-se, portanto, a opção pela utilização de uma arquitetura de sistema industrial aberta que, ao contrário das arquiteturas proprietárias, proporciona aos projetistas e desenvolvedores encontrar, em diversos fabricantes, soluções para as especificidades que um sistema de automação aplicado à operação de redes de abastecimento hídrico possa vir a apresentar. Além disso, a maioria dos protocolos de comunicação que compõe arquiteturas abertas possui organizações de usuários e fornecedores que podem oferecer subsídios ao desenvolvimento de projetos e oportunizar trocas de experiências a respeito de soluções com estes protocolos.

Entre os benefícios do uso de protocolos digitais de comunicação em aplicações industriais, incluindo a de controle e operação das redes de abastecimento hídrico, destacam-se:

- a) a melhoria da qualidade e o aumento da quantidade de informações sobre o processo controlado e os dispositivos que o compõe;
- b) a possibilidade de troca de informações entre esses dispositivos, possibilitando a percepção do próprio sistema da perda de algum dos seus componentes;
- c) a distribuição das funções de controle e comunicação;
- d) a redundância dessas funções.

A interoperabilidade, característica pela qual um dispositivo da rede pode ser substituído por outro dispositivo similar de outro fornecedor, mantendo as funções do dispositivo original é fundamental no processo de implementação em um sistema tão distribuído, sendo possível que os usuários mesquem dispositivos de campo e sistemas de vários fornecedores. Adicionalmente, outra característica importante é a flexibilidade do protocolo, tendo em vista que permite a implementação de novas estratégias de controle ou otimização das já existentes por meio de programação remota, permitindo o comissionamento do sistema a partir do CCO ou de qualquer outra localidade remota interligada à rede por meio de rede celular, rádio ou *link* físico de dados.

Além destas características, em Coelho e Lobue (2006), é destacado que nos sistemas de automação baseados em protocolos de comunicação analógicos, o volume de dados disponíveis ao usuário compreende poucas informações além das destinadas às funções de controle, como valores de variáveis principais. Em sistemas baseados no protocolo Modbus, o volume de informações disponibilizado é bem maior, devido às facilidades proporcionadas, principalmente, pela comunicação digital. Essas informações envolvem *status* de funcionamento dos dispositivos de campo e seus componentes, além de informações sobre a rede de controle e de supervisão.

### **2.8.1 Padrão RS485 de Interface Serial**

No protocolo de comunicação RS485 existe apenas um par de fios para transmissão e recepção que deve ser compartilhado. O software de comunicação deve gerenciar habilitação de transmissão e recepção para evitar uma confusão de dados. Além de que deve haver um meio de se evitar o conflito de dados quando dois equipamentos tentam transmitir ao mesmo tempo. Quando isso acontece a solução é permitir que cada equipamento só inicie a transmissão quando

verificar que a linha está livre. Caso dois equipamentos iniciem a transmissão ao mesmo tempo, deve-se identificar a colisão de dados, interromper o processo e tentar novamente após tempos diferentes. A inserção de resistores nas duas extremidades do cabeamento da rede RS485 permite um melhor casamento de impedâncias no cabo, evitando reflexões a ponto de deteriorar a comunicação.

### **2.8.2 Modbus**

É um sistema de comunicação digital bidirecional, que interliga equipamentos de campo com o sistema de controle ou com equipamentos na sala de controle. Este padrão permite a comunicação entre uma variedade de equipamentos, como transmissores, válvulas, controladores, CLP etc., podendo ser de fabricantes diferentes (interoperabilidade) e ter controle distribuído, ou seja, cada instrumento tem a capacidade de processar um sinal recebido e enviar informações a outros equipamentos para correção de uma variável. Sua grande vantagem é a redução do número de cabos do controlador aos instrumentos de campo. Apenas um par de fios é o suficiente para a interligação desse tipo de rede.

## **2.9 SUPERVISÃO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS**

O sistema SCADA é um sistema responsável pela coleta e transferência de informações lógicas e analógicas sobre o estado corrente do sistema, pela exibição desses dados na sala de controle e pelo comando remoto de dispositivos. O termo controle supervisão denota o processo de monitorar à distância uma atividade, transmitindo diretrizes de operação aos controladores localizados à distância e recebendo de volta a indicação de realização das ações de controle.

O supervisão usa mensagens e alarmes, classificados de acordo com as prioridades, para informar aos operadores sobre as atividades de processo. Dessa forma, ele recebe os dados necessários dos bancos de dados, dos sistemas de computadores e mesmo dos operadores. As informações incluem alarmes de processo definidos pelo usuário, memorização de eventos de operação e do processo.

O sistema supervisão é responsável pela comunicação do operador com as várias etapas do processo. Através dele o usuário pode acompanhar todo o processo, suprindo eventuais necessidades de intervenção. Através da utilização deste sistema, é possível gerenciar toda a operação das unidades de controle, de forma a obedecer intertravamentos hierárquicos

de acordo com uma filosofia de controle adequada, em função de vazões médias e tomada de decisões. Com a configuração de proteção podem ser designados direitos de acesso na forma de campos de aplicação e campos protegidos. As atribuições básicas de um sistema SCADA são: controle, monitoração e supervisão.

O controle trata da ação de gerar sinais de forma que a variável controlada se comporte de acordo com o preestabelecido, observando a presença de entradas e saídas analógicas e digitais entre o processo e as variáveis. A monitoração é a aquisição de dados para verificar as condições de funcionamento do processo, tais como, sinalização de valores limites, ocorrências de falhas, alarmes e relatórios. A supervisão permitirá a elaboração de uma estratégia de operação para maximizar o retorno financeiro por meio de uma maior produção, qualidade do produto e eficiência do sistema.

No sistema supervísório existem alguns componentes fundamentais. A camada de aplicativos abrange os algoritmos de alto nível, conjunto de telas, recursos, comunicações e configurações elaboradas pelo usuário responsável pela personalização do sistema. Os scripts são subrotinas em que se podem definir linhas de código em linguagem *Javascript* para permitir maior flexibilidade para associar ações a eventos específicos.

## 2.10 IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS

A identificação de sistemas, também conhecida como modelagem empírica, é a área de conhecimento que estuda maneiras de modelar e analisar sistemas a partir de observações, ou seja, a partir de dados (SIMPSON, 2013). O modelo originado dessa abordagem deve ser capaz de reproduzir uma noção do comportamento do sistema, a partir da qual, por exemplo um controlador poderá ser projetado para atingir um determinado desempenho, e deve ter a capacidade de predição, estimação de parâmetros de estados, simulação etc.

A identificação para controle é a tentativa de integrar a etapa do experimento de identificação do modelo ao projeto de controladores robustos. Em outras palavras, as técnicas de identificação para controle têm o objetivo de obter o modelo matemático do processo que seja apropriado para o projeto de controladores robustos (SIRAKI, 2012).

A seleção de modelos matemáticos e o ajuste dos parâmetros são influenciados por diversos fatores entre os quais: (i) conhecimento a priori do sistema (linearidade, grau de não linearidade, atraso de transporte); (ii) propriedade do modelo do sistema identificado (complexidade); (iii) seleção da medida do erro a ser minimizado; (iv) presença de ruídos (MORENO, 2009).

### 2.10.1 Etapas de Identificação de Sistemas Lineares

A identificação de sistemas se propõe a obter um modelo matemático que explique a relação de causa e efeito, em parte e de forma aproximada, presentes nos dados de entrada  $u(k)$ , e de saída  $y(k)$  (SIMPSON, 2013). As principais etapas de um problema de identificação de sistemas são:

1. Testes dinâmicos e coleta de dados. Como mencionado anteriormente a identificação obtém modelos através de dados, logo é necessário gerar tais dados. O desejável é efetuar testes para a extração de dinâmica(s) do sistema.
2. Escolha da representação matemática a ser usada. Nesta etapa é decidido o modelo a ser usado para representar o sistema. No caso deste projeto, no domínio do tempo, os modelos utilizados são ao ARX, ARMAX, modelo de erro na saída e modelo Box-jenkins. No domínio da frequência, tem-se a identificação no paramétrico da resposta em frequência.
3. Determinação da estrutura do modelo. No caso de modelos lineares, a estrutura e a escolha do número de polos e de zeros, e a determinação do atraso puro de tempo.
4. Estimação de parâmetros. Essa etapa é a escolha do algoritmo a ser utilizado para a estimação dos parâmetros do modelo, os quais vêm da etapa 2 e 3. Sendo assim, a estimação poderá alterar seus valores de referência com base tanto na abordagem escolhida para o modelo do sistema quanto em função de fatores como atraso de resposta e número de polos e zeros.
5. Validação do modelo. Tendo uma família de modelos é necessário verificar se as características de interesse do sistema original estão representadas no respectivo modelo. Como parte principal deste projeto tem-se a motivação para a comparação de modelos entre si a fim de decidir sobre um candidato melhor para utilizar no contexto de controle.

Para simplificar o processo de identificação são feitas algumas considerações como: o sistema se comporta de maneira linear ou aproximadamente linear dentro da faixa de operação a ser avaliada e usada para identificação; o sistema deve ser invariável no tempo, ou seja, o comportamento dinâmico do sistema uma vez modelado permanece inalterado; e por último, o sistema deve ter parâmetros concentrados para que o modelo apresente equações diferenciais ordinárias, não parciais. Isso implica que as variáveis de interesse variam somente com o tempo e não no espaço.

Praticamente todos os sistemas reais são contínuos no tempo, apesar disso, a representação de modelos dinâmicos discretos no tempo e de grande utilidade visto que a

maioria dos métodos de identificação estocásticos tem como resultado um sistema discreto no tempo. Tais métodos são conhecidos como algoritmos para a estimação de parâmetros e a seguir serão apresentadas duas representações matemáticas adequadas a esse tipo de identificação de sistemas.

### 2.10.2 Modelo ARX

O modelo ARX é representado segundo a equação 13. O ruído  $v(k)$  presente diretamente na equação faz com que o modelo ARX seja classificado como sendo da classe de modelos de identificação baseado no erro de previsão, ou seja, para a correta excitação da planta é necessário que seja incluído o ruído tendo em vista sua influência direta no sinal de saída do processo.

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{1}{A(q)}v(k) \quad (13)$$

sendo  $A(q)$  e  $B(q)$  polinômios arbitrários da seguinte forma:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (14)$$

$$B(q) = 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad (15)$$

e o  $q^{-1}$  operador atraso, de forma que  $y(k)q^{-1} = y(k+1)$ .

O sinal  $e(k)$  representa o erro na equação e é um ruído não branco que aparece adicionado à saída. Nesta representação o ruído é modelado como um processo branco que passa por um filtro auto-regressivo, com polos idênticos aos do processo, pois  $e(k) = v(k)/A(q)$ .

Na Figura 8 pode ser apreciada a representação da equação 13 em diagrama de blocos do modelo ARX. Na Figura 9 o diagrama de bloco referente a mesma equação do modelo, após algumas manipulações, para facilitar o entendimento do porquê o modelo pertencer a classe de modelos para identificação baseada no erro de previsão.

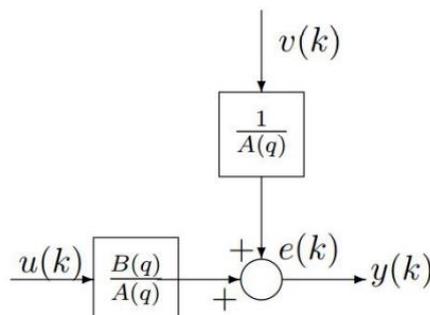


Figura 8 - Representação esquemática do modelo ARX.

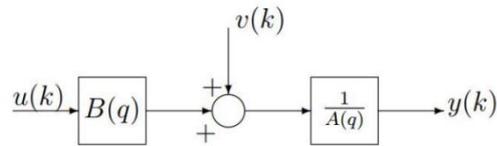


Figura 9 - Representação esquemática do modelo manipulada ARX.

### 2.10.3 Modelo ARMAX

O modelo ARMAX é representado pela equação 16, onde os polinômios  $A(q)$ ,  $B(q)$  e  $C(q)$  são arbitrários com o formato da equação 14 para  $A(q)$ , equação 15 para  $B(q)$  e da equação 17 para  $C(q)$ .

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{C(q)}{A(q)} v(k) \quad (16)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad (17)$$

Semelhantemente ao modelo ARX, o ARMAX pertence à classe de modelos de identificação baseado no erro de previsão como é representado na Figura 10. No que se refere ao ruído adicionado a saída,  $e(k)$ , é modelado como um ruído branco pelo filtro  $C(q)/A(q)$ , ou seja, o sinal de erro levará em consideração apenas o ruído com características específicas para excitação da planta.

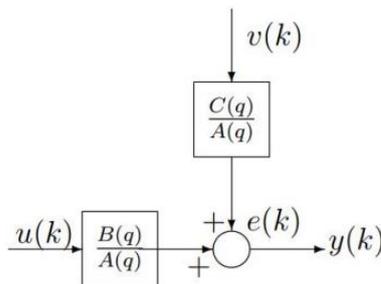


Figura 10 - Representação esquemática do modelo ARMAX.

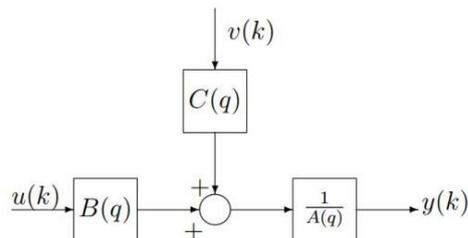


Figura 11 - Representação esquemática do modelo manipulada ARMAX.

### 2.10.4 Modelo de Erro na Saída

Este modelo pode ser obtido a partir do modelo geral tomando-se  $A(q)=C(q)=D(q)=1$  e  $B(q)$  e  $F(q)$  polinômios arbitrários, resultando em:

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + v(k) \quad (18)$$

sendo que o fato ruído branco  $v(k)$  ser diretamente adicionado a saída justifica o nome desta classe de modelos. É comum representar esse tipo de modelo usando uma variável auxiliar  $w(k)$ .

$$F(k)w(k) = B(q)u(k) \quad (19)$$

$$y(k) = w(k) + u(k) \quad (20)$$

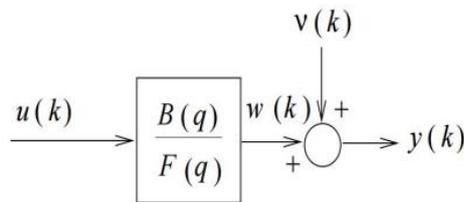


Figura 12 - Representação esquemática do modelo de erro na saída.

### 2.10.5 Modelo de Box-Jenkins

Este modelo pode ser obtido a partir do modelo geral tomando-se  $A(q) = 1$  e polinômios arbitrários, resultando em:

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + v(k) \quad (21)$$

As funções de transferências do sistema  $B(q)/A(q)$  e do ruído branco  $C(q)/D(q)$  não tem parâmetros comum, ou seja, são independentemente parametrizados. O modelo Box-Jenkins também é do tipo erro na saída:

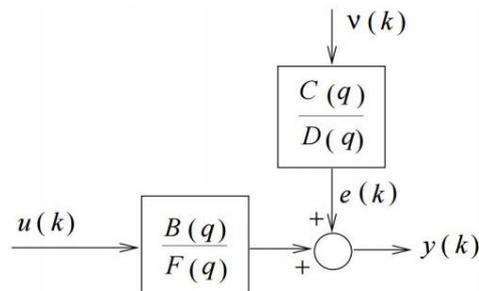


Figura 13 - Representação esquemática do modelo Box-Jenkins.

## 2.11 WAVELET

A *wavelet* tem a capacidade de extrair informação de forma que se possam analisar blocos de informação em detalhes ou em escala, tornando informações que outrora não eram visíveis no domínio do tempo. O objetivo da transformada *wavelet* é descrever uma função como uma combinação de funções de base e possibilitar uma melhor análise desta função ou sinal. As funções *wavelets* são oriundas de uma função denominada *wavelet*-mãe e são definidas a partir de escalonamentos e translações desta última. Sendo estas funções contempladas por famílias que possuem características específicas, tais como: *Haar*, *Daubechies* e *Coiflets*.

Resumidamente, em uma comparação entre a série de *Fourier* e a *wavelet* pode-se destacar a forma das funções de base, que são senóide na primeira e que sem nenhum artifício de janelamento o domínio é sempre frequência; enquanto, no segundo, pode ser tempo-frequência. A *wavelet* pode ser representada por uma função  $f(t)$  expressão como uma decomposição linear, dada por:

$$f(t) = \sum_k a_k \omega_k(t) \quad (22)$$

Em que  $k$  é um índice inteiro,  $a_k$  são os coeficientes da expansão,  $\omega_k(t)$  são conjuntos de funções (famílias) e  $t$  o conjunto de expansão. Se a expansão é única e ortogonal, pode chamá-la de base e  $a_k$  é chamada de transformada wavelet discreta de  $f(t)$ .

A expansão *wavelet* dá a localização tempo-frequência do sinal; isto significa que a maioria da energia do sinal será representada por poucos coeficientes de expansão  $a_{jk}$ . Considerando espaços ortogonais  $V_j$  pode-se expressar a equação como:

$$f(t) = \sum_k a_k \varphi(2^j t + k) \quad (23)$$

Em que  $\varphi$  é chamada de função de escala, que pode ser definida como:

$$\varphi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n), n \in Z \quad (24)$$

Sendo que  $h$  são números complexos chamados coeficientes da função escala,  $\sqrt{2}$  mantém a norma da função. As *wavelets* estão num espaço expandido  $V$  da próxima função de escala que pode ser representada por um somatório de funções deslocadas  $\varphi(2t)$ , definida por:

$$\omega(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n), n \in Z \quad (25)$$

Nessa expressão os coeficientes  $h_1$  são relacionados com os coeficientes da função de escala por:

$$h_1(n) = (-1)^n h(1 - n) \quad (26)$$

E estão relacionados com os coeficientes da *wavelet* requererem a ortogonalidade entre si. Dessa forma, a análise de multiresolução é dada pela representação de sinais onde um evento pode ser decomposto em funções de escala e detalhes.

### 3 METODOLOGIA

Nas seções anteriores foram demonstrados os tipos dos processos operacionais da CAERN, objetivando situar o contexto do trabalho e iniciar a base do trabalho. A companhia contempla diversas áreas de conhecimento técnico, enfrentando problemas, dificuldades e complexidades operacionais muito amplas. O uso de um conjunto de ferramentas computacionais faz parte do controle de perdas físicas e comerciais e um dos principais desafios da concessionária de saneamento. Associando banco de dados já usados pelo seu corpo técnico à ampliação de sua capacidade de macromedição e de telemetria, a companhia investe na implementação do sistema integrado de gerenciamento operacional. Com a divisão de superintendências, os esforços podem ser concentrados mais exclusivamente na região de atuação, focando a resolução dos problemas destas áreas.

Levando em consideração a necessidade de aumento na eficiência dos sistemas em que o país está imerso, há uma tendência natural, com o aumento da produção, do desenvolvimento de novas pesquisas acerca de tecnologias que venham a suprir as deficiências das linhas de produção, exploração e beneficiamento, sejam essas relacionadas a quaisquer gêneros. Atualmente com o crescimento dos processos de exploração e beneficiamento, principalmente os ligados ao petróleo, à energia e ao saneamento, ocorreu o aumento da carência de processos de controle que permitam uma maior flexibilidade de aplicações, assim como uma elevada confiabilidade, velocidade de resposta e menor consumo energético. Sendo assim, o controle de processos e de análise de dados são as áreas que exigem maior investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias inovadoras, melhorando o seu rendimento para que possam aprimorar os sistemas de controle automatizados.

Tendo os fatores de aumento na eficiência do processo e incremento na qualidade do serviço prestado à população como base, será elaborado um projeto que permita, a partir das necessidades do mercado, a criação de um sistema que oportuniza o aperfeiçoamento do controle operacional e do monitoramento em tempo real, por meio do desenvolvimento de um sistema de controle por intermédio das medições de nível, pressão, vazão e parâmetros elétricos em diferentes aplicações operacionais, onde será viabilizada a implementação de modelos dinâmicos otimizados, com uma ênfase prática que segue desde a instalação dos equipamentos em campo até a criação de algoritmos e rotinas operacionais no sistema supervisão. Com isso, o projeto objetiva desenvolver uma malha de controle que permita o ensaio de algoritmos inteligentes, tal como a aplicação de técnicas e tecnologias para aperfeiçoar o processo através

do gerenciamento adequado dos atuadores, variáveis de processo e informações inferidas do processo, a partir de dinâmicas previamente modeladas.

A automação de processos industriais contempla basicamente o nível de monitoramento e controle, sistemas de supervisão e atividades de coordenação, otimização e manutenção. O progresso nas áreas de controle digital e sistemas dinâmicos tornou possível o controle de processos complexos. Logo, as variáveis de processo passaram a ser operadas com controle em malha fechada, objetivando manter as operações satisfatórias com a compensação de distúrbios e mudanças no processo. Apesar disso, algumas mudanças não conseguem ser corrigidas de forma adequada pelos controladores, como é o caso de falhas<sup>2</sup>.

Sendo assim, a automação industrial deixou de atuar apenas no monitoramento e controle de variáveis de processo e equipamentos, passando a exercer papel essencial como um mecanismo de gerenciamento da produção, permitindo, inclusive, o auxílio na tomada de decisão gerencial.

Os grandes desafios na área de automação dentro da empresa são relacionados mais a área operacional em si. Natal possui centenas de pontos de operação da CAERN, conforme Figura 14, onde algum tipo de equipamento realiza intervenção direta ou indireta no sistema de abastecimento. A falta de um padrão em alguns casos e a falta de ferramentas de auxílio para os operadores causam o efeito de muitos destes pontos não estarem alinhados aos preceitos de eficiência necessários. A empresa vem buscando novas alternativas sustentáveis e soluções em automação que atendam bem aos anseios do nicho de operação da empresa.

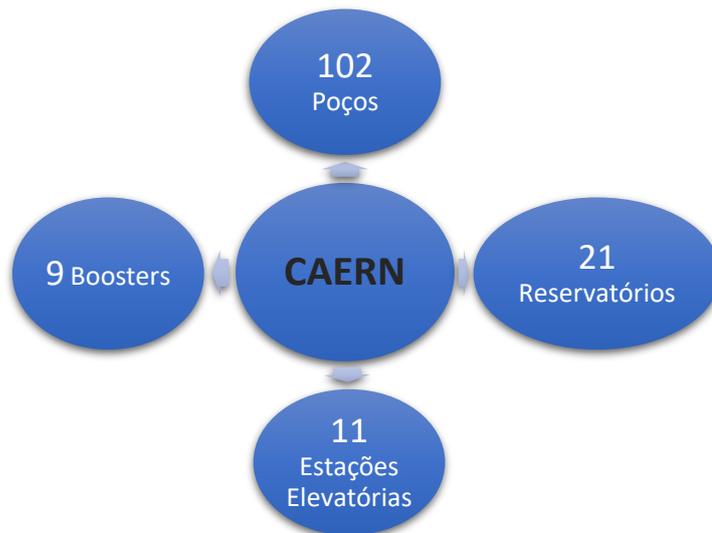


Figura 14 - Dimensão operacional do sistema.

<sup>2</sup> A falha consiste em um desvio não permitido de pelo menos uma propriedade característica do sistema de seu comportamento aceitável, usual ou da condição padrão; uma condição anormal que pode causar redução ou perda de capacidade de uma unidade funcional desempenhar a função designada.

A interface com o usuário será desenvolvida com a finalidade de permitir uma interação simples e o acompanhamento em tempo real do estado do sistema de controle, não sendo necessário um conhecimento aprofundado do assunto e trazendo maior dinamismo e flexibilidade de comunicação. Os sinais do sensoriamento serão processados e as informações relevantes ao usuário serão exibidas na tela da central de controle, visto que deverão ser analisadas de maneira automatizada, fazendo com que o ScadaBR monitore, controle e interprete o modo correto de acionamento dos atuadores que efetuarão o acompanhamento do nível dos reservatórios e acionamento de poços tubulares. O projeto proposto explicita e acompanha a tendência do processo de ascensão da automação industrial que objetiva a execução de atividades tidas como repetitivas e perigosas por ferramentas autônomas inteligentes, possibilitando a melhoria na precisão, desempenho, velocidade e redução de custos.

O sistema supervisor a ser implementado na empresa será o ScadaBR, sendo este responsável por gerenciar as funções de campo mediante uma programação prévia, sendo capaz de analisar as informações recebidas dos sensores de processo e determinar qual a melhor intervenção deve ser implementada, compondo um sistema em malha fechada para os sistemas totalmente automatizados e sistema em malha aberta para os sistemas que não possuem atuadores elétricos. O sinal de entrada transmitido ao sistema supervisor é advindo de sensores de vazão, de pressão, de nível e de energia, os quais se correlacionam de maneira variável, segundo a necessidade da rede de alimentação, explicitando, dessa maneira, a complexidade do sistema de sensoriamento conjugado à programação dos controladores e do ScadaBR. Basicamente, a comunicação utiliza sistemas de sinais de 4 a 20 mA, Modbus (RS485), saídas pulsadas e um *modem* com tecnologia baseada no *General Packet Radio Services* (GPRS) como elemento transparente intermediário de comunicação.

Além disso, o projeto irá contemplar todo o sistema operacional apresentado com dispositivos de medição e controle, sistema de telemetria de dados e sistema supervisor. A etapa de controle implementada irá abranger especificamente as estações elevatórias e os *boosters*, no entanto será destacada a EERP de Nova Descoberta como modelo de referência tendo em vista sua grande área de abrangência e dificuldade de operação por meios convencionais manuais. Além disso, será desenvolvido um sistema embarcado inteligente capaz de detectar anomalias hidráulicas, como extravasamentos, entradas de carga de grande porte e vazamentos. O local definido para a realização dos testes operacionais foi o sistema de abastecimento de Ponta Negra, baseado nos seus desníveis geométricos elevados que

proporcionam zonas com variações abruptas de pressão e unidades de bombeamento que alimentam diretamente a rede hidráulica.

A partir desse contexto gerencial será implementada uma metodologia de projeto baseada em cinco grandes áreas conforme estruturado na Figura 15. Os dispositivos de medição e controle funcionam como elementos básicos da pirâmide de automação industrial, tendo em vista que serão as ferramentas capazes de gerar informações das variáveis de processo e possibilitar a alteração das variáveis manipuladas em campo. No entanto, a modernização está fortemente conectada a possibilidade de gerenciamento virtual dessas informações no ScadaBR. Sendo assim, a segunda etapa de implementação objetiva a telemetria dos dados do chão de fábrica até a estruturação do sistema supervisório.

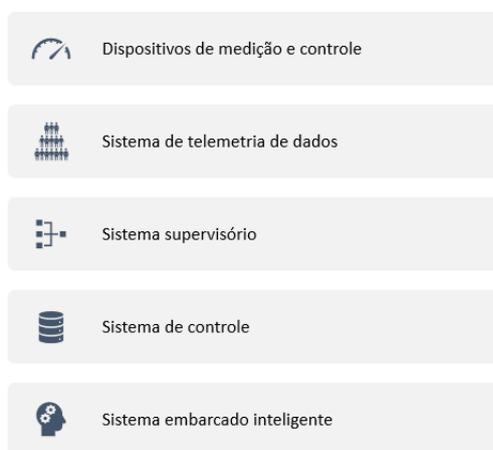


Figura 15 - Metodologia de projeto.

O histórico de dados formado no sistema supervisório permitirá o auxílio na análise das características operacionais para otimização dos controles operacionais. Assim como, permitirá a criação de novas bases de conhecimento para embasar a implementação de sistemas embarcados inteligentes capazes de fornecer análises confiáveis e eficientes para efficientização das tomadas de decisão operacionais.

Na CAERN, onde a atividade foi desenvolvida, são oferecidas soluções para que possam ser facilmente aceitas e utilizadas pela base operacional. A implementação dos processos automatizados vem lentamente ganhando espaço, visto que esta mudança traz benefícios tanto para a área operacional como para a comercial, permitindo o aumento da eficiência na produção associadamente ao incremento na qualidade das informações geradas tanto nas plantas industriais da companhia como no serviço prestado aos clientes. A falta de profissionais especializados em automação e questões de ordem financeira ainda são os principais motivos para ainda os processos não sejam totalmente automatizados. No caso desse projeto, há uma consciência que criar soluções em automação visando o auxílio dos processos é o grande desafio

em questão. A Figura 16 apresenta a base de instrumentos adotados pela empresa atualmente, ressaltando a importância da modernização e incremento na qualidade da informação.



Figura 16 - Base de instrumentos analógicos.

As melhorias no setor operacional e a complexidade dos processos da CAERN tornam a tentativa para se adotar uma estratégia para promover uma fácil resolução, particionando os problemas para que possam ser analisados separadamente e posteriormente encontrar uma solução flexível e global constitui-se em uma árdua tarefa, especialmente em função das restrições e variações operacionais de cada alimentador. No entanto, esta concepção de solução *bottom-up*, transforma os pequenos avanços em soluções para problemas específicos que vão se generalizando com o aumento da aceitação por parte da empresa até atingir processos maiores e sistemas mais complexos. O objetivo deste trabalho então não é apenas promover um auxílio a uma operação singular do processo, mas também incentivar a pesquisa de outras soluções, construindo um círculo virtuoso de realizações.

