



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado

**CONTROLE PARA BOMBEAMENTO DISTRIBUÍDO
COM VISTAS À MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS
ENERGÉTICOS APLICADO A SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

por

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

*Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Doutor.*

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

**CONTROLE PARA BOMBEAMENTO DISTRIBUÍDO
COM VISTAS À MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS
ENERGÉTICOS APLICADO A SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Heber Pimetel Gomes

C331c Carvalho, Paulo Sergio Oliveira de.
Controle para bombeamento distribuído com vistas à
minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de
abastecimento de água / Paulo Sergio Oliveira de Carvalho.-
João Pessoa, 2012.
150f. : il.
Orientador: Heber Pimentel Gomes
Tese (Doutorado) – UFPB/CT
1. Engenharia Mecânica. 2. Controle Fuzzy. 3. Eficiência
energética. 4. Eficiência hidráulica. 5. Bombeamento.

UFPB/BC

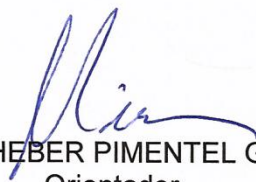
CDU: 621(043)

**CONTROLE PARA BOMBEAMENTO DISTRIBUIDO COM
VISTAS À MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS ENERGÉTICOS
APLICADO A SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

por

PAULO SERGIO OLIVEIRA DE CARVALHO

*Tese aprovada em 20 de junho de 2012
Período letivo 2012.1*



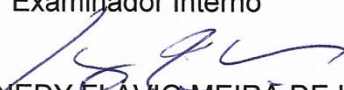
Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador



Prof. Dr. ISAAC SOARES DE FREITAS
Examinador Interno



Prof. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno



Prof. Dr. KENNEDY FLAVIO MEIRÃ DE LUCENA
Examinador Externo



Prof. Dr. TARCISO CABRAL DA SILVA
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Wallace M. Carvalho e
Mariazinha, minha esposa Marluce Acyoman
Carvalho e aos meus filhos Paulo Filho e
Paulo Henrique.*

AGRADECIMENTOS

Ao Criador do Universo pela minha existência, capacidade de aprendizagem/desenvolvimento, pelo dom da fertilidade, que me proporcionou a deixar descendentes.

Ao prof. Heber Pimentel Gomes um agradecimento especial pela orientação nos meus primeiros trabalhos de produção científica; pelos ensinamentos e oportunidades disponibilizadas; bem como pela relação profissional que foi construída e consolidada em sete anos de convivência diária.

Aos Professores Simplício Arnaud, Jacques Santos, Paulo Montenegro, Heber Gomes, Clivaldo Araújo, Bosco Silva, Isaac Freitas, Marcos Cavalcanti, por terem repassado os seus conhecimentos por ocasião da ministração das disciplinas que cursei neste Programa de Pós-Graduação.

Aos Professores Ronildo Alencar e Simplício Arnaud, pelo apoio, sugestões e auxílio na parte prática e teórica desta pesquisa.

A minha esposa Marluce Acyoman Carvalho e a meus filhos Paulo Sergio Filho e Paulo Henrique pelo apoio incondicional, carinho e compreensão em todos os momentos.

Aos meus pais Wallace Carvalho e Mariazinha, minhas avós Lourdes e Odete (*in memoriam*), tia Vanda, Sogros Arnaldo (*in memoriam*) e Eugênia, por terem proporcionado apoio para avançar, desde a minha existência, passando pela minha formação para o meu desenvolvimento como pessoa.

Aos membros da banca examinadora - pelas sugestões apresentadas para o aperfeiçoamento final do presente trabalho.

Aos meus colegas do LENHS UFPB – Moisés M. Salvino, Roberta M. M. Gouveia, Wil L. L. Camboim, Magno J. G. Silva, João S. O. P. Silva, Leonardo L. B. Montenegro e Saulo de Tarso M. Bezerra, pela oportunidade de convivência.

Um agradecimento especial ao amigo Moisés M. Salvino, por ter me auxiliado em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Aos bolsistas do LENHS UFPB – Gennisson Carneiro, Helder Guerra e Thiago Almeida, pelos serviços prestados, dedicação, paciência e convivência.

Ao laboratorista Edilson E. de Souza, que sempre com presteza, competência e bom humor, atendeu a todas as minhas solicitações.

Ao colega Carlos Nobrega, por ter me ajudado a dar os primeiros passos para o aprendizado do software LabVIEW™.

Aos colegas da UFPB - Roberto João Regis, José Anselmo (Zezinho) e Fábio Barroso, por terem me atendido quando precisei construir suportes e adaptadores para a montagem da rede experimental e **Alysson Costa, Flávio Gomes, Átila Pontes e Jairo Inocêncio** por terem tirado várias das minhas dúvidas técnicas de elétrica.

Ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro para construção da parte física e experimental, concedido através das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

À UFPB instituição de ensino superior, por ter me proporcionado praticamente toda a minha formação acadêmica, como também por ter me admitido como servidor dos seus quadros desde 24 de abril de 1985, quando na época era estudante de engenharia.

A todas as pessoas e entidades, que contribuíram para a realização deste trabalho, aqui nominalmente citados, e a todas as outras pessoas que de forma direta ou indireta participaram da minha trajetória de vida, deixo aqui o meu mais profundo agradecimento.

CONTROLE PARA BOMBEAMENTO DISTRIBUÍDO COM VISTAS À MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS ENERGÉTICOS APLICADO A SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

RESUMO

O objetivo nesta pesquisa foi desenvolver um controlador não-linear, utilizando a técnica de controle inteligente *fuzzy*, aplicável a redes pressurizadas de distribuição de água setorizadas, automatizadas e com sistema de bombeamento distribuído, visando minimizar o consumo de energia elétrica. A metodologia empregada foi baseada na realização de diversos ensaios utilizando uma rede experimental instrumentalizada, onde o sistema de controle pode ser testado e avaliado. O sistema experimental possui transdutores de pressão e de vazão, conversores de frequência, válvulas com controle proporcional e ramais de distribuição de água, com topologias diferentes que permitem simular, dinamicamente, diversas situações operacionais da rede de abastecimento, em função da variação da demanda de água ao longo do tempo. O sistema supervisor construído adquire os dados necessários, fornecidos pelos instrumentos de monitoramento da rede. O módulo controlador do sistema supervisor processa os dados, em tempo real, sintonizando de forma criteriosa os instrumentos de controle da rede experimental. Foram realizados inúmeros ensaios com diferentes condições operacionais, visando extrair regras e combinações diversas de controle, para otimizar o equilíbrio das pressões na rede e reduzir o consumo energético. Os resultados obtidos comprovaram que é mais econômico operar a rede com os dois conjuntos de bombeamento, para todas as faixas de consumo estudadas. Além do aspecto econômico, que indicou uma economia de energia da ordem de 12,17%, o controlador proporcionou um melhor desempenho para atingir e equilibrar as pressões da rede com a ação dos dois bombeamentos atuando simultaneamente.

Palavras chaves – controle *fuzzy*, eficiência energética, eficiência hidráulica, bombeamento.

DISTRIBUTED CONTROL FOR PUMPING WITH A VIEW TO MINIMIZING COSTS OF ENERGY APPLIED TO WATER SUPPLY SYSTEMS

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a nonlinear controller, using the technique of fuzzy intelligent control, apply to networks pressurized water distribution sector, automated and distributed pumping system in order to minimize energy consumption. The methodology used was based on the performance of several tests using an instrumented experimental network, where the control system can be tested and evaluated. The experimental system has pressure transducers and flow, variable speed driven, proportional control valves and water distribution lines, with different topologies that allow you to simulate dynamically different situations operational supply network, depending on the variation of demand water over time. The supervisory system built acquires the necessary data, provided by the network monitoring tools. The controller module of the supervisory system processes data in real time, tuning the instruments to carefully control the experimental network. We performed numerous tests with different operating conditions in order to extract rules and various combinations of control, to optimize the balance of pressures on the network and reduce energy consumption. The results obtained proved that it is more economical to operate the network with the two sets of pumping, for all ranges of consumption studied. Besides the economic aspect, which indicated an energy saving of around 12.17%, the controller gave better performance to achieve and balance the pressures of the network with the pumping action of two acting simultaneously.

Keywords – fuzzy control, power efficiency, hydraulics efficiency, pumping.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	3
1.2.1 Consumo Energético	7
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	8
1.3.1 Objetivo Geral.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 O ESTADO DA ARTE PARA O CONTROLE DE SISTEMAS	10
2.2 LÓGICA <i>FUZZY</i>	12
2.2.1 Controle <i>Fuzzy</i>	15
2.2.2 Controladores Baseados em Regras	17
2.3 TRANSIENTES HIDRÁULICOS.....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 INTRODUÇÃO	30
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	30
3.2.1 Conjunto Motobomba	30
3.2.2 Conversor de Frequência.....	32

3.2.3	Válvula de Controle	33
3.2.4	Transdutor de Pressão	34
3.2.5	Transdutor de Vazão	35
3.2.6	Analisador de Energia Elétrica.....	36
3.3	SOFTWARE E HARDWARE PARA AUTOMAÇÃO	37
3.3.1	LabVIEW™	37
3.3.2	Interface de Aquisição de Dados - DAQ.....	37
3.3.3	Diagrama Elétrico	38
3.4	REDE DE ABASTECIMENTO EXPERIMENTAL.....	40
3.4.1	Introdução	40
3.4.2	Componentes da Rede de Abastecimento	42
3.4.3	Operação do Sistema Experimental	48
3.5	SISTEMA SUPERVISÓRIO	49
3.6	SISTEMA DE CONTROLE	55
3.6.1	Escolha do Método de Controle.....	55
3.6.2	Determinação dos Limites Máximos e Mínimos	57
3.6.3	Controlador <i>Fuzzy</i>	61
3.6.4	Estratégia de Controle	66
3.6.5	Módulos de Controle <i>Fuzzy</i>	68
4.	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	76
4.1	CONTROLADOR <i>FUZZY</i> APLICADO NA REDE EXPERIMENTAL.....	76
4.2	ENSAIOS UTILIZANDO O CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	77
4.3	CONFIGURAÇÕES DA REDE PARA ANÁLISE ENERGÉTICA	93
4.3.1	Introdução	93
4.3.2	Válvulas Simuladoras de Consumo	94
4.3.3	Definição da Faixa de Consumo	95
4.3.4	Simulação de Demanda nas Zonas da Rede.....	99

4.4	ENSAIOS ENERGÉTICOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	103
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
5.1	CONCLUSÕES.....	122
5.2	RECOMENDAÇÕES	125
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
	APÊNDICE A (código fonte MATLAB)	131
	APÊNDICE B (código fonte LabVIEWTM do programa supervisor).....	133
	APÊNDICE C (Procedimentos práticos).....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exemplo de um sistema setorizado (TSUTIYA, 2004).....	2
Figura 1.2 - Exemplo de aplicação de um <i>booster</i> (TARDELLI FILHO, 2004)	3
Figura 1.3 - Ações para o controle de perdas reais (TARDELLI FILHO, 2004).....	3
Figura 1.4 - Sistema de abastecimento de água com duas zonas de consumo	5
Figura 1.5 - Sistema de abastecimento de água com VRP	6
Figura 1.6 - Sistema de abastecimento de água com VRP e booster.....	6
Figura 2.1 - Processo qualquer a ser controlado.....	10
Figura 2.2 - Sistema de malha fechada com retroação	11
Figura 2.3 - Relógio de água	11
Figura 2.4 - Conjunto validade: lógica binária x lógica <i>fuzzy</i>	13
Figura 2.5 - Fluxograma da estrutura básica de um controlador <i>fuzzy</i>	16
Figura 2.6 - Estratégias utilizadas para a <i>defuzzyficação</i>	17
Figura 2.7 - Controlador Mamdani.....	19
Figura 2.8 - Representação da evolução de um transiente hidráulico	28
Figura 3.1 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas	31
Figura 3.2 - <i>Booster</i> instalado na rede com entrada e saída em linha	32
Figura 3.3 - Conversores de frequência.....	33
Figura 3.4 - Válvula de controle e esquema de ligação.....	33
Figura 3.5 - Transdutor de pressão, esquema de conversão elétrica e alimentação	34
Figura 3.6 - Transdutor de vazão eletromagnético de PVC	36
Figura 3.7 - Analisador de energia elétrica e diagrama esquemático de instalação	36
Figura 3.8 - Interface (DAQ) da <i>National Instruments</i>	38
Figura 3.9 - Diagrama elétrico dos equipamentos do sistema de controle	39
Figura 3.10 - Foto panorâmica da rede de abastecimento experimental e CCO	41
Figura 3.11 - Fonte 24 V CC	44
Figura 3.12 - Interfaces de aquisição de dados.....	44
Figura 3.13 - Detalhe do <i>bypass</i> realizado para o <i>booster</i> no ramal da zona alta	45
Figura 3.14 - Quadros elétricos e conversores de frequência.....	45

Figura 3.15 - Detalhe do barramento executado com barras de <i>sindal</i> e canaletas.....	46
Figura 3.16 - Notebook utilizado no experimento.....	46
Figura 3.17 - Reservatórios de sucção e de descarga da rede de abastecimento.....	47
Figura 3.18 - Detalhe da fixação das tubulações e visores.....	48
Figura 3.19 - Tela principal da guia “SUPERVISÓRIO” para monitoramento.....	50
Figura 3.20 - Tela da guia “CONTROLE” para configurações.....	53
Figura 3.21 - Gráfico dos limites para as zonas do sistema (CMB+BST).....	59
Figura 3.22 - Gráfico dos limites para as zonas do sistema (CMB).....	60
Figura 3.23 - Gráfico da influência do BST na zona baixa.....	60
Figura 3.24 - Gráfico da influência do BST na zona alta.....	61
Figura 3.25 - Fluxograma do sistema de controle, implementado no supervisório.....	62
Figura 3.26 - Diagrama de fluxo de dados para o cálculo da D _{Erro}	67
Figura 3.27 - Código LabVIEW™ para cálculo da D _{Erro}	67
Figura 3.28 - Entradas e saída do controlador <i>fuzzy</i> do CMB.....	68
Figura 3.29 - Entradas e saída do controlador <i>fuzzy</i> do BST.....	69
Figura 3.30 - Variáveis linguísticas e funções de pertinência do controlador <i>fuzzy</i>	70
Figura 3.31 - Superfície de controle <i>fuzzy</i>	70
Figura 3.32 - Base de regras dos controladores <i>fuzzy</i>	71
Figura 3.33 – Tela do simulador <i>fuzzy</i>	72
Figura 3.34 – Código fonte em LabVIEW do simulador <i>fuzzy</i>	72
Figura 3.35 - Diagrama resumido da implementação da lógica de programação.....	74
Figura 3.36 - Trecho do código LabVIEW™ para os controladores <i>fuzzy</i>	74
Figura 4.1 - Botão iniciar e caixas de controle para ativar CV-1 e BST.....	77
Figura 4.2 - Erro relativo das pressões do Ensaio 1.1.....	78
Figura 4.3 - Variáveis controladas para o Ensaio 1.1.....	78
Figura 4.4 - Variáveis de controle para o Ensaio 1.1.....	79
Figura 4.5 - Erro relativo das pressões do Ensaio 1.2.....	80
Figura 4.6 - Variáveis controladas para o Ensaio 1.2.....	80
Figura 4.7 - Variáveis de controle para o Ensaio 1.2.....	81
Figura 4.8 - Erro relativo das pressões do Ensaio 2.....	82
Figura 4.9 - Variáveis controladas para o Ensaio 2 (distúrbios).....	82
Figura 4.10 - Variáveis de controle para o Ensaio 2 (distúrbios).....	83
Figura 4.11 - Erro relativo das pressões do Ensaio 3.....	84

Figura 4.12 - Tempos de resposta para os <i>set points</i> de pressão atribuídos	84
Figura 4.13 - Variáveis controladas para o Ensaio 3 (<i>set point</i>).....	85
Figura 4.14 - Variáveis de controle para o Ensaio 3 (<i>set point</i>)	85
Figura 4.15 - Erro relativo das pressões do Ensaio 4.1	86
Figura 4.16 - Variáveis controladas para o Ensaio 4.1 (vazão mínima).....	87
Figura 4.17 - Variáveis de controle para o Ensaio 4.1 (vazão mínima)	87
Figura 4.18 - Erro relativo das pressões do Ensaio 4.2	88
Figura 4.19 - Variáveis controladas para o Ensaio 4.2 (vazão mínima).....	88
Figura 4.20 - Variáveis de controle para o Ensaio 4.2 (vazão mínima)	89
Figura 4.21 - Erro relativo das pressões do Ensaio 5.1	90
Figura 4.22 - Variáveis controladas para o Ensaio 5.1 (vazão mínima).....	90
Figura 4.23 - Variáveis de controle para o Ensaio 5.1 (vazão mínima)	91
Figura 4.24 - Erro relativo das pressões do Ensaio 5.2 (vazão mínima).....	92
Figura 4.25 - Variáveis controladas para o Ensaio 5.2 (vazão mínima).....	92
Figura 4.26 - Variáveis de controle para o Ensaio 5.2 (vazão mínima)	93
Figura 4.27 - Detalhe do funcionamento das válvulas proporcionais CV-2 e CV-3.....	95
Figura 4.28 - Limites máximo e mínimo do consumo simulado pelas CVs 2 e 3.....	95
Figura 4.29 - Gráfico (H×Q) para a zona baixa (CMB+BST)	96
Figura 4.30 - Gráfico (H×Q) para a zona alta (CMB+BST)	97
Figura 4.31 - Gráfico (H×Q) para a zona baixa (CMB).....	98
Figura 4.32 - Gráfico (H×Q) para a zona alta (CMB).....	98
Figura 4.33 - Faixas de consumo e ângulos de fechamento das válvulas CV-2 e CV-3...	100
Figura 4.34 - Ensaios realizados para análise energética da rede experimental.....	101
Figura 4.35 - Equipamentos utilizados para realizar os ensaios.....	102
Figura 4.36 - Variáveis controladas do Ensaio 1	104
Figura 4.37 - Variáveis de controle do Ensaio 1	104
Figura 4.38 - Consumo energético do sistema para o Ensaio 1	105
Figura 4.39 - Variáveis controladas para o Ensaio 2.....	106
Figura 4.40 - Consumo energético do sistema de bombeamento para o Ensaio 2	107
Figura 4.41 - Gráfico comparativo Ensaio 1 <i>versus</i> Ensaio 2	108
Figura 4.42 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 1	109
Figura 4.43 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 2	110
Figura 4.44 - Variáveis controladas do Ensaio 3.....	112

Figura 4.45 - Variáveis de controle do Ensaio 3	113
Figura 4.46 - Consumo energético do sistema do Ensaio 3.....	113
Figura 4.47 - Variáveis controladas do Ensaio 4.....	115
Figura 4.48 - Consumo energético do sistema de bombeamento do Ensaio 4	115
Figura 4.49 - Gráfico comparativo do consumo energético do Ensaio 3 <i>versus</i> Ensaio 4	117
Figura 4.50 - Gráfico comparativo do Ensaio 3 <i>versus</i> Ensaio 4 (potências)	117
Figura 4.51 - Gráfico comparativo do Ensaio 1 <i>versus</i> Ensaio 3	119
Figura 4.52 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 3	120
Figura 4.53 - Curva de demanda e cons. energético acum. para o Ensaio 1 (adaptado) ...	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Marcos históricos no desenvolvimento dos sistemas de controle	12
Tabela 3.1 - Faixa de Vazão do Transdutor Eletromagnético (Modelo VMS)	35
Tabela 3.2 - Valores máximos e mínimos para as zonas do sistema (CMB+BST).....	59
Tabela 3.3 - Valores máximos e mínimos para as zonas do sistema (CMB)	59
Tabela 3.4 - Particularidades dos controladores <i>fuzzy</i>	69
Tabela 3.5 – Entradas para teste de valores de saída.....	73
Tabela 4.1 - Valores de vazão e pressão para zona baixa (CMB+BST)	96
Tabela 4.2 - Valores de vazão e pressão para zona alta (CMB+BST)	97
Tabela 4.3 - Valores de vazão e pressão para zona baixa (CMB).....	97
Tabela 4.4 - Valores de vazão e pressão para zona alta (CMB).....	99
Tabela 4.5 - Diferenças das pressões médias observadas nas duas zonas de consumo.....	108
Tabela 4.6 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 1	109
Tabela 4.7 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 2.....	110
Tabela 4.8 - Ensaio 1 <i>versus</i> Ensaio 2 (consumo elétrico e monetário).....	111
Tabela 4.9 - Diferenças das pressões médias observadas nas três faixas de consumo.....	118
Tabela 4.10 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 3	119
Tabela 4.11 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 1 (adaptado).....	120
Tabela 4.12 - Ensaio 1 (adaptado) <i>versus</i> Ensaio 3 (consumo elétrico e monetário).....	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BI-RADS	<i>Breast Imaging Reporting and Data System</i>
BST	Conjunto motobomba auxiliar do sistema de bombeamento (<i>booster</i>)
CE	Indicador – consumo específico de energia elétrica
CF	Conversor de frequência
CF-1	Conversor de frequência do CMB
CF-2	Conversor de frequência do BST
CMB	Conjunto motobomba principal do sistema de bombeamento
CN	Comando numérico
CSV	Extensão de arquivo de dados, com campos separados por ponto e vírgula
CV-1	Válvula de controle proporcional, utilizada pelo sistema de controle
CV-2	Válvula de controle proporcional, simuladora de consumo para a zona baixa
CV-3	Válvula de controle proporcional, simuladora de consumo para a zona alta
DAQ	<i>Data acquisition</i> (interface controle e aquisição de dados)
DErro	Derivada do erro
DN	Diâmetro nominal ou comercial de uma tubulação
EE	Estação elevatória
Erro	Erro registrado entre as pressões instantâneas e a de <i>set point</i> da rede
F1	Fase 1
F2	Fase 2
F3	Fase 3
fc	Extensão do arquivo com as configurações <i>fuzzy</i>
FREQ	Frequência
FT-1	Transdutor de vazão da zona baixa
FT-2	Transdutor de vazão da zona alta
G	Linguagem utilizada para programar no LabVIEW™
GB	Gigabyte (capacidade de memória de armazenamento computacional)
INCREM	Incremento

LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
MIT	Motor de indução trifásico
N	Neutro
NB	Negativo grande, variável linguística
NBOOK	<i>Note book (lap top)</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NM	Negativo médio, variável linguística
PI	Controlador proporcional-integral
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PT-3	Transdutor de pressão da zona baixa
PT-5	Transdutor de pressão da zona alta
PVC	Policloreto de vinila (plástico utilizado na fabricação de tubulações)
QME	Quadro de medição elétrica
RAM	<i>Random Access Memory</i> (memória volátil)
RD-1	Ramal de descarga da zona baixa
RD-1	Ramal de descarga da zona alta
SADA	Sistema automatizado de distribuição de água
SP	<i>Set point</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V CA	<i>Voltage Alternating current</i> (tensão de corrente alternada)
V CC	<i>Voltage Direct current</i> (tensão de corrente direta ou contínua)
VI	<i>Virtual instruments</i> (Instrumentos virtuais), são arquivos do LabVIEW™
VRP	Válvula redutora de pressão
ZA	Zona alta
ZB	Zona baixa

LISTA DE SÍMBOLOS

\circ	Grau de fechamento para as válvulas de controle
ϵ	Pertence
μ	Função de pertinência
μ_{NEG}	Função de pertinência negativa
μ_{POS}	Função de pertinência positiva
$\mu_{\text{TRAPEZOIDAL}}$	Função de pertinência trapezoidal
μ_{ZERO}	Função de pertinência zero
CDA	Critério do centro do máximo para a <i>defuzzyficação</i>
H	Hora
H_{man}	Altura manométrica (carga)
Hz	Hertz (medida de frequência)
K	Múltiplo de mil vezes (X 1.000)
m^3	Metro cúbico
MAX	Critério do máximo para a <i>defuzzyficação</i>
mca	Metro de coluna d'água
MDM	Critério da média dos máximos para a <i>defuzzyficação</i>
\emptyset	Diâmetro
Q	Vazão
s	Segundo
t	Tempo
U	Coleção de objetos
U_{CDA}	Valor da <i>defuzzyficação</i>
V	Volume
W	Watt

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água, no Brasil e no mundo, vem chamando a atenção nos últimos anos, por ser, em muitos casos, a segunda maior despesa das companhias, perdendo apenas para o pagamento de pessoal. Os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2009).