O desenvolvimento deste trabalho foi orientado à proposição de um sistema automatizado que visa subsidiar a desenvolvedores e projetistas o desenvolvimento de soluções para problemas enfrentados na operação de redes de abastecimento hídrico. Para que o modelo estruturado seja aplicável a diferentes contextos é necessário que ele se caracterize, primeiramente, como abrangente e flexível. Essas características podem ser conseguidas mediante a identificação de critérios de decisão referentes aos componentes de um modelo dessa natureza.

Para a estruturação do modelo do sistema de automação aplicado à operação de redes de abastecimento hídrico, optou-se pela organização de referenciais de pesquisa segmentados de acordo com a função que cada um destes referenciais exerce no referido modelo, contribuindo assim para a realização de um processo de tomada de decisões mais racional, eficiente e produtivo. Inicialmente foi necessário o estabelecimento de qual tecnologia é

predominante nas unidades operacionais, tomando como base a Figura 17. A partir de visitas de campo foi concluído que o sistema operacional é baseado em grande parte nos sistemas automáticos elétricos. Com esta referência é possível a criação de um cronograma para a parada estratégica das unidades para modernização dos equipamentos.

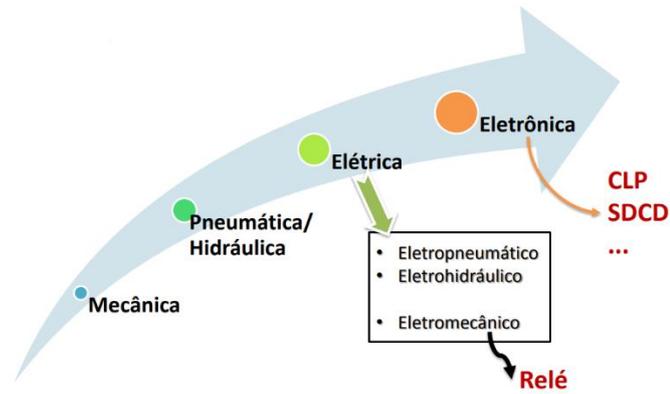


Figura 17 - Linha temporal da tecnologia operacional.

## 4 DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO E CONTROLE

Os instrumentos de controle empregados na indústria de processos têm sua própria terminologia. Os termos utilizados definem as características de medida e controle dos diversos instrumentos: indicadores, registradores, controladores e transmissores. A seguir serão definidas as principais características desses componentes:

- a) faixa de medida (*range*): é o conjunto de valores da variável analisada dentro de medidas extremas;
- b) rangeabilidade: é a relação entre o valor máximo e o valor mínimo, lidos com a mesma exatidão na escala de um instrumento;
- c) zona morta: é a máxima variação que a variável pode ter sem que provoque alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.

Os instrumentos podem ser denominados de acordo com a função que desempenham no processo. Os elementos indicadores dispõem de um ponteiro e de uma escala graduada na qual pode-se ler o valor da variável. Podendo existir também indicadores digitais que mostram a variável em forma numérica com dígitos ou barras gráficas. Já os registradores são instrumentos que armazenam a variável através de um traço contínuo ou pontos em um gráfico. E, os transmissores determinam o valor de uma variável no processo através de um elemento primário, tendo o mesmo sinal de saída (eletrônico), cujo valor varia apenas em função da variável do processo. Enquanto os controladores comparam a variável controlada com um valor desejado e fornecem um sinal de saída a fim de manter a variável controlada em um valor específico ou entre valores determinados.

### 4.1 MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão trata da determinação da quantidade de líquidos, gases ou sólidos que passa por um local específico na unidade de tempo. Além de que podem ser incluídos instrumentos que indicam a quantidade total movimentada, num intervalo de tempo. A quantidade total movimentada pode ser medida em unidades de volume (litros, mm<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, galões, pés cúbicos). A vazão instantânea é dada por uma dessas unidades dividida por uma unidade de tempo.

Quando se mede a vazão em unidade de volume, devem ser especificadas as condições base consideradas. Assim no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera nas condições de operação ou em outra temperatura qualquer. Os instrumentos contemplados

neste trabalho retratam condições de campo da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, portanto todos os elementos sensores levarão em consideração as condições de operação do sistema. No entanto, os mesmos podem ser estendidos para aplicações em bancadas didáticas ou laboratórios de medição e controle. A seguir serão descritos os principais medidores utilizados pela empresa.

A precisão global de uma medição de vazão, nível ou pressão depende de muitas variáveis. Embora os equipamentos tenham desempenhos de alto nível, uma instalação adequada é fundamental para aproveitar ao máximo os benefícios oferecidos. As condições ambientais são os elementos de influência mais difíceis de controlar, afetando diretamente na precisão das medições. Apesar disso, existem maneiras de se reduzir os efeitos da temperatura, umidade e vibração. Todos os medidores que serão citados a seguir possuem em seus circuitos elementos para compensação das variações de temperatura.

Em suas respectivas fábricas, cada sensor ou transmissor é submetido a vários ciclos de temperatura e as características desses elementos sob diferentes temperaturas são gravadas na memória do sensor. Logo, quando instalados em campo o efeito da temperatura é minimizado devido a esta correção. A maneira mais simples de se evitar as variações de temperatura, geralmente, é a montagem do equipamento em áreas protegidas das mudanças ambientais. Outro inimigo de circuitos eletrônicos é a umidade. Para a instalação dos equipamentos em áreas com altos índices de umidade é verificada a correta colocação dos anéis de vedação das tampas das carcaças. As tampas são completamente fechadas manualmente até que os anéis sejam comprimidos e para as conexões elétricas são usadas fitas vedantes para evitar a penetração de umidade. E, embora os equipamentos sejam quase insensíveis às vibrações, foram evitadas as montagens próximas a bombas e outros equipamentos que geram vibração excessiva.

#### **4.1.1 Medidor de vazão eletromagnético**

Na classe dos medidores especiais de vazão se enquadram os eletromagnéticos. Esse medidor é um dos mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão na indústria. Sua perda de carga é equivalente à de um trecho reto de tubulação, já que não possui qualquer obstrução. É virtualmente insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição e a única restrição é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo. Um fato de importante ressalva é que fluidos com propriedades magnéticas podem adicionar erro na medição.

A Lei de Faraday utilizada para medidores de vazão determina que o movimento do líquido através do campo magnético induz uma força eletromotriz que atravessa o líquido num sentido perpendicular ao campo magnético, sendo essa fem diretamente proporcional à sua velocidade de escoamento.

O medidor utilizado pela empresa CAERN consiste em um eletromagnético da fabricante italiana *Euromag International*, modelo MC608B para o conversor e MUT2200 para o sensor, que pode ser visto na Figura 18. De maneira geral, esse medidor possui duas partes básicas: sensor e conversor. O sensor é instalado nos tubos com o auxílio de flanges e o conversor é instalado nas proximidades conectado por meio de dois cabos. Os medidores de fluxo eletromagnético apresentam muitas vantagens importantes com relação às relativas contrapartes mecânicas, que compreendem entre outros: estabilidade excepcional por longo período, máxima confiança de processo e baixo índice de manutenção. Conseqüentemente, esses sensores fornecem medições precisas e são confiáveis por muitos anos.



Figura 18 - Medidor de vazão eletromagnético (sensor e conversor).

Para indicações detalhadas e medições corretas obedeceram-se às seguintes condições básicas: o líquido deve ser condutor, o tubo deve estar sempre completamente cheio, as distâncias de entrada e saída devem ser aquelas aconselhadas. O conversor eletrônico apresenta IP (grau de proteção) 67 e o elemento sensor IP 68, com possibilidade de imersão contínua em 1,5 metro de coluna d'água.

A placa de identificação do sensor representada na Figura 19 traz informações importantes. A primeira diz respeito ao modelo do sensor instalado (MC 608B), em seguida tem-se o número da parte que identifica o instrumento por meio do qual pode-se obter o número de série. O item DN representa o diâmetro nominal em milímetros; PN representa a pressão nominal na unidade bar; Temp. apresenta a temperatura máxima do fluido para realizar o processo de medição adequado; IP é o grau de proteção do equipamento segundo as normas internacionais; e KA o coeficiente de calibração.

No sensor, se o líquido escorrer na mesma direção da seta (entra em – e sai em +), o fluxo será positivo e o display mostrará uma leitura sem sinal. Já se o fluxo escorrer em direção

oposta irá obter-se no display uma leitura com um sinal negativo. Nas instalações em tubos horizontais, a caixa de derivação deve ser colocada na parte superior, conforme Figura 20, pois somente assim será garantida a possibilidade de detecção de tubo vazio. Quando a instalação for vertical, aconselha-se sua instalação com direção no fluxo para cima, reduzindo ao mínimo o desgaste e os depósitos no sensor.



Figura 19 - Placa de identificação e indicação do sentido de fluxo.



Figura 20 - Caixa de derivação na parte superior do medidor.

Para obter uma medição de fluxo de máxima precisão, foi essencial ter os comprimentos retos mínimos dos tubos de entrada e saída conforme as indicações que seguem:

- a) na presença de tubos parcialmente cheios ou com saída livre, o medidor de vazão foi colocado num tubo em U respeitando os comprimentos para cima e para baixo entre as curvas;
- b) em caso de conexão em T entre dois tubos diferentes, foi necessário respeitar uma distância de 10DN (diâmetro nominal) a montante do medidor de vazão;

- c) não se colocou o sensor nas proximidades de qualquer variação no percurso do fluxo;
- d) não se colocou qualquer válvula de gaveta diretamente conectada a montante do sensor.

Para um funcionamento normal e eficiente do medidor de vazão a temperatura ambiente deve estar limitada dentro de um intervalo de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sendo possível obter tal valor através de sensores no elemento sensor. E, a temperatura do fluido deve estar dentro do intervalo de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  até  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

O elemento conversor possui uma placa de identificação com os seguintes itens, conforme Figura 21:

- a) modelo: modelo do conversor;
- b) IP: grau de proteção do conversor;
- c) n° parte: número de série que identifica o instrumento;
- d) temp.: temperatura mínima/máxima das condições de trabalho;
- e) alimentação: tensão de alimentação ou a bateria;
- f) Hz: frequência da tensão de alimentação;
- g) acoplamento: número de série que identifica o sensor acoplado ao conversor.



Figura 21 - Placa de identificação do elemento conversor.

Para assegurar um funcionamento regular, utilizaram-se sempre os cabos de sinal incluídos pelo fabricante no fornecimento.

A Figura 22 demonstra que os dados podem ser visualizados no display em três áreas principais. A área no alto contém os símbolos para as informações sobre o estado, com indicação de duração da bateria, indicação de alimentação, símbolos de alarme e leitura instantânea de vazão do fluxo. A área central contém um gráfico linear da vazão mostrado em

percentual sobre a vazão do fluxo de fundo de escala. A área embaixo pode ser selecionada pelo cliente e as opções disponíveis são:

- a) T+ contador positivo total;
- b) P+ contador positivo parcial;
- c) T- contador negativo total;
- d) P- contador negativo parcial;
- e) data e hora e indicação de temperatura.



Figura 22 - Display do medidor de vazão.

Os alarmes de vazão surgem como elementos fundamentais para o controle local do sistema. Os limites de vazão máxima e mínima são acionados quando a vazão do sistema está fora dos valores estabelecidos. Um elemento importante é o limite de tubo vazio. Ele permite regular a sensibilidade de detecção do tubo vazio. Deve-se mover a seleção para “*Empty*” se o alarme não aparecer com o tubo vazio ou para “*Full*” se o alarme não desaparece com o tubo cheio. Por motivos operacionais, os sensores podem saturar e passarem a não medir de maneira adequada. Quando isso acontece deve-se alterar o limite de tubo vazio até “*Full*” e em seguida voltar para seu estágio original.

No que diz respeito às saídas do conversor é possível ressaltar elementos fundamentais para o controle do sistema, tais como: saídas analógicas ativas e passivas de 4 a 20 mA; saída auxiliar de 24 Vcc.; saída digital programável para situações como fluxo inverso, limite de vazão máxima, limite de vazão mínima, dosagem, falha na excitação e tubo vazio. Além do fato de que todas as saídas são optoisoladas.

A precisão do medidor de vazão obedece ao princípio de que quanto maior a velocidade do fluido dentro do tubo menor será o erro percentual de medição. Diante desse fator, em alguns sistemas de medição foram feitas adaptações para adequação do parâmetro de velocidade dentro do tubo, pois havia uma vazão muito baixa para um tubo de elevado diâmetro. Dessa forma, foi necessária a redução de seu diâmetro sempre obedecendo as distâncias a montante e a jusante estabelecidas pelo fornecedor.

De maneira geral, existem dois parâmetros fundamentais de configuração do medidor: *peak cut* e *cut-off*. O conversor mede a vazão durante intervalos de tempo regulares chamados ciclos de digitalização. Em cada ciclo a tensão dos eletrodos é amostrada. Cada amostra é comparada com média medida anteriormente. A diferença entre os valores médios (em valores absolutos e expressa em % do fundo de escala) é comparado com o valor configurado no tópico *peak cut*. Se essa diferença superar o anterior, então o seu valor é limitado ao valor configurado. A mesma diferença também é comparada com a configuração dos filtros de desvio: se a diferença for maior que o valor estabelecido, a medida imediatamente assume o valor da nova amostra, caso contrário, o valor é lentamente alterado para um conjunto médio dentro de um período determinado. Por exemplo, na Figura 23, tem-se o *peak cut* setado em 5 %, ou seja, qualquer sinal medido abaixo desse limite será considerado zero. E, o filtro de desvio setado em 15 %, podendo variar até 20 % ou 10 %. Sendo assim, qualquer valor menor que 10 % não será considerado para efeito de medição e caso seja superior a 20 % o valor máximo estabelecido é que será considerado.

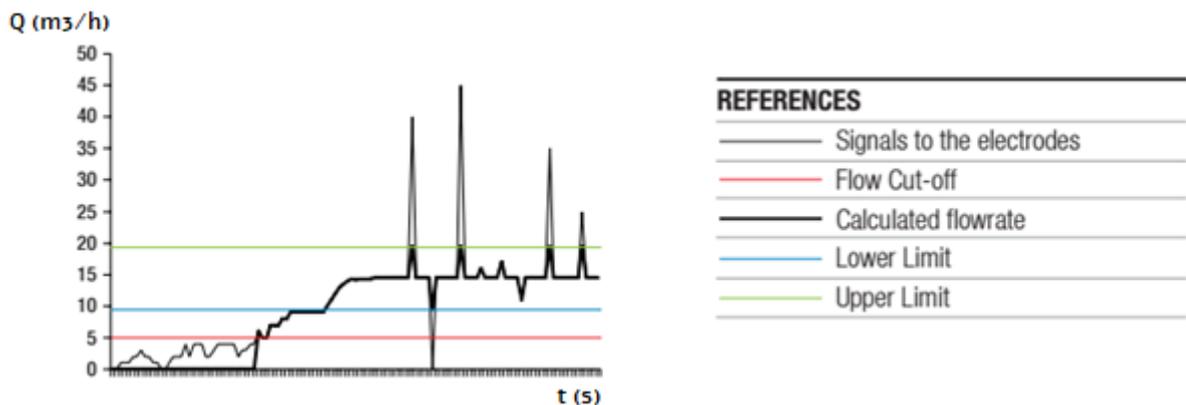


Figura 23 - Gráfico representativo de comportamento da vazão.

#### 4.1.2 Medidor de vazão ultrassônico

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito modelo SL1168 mostrado na Figura 24 foi implementado tendo em vista o baixo consumo energético. Sua aplicação, principalmente, em

fluidos limpos, possui pequena tolerância para líquidos com pequenas quantidades de ar ou sólidos em suspensão sendo mais adequada sua utilização para medição de água. Como principais vantagens tem-se sua precisão, flexibilidade e baixo custo para diâmetros acima de 50 mm, fato este que reduz seu campo de aplicação para as aplicações residenciais, tendo em vista que as ligações convencionais são limitadas a 32 mm. Sua navegação amigável é de fácil parametrização. E, sua versatilidade se deve ao fato de não ser um medidor de inserção. Podendo ser aplicado em tubos de diversos diâmetros e com diferentes materiais. Seu totalizador é dividido em diário, mensal e anual.



Figura 24 - Medidor ultrassônico *clamp-on*.

Seu princípio de funcionamento é simples. Quando o sinal ultrassônico é transmitido através do fluxo de fluido, haverá uma diferença entre o tempo de trânsito do sinal dos sensores a montante e a jusante que será proporcional à velocidade do fluxo de acordo com as equações 13 e 14 abaixo:

$$V = \frac{M * D}{\text{sen}(2\theta)} * \frac{\Delta T}{T_{up} * T_{down}} \quad (27)$$

$$\Delta T = T_{up} - T_{down} \quad (28)$$

Sendo as variáveis:

V = velocidade média;

M = frequência de reflexão ultrassônica;

D = diâmetro do tubo;

$\Theta$  = ângulo entre o sinal ultrassônico e o fluxo;

T<sub>up</sub> = tempo de trânsito na direção direta;

T<sub>down</sub> = tempo de trânsito na direção reversa.

Sua instalação é relativamente simples, demandando pouca mão de obra e baixo custo de materiais. Basicamente, basta apenas parametrizar o diâmetro externo da tubulação, a espessura da parede do tubo, o material do tubo, o tipo de transdutor e o tipo de montagem. Em seguida, o próprio medidor irá apresentar a distância ideal para a colocação dos elementos sensores. Após essa etapa, deve-se analisar os menus que indicam a qualidade do sinal individual de cada sensor (devendo estar acima de 60 %) e a qualidade da montagem (devendo estar entre 98 % e 101%).



Figura 25 - Sensores instalados com destaque para área sem pintura.

Antes de instalar os transdutores é necessária a limpeza da superfície onde serão colocados, retirando qualquer incrustação e tinta. A Figura 25 destaca a retirada da pintura para a verificação inicial da vazão por meio de medidores portáteis com o mesmo princípio de funcionamento. Aplica-se a pasta de acoplamento nos transdutores e os coloca alinhados entre eles e com a superfície, verificando se existem bolhas de ar entre os transdutores e a parede do tubo. Após o processo de instalação é indicado a sua inspeção. A condição de montagem influencia diretamente no valor da vazão e na confiabilidade do sistema. Na maioria dos casos basta aplicar a pasta de acoplamento nos transdutores para a qualidade do sinal melhorar, mas em outros casos é necessário ajustar as distâncias entre os elementos sensores para se obter maiores valores de qualidade de montagem e elevar a confiabilidade do sistema.

A intensidade do sinal é obtida de cada elemento sensor. Sua intensidade é representada em porcentagem e varia de 0 até 99,9 %. Normalmente, são obtidas indicações fortes do sinal, durante um longo tempo de operação, mas o ajuste dos transdutores para a melhor posição deve ser efetuado com o intuito de maximizar a intensidade do sinal individual durante a instalação. Se o sinal for menor que 60 % o modo de instalação dos transdutores e o espaçamento fornecido devem ser reajustados e o tubo deve ser inspecionado novamente.

#### **4.1.3 Transmissor de pressão SMAR**

O advento dos microprocessadores e componentes eletrônicos permitiu a utilização de transmissores de pressão, assim como os de outras variáveis, possibilitando alto desempenho em medições que até então utilizavam somente a tecnologia analógica. Os transmissores analógicos usados eram projetados com componentes discretos, suscetíveis a falhas devido à temperatura, condições ambientais e de processo, necessitando de ajustes constantes através de potenciômetros e chaves especiais. Mas, com o avanço da tecnologia digital, a simplicidade de uso dos transmissores de pressão fez com que passassem a ser amplamente utilizados nos processos e aplicações com inúmeras funcionalidades e recursos.

A série de transmissores LD301 da fabricante SMAR utilizados pela CAERN é baseada em sensores capacitivos em que a pressão aplicada a diafragmas sensores faz com que se tenha uma variação da capacitância entre os mesmos e um diafragma central. Esta variação de capacitância é usada para variar a frequência de um oscilador que é medida diretamente pela CPU (Unidade de Processamento Central) e convertida em pressão. Não existe conversão analógica-digital o que contribui na exatidão e eliminação de falhas embutidas nessas conversões. O equipamento apresenta em seu display os valores de pressão devidamente convertidos em vazão e em totalização de volume. A Figura 26 mostra um diagrama funcional do medidor tipo SMAR.

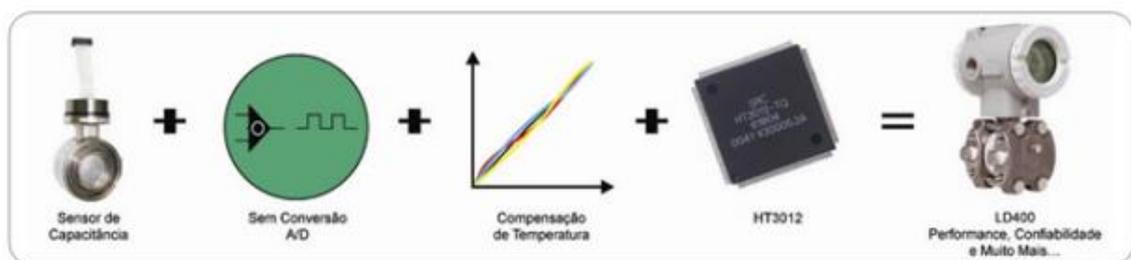


Figura 26 - Diagrama funcional do medidor de vazão.

Os sensores capacitivos são confiáveis, com respostas lineares e praticamente insensíveis a variações de temperatura, conforme Figura 27, sendo indicados em instrumentação e controle de processos. Essa propriedade possibilita a comunicação através de uma saída analógica que irá fornecer um valor de corrente proporcional ao valor de pressão.

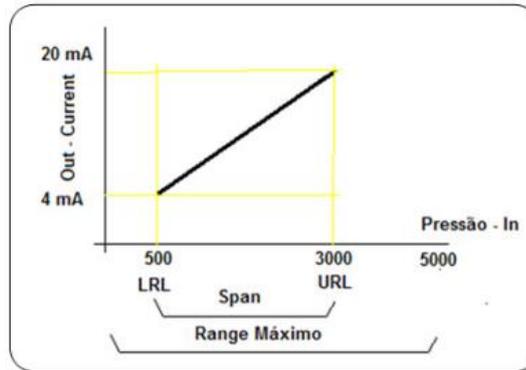


Figura 27 - Terminologia de calibração.

#### 4.2 MEDIDOR DE PARÂMETROS ELÉTRICOS

O multimedidor de energia utilizado no sistema de sensoriamento das condições operacionais das bombas elétricas trata-se do modelo MGE G3 da fabricante ABB e pode ser visualizado na Figura 28. Consiste em um medidor de grandezas elétricas capaz de medir grandezas como tensão, corrente, potência ativa, potência aparente, potência reativa, ângulo de defasagem, fator de potência e frequência. O equipamento apresenta três displays alfanuméricos e uma linha de 16 caracteres para leitura das variáveis e diagnóstico de comunicação. O multimedidor foi instalado em equipamentos que utilizam esquemas diferentes de ligação elétrica, sendo aplicado em uma rede universal trifásica desequilibrada com neutro na maioria dos casos. Sendo possível sua configuração para redes monofásicas, trifásicas equilibradas ou desequilibradas. A utilização da interface de comunicação RS 485 permitiu a interligação do equipamento na rede de comunicação, sendo a ligação entre os instrumentos feita através de um par de fios trançados ou com cabo blindado com comprimento máximo de 1.200 m. Os instrumentos foram interligados em paralelo observando a polaridade do sinal. No início e no final do loop colocou-se um resistor de terminação de 120 ohms, conforme Figura 30.



Figura 28 - Multimedidor de grandezas elétricas.

As Figuras 29 e 30 trazem os esquemas elétricos de ligação utilizados nos poços tubulares de Ponta Negra e na Estação Elevatório de Água de Ponta Negra. A ligação mais comum encontrada em campo é a de uma rede trifásica desequilibrada com neutro e que utiliza

dois transformadores de corrente (TC's). Por definição, os TC's são implementados com o intuito de retirar amostragens do sinal de alimentação para efeito de medição. O multimetror faz uso de cada fase da alimentação e dos sinais coletados a partir do TC's para efetuar suas medições dos parâmetros elétricos.

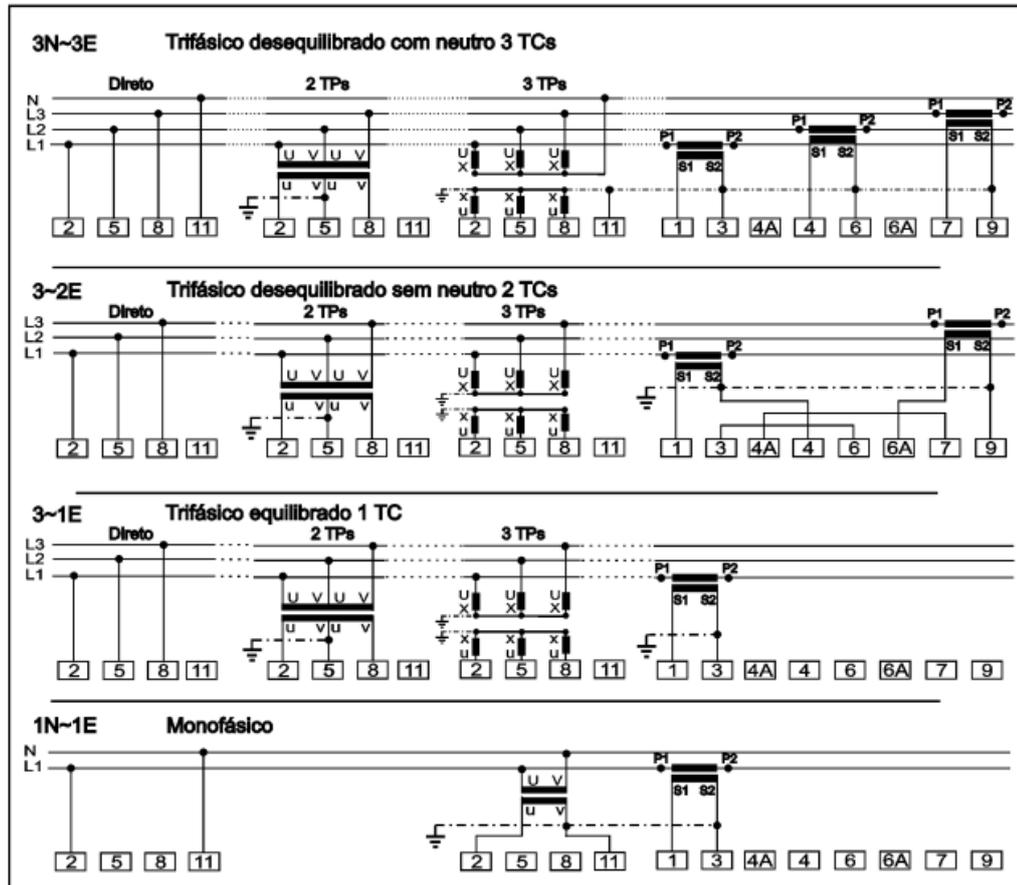


Figura 29 - Esquema de ligação do sinal de entrada.

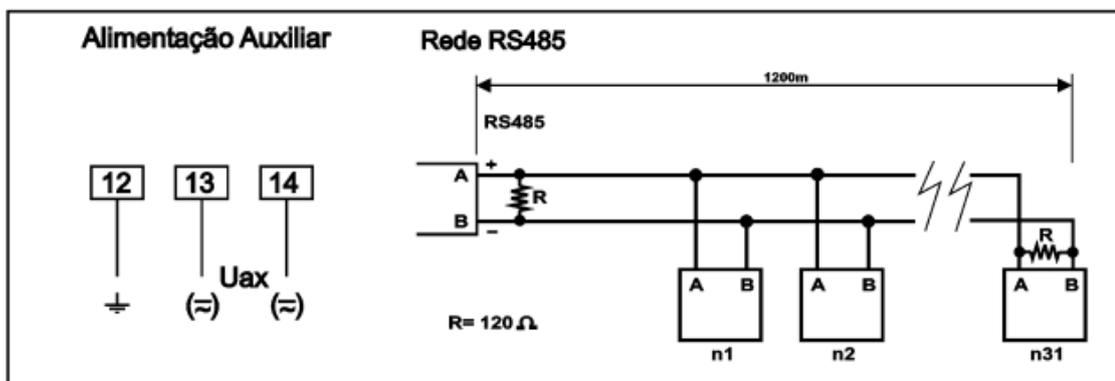


Figura 30 - Esquema de ligação da interface de comunicação.

### 4.3 MEDIÇÃO DE PRESSÃO

A medição de pressão é o mais importante padrão de medida, pois as medidas de vazão e nível podem ser feitas a partir desse processo, conforme já visto nos transmissores de pressão utilizados para medição de vazão. A pressão é definida como uma força atuando em uma unidade de área. A pressão estática é o peso exercido por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente à tomada de impulso, por unidade de área exercida. Já a pressão dinâmica é a pressão exercida por um fluido em movimento, sendo medida fazendo-se a tomada de impulso de tal forma que receba o impacto do fluxo.

#### 4.3.1 Sensor capacitivo

A principal característica dos sensores capacitivos é a completa eliminação dos sistemas de alavancas na transferência da força e deslocamento entre o processo e o sensor. Este tipo de sensor resume-se na deformação, diretamente pelo processo de uma das armaduras do capacitor. Tal deformação altera o valor da capacitância total, que é medida por um circuito eletrônico. Se essa montagem elimina os problemas mecânicos das partes móveis de um lado, do outro, expõe a célula capacitiva às rudes condições do processo, em especial a temperatura e aos produtos químicos. A Figura 31 mostra a imagem do transmissor utilizado em campo.



Figura 31 - Transmissor capacitivo NP300.

O transmissor de pressão utilizado para monitoramento das condições de pressão nos poços produtores e do nível dos reservatórios foi o modelo NP300 da fabricante Novus. Os modelos de 5 MPa e de 10 Mpa são transmissores de pressão absoluta, ou seja, a soma da pressão relativa com a pressão atmosférica. O primeiro é utilizado para efetuar a medição de nível nos reservatórios. E, os de pressão de trabalho maior são utilizados nos poços que injetam água diretamente na rede de distribuição e estão suscetíveis a pressões de operação maiores. O esquema de ligação elétrica é simples, conforme Figura 32. Sua comunicação é feita por um

sistema de 4 a 20 mA pelo mesmo cabo de alimentação e retorna uma corrente proporcional ao diferencial de pressão. A temperatura de trabalho do transmissor varia de -10 °C até 70 °C e o material do sensor que entra em contato com o meio é o aço inox 316L. Apresenta precisão considerável, com 0,5 % do fundo de escala, incluindo histerese, repetibilidade e linearidade.

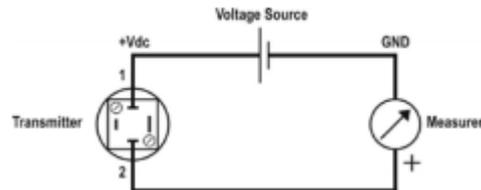


Figura 32 - Esquema elétrico do transmissor capacitivo NP300.

#### 4.4 ELEMENTO CONTROLADOR

O controlador criado pela Novus, modelo N1540, que pode ser visto na Figura 33, é um indicador de processo de grande versatilidade. Possui uma ampla lista de tipos de entrada como termopares, termorresistência e sinais lineares de tensão e corrente elétricas, que permitem ao dispositivo indicar as mais diversas variáveis nos mais diversos processos. E, é a partir dessa característica é que se insere a medição de nível e pressão. Os sensores de pressão utilizados medem a altura da coluna d'água acima do sensor e por meio da deflexão da célula capacitiva gera-se um sinal elétrico de 4 a 20 mA que é enviado para esse controlador. Também apresenta diferentes funções de alarme, *offset* de indicação, proteção por senha da configuração feita, comunicação serial RS485, indicação em graus Celsius (°C) ou Fahrenheit (°F), dentre outras funcionalidades. A configuração pode ser realizada diretamente no indicador ou via interface USB.



Figura 33 - Controlador N1540.

## 5 SISTEMA DE TELEMETRIA DE DADOS

Na CAERN são utilizadas aplicações de telemetria utilizando serviço GPRS do sistema de telefonia celular baseado na tecnologia conhecida como *Global System for Mobile Communications* (GSM) para o enlace privado de pacote de dados. Nessa seção será abordado o sistema GPRS e uma descrição das aplicações desse sistema e outras tecnologias associadas a essa tecnologia, levando em consideração o esquema funcional apresentado na Figura 34. Também será apresentada uma breve descrição de requisitos de unidades remotas para estas aplicações.

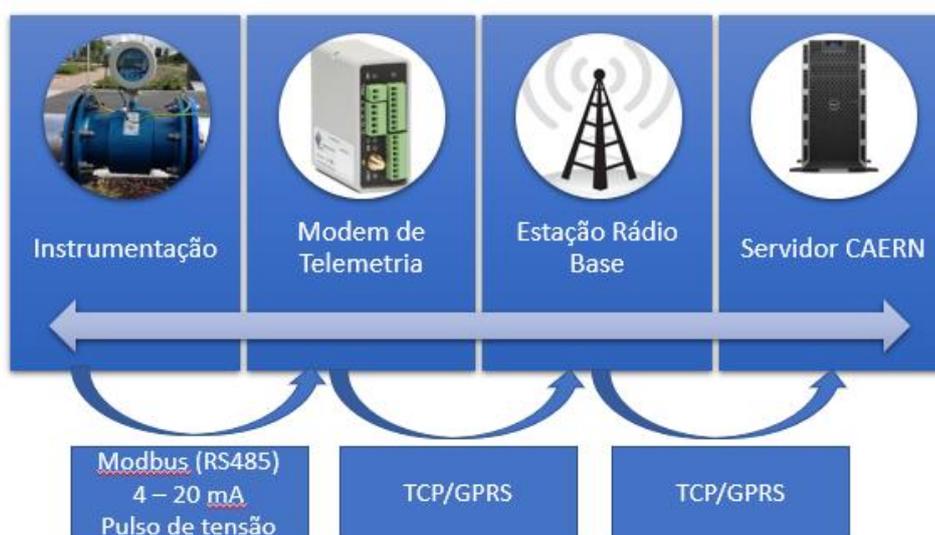


Figura 34 - Esquema funcional do sistema de telemetria de dados.

O serviço GPRS cria uma rede de pacotes sobre a rede de telefonia celular GSM para o envio e recepção de dados. Neste sistema de comutação de pacotes, um canal de rádio só é utilizado quando o usuário está efetivamente enviando ou recebendo dados, ficando o canal livre para outros usuários do serviço que compartilham o mesmo canal. Este tipo eficiente de uso de canais permite que vários usuários usem o sistema no mesmo componente. O serviço oferece aplicações importantes para telemetria como:

- a) rápida conexão: o sistema remoto tem acesso quase instantâneo ao serviço;
- b) tarifação por tráfego: as operadoras usualmente tarifam o serviço pelo volume de dados transportado. Aplicações de telemetria tipicamente são de baixo tráfego, resultando em uma tarifa mensal bastante reduzida.
- c) Velocidade: as operadoras usualmente tarifam o serviço pelo volume de dados transportado. Aplicações de telemetria tipicamente são de baixo tráfego, resultando em uma tarifa mensal bastante reduzida.

- d) Integração com a internet: uma vez estabelecida a conexão GPRS, o dispositivo remoto tem acesso pleno à Internet e todos os serviços associados. A rede GPRS pode ser entendida como uma subrede da *internet*, utilizando os mesmos protocolos.
- e) Disponibilidade de equipamentos: o número de fornecedores de *modems* GPRS no mercado vem aumentando significativamente, possibilitando a implementação de um maior número de aplicações de sucesso.
- f) Cobertura de serviços: as operadoras GSM no Brasil oferecem o serviço GPRS em todas as áreas em que o sistema de voz GSM está em operação.
- g) Origem da conexão: os sistemas de telemetria baseados em GPRS devem se basear em conexões originadas pela unidade remota. Esta é uma questão apenas de iniciativa de conexão, visto que uma vez estabelecida, a troca de dados é bidirecional.

A CAERN instala nas suas estações de tratamento tanto de água como de esgoto quadros de telemetria com modems GPRS, onde a unidade remota envia dados diretamente para o supervisor na internet com protocolo TCP/IP. Uma aplicação rodando no servidor aguarda a requisição de conexão originada pela unidade remota, recebe e envia dados através desta conexão e armazena os dados recebidos.

Este tipo de aplicação é adequado para registro periódico de informações de campo diretamente no banco de dados do servidor corporativo, eliminando as atividades de coleta e digitação de informações. Pode ser aplicado em sistemas de tarifação (energia, água, gases, combustíveis) ou qualquer outro sistema em que o registro histórico de variáveis de campo seja necessário. A unidade remota deve ter capacidade de armazenar localmente os dados para envio até que o recebimento dos mesmos seja confirmado pelo servidor. A capacidade de armazenamento local é também importante para o caso de falha do sistema GPRS ou do acesso à *internet* do servidor.

A oferta de unidades remotas com capacidade de comunicação via *internet* ainda é pequena, e a escolha da mais adequada para cada aplicação deve ser feita com bastante cuidado. Hoje já são disponíveis no mercado unidades remotas compactas com grande capacidade de comunicação, que resultam em um melhor compromisso entre custo e benefício que as soluções anteriores. A unidade remota de telemetria deve ter recursos adequados à interface com o sistema sob supervisão e à rede GPRS. Destacam-se os seguintes recursos:

- a) entradas e saídas para monitoração e atuação no sistema sob supervisão;
- b) interface RS232 para interface com modem GPRS;
- c) interface *ethernet* e RS232 ou RS485 para interface com equipamentos do sistema sob supervisão;

- d) memória para retenção dos dados de telemetria até o envio para a central de supervisão;
- e) protocolo TCP/IP para acesso aos serviços de *internet*;
- f) protocolos associados aos serviços de *internet*;

As soluções de telemetria utilizando a infraestrutura de telefonia celular para transporte de dados através da *internet* alcançaram maturidade e já há disponibilidade de diferentes opções para implantação. A utilização dos protocolos e serviços da Internet permite a implementação de diferentes sistemas de telemetria, e ainda soluções mistas baseadas nas alternativas apresentadas.

A seleção da operadora de telefonia celular e do sistema de transmissão de dados utilizado depende mais de negociação de tarifas e disponibilidade do serviço do que de questões técnicas. Já a escolha da unidade remota e o projeto do sistema de informática associado devem se basear em uma análise técnica rigorosa.

Os dados obtidos pelos medidores não são suficientes para o estabelecimento do controle operacional. Para tanto é necessário a transmissão dos dados de campo até a sala de controle e para isso faz-se uso da telemetria. A telemetria é a técnica de transportar medições obtidas no processo à distância. Seu uso torna possível a centralização dos instrumentos e controles de um determinado processo em painéis de controle ou em uma sala de controle. Suas principais vantagens são:

- a) os instrumentos agrupados podem ser consultados mais fácil e rapidamente, possibilitando à operação uma visão conjunta do desempenho da unidade produtora;
- b) pode-se reduzir o número de operadores com simultâneo aumento da eficiência de trabalho;
- c) aumento da utilidade e da eficiência dos instrumentos devido as possibilidades de pronta consulta, manutenção e inspeção, em situação mais acessível, mais protegida e mais confortável.

## 5.1 MODEM DE TRANSMISSÃO

O *modem* funciona como elemento transparente de transmissão de dados na rede com uma inteligência limitada. Utiliza-se uma porta RS485 para entrada e saída de dados. O *modem* apenas transmite os dados recebidos na porta serial sem fazer uma checagem de erro ou controle de fluxo de dados no canal. As aplicações típicas de integração entre instrumentos de campo por meio do *modem* são gerenciadas por um sistema supervisor que utiliza o protocolo mestre-

escravo. Como exemplo de sistema com tempo de transmissão programável pode-se citar o Modbus utilizado nessa aplicação. O mestre da rede é o próprio sistema supervisor (ScadaBR) e é somente ele que inicia uma transmissão, ocupando o canal da rede. Cada escravo (sensor de campo) só responde quando é solicitado.

O modem também transmite os sinais provenientes dos sensores conectados às suas entradas digitais e analógicas. O protocolo é totalmente transparente para o usuário e a única operação necessária é a programação dos endereços das unidades, sendo possível programar lógicas simples como, por exemplo, o acionamento de bombas hidráulicas de acordo com um determinado nível de sinal recebido.

A CAERN possui características operacionais específicas. Por ser um sistema onde as unidades de comunicação estão muito distantes, a solução mais viável é o uso da transmissão por meio de sistemas de telefonia móvel. O sistema utiliza a telefonia móvel com tecnologia GSM como meio de transmissão de dados, possibilitando fazer telemetria e controle através de GPRS. Sendo este uma tecnologia que faz uso de comutação de pacotes e a conexão pode permanecer aberta sem a necessidade de um canal aberto. E, por esse motivo é que esse serviço cobra por dados e não por tempo de transmissão. Um elemento interessante desse método é a utilização do protocolo TCP/IP e a sua conectividade com a Internet.

O modem da empresa ABS funciona como uma ponte entre equipamentos seriais e o *software* de telemetria, usando a internet como intermediário. A *internet* está disponível através do serviço GPRS da rede celular GSM. Uma vez que o modem ABS consegue acesso ao serviço GPRS, ele tentará fazer a conexão TCP/IP com um *host* acessível na internet. Não há necessidade de comandos externos: o *modem* ABS implementa todas as rotinas necessárias para manter a conexão GPRS e manter a conexão com o *host* disponível. Suas principais vantagens são:

- a) é a forma mais segura para acessar dispositivos remotos, pois não há portas TCP abertas para *hackers*;
- b) melhor gerenciamento da perda de conexão e da quebra de conexão com o *host*;
- c) a qualquer momento pode-se verificar o estado do *modem*;
- d) dependendo das funcionalidades do elemento de campo, um mesmo modem pode ser acessado por mais de uma pessoa, de diferentes locais e ao mesmo tempo.

A Figura 35 representa o painel frontal do modem celular utilizado para a comunicação.

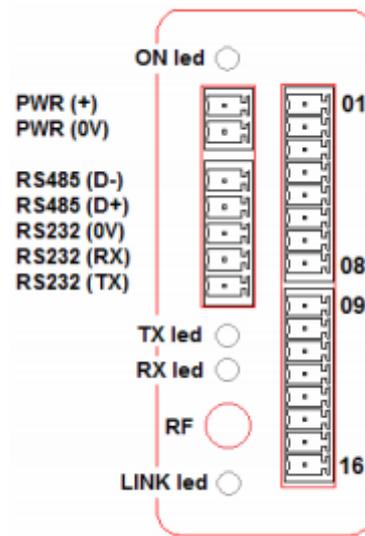


Figura 35 - Painel frontal do modem celular.

## 5.2 TRANSMISSÃO ELETRÔNICA

Os transmissores eletrônicos geram vários tipos de sinais em painéis, sendo mais utilizado o de 4 a 20 mA. O zero vivo utilizado, quando adota-se o valor mínimo de 4 mA, oferece a vantagem de poder detectar uma avaria (rompimento de fios), que provoca a queda de sinal, quando ele está em seu valor mínimo. Tendo em vista as respostas lineares dos medidores utilizados em campo, foi possível estabelecer uma função que permite a conversão do valor de corrente em vazão nominal, pressão ou nível do reservatório.

Para o cálculo da vazão nominal a partir dos transmissores de pressão SMAR e de pressão, diferindo entre eles apenas a variável em estudo, utiliza-se a equação da reta com o intuito de se descobrir os coeficientes que serão utilizados numa equação linear, conforme equação 29. Estabelecendo  $Q_{mín}$  (vazão mínima) = 0 na equação 30 e utilizando os limites de 4 a 20 multiplicados por 100 para uma maior precisão do valor recebido chega-se a expressão para o cálculo do coeficiente angular conforme equação 32.

$$y - y_0 = a(x - x_0) \quad (29)$$

$$Q_{máx} - Q_{mín} = a(2000 - 400) \quad (30)$$

$$Q_{máx} = a(1600) \quad (31)$$

$$a = \frac{Q_{máx}}{1600} \quad (32)$$

E, para o cálculo do coeficiente linear da expressão, o caminho mais adequado é atribuir  $y=0$  na equação 33 e substituir o valor do coeficiente angular na mesma equação, obtendo-se a expressão para cálculo do coeficiente linear conforme equação 35.

$$y = a * x + b \quad (33)$$

$$0 = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{1600} * 400 + b \quad (34)$$

$$b = \frac{-400 * Q_{m\acute{a}x}}{1600} \quad (35)$$

Logo, para saber o valor de vazão nominal ( $y$ ) utiliza-se a equação 36.

$$y = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{1600} * x - \frac{400 * Q_{m\acute{a}x}}{1600} \quad (36)$$

Já para o cálculo do nível foram utilizados os mesmos passos, alterando apenas a variável e o fato de que a escala deixa de ser em valor absoluto para ser em porcentagem.

### 5.3 TRANSMISSÃO SERIAL DE DADOS

A comunicação dos instrumentos de campo com o sistema supervisorio pode ser feita de diversas formas. O método escolhido foi a transmissão serial de dados onde o número de linhas necessárias à transmissão dos dados dos sensores de campo é reduzida, pois os dados a serem transmitidos são convertidos numa sequência serial de bits. Para o modo assíncrono de comunicação escolhido não existe a necessidade de um *clock*. O controle de tempo entre dois *bytes* consecutivos não é importante, mas o tempo da sequência de bits que compõem um *byte* é crítico. Os dois sistemas (recepção e emissão) devem ter geradores de *clock* internos programados para a mesma taxa de transmissão de dados, denominada *baud rate*. O modo assíncrono é o mais utilizado por necessitar de um número menor de vias de comunicação e a implementação de *hardware* do equipamento de comunicação é mais simples.

Quanto ao sentido do fluxo de dados, a comunicação utilizada é caracterizada como sendo *halfduplex*, onde têm-se elementos que recebem e transmitem dados, embora as duas operações não possam ocorrer simultaneamente.

E, no que diz respeito a classificação quanto à referência, o sistema se enquadra numa rede balanceada em que para cada sinal de dados tem-se uma referência desconectada do aterramento. Dessa forma, precisa-se apenas de um par de fios para a transmissão. O sinal e a referência entram em um amplificador diferencial de sinal. A vantagem dessa utilização é que gera uma alta imunidade a ruídos, pois qualquer ruído é sentido igualmente pelas partes, ou seja, a diferença de tensão entre sinal e referência permanece a mesma.

## 5.4 REDES INDUSTRIAIS

As redes de campo surgiram da necessidade de interligar equipamentos usados nos sistemas de automação, que se proliferaram operando independentemente. A interligação desses equipamentos em rede permitiu o compartilhamento de recursos e base de dados, passando a serem únicas e não mais replicadas, promovendo maior segurança de informação.

A importância de confiabilidade em sistemas de controle é óbvia, pois falhas podem ter consequências catastróficas no quesito ambiental. O projeto deve levar em consideração que os sensores e atuadores são elementos suscetíveis a falhas e que em sistemas fisicamente dispersos, estes fazem interface somente com os processadores mais próximos.

O desempenho em sistemas para controle de processos é medido mais em termos de tempo de resposta. A violação das restrições de tempo geralmente se constitui em uma falha. Redes para tais ambientes devem incluir capacidade para transmissão de dados em tempo real. As estações são dimensionadas para não trabalharem em sobrecarga e a rede de forma a admitir um grande número de nós espalhados fisicamente.

Em uma arquitetura distribuída, o sistema de controle deve atender às seguintes exigências:

- a) baixo custo pelo uso de sistemas padronizados, abertos, modulares, de arquitetura simples e independente de fabricantes;
- b) resposta em tempo real, caracterizada por pequenos tempos de resposta, alta velocidade no tráfego de informação, contínua atualização de dados e saída de informações nas interfaces gráficas;
- c) rápido acesso randômico a todos os dados do processo, adequada operação do sistema mesmo em condições de sobrecarga, rápido reconhecimento de falha e reconfiguração em caso de falhas de componentes redundantes.

Em modo requisição/resposta, o mestre envia uma requisição em particular a um escravo; este responde se a mensagem de requisição estiver formulada corretamente. De maneira geral, as trocas de informações são relativas à memória de dados dos escravos. Como o mestre está ligado, assim como todos os escravos sobre uma rede bidirecional do tipo barramento, é necessário designar um endereço para cada escravo. Todos os escravos recebem as questões do mestre, mas só o escravo endereçado responde ao mestre. Esse endereço pode variar de 1 a 247, sendo possível, haver 1 mestre e 246 escravos. O mestre possui quatro atribuições básicas:

- a) assegurar a troca de informação entre as estações de controle local ou equipamentos terminais de dados;
- b) assegurar o diálogo com o operador do sistema;
- c) assegurar a programação ou passagem de parâmetros para os escravos a fim de obter a flexibilidade da produção.

As trocas de informações são realizadas por iniciativa do mestre no instante da requisição. O escravo destinatário a interpreta e envia uma resposta. Uma mensagem sobre o protocolo Modbus é constituída por um conjunto de caracteres hexadecimais enviadas para o sistema supervisorio. A mensagem Modbus será uma sequência que varia desde alguns poucos *bytes* até algumas centenas dependendo do equipamento que esteja enviando a informação. Cada um dos serviços possui um formato de mensagem para a requisição e outro para a resposta. A pergunta é apresentada no seguinte formato:

- a) número do endereço do escravo, que designa o destinatário da mensagem (1 a 247), seguindo o ordenamento de 1 para o *modem* de telemetria que é o mestre da rede até o endereço dos respectivos escravos;
- b) o código da função a realizar, que designa um comando de escrita (habilitada momentaneamente para alteração nos elementos controladores e sensores) ou leitura sobre os escravos;
- c) o endereço respectivo, que designa a posição de memória do escravo: inicialmente o *byte* mais significativo e em seguida o *byte* menos significativo, variando conforme o fabricante do equipamento;
- d) 2 *bytes* que designam o número de dados a transmitir ou serem lidos pelo escravo;
- e) dados, caso seja escrita, os dados a serem escritos pelo mestre no escravo;
- f) uma palavra de controle que serve para detectar os erros de transmissão do tipo CRC-16.

A resposta por sua vez, apresenta-se no seguinte formato:

- a) o número do escravo, ao qual se solicitou os dados;
- b) o código da função realizada, que designa um comando de escrita ou leitura sobre os escravos;
- c) a quantidade de *bytes* de resposta;
- d) os dados solicitados, organizados da seguinte forma: inicialmente o *byte* mais significativo e em seguida o menos significativo;
- e) uma palavra de controle que serve para detectar os erros de transmissão do tipo CRC-16.

As principais funções no protocolo Modbus para troca de mensagens são: a leitura de dados, a escrita de dados e a difusão de dados. Senso este último definido como o processo pelo qual se transmite ou difunde determinada informação, tendo como principal característica o envio de informações idênticas para todos os escravos ao mesmo tempo.

Esse protocolo define os seguintes tipos de dados:

- a) dados de 1 bit: bobinas (*coils*) que podem ser lidas dos escravos ou escritas nos escravos, sendo esta função não implementada no sistema supervisorio; e, as entradas (*inputs*) que somente podem ser lidos do escravo;
- b) dados de 16 bits (registros): Retentivos (*holding*) que podem ser lidos do escravo ou escritos no escravo; e, as entradas (*inputs*) que somente podem ser lidos do escravo.

#### 5.4.1 Endereçamentos Lógicos dos Dados

Cada um dos tipos de dados pode ter até 9999 variáveis. Cada operando de ter um endereço lógico para diferenciá-lo dos demais operandos. Existem faixas pré-determinadas para cada tipo de dados:

- a) *Coils*: 00001 a 09999 (saída discreta);
- b) *Inputs*: 10001 a 19999 (entrada discreta);
- c) *Input registers*: 30001 a 39999 (entradas analógicas);
- d) *Holding registers*: 40001 a 49999 (saídas analógicas).

O endereço dos dados dentro das mensagens difere levemente do seu endereçamento lógico. Dentro das mensagens, o endereço dos operandos varia de 0 a 9998, independentemente do tipo de dado. Por exemplo, o endereço lógico 30001 corresponde ao endereço 0 dentro das mensagens, o endereço lógico 30002 corresponde ao endereço 1 dentro das mensagens, e assim por diante. Da mesma forma funciona para os outros tipos de dados.

#### 5.4.2 Modos de Mensagem

O formato de pacotes de comunicação entre mestre e escravos pode ser feito nos modos RTU e ASCII:

- a) Modbus ASCII: transmite dados codificados em caracteres ASCII de sete bits. Apesar de gerar mensagens legíveis para o operador, este modo consome mais recursos da rede e por isso só é utilizado para leitura de informações alfanuméricas pontuais, como

fabricante e modelo do equipamento de campo caso não seja possível a visita física ao local;

- b) Modbus RTU: neste modo os dados são transmitidos em formato binário de oito bits, no modo RTU (*Remote Terminal Unit*). Cada *byte* na mensagem contém dois caracteres hexadecimais de quatro bits cada.

O modo RTU é mais utilizado por permitir que o tamanho do pacote fique mais compacto.

### **5.4.3 Temporização no *Modbus***

O protocolo MODBUS define algumas regras de temporização a ser respeitadas. Entre duas mensagens consecutivas, deve existir um tempo mínimo de inatividade na linha (aproximadamente 4 ms a 9.600 bps). Possibilitando a detecção de início e fim de mensagens. Quando o mestre faz uma pergunta, o escravo pode demorar um pouco para responder. Existe um atraso típico e também um atraso máximo admissível para receber uma resposta do escravo. Este atraso máximo deve ser configurado no mestre como timeout e para o ScadaBR este valor é de aproximadamente 15 segundos. Se a resposta não for recebida dentro do timeout, o mestre assume que ela não virá mais, e fará duas tentativas adicionais de comunicação.

O RS 485 é aplicado nas áreas em que a velocidade de transmissão e uma instalação barata são necessárias. Utiliza-se um cabo de cobre blindado com um par de condutores. É muito fácil de instalar, com uma estrutura de barramento que permite a incorporação e a remoção de estações ou o passo-a-passo no sistema sem influenciar nas outras estações. As velocidades de transmissão podem ser selecionadas entre 9,6 kbits por segundo e 12 Mbits por segundo, sendo a definida para a implementação na CAERN a taxa de 9,6 kbps tendo em vista a possibilidade de utilização de linhas mais longas para a comunicação.

## 6 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Os sistemas SCADA servem como interface entre o computador e equipamentos eletrônicos como máquinas industriais, controladores automáticos e sensores dos mais variados tipos. Com sistemas SCADA são construídos desde aplicativos simples de sensoriamento e automação, até os centros de operação integrada em empresas de geração e distribuição de energia elétrica, centrais de controle de tráfego e assim por diante.

De forma geral os sistemas de supervisão oferecem três funções, que depende do fabricante (PEREIRA, 2003):

- supervisão: inclui todos as funções de monitoramento do processo tais como sinóticos animados, gráficos de tendência de variáveis analógicas e digitais, relatórios em vídeo e impressos etc.
- Operação: atualmente os sistemas SCADA substituíram com vantagens as funções da mesa de controle. As funções de operação incluem: ligar e desligar equipamentos e sequência de equipamentos, operação de malhas PID, mudança de modo de operação de equipamentos etc.
- Controle: alguns sistemas de supervisão possuem uma linguagem que permite definir diretamente ações de controle, sem depender de um nível intermediário de controle representado por unidades remotas inteligentes. Todas as operações de entrada e saída são executadas diretamente através de cartões de entradas e saídas ligados diretamente ao barramento do computador, ou por unidades remotas mais simples. Os dados são amostrados, um algoritmo de controle como um controlador PID por exemplo, é executado, e a saída é aplicada ao processo (ação direta sobre uma variável manipulada). Isto, entretanto, só é possível quando a velocidade do processo assim o permite. Em alguns casos requisitos de confiabilidade tornam desaconselhável este tipo de solução.

### 6.1 ARQUITETURA: COMPONENTES DO SISTEMA SCADABR

Os componentes do sistema físico do ScadaBR são classificados da seguinte forma: sensores e atuadores, rede de comunicação, estações remotas de aquisição/controle e monitoração central. Através das estações remotas de entrada e saída é que se tem controle e aquisição de dados dos equipamentos do processo, onde são compostos equipamentos diversos como CLP e/ou RTU (*Remote Terminal Units*), portanto, são equipamentos que permitem a

entrada de dados e saída de comandos para que o processo seja manipulado. A rede de computação é o meio por onde circulam as informações das estações remotas para o sistema SCADA. Elas foram implementadas por meios de cabos metálicos, fibra óticas, *links* GPRS etc. (SILVA, 2017). Essas estações de monitoração centrais são consideradas como unidades principais do ScadaBR, sendo responsável por reunir a informação gerada pelas estações e agir de acordo com os eventos acontecidos, podendo estar em uma unidade central de processamento ou distribuídos pela rede. Os componentes ScadaBR têm capacidade de ser multitarefa e essa característica faz com que o *software* execute várias tarefas ou módulos ao mesmo tempo. Dessa forma os principais componentes da arquitetura lógica foram divididos nas seguintes tarefas:

- a) sistema de aquisição de dados/banco de dados em tempo real;
- b) gerenciamento de alarmes;
- c) gráfico de tendências instantânea/gráfico de tendências históricas;
- d) geração de relatório;
- e) interface gráfica;
- f) módulo de gráfico;
- g) geração de *script*;
- h) log de eventos.

## 6.2 SCADABR

O ScadaBR é um sistema supervisório completo, disponibilizado em licença *Open Source* (*software* aberto) sob a licença pública geral GNU onde o código fonte e a documentação podem ser acessados no site ([www.scadabr.com.br](http://www.scadabr.com.br)) para quem quiser usufruir. Ele foi adaptado e melhorado para o uso no Brasil, iniciado em meados de 2009, através de uma parceria com empresas em Florianópolis/SC, entre elas a fundação CERTI, MCA, Unis Sistemas, Conetec, com patrocínio da FINEP, SEBRAE, com apoio da UFSC.

Este *software* pode ser executado em diversos sistemas operacionais como: Windows, Linux, ou mesmo outros sistemas operacionais e tem como base a linguagem Java. É executado a partir de um servidor *web open source* que é o Apache Tomcat que é utilizado nos mais de 70% dos servidores *web* do mundo, garantindo estabilidade robustez e segurança ao sistema. Este projeto recebe todas as características e funcionalidade do projeto mango Canadá, todas traduzidas para o português, incluindo adições como uma API tornando possível estender o SCADA para qualquer linguagem de programação como: Java, C/C#, PHP, Python e entre outros. O ScadaBR também possui suporte OPC, Modbus, TCP/IP, protocolos do setor elétrico

DNP3 e IEC101, disponibilizando mais de 30 tipos de protocolos, além de sistemas de *scripts*, *help* e manual de usuário, entre outras facilidades.