AHONEN *et al.* (2008), afirmam que as bombas utilizadas na indústria europeia, representam 15% do consumo de energia elétrica no setor industrial. Por isso, a importância de efficientizar as unidades de bombeamento estão ganhando notoriedade com o aumento dos custos de energia elétrica.

A ocorrência de um intenso processo de urbanização nas últimas décadas tem exigido dos serviços públicos de abastecimento de água grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro, na tentativa de atender satisfatoriamente às demandas (VENTURINI *et al.* 2001). Isso faz crescer a quantidade de estações de bombeamento para transportar água até os pontos de consumo, resultando em elevadas demandas de energia elétrica provenientes de muitos motores de médio e grande porte em funcionamento.

O controle da pressão nas redes de abastecimento é fundamental para a redução de perdas reais em sistemas urbanos de distribuição de água. A pressão excessiva na rede, além de onerar, desnecessariamente, os custos energéticos de bombeamento, provoca avarias nas tubulações e acessórios, além de provocar uma redução na vida útil de válvulas de controle.

YANG, *et al.* (2010) ratificam que os sistemas de abastecimento convencionais, onde as velocidades das bombas não se alteram, não são capazes de se ajustarem à variação

de consumo dos usuários. Além de não otimizarem o fornecimento de água, ainda são responsáveis pela aplicação um excesso de carga no sistema, provocando desperdício de energia, além de causar danos às redes, canalizações auxiliares e equipamentos nela instalados.

Segundo BEZERRA (2009), para a aplicação de um sistema de controle é condição *sine qua non* que as três ações - setorização do sistema de distribuição de água, instalação de válvulas redutoras de pressão e utilização de bombas com velocidade de rotação variável - ocorram concomitantemente (ver Figura 1.1).

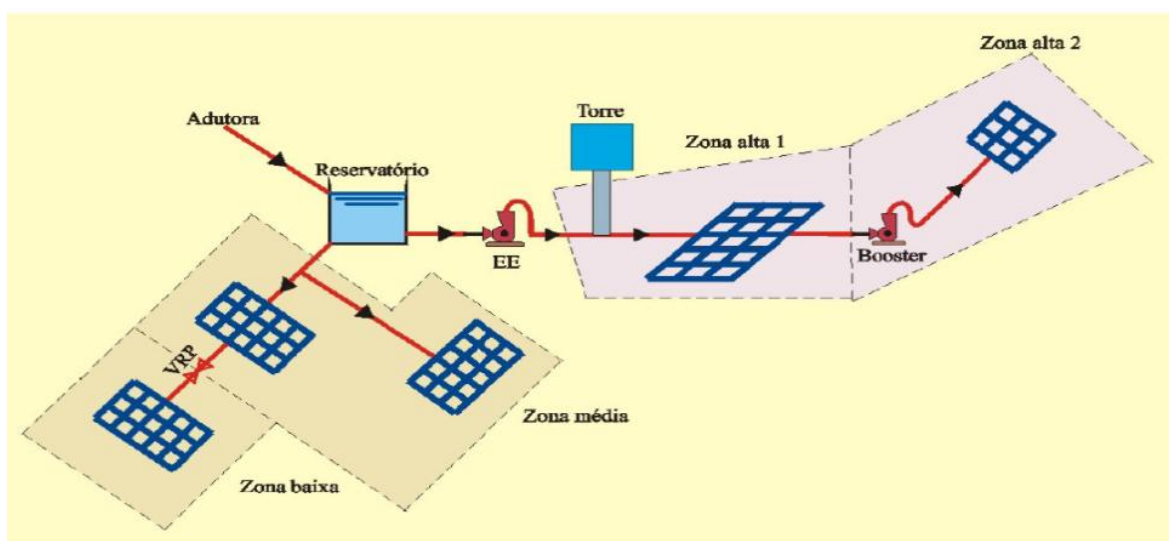


Figura 1.1 - Exemplo de um sistema setorizado (TSUTIYA, 2004)

A Figura 1.2 ilustra a necessidade de instalação de um *booster* para incrementar uma maior pressão para abastecer uma zona alta da rede de abastecimento e no detalhe, o conseqüente aumento da linha piezométrica.

A Figura 1.3 apresenta de uma forma sintética, as quatro principais ações, necessárias para o controle de perdas reais, em sistemas de abastecimento. Portanto, a relação direta que existe entre o controle de pressão na rede com o índice de perdas reais de água, mostra a necessidade de se estudar alternativas tecnicamente e economicamente viáveis, utilizando-se ferramentas de gestão avançadas, associadas a equipamentos que possibilitem o controle efetivo destes sistemas.

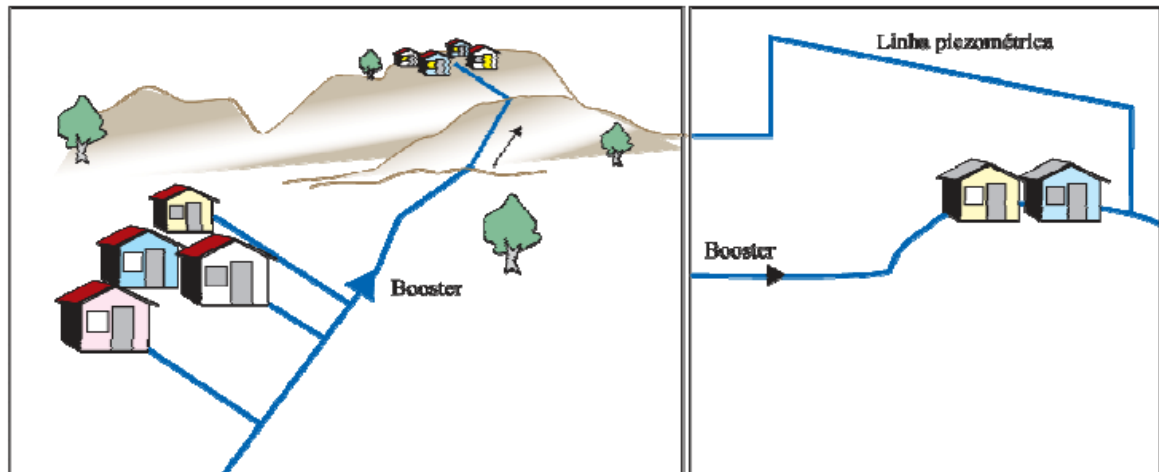


Figura 1.2 - Exemplo de aplicação de um *booster* (TARDELLI FILHO, 2004)

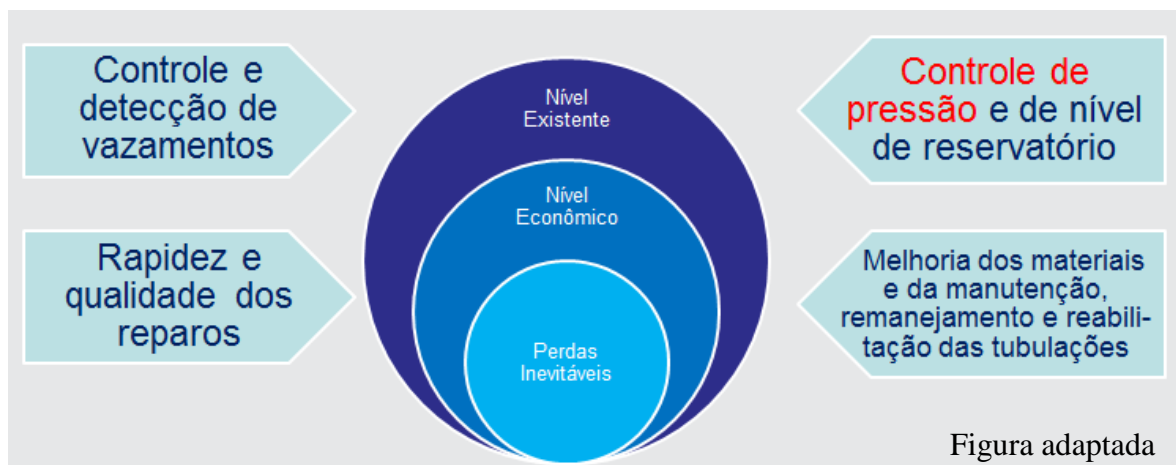


Figura adaptada

Figura 1.3 - Ações para o controle de perdas reais (TARDELLI FILHO, 2004)

1.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O controle e distribuição das pressões num sistema de abastecimento de água é um desafio a ser administrado, pois ele está diretamente relacionado ao consumo de água e energia elétrica. Este controle é fundamental para que os sistemas atuais se tornem mais eficientes e menos onerosos.

Com os avanços tecnológicos atuais disponibilizados, equipamentos tais como: conversores de frequência (aplicáveis na variação da rotação de motores de indução trifásicos) e válvulas de controle (destinadas à regulação da pressão e/ou vazão nas zonas de monitoramento e controle – ZMCs) podem ser utilizados de maneira integrada, nas redes de abastecimento, visando manter as pressões sob controle. O conversor de

frequência, quando acoplado a um sistema de bombeamento, permite variar a velocidade de rotação do conjunto motobomba, que em função da pressão em pontos monitorados no sistema, pode variar a vazão produzida. Desta forma, todas as medidas de pressão nos pontos de consumo da rede, a jusante, serão alteradas.

As válvulas de controle são utilizadas, num sistema de controle, para reduzir a pressão de forma pontual ou setorial na rede. Estas geralmente são instaladas nas entradas dos setores de zonas baixas e médias, onde a pressão normalmente está acima do desejado.

Considerando que nos sistemas de distribuição de água existem variações significativas das pressões ao longo da rede, o controle só poderá atingir níveis ótimos, em termos econômicos, quando conversores de frequência e válvulas de controle são aplicados de forma integrada. Para que conversores e válvulas trabalhem de forma conjunta e adequada, um sistema de controle deverá atuar em tempo real para automatizar o sistema.

O conversor de frequência manterá a altura manométrica nos pontos de consumo, em torno de um valor de pressão mínima admitida (*set point*), enquanto as válvulas, estrategicamente posicionadas, eliminarão o excesso de pressão nas zonas baixas da rede.

Visando minimizar ao máximo o custo energético, devem-se conseguir regulagens no sistema, que permitam reduzir ao máximo a velocidade de rotação dos conjuntos de impulsão, ação que deve prevalecer sobre as perdas de carga necessárias, para regulação das pressões na rede, quando o sistema de controle utiliza as válvulas. Trocando em miúdos, as válvulas deverão trabalhar na maior abertura possível e os conversores na menor frequência de operação necessária.

Em sistemas onde a topografia propicia desníveis geométricos entre os diversos setores da rede, a aplicação de apenas um sistema de impulsão, pode não ser uma boa estratégia no que se refere à minimização dos custos energéticos. Na hipótese da utilização das técnicas de controle da pressão descritas anteriormente, ao invés da utilização de um único conjunto de impulsão, pode ser mais vantajosa a instalação de um sistema de impulsão auxiliar (*booster*) que trabalhará de forma associada ao sistema principal. Com o sistema de impulsão distribuído, espera-se que o sistema tenha mais possibilidades de regulagens, visando à otimização do seu funcionamento, reduzindo significativamente a potência do conjunto de impulsão principal.

Para ilustrar o problema, com base nas indicações descritas anteriormente, foram desenvolvidos três desenhos esquemáticos, para destacar a aplicação de uma válvula redutora de pressão - VRP e um *booster* - BST, como alternativas de funcionamento de

uma rede de abastecimento, originalmente impulsionada por sistema de bombeamento único. As figuras indicam os impactos provocados na rede, relativos à instalação de uma VRP e de uma VRP associada a um BST.

Os desenhos destacam duas zonas de consumo a serem abastecidas, sendo uma alta e outra baixa. A linha piezométrica do sistema é apresentada, destacando a evolução das pressões ao longo da rede, sobretudo nos pontos onde as pressões são modificadas pela instalação dos equipamentos a ela acrescentados.

A Figura 1.4 mostra, esquematicamente, um sistema composto por duas zonas de consumo, uma alta e uma baixa. Neste caso inicial, existe apenas um conjunto motobomba (CMB) abastecendo o sistema que poderá estar localizado a alguns quilômetros de distância do primeiro ponto de abastecimento da rede. Para que a zona alta de consumo seja abastecida, verifica-se a elevada altura manométrica necessária a ser fornecida pelo sistema de impulsão, bem como o excesso de pressão incrementado, desnecessariamente, na zona baixa. As setas indicam o *set point* de pressão desejado.

A Figura 1.5 apresenta uma modificação no comportamento do sistema provocado pela instalação de uma (VRP) que reduz a pressão na zona baixa, porém a altura manométrica continua elevada para atender ao nível de pressão requerido pela zona alta.



Figura 1.4 - Sistema de abastecimento de água com duas zonas de consumo

Na Figura 1.6 são utilizadas as duas estratégias de controle simultaneamente, ou seja, a utilização da (VRP) e do (BST). Observa-se uma redução significativa da altura manométrica do (CMB), uma vez que o sistema de impulsão foi dividido. Além disso, a (VRP) instalada, convenientemente, na zona baixa retira o excesso de pressão

desnecessário, reduzindo a demanda. Esta ação reduz a possibilidade de perdas reais de água por vazamentos. Por outro lado, reduz a indução do consumo, por parte da população da zona abastecida. O (BST) instalado na rede, próximo à zona alta, produz um ganho de pressão extra, capaz de supri-la adequadamente.

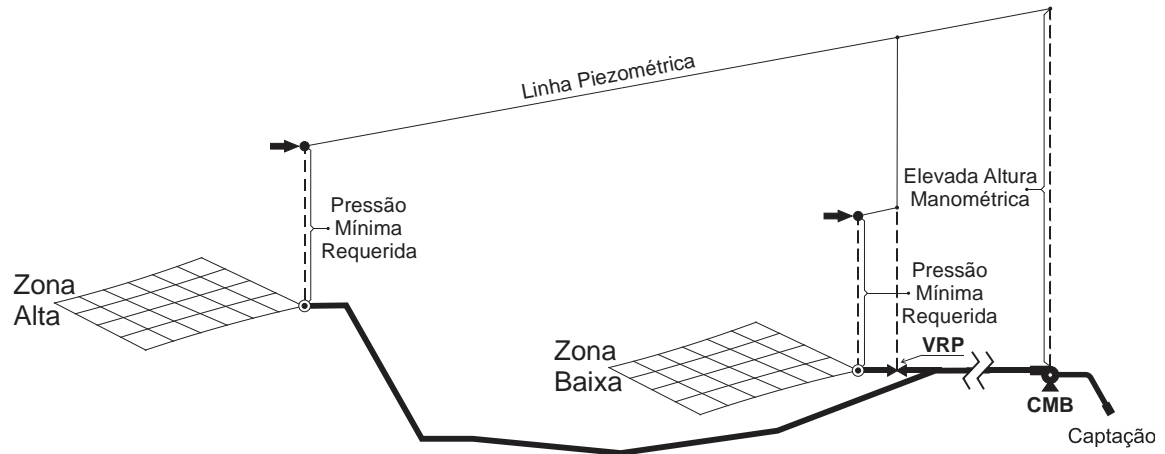


Figura 1.5 - Sistema de abastecimento de água com VRP

Caso os elementos de controle do sistema, CMB, BST e VRP possam ser ajustados à demanda de água, ao longo do tempo, de forma automatizada, a rede poderá fornecer apenas a quantidade de água necessária ao abastecimento. Na prática, o monitoramento da pressão em pontos estratégicos da rede indicam as modificações necessárias nas regulagens a serem realizadas nos instrumentos de controle, visando manter constantes as pressões nas zonas de abastecimento monitoradas, absorvendo as variações naturais da demanda.

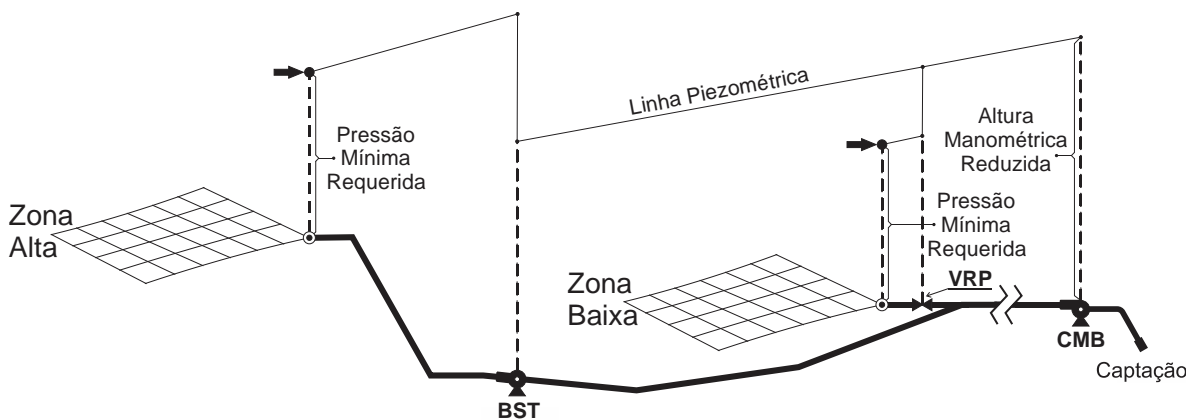


Figura 1.6 - Sistema de abastecimento de água com VRP e booster

Para melhor quantificar e avaliar a aplicação destas estratégias para o controle efetivo das pressões numa rede foi utilizado um sistema de abastecimento automatizado. A rede de distribuição consiste numa planta experimental, com sistema de impulsão distribuído, composta por duas zonas de consumo, com topologias diferenciadas, diversos instrumentos de controle e de monitoramento. A rede foi montada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba - LENHS UFPB.

1.2.1 Consumo Energético

Em sistemas de abastecimento de água, a simples medição do consumo de energia elétrica não é suficiente para a determinação do seu custo/benefício. Como em qualquer sistema produtor, a energia consumida possui uma relação inseparável com os gastos necessários para geração do que se produz. Nos sistemas de abastecimento a produção é de água, e é inversamente proporcional ao consumo energético. Comumente, o transporte de água, em sistemas de abastecimento, é realizado através de tubulações pressurizadas por sistemas de bombeamento. Portanto, não adianta reduzir o consumo de energia se a produção de água também decair na mesma proporção.

A maneira usual para determinação do consumo energético de um sistema se dá através do cálculo do Consumo Específico de Energia Elétrica – CE. Este indicador é definido pela Equação 1.1, como sendo a relação entre o consumo de energia elétrica do sistema de impulsão em kWh e o volume de água produzido pelo sistema em metros cúbicos.

Entretanto, vale salientar que este coeficiente (CE) é inerente a cada sistema. O CE é um indicador capaz de mostrar se uma modificação, em nível de gerência da rotina operacional, na alteração ou inclusão de novos equipamentos da rede, produziu ou não uma melhor relação custo/benefício para o sistema. Face ao exposto, antes de intervir em qualquer sistema de abastecimento é fundamental que seja determinado o seu CE, ficando este valor como referência, para comparações futuras.

$$CE = \frac{P \times t}{V} (kWh/m^3) \quad (1.1)$$

Onde:

P é a potência elétrica do sistema de bombeamento, medida em kW;

t é o tempo de bombeamento em h;

V é o volume de água bombeado em m³.

Apesar do consumo da energia elétrica ser muito variável, dependendo do sistema de abastecimento considerado, TSUTIYA (2001) apresenta um índice médio de referência de 0,6 kWh/m³ de água produzida (bombeada).

Segundo dados do PROCEL ELETROBRAS (2005) em termos econômicos, a energia elétrica representou em média 12,2% das despesas totais das empresas prestadoras de serviço de saneamento, sendo o segundo maior item de dispêndio. Diante desta realidade, sinaliza a necessidade de estudos e análises voltados para proporcionar o aumento na eficiência dos sistemas de saneamento.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa foi desenvolver um controlador não linear, utilizando a técnica de controle inteligente *fuzzy*, aplicável a redes pressurizadas de distribuição de água setorizadas, automatizadas e com sistema de bombeamento distribuído, visando minimizar o consumo de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Construir um sistema de abastecimento automatizado, em escala reduzida, que represente uma dinâmica operacional real.
- ✓ Desenvolver um sistema supervisor baseado na técnica de controle moderno - lógica *fuzzy*, capaz de proporcionar a sintonia automática de todos os elementos de controle, responsáveis pela regulação automática das pressões, nos dois ramais de consumo da rede.

- ✓ Reduzir e controlar as pressões, para gerar subsídios capazes de melhorar a eficiência dos sistemas atuais, minimizando o trinômio: despesas operacionais, gastos com energia elétrica e perdas reais de água.
- ✓ Desenvolver ou extrair regras operacionais genéricas para utilização em sistemas de abastecimento de água.
- ✓ Contribuir para a preservação dos recursos naturais, reduzindo o consumo dos insumos: água e energia elétrica.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ESTADO DA ARTE PARA O CONTROLE DE SISTEMAS

A tecnologia e a ciência avançam e a cada dia mais processos são concebidos e/ou adaptados para funcionarem de forma automática. As novas técnicas desenvolvidas nos centros de pesquisa aplicáveis a maioria dos processos, tem seguido uma nova tendência que visa além da automatização propriamente dita, aperfeiçoar o desempenho dos sistemas, para que estes melhorem significativamente as suas produtividades, minorando ao máximo a utilização de insumos.

Os sistemas de controle fornecem respostas em função da(s) entrada(s). Um sistema de controle básico pode ser representado pela Figura 2.1.



Figura 2.1 - Processo qualquer a ser controlado

Existem duas classificações para sistemas de controle: malha fechada e malha aberta. O de malha fechada (Figura 2.2), também denominada de controle com realimentação, possui um processo de controle cíclico. A cada ciclo, que acontece num dado intervalo de tempo, o valor da saída desejada (*set point*) é comparado com o valor da saída real, cujo valor é obtido através de um dispositivo de medição. A diferença encontrada para mais ou para menos, denomina-se de erro. O erro é utilizado como

referência pelo controlador, que baseado na sua magnitude e direção (sinal), fará as interferências necessárias no processo, de modo a permitir à minimização deste erro, até que ele tenda a zero.

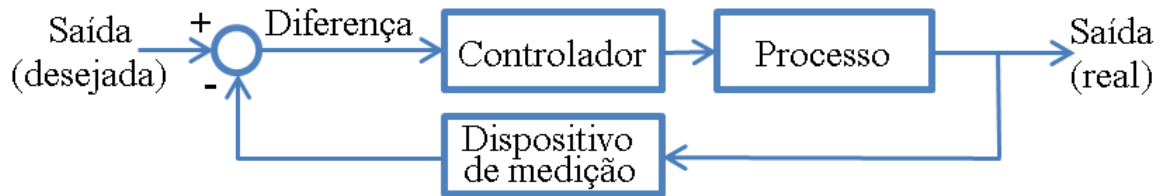


Figura 2.2 - Sistema de malha fechada com retroação

Há registros que as primeiras aplicações de controle com retroação foram utilizadas pelos gregos desde alguns anos antes de Cristo. Um exemplo clássico é o relógio de água (Figura 2.3) em que uma boia fornecia ao sistema um controle com retroação, mantendo a exatidão do relógio. (NEWTON *et al.* 1957, apud DORF e BISHOP 2001).

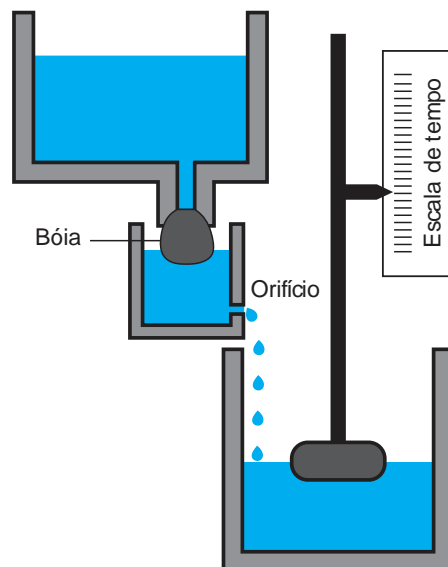


Figura 2.3 - Relógio de água

Para fins de registro, os Marcos Históricos relacionados na Tabela 2.1, apresentam um resumo sucinto da evolução cronológica no Desenvolvimento de Sistemas de Controle.