Quando instalado, o ScadaBR pode funcionar como um servidor de aplicações *web* em Java. O usuário, através de qualquer navegador de *internet*, pode acessar as funcionalidades, configurações e telas (IHM - Interface Homem Máquina) do sistema. Através da linguagem Java tornou-se mais fácil o desenvolvimento de aplicações *web*, onde as comunicações são baseadas em pacotes e no relacionamento entre cliente-servidor.

### 6.2.1 Funcionalidades do ScadaBR

Como funcionalidades o ScadaBR possui diversas possibilidades de melhorias e flexibilidade para atendimento de diversos protocolos nativamente, sendo as principais apresentadas a seguir.

- a) *Data Source*: são fontes de dados recebidos pelo sistema, ou seja, as configurações dos equipamentos que irão ser fisicamente controlados, constituindo parte fundamental para o funcionamento do sistema, podendo virtualmente ser representado por qualquer coisa desde que os protocolos sejam aceitos pela aplicação.
- b) *Data Points*: são os pontos de medição e controle e tags - são todas as variáveis numéricas e alfanuméricas envolvidas na aplicação, funcionando como uma coleção de valores e históricos e que contém atributos como: nome, de que forma os dados são registrados, se totalmente ou quando muda de valor ou nenhum, por quanto tempo mantém esses dados, em que condições esses dados devem ser formatados para exibição e de que maneira traçar um determinado gráfico para exibição de valores medidos. O sistema suporta cinco tipos de dados: binário, estados múltiplos, numéricos, alfanuméricos. Portanto, os *data points* armazenam todos os valores de dados que são coletados por um *data source*.
- c) Representações Gráficas ou Telas: nas representações gráficas conhecidas como IHM foram criados os painéis de controle, onde os *data points* podem ser monitorados em tempo real e também foram disponibilizados elementos gráficos como botões, ícones, gráficos, componentes HTML e *displays* representando o processo real que está sendo representado ou controlado.
- d) Relatórios: através dos relatórios é possível ter uma visualização dos dados que são guardados no banco de dados, possui um histórico completo dos dados captados pelo

sistema que podem ser importados para *software* de planilhas eletrônicas, na CAERN o banco de dados utilizados é o MySQL. Os relatórios podem ser agendados automaticamente, selecionando os *data points* assim como a data, hora e minutos desejado.

- e) Scripts: através de script foram criadas linhas de códigos para lógica computacional como cálculos, operações aritméticas, lógica booleana, contadores que atuam em determinados tags com base em valores de outros elementos, utilizando adicionalmente *meta data source* para combinar valores de um dado para cálculo de outro dado. A linguagem comumente usada é o javascript, que é provavelmente a linguagem mais conhecido para scripts.
- f) Monitoramento: no sistema os pontos são monitorados, onde são criadas lista dinâmicas de pontos com os seus valores monitorados em tempo real, sem que seja atualizado o navegador com os últimos pontos de atualização.
- g) Controle: o controle de sistemas externos é iniciado através da configuração no *data source* do tipo de protocolo que vai ser utilizado na aplicação. Para o protocolo Modbus-RTU cada fabricante utiliza parâmetros configuráveis que podem ser acessados, lidos ou escritos através da tabela de registradores que servem para localizar os valores dos pontos. Esses valores podem ser binários ou numéricos e estão em determinados faixas de registro de valores. Dessa forma para obter o controle externo no ScadaBR utilizando protocolo Modbus-RTU foi necessário verificar na tabela do fabricante de instrumento, qual controle deve ser feito pelo instrumento e marcar no detalhe do *data point* e preencher as configurações de faixa de registro, tipo de dados Modbus, *offset* numérico.
- h) Alarmes: são ocorrências usualmente assíncronas, isto é, que não ocorre e se efetiva ao mesmo tempo, de uma medição com valores fora dos limites de pré-estabelecidos, ou eventos que necessitam ação de operador para interpretar e reconhecer o evento pelo alarme que pode significar diversos problemas. O sistema permite automaticamente a sinalização sonora de alarmes na ocorrência de eventos críticos, eventos de aviso, eventos de riscos.
- i) Eventos: o sistema suporta 4.500 eventos por segundo e considera um evento como sendo uma ocorrência na planta supervisionada de uma condição definida no sistema. Os eventos podem ser definidos pelo sistema ou pelo usuário, os definidos pelo sistema incluem erros de operação de *data points*, *data source*, *logins* de usuários e inicialização e parada do sistema. Entretanto os definidos pelo usuário

incluem detectores de valores, eventos de valores, eventos agendados e eventos compostos que detectam condições sobre pontos múltiplos.

- j) Integração com eventos externos: o ScadaBR permite a integração com dois gerenciadores de banco de dados: Derby e MySQL. Desta forma pode-se acessar diretamente os bancos de dados para execução das requisições e *updates*, tendo esta funcionalidade como função principal para manutenção do sistema.

O ScadaBR permite que seja ampliado as suas funcionalidades, através de API (*application programming interface*), que é um conjunto de especificações que permite diversos *softwares* e diferentes módulos se comuniquem entre si.

Segundo Gaidzinski (1996), os *softwares* de supervisão existentes no mercado, rodam principalmente sobre o sistema operacional *Windows*, são orientadas a objeto, possuem uma biblioteca de símbolos para auxiliar no desenvolvimento das aplicações, além de alguns possuírem uma linguagem própria de programação e suporte *Dynamic Data Exchange* (DDE), que nada mais é que um protocolo de troca de dados entre aplicativos independentes, que permitem a troca de dados entre aos aplicativos do *Windows*.

Na sequência, serão listadas algumas das principais características que compõem o *software* de supervisão.

### 6.2.2 Telas de aplicação e objetos

A tela de aplicação é o objeto básico de interface com o usuário e pode conter vários tipos de objetos. Alguns *softwares* possuem editor próprio para configuração das telas, já outros dispõem do editor de *bitmap*, conforme Gaidzinski (1996). Estes editores são utilizados para desenhar ou aplicar fotos do processo, deixando, assim, as telas com maior grau de fidelidade em relação ao processo que está sendo supervisionado. O ScadaBR permite o desenvolvimento com biblioteca própria e através de diversas linguagens de programação como HTML, C, C++, CSS e PHP.

Geralmente, é utilizada mais de uma tela para a supervisão de processos industriais, sendo que há necessidade de uma boa organização da navegação entre essas telas, tornando o sistema claro e condizente à realidade, auxiliando no serviço dos usuários. Um dos passos citados por Moraes e Castrucci (2007), para um bom desenvolvimento de um *software* de supervisão é a hierarquia de navegação, que consiste em uma série de telas que fornecem progressivamente detalhes dos processos à medida que se navega através do aplicativo.

Os objetos foram configurados em cima das diversas telas que uma determinada aplicação pode possuir. Pode-se listar como objetos: linhas, retângulos, figuras, desenhos livres, textos, displays, escalas etc. Estes objetos foram cuidadosamente organizados para aumentar a eficiência do *software* de supervisão, apresentando nome de botões, cores e símbolos compatíveis com o processo ou situação (SILVA, 2017).

### 6.2.3 Bibliotecas

As bibliotecas são ferramentas que estão à disposição do usuário para facilitar no desenvolvimento do *software*, trazendo ao usuário, por exemplo, em uma biblioteca de figuras com formatos básicos, sopradores e ventiladores, esteiras e linhas de produção, dutos, símbolos gerais, ícones e *bitmaps*, mapas e bandeiras, misturadores, motores, painéis, acessórios industriais, sensores, tanques, válvulas, veículos, maquinário etc. Para a implementação da etapa visual do sistema supervisório foram desenvolvidas bibliotecas próprias personalizadas para a CAERN, visando a otimização dos componentes visuais e otimização na padronização dos treinamentos com as equipes de CCO.

### 6.2.4 TAGS

As variáveis em um *software* de supervisão são denominadas de *tags*, que podem ser, por exemplo, variáveis de entradas e saídas do sistema, variáveis internas, variáveis auxiliares para realização de cálculos ou variáveis auxiliares. Em um processo industrial pode-se ter muitas variáveis a serem controladas, dentre elas pode-se citar: temperatura, pressão, nível, vazão, potência, umidade, quantidade etc., sendo os *tags* que irão interligar os objetos e animações das telas com as variáveis do processo no campo. O sistema desenvolvido possui aproximadamente 3.000 *tags* que são atualizadas a cada dois minutos. Para seu pleno funcionamento foi necessário o desenvolvimento de uma melhoria para requisições que seguem o padrão *token ring* com o *timestamp* sendo um número primo para otimização dos ciclos de solicitação dos barramentos de campo.

### 6.2.5 Drivers

Os *drivers* são pequenos programas que tem por objetivo a comunicação entre o sistema operacional e algum *hardware*, ou seja, os *drivers* funcionam como um tradutor entre o

protocolo do sistema supervisor e o equipamento de controle. Em geral um *software* supervisor comercial normalmente oferece diversos tipos de *drivers* de comunicação para os mais diversos tipos de *hardwares* que possam ser utilizados, como por exemplo: CLP's, inversores de frequência, equipamentos de aquisição de dados etc. Em alguns casos, o servidor de comunicação do *software* pode agregar mais de um *driver* de comunicação para equipamentos distintos como é o caso do ScadaBR.

### 6.2.6 Alarmes

Os alarmes são mensagens do sistema, que são previamente definidas pelo programador e servem para alertar o operador sobre algumas situações específicas, chamando a atenção dele para alguma modificação do estado do processo. Cada alarme pode ser gerado de maneira independente e estar associado a uma variável determinada do processo industrial. As principais características de um alarme, conforme Rosário (2005), são: podem ser definidos por meio de condições algébricas, podem apresentar textos específicos, podem ser impressos ou documentados, podem ser configurados para apresentar sinais sonoros, quando ativados podem enviar *e-mails* e mensagens para celulares.

No desenvolvimento do *software*, o que observou-se em relação aos alarmes, foi o aparecimento simultâneo de um número elevado de alarmes, como também a repetição excessiva de certo alarmes, tornando-se necessário a existência de uma programação que faz a filtragem das informações que serão utilizados na tela do sistema (SILVA, 2017).

### 6.2.7 Relatório

Segundo Gaidzinski (1996), uma das boas funções dos *softwares* de supervisão é sua capacidade de armazenar dados e produzir relatórios de produção ao final de um turno, dia ou mês. Estes relatórios de produção, incluindo os relatórios de balanço, demonstram quanto uma determinada planta produziu, quanto consumiu de insumos, de energia etc. Assim podem auxiliar muito nos interesses gerenciais. O setor de manutenção da CAERN também se beneficia com essa ferramenta, devido aos relatórios de monitoramento de equipamentos, que dizem quando cada equipamento parou, qual o motivo desta parada e por quanto tempo este ficou parado.

No desenvolvimento do sistema, o usuário pode definir as variáveis que farão parte do relatório e o seu período de amostragem, sendo que esta armazenagem de um dado também

pode ser vinculada a um evento e não apenas a um horário. Do mesmo modo, poderá ser definido o formato do relatório e o instante de sua impressão (final do turno, dia etc.). Existem várias formas de gerar um relatório, o qual pode estar em forma de uma planilha, pode ser definida por uma linguagem especial textual ou orientada para blocos de funções.

### 6.3 DESENVOLVIMENTO DOS SOFTWARES DE SUPERVISÃO

O bom desenvolvimento de uma aplicação de supervisão compõe-se de várias etapas que devem ser seguidas, conforme recomenda Moraes e Castrucci (2007) e Silva (2017):

1. Entendimento do processo a ser automatizado: foi necessário conhecer como funciona o processo industrial da CAERN em que foi aplicado o sistema de supervisão. Para um completo e detalhado entendimento deste processo foi necessário, conversar com operadores do sistema, especialistas do processo, com a gerência e corpo administrativo, quebrar os processos em etapas verificando as variáveis que precisam ser monitoradas.
2. Tomada de dados e variáveis (*tags*): foi necessário ter em mente um limite superior para o número de dados e variáveis que seriam apresentadas no supervisório, para que o sistema ficasse conciso e apresentasse uma boa velocidade de tráfego de informação pela rede.
3. Planejamento do banco de dados: foram necessárias, nessa etapa, as informações sobre o fluxograma dos processos envolvidos na planta e seus instrumentos, lista de endereços dos dados e dos registradores do CLP, lista de alarmes, desenvolvimento de um sistema de nomes de variáveis seguindo uma lógica, organizando essas variáveis de forma que facilite o manuseio, escolhendo a classe de varredura (*scan*), isto é, a velocidade que seria feita a leitura destas variáveis e atualizadas no banco de dados.
4. Planejamento dos alarmes: nesta etapa orientou-se sob a obtenção da aprovação dos responsáveis técnicos pelo processo, verificando as condições de acionamento dos alarmes, escolha de qual maneira seria notificado o operador, quais providências e ações seriam tomadas para intervenção do alarme. Um ponto crítico, que se tomou cuidado neste momento do desenvolvimento do sistema, foi no aparecimento simultâneo de um número elevado de alarmes, assim como na repetição de certos alarmes que pudessem atrapalhar na operação do sistema.

5. Planejamento da hierarquia de navegação entre telas: a hierarquia das telas de navegação consistiu em fornecer progressivamente detalhes das plantas e seus constituintes, conforme o usuário navegasse através do aplicativo. Uma boa organização, guiando o serviço do operador, tornou o sistema mais claro e eficiente.
6. Desenho das telas: essa foi uma etapa fundamental para aumentar a eficiência do sistema, bem como ajudar o usuário em sua utilização. Para isso, foram considerados alguns pontos, como a consistência no uso de símbolos e cores, nomes de botões, utilização de símbolos que pudessem ser facilmente reconhecidos, obter consistência na aparência entre todas as telas, seguindo um padrão na colocação das informações sempre no mesmo lugar dentro de cada tela.
7. Gráfico de tendência dentro das telas: os gráficos de tendência mostram como determinadas variáveis do processo mudam ao longo do tempo, através de sua imagem gráfica, podendo possuir vários indicadores com diferentes cores para se obter uma fácil comparação entre dados. Os dados plotados podem ser obtidos em tempo real, dependendo do tempo de *scan* dos *modems*, ou podem vir de um histórico arquivado. Com base nessas informações o operador tem uma melhor condição de avaliar as situações críticas do sistema.
8. Planejamento do sistema de segurança: a segurança do sistema depende e muito da restrição do acesso das pessoas ao sistema, sendo todos os acessos registrados para permitir auditorias futuras.
9. Padrão industrial de desenvolvimento: atualmente, o que se predomina em sistemas supervisórios é o padrão *Windows*, baseado no padrão da Microsoft de interface homem-máquina, o qual possibilita a redução do tempo de aprendizagem caso o operador já esteja familiarizado com este ambiente de trabalho.

A elaboração de aplicativos de supervisão pode seguir uma sequência de implementação relativamente simples. A aplicação pode variar de acordo com o processo e até mesmo com o usuário. A sequência simples utilizada como padrão no desenvolvimento deste projeto foi:

- a) definição das telas que deverão fazer parte da solução;
- b) elaboração e definição das propriedades das telas;
- c) introdução dos objetos que deverão fazer parte de cada tela;
- d) definição das interconexões entre as telas;
- e) elaboração dos scripts necessários para a aplicação;
- f) definição dos logs de alarmes e eventos;
- g) definição dos relatórios, gráficos e receitas.

## 6.4 METODOLOGIA DA ESTRUTURA DE TELAS

A página da Gerência de Manutenção e Operação de Natal está disponível na intranet da empresa e é de acesso restrito. A página mostrada na Figura 36, foi construída de forma a personalizar o ScadaBR para utilização da CAERN, com seu respectivo logo e cores representativas. Na parte superior da página, o botão "LOGIN" dá acesso ao supervisor destinado a ser utilizado em microcomputadores, que neste caso é o ScadaBR.

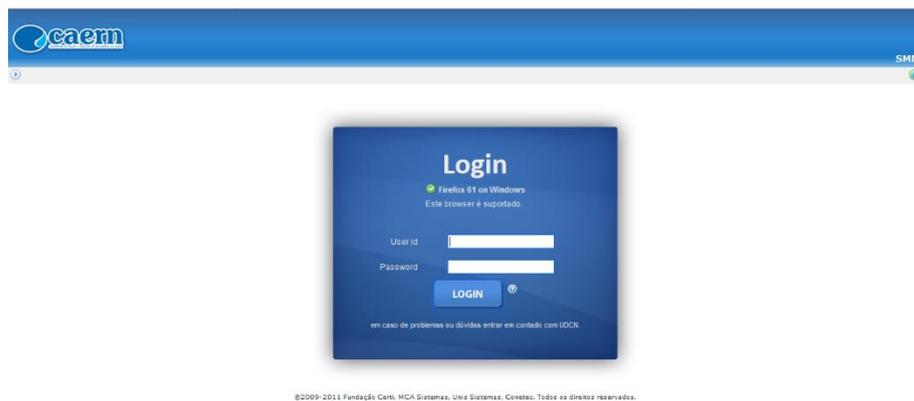


Figura 36 - Tela de login do sistema.

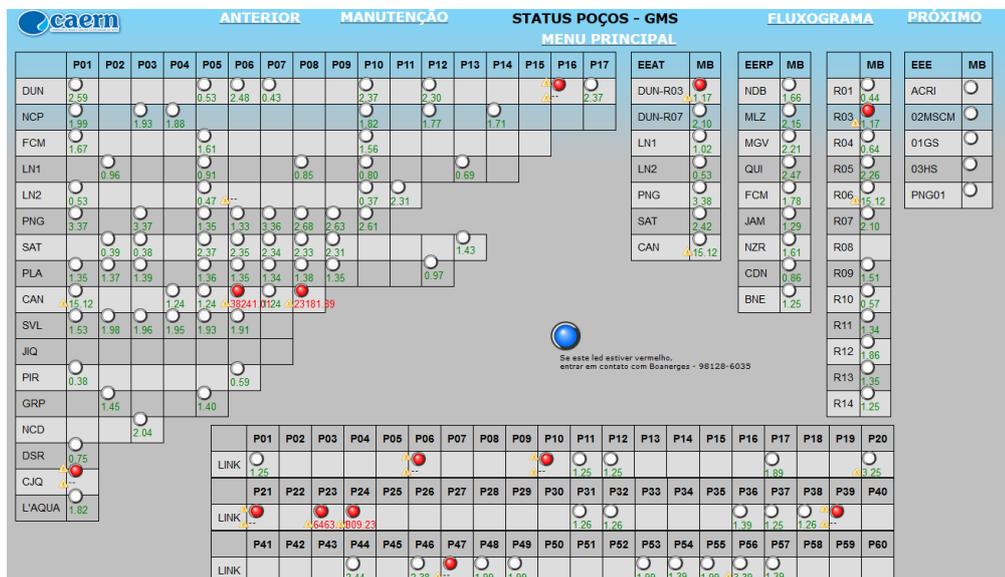


Figura 37 - Tela de monitoramento dos *links* de comunicação.

A tela apresentada na Figura 37 explicita a situação dos *links* de comunicação entre o servidor central e as unidades de transmissão remota de cada unidade produtora. Os sinóticos que representam um LED na cor branca mostram que o *link* está ativo e em condição normal. Já os que representam um LED vermelho explicitam que o ponto está inativo ou que a comunicação está com problemas. Adicionalmente a tela também apresenta o tempo decorrido em minutos desde a última comunicação estabelecida. Caso este seja maior que 60 minutos o

sistema numérico destacado em verde se torna laranja e após 120 minutos se torna vermelho. Este componente temporal adicional é de fundamental importância para as equipes de manutenção de campo, tendo em vista que de acordo com o tempo de inatividade podem ser levantadas algumas possibilidades para a causa da falha, promovendo uma maior celeridade na resolução do problema.

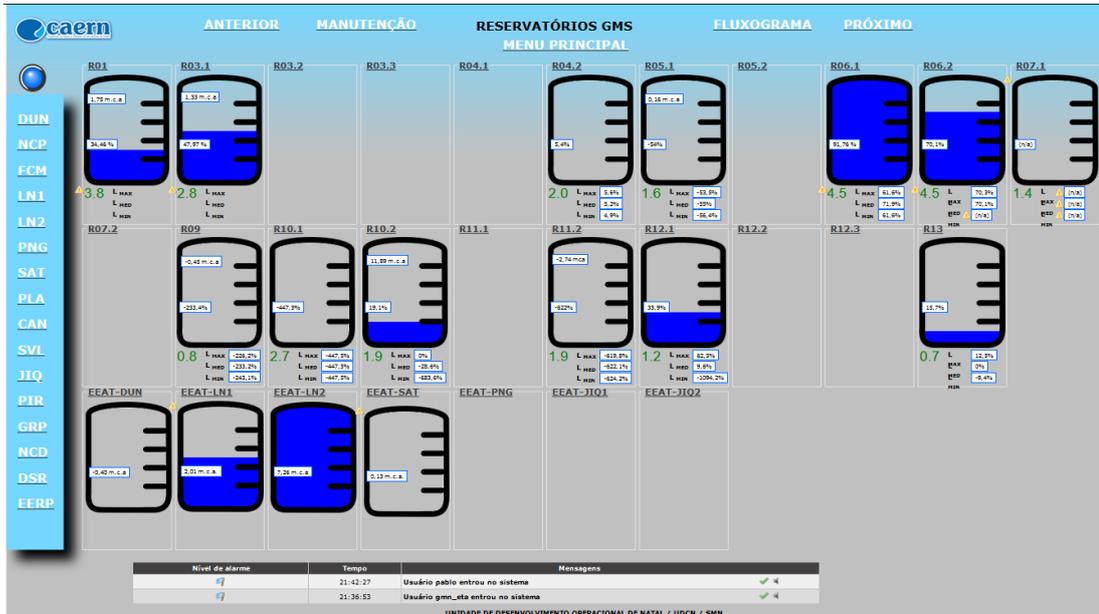


Figura 38 - Tela de monitoramento do nível dos reservatórios.

A Figura 38 está relacionada a uma representação gráfica referente ao monitoramento do nível dos reservatórios de água. No sinótico de tanque foram estabelecidos limites de operação de 0 a 100 % para cada unidade de reservação, vale ressaltar que esta unidade foi definida pelo fato de cada reservatório possuir níveis máximos e mínimos diferentes. Sendo assim, o operador do sistema teria uma etapa de análise desnecessária para cada unidade. Além disso, a análise pontual do nível não se mostra eficiente em situações críticas, como durante períodos de desabastecimento da rede de distribuição ou retorno de funcionamento do sistema de bombeamento, tendo em vista que deve-se levar em consideração valores anteriores, ou seja, valores armazenados no banco de dados para concluir, por exemplo, se determinada unidade está aumentando ou reduzindo seu nível. Como técnica para solucionar este problema, foram inseridas três análises estatísticas básicas: valor máximo, médio e mínimo, referentes a última hora de operação. Dessa forma, uma referência para efeito de análise e tomada de decisão foi criada para os operadores do sistema.

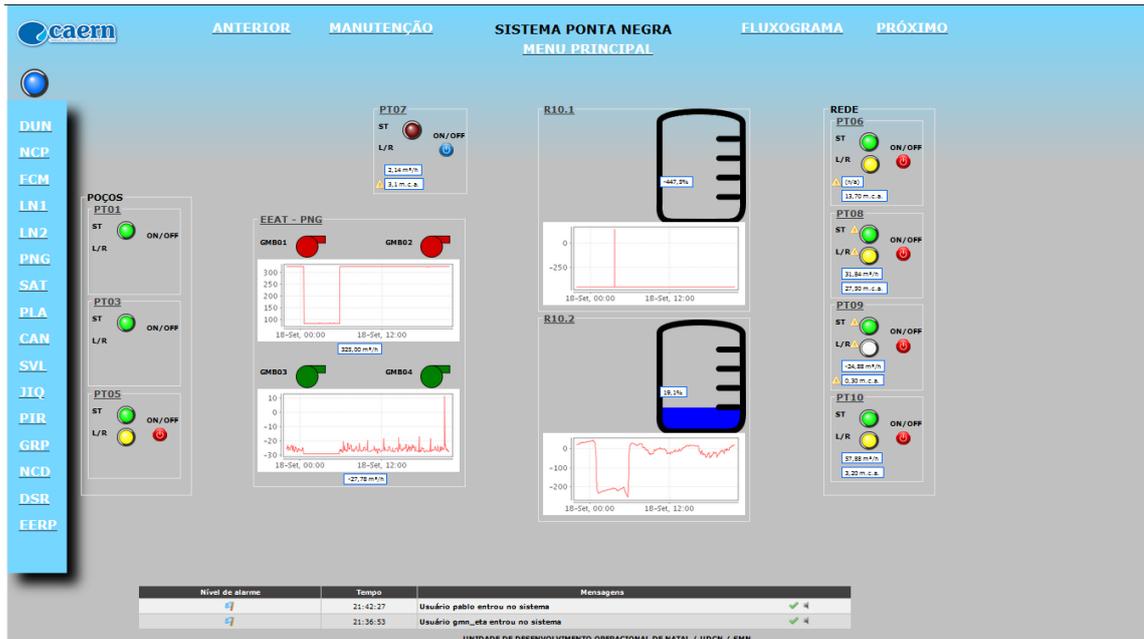


Figura 39 - Tela de monitoramento de um sistema produtor.

Os sistemas produtores de água contemplam basicamente poços tubulares, estações elevatórias de água e reservatórios. Com o intuito de inserir todos os componentes de um sistema numa única tela, conforme Figura 39, foi seguido o conceito do fluxo da água, desde sua produção até a sua distribuição na rede. Logo, os poços tubulares foram alocados no canto mais a esquerda da tela, em seguida vem as estações elevatórias e por último os reservatórios de armazenamento e poços tubulares que alimentam diretamente a rede de distribuição.

Esta representação possui elementos gráficos que podem ser divididos em três conjuntos principais. O primeiro contempla os poços tubulares que mostram informações de status do grupo motor-bomba, posição da chave (local/remoto) do quadro de comando, botão para acionamento remoto da unidade e informações de vazão e pressão para aqueles que injetam diretamente na rede de distribuição, pois os mesmos possuem condições operacionais diferenciadas por alterarem o seu ponto de trabalho de acordo com a demanda da rede.

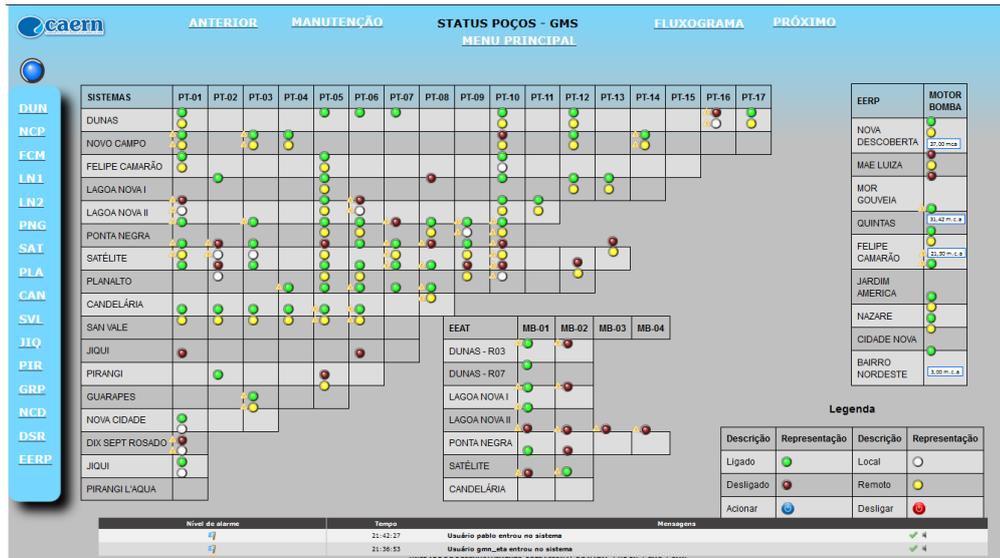


Figura 40 - Tela de monitoramento de status das unidades produtoras.

A tela em destaque na Figura 40 é uma das mais utilizadas pela Central de Controle Operacional da empresa. Nela estão contidas as informações de status e posição da chave do quadro de comando de cada unidade produtora separada por sistema, status das estações elevatórias e status juntamente com a pressão de abastecimento das unidades de reforço de pressão. Esta tela permite a rápida tomada de decisão quanto a condição operacional de determinado sistema.

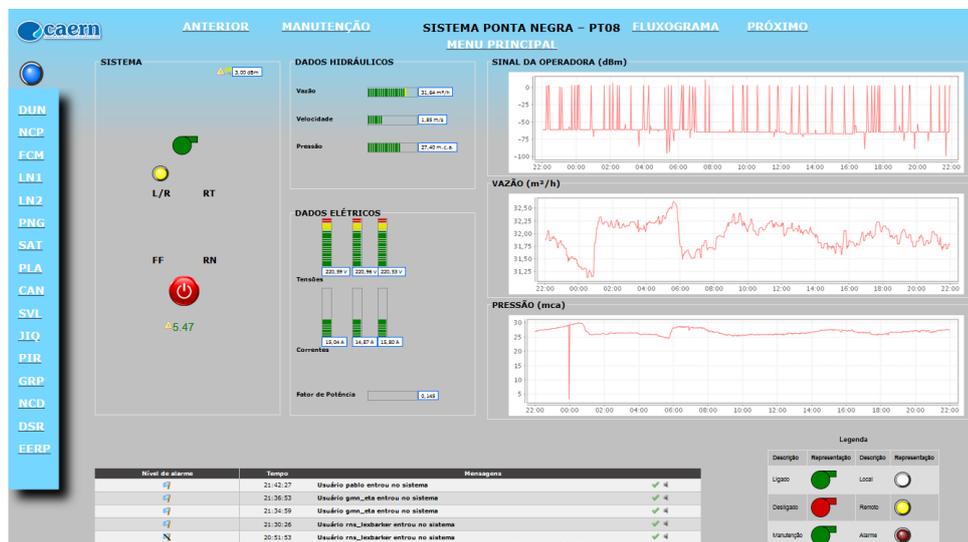


Figura 41 - Tela de monitoramento individual da unidade de produção.

A unidade produtora é o nível mais baixo da hierarquia de telas. Neste nível são exibidas as informações operacionais em tempo real e com o auxílio de gráficos é possível visualizar a pressão, a vazão e a qualidade do sinal da operadora de telefonia, conforme Figura 41. Além dessas informações, na parte central da tela estão os dados em tempo real de variáveis hidráulicas e elétricas, como pressão, vazão, velocidade do fluido, tensão, corrente e fator de

potência. Dados adicionais podem ser visualizados na janela de sistema que contempla possíveis falhas que possam ocorrer dentro do quadro de comando, como falha dos relés térmico, de falta de fase ou de nível.



Figura 42 - Tela de monitoramento das variáveis internas do ScadaBR.

O ScadaBR possui um *datasource* específico para monitoramento das variáveis internas do sistema, conforme Figura 42. Para os administradores é fundamental verificar a integridade da máquina virtual e das requisições do sistema. Tais requisições são divididas em baixa, média e alta prioridade. Eventos como geração de relatórios e falhas de comunicação podem provocar uma elevação no número de requisições empilhadas e provocar o travamento do supervisório. Ainda mais importante do que a checagem em tempo real é a visualização desses dados em relação ao tempo, já que por meio de análise gráfica pode-se observar comportamentos anômalos e causas de instabilidades de comunicação.

## 6.5 BOLETIM OPERACIONAL

Conforme já citado, o uso de um sistema supervisório SCADA possibilita o acompanhamento em tempo real das variáveis do processo. Sendo, inclusive, ferramenta fundamental para a área de controle operacional. Anteriormente, a empresa elaborava seus boletins operacionais mensalmente para as unidades individualizadas, ou seja, no último dia de cada mês operadores seguem até cada unidade produtora e registram os valores referentes ao volume totalizado em metros cúbicos e a quantidade de horas trabalhadas por meio de horímetros localizados nos quadros de comando. Com o formulário preenchido, uma equipe de técnicos avalia se houve condições adversas em relação ao trabalho do poço. Fatores como queda na quantidade de horas trabalhadas em relação ao mês anterior, variação abrupta de

volume produzido e vazão média fora de uma faixa determinada, não eram analisados em função da grande quantidade de dados a serem analisados individualmente. Essa faixa de vazão leva em consideração o processo de medição conhecido como pitometria<sup>3</sup> que determina a vazão nominal de trabalho do poço. Caso a vazão se distancie em 10% para mais ou para menos do valor determinado, deveria ser solicitada a ida de uma equipe do setor de macromedição para averiguação das condições operacionais do medidor de vazão.

No entanto, dados operacionais fundamentais são perdidos durante todos os outros dias do período, já que não era possível analisar o comportamento do poço, seja em relação a vazão, volume produzido, corrente, tensão, fator de potência ou pressão de trabalho. Por exemplo, caso a bomba passe a funcionar com uma vazão de 10% em relação a nominal não era possível averiguar em tempo hábil para conserto. Para um controle efetivo também não basta detectar a falha, ela deve ser consertada em tempo viável. No que diz respeito ao monitoramento operacional, através da utilização do *modem*, de diversos sensores de campo e do sistema supervisorio foi possível realizar todas estas rotinas operacionais com um nível de eficiência adequado na empresa.

O ScadaBR solicita os dados de campo a cada dois minutos e registra-os em um banco de dados que pode ser facilmente acessado no *software*, fornecendo em que dia e hora aconteceu determinado fato, valor mínimo atingido, valor máximo atingido e valor médio do período escolhido. Por meio de *scripts* de programação foi possível determinar alarmes para monitoramento das variáveis, informando caso ocorra algum problema ou variação acima do normal. E, quando houver necessidade pode-se gerar relatórios de auditoria do sistema.

---

<sup>3</sup> Técnica usada para se medir pressão e vazão de água em condutos forçado, através de pressão diferencial.

## 7 SISTEMA DE CONTROLE

Os paradigmas em automação industrial passam por permanentes mudanças. Há alguns anos existia um grande imobilismo, onde fornecedores de *hardware* desenvolviam seus equipamentos e, agregados a estes, os *softwares* necessários para seu funcionamento. Era uma época do culto ao fornecedor, onde padrões abertos pareciam não poder serem alcançados. Com o surgimento do *Personal Computer* (PC) todo ambiente tecnológico pode ser mudado. Painéis sinópticos, mesas de controle, tudo isso foi aos poucos sendo substituído pelo PC. Nesse contexto surgiram os sistemas SCADA, que passaram a desempenhar um papel importante na supervisão de processos de automação, possibilitando a coleta de dados oriundos dos processos e disponibilizando-os de forma mais amigável para os operadores da planta (SILVA; CUNHA, 2017). Além da visualização on-line dos dados, ainda, é possível a geração de relatórios e gráficos on-line. Porém, mesmo com os avanços dos sistemas SCADA, estes ainda sofrem de algumas limitações, como a pouca capacidade de armazenamento de dados históricos, além de ser uma ferramenta destinada ao pessoal do setor operacional dos processos de automação. É possível observar, também, a evolução do CLP que passou a ser modular, com capacidade de comunicar-se com qualquer computador do tipo PC; a entrada da rede *ethernet*, quebrando o paradigma do uso de redes determinísticas interligando estações de controle e, também, os instrumentos de campo.

Por se tratar de um tema ainda pouco estudado em suas especificidades e tendo como foco principal do trabalho de pesquisa as empresas de saneamento do país, fato este plenamente justificado pela ausência de bibliografia disponível, houve entendimento de que o conhecimento das experiências de empresas de saneamento com variação de velocidade de bombas seria de grande importância para compor o processo investigativo e de pesquisa proposto.

As funções básicas do controle são a medição, a comparação e a correção. A medição se baseia no elemento primário em contato com a variável, que transforma o valor lido em sinal padrão e envia-o para o controlador. Por sua vez, o controlador, ao receber o sinal, compara-o com o desejado (*set point*). E, caso exista desvio, o controlador emite um sinal de correção para o elemento final de controle.

O controle mais simples e de menor custo de implementação é o *on-off*. Neste modo de controle só existem duas posições do elemento final: aberto/fechado ou ligado/desligado. Seu uso fica restrito a processos que apresentam grande capacitância ou a processo em que a oscilação não seja prejudicial.

Para Lima (2004), a estratégia de controle pode ser classificada de duas formas: sistema em malha aberta e sistema em malha fechada. Os processos que apresentam um sistema de malha aberta, não terão qualquer tipo de ajuste nas variáveis do processo, utilizando-se de dados das variáveis de entrada para influenciar na variável a ser controlada. Um sistema em malha fechada já apresenta um controle, que pode ser realizado por um operador humano, através de um controle manual ou mediante a utilização de instrumentação com um controle automático. Os principais tipos de controladores normalmente utilizados em controle de processos industriais são: controle *on-off*, controle auto operado e o controle PID e suas derivações, Mirabella (2008).

## 7.1 PROCESSO DE IMPLANTAÇÃO

A CAERN iniciou em 2013, estudos com a finalidade de automatizar as Estações Elevatórias de Água Tratada (EEAT), para tanto foi criado um grupo de automação formado por equipes multidisciplinares de operação, manutenção, controle de perdas, projeto e informática. A autonomia desse grupo lhe permitia definir parâmetros, áreas de implantação, recursos, sistemas, técnicas operacionais etc., enfim tudo em se tratando de automação e, por conseguinte, o uso de inversores de frequência.

Os estudos que se iniciaram foram motivados por:

1. automação das EEAT's, com consequente retirada dos operadores do local: a função dos operadores nesses locais é basicamente o acionamento e a parada do sistema de recalque além do controle dos níveis operacionais.

A operação de acionamento de bombas era feita com a válvula (gaveta ou borboleta) a jusante das bombas inicialmente fechada. Ligavam-se as bombas que passavam a recalcar para o barrilete bloqueado, só então o operador procedia a abertura gradual da válvula até atingir a vazão desejada.

Na parada o procedimento era o inverso, ou seja, com o sistema de bombeamento operando era feito o fechamento gradual da válvula a jusante das bombas, bloqueando o fluxo das linhas ou adutoras e só então se desligavam as bombas. Esse procedimento é extremamente danoso aos materiais e aos equipamentos, principalmente este último, sem falar no consumo desnecessário de energia elétrica, conforme já exaustivamente comentado anteriormente.

Nem sempre essa conduta operacional funcionava bem, pois dependia e muito da qualidade profissional do operador. Por se tratar de serviço essencial, com operação contínua (24 horas) das EEAT's, eram comuns as falhas que acabavam por causar transbordamento de

reservatórios e imprecisão na leitura dos dados (vazão, pressão, níveis operacionais, etc.), afetando assim a rotina do CCO. Neste sentido, a automação das EEAT's permitiu um controle aprimorado, seguro e eficaz das unidades, substituindo por informações "on-line" aquelas que eram feitas via rádio em intervalos de uma hora.

2. Controle de perdas: fato oriundo do transbordamento de reservatórios, causado por falhas operacionais como relatado na seção 2, além do bombeamento contínuo, desnecessário em horários de baixo consumo, principalmente durante o período noturno, onde são alimentados praticamente vazamentos não aparentes.

3. Transmissão de dados on-line para o CCO: no passado essas informações eram enviadas ao CCO a cada uma hora. Esse espaço de tempo provocava uma enorme lacuna entre as leituras o que, em determinados casos, ocasionava desabastecimento, pois se alguma anomalia ocorresse nesse período ou se os dados passados verbalmente por rádio pelos operadores não estivessem corretos, o que também não era raro, ações demandadas para correção demoravam horas, influenciando diretamente a distribuição com falta de água ou pouca pressão até a sua total regularização.

4. Redução do bombeamento no horário de pico: visando a redução dos gastos, principalmente com energia elétrica para aquelas estações de bombeamento com tarifação horossazonal.

Como se vê o controle, a eficiência, a economia e a segurança podem ser apontadas como as principais razões que levaram a CAERN a empregar inversores de frequência.

Inicialmente, conforme informações do "Grupo de Automação", foram várias as técnicas de aplicação de atuadores idealizadas para a automação, até por uma ausência maior de conhecimento sobre o assunto.

As primeiras discussões se deram sobre a utilização de atuadores elétricos instalados em válvulas já existentes, *soft starter* e inversores de frequência. Buscou-se então por informações em outras empresas e locais que se utilizavam dessa tecnologia que pudessem ajudar na escolha do melhor caminho a ser seguido dentro das disponibilidades e necessidades da CAERN.

Em função da experiência observada nessas empresas, chegou-se a conclusão que os atuadores elétricos não seriam uma boa opção. Normalmente as válvulas que seriam adaptadas a este dispositivo eram antigas ou já se encontravam muito desgastadas pelo uso, necessitando, assim, de manutenção ou serem substituídas para que o sistema se tornasse adequado para a ação idealizada.

Com relação às outras duas opções, *soft starter* e inversor de frequência, estas se mostraram viáveis economicamente com o barateamento dos componentes eletrônicos e de sua instalação, independente do uso operacional (por ex.: bombeamento direto na rede de distribuição ou para um reservatório).

O *soft starter* é um dispositivo para partida de motores elétricos, cuja principal característica é o controle da tensão sem que o torque seja constante em toda sua faixa de operação. Embora, como o próprio nome diz (partida suave), ele pode fazer também o desligamento de forma atenuada do sistema. O *soft starter* não varia frequência.

A Figura 43 ilustra a curva corrente  $\times$  torque de um sistema de recalque dotado de um *soft starter*. O gráfico característico deste dispositivo mostra que a partir de 85% (em média) de torque, quando a bomba começa efetivamente a recalcar, dependendo da inércia da coluna líquida a jusante, a corrente aumenta sensivelmente até provocar sobrecarga e o dispositivo desarmar. Para situações, como os casos de coluna líquida pequena, o *soft starter* seria indicado. Mais adiante serão apresentados os critérios que a CAERN adota como referência para instalação de *soft starter*. Em relação ao custo final, o *soft starter* é aproximadamente 50% mais barato que o inversor de frequência.

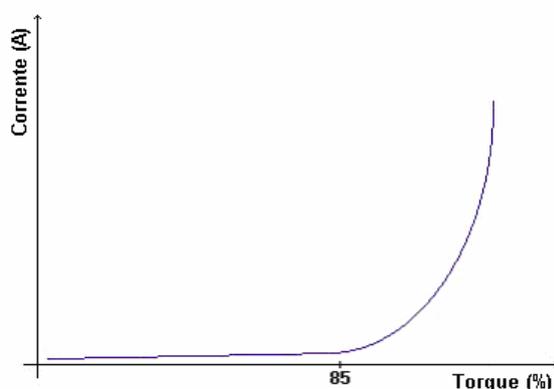


Figura 43 - Curva corrente  $\times$  torque de um sistema de recalque com *soft starter*.

Já a análise quanto ao uso de inversor de frequência se baseou, fundamentalmente, em características do sistema de bombeamento, sendo:

- reservatório com entrada superior (controle manual): esse caso específico, o uso do inversor de frequência é destinado simplesmente ao acionamento e a parada das bombas (*on/off*), sem uma variação da frequência propriamente dita. Seu controle se dá através de uma lógica que impõe qual a rampa de aceleração e desaceleração a ser empregada. A determinação da rampa é feita de forma empírica, limitada pelos níveis máximo e mínimo do reservatório em questão. Essa operação é comandada à distância pelo CCO.

- Reservatório com entrada inferior (controle automático): o reservatório trabalha como unidade secundária, sendo o recalque efetuado diretamente na rede de distribuição. Essa operação é limitada ao nível máximo do reservatório. Também nesse caso, a variação da velocidade com o emprego do inversor de frequência é discreta, conforme observado em Carvalho et. al. (2000).

Quanto a especificação deste dispositivo, a CAERN fez a opção por alguns fabricantes, entre eles: Schneider, Siemens, WEG e Danffos. Essa opção se deu por informações obtidas junto a área de manutenção, em específico, do setor de manutenção elétrica, a partir de históricos de equipamentos dos fabricantes já empregados na empresa. Foram desconsiderados como fornecedores fabricantes que apresentaram problemas de assistência técnica.

Segundo a gerência de manutenção da empresa, essa preferência inicial foi sendo substituída ao longo do tempo por fabricantes exclusivamente nacionais, que melhoraram seus equipamentos em qualidade, tornando-os extremamente competitivos com os concorrentes internacionais.

Esta gerência cita como exemplo, o custo de um inversor para um motor de 50 cv. O similar nacional teria um valor aproximado 50% menor que o importado. Essa diferença é observada também nos custos de manutenção, que seriam da ordem de 20% do valor que seria gasto com um aparelho importado. Outro fator relevante é quanto a disponibilidade de peças e materiais, que para os fabricantes nacionais, dependendo do caso, podem ser encontradas para pronta entrega, não sendo o caso, via de regra, dos equipamentos importados.

Nos dias atuais o custo final de um inversor de frequência se reduziu bastante. A Figura 44 apresenta em um gráfico a relação do custo de um inversor pela potência do motor elétrico para as três faixas de tensão mais utilizadas (220, 380 e 440 V).

Os itens considerados pela CAERN como os mais relevantes na escolha de um inversor de frequência são:

- a) potência do inversor de frequência: tem relação direta com a potência do motor;
- b) corrente do inversor de frequência: tem também relação direta com a corrente do motor, que em muitos casos são velhos. Segundo Silva et. al (2017), não é raro encontrar motores em operação com idade superior a 30 anos.
- c) Temperatura de operação do inversor de frequência: deve ser 45 °C. Essa imposição se baseia no fato da perda de potência com a temperatura; por exemplo, considerando um motor de 20 cv acoplado de um inversor de frequência, com temperatura de operação estimada de 30 °C. E levando em consideração que o mesmo perca 5 cv de potência a cada 5 °C de aumento sobre a temperatura de

trabalho, para uma temperatura em ambiente confinado de uma casa de bombas de 45 °C, necessitaria de um equipamento para 35 cv;

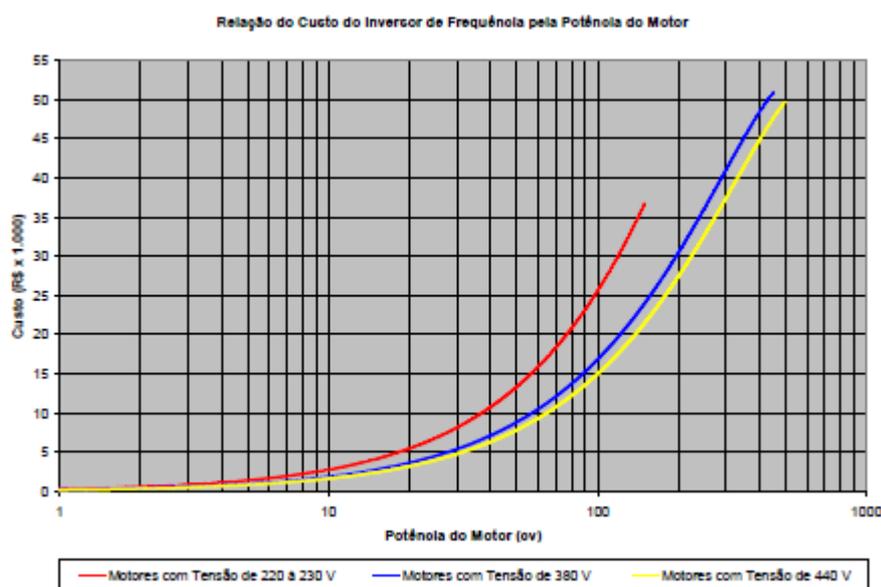


Figura 44 - Relação do custo do inversor de frequência pela potência do motor.

Quanto aos tipos de inversores, o grupo de automação da CAERN classificou os inversores de ajuste escalar como funcional, porém na atualidade está em desuso (tecnologia antiga) e os preços, atualmente se comparam aos inversores de ajuste vetorial. Alguns fabricantes já dispõem dos dois tipos de controle incorporados a um mesmo modelo, cabendo ao usuário fazer a seleção na parametrização.

O mesmo grupo de automação ainda estabeleceu, em conclusão aos estudos que se desenvolveram, os critérios que determinam a escolha entre inversor de frequência e *soft starter*, são eles:

- a) para bombas com potência < 5 cv: não se aplica nenhum dos dispositivos e a partida é direta sem utilizar até mesmo uma válvula a jusante;
- b)  $5 \text{ cv} \leq \text{potência da bomba} \leq 40 \text{ cv}$ : emprega-se o *soft starter* desde que a coluna líquida a jusante da bomba não provoque uma pressão logo na saída do recalque acima de 40 mca;
- c) para bomba com potência > 40 cv: o inversor de frequência é sempre aplicado.

Cabe ainda salientar que esses critérios são eminentemente empíricos, definidos a partir de um histórico e da realidade da empresa, aplicados unicamente em sistemas de água e esgoto. Casos particulares para uso exclusivo de inversores de frequência, também estabelecidos pelo grupo, independem dos critérios acima listados e são:

- a) controle de pressão, vazão, nível etc.

b) coluna líquida acima de 40 mca.

Baseado nas informações e critérios definidos pela CAERN, será apresentado a seguir o estudo sobre a implantação de inversor de frequência na Estação Elevatória de Reforço de Pressão de Nova Descoberta a título de exemplificação.

Essa estação em especial era um verdadeiro desafio para a companhia, pois se tratava de uma bomba de 50 cv com grande variação da altura manométrica, entre 10 e 70 mca.

A operação normal desta adutora se dava a partir do estrangulamento de uma válvula borboleta na saída do recalque, tendo como principal referencial o ponto mais desfavorável da rede que é alimentada pela citada subadutora, ponto 02 da Figura 46. Neste sentido, o operador da EERP se comunicava com o operador do ponto mais desfavorável via rádio e, em função das informações recebidas, era feita a graduação de abertura da válvula variando-se assim a vazão a fim de atender as necessidades operacionais daquele Centro de Reservação e Distribuição (CRD), conforme Figura 45.

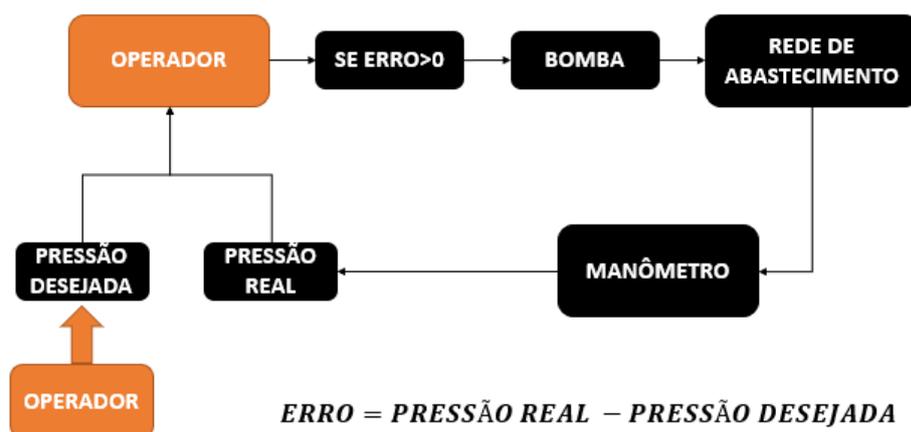


Figura 45 - Diagrama de controle manual.

Tinha-se ainda como referência um manômetro na saída do bombeamento, logo após a válvula borboleta, onde por critérios empíricos, se mantinham as pressões variando entre 20 e 60 mca. Essa subadutora apresenta pontos de distribuição direta de água para vários bairros, o que é um complicador sob o ponto de vista operacional. A Figura 46 ilustra a topologia da área de abastecimento da EERP.



Figura 46 - Área e pontos críticos de abastecimento.

Diante disso, optou-se pela colocação de um único inversor que controlaria a operação do conjunto motor-bomba submerso, recebendo informação de um ponto de controle (*setpoint*) remoto. Como critério foi estabelecido que a pressão nesse ponto não poderia ser superior a 60 mca, devendo manter a pressão estável em 47 mca.

Definido o desafio, partiu-se então para o levantamento das características do sistema operacional. Como primeiro passo, foram feitos levantamentos do sistema de bombeamento (curva da bomba, rendimento etc.) através do catálogo do fabricante e da curva real obtida através das medições em campo. Analisando essas curvas foi possível notar uma boa variação da altura manométrica em função das vazões ditadas pelo sistema ao longo do dia, o que é um bom indicador para o emprego de inversores de frequência, conforme observado em Garcia (2003).

No passo seguinte, os técnicos verificaram a validação das Equações das Leis de Semelhança para Máquinas Hidráulicas, com a finalidade de se identificar problemas de escorregamento ou outras diferenças que pudessem comprometer o estudo. Os resultados verificados, analisando os valores medidos e calculados, foram relativamente próximos entre as duas situações, o que deu ao grupo uma certa segurança e confiabilidade no uso dessas equações.

Os itens mais relevantes foram: a pressão de recalque na saída da bomba e antes da válvula de estrangulamento, a pressão de recalque imediatamente após a válvula, a curva de vazão do sistema ao longo do dia inferida através de um sensor de pressão com saída analógica de corrente na subadutora e a pressão na chegada dos pontos críticos 01, 02 e 03, apresentados na Figura 46.

O novo diagrama de controle implementado no sistema de bombeamento é apresentado na Figura 47. O elemento controlador passou a ser o inversor de frequência com sua lógica de

controle embarcada para que caso a diferença entre a pressão real e a desejada seja diferente de zero ele possa atuar na alteração da velocidade de rotação da bomba, alterando dessa forma seu ponto de operação para pressões e vazões diferentes para cada situação.

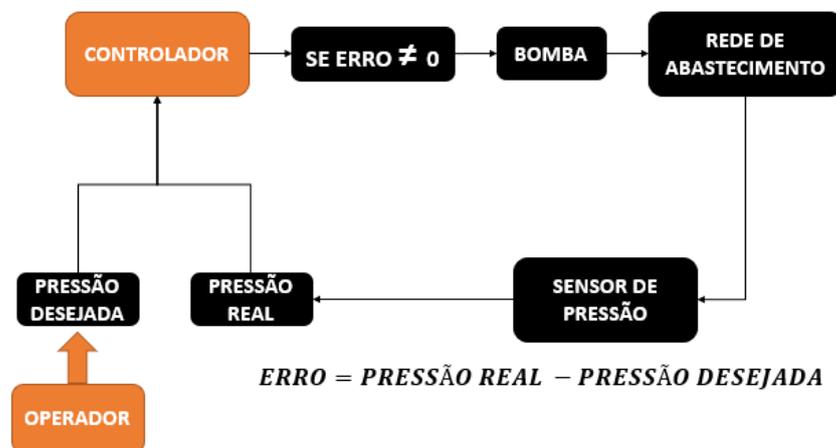


Figura 47 - Diagrama de controle automático.

O diagrama funcional do sistema de controle proposto pode ser visualizado na Figura 48, em que o inversor recebe o sinal de 4-20 mA proveniente do sensor capacitivo de pressão e o interpreta de acordo com sua configuração de limites. O controle implementado segue a lógica inversa, logo caso o erro seja positivo o motor irá reduzir sua velocidade de rotação para a diminuição da pressão de bombeamento. Caso o erro seja negativo significa que a pressão de abastecimento está abaixo do valor esperado, promovendo uma aceleração do conjunto motor bomba e respectiva elevação de pressão.

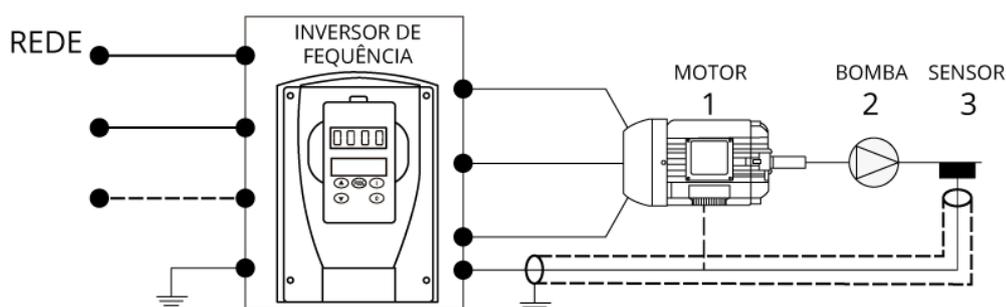


Figura 48 - Diagrama funcional de controle.

A partir da análise dos dados é possível observar as diferenças no comportamento do sistema sem controle e com controle de maneira clara. No sistema sem controle, inicialmente a rede encontra-se vazia e logo que o motor é acionado ocorre um pico de pelo menos 8 vezes maior que a corrente nominal, consumindo muito mais energia e diminuindo a vida útil do motor. O gráfico presente na Figura 49 representa um período de aproximadamente 4 horas de

operação. Na curva onde não existe controle é perceptível a falta de padrão operacional do sistema. Não existe um padrão bem definido para a atuação horária ou partir de determinada pressão, promovendo picos inadequados de pressão, golpes de aríete na rede de distribuição e sucessivos acionamentos por falta de procedimento de acionamento. Todos esses elementos afetam a qualidade de abastecimento de forma negativa, promovendo uma demora na estabilização da pressão na rede e reduzindo a qualidade do serviço prestado para a população. Somente no período em questão a rede trabalhou com pressões que variaram de 16 até 67 mca.

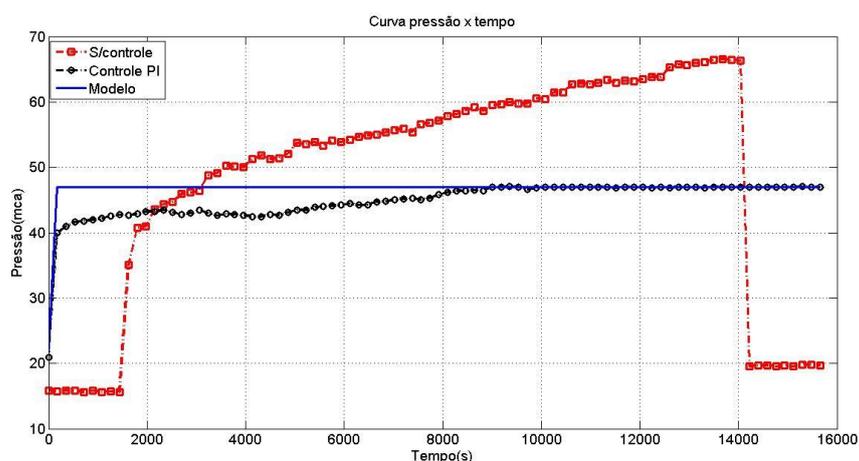


Figura 49 - Comparativo dos comportamentos de pressão.