Tabela 2.1 - Marcos históricos no desenvolvimento dos sistemas de controle

ANO	MARCO HISTÓRICO
1769	Desenvolvimento da máquina a vapor e do regulador de esferas de James Watt.
1800	O conceito de intercambialidade de partes manufaturadas de Eli Whitney foi demonstrado na fabricação de mosquetões (início da produção em massa).
1868	J. C. Maxwell formula um modelo matemático para o controle regulador de uma máquina a vapor.
1913	Introdução da máquina de montagem mecanizada de Henry Ford para a produção automobilística.
1927	H. W. Bode analisa amplificadores com retroação.
1932	H. Nyquist desenvolve um método para analisar a estabilidade de sistemas.
1952	Desenvolvido o comando numérico (CN) no Instituto de Tecnologia de Massachusetts para o controle dos eixos de máquinas ferramentas.
1954	George Devol desenvolve a “transferência programada de itens” considerado o primeiro projeto de robô industrial.
1960	Introduzido o primeiro robô Unimate, baseado nos projetos de Devol. O Unimate foi instalado em 1961 para alimentar máquinas de embutimento.
1970	Desenvolvidos modelos em variáveis de estado e o controle ótimo.
1980	Estudado amplamente o projeto de sistemas de controle robusto.
1990	As empresas orientadas para a exportação de produtos manufaturados enfatizam a automação.
1994	O controle com retroação é usado amplamente nos automóveis. Demanda da manufatura por sistemas robustos, confiáveis.

Fonte: DORF e BISSHOP (2001)

2.2 LÓGICA FUZZY

Pela própria concepção, computadores são rígidos nas suas decisões, pois todas elas são tomadas com base nos binômios: verdadeiro-falso, sim-não ou ligado-desligado, também conhecido como código binário. Um exemplo típico deste tipo de tomada de decisão é o caso da data de validade de um produto alimentício qualquer (Figura 2.4), ou ele está próprio para o consumo ou impróprio. Portanto, utilizando a lógica binária, inexistente uma classificação intermediária. Fica fácil de enxergar que esta abordagem é simplista e não pode ser comparada com a lógica de pensamento do ser humano. Para ilustrar o problema, quando um consumidor verifica que um produto está próximo da sua data de validade dificilmente ele o adquire, apesar do mesmo ainda estar próprio para o consumo.

Considerando a abordagem *fuzzy*, a modelagem desta situação ficaria mais rica em termos de informação para o consumidor, pois haveria uma escala de transição suave, em

relação à classificação rígida de uma única data limite. Na abordagem *fuzzy* também existe o conceito chamado de grau de pertinência, quando este define o quão uma variável pertence a um determinado conjunto, cuja variação se dá no intervalo [0,1].

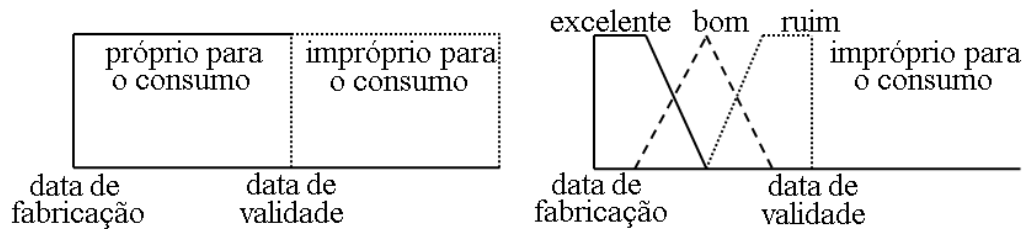


Figura 2.4 - Conjunto validade: lógica binária x lógica *fuzzy*

Portanto, a lógica *fuzzy* se propõe a traduzir a linguagem da comunicação humana, de forma a torná-la compreensível para os computadores.

Os chamados conjuntos *fuzzy*, “conjuntos difusos”, fazem parte do estudo da teoria dos conjuntos, estudados pelo matemático alemão Georg CANTOR (1845-1918), apud JANTZEN (2007). Baseada na teoria de conjuntos difusos, a lógica *fuzzy*, possibilita que o computador processe palavras de uma linguagem natural tais como: pequeno, grande, aproximadamente, igual etc.

De acordo com a teoria de Cantor, um conjunto X é uma coleção de objetos claramente definidos e distinguíveis de nossa intuição podendo ser tratados como um todo. Cada objeto é um elemento de X . Os objetos a serem trabalhados devem ser claramente definidos, de forma que dado um conjunto e um objeto, seja possível determinar se este objeto é ou não um elemento deste conjunto.

Na teoria clássica dos conjuntos, dois conjuntos são iguais, se e somente se, eles possuírem os mesmos elementos. O conjunto que possui nenhum membro é chamado de conjunto vazio e é um subconjunto de qualquer conjunto.

ZADEH (1965) propôs uma caracterização mais ampla, sugerindo que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Desta forma ficou definido que o valor de pertinência poderia assumir qualquer valor entre 0 e 1. O valor zero representa uma completa exclusão, enquanto o valor 1 representa total pertinência.

A teoria de conjuntos *fuzzy*, por definição, é a seguinte: dada uma coleção de objetos U , um conjunto *fuzzy* A em U é definido como sendo um conjunto de pares ordenados.

$$A \equiv \{\langle x, \mu_A(x) \rangle | x \in U\}$$

Onde, $\mu_A(x)$ é chamada função de pertinência (*membership function*), para o conjunto de todos os objetos x em U . O símbolo \equiv , significa “definido como”. A função de pertinência associa a cada elemento um grau de pertinência $\mu_A(x)$, que é um número real no intervalo compreendido entre zero e um $[0,1]$. Na modelagem *fuzzy*, deve-se trabalhar os pares $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, enquanto para conjuntos clássicos a lista de objetos é suficiente, uma vez que sua pertinência é compreendida facilmente. Por isso, o termo *fuzzy* sugere uma zona de fronteira entre pertencer e não pertencer ao conjunto, ao invés de uma fronteira brusca. A definição de conjuntos *fuzzy* estende o conceito de conjuntos clássicos, devido a função de pertinência variar no intervalo compreendido entre $0 \leq x \leq 1$. Quanto maior este valor, maior a pertinência. Um conjunto clássico modelado em *fuzzy* torna-se um caso especial, onde a sua função de pertinência é restrita e expressa como: $\mu \in \{0,1\}$.

Membros de um conjunto *fuzzy* são retirados de um universo. O universo consiste de todos os objetos que podem vir a ser considerados. O Universo depende do contexto.

As funções de pertinência podem ser contínuas ou discretas. Um conjunto *fuzzy* contínuo utiliza uma função de pertinência contínua. Algumas possibilidades de função de pertinência contínua são: trapezoidal, strapezoidal, triangular, gaussiana, sigmoide, entre outras.

As tabelas da verdade para conectivos lógicos *fuzzy*, são definidas sobre um intervalo contínuo. Desta forma, deve-se garantir que qualquer que seja a identidade a ser desenvolvida, possua validade para todos os valores da tabela verdade no intervalo $[0,1]$.

Assumindo o universo de valores da verdade como sendo

$$U = \{0, u, 0.5, v, 1\}$$

E considerando os seguintes limites

$$0 < u < 0.5$$

$$0.5 < v < 1$$

$$v = \neg u$$

Neste caso, tem-se uma lógica de cinco valores. Entretanto, "u" pode assumir qualquer valor desde falso até indefinido, enquanto "v" pode assumir qualquer valor desde indefinido até verdadeiro. Desta forma, todos os valores da verdade serão considerados.

2.2.1 Controle *Fuzzy*

Considerando uma definição simplista: *fuzzy* é um controle com regras. As regras são na forma SE-ENTÃO, com a premissa no lado do SE (antecedente) e a conclusão do lado do ENTÃO (consequente).

SE o erro é Neg e variação do erro é Neg ENTÃO controle é NB

SE o erro é Neg e variação do erro é Zero ENTÃO controle é NM

·
·
·

Em *fuzzy*, o valor da premissa dada por Neg é um termo linguístico, sendo a forma abreviada da palavra Negativo. O valor da conclusão NB indica Negativo Grande e NM indica Negativo Médio. A coleção de regras é chamada de “base de regras”. Melhor dizendo, em *fuzzy* um computador pode executar as regras e definir uma ação de controle, dependendo dos valores medidos para o erro e para a variação deste. Como resultado, essa estratégia de controle é considerada inteligente.

Para modelar um sistema o seu comportamento deverá ser descrito, possibilitando a sua análise e simulação. Equações relacionais ou diferenciais são capazes de descrever a dinâmica ou a cinética de sistemas. Entretanto, descrever um sistema de forma exata através de equações não é uma tarefa fácil, sobretudo os sistemas complexos e com múltiplas variáveis (sistemas não lineares e variantes no tempo). À medida que a complexidade de um sistema aumenta, decresce a possibilidade de descrevê-lo através de equações matemáticas.

Na abordagem que trata a descrição do sistema em forma de regras, como nos sistemas clássicos da inteligência artificial, existe flexibilidade para mudar o sistema com certo grau de facilidade, pois as regras são independentes umas das outras.

A principal característica em controle *fuzzy* é possibilitar a modelagem de ações com base no conhecimento especializado, sem que seja necessário modelar o processo em si. A Figura 2.5 apresenta um fluxograma da estrutura básica de um controlador *fuzzy*.

O módulo de *fuzzyficação* adquire os valores atualizados do sistema através dos sensores (temperatura, pressão, vazão, etc.). Em seguida faz um escalonamento para enquadrar os valores aos universos de discurso normalizados, ato contínuo, *fuzzyfica* os valores, convertendo valores numéricos em conjuntos *fuzzy*, possibilitando que estes se tornem instâncias de variáveis linguísticas.

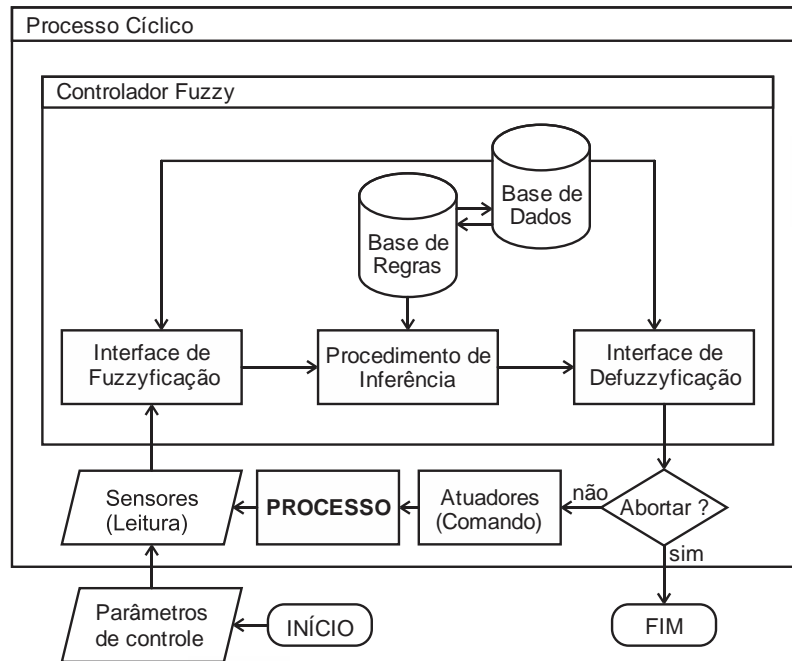


Figura 2.5 - Fluxograma da estrutura básica de um controlador *fuzzy*

A base de regras é formada pelo conhecimento prévio, devidamente estruturado, contemplando as estratégias de controle e suas metas.

A base de dados armazena todas as definições necessárias sobre as discretizações e normalizações dos universos de discurso, as partições *fuzzy* dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência. Durante a inferência os dados *fuzzy* de entrada são processados, concomitante com as regras, inferindo ações de controle *fuzzy*, aplicando o operador de implicação e as regras de inferência.

O módulo de *defuzzyficação* realiza a inversão do processo de *fuzzyficação*, transformando as ações de controle inferidas em ações de controle não-*fuzzy*, para em seguida parametrizar os valores normalizados, para os universos de discurso reais das variáveis. As principais estratégias utilizadas para a *defuzzyficação* são: critério do máximo (MAX), que seleciona o ponto em que a função inferida atinge o seu máximo; a média dos

máximos (MDM), quando existe mais de um máximo e o método do centro de área (CDA), que utiliza o dentro de área da função inferida (ver Figura 2.6).

Além da importância do conhecimento das regras de funcionamento intrínsecas ao algoritmo *fuzzy*, não menos importantes são os parâmetros que serão responsáveis pela sintonização e monitoramento de um controlador desenvolvido em *fuzzy*.

Nos processos, alguns parâmetros podem ser invariáveis, considerando as condições normais de operação, e outros que podem exigir uma alteração de tempos em tempos. Os parâmetros de natureza estrutural são denominados de fixos e os variáveis são os parâmetros de sintonização, responsáveis pelas alterações das condições de operação.

Para exemplificar melhor a teoria até aqui apresentada, será mostrado no próximo tópico um exemplo prático da modelagem de um controlador *fuzzy* que se baseia em regras.

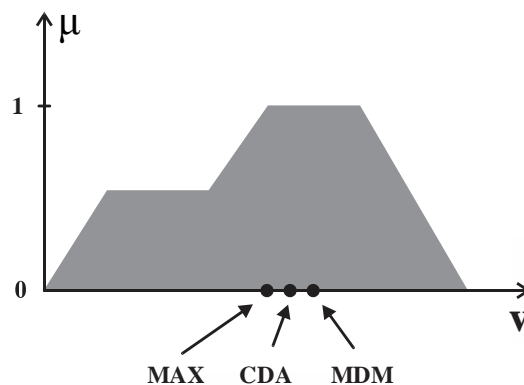


Figura 2.6 - Estratégias utilizadas para a *defuzzificação*

2.2.2 Controladores Baseados em Regras

Os controladores *fuzzy* possuem uma classificação em função de suas características ou do método que utiliza para a tomada de decisão. Considerando que existem muitas possibilidades de implementação *fuzzy* e considerando que existe um vasto material na literatura, apenas o método de Mamdani será tratado e exemplificado neste trabalho, inclusive com o código fonte elaborado utilizando o software MATLAB. Este exemplo foi trabalhado quando o autor cursou a disciplina Controle Inteligente no PPGEM.

MAMDANI (1973) publicou um trabalho onde cada regra do algoritmo *fuzzy* do controlador é uma proposição condicional *fuzzy*, e outras diferentes relações *fuzzy* podem ser derivadas destas.

Exemplo: Inferência de Mamdani

Assumindo o universo da conclusão $u = [-100 \ -50 \ 0 \ 50 \ 100]$

Uma função trapezoidal suave dada por: $\mu_{trapezoidal}(x; a, b, c, d)$

As funções de pertinência são definidas por:

$$\mu_{NEG} = \mu_{trapezoidal}(x; -100, -100, -60, 0)$$

$$\mu_{ZERO} = \mu_{trapezoidal}(x; -90, -200, 20, 90)$$

$$\mu_{POS} = \mu_{trapezoidal}(x; -100, 0, 60, 100)$$

Inserindo o universo u em x nas funções de pertinência, o conjunto de termos da conclusão é representado por três vetores, que são os valores de pertinência para cada um dos cinco pontos do universo da conclusão tem-se:

$$NEG = [1 \ 0.93 \ 0.05 \ 0 \ 0]$$

$$ZERO = [0 \ 0.61 \ 1 \ 0.61 \ 0]$$

$$POS = [0 \ 0 \ 0.05 \ 0.93 \ 1]$$

Atribuindo $erro = -50$, a unidade é o valor percentual de toda a faixa.

O conjunto de termos da conclusão é organizado numa matriz, onde cada linha representa o conjunto de termos da conclusão. Considerando que o valor -50 corresponde à segunda coluna da matriz e que nenhum valor da linha poderá ser superior aos valores desta coluna, resultará na segunda matriz.

$$Termos = \begin{pmatrix} 1 & 0.93 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0.61 & 1 & 0.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.93 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow Mandani = \begin{pmatrix} 0.93 & 0.93 & 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0.61 & 0.61 & 0.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Como resultado, o vetor acumulado (máximo) resultante será formado pelos maiores valores verificado em cada coluna da segunda matriz. Assim:

$$Acumulado = (0.93 \quad 0.93 \quad 0.61 \quad 0.61 \quad 0)$$

Finalmente, utiliza-se o método de *defuzzyficação* CDA, para obtenção do sinal de controle *defuzzyficado*.

$$U_{CDA} = \frac{\sum_i \mu_c(x_i)(x_i)}{\sum_i \mu_c(x_i)}$$

$$U_{CDA} = \frac{0.93(-100) + 0.93(-50) + 0.61(0) + 0.61(50) + 0(100)}{0.93 + 0.93 + 0.61 + 0.61 + 0} = -35.3896$$

Após o processamento do código MATLAB, obteve-se a Figura 2.7 que apresenta graficamente todas as variantes do controlador Mamdani, para o exemplo. O código fonte completo do programa pode ser consultado no Apêndice A.

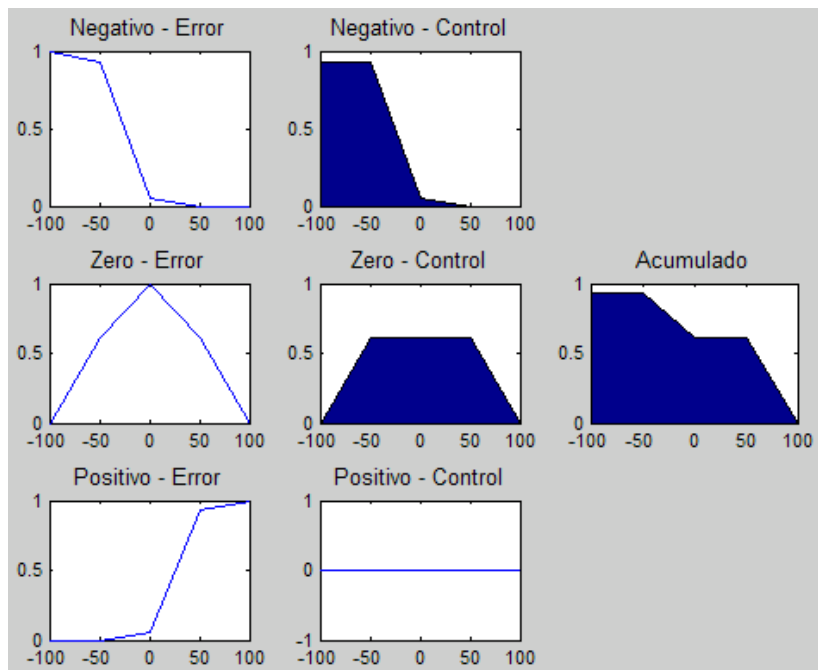


Figura 2.7 - Controlador Mamdani

Técnicas de controle inteligente, sobretudo a lógica *fuzzy*, vêm sendo aplicadas nos últimos dez anos em várias áreas do conhecimento. Estas técnicas tiveram um desenvolvimento bastante significativo quando a tecnologia de processamento se tornou mais eficiente e acessível. Na indústria, a grande maioria dos sistemas é de natureza não linear. Por possuírem esta característica, representá-los matematicamente é uma tarefa de altíssima complexidade.

A robótica e a automação de sistemas foram impulsionadas, também, pela grande quantidade de pesquisas utilizando técnicas de controle moderno que através da aplicação de métodos heurísticos e estocásticos tem conseguido excelentes resultados, em termos de controle, diferentemente das técnicas clássicas, que se adequam a sistemas lineares, os quais são modelados a partir de modelos matemáticos.

A pesquisa mencionada a seguir mostra a aplicabilidade de técnicas de controle moderno em aplicações práticas diversificadas publicadas na literatura mundial.

LUNA FILHO *et al.* (2002) através do estudo de sistemas não lineares, tendo como exemplo um tanque com escoamento turbulento em sua saída, realizaram uma comparação entre técnicas de controle: *fuzzy* e PI¹. O sistema construído para o controle de nível de líquido possuía os seguintes componentes: bomba hidráulica, atuador; sensor de nível; tanques; computador e controlador implementado através de software. Eles concluíram que para sistemas com plantas comprovadamente não lineares, o controlador *fuzzy* mostrou-se adequado.

RUFINO (2003) desenvolveu um robô inteligente com visão digital. O robô tinha a capacidade de localizar objetos numa superfície plana, através de uma *webcam*, e movimentar um braço até ele e, utilizando uma garra, apanhar o objeto e transportá-lo até outra posição, largando-o em seguida. A modelagem aplicada analisava a imagem em tempo real utilizando um sistema inteligente, baseado em lógica *fuzzy*, capaz de determinar a posição do objeto sobre um plano. O sistema robótico mostrou-se confiável, apresentando os resultados esperados.

MACHADO (2003) elaborou um sistema inteligente para gerenciamento de cargas elétricas de edifícios (SIGE). O sistema desenvolvido era composto por um computador mestre e diversos escravos, interligados numa rede de computadores. Os

¹ PI é uma técnica de controle, aplicável a sistemas lineares, denominada de Proporcional-Integral.

dispositivos escravos utilizados foram microcomputadores padrões, denominados de módulos inteligentes. O sistema desenvolvido foi capaz de controlar diversos equipamentos domésticos e iluminação, visando à economia de energia elétrica.

Os sistemas *fuzzy* são amplamente empregados em acionamentos de velocidade variável, particularmente em máquinas de indução (LIAW e WANG, 1991). IVANQUI (2005) desenvolveu um sistema *fuzzy* para controlar a velocidade de rotação de uma esteira ergométrica através de conversores de frequência, com a finalidade de minimizar os riscos da atividade cardíaca do usuário, permitindo ainda maximizar os benefícios que a atividade física poderia proporcionar ao usuário deste equipamento. Os resultados obtidos foram satisfatórios.

YATIM e UTOMO (2005) desenvolveram um sistema neuro-*fuzzy* para o controle de velocidade de rotação de compressores acionados por motores de indução. As simulações e resultados experimentais demonstraram que o método proposto diminui o consumo de energia elétrica em relação ao controle escalar (tensão/frequência), para velocidades de rotação inferiores a cerca de 60% da velocidade de rotação nominal e para o sistema experimental estudado.

MARIANO (2005) estudou a viabilidade da aplicação de um controle do tipo adaptativo, aplicado a um eixo posicionador de mesa de máquina-ferramenta. Ele concluiu através dos resultados obtidos experimentalmente, aliados aos resultados de simulação computacional, a potencialidade da aplicação desse tipo de controlador para seguir trajetórias comuns nas situações reais de operação.

SANTOS (2005) apresentou um projeto de implementação de um protótipo de um sistema robótico móvel inteligente. Uma câmera digital, acoplada ao robô, capturava a imagem do ambiente do espaço de trabalho e as enviava a um computador remoto. O sistema inteligente no computador, usando regras *fuzzy*, analisava a imagem recebida e determinava a região de interesse no espaço de trabalho do robô. Ele conseguiu aperfeiçoar o sistema robótico, através dos experimentos realizados. Após ajustes no processo para execução das tarefas, ele conseguiu um bom funcionamento do sistema.

EL-BAROUDY e SIMONOVIC (2006) aplicaram a lógica *fuzzy* para avaliar medidas em sistemas de abastecimento de água complexos, considerando como critérios de decisão a confiabilidade-vulnerabilidade, a robustez e a resiliência. O estudo mostrou a capacidade do desempenho da lógica fuzzy para lidar com incertezas e identificar os componentes críticos do sistema.

CASTRO (2006) propôs técnicas de análise e projeto aplicáveis a controladores robustos descentralizados de pequena ordem, voltadas para sistemas multivariáveis no domínio da frequência, visando amortecer os modos de oscilação em sistemas elétricos de potência com múltiplas unidades, tendendo à estabilização robusta do sistema. As técnicas frequenciais multivariáveis propostas, mostraram-se ideais para projetar controladores robustos, comumente utilizados no controle da excitação de ferradores de energia elétrica.

LIMA (2007) apresentou um sistema de controle *fuzzy* que mantém o potencial matricial da água no solo na faixa do tensiômetro de campo em níveis compatíveis com os requisitos de irrigação, por meio de dotações hídricas variáveis de acordo com a velocidade de um conjunto motobomba. Ele projetou e desenvolveu três modelos distintos e chegou à conclusão de que este tipo de controle proporciona um maior desenvolvimento para as culturas, racionaliza o consumo de água e energia, e reduz custos operacionais.