Fazendo uma análise crítica dos dados obtidos no ensaio e cruzando com os dados do gráfico se vê claramente que o sistema de bombeamento trabalha no máximo a 85% da rotação nominal para atender a vazão requerida. Outra conclusão importante é quanto a faixa de operação das vazões requeridas ao longo do dia, que em aproximadamente 67% dos casos, está contida entre 60 a 80% da rotação nominal do motor (SILVA; CUNHA, 2017).

Os parâmetros de desempenho possibilitam a comparação quantitativa entre os desempenhos de diversos sistemas a partir da sua resposta ao degrau. Comparando algumas características relevantes de um processo (ROBERTO, 2014), como máximos sobressinais, tempos de assentamento e erros em regime, pode-se constatar que o controlador PI implementado obteve um desempenho satisfatório nos pontos de operação ideal do sistema.

O percentual de ultrapassagem, equação 37, é utilizado quando há oscilações na resposta e mede o quanto a saída ultrapassa o valor em regime permanente  $Y_r$ . Sabendo que  $Y^*$  é o valor máximo, tem-se que:

$$PO(\%) = \frac{Y^* - Y_r}{Y_r} * 100\% \quad (37)$$

Substituindo os valores do período avaliado na expressão:

$$PO(\%) = \frac{47,03 - 47}{47} * 100\%$$

Dessa forma, será obtido um percentual de *overshoot* de 0,0638 %. Este valor mostra a boa eficiência do controlador implementado, evitando sobrepressões na rede de abastecimento e golpes de aríete pela carga e descarga sucessiva do sistema. O tempo de estabilização foi calculado devido ao caráter oscilatório da saída. Foi medido o tempo necessário para que a saída se enquadrasse numa faixa percentual para mais ou menos em relação ao valor em regime. A equação 38, a seguir, apresenta uma aproximação aceitável para as variações:

$$T_{s(2\%)} = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (38)$$

Analisando os dados obtidos no ensaio obteve-se um tempo de acomodação de 144 minutos por limitação do próprio motor. Logo, o termo  $\xi\omega_n$  equivale a 0,000462963.

Já o erro em regime leva em consideração o quanto do valor desejado o valor final de comportamento está afastado. Para o sistema estudado, o erro em regime foi de -0,106382979 % em um período de medição de 681 minutos. Ou seja, o resultado foi muito próximo do desejado, afastando-se apenas 0,1 % dos 47 mca desejados.

Além disso, essa figura permite, mesmo que de forma superficial, a avaliação entre os valores disponibilizados pela bomba e aqueles efetivamente requeridos pelo sistema. Somente nessa comparação já é possível vislumbrar a economia em potencial capaz de se obter com a utilização de um inversor de frequência nesse sistema. Cabe aqui salientar ainda que esse sistema opera por gravidade uma parte da madrugada, onde o conjunto de bombeamento em operação é desligado.

De acordo ainda com o “Grupo de Automação”, a recomendação dos fabricantes de Inversores é que a mínima rotação do motor elétrico seja de 50% de sua rotação nominal, pois para rotações inferiores os motores podem sofrer problemas na sua refrigeração provocando aquecimento. Em Ribeiro et al. (2002), verifica-se sugestão semelhante, onde os autores apresentam como regra prática “[...] limitar a vazão mínima a valores não inferiores a 25% – 30% da vazão correspondente ao seu ponto de melhor rendimento na rotação máxima recomendada”. Além disso, outros problemas são apontados em operação de bombas com baixas vazões, como a vibração e o ruído.

Os testes nesse sistema de bombeamento foram desenvolvidos com a aquisição de dados em campo. Uma equipe do setor de perdas da CAERN foi alocada para medições *in loco*. Foram empregados os seguintes equipamentos nesta campanha:

- 3 *dataloggers* de pressão, marca Novus, faixa de leitura de 0 a 100 mca e erro de 0,5% do fundo de escala;
- 4 *modems* de telemetria, marca ABS, entrada de 4 à 20 mA;
- 1 multimedidor de grandezas elétricas, marca ABB, saída RS-485/Modbus;

Os equipamentos foram instalados em pontos estratégicos do sistema, sendo o multimedidor ABB no painel elétrico para aquisição dos dados de tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e potência consumida. Os três *dataloggers* de pressão foram instalados nos pontos críticos de abastecimento de forma simultânea.

Os equipamentos foram configurados para uma leitura a cada 10 segundos (tempo base), sendo que a cada 3 minutos (intervalo de gravação) era feita a média das 18 leituras e o resultado gravado na memória uma vez. Com isso, foi possível fazer um longo período de teste com todos os dados obtidos do sistema a cada 3 minutos.

De todo o período de dados acumulados no microcomputador e nas memórias dos *dataloggers*, excluindo aqueles em que ocorreram imprevistos operacionais (os que precisaram de ações diferentes da rotina), além da perda de alguns dados devido a falha em um dos equipamentos, foi possível selecionar dois meses de operação com o inversor de frequência, como também dias com operação convencional. Procurou-se respeitar um certo padrão sazonal nessa seleção de dias, a fim de se manter perfis semelhantes de demanda. A partir dos dados coletados, selecionados e devidamente tratados, se iniciou a interpretação e a avaliação deles.

### **7.1.1 Acionamento Remoto**

Os sistemas de controle implementados basearam-se nas estações elevatórias e *boosters*, mas dezenas de unidades de bombeamento não foram contempladas com os controles mais complexos por falta de ferramentas que permitissem sua instalação. Apesar disso, foi desenvolvida uma solução capaz de possibilitar o acionamento remoto de todas as unidades a partir do sistema supervisor caso necessário. A seguir será apresentado o sistema de acionamento proposto para as partidas diretas por contemplarem cerca de 75 % de todas as unidades operacionais.

A partida direta utilizada nos motores elétricos trifásicos da CAERN é utilizada com o intuito de usufruir do desempenho máximo nominal do equipamento, como o torque de partida. Apesar dessa vantagem, o sistema de partida é recomendado para motores que possuam no máximo 7,5/10 cv de potência. Logo, esse tipo de partida direta influencia diretamente na infraestrutura da rede de alimentação onde está instalada. Os fatores negativos de maior

influência são que durante a partida a corrente pode chegar a 8 vezes a nominal, os dispositivos do quadro devem ser mais robustos e a manutenção deve ser constante.

O digrama de potência da Figura 50 indica as ligações de um sistema convencional. A rede de alimentação disponibiliza a alimentação trifásica (3 fases + Terra) para atender o motor elétrico utilizado. Para a proteção do circuito e seus componentes, como cabos, contactores e curto circuito, utilizam-se itens com características de funcionamento retardados. Os contactores estabelecem a ponte de ligação entre o motor e sua alimentação, variando de classe e tamanho em função da corrente do motor. O relé térmico é o dispositivo de segurança que se encarrega de realizar a proteção do motor elétrico em função de corrente de sobrecarga. O acionamento do motor depende basicamente do acionamento do contator K1.

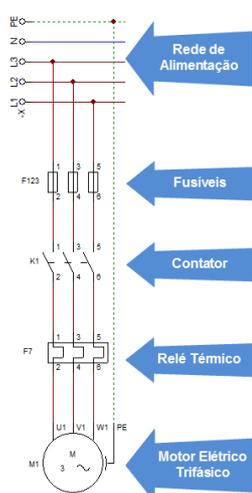


Figura 50 - Diagrama de potência de uma partida direta.

O diagrama de comando de uma partida direta que pode ser visto na Figura 51 representa a lógica de contatos que será responsável por acionar os componentes que serão responsáveis por comandar as cargas presentes no diagrama de potência.

O diagrama de comando possibilita dois tipos de acionamento, um modo local e outro remoto, a partir da posição da chave S0. Caso o seletor esteja na posição I (local) se os contatos NF do relé térmico (RT) e do botão desliga (S2) estiverem em condição normal, ou seja, fechados, pressionando o botão de ligar (S1) tem-se a alimentação da bobina do contator K1 que por sua vez irá fechar seus contatos de potência acionando o motor elétrico trifásico e irá realizar o fechamento de seus contatos auxiliares, neste caso o contato de selo que tem o objetivo de manter a bobina do contator alimentada. Somente será realizada a desenergização da bobina caso seja pressionado o botão desliga, o contato auxiliar do relé térmico seja acionado ou a chave seletora mude de posição.

Todos os passos supracitados dizem respeito ao controle local no quadro de comando, ou seja, quando o contato de três posições está fechado na posição local. Caso o contato da chave esteja posicionado em remoto o acionamento só poderá ser feito através do *ScadaBR* de maneira remota. Para verificação da posição da chave há uma conexão em cada borne da chave selecionadora. A análise é feita comparando o sinal recebido com o sinal do contato comum, existindo um intertravamento no próprio contato impedindo que ambos fiquem em estado alto. O estado de funcionamento da bomba instalada no poço é verificado através da ligação do contato auxiliar da bobina do contator K1. E, o acionamento remoto é feito através da ligação entre o contato da chave seletora e a bobina do contator diretamente, sobrepondo os outros botões de acionamento, ou seja, o relé conectado ao modem fica em série com o circuito de comando e faz parte do sistema.

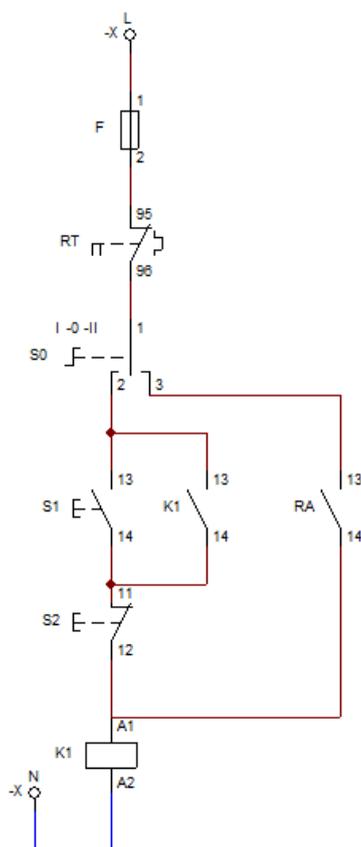


Figura 51 - Diagrama de comando de uma partida direta.

## 8 SISTEMA EMBARCADO INTELIGENTE

O método desenvolvido pode ser considerado um aperfeiçoamento da análise pontual de pressão, tentando corrigir suas falhas e aproveitar vantagens, ou seja, mesmo com o conhecimento das dificuldades presentes nos sinais de pressão e vazão apresentados anteriormente, pode-se justificar a colocação de sensores de pressão e vazão devido a: baixos custos de implantação, baixos custos de equipamentos (sensores e transmissores), custos operacionais, custos com manutenção, baixa influência de ruídos, entre outros. Apesar da utilização eficaz da ferramenta, também é necessária a combinação com uso de outras técnicas de processamento de sinais para extrair características operacionais do sinal advindo de campo. Já com relação à informação ou conhecimento do vazamento em si, pode-se utilizar um conjunto de técnicas inteligentes para obter resultados semelhantes à apresentação de análise de um especialista. Utilizando a transformada *wavelet* processam-se os sinais de pressão e vazão, buscando-se os coeficientes do filtro passa alta, em busca de altas resoluções que caracterizassem o vazamento.

A análise de séries temporais no domínio da frequência, tempo-escala e tempo-frequência tem sido amplamente implementado em diversos campos de aplicação da engenharia. Os sinais ou séries temporais aparecem constantemente nos ambientes industriais através de variáveis como pressão, vazão, temperatura e nível, permitindo a solução de problemas como a compressão, transmissão, reconstrução, filtragem e extração de características. Neste trabalho a transformada *wavelet* será utilizada na extração de atributos que caracterizam os padrões de vazamento no sinal de pressão de uma rede de distribuição. A seguir, na Tabela 1, é apresentada uma comparação entre as ferramentas para processamento dos sinais de campo.

Tabela 1 - Comparativo dos métodos de análise.

	Vantagens	Desvantagens
<b>Transformada de Fourier</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• boa resolução espectral;</li> <li>• representação compacta do sinal;</li> <li>• facilmente computável;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• perda de informação temporal;</li> <li>• não aplicável para sinais não estacionários;</li> </ul>

<b>Transformada de Fourier com janelamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>baseada na decomposição do sinal;</li> <li>razoável resolução espectral e temporal;</li> <li>aplicável para sinais não estacionários;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>necessidade de poder de processamento;</li> <li>cálculo demorado quando comparado a TF e TWP;</li> <li>incapacidade de alteração da resolução do sinal;</li> </ul>
<b>Transformada Wavelet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>capacidade de alteração da resolução espectral e temporal do sinal;</li> <li>aplicável para sinais não estacionários;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>baixa resolução espectral nas componentes de alta frequência.</li> </ul>

Um sinal representado como uma função no tempo pode ser expandido pela *wavelet* em coeficientes de escala em tempo e frequência. Segundo o princípio da incerteza de Heisenberg, não é possível saber exatamente qual frequência existe em um dado instante de tempo, mas apenas pode-se saber quais bandas de frequência existem em determinados intervalos de tempo. Sendo assim, uma função  $f(t)$  pode ser escrita como:

$$f(t) = \sum_k c_{j_0}(k) \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_k \sum_{j=j_0}^{J-1} d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (39)$$

Em que  $c_j$  e  $d_j$  são coeficientes que podem ser calculados por:

$$c_j(k) = \sum_m h_0(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (40)$$

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m - 2k) c_{j+1}(m) \quad (41)$$

Sendo  $h_0$  e  $h_1$  os coeficientes de base para filtros. Pode-se melhor entender a estrutura do banco de filtros pela Figura 52, em que  $\downarrow 2$  é chamado de operador de decimação, que tem uma função simples de descartar metade dos dados, minimizando a perda de informação por causa do efeito de *aliasing* que mistura a perda de informação com componentes de frequência.

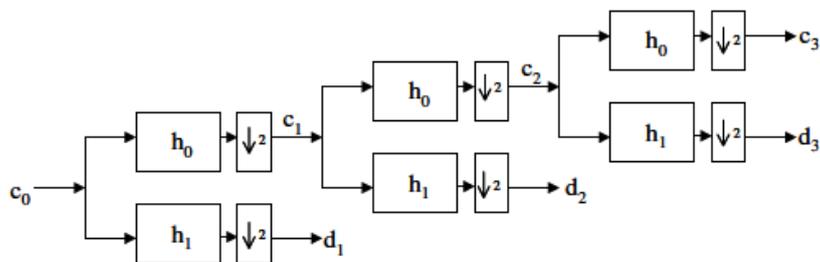


Figura 52 - Banco de filtros.

Após testes foi possível avaliar o comportamento de várias famílias de *wavelets*, entre elas as *Daubechies*, *Coiflets*, *Symlets* e *Haar*. Foram testadas diversas classes das famílias tanto na análise como na síntese buscando a melhor solução para o problema. Tomou-se como referência de qualidade o aspecto estatístico na reconstrução do sinal e da visualização do vazamento em níveis de detalhamento ou escala.

## 8.1 SISTEMA DE PONTA NEGRA

A fundamentação teórica supracitada permitiu a criação de um sistema de automação e controle operacional eficiente dentro das condições fornecidas. Sua implementação teve como base o sistema de abastecimento de água de Ponta Negra, cuja operação de toda a malha de dutos é complexa, demandando constantes intervenções para correção de eventuais erros. Dessa maneira, o projeto contemplou desde a produção dos poços tubulares até o transporte aos reservatórios de distribuição do produto. A Figura 53 fornece um diagrama funcional do sistema. Em linhas gerais, existem quatro poços tubulares que transferem água diretamente para um reservatório intermediário localizado na Estação Elevatória de Água Tratada. Nesta estação estão localizadas quatro bombas de grande porte que nas suas sucções possuem o reservatório de reunião e injetam a água para dois reservatórios elevados.

Em relação à instrumentação, o reservatório de reunião que recebe a água dos poços possui uma medição de nível por meio de um sensor ultrassônico que envia os dados através de uma saída de 4 a 20 mA para a entrada analógica do modem. Este último é o encarregado de enviar os dados para o sistema supervisorio que fica responsável pela análise e controle do estado das bombas de cada poço tubular. Ou seja, de acordo com o valor recebido ele verifica o nível do reservatório de reunião, e se o mesmo estiver acima do estabelecido deve-se desligar as bombas de alguns poços para evitar o extravasamento, estabelecendo um sistema de rodízio de desligamento entre as mesmas. Caso o nível esteja muito baixo, as bombas de salão é que serão desligadas para evitar que funcionem em vazio (*shutoff*).

As tubulações de saída das bombas da estação elevatória possuem medidores de vazão do tipo SMAR por diferencial de pressão. Sua comunicação é feita por um sinal de 4 a 20 mA que está ligado nas entradas analógicas do modem permitindo o acompanhamento do seu comportamento de vazão. O reservatório elevado R10.1 funciona apenas como elemento de passagem, ou seja, seu nível se mantém sempre o mínimo possível, não reservando água para a distribuição. Já o reservatório R10.2 é quem rege o acionamento das bombas da estação.

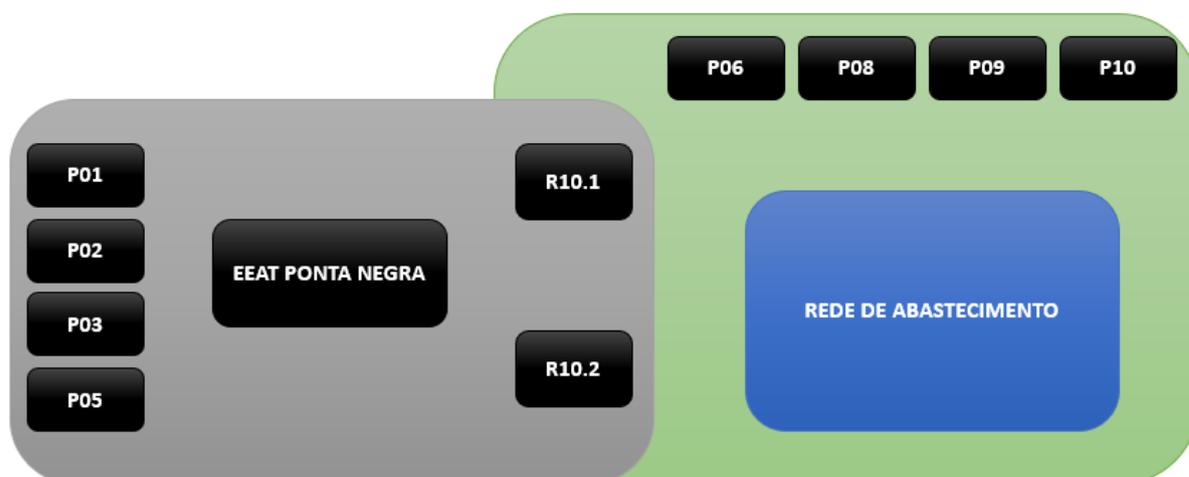


Figura 53 - Diagrama funcional do sistema de Ponta Negra.

Sistemas de abastecimento são construídos baseados em cálculos hidráulicos muito específicos objetivando a melhor qualidade de instalação e manutenção possíveis, no entanto a CAERN apresenta uma característica operacional excepcional: poços tubulares alimentando a rede de distribuição diretamente, sem bombeamento intermediário ou reservação. Este fator faz com que as bombas trabalhem segundo as condições de consumo dos clientes, fazendo com que operem em diferentes pontos de sua curva característica e alterem seu rendimento instantâneo de bombeamento. Por esse motivo é fundamental verificar as condições de pressões excessivas na rede de distribuição, que podem provocar, inclusive, rupturas, quebras, vazamentos e desperdício do produto. Tendo em visto esses elementos, o controle do acionamento desses poços deve ser feito, idealmente, por meio do acompanhamento dessas variações de pressão através da instalação de sensores e controladores locais.

O poço tubular que será tomado nesse estudo será o PT-08-A de Ponta Negra, cujo quadro informativo pode ser visto na Tabela 2. Ele está equipado com um medidor de vazão ultrassônico do tipo *clamp-on*, ou seja, não intrusivo; medidor de pressão; multimedidor de energia elétrica; e, um elemento controlador. O medidor de vazão registra o comportamento do poço quanto a demanda de água; o medidor de pressão envia os dados por meio de um sinal de 4 a 20 mA para o controlador que fará o acionamento local do poço segundo os parâmetros configurados nele, por exemplo, liga a uma pressão de 9 metros de coluna d'água e desliga com 30 metros de coluna d'água; e o multimedidor de energia acompanha as grandezas elétricas do poço, sendo a mais importante o fator de potência. Os dados são supervisionados através do ScadaBR por meio da comunicação RS485.

Tabela 2 - Quadro informativo do P08 de Ponta Negra.

<b>Motor</b>		<b>Bomba</b>	
<b>Marca</b>	Leão	<b>Marca</b>	Leão
<b>Potência (cv)</b>	13	<b>Modelo</b>	S35-6
<b>Tensão (V)</b>	380	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/h)</b>	35
<b>Corrente (A)</b>	30	<b>AMT (mca)</b>	75
<b>Rotação (RPM)</b>	3.500	<b>Rotação (RPM)</b>	3.500

Os três instrumentos de campo estão ligados na topologia de barramento devido ao menor custo de instalação, menor probabilidade de perda de sinal e menor influência de ruídos. O esquema de ligação pode ser visto na Figura 54.

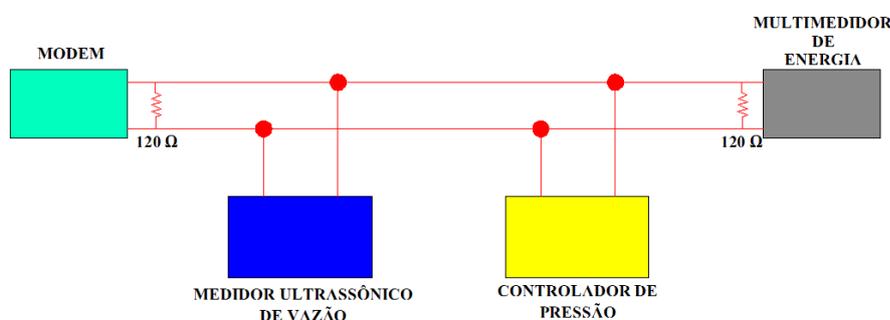


Figura 54 - Esquema de ligação dos medidores em campo.

A ligação elétrica do modem consiste em uma alimentação de 12 V a partir de uma fonte que vem acoplada ao conjunto. Esta fonte é conectada à rede elétrica 220 V e para evitar problemas advindos de curto circuitos ou até mesmo de descargas atmosféricas utilizou-se um disjuntor na fase e um protetor de surto tanto na fase como no neutro.

Foi desenvolvida e instalada em campo uma ferramenta para aquisição de sinais e detecção de vazamentos. Este sistema será chamado a seguir de supervisor e pode ser dividido em duas partes funcionais, a aquisição e o processamento. A estrutura física é formada pela conexão de transmissores de pressão conectados ao duto e que por sua vez, enviam um sinal de 4 a 20 mA ao modem de telemetria que envia este sinal via GPRS a um computador central que reúne os sinais de todos os pontos e faz o processamento. Ela foi desenvolvida de maneira que os dados fossem centralizados e referenciados com tempos sincronizados, ou seja, independente dos marcadores de tempo individuais dos modems, dos computadores e do tempo de envio e recepção de dados, levou-se em consideração um tempo referencial quando todos os dados estiverem disponíveis no computador central e esse será o horário de todos. Um esquema deste sistema está mostrado na Figura 55.



Figura 55 - Esquema funcional do fluxo de dados.

O método desenvolvido pode ser considerado um aperfeiçoamento da análise pontual de pressão, tentando corrigir suas falhas e aproveitar vantagens, ou seja, mesmo com o conhecimento das dificuldades presentes nos sinais de pressão e vazão apresentados anteriormente, pode-se justificar a colocação de sensores de pressão e vazão devido a: baixos custos de implantação, baixo custo de equipamentos (sensores e transmissores), custos operacionais, custos com manutenção, baixa influência de ruídos, entre outros. Apesar da utilização eficaz da ferramenta, também é necessária a combinação com uso de outras técnicas de processamento de sinais para extrair características operacionais do sinal advindo de campo. Já com relação à informação ou conhecimento do vazamento em si, pode-se utilizar um conjunto de técnicas inteligentes para obter resultados semelhantes à apresentação de análise de um especialista. Utilizando a transformada *wavelet* processam-se os sinais de pressão e vazão, buscando-se os coeficientes do filtro passa alta, em busca de altas resoluções que caracterizassem o vazamento.

O sistema foi desenvolvido, testado e avaliado no *Matlab*, sendo possível observar o comportamento das curvas de pressão e vazão, e seus descritores, utilizando sinais de campo armazenados em arquivos de dados. No entanto, como se faz necessário uma ferramenta mais robusta, para uma implementação em plataforma embarcada, com geração de código executável capaz de interagir diretamente com as variáveis de campo, utilizou-se o Quartus II e, especificamente, os ambientes *DSP Builder* e *HDL Coder*.

A primeira etapa do desenvolvimento da ferramenta foi a identificação de requisitos mínimos que deveriam ser atendidos para a escolha da plataforma adequada e construção das rotinas auxiliares e principais do software. Com base no sistema instalado em campo foram levantados os seguintes requisitos:

- a) o controlador deverá ter, no mínimo, uma entrada analógica para poder ler os valores do sensor de pressão;

- b) o conversor A/D deverá ter uma taxa de amostragem maior que a frequência de *Nyquist*, ou seja, no mínimo deve ser capaz de converter o valor duas vezes mais rápido do que a largura de faixa do sinal;
- c) a resolução do A/D deverá ser suficiente para ler as menores variações de tensão do sensor;
- d) o controlador deve possuir uma memória não-volátil para armazenar os parâmetros do filtro;
- e) deve haver uma compensação da resistência dos cabos do sensor, que podem ser longos.

A partir dessas definições foram estabelecidas duas topologias para ligação dos elementos de campo. A primeira, cujo diagrama esquemático pode ser visualizado na Figura 56, consiste na instalação do sensor de pressão que será conectado a um conversor analógico digital para só então ser conectado a um processador digital de sinais, onde serão realizadas as respectivas filtrações e análise da possibilidade de vazamento. Em seguida, o sinal filtrado é enviado para um conversor digital analógico que deverá compatibilizar com o tipo adequado para a entrada analógica do modem de telemetria.

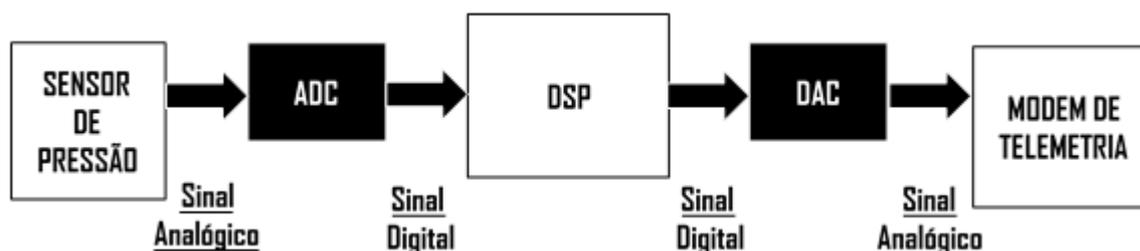


Figura 56 - Topologia de ligação de campo 01.

A segunda topologia, apresentada na Figura 57, é uma solução mais robusta do ponto de vista de barramento de comunicação de campo. Nesta topologia, o sensor de pressão é conectado a um controlador universal N1540, semelhante àquele apresentado na seção 4, que possibilitará a conversão do sinal de 4-20 mA em Modbus, podendo utilizar o barramento RS485 para comunicação bidirecional com o modem de telemetria e disponibilizando a comunicação serial via RS232 com o processador digital de sinais. Um detalhe importante é a possibilidade de comunicação bidirecional com o modem de telemetria a partir do barramento RS232, fato que traz grande versatilidade para configuração remota dos parâmetros de filtro, por exemplo.

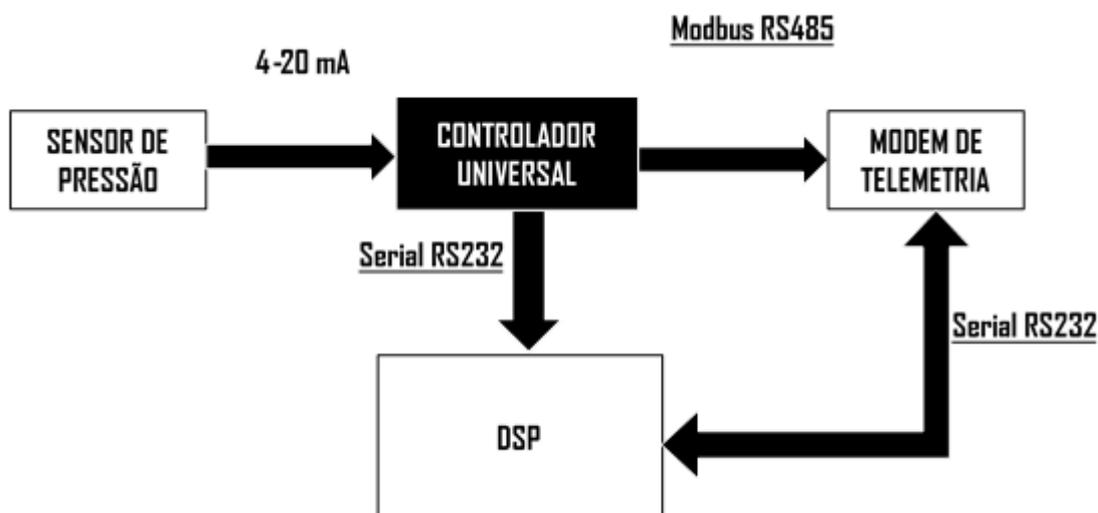


Figura 57 - Topologia de ligação de campo 02.

## 8.2 PERFIL DO SISTEMA ESTUDADO

A execução da etapa de testes foi efetuada através da aquisição dos dados de campo do sistema de abastecimento de Ponta Negra. A escolha deste sistema foi feita na tentativa de estudar soluções para dificuldades operacionais apresentadas pelo perfil bastante irregular, onde quebras de tubulações são comuns e há a presença de pontos múltiplos de abastecimento que fornecem dificuldade operacional. O perfil da zona de abastecimento pode ser visualizado na Figura 58.

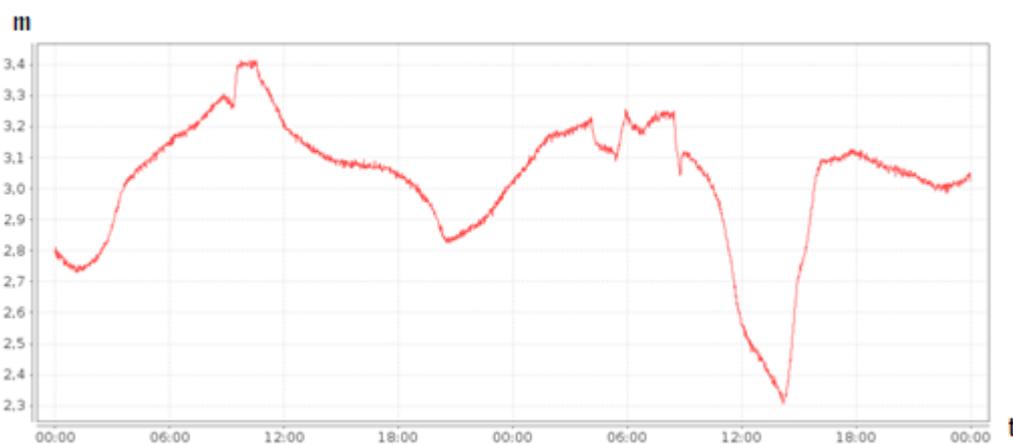


Figura 58 - Perfil da zona de abastecimento.

Em estações coletoras nas unidades de produção foram instalados medidores de vazão e pressão para monitoramento das condições operacionais. As unidades em questão abastecem áreas diferentes, no entanto, em determinados trechos há uma zona comum de abastecimento, fato que dificulta a análise pontual e localizada de possíveis efeitos de anomalias hidráulicas da

rede de distribuição. Através do sistema instalado é possível monitorar transientes da bomba devido a entradas e saídas abruptas de grandes cargas e anomalias provocadas por possíveis pontos de ruptura e zonas de pressão localizadas. Vale ressaltar que por não haver zona de influência dos reservatórios de Ponta Negra não há uma coluna de fluido que seja capaz de provocar a supressão das variações de pressão no duto. Na Figura 59 é destacada a ocorrência de um transiente na bomba, assim como a influência de entradas e saídas de grandes cargas.



Figura 59 - Comportamento do sistema de bombeamento a partir de variações de carga.

Devido à presença de vazamentos e paradas de abastecimento surge um período transitório em que o duto não fica completamente preenchido, fazendo com que haja a formação de vácuos, golfadas e escoamento descontínuo. Este comportamento é contínuo e pode ser visto na Figura 60.

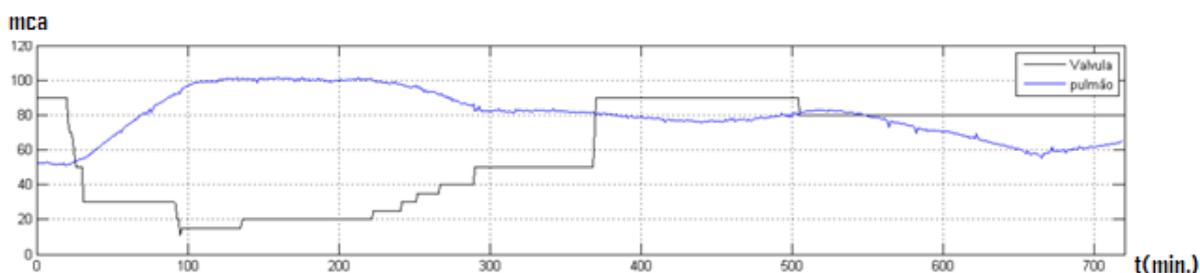


Figura 60 - Comportamento de descontinuidades de abastecimento.

A CAERN possui sensores de pressão e vazão já instalados nas unidades produtoras, mas foram utilizadas medidas advindas de unidades móveis instaladas em pontos críticos de abastecimento, seja por elevadas pressões caracterizando uma zona de elevado estresse hidráulico ou por baixas pressões destacando zonas com dificuldade de abastecimento. Nestes pontos, além dos sensores foram instaladas unidades de aquisição, envio e monitoramento de pressão rodando em paralelo ao sistema já existente e sua colocação se fez junto ao

desenvolvimento de aplicações de aquisição, supervisão e envio dos sinais via modems de transmissão, além do sistema de processamento.

### 8.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE ANOMALIA HIDRÁULICA

Foi desenvolvida e instalada em campo uma ferramenta para aquisição de sinais e detecção de vazamentos. Este sistema será chamado a seguir de supervisor e pode ser dividido nestas duas partes funcionais (aquisição e processamento). A estrutura física é formada pela conexão de transmissores de pressão (PT) conectados ao duto e que por sua vez, enviam um sinal de 4 a 20 mA, aos modems de transmissão que estes sinais via GPRS a um servidor central que une os sinais de todos os pontos e faz o processamento. Ela foi construída de maneira que os dados fossem centralizados e referenciados com tempos sincronizados, ou seja, independente de marcadores de tempo individuais dos modems, dos computadores e do tempo de envio e recepção de dados, foi tomado um tempo referencial quando todos os dados estivessem disponíveis no servidor central.

Testes realizados em campo foram a fonte dos sinais de treinamento e de testes do sistema em laboratório, mas nem todos resultaram em sucesso operacional. Apesar disso, o conhecimento empírico do comportamento hidráulico no duto facilitou o planejamento do método utilizado na detecção de vazamento. Sendo assim, o método desenvolvido pode ser considerado um aperfeiçoamento da análise pontual de pressão, tentando corrigir suas falhas e aproveitar as vantagens, ou seja, mesmo com o conhecimento das dificuldades presentes nos sinais de pressão e vazão apresentados anteriormente, a justificativa de sua utilização é dada pelos seguintes fatores: baixo custo de implantação, baixo custo dos equipamentos, custos operacionais, custos com manutenção e a baixa influência de ruídos. Apesar destes benefícios, é necessária a combinação dos elementos de campo com o uso de técnicas de processamento de sinais para extrair características operacionais que não eram possíveis anteriormente. Além disso, em relação à informação e ao conhecimento do vazamento pode-se utilizar um conjunto de técnicas inteligentes para expressar resultados semelhantes à apresentação a um especialista.

Utilizando a transformada *wavelet* os sinais de pressão e vazão são processados, buscando-se obter os coeficientes do filtro passa alta para a obtenção de altas resoluções que caracterizem o vazamento, ou seja, quanto maior o número de dados por amostra melhor será a qualidade das anomalias identificadas tendo em vista a elevada frequência do sinal característico dos vazamentos. A Figura 61 demonstra como o sinal é decomposto em cada etapa. Os coeficientes  $a_1$  e  $d_1$ , representam o sinal de aproximação e os coeficientes de detalhe

do sinal original  $s$ , respectivamente. A atuação destes filtros está vinculada a capacidade de retirada dos dados considerados como ruídos do sinal, dessa forma o sinal resultante da filtragem possui dados com características específicas para a anomalia abordada nesta etapa. Posteriormente, o sinal de aproximação anterior ( $a_1$ ) passa novamente pelos filtros e apresenta mais dois coeficientes ( $a_2$  e  $d_2$ ) capazes de descrever novos e diferentes comportamentos em relação a etapa anterior. Seguindo até a terceira etapa ( $a_3$  e  $d_3$ ) que extrai a anomalia hidráulica mais importante, o vazamento na rede de distribuição.

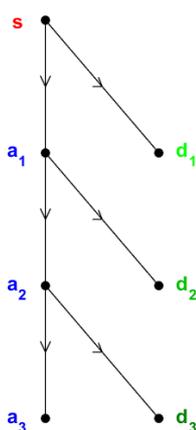


Figura 61 - Processo de filtragem em cascata do sinal.

Com base em ensaios e dados taguados fornecidos pela CAERN foi possível estabelecer valores limites de 1,8 e -1,8 para caracterização de extravasamento de reservatório. A Figura 62 explicita a ocorrência de três extravasamentos no período analisado, durante os picos dos coeficientes deste filtro.

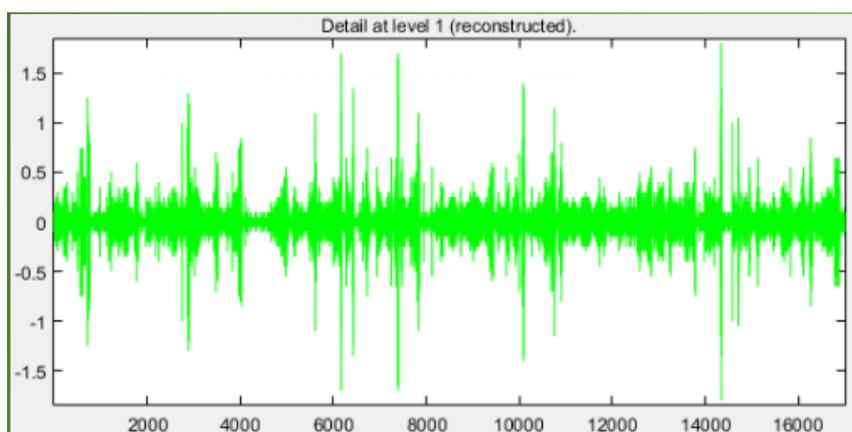


Figura 62 - Coeficientes de detalhe do primeiro nível.

Na segunda etapa de análises, os ensaios e dados taguados fornecidos possibilitaram o estabelecimento de valores limites de 2,825 e -2,825 para caracterização de entrada de cargas de grande porte. A Figura 63 explicita a ocorrência de uma entrada de carga de grande porte no período analisado, durante o pico do coeficiente deste filtro.

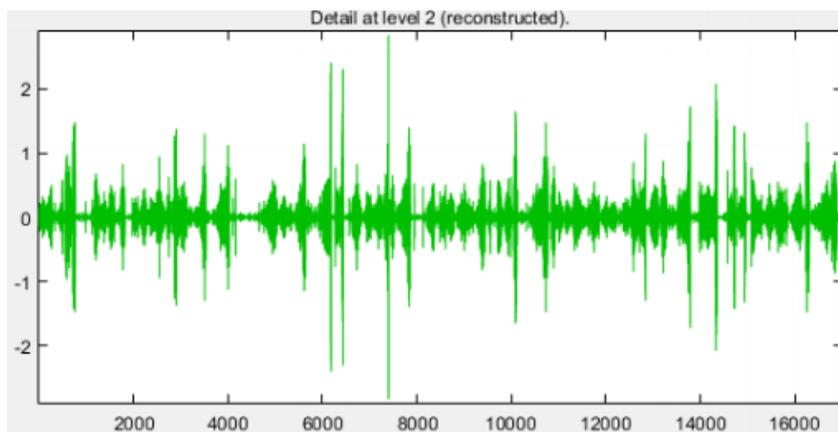


Figura 63 - Coeficientes de detalhe do segundo nível.

E na última etapa de análises, os ensaios e dados taguados fornecidos forem mais sensíveis tendo em vista a impossibilidade de determinação temporal exata da ocorrência. No entanto, com base na informação de ocorrências específicas e conhecidas na rede de distribuição foi possível estabelecer valores limites de 4,863 e -4,863 para caracterização de vazamento na rede de distribuição da área em estudo. A Figura 64 explicita a ocorrência de um vazamento na rede de distribuição em estudo no período analisado, durante o pico do coeficiente deste filtro.

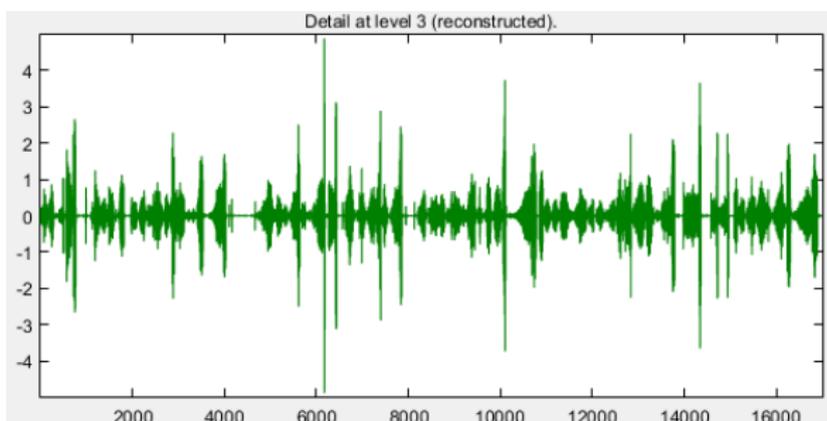


Figura 64 - Coeficientes de detalhe do terceiro nível.

## 9 ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Com a proposta de implantação de um inversor de frequência em todas as EEAT's necessárias que seguem o mesmo padrão operacional da Estação Elevatória de Reforço de Pressão (EERP) em análise, os resultados alcançados proporcionam ganhos relevantes ao estudo em questão:

1. Aumento na confiabilidade do sistema: com o aumento da eficiência hidráulica e a diminuição da potência destrutiva do sistema proposto, os esforços mecânicos sobre a bomba são extremamente reduzidos, permitindo assim, um aumento da confiabilidade dos equipamentos.
2. Redução na demanda de mão de obra: a redução na demanda de mão de obra é diretamente proporcional ao aumento do tempo médio entre falha dos equipamentos.
3. Redução nos níveis de vibração do conjunto motor-bomba: os níveis de vibração dos equipamentos caminham em conjunto com a potência destrutiva, sendo assim, a redução do nível de vibração nos equipamentos pode ser claramente observada conforme a ocorrência de diminuição da potência destrutiva, imposta pelo inversor.
4. Redução de vazamentos no selo mecânico da bomba (*jet pump*): as possibilidades de vazamento em um selo mecânico com a bomba operando a um percentual da pressão de descarga e em uma rotação consideravelmente mais baixa do que na condição de rotação nominal. Aguarda-se assim, um aumento da redução de vazamento pelo selo.

### 9.1 CARACTERÍSTICAS DA ANÁLISE DO INVESTIMENTO

Para a análise do investimento foram consideradas as premissas listadas abaixo:

- a) para o estudo de viabilidade econômica foram considerados todos os valores em reais;
- b) a taxa de atratividade anual (TMA) considerada nesse estudo é de 10%;
- c) o valor de contingência para este estudo foi de 10%;
- d) para este estudo foi considerado uma depreciação linear no investimento, com o tempo de depreciação de 10 anos;
- e) foi considerado para o cálculo de depreciação, a inflação anual para taxa de 6,5% no ano de 2016, 6% para o ano de 2017 e 6% a partir do ano de 2018;
- f) o custo estimado de materiais e serviços necessários aos investimentos inclui impostos;
- g) o valor do imposto de renda + CSLL debitado no lucro bruto é de 30%;
- h) o custo da energia elétrica, também foi considerado: 1 MWh = R\$ 292,00;

- i) os valores de serviços e equipamentos apresentados nesse documento devem ser considerados apenas como estimativas quantitativas para fins orçamentais;
- j) a margem de erro estabelecida para as estimativas deste estudo está entre -20% e 20%;
- k) para este estudo foi considerado disponível o espaço na subestação para a instalação do novo conjunto de equipamentos.

## 9.2 ANÁLISE DE RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO PROPOSTO

Em relação aos custos e os retornos esperados provindos da instalação da nova solução, realizou-se um estudo de viabilidade econômica para o empreendimento em questão, analisando-se assim, a viabilidade econômica do projeto.

A Figura 65 representa a elaboração do fluxo de caixa em um prazo de 20 anos para o investimento proposto.

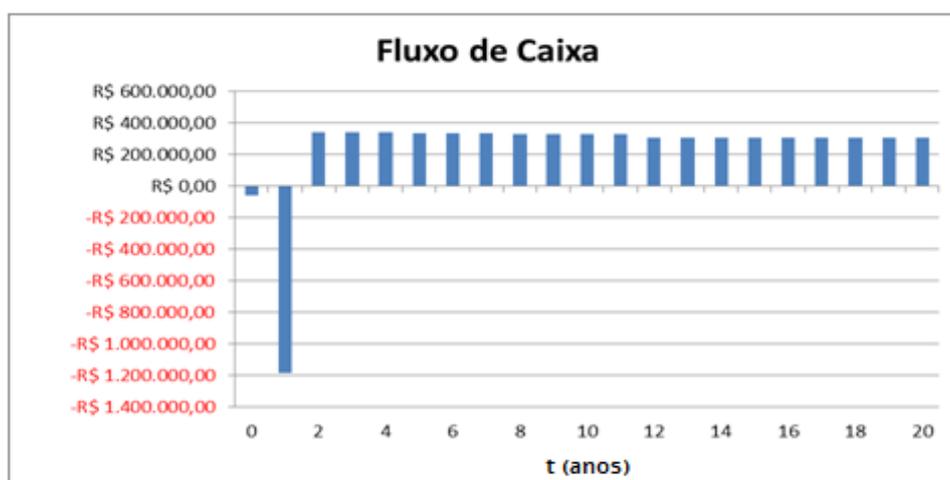


Figura 65 - Fluxo de caixa para o investimento proposto.

A partir do gráfico apresentado acima, pode-se concluir que, o uso do inversor de frequência além de apresentar resultados positivos tecnicamente, é ainda uma solução viável economicamente para o empreendimento proposto que possui um Valor Presente Líquido (VPL) de aproximadamente R\$ 1.282.700,00, uma taxa interna de retorno (TIR) de 26,13 % e um *payback* simples de 5 anos e 4 meses, apresentando-se assim como um investimento de ótima oportunidade. Na Tabela 3, na seção de Apêndice, é possível visualizar como este valor foi alcançado por meio de instrumentação, telemetria e controle.

### 9.3 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO

Levando em consideração que a nova solução possa sofrer variações no custo da implantação, foi feita uma análise em relação ao comportamento do novo investimento perante possíveis variações no custo de implantação do novo projeto.

A variação do custo de implantação modifica completamente o resultado do investimento total do empreendimento. Porém em ambos os cenários analisados, o investimento para a nova solução continua economicamente viável, concluindo-se assim que o investimento inicial é robusto levando em consideração uma variação crescente no seu custo de implantação de até metade do seu valor.

A partir dos dados coletados e devidamente tratados, passou-se a etapa de avaliação. Inicialmente, somente com os dados dos dias de operação convencional foram calculadas as rotações que seriam necessárias para se reproduzir as vazões e cargas medidas na saída da estação. Observou-se claramente que esse sistema trabalha de uma maneira bastante uniforme, com pouquíssimas variações, em rotações entre 65 e 90% da nominal. Notadamente, numa avaliação preliminar, isso já seria uma condição recomendável para emprego de um inversor, haja vista que teria um alto ganho numa relação custo-benefício. Outro fator relevante é o próprio perfil da curva da bomba, que nesse caso é bastante variável e recomendável no emprego com inversor de frequência devido a alta variação de carga com a mudança da vazão.

Obviamente, por menos que se varie a velocidade de operação do conjunto, haverá algum ganho em termos de economia de energia elétrica. Entretanto, como todos os parâmetros da bomba se alteram com a mudança das rotações, há que se discutir as questões de rendimento para uma avaliação mais conclusiva.

Uma das análises mais importantes do ponto de visto gerencial é o retorno financeiro. Portanto, a seguir serão mostradas as informações mensais a partir de janeiro de 2018 até agosto de 2018 acerca do consumo ativo (kWh) e o custo total da fatura (R\$).

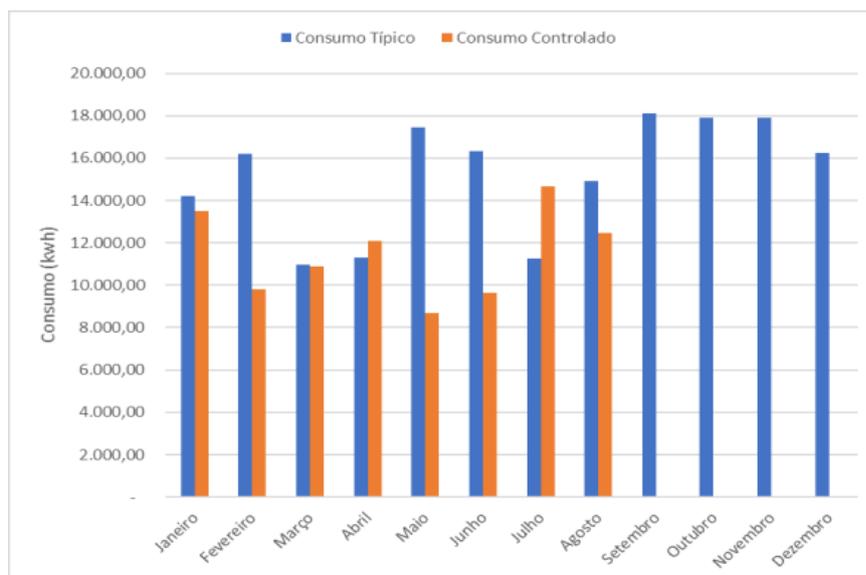


Figura 66 - Comparativo de consumo de energia elétrica com controle e sem controle.

Ao implementar o controle em malha fechada houve uma diminuição no consumo ativo em razão do inversor de frequência controlar a rotação do motor promovendo uma forte economia de energia, pois ao invés do motor operar na rotação nominal todo o tempo ele passará a operar em valores menores já que adequará o funcionamento do motor de acordo com a pressão de abastecimento. O gráfico da Figura 66 mostra a consolidação dos dados energéticos.

Seguindo o comportamento do consumo ativo tem-se o custo operacional pela mesma lógica. Um fator relevante que deve ser levado em consideração nesta análise é a tarifa da concessionária em cada período. De maneira geral, o custo da tarifa é bem próximo em todos meses apesar da variação de alguns impostos. Com a implementação do inversor de frequência e do controle ocorreu uma economia de 10,29 %.

E para finalizar a análise econômica deve-se efetuar o estudo do custo geral contratual. Antes disso, vale ressaltar que o inversor de frequência também faz a correção do fator de potência do motor. Portanto, já existe a redução do custo com a utilização e manutenção de bancos de capacitores. E com a implementação do inversor de frequência e do controle ocorreu uma economia na fatura de 17,56 % em um período de sete meses. O comportamento pode ser visualizado na Figura 67.

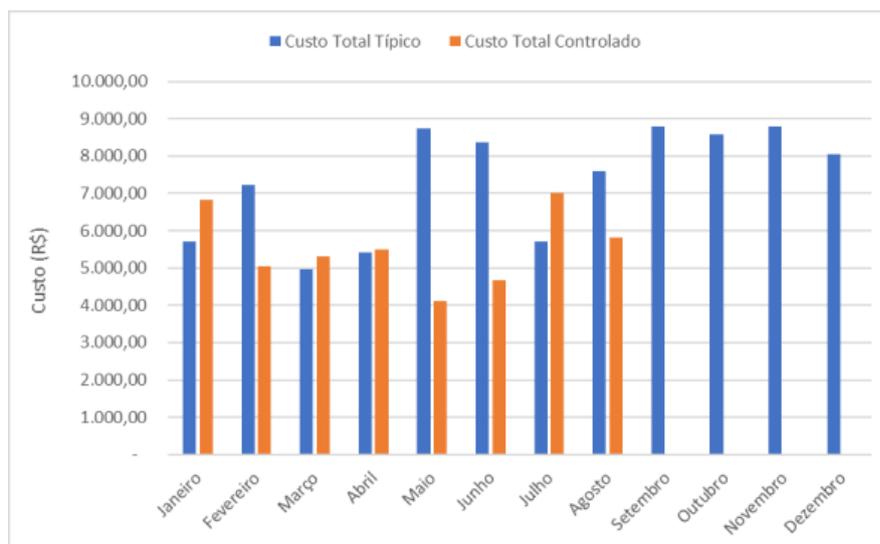


Figura 67 - Comparativo do custo total da fatura de energia com controle e sem controle.

Tendo em vista o âmbito prático e a planta real, o sistema operacional da CAERN, muitas vezes, está ligado diretamente aos vazamentos na rede de distribuição.

Portanto, para uma análise adequada e correta deve-se levar em consideração a quantidade de vazamentos na região de operação da unidade durante o período em análise tendo em vista que quando ocorre um vazamento a unidade necessariamente tem que ser desligada. Sendo assim, o parâmetro de número de acionamentos torna-se um filtro inicial para verificação da redução do número de quebras da rede. No entanto, é importante ressaltar que a parada do bombeamento em função dos vazamentos influencia nas horas trabalhadas, no número de acionamentos e na pressão média de abastecimento.

Serão analisados dados históricos em dois ciclos: de fevereiro a agosto de 2017 quando não havia controle e de julho a setembro de 2018 fazendo uso do controle em malha fechada.

A primeira análise efetuada será a de horas trabalhadas. As rotinas de manutenção devem levar em consideração como primeira variável as horas trabalhadas, sendo de fundamental importância sua análise junto as condições operacionais de trabalho. E ao implementar o controle em malha fechada observa-se um aumento considerável da quantidade de horas trabalhadas, conforme Figura 68. Apesar disso, conforme análise que será feita posteriormente haverá um menor consumo de energia.

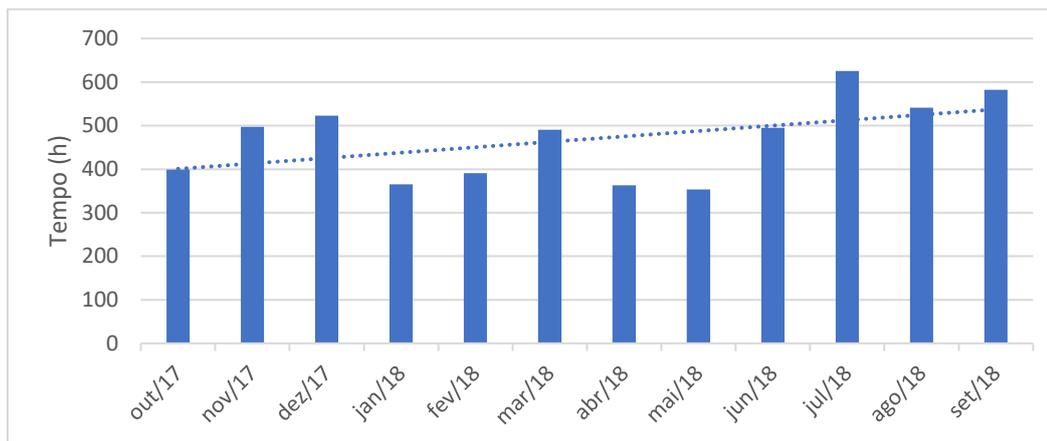


Figura 68 - Evolução da quantidade de horas trabalhadas.

Efetuada uma análise geral do comportamento das horas trabalhadas é possível observar a tendência crescente das horas segundo uma expressão  $y = 0,4059x - 16760$ , com um coeficiente angular positivo ressaltando a tendência de crescimento da variável, conforme Figura 68.

A segunda variável que será analisada é a quantidade de acionamentos. Vale ressaltar que esta é uma variável que não é verificada e nem acompanhada pelo setor operacional da empresa. Portanto, os operadores do sistema efetuam os acionamentos por análise própria ou quando ocorrem vazamentos.

O primeiro ciclo mostra uma quantidade de acionamentos elevada devido ao número elevado de vazamentos na rede e falta de análise crítica de diversas variáveis sistêmicas.

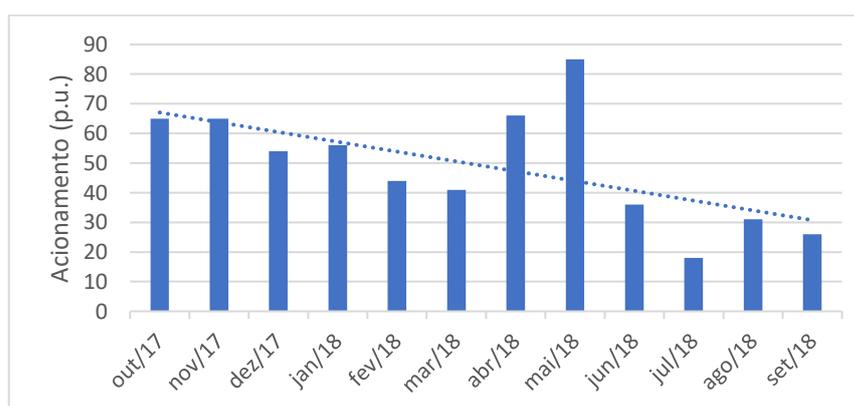


Figura 69 - Número de acionamentos da unidade operacional.