GOMES *et al.* (2007) publicaram um livro intitulado “Abastecimento de Água – O estado da arte e técnicas avançadas”. A publicação evidencia o grande avanço que a área de distribuição pressurizada de água, sobretudo às relativas ao abastecimento urbano, teve nos últimos vinte anos, através de um desenvolvimento acentuado, oriundo do avanço tecnológico na área da informática e de novos equipamentos.

O organizador no prefácio do livro afirma que apesar dos princípios físicos da hidráulica clássica voltados para condutos forçados permanecer inalterado, é evidente que houve avanços significativos nas metodologias de dimensionamento, análise e operação de sistemas de distribuição já existentes; as técnicas de reabilitação de sistemas obsoletos com base em novos modelos de otimização; além dos processos de automação e controle, com o emprego de técnicas de controle inteligente, tais como: lógica *fuzzy* e redes neurais.

AHONEN *et al.* (2008) realizaram um estudo para aplicação de conversores de frequência (VSD – *Variable speed driven*) em bombas utilizadas em aplicações industriais. Os autores classificaram os conversores como sendo um dispositivo de monitoramento inteligente, para a unidade de bombeamento, pois proporciona novas possibilidades para o pessoal de manutenção e operação, além de permitirem partidas e paradas suaves dos motores.

ARAÚJO *et al.* (2008) aplicaram técnicas de inteligência artificial visando eficiência energética e estimação de parâmetros em sistemas motrizes industriais (bomba centrífuga, ventilador centrífugo e correia transportadora) a partir de dados levantados no laboratório de LAMOTRIZ-UFMS. As contribuições do trabalho foram a determinação de

parâmetros reais adequados ao desenvolvimento de software e hardware para o controle automático de sistemas motrizes e para a tomada de decisão. Foram desenvolvidos dois modelos: (a) baseado em redes neurais artificiais, para estimação de parâmetros e grandezas mecânicas, e (b) uma análise de estratégias baseadas em lógica *fuzzy* visando aumentar a eficiência energética do processo industrial. O estudo concluiu que o modelo, além de propiciar a simulação de diversas situações encontradas na indústria, apresentou-se como sendo uma ferramenta viável na modelagem de sistemas motrizes.

CAMPOS e SILVA (2008) publicaram um artigo onde apresentaram um projeto para apoio à tomada de decisões, utilizando lógica *fuzzy* como forma de determinar os melhores preços de venda dos produtos de um supermercado. Eles concluíram que as respostas geradas pelo protótipo desenvolvido foram satisfatórias, comprovando que a tomada de decisão, baseando-se em ambiguidades e incertezas, pode ser apoiada pela lógica *fuzzy*.

MENDONÇA (2008) aplicou a técnica de controle *fuzzy* na absorção de vibrações em estruturas apertadas. O objetivo do seu trabalho foi representar um sistema de controle híbrido, para controlar a vibração em qualquer plano vertical de flexão. Utilizou para testes um protótipo de um edifício de dois pavimentos em escala reduzida. Ele concluiu que a técnica de controle utilizada se mostrou adequada para reduzir a vibração na estrutura.

XAVIER FILHO (2008) projetou um controlador *fuzzy* para o posicionamento de uma mesa de um eixo. O trabalho foi dividido em duas partes. Na primeira foram realizadas simulações com a função de pertinência obtida no processo de identificação do sistema, utilizando o toolbox do MATLAB IDENT.; na segunda parte o controlador *fuzzy* foi utilizado para posicionar a mesa, em tempo real. Os resultados obtidos nas simulações foram equivalentes aos dos ensaios experimentais realizados.

CAMBOIM (2008), na sua pesquisa, controlou a pressão de uma rede de distribuição de água através da aplicação de técnicas de controle *fuzzy*. A rede de abastecimento montada em laboratório possuía dois pontos de consumo e era composta por: um motor de indução trifásico, dotado de um conversor de frequência variável, válvulas de controle e transdutores de pressão. Ele concluiu que, com a aplicação do controlador, obteve uma redução de 27,4% no consumo de energia sem comprometer as características hidráulicas do sistema.

AHONEN *et al.* (2009) aplicaram a uma rede de teste em anel, um modelo matemático para um sistema de bombeamento de água com CLP – Controlador Lógico Programável e um controle de frequência construído na ferramenta SIMULINK do software MATLAB. Eles concluíram que nas análises experimentais utilizando as características dinâmicas do sistema experimental de bombeamento de água simuladas no SIMULINK, quando comparadas com a rede de teste experimental dotada de CLP e conversor de frequência, foram muitos semelhantes.

MIRANDA *et al.* (2009) apresentaram um método para avaliação e classificação de nódulos de mama que utiliza a lógica *fuzzy* no processo de inferência da categoria BI-RADS² relativa à avaliação. Segundo eles existe um “hiato semântico” entre os diagnósticos auxiliados por computador e os produzidos pelos radiologistas. Essa divergência deve-se principalmente às dificuldades encontradas pelos sistemas computacionais em representar e simular o raciocínio e o estilo adotado pelo radiologista no processo de análise da imagem. Eles concluíram, através da realização de uma análise comparativa entre diagnósticos gerados pelos radiologistas e pela saída automática gerada pelo sistema desenvolvido, que houve um aumento na precisão, reduzindo o “hiato semântico” existente, resultante da aplicação de lógicas computacionais convencionais.

WENHAI (2009) desenvolveu uma aplicação em LabVIEWTM, para instrumentalização da operação de uma bomba utilizada em uma mina. Ele desenvolveu um software de teste virtual, que substituiu todos os medidores utilizados em testes convencionais. Com isso puderam ser adquiridos, de forma simultânea, todos os dados para serem processados no computador, melhorando a precisão e a eficiência do teste. Um parâmetro importante e que pode descrever o estado de operação da bomba é a carga hidráulica. Caso a carga hidráulica satisfaça a uma determinada classificação, considera-se que a bomba opera normalmente. Sendo assim, um sensor ultrassônico foi utilizado para medir a variação da carga hidráulica como forma de monitoramento.

BEZERRA (2009) desenvolveu, modelou e aplicou um sistema *fuzzy*, desenvolvido no ambiente LabVIEWTM, para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversor de frequência acoplado a um conjunto motobomba, visando à economia de água e energia

² BI-RADS (*Breast Imaging Reporting and Data System*) é um modelo adotado pelo Colégio Americano de Radiologia para normatizar os relatórios mamográficos.

elétrica. O estudo apresentou resultados bastante satisfatórios, no que se refere à redução do consumo de água e energia elétrica.

CARVALHO (2009) modelou e controlou, em tempo real, utilizando controle adaptativo, um robô manipulador de dois graus de liberdade planar, constituído de um elo rotacional e outro prismático. Ele obteve o seu modelo matemático através da utilização do método dos mínimos quadrados recursivo (MQR). Foram apresentados resultados de simulações dos modelos estimados, confrontados com as respostas do sistema que comprovam o bom desempenho no processo de estimativa dos parâmetros da planta, levando a conclusão de que os controladores adaptativos implementados apresentaram um desempenho satisfatório.

KHATCHATOURIAN e TRETER (2010) desenvolveram uma metodologia baseada em lógica *fuzzy* para classificação e avaliação de desempenho econômico-financeiro das cooperativas de produção. A aplicação do modelo desenvolvido foi na análise da dinâmica e desempenho de duas cooperativas de produção (Coopermil e Cotricampo) no período de 05 (cinco) anos. Eles concluíram que as avaliações realizadas pelas simulações numéricas para análise de influência de vários indicadores sobre o desempenho de uma cooperativa de produção e as avaliações periciais realizadas mostraram uma boa correlação.

WU-QUAN *et al.* (2010) desenvolveram uma automação, com a utilização de conversores de frequência, para sistemas de irrigação com tubulação pressurizada através de bombas eletromecânicas. Quando a área a ser irrigada é grande, ou o gradiente de desnível de campo é elevado, a exigência da uniformidade de irrigação em todo o campo pode não ser satisfeita, quando o bombeamento for constante. Com a utilização de um sistema de pressão, que identifica automaticamente as necessidades de irrigação de cada subárea, tornando-as uniformes. O modelo proposto proporcionou economia de água e energia elétrica. Este é mais um exemplo da aplicabilidade de conversores de frequência, no controle do bombeamento de sistemas hidráulicos.

JÚLIO (2010) aplicou um controlador *fuzzy* a um sistema de controle de posição acionado por motores de indução trifásicos. O sistema utilizado para aplicar o controle foi uma mesa de coordenadas x-y com dois graus de liberdade. Sinais de referência do tipo degrau, senoidal e cossenoidal foram aplicados para avaliar o desempenho do sistema, no controle de posição e acompanhamento de trajetória. Ela concluiu, baseada nos resultados

obtidos, que a modelagem dos controladores desenvolvidos apoiados na lógica *fuzzy* foi bastante eficaz para posicionar o sistema.

JAIN *et al.* (2010) realizaram um trabalho voltado para o projeto de controladores *fuzzy* para sintonia automática de sistemas não lineares. Eles afirmam que projetar controladores para sistemas não lineares não é uma tarefa trivial. A dificuldade aumenta no caso de sistemas que possuem multi entradas e saídas. A obtenção da melhoria no desempenho do sistema foi obtida através da minimização do erro. Os resultados experimentais conseguidos demonstraram a eficiência do controle.

NÓBREGA SOBRINHO (2011) desenvolveu e aplicou um controlador neural a um sistema posicionador acionado por motores de indução trifásicos, alimentados por conversores de frequência, para comandar uma mesa de coordenadas X-Y com dois graus de liberdade. Ele utilizou o ambiente de programação LabVIEW™ para programar os controladores neurais. Para avaliar o desempenho do sistema, foram utilizados sinais de referência do tipo degrau e acompanhamento de trajetória.

RAJU *et al.* (2011) apresentam nos seus estudos a versatilidade da utilização do LabVIEW™ para o desenvolvimento de aplicações voltadas ao controle automático de processos. Eles utilizaram o LabVIEW™ para simular e testar um Módulo de configuração de satélite de dados (SCM – *Satellite data Configuration Module*) para ser operado sem qualquer interferência humana. Eles concluíram que, com a realização dos testes de forma automatizada, os erros humanos foram eliminados. Além disso, o tempo consumido para a realização dos testes foi drasticamente reduzido.

Para conhecer e aprender a utilizar as funcionalidades do LabVIEW™ foi consultada a ajuda do próprio programa, além da consulta a três livros, relacionados a seguir, que tiveram uma fundamental importância no desenvolvimento da programação, sobretudo no entendimento da aplicação das funcionalidades mais avançadas. A maior dificuldade desta etapa foi sem sombra de dúvidas o processo referente à aquisição de dados.

CRUZ e FIGUEROA (2010) publicaram o livro intitulado *Intelligent Control Systems with LabVIEW™*. Trata-se de uma publicação recente, de nível avançado, que aborda a modelagem das técnicas inteligentes de controle mais utilizadas na atualidade, a saber: lógica *fuzzy*, redes neurais, *neuro-fuzzy*, algoritmo genético e controle preditivo. Os capítulos são bem estruturados e possuem diagramas de blocos na forma de exemplos descritos passo a passo.

TRAVIS e KRING (2006) conseguiram elaborar um verdadeiro compêndio sobre a utilização do LabVIEW™. Ele possui uma vasta galeria de exemplos bastante didáticos facilitando a assimilação. Este livro é recomendado para quem deseja iniciar o processo de aprendizagem e se aprofundar no programa, mas também existem vários capítulos dedicados a abordagens avançadas.

KEHTARNAVAZ e KIM (2005) publicaram um livro voltado para o processamento digital de sinais utilizando o LabVIEW™. A linguagem é acessível, incluindo bons exemplos. A publicação possui um CD contendo os exercícios e projetos do livro.

2.3 TRANSIENTES HIDRÁULICOS

Em sistemas de escoamento de fluidos, sejam eles em canais abertos ou em tubulações pressurizadas, surgem muitas vezes transientes ou transitórios hidráulicos, que dependendo da sua intensidade podem ser danosos ao sistema. Estes fenômenos momentâneos são oriundos de alterações no fluxo, provocados pelo fechamento ou abertura de válvulas ou de comportas, partida ou parada de bombas. Estas ações mudam a dinâmica do escoamento, causando variações de pressões e de velocidades em frequências tais que, entrando em ressonância com a frequência natural do sistema, provocam: sobrepressões com possível ruptura da tubulação e conexões, e depressões com possível colapso da tubulação, entrada de ar na rede e cavitação.

Segundo ALMEIDA e KOELLE (1982) o transiente hidráulico pode ser definido como sendo a “situação de escoamento existente entre duas condições extremas (inicial e final) de regime permanente”. A evolução do transiente, entre dois regimes permanentes, um que se inicia e outro final, que é a situação desejada. Após a aplicação de uma manobra na rede ocorrerá o transiente até que passado algum tempo esse efeito seja absorvido ou dissipado.

Em sistemas de abastecimento de água os transitórios hidráulicos são uma preocupação constante dos profissionais em nível de projeto e na operação das redes por parte das companhias de abastecimento. A estabilidade e a confiabilidade dos sistemas estão diretamente ligadas a estas questões. O golpe de ariete deve ser evitado e/ou atenuado ao máximo, para que seus efeitos não danifiquem as tubulações e/ou acessórios

da rede. A limitação da velocidade nos encanamentos é uma medida eficaz para reduzir os efeitos deste fenômeno.

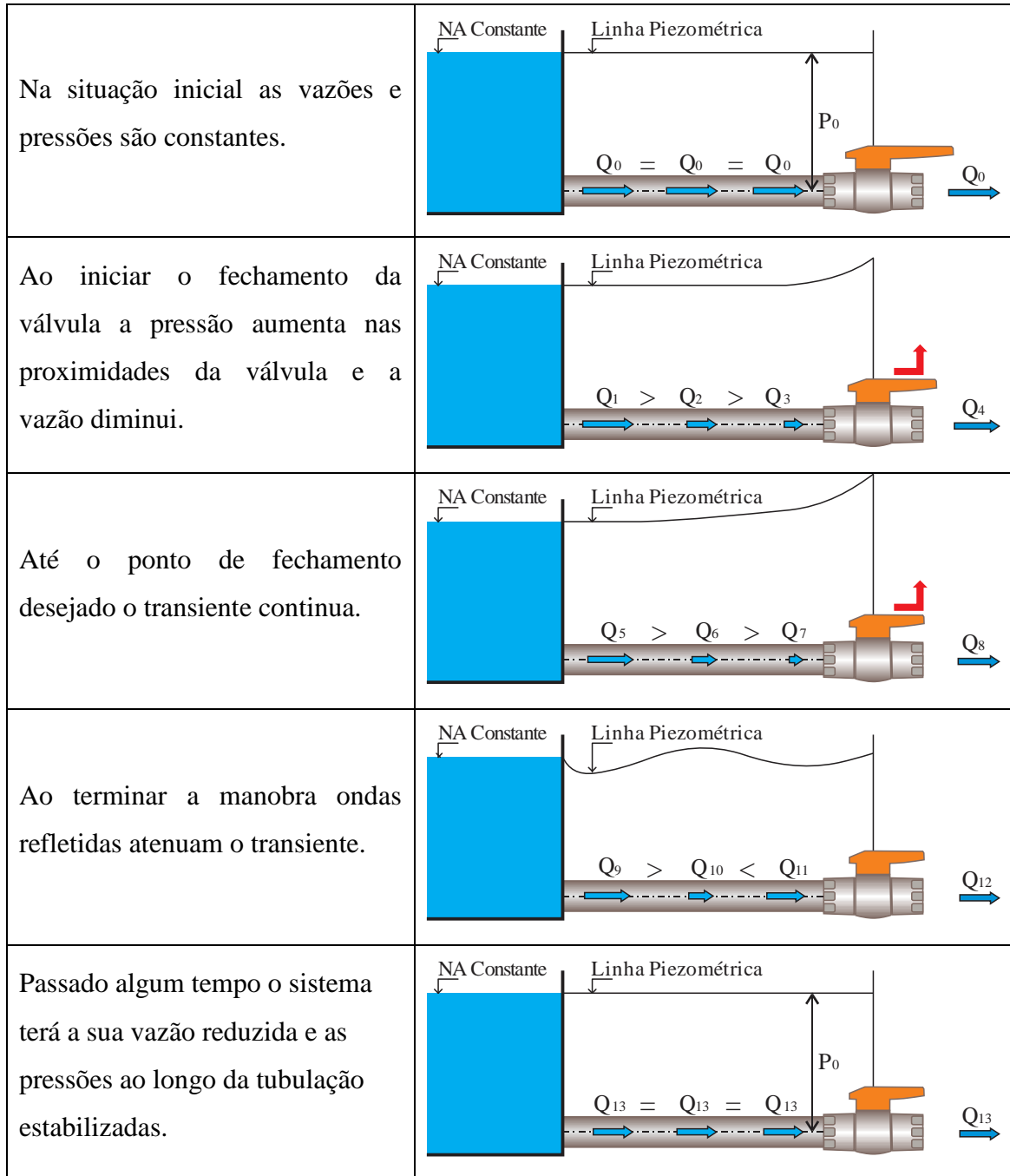


Figura 2.8 - Representação da evolução de um transiente hidráulico

Para uma melhor visualização da evolução de um transiente foi elaborado o seguinte exemplo: considerar um sistema formado por um reservatório de nível fixo, que possui um conduto de saída (considerando o mesmo sem perdas), onde na sua extremidade

existe instalada uma válvula. Na situação inicial a vazão (Q_0) e a pressão (P_0) são constantes. A Figura 2.8 mostra o passo a passo dos efeitos do transiente hidráulico, na pressão e na vazão do sistema, para um fechamento parcial da válvula.

Em sistemas de abastecimento automatizados os efeitos dos transientes hidráulicos provocam medições oscilatórias nos instrumentos de monitoramento, podendo retirar o sistema da estabilidade, uma vez que os elementos de controle serão sintonizados com base em informações distorcidas. A utilização de conversores de frequência e válvulas automáticas de fechamento lento são exemplos de equipamentos que podem mitigar os efeitos dos transientes hidráulicos numa rede automatizada.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

O controle das pressões numa rede de abastecimento automatizada pode ser configurado mediante a utilização de um software de gerenciamento dos equipamentos instalados na rede, responsáveis pelo seu monitoramento e controle, regulando a quantidade de água a ser bombeada e a pressão a ser mantida, de acordo com a demanda corrente.

A seguir são descritos todos os elementos que constituem a rede de abastecimento experimental desenvolvida, incluindo os elementos de controle e de monitoramento utilizados e software. Os procedimentos complementares, necessários à aplicabilidade do sistema supervisor e de controle que foi objeto de desenvolvimento desta pesquisa estão relacionados no Apêndice C.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 Conjunto Motobomba

A bomba centrífuga é um equipamento comumente utilizado para impulsionar líquidos nos sistemas de abastecimento. A bomba centrífuga funciona da seguinte maneira: uma fonte externa à bomba, geralmente um motor elétrico de indução trifásico, que gira um ou mais rotores dentro do corpo da bomba, movimentando o líquido e criando a força centrífuga que se transforma em energia de pressão e cinética. A velocidade de rotação é caracterizada pela velocidade que a máquina de acionamento imprime à bomba. No caso

do motor elétrico, essa velocidade é função direta da frequência e do número de polos do motor.

O ponto de trabalho de um sistema de bombeamento é definido por suas curvas características. São estas curvas matemáticas que descrevem a relação entre as variáveis: altura manométrica e vazão de bombeamento. Na Figura 3.1 é apresentado um gráfico $H \times Q$, onde a curva da bomba descreve a altura manométrica para diferentes valores de vazão, mantendo-se a rotação da bomba constante. A curva do sistema representa a altura manométrica solicitada pelo sistema de tubulações, em função da vazão para que a água seja conduzida do ponto de sucção ao final da linha de recalque, que pode ser, por exemplo, um reservatório.

Sobre a curva do sistema, destaca-se que a altura manométrica que é composta pela soma de duas componentes: altura estática e altura dinâmica. A altura estática refere-se à diferença de cota entre o ponto de sucção e de recalque, sendo, portanto, uma altura geométrica. No caso da altura dinâmica, essa é composta pelo somatório das perdas de carga das tubulações e acessórios, tendo uma variação relacionada com o quadrado da vazão bombeada.

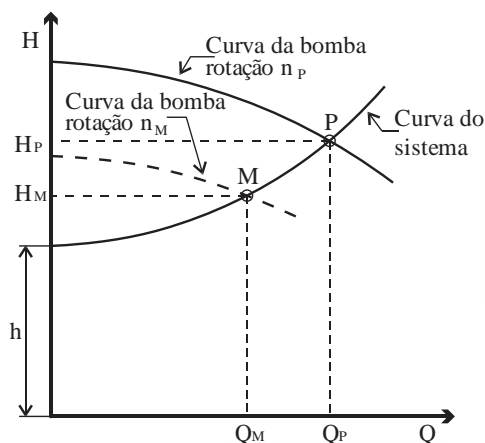


Figura 3.1 - Determinação do ponto de trabalho de bombas hidráulicas

Com a instalação de um *booster* (ver Figura 3.2) numa rede de abastecimento pode-se acrescentar pressão extra em setores deficitários da rede. No Sistema Automatizado de Distribuição de Água - SADA, a introdução na rede de um sistema de impulsão auxiliar para a zona alta consiste na instalação de um conjunto motobomba, em série, devidamente dimensionado para este fim, sendo este o responsável direto pelo fornecimento de uma carga extra (pressão) para a zona alta.



Figura 3.2 - *Booster* instalado na rede com entrada e saída em linha

Como a demanda de consumo, numa rede de abastecimento, varia ao longo do tempo, é de suma importância que este sistema de impulsão (*booster*) funcione apenas na proporção necessária. O sistema ideal seria, portanto, aquele em que o *booster* funciona de acordo com a curva da demanda de água.

3.2.2 Conversor de Frequência

Os conversores de frequência (Figura 3.3) são equipamentos elétricos que, quando acoplados aos conjuntos motobomba, possibilitam variar a velocidade de rotação destes, modificando a vazão e a pressão a jusante. A utilização de conversores de frequência possibilita ajustar o funcionamento dos conjuntos motobomba, de acordo com a demanda de água exigida para a rede de abastecimento, mantendo as pressões sob controle nas diversas zonas de consumo, reduzindo, desta forma, os custos energéticos de bombeamento.

Os conversores devem ser dimensionados de acordo com a potência do motor que se quer comandar. Eles podem operar localmente, através da sua IHM (interface homem-máquina) disponibilizada no próprio aparelho ou remotamente, através de uma porta analógica de entrada disponibilizada (normalmente de 0 a 10 V), que pode ser energizada, dentro da sua faixa de tensão admissível, por um CLP ou por uma interface de controle e aquisição de dados – DAQ, para variar a velocidade de rotação de um motor elétrico.

Para configurar corretamente o equipamento, o usuário deverá consultar o seu manual para preencher as opções corretas com as especificidades do motor que o

equipamento irá comandar. As informações obrigatórias podem ser obtidas na placa de identificação do motor.



Figura 3.3 - Conversores de frequência

3.2.3 Válvula de Controle

Também conhecidas com a denominação de válvulas proporcionais são registros com abertura/fechamento regulável, acionadas por um motor elétrico com tensão de alimentação normalmente de 24 V (ver Figura 3.4). O ângulo de abertura destas válvulas varia na faixa de 0° a 90°. A maioria dos modelos pode ser configurada através de uma chave (no corpo de comando) para assumir a condição de normalmente aberta ou fechada (iniciar em 0° ou 90°), quando o sinal de comando emitir 2 V (dois Volts) de tensão. Neste tipo de válvula é importante optar por modelos que também informem o seu posicionamento de abertura. A Figura 3.4 mostra um diagrama esquemático de ligação típico para este tipo de equipamento:

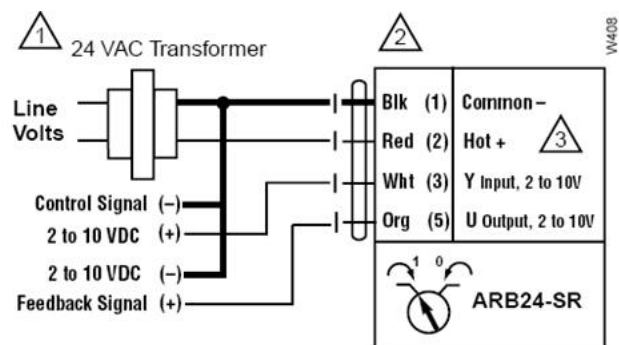


Figura 3.4 - Válvula de controle e esquema de ligação

Para que este tipo de equipamento funcione, deverão ser utilizadas uma porta analógica de saída e outra de entrada da interface de aquisição de dados. Neste caso, deverão ser realizadas duas parametrizações: a primeira para que o usuário informe a posição desejada em graus, para este valor ser convertido em tensão para a válvula, na segunda, quando a válvula informar a sua posição em tensão, ocorrendo transformação inversa, ou seja, de tensão para ângulo de rotação.

3.2.4 Transdutor de Pressão

É um equipamento capaz de medir a pressão efetiva num ponto da rede convertendo e transmitindo este valor na forma de sinal elétrico. Normalmente ele é dotado com sensores do tipo piezo-resistivo de silício (célula de carga), alimentado por uma tensão de alimentação de 24 V e com sinal de saída variando de 4 a 20 mA, para representar as pressões registradas de acordo com o fundo de escala do equipamento. Para transdutores concebidos originalmente para transmitir o sinal elétrico na forma de corrente, como é o caso dos utilizados no experimento, além da parametrização, será necessário realizar a conversão da corrente em tensão, em nível de hardware, pois as interfaces de aquisição de dados da *National Instruments* utilizadas só trabalham com tensão. Para realizar esta conversão, basta instalar um resistor de 500 Ω entre os terminais de uma porta de entrada analógica qualquer (Porta AI X) da interface (DAQ), conforme esquema apresentado na Figura 3.5.

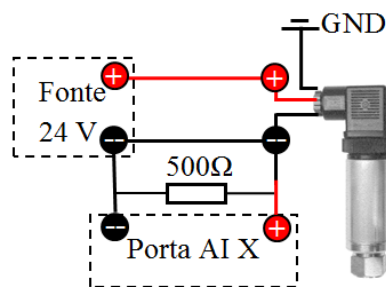


Figura 3.5 - Transdutor de pressão, esquema de conversão elétrica e alimentação

Para garantir a confiabilidade nas medições oriundas dos equipamentos, já que houve a transformação da corrente em tensão, foi realizada uma calibração em todos os transdutores de pressão utilizados no experimento (Ver procedimento no Apêndice C).

A calibração consiste na determinação dos limites de tensão superior e inferior do equipamento, correspondentes ao seu fundo de escala. No cálculo teórico, como o fundo de escala dos equipamentos utilizados possui faixa de medição entre 0 e 40 mca, e a faixa de tensão correspondente aos limites inferior e superior, 2 e 10 Volts, respectivamente, era esperado que o equipamento informasse 2 Volts para a indicação de pressão de 0 mca e de 10 Volts quando o nível de pressão medido atingisse 40 mca. Na prática isso não foi verificado, porém os valores ficaram próximos aos teóricos.

3.2.5 Transdutor de Vazão

É um equipamento que mede a vazão e a transmite, na forma de sinal elétrico, para um sistema de aquisição de dados. Os transdutores, do tipo eletromagnético, cujo princípio de funcionamento é baseado na Lei de Faraday, são os mais indicados. Eles provocam uma perda de carga equivalente a de um tubo liso. Existem muitos modelos no mercado, inclusive de PVC (ver Figura 3.6).

A tensão de alimentação destes equipamentos é de 24 V, energizados de forma contínua e independente do sinal de medição, que varia na faixa compreendida entre 4-20 mA (assim como foi feito para o transdutor de pressão se fez necessário instalar um resistor de 500 Ω para transformar o sinal elétrico na forma de corrente para tensão na faixa entre 2 e 10 V).

Para realizar a parametrização do equipamento o manual do fabricante deverá ser consultado para verificar o seu fundo de escala (Tabela 3.1), bem como as conexões elétricas de alimentação e comando.

Tabela 3.1 - Faixa de Vazão do Transdutor Eletromagnético (Modelo VMS)

Modelo básico	Diâmetro nominal		Faixa de medição	
	mm	polegadas	litros/min	m ³ /h
VMS 012	12	1/2"	2,0 a 67,8	0,12 a 4,07
VMS 019	19	3/4"	5,17 a 170	0,31 a 10,2
VMS 025	25	1"	8,83 a 293	0,53 a 17,6
VMS 038	38	1 1/2"	20,7 a 680	1,24 a 40,8
VMS 050	50	2"	35,7 a 1176	2,14 a 70,6



Figura 3.6 - Transdutor de vazão eletromagnético de PVC

3.2.6 Analisador de Energia Elétrica

É um equipamento portátil destinado à medição e monitoramento das grandezas elétricas, tais como: correntes, tensões, potência, fator de potência e distorção harmônica (medições em valor eficaz - TRUE RMS para tensões V_{123} e correntes I_{123}). Este equipamento foi utilizado para avaliar o consumo energético do sistema de bombeamento da rede de abastecimento experimental, por meio do parâmetro potência, expresso em kW. Como o sistema é trifásico, todas as tensões e correntes, de cada fase, deverão ser monitoradas pelo aparelho (ver Figura 3.7).

O equipamento utilizado possui memória interna de 512 Kb (permite 17.000 gravações para sistema trifásico de 4 fios) para acumular os dados adquiridos. O tempo mínimo entre as aquisições foi de 2 s (dois segundos). O equipamento contém um software que permite a transferência dos dados gravados para o microcomputador, através de um cabo adaptador USB (*Universal Serial Bus*). No software, fornecido pelo fabricante, existe a possibilidade de exportação dos dados para o formato (CSV), compatível com softwares gerenciadores de planilha eletrônica.

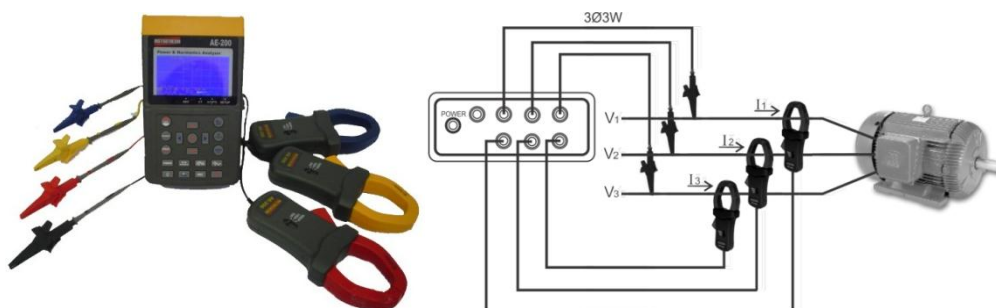


Figura 3.7 - Analisador de energia elétrica e diagrama esquemático de instalação

3.3 SOFTWARE E HARDWARE PARA AUTOMAÇÃO

3.3.1 LabVIEW™

O programa computacional utilizado para o desenvolvimento do Sistema Supervisório de controle e aquisição de dados, para a rede de abastecimento foi o LabVIEW™ (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*). Ele utiliza uma linguagem de programação predominantemente visual desenvolvida pela *National Instruments* (NI), conhecida por Linguagem G. O LabVIEW™ possui uma mecânica de programação que difere das linguagens sequenciais usuais, pois incorpora um compilador gráfico aperfeiçoado para maximizar o desempenho do sistema, ao invés de utilizar as tradicionais linhas de código. O fato de ser totalmente compatível com as interfaces (DAQ), também produzidas pela (NI), facilita a compatibilidade para processar e armazenar os dados adquiridos. Os programas criados utilizando LabVIEW™ são chamados de instrumentos virtuais (VIs), porque emulam a aparência e operacionalidade de equipamentos reais.

3.3.2 Interface de Aquisição de Dados - DAQ

Este tipo de equipamento tem função análoga a de um CLP (Controlador Lógico Programável). A interface de aquisição de dados é responsável pela captura das informações de todos os elementos de leitura e de escrita do sistema. É através dessa interface, situada entre os equipamentos e o computador, que possibilita receber as informações atualizadas do sistema, processá-las em nível computacional e alterar os equipamentos de comando do sistema de abastecimento, de modo que sejam obedecidas todas as estratégias de configurações pré-estabelecidas.

O Sistema de Aquisição de Dados é composto, basicamente, por um microcomputador com hardware atualizado e sistema operacional Windows 7. A interface *Data Acquisition* (DAQ) da Figura 3.8 contém entradas/saídas analógicas (tensões entre -10 e 10 V) e entradas/saídas digitais (tensões de 0 ou 5 V).

As interfaces contêm conexão USB e alimentação elétrica 110 ou 220 V (alguns modelos são energizados apenas pela USB). Para serem reconhecidas pelo computador, basta instalar o programa de gerenciamento e drives (NI *Device Monitor*) no sistema

operacional Windows que o LabVIEW™ conseguirá acessar todos os recursos de aquisição e controle, através da utilização de todas as suas portas de forma transparente.



Figura 3.8 - Interface (DAQ) da *National Instruments*

3.3.3 Diagrama Elétrico

Para automatizar a rede de abastecimento experimental, foi necessário instalar equipamentos específicos para o seu monitoramento e controle. A Figura 3.9 mostra um diagrama elétrico, onde são apresentados todos os equipamentos envolvidos no processo de controle.

A tensão de alimentação elétrica dos conversores de frequência, que operam os motores do sistema de bombeamento é trifásica 380 V. Entre a rede de alimentação 380 V e entre os conversores e os motores existem quadros de medição elétrica. Os quadros são equipados com disjuntores e providos de locais apropriados, para que equipamentos de medição elétrica possam ser conectados através de garras (tipo jacaré) de forma segura.

A interface DAQ e a fonte 24 V CC são alimentadas eletricamente pela rede elétrica monofásica de 220 V CA.

Os equipamentos de monitoramento (PT-3, PT-5, FT-1 e FT-2) são alimentados eletricamente pela fonte 24 V CC os quais transmitem as informações elétricas necessárias para a interpretação de suas leituras, para a interface DAQ através de uma porta de entrada analógica.

O equipamento de controle (CV-1) é alimentado eletricamente pela fonte 24 V CC. Além da conexão com uma porta de saída da interface DAQ, responsável pelo envio de um sinal elétrico de comando para a válvula, existe outra conexão numa porta de entrada analógica. Esta conexão representa o sinal de tensão enviado pela válvula à interface DAQ, referente ao seu posicionamento.

Os outros equipamentos de controle (CF-BST e CF-CMB) são conectados a portas de saída analógica da interface DAQ, responsáveis pelo envio de um sinal elétrico de comando.

A interface DAQ é o elo entre os equipamentos de monitoramento e de controle da rede de abastecimento e o microcomputador, onde é executado o software do supervisor. A interface DAQ comunica-se com o microcomputador através de um cabo USB (*Universal Serial Bus*).

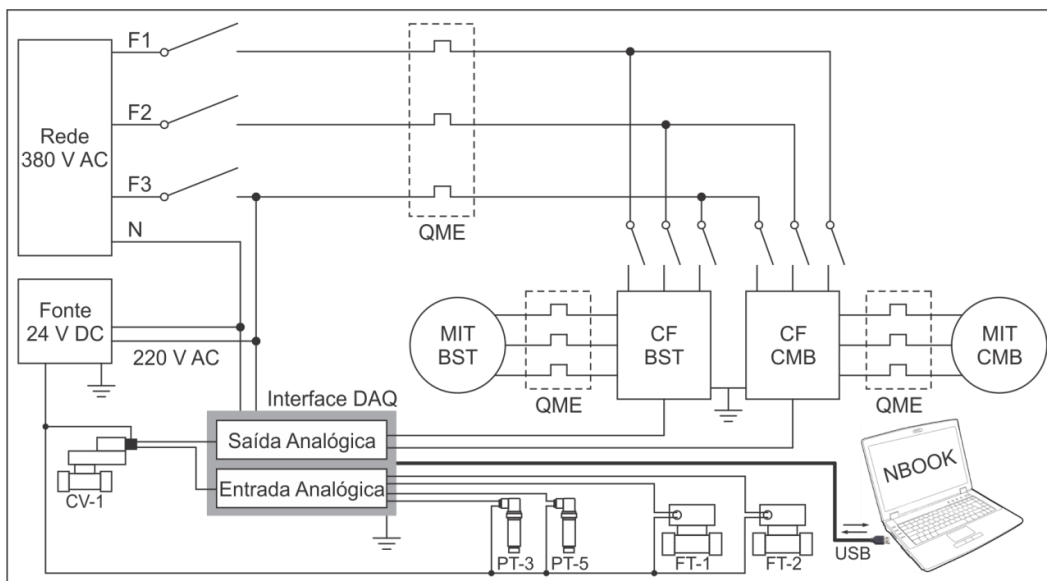


Figura 3.9 - Diagrama elétrico dos equipamentos do sistema de controle

O significado das siglas utilizadas na Figura 3.9 são os seguintes:

01. QME – Quadro de medição elétrica.
02. CV-1 – Válvula de controle proporcional.
03. PT-3 – Transdutor de pressão da zona baixa.
04. PT-5 – Transdutor de pressão da zona alta.
05. FT-1 – Transdutor de vazão da zona baixa.
06. FT-2 – Transdutor de vazão da zona alta.
07. DAQ - *Data Acquisition* (aquisição de dados).
08. USB - *Universal Serial Bus* (porta serial universal).
09. NBOOK – Notebook.
10. F1 – Fase 1.
11. F2 – Fase 2.
12. F3 – Fase 3.

13. N – Neutro.
14. CC – Corrente contínua.
15. CA – Corrente alternada.
16. MIT – Motor de indução trifásico.
17. CF – Conversor de frequência.
18. BST – Booster (conjunto motobomba auxiliar).
19. CMB – Conjunto motobomba principal.

3.4 REDE DE ABASTECIMENTO EXPERIMENTAL

3.4.1 Introdução

O controle da pressão, num sistema de distribuição de água, é um desafio a ser administrado, pois ele está diretamente relacionado ao consumo de água e energia elétrica. Este controle é fundamental para que os sistemas atuais se tornem mais eficientes e menos onerosos. Com os avanços tecnológicos, disponibilizados nos dias de hoje, equipamentos tais como conversores de frequência e válvulas de controle são utilizados para regular, em tempo real, o fornecimento da vazão necessária visando atingir e manter as pressões de referência (*set point*) para a rede de abastecimento.

O conversor de frequência, acoplado a um sistema de bombeamento, propicia a variação na velocidade de rotação do conjunto motobomba que, em função da pressão em determinados pontos do sistema, pode funcionar em velocidades de rotações menores ou maiores. Desta forma, todas as medidas de pressão nos pontos de consumo da rede a jusante serão alteradas.

As válvulas de controle são utilizadas para reduzir a pressão de forma pontual. Estas geralmente são instaladas nas entradas de setores de zonas baixas e médias, onde a pressão ficaria muito acima do desejado, em determinados horários.

Considerando que nos sistemas de distribuição de água existem variações significativas da pressão ao longo da rede, o controle só poderá atingir níveis ótimos, em termos econômicos, quando conversores de frequência e válvulas de controle são aplicados de forma associada e integrada. Para que conversores e válvulas trabalhem de forma conjunta e adequada, um sistema de controle deverá atuar em tempo real para gerenciar o sistema de distribuição de água.



Figura 3.10 - Foto panorâmica da rede de abastecimento experimental e CCO

Os conversores de frequência manterão a altura manométrica adequada nos pontos de consumo, em torno de um valor de pressão estabelecido (*set point*), enquanto as válvulas, estrategicamente posicionadas, eliminarão o excesso de pressão em regiões da rede de abastecimento, visando minimizar ao máximo o custo energético. A velocidade de rotação sempre deverá prevalecer sobre as perdas de carga necessárias, provocadas pelas válvulas.

Segundo estudos realizados pelo autor desta pesquisa e publicado em artigo técnico (CARVALHO *et. al.*, 2011) em sistemas de abastecimento, onde a topografia propicia desníveis geométricos entre os diversos setores da rede, a aplicação de apenas um sistema de impulsão, para atender a todas as zonas da rede, normalmente, é menos econômico, se comparado ao de uma impulsão distribuída. Dependendo do ponto de operação pode ser mais vantajosa à utilização de um sistema de impulsão auxiliar (booster) que trabalhará de forma associada ao sistema principal.

O sistema de controle (software supervisor) desenvolvido no software LabVIEW™, utilizando lógica *fuzzy*, para regular e manter estáveis as pressões em sistemas de abastecimento de água, com sistema de impulsão distribuído, foi aplicado no Sistema Automatizado de Distribuição de Água Experimental – SADA³ (ver foto da Figura 3.10), que foi construído no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS UFPB.

Para dar suporte ao SADA, também foi edificado um Centro de Controle Operacional – CCO, exclusivo para o experimento.

3.4.2 Componentes da Rede de Abastecimento

O Sistema Automatizado de Distribuição de Água – SADA é composto por vários itens, conforme relação a seguir:

01. Conversor de frequência do conjunto motobomba principal (CMB).
02. Conversor de frequência do conjunto motobomba auxiliar “*booster*” (BST).
03. Conjunto motobomba principal (CMB), com motor de indução trifásico, 220/380 V de 3 cv.

³ Responsável pelo projeto e execução do SADA: Paulo Sergio Oliveira de Carvalho (autor da Tese)

04. Conjunto motobomba auxiliar “*booster*” (CMB), com motor de indução trifásico, 220/380 V de 1,5 cv.
05. Registro de gaveta, para induzir uma determinada perda de carga, simulando uma distância virtual, entre os conjuntos motobomba do sistema.
06. Válvula de controle proporcional (CV-1), para retirar o excesso de pressão da zona baixa (ZB) de consumo.
07. Transdutor de pressão (PT-3) para monitoramento das pressões da zona baixa (ZB).
08. Transdutor de vazão (FT-1) para monitoramento das vazões da zona baixa (ZB).
09. Válvula de controle proporcional (CV-2), para simular o consumo da zona baixa (ZB).
10. Local de descarga da zona alta (ZA).
11. Local de descarga da zona baixa (ZB).
12. Válvula de controle proporcional (CV-3), para simular o consumo da zona alta (ZA).
13. Transdutor de vazão (FT-2) para monitoramento das vazões da zona baixa (ZA).
14. Válvula de retenção, para evitar realimentação do (BST) pelo *bypass*.
15. Transdutor de pressão (PT-5) para monitoramento das pressões da zona alta (ZA).
16. Reservatório circular de descarga para as zonas de abastecimento, em fibra de vidro, com capacidade de 310 litros.
17. Reservatório circular de sucção para alimentação da rede, em fibra de vidro, com capacidade de 310 litros.

A planta experimental projetada (Figura 3.10) possui dois pontos de consumo representados pelos ramais de descarga RD-1 (zona baixa) e RD-2 (zona alta). Para prover a impulsão do sistema foram instalados um conjunto motobomba (CMB) de 2 cv e um *booster* (BST) de 1,5 cv. Para monitoramento do sistema foram instalados dois transdutores de pressão (PT-3 e PT-5) e dois transdutores de vazão (FT-1 e FT-2). Para comandar o sistema foram instaladas: uma válvula de controle (CV-1), duas válvulas de controle – simuladoras de consumo (CV-2 e CV-3) e dois conversores de frequência, responsáveis pelo controle da velocidade de rotação dos conjuntos de impulsão do sistema.

Dada à magnitude do experimento e dos equipamentos envolvidos, foi construída uma sala de apoio, para ser o Centro de Controle Operacional (CCO).

Os transdutores de pressão, vazão e as válvulas de controle são alimentados eletricamente por uma fonte 24 V CC (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 - Fonte 24 V CC

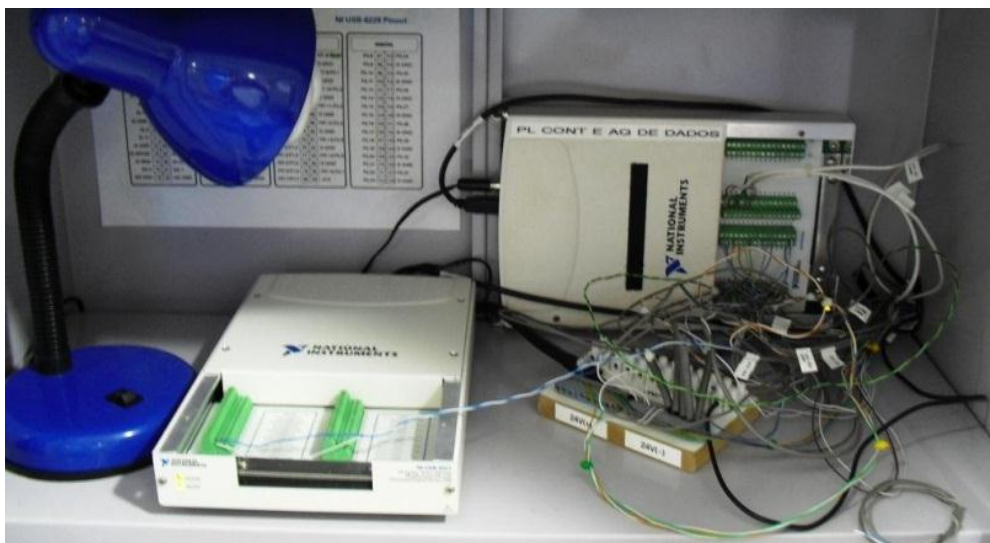


Figura 3.12 - Interfaces de aquisição de dados

Para gerenciamento de todos os elementos de monitoramento e controle foram instalados duas interfaces de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments* (ver Figura 3.12).

Para condução da água do experimento, foram utilizados tubos e conexões de PVC DN 50 e 25. Também foi utilizado em cada zona de abastecimento um registro de

esfera, com a finalidade de provocar distúrbios no sistema, para testar a robustez do sistema de controle quando ele estiver atuando.

Para deixar um caminho alternativo para a alimentação da zona alta, sem passar necessariamente pelo *booster*, foi realizado um sistema de *bypass*. Para evitar um possível refluxo, quando o *booster* estiver em funcionamento, uma válvula de retenção foi instalada (ver Figura 3.13).



Figura 3.13 - Detalhe do *bypass* realizado para o *booster* no ramal da zona alta

Foram instalados quadros elétricos para alimentação e proteção dos motores e equipamentos envolvidos no experimento, além de propiciar pontos de conexão para as medições elétricas de forma segura (ver Figura 3.14).



Figura 3.14 - Quadros elétricos e conversores de frequência

Todos os equipamentos de controle são conectados eletricamente à fonte de alimentação 24 V DC e logicamente as portas das interfaces de aquisição de dados através

de cabos. Entre os equipamentos e a fonte e entre as interfaces de aquisição de dados e a fonte, existe um barramento que foi executado com barras de *sindal* (ver Figura 3.15). Todos os equipamentos dispostos na rede se conectam ao barramento através de cabeamento blindado. Após o barramento, as conexões são realizadas por fios rígidos de pequena seção, até a fonte de alimentação e portas das interfaces de aquisição de dados. Todo o cabeamento foi devidamente acondicionado em canaletas apropriadas.



Figura 3.15 - Detalhe do barramento executado com barras de *sindal* e canaletas

Para acondicionar adequadamente a fonte e as interfaces de aquisição de dados foi instalado um armário metálico. Para gerenciar os equipamentos foi construído um sistema supervisorio em linguagem G no programa LabVIEWTM rodando num notebook com sistema operacional Microsoft Windows 7, equipado com processador Intel Core 2 Duo e 2 GB de memória RAM (ver Figura 3.16).



Figura 3.16 - Notebook utilizado no experimento

Foram instaladas duas tubulações de PVC DN 100 e após redução com DN 75, com a finalidade de conduzir a água produzida pelo sistema para o reservatório de descarga. A rede de abastecimento é alimentada pelo reservatório de sucção (caixa circular de fibra de vidro, com capacidade de 310 litros) e a vazão produzida é conduzida até o

reservatório de descarga (caixa circular de fibra de vidro, com capacidade de 310 litros). Portanto, a água que alimenta o sistema de abastecimento é totalmente reutilizada, sem ocasionar desperdícios.