A partir do gráfico da Figura 69 torna-se claro o perfil descendente na quantidade de acionamentos da unidade. Retirando os meses de abril e maio quando ocorreram problemas externos a planta, nota-se uma redução considerável com o controle em malha fechada. Para confirmar a tendência de queda foi inserido no gráfico uma linha de tendência linear apenas para enfatizar o decréscimo no número de acionamentos, com uma expressão equivalente de

$y = -0,1079x + 4628,5$ , ou seja, um coeficiente angular negativo com uma taxa de diminuição considerável.

A análise da pressão de abastecimento tem perfis de comportamento muito interessantes. Não necessariamente uma medida de pressão mais elevada significa melhor abastecimento ou melhor condição operacional, tendo em vista que para essa análise o sistema não leva em consideração o tempo em que permaneceu em determinada pressão. A seguir serão mostrados os valores encontrados para os ciclos já definidos. Também será possível observar os valores máximos de pressão registrados.

No ciclo operacional com o controle PI implementado foram obtidos os melhores resultados operacionais. Nesta etapa é notável a elevação da média de pressão de abastecimento para 42,06 mca, valor superior em 15,1 % ao estado inicial. E como benefício complementar ainda houve uma diminuição nas pressões máximas registradas.

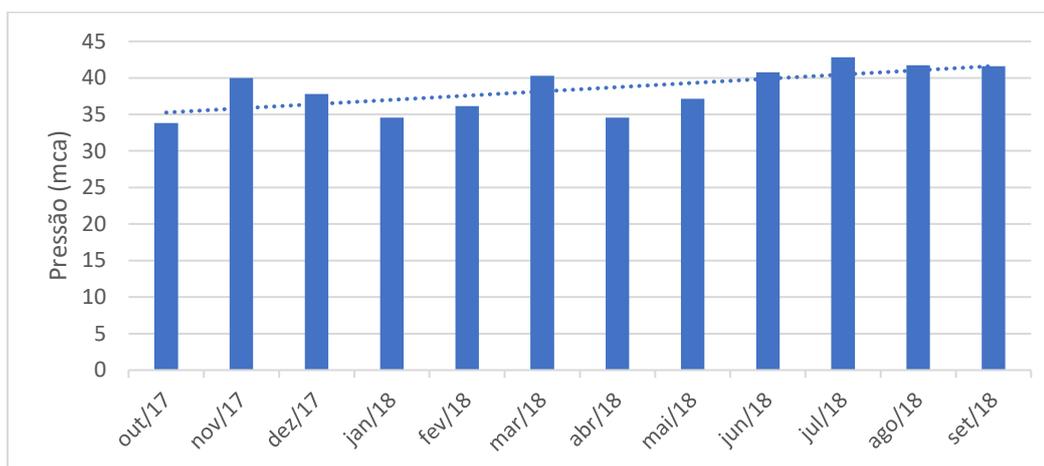


Figura 70 - Comportamento da pressão de recalque.

Como maneira de facilitar a visualização do comportamento da pressão criou-se o gráfico da Figura 70 que apresenta o comportamento da pressão média mensal nos dois ciclos de controle utilizados. Para adequar e confirmar a tendência de elevação da pressão de abastecimento utilizou-se a linha de tendência linear com uma expressão de comportamento equivalente a  $y = 0,0189x - 764,6$ , ou seja, com um coeficiente angular positivo, fato que confirma para este caso o crescimento da pressão.

## 10 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A motivação para esse longo trabalho de pesquisa, a respeito do processo de implantação de um sistema de automação em uma companhia de saneamento, foi a pouca informação sobre esse assunto e a quase indisponibilidade de dados, mais precisamente, aqueles relativos às questões operacionais dinâmicas. A bibliografia disponível, exaustivamente consultada, não revelou muito mais informações, focando quase que prioritariamente a questão única da eficiência hidráulica, sem conexão alguma com a economia de energia elétrica e com a implantação de tecnologias de automação.

É possível compreender a importância deste item, porém quando se enxerga unicamente um sentido em meio a um ambiente que congrega inúmeras variáveis, esse foco único pode conduzir a distorções ou equívocos em relação aos resultados apresentados e a sua interpretação, criando uma visão enganosa e irreal a respeito do assunto. Esse é o caso do inversor de frequência, ferramenta de grande relevância que se bem aplicada e perfeitamente solidarizado ao sistema, tem muito a contribuir no desenvolvimento tecnológico no campo da engenharia.

O fato preponderante para se chegar às conclusões que serão apresentadas adiante, se deve muito ao contato estabelecido com a empresa de saneamento envolvida no trabalho. A CAERN mais especificamente, disponibilizou dados, instalações, equipamentos e pessoal para os testes que se desenvolveram. Sem esse apoio irrestrito, dificilmente o objetivo da pesquisa seria alcançado.

Quando se fala em operação de sistema de bombeamento, a primeira coisa que se vem em mente são bombas funcionando de forma ininterrupta, produção, rotina operacional, consumo de energia elétrica e, obviamente, custo. Essa talvez seja a palavra chave de toda a discussão, o custo. Quando existe a intenção de se empregar um sistema de automação, a primeira pergunta que deveria ser feita seria: “Qual a expectativa do cliente ou empresa que pretende empregar um sistema de automação em suas unidades operacionais?”.

Trata-se de uma questão muito abrangente, contudo ela é fundamental e toda discussão será levada em função dessa simples resposta. Elegendo hipoteticamente o custo como resposta à questão apresentada, surgiria a primeira grande orientação.

O início de um estudo visando o emprego de novas tecnologias deve começar pelo profundo conhecimento do sistema, tendo como referência dois grupos principais:

- sistema de tarifação (modalidade de cobrança, demanda contratada, etc.);

- características da unidade (topologia, rotina operacional, curva real do sistema, curva real da bomba, rendimento real, ponto de operação, pontos críticos, limitações etc.).

Essas são informações extremamente importantes para o desenvolvimento do trabalho. De posse delas, foi possível associá-las à expectativa levantada na primeira questão. Sendo o custo o foco principal, talvez pequenos ajustes e mudanças no sistema de tarifação já conduziram ao resultado almejado. A análise e a definição de uma outra modalidade de cobrança, além da recontração de uma nova demanda de potência, poderiam reduzir substancialmente os custos diretos.

Por outro lado, já por diversas vezes evidenciado ao longo da pesquisa, os sistemas são geralmente superdimensionados, o que implica diretamente na questão tarifária, pois a contratação da demanda de potência está diretamente vinculada a este item. Outro fator bastante significativo é a possibilidade de mudança na rotina operacional da estação. Esta condição abre caminhos para escolha de uma modalidade de cobrança mais vantajosa em função das demandas operacionais do sistema ou do processo.

É importante observar que todas essas alternativas não envolvem nenhum tipo de gasto e, na verdade, já deveriam ser de pleno conhecimento, pois fazem parte do gerenciamento de um processo, entretanto, isso não é o que ocorre na grande maioria dos casos observados.

Tendo então o custo como foco inicial da discussão e sendo possíveis os ajustes acima sugeridos, muito provavelmente o objetivo já seria de imediato alcançado e o melhor, sem investimento algum, apenas uma readequação da unidade o mais próximo da sua realidade.

Imaginando agora que o custo não mais seja o foco principal, ou até mesmo que os resultados atingidos com as readequações do sistema de cobrança de energia elétrica e as mudanças nas rotinas operacionais não tenham sido satisfatórias, se inicia então a segunda etapa, que é a identificação de pequenas obras e investimentos, obviamente, com valores abaixo do custo de um sistema automatizado, que poderiam ser implementados e que melhorariam este sistema.

Conhecendo-se as curvas da bomba, do sistema e o rendimento do conjunto motor-bomba é possível identificar o seu ponto de operação, além da faixa de vazão, intervalo de rendimento e carga em que o sistema mais opera. De imediato esses dados já fornecem uma excelente indicação se o inversor de frequência será uma alternativa adequada.

Curvas de bombas com perfis muito planos, ou seja, com baixa variação de carga, não são as melhores para associação com inversor de frequência, visto que certas faixas de variações de vazão, pouco ou quase nada refletirão em termos de variações de carga e, conseqüentemente,

muito pouco será o benefício de economia se comparado com uma operação pelo sistema convencional.

Conforme descrito por outros autores e muitas vezes enfatizado ao longo do trabalho, o melhor dimensionamento possível do conjunto motor-bomba é aquele em que o ponto de operação, correspondente à máxima vazão, esteja localizado à direita das curvas de melhores rendimentos. Isso permitiria que ao longo da faixa de vazão em que se opera, o sistema flutuasse pelos melhores rendimentos do conjunto, alcançando assim resultados mais efetivos em termos de economia. Nesse caso a substituição do conjunto motor-bomba existente seria uma alternativa a ser considerada. Outra possibilidade a ser verificada é a substituição do próprio barrilete da estrutura de bombeamento. Projetos antigos apresentam conexões em  $90^\circ$  o que aumenta bastante a perda de carga, assim como válvulas de retenção que também contribuem para isso.

A mudança na rotação do conjunto implica na alteração de todos os parâmetros da bomba, ou seja, ao se alterar a rotação mudam além da vazão e da carga, o NPSH requerido, potência consumida, etc. e, principalmente, o rendimento. Chega-se nesse ponto numa outra questão crucial para análise: existe alguma vantagem em se alterar as rotações e passar a trabalhar com rendimentos do conjunto muito baixos?

É nesse ponto que a questão do emprego do inversor de frequência começa a esbarrar na dúvida. Alterações nas rotações trarão benefícios como a redução da carga, da potência consumida, da preservação do conjunto contra o *stress* da operação com válvula de controle etc. Entretanto, haverá um preço a ser pago, na forma da perda de rendimento, aumento da temperatura do conjunto motor-bomba, desgaste da isolação do bobinado do motor etc. A resposta tem relação direta com o custo-benefício disso, e aí a questão passa a ser uma avaliação temporal dos conjuntos e envolve múltiplos fatores além do próprio tempo de operação. Parâmetros de avaliação serão obtidos a partir de ensaios dos conjuntos para análise do comportamento termodinâmico, hidráulico e eletromecânico, para posterior classificação e estabelecimento das severidades de operação. Aqueles que possuírem os piores resultados deverão ser trocados, pois mesmo com a utilização dos inversores de frequência para o controle automático o resultado não será viável. E os demais passam a apresentar melhores resultados apenas com a aplicação dos inversores de frequência em malha fechada para o estabelecimento das melhores condições de operação. Como benefícios fundamentais obtidos a partir da implementação do projeto estão:

- a) Economia significativa de energia elétrica: pelas Leis de Semelhança, sendo a vazão diretamente proporcional à rotação, e a potência diretamente proporcional à rotação

elevada ao cubo, verifica-se que para um menor valor de vazão recalçada haverá também uma potência consumida correspondente muito menor.

- b) Controle de velocidade submetendo assim o conjunto a uma carga muito menor: conforme evidenciado, cada valor de vazão corresponderá a um valor de carga que será menor em função da redução de rotação, se comparado com o sistema convencional de controle de vazão.
- c) As pressões no sistema são mantidas bem próximas aos níveis mínimos requeridos.
- d) Controle operacional das bombas simplificado: a ação de controle da vazão se dá diretamente com a mudança da rotação, o que acontece de forma suave, segura e confiável. Essa ação pode ser feita diretamente no painel elétrico da casa de bombas ou mesmo à distância pelo Centro de Controle Operacional (CCO) fazendo o ajuste requerido.
- e) Eliminação do transitório causado com o acionamento e a parada de bombas: como a ação do inversor de frequência se faz de forma lenta e gradativa, tanto no acionamento como na parada, existe um tempo entre a intervenção propriamente dita e o resultado final esperado, ou seja, o conjunto motor bomba vai acelerando ou desacelerando, de acordo com a parametrização da rampa, de forma lenta e contínua. Com isso desaparecem as perturbações geradas pelos transitórios. As ações de acionamento e parada com o inversor reduzem o *stress* no motor, bomba e acoplamento.
- f) Controle do fator de potência, uma vez que o lado da rede tem contato com o retificador não controlado, resultando assim um excelente fator de potência (próximo de 1).
- g) Eliminação da alta corrente de partida e redução do pico de demanda (kVA): o inversor de frequência se adapta para evitar sobrecargas causadas pela aceleração de alta carga de inércia.
- h) Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico: como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil.
- i) Redução do nível de ruído e vibração: em sistemas convencionais as condições de baixa vazão são sempre acompanhadas por ruídos e vibrações, geralmente causadas pela válvula de controle que se encontram nesse caso parcialmente abertas, além de efeitos de cavitação.
- j) Método de interfaceamento simplificado para sinais de controles externos (0 – 10 V ou 4 – 20 mA) proveniente de transmissores.

- k) Redução de problemas de cavitação no sistema de bombeamento associados a operação de válvulas de controle a baixo fluxo.
- l) Simplificação na rede de dutos através da eliminação de válvulas para o controle da vazão.

Apesar disso, o início da execução foi custoso do ponto de vista gerencial principalmente em relação aos altos custos dos equipamentos. A etapa de análise dos resultados obtidos também trouxe conclusões importantes que podem ser generalizadas em outras instalações industriais semelhantes:

- a) Custo inicial relativamente alto.
- b) Introdução de distorções harmônicas da tensão, provocada pelo processo de conversão de potência e emissão de interferências eletromagnéticas: alteração da onda senoidal perfeita da rede elétrica concessionária. Nos Estados Unidos existe legislação específica a respeito desse assunto que limita a emissão de correntes harmônicas.
- c) Limitada distância entre o drive do inversor de frequência e o motor: em casos de distância muito grande entre o inversor e o motor, excedendo o limite máximo, implicará na necessidade de inserção de outros equipamentos adicionais, tais como: filtro de Interferência de Frequência de Rádio (RFI) e reator de linha.
- d) Retorno discreto dos benefícios ou subutilização do equipamento em virtude da má localização de sensores no sistema, cuja função essencial é a emissão de parâmetros que servirão de referência ao inversor de frequência para as correções necessárias na velocidade: implementação de sensores de pressão, vazão e nível em pontos críticos do sistema aumentando o custo do investimento.
- e) O inversor de frequência pode requerer a instalação em ambientes menos agressivos dos que os motores geralmente ficam. Os componentes eletrônicos são menos tolerantes a locais corrosivos e com umidade.

A utilização do sistema supervisorio proposto neste trabalho tem como objetivo suprir uma demanda que vem sendo requisitada por grandes corporações do ramo de processos industriais: o auxílio à tomada de decisões, pois ações imediatas e precisas são necessárias para evitar decréscimo de produção e até mesmo evitar acidentes com consequências graves. Neste escopo, a solução proposta mostrou atender bem ao objetivo ao fornecer ao operador uma tela de monitoramento de variáveis e alarmes com informações operacionais úteis, processadas de forma a gerar análises prévias baseadas em regras modeladas para aquela situação. Sendo assim, o operador foca sua atenção em alarmes e condições operacionais que são de extrema

importância naquele determinado momento, resultando em uma decisão mais rápida e com maior acurácia.

Nos protocolos de barramento de campo existem transmissores (sensores) e atuadores cujo sinal de transmissão, na maioria das vezes analógico (4 a 20 mA) se dirigem às estações de controle de campo no qual o sinal é convertido para a forma digital. Nessa unidade são executados os vários algoritmos de controle do processo. Os dados das variáveis trafegam em uma rede, onde podem ser armazenados e manipulados através da utilização de softwares supervisórios. Têm-se os sensores e atuadores se comunicando em rede, reduzindo o custo de cabeamento que não precisa mais ser dedicado a um sensor ou atuador. Como vantagem do sistema supervisório pode-se citar:

- a) informação imediata sobre diagnósticos de falhas nos equipamentos de campo. Os problemas podem ser detectados antes deles se tornarem sérios, reduzindo assim o tempo de inatividade das plantas;
- b) distribuição das funções de controle nos equipamentos de campo;
- c) instrumentos de medição e elementos de controle final. São dispensados os equipamentos dedicados para tarefas de controle. Assim, em caso de falha em um equipamento, o resto da rede continua funcionando;
- d) aumento da robustez do sistema, visto que dados digitais são mais confiáveis que analógicos;
- e) os custos de engenharia serão reduzidos e os atuais procedimentos serão completamente mudados. Cada equipamento de campo oferece muitos blocos de controle que podem ser usados pelo usuário;
- f) a atual conexão física ponto-a-ponto é substituída pelas conexões multiponto com diversos equipamentos em um mesmo par de fios;
- g) os equipamentos de campo são capazes de fornecer muito mais informações do que hoje. Como o sinal digital é menos sensível a ruídos, a qualidade da informação também é melhor. Sem falar na possibilidade na utilização de transmissores de múltiplas variáveis;
- h) equipamentos de campo podem indicar falhas em tempo real, assim como indicar diagnóstico preventivo baseado em dados de operação do equipamento e avaliação estatística dos mesmos.

O sistema proposto mostrou-se eficaz em monitorar e possibilitar melhorias na qualidade da informação de campo e operação da rede de abastecimento hídrico. Além disso, a implementação proposta com a utilização da *wavelet* permitiu a detecção de vazamentos através

da utilização de técnicas de processamento de sinais combinadas com sistemas embarcados. O sistema pode ser adaptado para utilizar diferentes tipos de variáveis e esquemas de ligação. Uma das dificuldades encontradas durante o processo foi a escolha da família *wavelet* a ser utilizada e como isso seria feito, tendo em vista a dificuldade na obtenção de dados confiáveis para estabelecimento das condições de referência.

Como complemento deste trabalho pode-se utilizar um conjunto de máquinas com redes neurais especializadas para aumentar ainda mais a confiabilidade na tomada de decisões, assim como, a combinação de outros métodos tradicionais.

## 11 CONCLUSÃO

A expansão dos sistemas de abastecimento hídrico é um processo contínuo e necessário à propagação do saneamento básico às comunidades que se encontram em franco crescimento na maioria das regiões brasileiras. O planejamento deste processo tem fundamental importância na posterior manutenção destes sistemas e na identificação das inevitáveis necessidades de intervenção. O gerenciamento da pressão e um bom plano de pesquisa de vazamentos constituem procedimentos de suma importância dentro de um plano para redução de perdas hídricas em um sistema de abastecimento urbano. Adicionalmente, a dicotomia imposta pela necessidade de aumento da demanda hídrica urbana e o iminente déficit entre os recursos disponíveis e os demandados, impõe a necessidade de atualização tecnológica e otimização dos sistemas de abastecimento, oportunizando a sua expansão com base na eficiência da detecção e controle de vazamentos, eficácia operacional e processos de manutenção rápidos e efetivos.

Uma expansão eficaz, no entanto, torna-se impraticável sem a utilização de recursos que proporcionem autonomia aos sistemas de controle de perdas das redes de distribuição. O protocolo de comunicação proposto neste trabalho possibilita tanto a implementação de algoritmos inteligentes quanto o monitoramento efetivo dos ativos da malha de controle, oportunizando a realização de diagnósticos aprofundados dos instrumentos e dispositivos que compõem esta malha.

Em um mercado cada vez mais competitivo, a capacidade de realmente compreender e controlar suas operações é fundamental para o sucesso. É necessário ter acesso a dados precisos atualizados para fazer escolhas consistentes e bem informadas, possibilitando tomar as melhores decisões em tempo real, bem como é preciso poder e segurança para precisamente monitorar e controlar cada aspecto do processo, como equipamentos e recursos utilizados na aplicação.

Após a realização deste estudo, fica mais evidente o grande auxílio e vantagens que um *software* de supervisão bem desenvolvido e uma boa escolha do *software* básico de supervisão traz ao processo como um todo. A utilização do sistema SCADA auxilia o operador a visualizar, controlar e analisar os dados oriundos do processo, possibilitando assim, otimizar a produção através de suas operações, resultado que será apresentado com uma decisão mais bem informada e segura, como também mais rápida, auxiliando e muito na melhoria da produtividade e redução de custos da empresa.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14724*. Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos: Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.
- ABADÍA, R.; ROCAMORA, M. C.; VERA, J. **Energy efficiency in irrigation distribution networks II: Applications**. Biosystems Engineering 111:398–411, 2012.
- ALCANTRA, W. **Estações de bombeamento**. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 8., Florianópolis, p. 107-208, 1988.
- AMIGO, M. R.; OLIVEIRA, C. D. **Otimização do Consumo de energia Elétrica Aplicada ao Controle de Vazão de Bombas Centrífugas Radiais**. Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de energia Elétrica, 2000.
- AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 77 p., 2003.
- AZEVEDO, N. F. **Estimativas de consumo de energia de unidades de bombeamento operando com e sem inversor de frequência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, MG, 2014.
- BERNIER, M. A.; BOURRET, B. **Pumping energy and variable frequency drives**. Ashrae Journal, Atlanta, v. 41, n. 12, p. 37-40, Dec. 1999.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Portaria nº 455**. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial-Inmetro. Brasília, 2010.
- BRIGNOL, W. S. **Economia de energia pela utilização de inversor de frequência em sistemas de bombeamento**. Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de energia Elétrica, 2000.
- BRION, L. M.; MAYS, L. W. **Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems**. Journal of Hydraulic Engineering nº 11, Vol. 117, p.1551 – 1569, 1991.
- BURT, C. M. et al. **Electric motor efficiency under variable frequencies and loads**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v. 134, n. 2, p. 129-136, 2008.
- CAMOIRANO, R.; DELLEPIANE, G. **Variable frequency drives for MSF desalination plant and associated pumping stations**. Desalination, Amsterdam, v. 182, n. 1, p. 53-65, 2005.
- CARVALHO, J. A.; MELLO, C. R.; BRAGA JR., R. A.; REINATO, C. H.; SANTANA, M. J. **Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão**. Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 4, nº 1, p. 51-56, 2000.

- CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação**. Hidráulica e consumo de energia. Lavras: Editora UFLA, 2008.
- CARVALHO, P. C. **Arquiteturas de sistemas de automação industrial – 2ª parte**. In Mecatrônica - Automação Industrial de Processos e Manufatura, p. 48–51, Brasil, 2003.
- CHRISTMAN, K. D. **Methods for rapid estimation of motor input power in HVAC assessments**. Thesis (Phd in Mechanics Engineering), Texas A&M University, Austin, 2010.
- COELHO, M. S.; LOBUE, F. S. **Apostila de Sistemas Digitais de Controle**. São Paulo: SENAI, 2006, p. 10 – 50.
- DIAS, L. P. C.; LOBOSCO, O. S. **Motores Elétricos: Seleção e Aplicação**. Editora McGraw-Hill, 1988.
- DJURDJANOVIC, D. et al. **Web-enabled remote spindle monitoring and prognostics**. In: International Cirp Conference on Reconfigurable Systems, 2., 2003, Ann Arbor. Proceedings... Ann Arbor: IMS, 2003, v.1, p.21-22.
- GARCIA, A. G. P. **Impacto da lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- ILINSKI, N. **Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving**. Energy Engineering n° 5, Vol. 97, p. 7-20, 2000.
- JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. **Optimal Pump Scheduling in Water Supply Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management n° 4, Vol. 118, p. 406-422, 1992.
- LATHI, B. P. **Modern digital and analog communication systems**. 3 ed. New York: Oxford University Press, 1998.
- LIMA, F. S. **Estratégia de Escalonamento de Controladores PID Baseado em Regras Fuzzy para Redes Industriais Foundation Fieldbus Usando Blocos Padrões**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN, 2004.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987, 667 p.
- MAHAR, S.; SINGH, P. R. **Optimal Design of Pumping Mains Considering Pump Characteristics**. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2014.

- MARCHI, A.; SIMPSON, A. R. **Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps.** Journal of Water Resources Planning and Management, Reston, v. 139, n. 4, p. 456-459, 2013.
- MENZ, J. M. B., PAYNE, J. R. **Server in scada application.** In IEEE Transactions on Industry Application, 1997.
- Ministério da Saúde. **Portaria n° 518.** Brasília, 25 de março de 2004.
- MIRABELLA, O.; BRISCHETTO, M.; RAUCEA, A. **A network based virtual lab for motion control applications.** In: *IEEE International Workshop Advanced Motion Control, AMC '8, 10, 2008. Trento. Workshop... Trento: IEEE.* [S.l.: s.n.], 2008. p. 342 –347.
- Modicon Industrial Automation Systems. **Modbus protocol reference guide.** Página Eletrônica, Visitada em Julho de 2018. <http://www.eecs.umich.edu/~modbus>.
- MORADI-JALAL, M.; MARINO, M. A.; AFSHAR, A. **Optimal design and operation of irrigation pumping stations.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v. 129, n. 3, p. 149-154, 2003.
- MORAES, M. J. D. et al. **Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de págua para perímetro irrigado.** Revisa Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 875-882, 2011.
- MORENO, M. A. et al. **Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations.** Biosystems Engineering, London, v. 102, n. 1, p. 95-105, 2009.
- OLIVEIRA FILHO, D.; RIBEIRO, M.C.; MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.A.; FERNANDES, H.C. **Dimensionamento de motores para o bombeamento de água.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1012-1022, 2010.
- OZDEMIR, E.; KARACOR, M. **Mobile phone based scada for industrial automation.** *ISA Transactions, Pittisburgh*, v. 45, n. 1, p. 67 – 75, 2006.
- PARRAGA, A. **Aplicação de transformada wavelet packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- PEREIRA, C. E., JUNIOR, W. O. **A supervisory tool for real-time industrial automation systems.** In 6th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Computing, 2003.
- PEREIRA, P. H. **Sistema automatizado de irrigação por pivô central: uma proposta para melhoria da eficiência energética através do uso de controladores lógicos programáveis**

**em conjunto com inversor de frequência e rede sem fio zigbee.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

**PNCDA – Documento técnico de apoio do programa nacional de combate ao desperdício de água.** Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, 1999.

**PROCEL – Resultados PROCEL ano base 2014.** Eletrobras, Rio de Janeiro, 2015.

**QUISPE, G. C. S. Reconhecimento de padrões em sensores integrados.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

**RIBEIRO, L. C. L. J. Modelo Híbrido para o Estabelecimento de Rotações Ótimas de Bombas de Rotação Variável.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2002.

**ROBERTO, D. S.; SANTOS, F. S. Estudo do acionamento de bombas centrífugas por meio de DVR's e análise de viabilidade técnica e econômica (EVTE) em uma unidade de coqueamento retardado.** Projeto final de graduação, Centro Federal de Educação Tecnológico Celso Suckow da Fonseca, 2014.

**RODRIGUES, W.; LUVIZOTTO JR., E. Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento.** Anais da VII<sup>o</sup> Exposição de experiências Municipais em Saneamento da ASSEMAE, Santo André, SP, 2003.

**SAIDUR, R. A Review on Electrical Motors Energy Use and Energy Savings.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 877-898, 2010.

**SARKAR, T. K.; SU, C. A tutorial on wavelets from electrical engineering perspective: the continuous case.** IEEE Antennas and Propagation Magazine, San Diego, v. 40, n. 6, p.36-37, 1998.

**SILVA, T. I.; SILVA, R. M.; CRUZ, W. L. V. M. Inversor de frequência para condicionadores de ar usados.** In: Jornada de Pesquisa e Extensão, IFMT, Cuiabá, 2013.

**SILVA, J. P. S; CUNHA, E. N. Supervisory system for hydraulic distribution apparatus ScadaBR application.** In: 2017 IEEE First Summer School on Smart Cities (S3C), Natal, 2017.

**SILVA, J. P. S; CUNHA, E. N. Aplicação de um controle PI em uma planta real de abastecimento hídrico,** In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), Porto Alegre, 2017.

**SIMPSON, A. R.; MARCHI, A. Evaluating the approximation of the affinity laws and improving the efficiency estimate for variable speed pumps.** Journal of Hydraulic Engineering, New York, v. 139, n. 12, p. 1314-1317, 2013.

SIRAKI, A. G.; PILLAY, P. **An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies.** IEEE Transactions on Energy Conversion, New York, v. 27, n. 1, p. 85-95, 2012.

TSUTIYA, M. T. **Eficiência hidráulica e energética em saneamento: utilização de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento.** In: Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, 6., João Pessoa, SEREA, 2008.

## APÊNDICE

A seguir, na Tabela 3, serão apresentados os custos gerais de implementação do projeto de automação.

Tabela 3 - Quadro de custos de projeto.

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo unitário (R\$)</b>	<b>Custo total (R\$)</b>
<b>Medidor de vazão</b>	62	7.000,00	434.000,00
<b>Sensor de pressão</b>	68	700,00	47.600,00
<b>Medidor de nível</b>	21	900,00	18.900,00
<b>Medidor de parâmetros elétricos</b>	14	1.100,00	15.400,00
<b>Modem de telemetria</b>	143	900,00	128.700,00
<b>Inversor de frequência</b>	42	15.000,00	630.000,00
<b>Controlador universal</b>	18	450,00	8.100,00
<b>Custo total</b>			<b>1.282.700,00</b>