A instalação de dois reservatórios se fez necessário, para evitar a incorporação de ar eventual na sucção do sistema. Estudos indicam que a incorporação de ar no líquido na proporção de 1% é suficiente, para reduzir o rendimento das bombas em até 15%. (FARELL, 1981 *apud* TSUTIYA, 2001). Ademais, qualquer alteração indesejada no bombeamento, provocaria distúrbios indesejáveis, alterando as leituras dos equipamentos de monitoramento da rede.

Entre os reservatórios existem três ligações (vasos comunicantes) que alimentam o reservatório de sucção. Nas ligações, a turbulência existente no reservatório de descarga é dissipada, não passando para o reservatório de sucção.

Na ligação mais próxima da descarga do sistema, foi necessário instalar uma tubulação complementar, pois durante os testes de funcionamento da rede de abastecimento, estavam sendo carreadas algumas bolhas de ar, para o reservatório de sucção.

No reservatório de sucção foi utilizado um complemento de tubulação, para redirecionar a sucção para um local mais próximo do fundo e do centro do reservatório, evitando a formação de vórtices.

Todos os detalhes descritos anteriormente, em relação aos reservatórios da rede de abastecimento, podem ser observados na Figura 3.17.

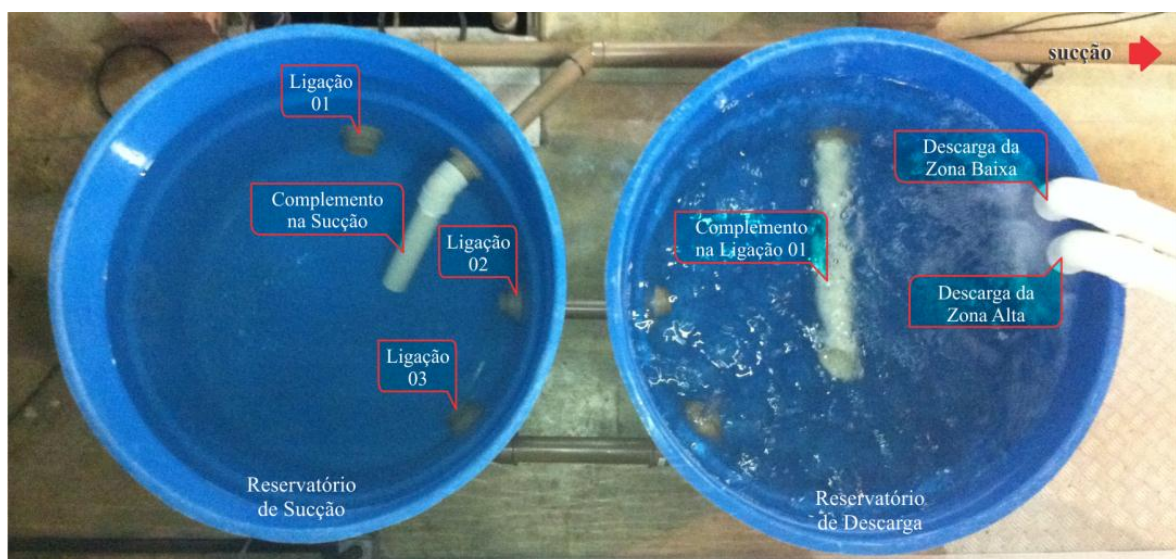


Figura 3.17 - Reservatórios de sucção e de descarga da rede de abastecimento

Para monitoramento visual das saídas de água das zonas de abastecimento foram instalados visores. Outro detalhe importante refere-se à fixação de todos os elementos da rede, sobretudo às tubulações. Foram utilizadas abraçadeiras metálicas, plásticas e suportes especiais, para minimizar vibrações indesejadas nos equipamentos de medição e de controle da rede de abastecimento (Ver Figura 3.18).



Figura 3.18 - Detalhe da fixação das tubulações e visores

3.4.3 Operação do Sistema Experimental

O conjunto motobomba principal (CMB) é o responsável pelo fornecimento de energia hidráulica ao sistema de bombeamento de água na forma de vazão e pressão. A rede hidráulica composta por dois ramais emulam a alimentação de dois setores no Sistema Automatizado de Distribuição de Água - SADA. A válvula de controle (CV-01) tem a função de alterar as condições de operação do sistema, proporcionando a variação da vazão de demandada (*set point*). À medida que a válvula de controle fecha, a vazão diminui e, conseqüentemente, a pressão a montante aumenta. Os transdutores de pressão (PT-3 e PT-5) são responsáveis pelas indicações das pressões e os transdutores de vazão (FT-1 e FT-2) são responsáveis pelas indicações de vazão do sistema.

O sistema de controle da rede monitora as pressões nas duas zonas de consumo da rede de abastecimento. O conversor de frequência do (CMB) possui a função de manter a pressão na zona baixa (ZB) e na zona alta (ZA), o mais próximo possível da pressão desejada (*set point*), enquanto o outro conversor de frequência, associado ao (BST), possui a função de fornecer uma pressão complementar para o setor da rede mais desfavorável, que é a zona alta. Atuando em segundo plano a válvula de controle (CV-1), tem a função de retirar o excesso de pressão da zona baixa, quando necessário ou em casos onde às

configurações dos motores não forem suficientes para atingir a referência. Portanto, em alguns casos ela não atuará. Porém, na maioria das configurações a válvula de controle (CV-1) deverá atuar obrigatoriamente, para auxiliar os motores no equilíbrio das pressões da rede, sobretudo quando o sistema for impulsionado unicamente pelo (CMB).

Em resumo, o sistema projetado para a rede de abastecimento deverá ser capaz de controlar todos os componentes de controle e monitoramento envolvidos, em tempo real, mantendo a pressão mínima exigida nas zonas baixa e alta da rede. Para que este objetivo seja atingido, as condições de operação dos equipamentos envolvidos no controle como conversores de frequência e válvula de controle deverão ser modificados automaticamente e continuamente.

3.5 SISTEMA SUPERVISÓRIO

O Sistema Supervisório para Controle e de Aquisição de Dados deste experimento é composto por um notebook executando o sistema operacional Microsoft Windows 7. Através das portas do tipo USB, as interfaces DAQ (*Data Acquisition*) são conectadas.

O programa computacional utilizado para o desenvolvimento e gerenciamento do sistema de abastecimento desta pesquisa foi o LabVIEW™ (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*), que utiliza uma linguagem de programação desenvolvida pela *National Instruments* (NI). O código completo do programa utilizado neste trabalho de pesquisa encontra-se no Apêndice B.

Para facilitar o entendimento do sistema e representação de todos os elementos de controle instalados foi criada uma interface gráfica detalhada, que pode ser acessada por meio da guia do programa “SUPERVISÓRIO” (ver Figura 3.19). A interface facilita a visualização dos indicadores e variáveis do sistema, informando seus valores em tempo real.

Além da funcionalidade de controle para a rede de abastecimento, o software supervisório desenvolvido possui outras funcionalidades importantes, tais como: adquirir e salvar os dados dos ensaios, configurações seletivas de participação ou não dos elementos opcionais de controle (BST e/ou CV-1), funcionamento da rede de abastecimento automaticamente ou manualmente, dentre outros ajustes disponíveis para automatizar os ensaios.

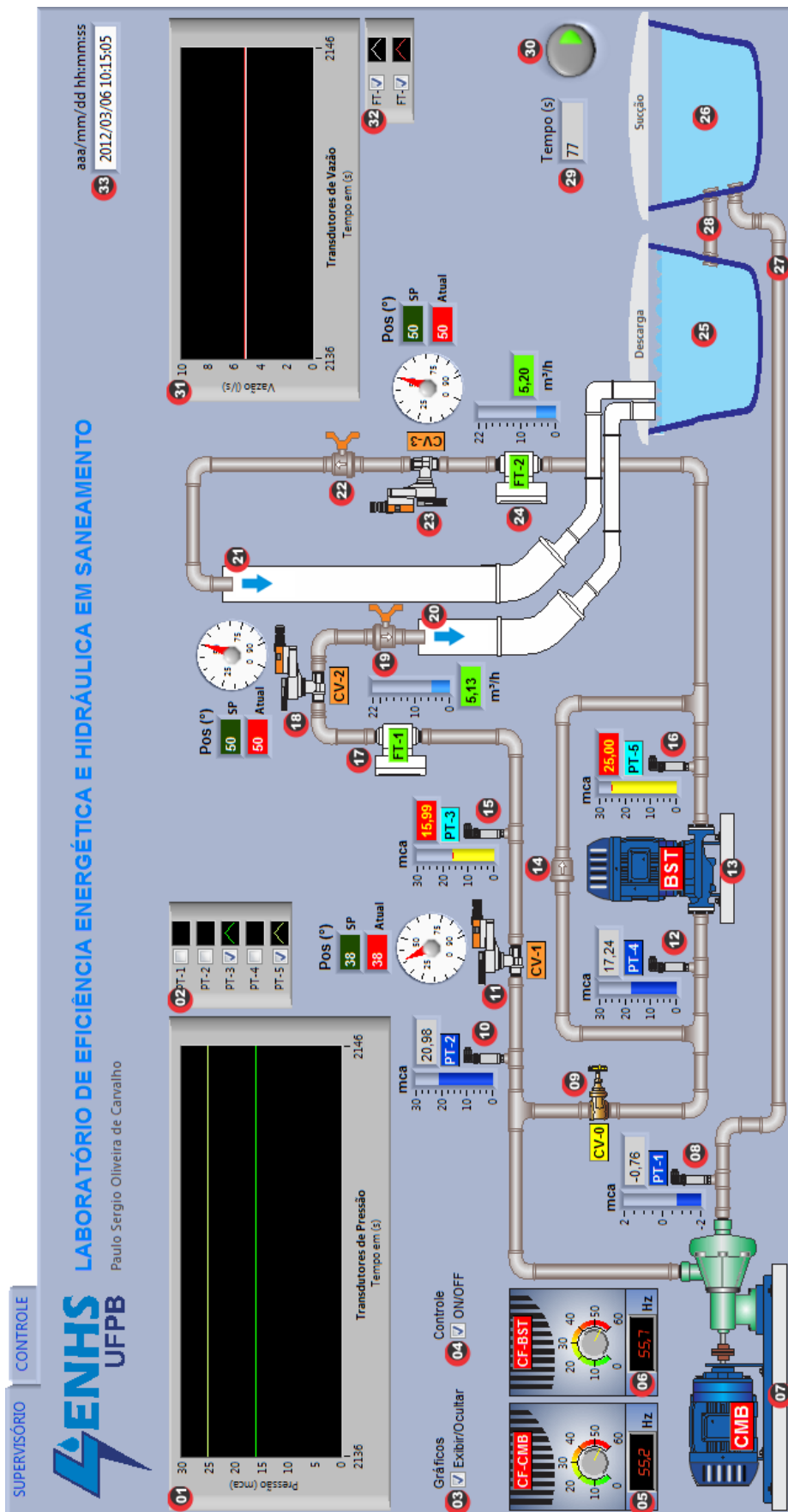


Figura 3.19 - Tela principal da guia “SUPERVISÓRIO” para monitoramento

A relação a seguir, identifica e descreve de forma resumida, todos os componentes do sistema de abastecimento que estão representados na guia “SUPERVISÓRIO”.

01. Gráfico para exibição das pressões.
02. Opção para exibição gráfica seletiva das pressões (*check box*), por instrumento.
03. Opção para exibição dos gráficos de pressão e vazão.
04. Informa se o sistema de controle está atuando.
05. Apresenta a frequência de operação do CMB.
06. Apresenta a frequência de operação do BST.
07. Conjunto motobomba principal (CMB).
08. Transdutor de pressão PT-1 (sucção do CMB).
09. Registro de gaveta CV-0 (provoca uma perda de carga entre o CMB e o BST).
10. Transdutor de pressão PT-2 (a montante da CV-1).
11. Válvula de controle proporcional CV-1 (atua no controle do sistema).
12. Transdutor de pressão PT-4 (sucção do CMB).
13. Conjunto motobomba auxiliar; booster (BST).
14. Válvula de retenção (*bypass* do BST).
15. Transdutor de pressão PT-1 (jusante da CV-1). É o indicador das pressões da zona baixa.
16. Transdutor de pressão PT-5 (recalque do BST). É o indicador das pressões da zona alta.
17. Transdutor de vazão FT-1 (indicador das vazões da zona baixa).
18. Válvula de controle proporcional CV-2 (atua simulando consumos para a zona baixa).
19. Registro de esfera manual de fecho rápido, para provocar distúrbios no sistema (descarga da zona baixa).
20. Tubulação de DN 100 que conduz a vazão produzida na zona baixa para o reservatório de descarga.
21. Tubulação de DN 100 que conduz a vazão produzida na zona alta para o reservatório de descarga.
22. Registro de esfera manual de fecho rápido, para provocar distúrbios no sistema (descarga da zona alta).
23. Válvula de controle proporcional CV-3 (atua simulando consumos para a zona alta).

24. Transdutor de vazão FT-2 (indicador das vazões da zona alta).
25. Reservatório para descarga das vazões produzidas pelo sistema.
26. Reservatório de sucção para alimentação do sistema.
27. Tubulação de sucção.
28. Tubulação de ligação entre os reservatórios de descarga e sucção.
29. Display que apresenta o tempo de aquisição decorrido em segundos.
30. Botão para encerrar a aplicação.
31. Gráfico para exibição das vazões.
32. Opção para exibição gráfica seletiva das pressões (*check box*), por instrumento.
33. Exibe a data e a hora corrente.

Na outra guia do programa “CONTROLE” (ver Figura 3.20) é possível realizar todas as configurações necessárias para a manipulação da rede de abastecimento, permitindo a realização de vários ensaios, utilizando a rede experimental de abastecimento de água.

A relação a seguir, identifica e descreve de forma resumida, todas as opções disponibilizadas, que estão representados na guia “SUPERVISÓRIO”, para operar a rede de abastecimento:

01. Apresenta o gráfico das pressões de forma ampliada, com taxa de atualização em décimos de segundo, do PT-3 (zona baixa) e do PT-5 (zona alta).
02. Apresenta o gráfico das pressões de forma normal, com taxa de atualização em segundos, do PT-3 (zona baixa) e do PT-5 (zona alta).
03. Displays com valores dos *set points* de pressão e pressões instantâneas nos ramais (pressões dentro da faixa desejada, a cor de fundo muda para amarela).
04. Habilita a rotina para construção das curvas limites para o sistema, variando automaticamente as frequências dos motores, numa combinação de valores pré-estabelecidos (*check box*).
05. Habilita a rotina para construção das curvas limites para o sistema, variando automaticamente os ângulos de fechamento das válvulas CV-2 e CV-3, para valores pré-estabelecidos (*check box*).
06. Exibe a data e a hora corrente.

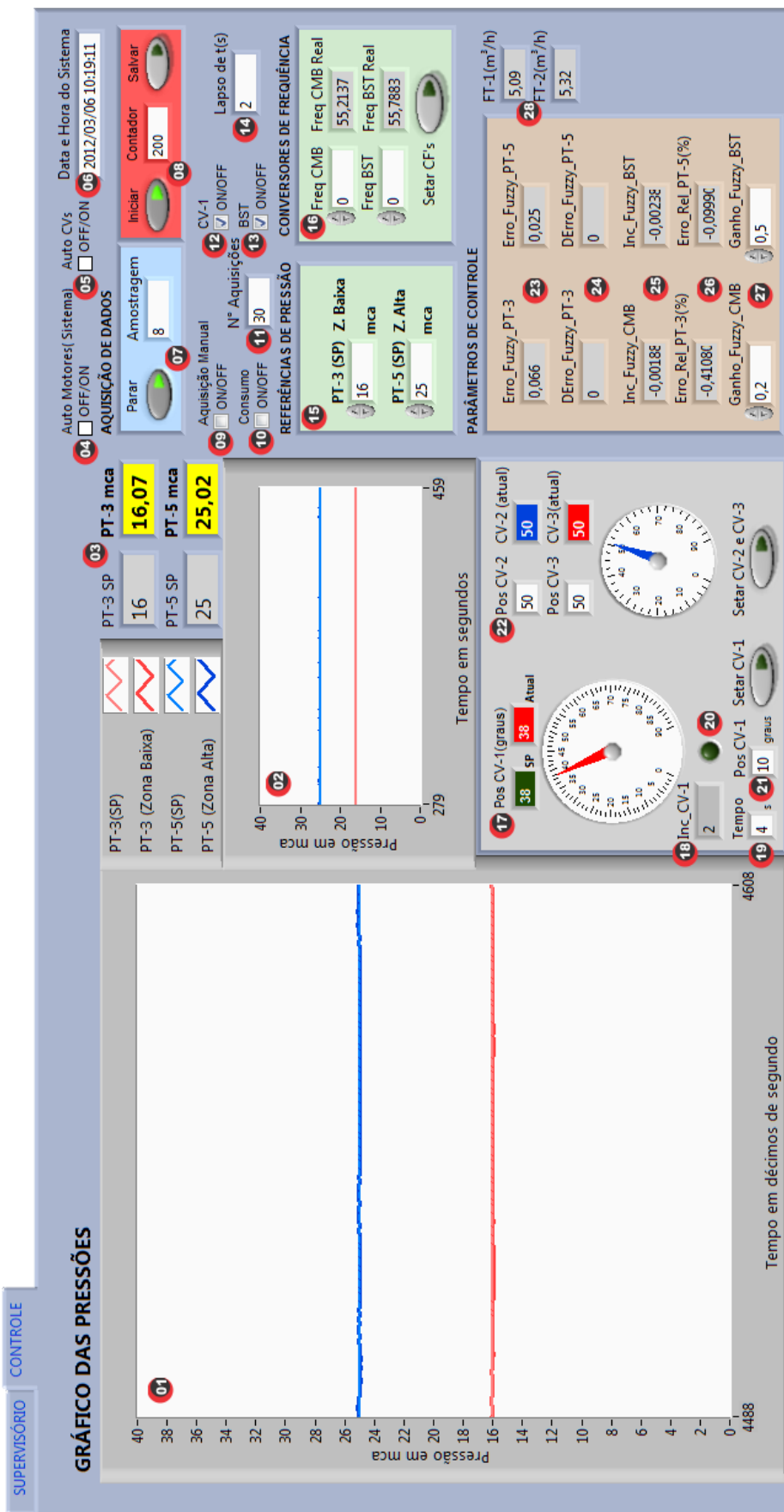


Figura 3.20 - Tela da guia “CONTROLE” para configurações

07. Apresenta os valores de tempo em décimos de segundo. Existe como opção, um botão que pode interromper o processo de contagem.
08. Módulo de aquisição de dados. Possui botão para iniciar/interromper o processo de aquisição e outro para salvar os dados. Existe um contador (*display*) que apresenta o número de aquisições.
09. Habilita o sistema para o modo de aquisição manual (*check box*).
10. Habilita a simulação de consumo variável para o sistema, através da movimentação das válvulas CV-2 e CV-3, numa série de ângulos pré-estabelecidos (*check box*).
11. Número de aquisições informadas pelo usuário para captura de dados, para cada nível de regulagem do sistema para os itens: 04, 05 e 10.
12. Habilita a válvula CV-1 no sistema de controle (*check box*).
13. Habilita o BST no sistema de controle (*check box*).
14. Lاپso de tempo informado pelo usuário, para as aquisições realizadas pelo sistema, em segundos.
15. Limites de pressão (*set point*) informados pelo usuário, para as zonas de consumo do sistema.
16. Valores de frequência para o CMB e BST, informados pelo usuário, para configurações manuais. Para aplicar os valores o botão disponibilizado deve ser acionado.
17. *Displays* e ponteiros do componente gráfico do LabVIEW™ “Gauge”, para exibir as posições angulares de objetivo e atual da CV-1, em graus.
18. Apresenta no *display* o valor do incremento, em graus, a ser adicionado ou subtraído a válvula, dependendo da magnitude dos erros avaliados pelo sistema.
19. Tempo informado pelo usuário, para que a válvula de controle CV-1 aplique uma nova ação.
20. Led indicativo de permissão para movimentação da CV-1, baseado em combinações verificadas no sistema, visando uma melhor estabilidade.
21. Valor em graus informado pelo usuário, para movimentação manual da válvula de controle CV-1. Para aplicar o valor desejado, o botão disponibilizado deve ser acionado.
22. Valores em graus informados pelo usuário, para operação manual das válvulas de controle CV-2 e CV-3. Para aplicar o valor desejado, o botão disponibilizado deve

- ser acionado. Os valores angulares instantâneos são exibidos nos *displays* e de forma gráfica através de ponteiros no componente Gauge do LabVIEW™.
23. São apresentados nos *displays* os valores para os erros verificados para as zonas de consumo.
 24. São apresentados nos *displays* os valores para as derivadas dos erros verificados para as zonas de consumo.
 25. *Displays* apresentam valores incrementais gerados pelos módulos *fuzzy*, para alterar as frequências dos motores do CMB e BST.
 26. *Displays* apresentam os valores para os erros relativos das pressões, em relação aos valores de referência (*set point*), para as zonas de consumo.
 27. Ganhos - valores em decimais informados pelo usuário, para potencializar ou reduzir a magnitude dos valores para as saídas geradas pelos módulos *fuzzy*.
 28. São apresentados nos *displays* os valores das vazões registradas nas zonas de consumo do sistema.

3.6 SISTEMA DE CONTROLE

3.6.1 Escolha do Método de Controle

A escolha do método de controle inteligente – lógica *fuzzy* – teve como base as inúmeras aplicações desenvolvidas por pesquisadores publicadas na literatura em sistemas que possuem características não-lineares, obtendo excelentes resultados, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

O trabalho foi idealizado para complementar os estudos realizados por CAMBOIM (2008), que na sua dissertação de mestrado controlou a pressão de uma rede de distribuição de água utilizando técnicas de controle *fuzzy*, aplicando apenas a um motor acionado por conversor de frequência variável e válvulas de controle. BEZERRA (2009), na sua tese de doutorado, também aplicou o controle piezométrico utilizando um sistema de controle *fuzzy*, para uma rede dotada de apenas um conjunto de impulsão acionado por conversor de frequência e válvulas de controle de forma simultânea.

O primeiro diferencial deste trabalho, em relação aos anteriores, começa pela topologia e modelagem da rede, que foi projetada com sistema de impulsão distribuído,

acarretando numa maior complexidade, no que se refere a sua modelagem física e desenvolvimento do algoritmo de controle adequado.

O segundo diferencial é que esta pesquisa concentrou grande parte dos seus estudos nas análises energéticas. Para isso, utilizou a rede experimental através do sistema supervisorio e de controle desenvolvido para avaliar opções de funcionamento capazes de gerar economia de água e energia elétrica.

No caso dos sistemas de abastecimento de água, a não-linearidade é uma característica intrínseca. A quantidade de água requerida por um sistema público de abastecimento varia continuamente ao longo do tempo. Os principais fatores que interferem nesta variação são: hábitos da população atendida e condições climáticas.

Considerando que a vazão fornecida por uma rede pública de abastecimento varia continuamente considera-se para a quantificação da demanda de água, para fins de projeto, a variação estacional (ao longo do ano) e a horária (ao longo do dia). Com base nestas informações quantitativas, o projeto foi desenvolvido para atender a condição mais desfavorável de consumo, ou seja, a demanda máxima atingida dentre todas as situações verificadas.

O sistema de controle proposto irá controlar um sistema de abastecimento experimental instrumentalizado, composto por duas zonas de abastecimento distintas: zonal baixa e zona alta. Estas zonas poderão ser alimentadas por um conjunto único de impulsão principal (CMB) ou associado a um segundo conjunto em série (BST). Como a demanda a ser atendida pelo sistema varia ao longo de todo o tempo, operar manualmente as variáveis de controle capazes de reconfigurar o sistema, visando acompanhar a demanda não é tarefa fácil, dada as inúmeras possibilidades de regulagens.

Face ao exposto, apenas um sistema de controle automático é capaz de configurar o sistema de abastecimento em tempo real, fazendo com que o mesmo sempre forneça de forma aproximada a quantidade necessária de água. Na prática esse controle pode ser feito por meio do monitoramento das pressões em pontos estratégicos do sistema. Após a definição de uma pressão de serviço a ser seguida, o sistema configurará os conjuntos de impulsão na rotação necessária, através dos conversores de frequência e o posicionamento de uma válvula de controle, tudo realizado em tempo real, mantendo sempre a pressão de serviço, independente da variação do consumo.

A lógica de funcionamento é a seguinte:

- ✓ Quando o consumo aumenta a pressão na rede diminui;
- ✓ Quando o consumo diminuir a pressão na rede aumenta.

Em quaisquer das situações descritas anteriormente, o sistema de controle atuará para manter as pressões nas zonas de consumo da rede em torno das pressões de serviço.

A lógica *fuzzy* é um algoritmo computacional estruturado, que precisa ser configurado adequadamente, para que o mesmo produza os efeitos de controle desejados, uma vez que cada sistema possui as suas especificidades. Para que o algoritmo possua uma maior flexibilidade de funcionamento, adaptando-se mais facilmente as situações de controle a ele impostas, a escolha correta da estratégia de modelagem e aplicação poderá deixá-lo mais generalista.

3.6.2 Determinação dos Limites Máximos e Mínimos

No desenvolvimento do controlador *fuzzy*, para o sistema de abastecimento experimental, foi necessário conhecer os limites máximos e mínimos de vazão e pressão da rede experimental, considerando as suas duas possibilidades de funcionamento possíveis, ou seja, com um ou dois conjuntos de impulsão. Além do conhecimento dos limites obrigatórios alcançados pelo sistema, através dos vários ensaios realizados, foi, também, observado o seu comportamento em determinadas condições de operação. Estas observações foram fundamentais para estabelecer as regras de controle, bem como as estratégias complementares na implementação do controlador.

É importante ressaltar que a frequência mínima admitida para os motores utilizados foi de 20 Hz. Trabalhar com o sistema de bombeamento abaixo deste valor, pelo lado da bomba, o torna inviável, pois o seu rendimento ficará comprometido, chegando a níveis onde não há mais transferência significativa de pressão e vazão para as zonas e consumo da rede de distribuição. Além disso, os motores podem ser danificados pelo superaquecimento, por falta de refrigeração, pois os seus sistemas de ventilação são acoplados aos seus eixos (auto ventilado).

As curvas dos limites máximos para as zonas de consumo: zona baixa (ZB) e zona alta (ZA) foram construídas fixando-se o valor da frequência dos motores, CMB e BST ou

apenas o CMB em 60 Hz, promovendo a variação da posição de fechamento das válvulas de controle CV-2 e CV-3.

Para cada ponto de operação ensaiado, o sistema permanece em funcionamento durante 120 s (cento e vinte segundos), registrando as pressões e vazões nas zonas de consumo, a cada 2 s (dois segundos). A cada 60 (sessenta) aquisições, o sistema reconfigura as válvulas num novo ângulo, considerando um total de 06 (seis) variações angulares. Após o término do processo de aquisição, que perfaz 720 s (setecentos e vinte segundos), os dados eram gravados em um arquivo de banco de dados estruturado. Todo o processo descrito anteriormente foi realizado pelo sistema de forma automática.

Para cada nível de funcionamento do sistema, são calculadas as médias aritméticas para os 60 (sessenta) valores, registradas para as pressões (alturas manométricas) e vazões obtidas, em cada zona de abastecimento. Desta forma, são geradas 06 (seis) coordenadas de pontos (altura manométrica *versus* pressão). Essas coordenadas dão origem a uma curva para cada zona de abastecimento ($H \times Q$).

As curvas dos limites mínimos para as zonas de consumo foram construídas fixando as válvulas de controle CV-2 e CV-3 nas suas aberturas máximas, ou seja, 0° (zero grau). Neste ensaio a modificação das condições de operação para o sistema foi provocada pela variação da frequência dos motores, CMB e BST ou apenas o CMB. A cada 60 (sessenta) aquisições, o sistema reconfigura as frequências dos motores (CMB e BST), ou do motor (CMB), num novo valor, considerando um total de 05 (cinco) valores de frequência. Após o término do processo de aquisição, que totalizam 720 s (setecentos e vinte segundos), os dados foram gravados em arquivo de banco de dados estruturado. Todo o processo descrito anteriormente foi realizado pelo sistema de forma automática.

Para cada nível de funcionamento do sistema foram calculadas as médias aritméticas para os 60 (sessenta) valores, registrados para as pressões (alturas manométricas) e vazões obtidas, em cada zona de abastecimento. Desta forma, são geradas 05 (cinco) coordenadas de pontos (altura manométrica *versus* pressão). Essas coordenadas dão origem a uma curva para cada zona de abastecimento ($H \times Q$).

A Tabela 3.2 e o gráfico da Figura 3.21 apresentam em detalhes as pressões (altura manométrica) em função das vazões, para as duas zonas de consumo da rede de abastecimento, dos ensaios realizados utilizando impulsão associada (CMB+BST).

Tabela 3.2 - Valores máximos e mínimos para as zonas do sistema (CMB+BST)

Ângulos CVs 2 e 3	Zona Baixa (FT-2 e PT-3)		Zona Alta (FT-2 e PT-3)		Freq Hz	Zona Baixa (FT-2 e PT-3)		Zona Alta (FT-2 e PT-3)	
	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Variando CVs 2 e 3 (ZA)			Variando CMB e BST (ZB)		Variando CMB e BST (ZA)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,00	26,26	0,00	35,76	20	6,24	1,62	0,00	3,57
72°	0,37	25,98	0,43	35,40	30	9,66	2,87	1,31	6,41
54°	3,23	24,86	3,14	33,13	40	12,55	4,14	4,18	7,79
36°	8,16	20,85	6,50	25,47	50	15,50	5,81	6,40	9,48
18°	15,41	12,07	8,50	14,41	60	18,39	7,73	8,33	11,42
0°	18,62	7,80	8,41	11,36					

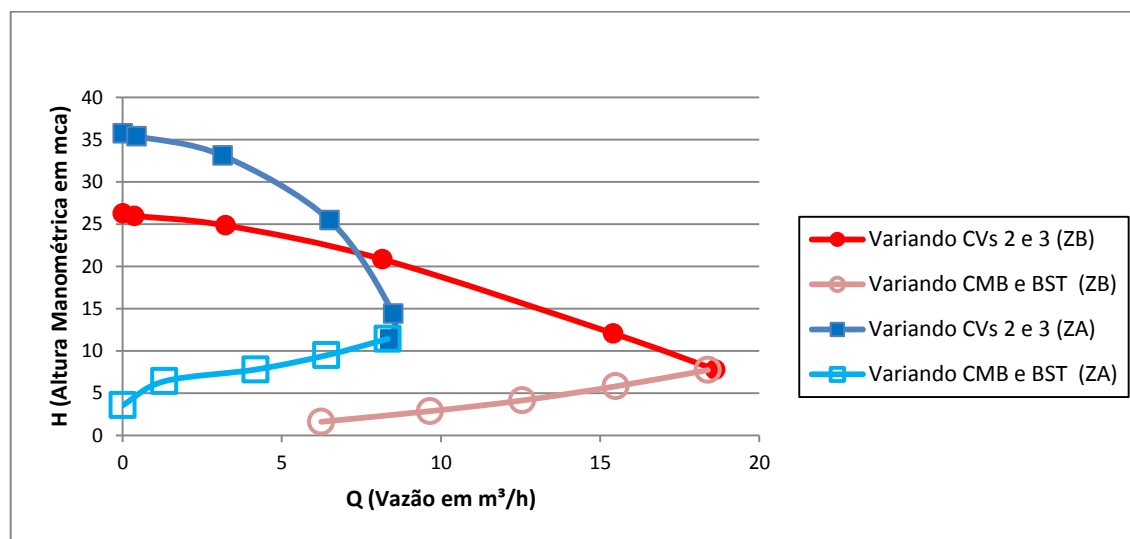


Figura 3.21 - Gráfico dos limites para as zonas do sistema (CMB+BST)

A Tabela 3.3 e o gráfico da Figura 3.22 apresentam em detalhes as pressões (altura manométrica) em função das vazões, para as duas zonas de consumo da rede de abastecimento, dos ensaios realizados utilizando impulsão única (CMB).

Tabela 3.3 - Valores máximos e mínimos para as zonas do sistema (CMB)

Ângulos CVs 2 e 3	Zona Baixa (FT-2 e PT-3)		Zona Alta (FT-2 e PT-3)		Freq Hz	Zona Baixa (FT-2 e PT-3)		Zona Alta (FT-2 e PT-3)	
	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Variando CVs 2 e 3 (ZA)			Variando CMB (ZB)		Variando CMB (ZA)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,00	26,16	0,00	26,60	20	6,52	1,65	0,00	2,54
72°	0,38	25,92	0,51	26,33	30	10,34	3,16	0,00	4,80
54°	3,19	24,89	2,58	24,62	40	13,49	4,76	1,82	6,67
36°	8,29	21,40	4,93	19,19	50	16,47	6,58	4,00	7,74
18°	15,99	13,14	5,87	11,18	60	19,56	8,71	5,27	8,96
0°	19,58	8,80	5,24	8,94					

Outro ponto a destacar é o grau de influência nas duas zonas de consumo, provocado pelo acionamento do BST. Com base nos dados já apresentados anteriormente, foram construídos gráficos que comparam as curvas para as pressões máximas nas zonas de consumo.

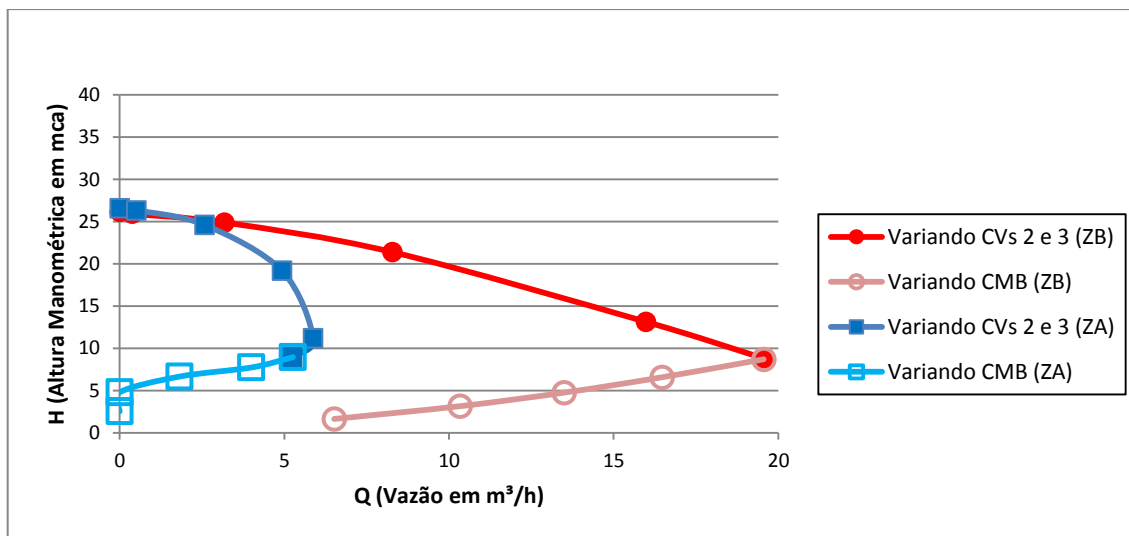


Figura 3.22 - Gráfico dos limites para as zonas do sistema (CMB)

Analisando os gráficos apresentados, foi observado que o funcionamento do BST não altera significativamente o comportamento da curva relativa à zona baixa. A maior diferença observada nas vazões foi de 0,96 m³/h, em relação aos últimos pontos das curvas, onde o sistema atinge a sua maior vazão (ver Figura 3.23). Entretanto, como já era esperado, o BST que funciona em serie com o CMB, provoca um ganho de carga (pressão) de 9,5 mca na zona alta (ver Figura 3.24).

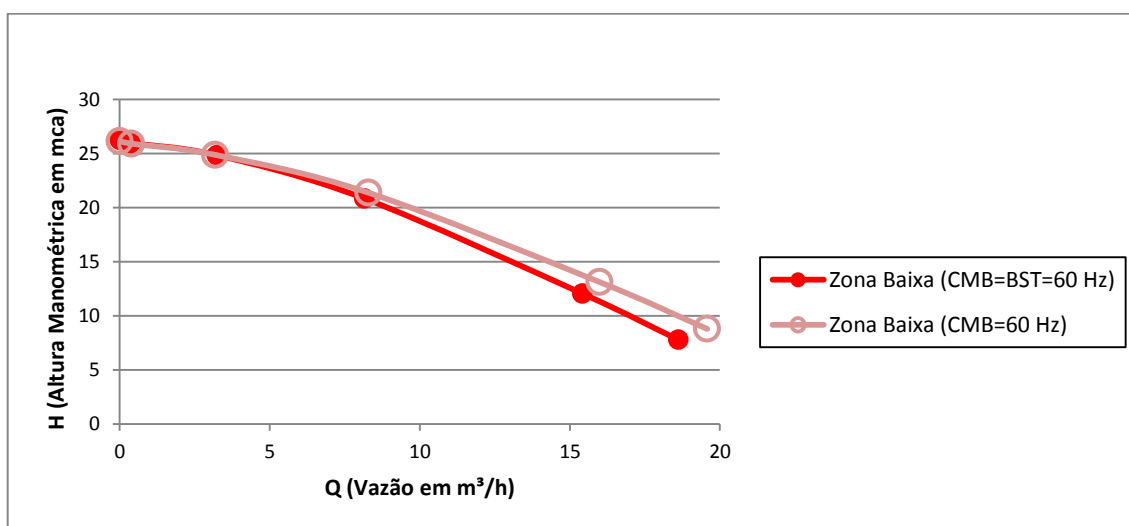


Figura 3.23 - Gráfico da influência do BST na zona baixa

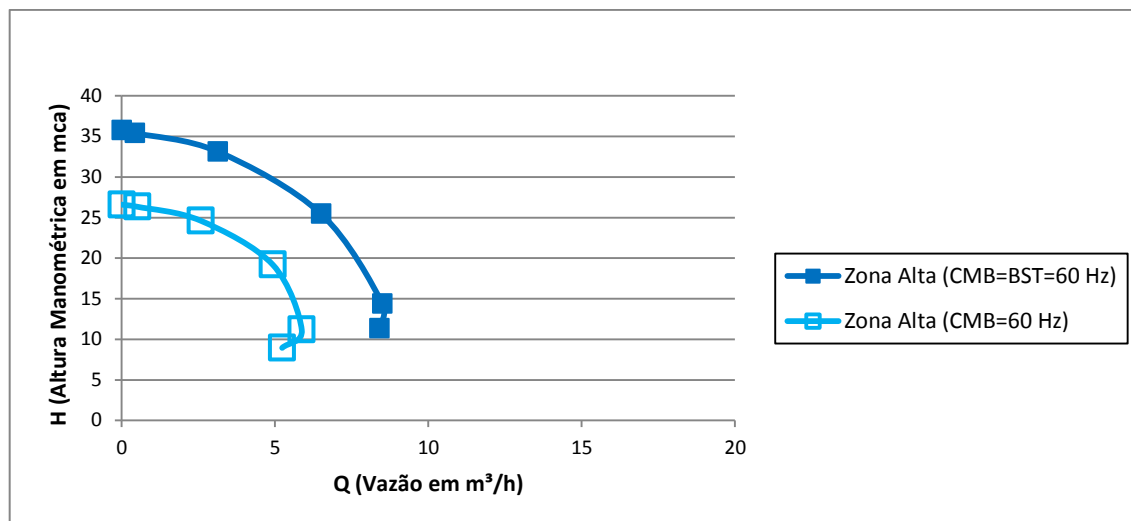


Figura 3.24 - Gráfico da influência do BST na zona alta

3.6.3 Controlador *Fuzzy*

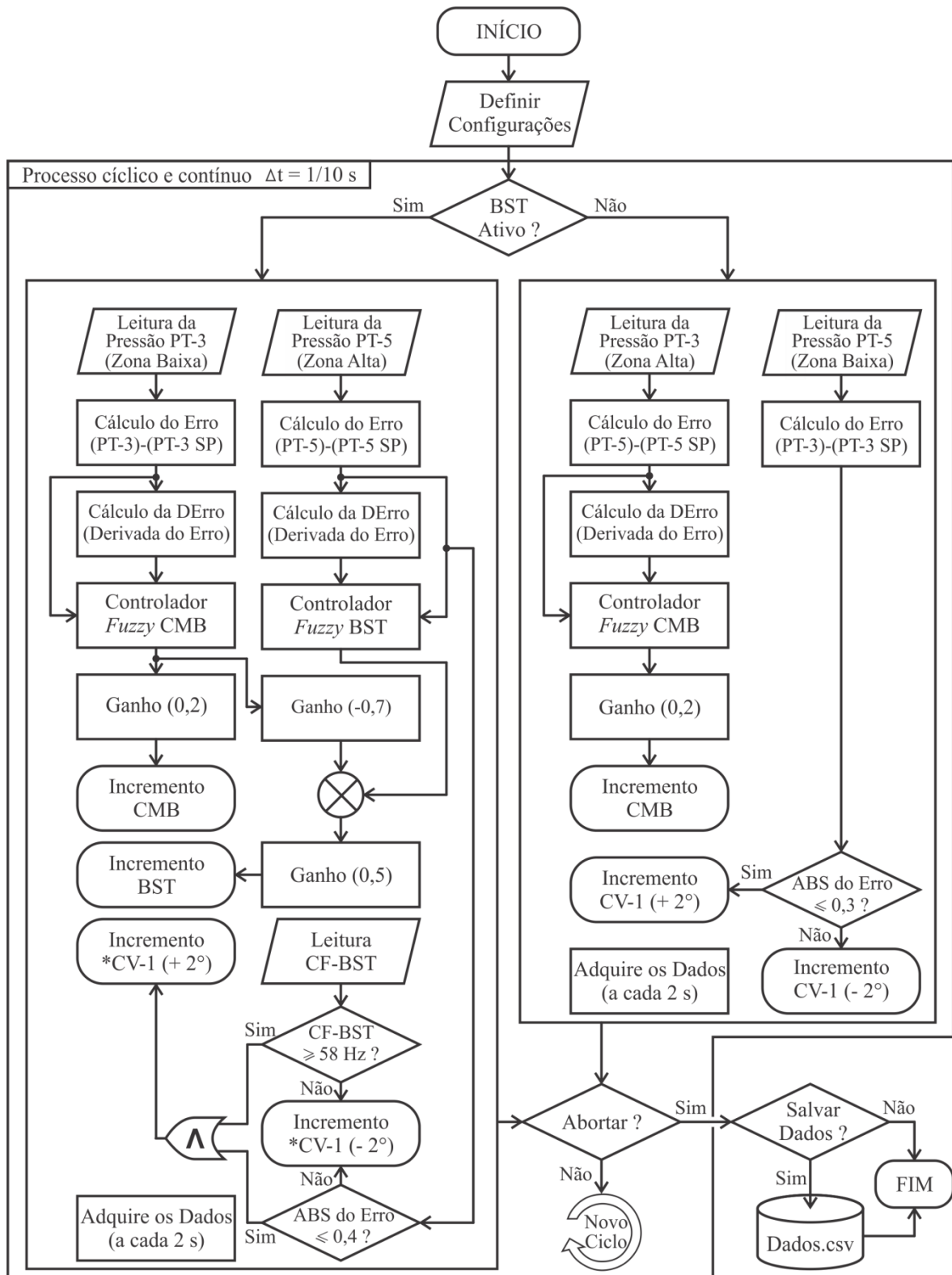
O sistema de controle, utilizando a lógica *fuzzy*, desenvolvido para a rede de abastecimento de água, tem como objetivo atingir e manter valores de pressão pré-estabelecidos, nas duas zonas de consumo existentes no sistema. Entre as zonas de consumo existe um desnível topográfico proposital. Este desnível foi concebido para criar uma situação desfavorável no sistema para uma das zonas de consumo da rede de abastecimento, no caso a zona alta. Desta forma, a instalação de uma impulsão auxiliar para oferecer pressão extra para a zona alta é justificável.

Segundo estudos realizados por (CARVALHO *et. al*, 2011), utilizando o sistema de controle desenvolvido, aplicado à rede de abastecimento experimental, ficou comprovado que a aplicação de um *booster* (BST) na zona alta, associado a uma válvula de controle instalada na zona baixa, confirma a teoria que foi apresentada na revisão bibliográfica apresentada.

Através da confirmação de que a topologia desenvolvida para a rede propicia a aplicação de um sistema auxiliar de impulsão, capaz de atingir pressões de serviço suficientes para a rede, atendendo à zona de consumo mais desfavorável (zona alta), foi dado continuidade ao estudo do desenvolvimento do controlador *fuzzy*, para comandar a rede de abastecimento experimental.

Para entendimento do fluxo de dados no programa supervisor, referente ao controlador e armazenamento dos dados, foi desenvolvido um fluxograma simplificado,

explicando as alternativas de controle desenvolvidas para a rede de abastecimento (ver Figura 3.25).



* A válvula de controle CV-1 pode ser desativada, através de uma caixa de controle, no software supervísório.

Figura 3.25 - Fluxograma do sistema de controle, implementado no supervísório

Inicialmente devem ser fornecidas ao programa as informações básicas necessárias para que o sistema de controle possa manter a rede de abastecimento nos limites de pressão pré-estabelecidos para as suas zonas de consumo. As informações básicas são: *set points* de pressão para as zonas baixa e alta; e o tipo de controle que será realizado, com ou sem o *booster* (BST).

Após a inicialização, o programa escolherá o trecho de código computacional a ser executado, dentre as três combinações possíveis, que são descritas nos tópicos a seguir:

CONTROLE (CMB+BST+CV-1)

O processo de atualização das variáveis do sistema ocorre em intervalos de 1/10 de segundo. A cada instante, são realizadas as leituras das pressões das zonas de consumo, alta e baixa. Constantemente são calculados o erro (Erro) e a sua derivada (DErro). Estas variáveis são as entradas necessárias para que os controladores *fuzzy* possam calcular o incremento a ser aplicado, nos conversores de frequência.

Neste tipo de controle, a referência de pressão para a regulação do CMB é função das pressões registradas na zona baixa (PT-3) e para o BST são as pressões registradas para a zona alta (PT-5).

Nas configurações do conversor de frequência do CMB, após a saída do controlador, existe a possibilidade de sintonizar um ganho. Após a definição do ganho, obtém-se o valor do incremento que será efetivamente aplicado ao CMB para a regulação das pressões da rede de abastecimento.

Para o conversor de frequência do BST a configuração é mais complexa. Como o BST funciona em série com o CMB ele sofrerá a influência direta deste. Para equalizar a influência do CMB no BST existe um redutor aplicado à saída do incremento calculado pelo controlador *fuzzy* do CMB, que é somado ao incremento calculado na saída do controlador *fuzzy* do BST. Após a soma destes valores é aplicado um ganho para a definição final do incremento a ser efetivamente aplicado ao BST para a regulação das pressões da rede de abastecimento.

O estado da válvula de controle CV-1 é tratado como sendo um elemento de controle secundário. A justificativa para a utilização dessa lógica de prioridade deve-se ao fato de que a válvula é um elemento de controle lento, se comparado com a ação dos

conversores de frequência, e por terem a característica de provocar perda de carga no sistema. Portanto, deve ser priorizada a abertura máxima desse elemento de controle.

Face ao exposto, a válvula de controle só atuará no sistema em condições excepcionais, ou seja, onde o sistema de bombeamento não conseguir atingir e manter os níveis de pressão desejados. Para que a CV-1 atue, se faz necessário que se verifiquem dois condicionamentos concomitantes: a frequência do BST deve ser igual ou superior a 58 Hz, e o valor absoluto do erro registrado na zona alta (PT-5) seja menor ou igual a 0,4. Se for verdade, o ângulo da válvula será incrementado ou decrementado em dois graus.

Para efeito de armazenagem dos dados, um código computacional foi construído para gravar, a cada 2 s (dois segundos), os valores instantâneos de todas as variáveis e configurações do sistema. A qualquer momento o usuário do sistema poderá abortar o processo de controle, clicando no botão “Salvar”, disponibilizado na interface do software supervisor, na guia “CONTROLE”. Se nada for feito o sistema permanecerá funcionando, executando um novo ciclo.

Se o usuário optar por abortar o controle lhe será dado a opção de gravar todos os dados registrados durante o funcionamento do sistema em arquivo de banco de dados estruturado, no formato CSV. Se for escolhida esta opção, após a gravação, o sistema de controle será desativado. Caso o usuário escolha não gravar os dados, o sistema de controle será automaticamente desligado.

CONTROLE (CMB+BST)

O software supervisor também possui a flexibilidade de ativação ou não da válvula de controle CV-1 por meio de uma caixa de controle (*check box*). Entretanto, só faz sentido utilizar o sistema sem a válvula no caso em que os dois motores estiverem funcionando. Mesmo assim, o equilíbrio fica mais difícil, ou até impossível, para várias configurações de pressões arbitradas para as zonas de consumo da rede, nos casos onde a válvula é necessária ou imprescindível.

As considerações de funcionamento, nesta combinação de controle, obedecem aos mesmos procedimentos descritos anteriormente para (CMB+BST+CV-1).

CONTROLE (CMB+CV-1)

O processo de atualização das variáveis do sistema ocorre em intervalos de 1/10 de segundo. A cada instante, são realizadas as leituras das pressões das zonas de consumo, alta e baixa. Constantemente são calculados o erro (Erro) e a sua derivada (DErro) para a zona alta (entradas do controlador *fuzzy*) e apenas o Erro para zona baixa.

Neste tipo de controle, a referência de pressão para a regulação do CMB é função das pressões registradas na zona alta (PT-5), diferentemente da situação (CMB+BST), onde a referência é determinada pela zona baixa (PT-3).

Nas configurações do conversor de frequência do CMB, após a saída do controlador, existe a possibilidade de sintonizar um ganho. Após a definição do ganho, obtém-se o valor do incremento que será efetivamente aplicado ao CMB, para regulação das pressões da rede de abastecimento.

Neste tipo de configuração, a movimentação da válvula de controle CV-1 é tratada como sendo um elemento de controle essencial, pois para que a zona alta atinja valores de pressão significativos, a válvula de controle CV-1 deverá obrigatoriamente atuar, retirando o excesso de pressão da zona baixa.

A válvula de controle CV-1 só atuará no controle da rede quando o valor absoluto do erro registrado na zona alta (PT-5) for menor ou igual a 0,3⁴ (quando o valor da pressão desejada para a zona alta for atingido), retirando o excesso de pressão da zona baixa, se necessário.

Para efeito de armazenagem dos dados, um código computacional foi construído para salvar a cada 2 segundo os valores instantâneos de todas as variáveis e configurações do sistema. A qualquer momento o usuário do sistema poderá abortar o processo de controle, clicando no botão “Salvar”, disponibilizado na interface do software supervisor, na guia “CONTROLE”. Se nada for feito o sistema permanecerá funcionando, executando um novo ciclo.

Se o usuário optar por abortar o controle, lhe será dada à opção de salvar todos os dados registrados durante o funcionamento do sistema em arquivo de banco de dados estruturado, no formato CSV. Se for escolhida esta opção, após o salvamento, o sistema de controle será desativado. Caso o usuário escolha não salvar os dados, o sistema de controle será automaticamente desligado.

⁴ O valor de 0,3 para o erro que indica ou não a movimentação da válvula CV-1 foi obtido experimentalmente.

3.6.4 Estratégia de Controle

A estratégia de controle utiliza como variáveis de entrada o erro (Erro) e a sua derivada (DERro). O Erro é determinado pela diferença registrada entre os valores das pressões das zonas alta e baixa da rede de abastecimento e dos seus respectivos valores de referência (*set points*) configurados. Para o cálculo do DERro, na prática, corresponde ao valor da diferença registrada entre o Erro atual e o Erro anterior registrado no sistema.

Existe um erro relacionado a cada zona de consumo. O Erro indica a magnitude do valor da distância que o sistema de controle está do seu objetivo, que é valor da pressão de *set point*. Este erro poderá ser positivo ou negativo. Se for positivo, indicará que o sistema deverá reduzir a potência do bombeamento e/ou movimentar a válvula de controle CV-1 para um ângulo maior de fechamento (fechar mais). Se for negativo indicará que o sistema deverá aumentar a potência do bombeamento e/ou movimentar a válvula de controle CV-1 para um ângulo menor de fechamento (abrir mais).

Como o DERro advém do Erro, também existe um DERro relacionado a cada zona de consumo. O DERro é um dado refinado que indica a magnitude da aproximação do objetivo, que é alcançar o valor da pressão de *set point*. O DERro poderá ser positivo ou negativo. Nas mudanças de direção do sistema, ou seja, nos pontos de máximos e mínimos das curvas de pressão; e quando da estabilidade do sistema o valor da DERro é zero. A base teórica para formulação e definição destas variáveis foi obtida em SIMÕES (2007).

Na modelagem do problema para a formulação do código computacional, para o cálculo da derivada do Erro, verificou-se que devido ao tempo de amostragem ser muito pequeno (1/10 s), bem como da incerteza de leitura dos transdutores de pressão, em face da pequena magnitude dos valores das Derivadas do Erro, foi utilizado o cálculo acumulado de uma média móvel, para a sua determinação.

O algoritmo calcula a DERro diminuindo do valor da pressão instantânea informada pelo transdutor de pressão, do valor imediatamente anterior registrado por ele. Para garantir que os valores resultantes não apresentem distorções momentâneas (ocorrências normais em instrumentos de medição), os valores calculados para o DERro são trabalhados para ficarem sempre no intervalo [-0,1 a 0,1]. Para isso, uma função do LabVIEW™ “*In Range and Coerce*” foi utilizada no código.

Para generalizar a implementação do código e elucidar o seu entendimento, por aqueles que não conhecem a linguagem G do LabVIEW™, foi desenvolvido um diagrama

de fluxo de dados (ver Figura 3.26). Baseado neste diagrama, o algoritmo computacional poderá ser estruturado numa outra linguagem de programação.

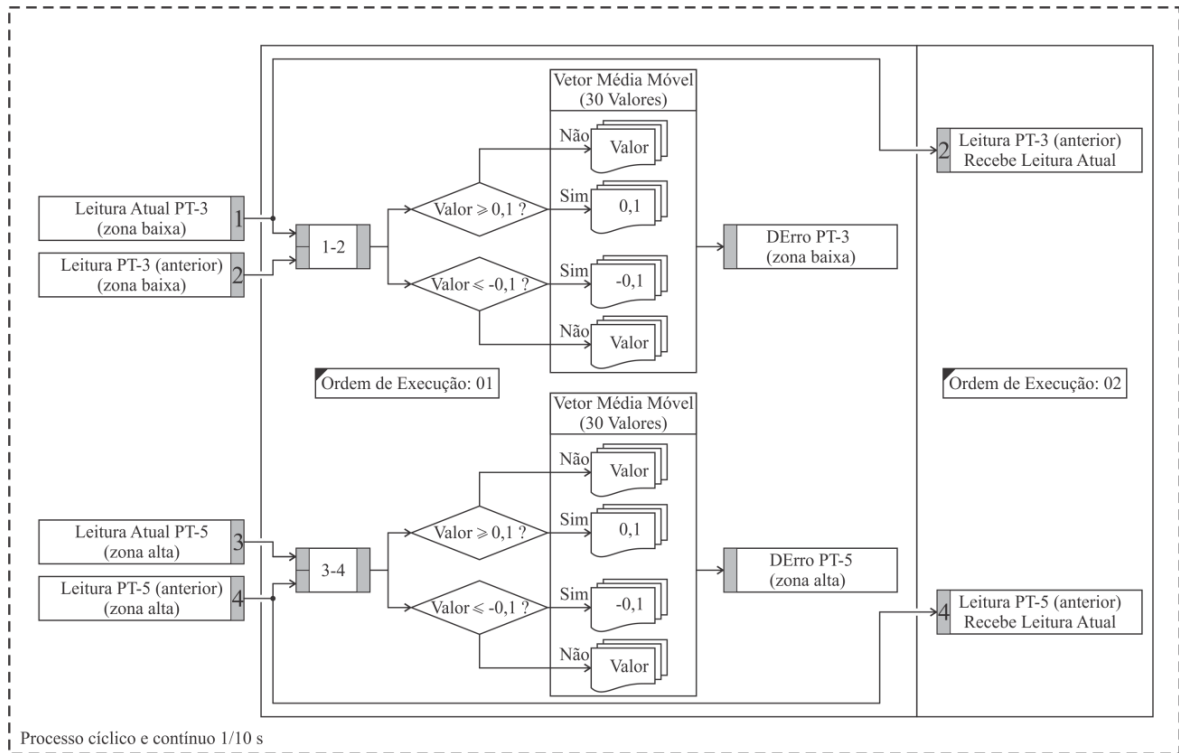


Figura 3.26 - Diagrama de fluxo de dados para o cálculo da DErro

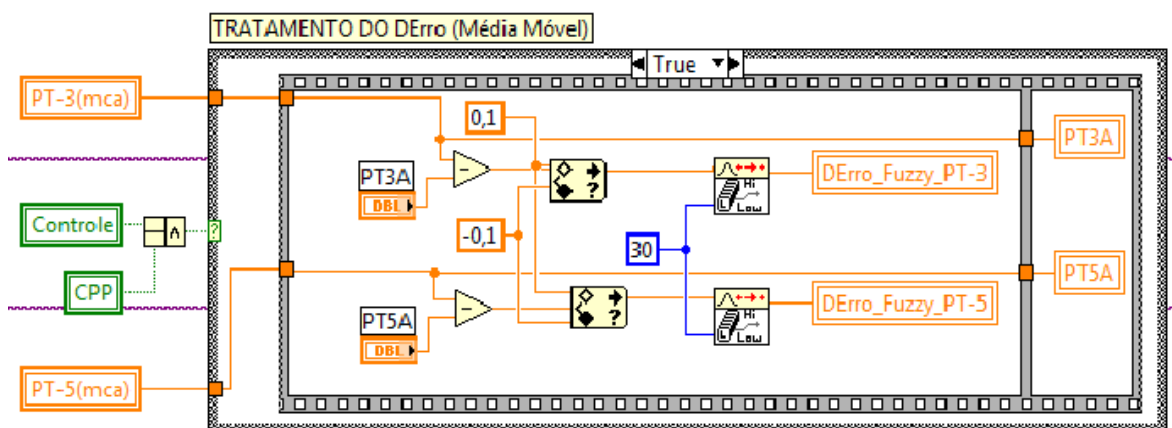


Figura 3.27 - Código LabVIEW™ para cálculo da DErro

Para evitar inconsistências na mudança de direção (mudança de sinal) é calculada uma média móvel dos últimos 30 (trinta) valores registrados. Como o ciclo é de 1/10 s, isto equivale à média móvel dos valores adquiridos nos últimos 3 s. Com esta providência, eliminam-se eventuais distorções no cálculo da DErro.

Finalmente, após estas providências necessárias, a DErro recebe o valor da média móvel atualizada, a cada décimo de segundo (ver Figura 3.27).

3.6.5 Módulos de Controle *Fuzzy*

Os motores do sistema de bombeamento - Conjunto Motobomba (CMB) e *Booster* (BST) - são acionados através de conversores de frequência, os quais são comandados pelo programa supervisorio desenvolvido. O sistema supervisorio calcula a cada décimo de segundo o erro e a sua derivada (conforme explicado anteriormente), baseado nas leituras de pressão verificadas nos dois ramais de consumo: zona baixa (PT-3) e zona alta (PT-5), em relação aos valores de referência das pressões determinadas pelo usuário (*set point*) para cada zona.

Cada conjunto de impulsão possui um controlador *fuzzy* independente. Os controladores determinam, em tempo real, o incremento necessário para fazer os motores acelerarem ou desacelerarem. A magnitude deste incremento é calculada de acordo com a necessidade, alterando o bombeamento na rede de forma criteriosa. A modificação da intensidade de bombeamento visa manter o sistema operando em torno da pressão exigida, para cada ramal de consumo. Em suma, o objetivo do sistema de controle é minimizar os erros observados a todo instante, por meio da mudança sistemática da frequência de operação dos motores.

A Figura 3.28 mostra as entradas e a saída do controlador *fuzzy*, responsável pelas configurações do conjunto de impulsão principal do sistema (CMB). O outro diagrama da Figura 3.29 apresenta as variáveis *fuzzy*, entradas e a saída, para regulação do conjunto de impulsão auxiliar do sistema (BST).

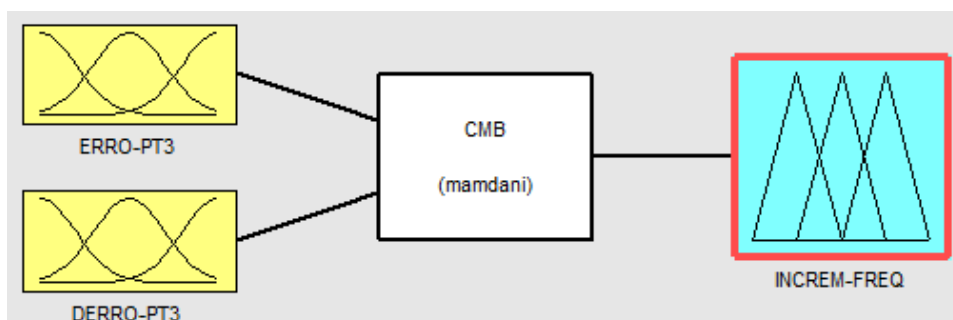


Figura 3.28 - Entradas e saída do controlador *fuzzy* do CMB

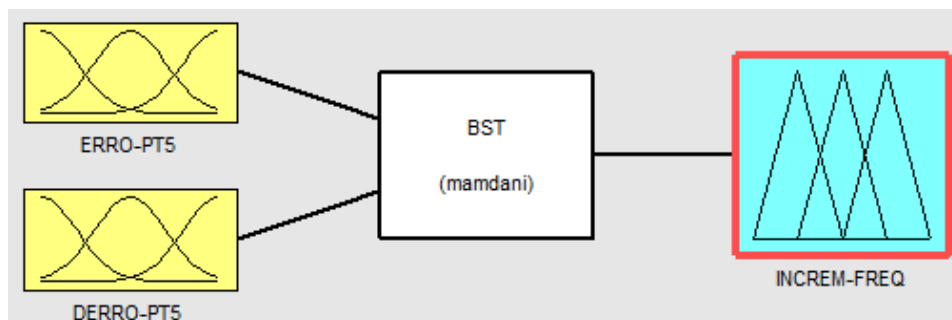


Figura 3.29 - Entradas e saída do controlador *fuzzy* do BST

As configurações necessárias para o funcionamento do controlador *fuzzy* passam, necessariamente, pela definição das variáveis linguísticas antecedentes (variáveis de entrada) e da consequente (variável de saída). Após a criação das variáveis linguísticas, correspondentes a cada uma delas, são definidas as funções de pertinência, dentro do universo do discurso. A Figura 3.30 mostra, em detalhes, as variáveis linguísticas e as funções de pertinência definidas para a manipulação das três variáveis do controlador *fuzzy*.

Fundamentado nas combinações dos valores assumidos pelas variáveis de entrada, as regras representam as decisões que o controlador irá tomar. Para ilustrar o comportamento do controlador *fuzzy*, foi construída e plotada uma superfície tridimensional (ver Figura 3.31), com base nas variáveis e configurações realizadas. Para elaborar o gráfico da superfície de controle foi empregado o software MATLAB, utilizando-se a ferramenta **FIS Editor** da GUI (*Graphical User Interface*) tools. Em ambos os casos, a base de regras para o controle é idêntica (ver Figura 3.32).

A Tabela 3.4 sintetiza as descrições básicas e particularidades dos controladores *fuzzy* desenvolvidos e utilizados.

Tabela 3.4 - Particularidades dos controladores *fuzzy*

ITENS	DESCRIÇÃO
Software de desenvolvimento	PID and <i>Fuzzy</i> Logic Toolkit para LabVIEW (versão 8.2)
Método de inferência	Mamdani (Max-Min)
Defuzzificação	MOM (middle of maximum)
Variáveis de entrada (baseadas nas pressões das zonas de abastecimento)	Erro [-1, 1] e derivada do erro [-0.05, 0.05]
Variável de saída	Incremento de frequência [-1, 1]
Número de regras	63 (sessenta e três)

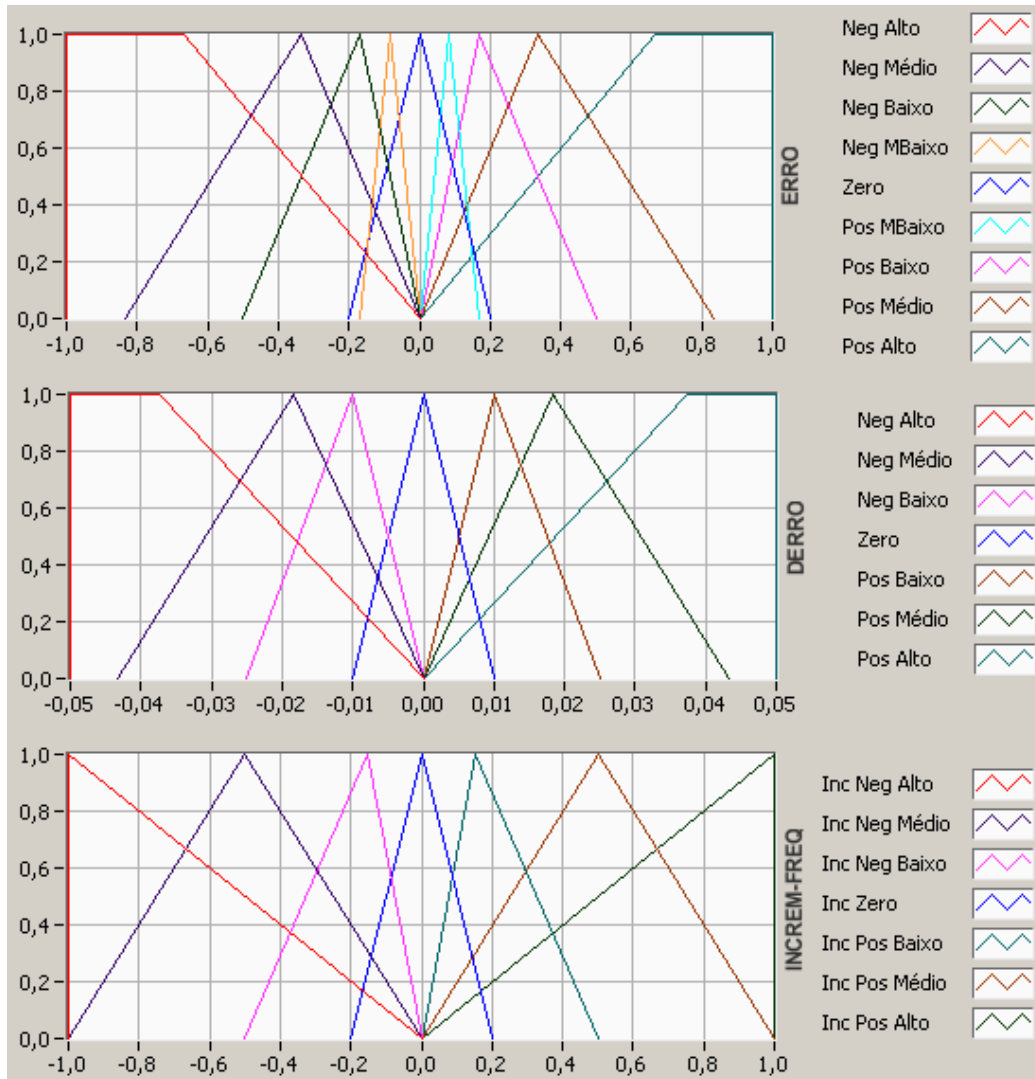


Figura 3.30 - Variáveis linguísticas e funções de pertinência do controlador *fuzzy*

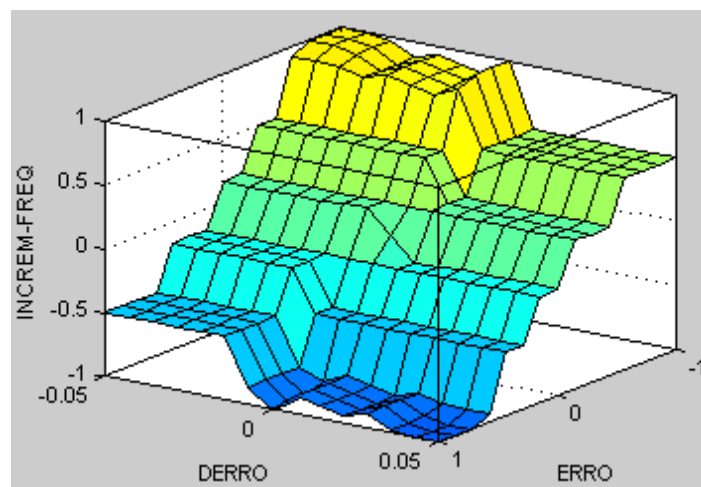


Figura 3.31 - Superfície de controle *fuzzy*

Rulebase Editor

Utils IF THEN With Defuzzification Method **Center of Maximum** default term **Inc Zero** if no rule is active **Take last value** Inference Method **Max-Min** Select form of Rulebase normal Rulebase total rules 63 used rules 63 default DoS 1,00

Rule-Nr.	ERRO	DERRO	INCREM FREQ	DoS
1	Neg Alto	Neg Alto	Inc Pos Alto	1,00
2	Neg Alto	Neg Médio	Inc Pos Alto	1,00
3	Neg Alto	Neg Baixo	Inc Pos Alto	1,00
4	Neg Alto	Zero	Inc Pos Alto	1,00
5	Neg Alto	Pos Baixo	Inc Pos Médio	1,00
6	Neg Alto	Pos Médio	Inc Pos Médio	1,00
7	Neg Alto	Pos Alto	Inc Pos Médio	1,00
8	Neg Médio	Neg Alto	Inc Pos Médio	1,00
9	Neg Médio	Neg Médio	Inc Pos Médio	1,00
10	Neg Médio	Neg Baixo	Inc Pos Médio	1,00
11	Neg Médio	Zero	Inc Pos Médio	1,00
12	Neg Médio	Pos Baixo	Inc Pos Baixo	1,00
13	Neg Médio	Pos Médio	Inc Pos Baixo	1,00
14	Neg Médio	Pos Alto	Inc Pos Baixo	1,00
15	Neg Baixo	Neg Alto	Inc Pos Baixo	1,00
16	Neg Baixo	Neg Médio	Inc Pos Baixo	1,00
17	Neg Baixo	Neg Baixo	Inc Pos Baixo	1,00
18	Neg Baixo	Zero	Inc Pos Baixo	1,00
19	Neg Baixo	Pos Baixo	Inc Pos Baixo	1,00
20	Neg Baixo	Pos Médio	Inc Pos Baixo	1,00
21	Neg Baixo	Pos Alto	Inc Pos Baixo	1,00
22	Neg MBaixo	Neg Alto	Inc Pos Baixo	1,00
23	Neg MBaixo	Neg Médio	Inc Pos Baixo	1,00
24	Neg MBaixo	Neg Baixo	Inc Pos Baixo	1,00
25	Neg MBaixo	Zero	Inc Pos Baixo	1,00
26	Neg MBaixo	Pos Baixo	Inc Pos Alto	1,00
27	Neg MBaixo	Pos Médio	Inc Pos Médio	1,00
28	Neg MBaixo	Pos Alto	Inc Pos Baixo	1,00
29	Zero	Neg Alto	Inc Pos Baixo	1,00
30	Zero	Neg Médio	Inc Pos Baixo	1,00
31	Zero	Neg Baixo	Inc Pos Baixo	1,00
32	Zero	Zero	Inc Zero	1,00
33	Zero	Pos Baixo	Inc Neg Baixo	1,00
34	Zero	Pos Médio	Inc Neg Baixo	1,00
35	Zero	Pos Alto	Inc Neg Baixo	1,00
36	Pos MBaixo	Neg Alto	Inc Neg Baixo	1,00
37	Pos MBaixo	Neg Médio	Inc Neg Médio	1,00
38	Pos MBaixo	Neg Baixo	Inc Neg Alto	1,00
39	Pos MBaixo	Zero	Inc Neg Baixo	1,00
40	Pos MBaixo	Pos Baixo	Inc Neg Baixo	1,00
41	Pos MBaixo	Pos Médio	Inc Neg Baixo	1,00
42	Pos MBaixo	Pos Alto	Inc Neg Baixo	1,00
43	Pos Baixo	Neg Alto	Inc Neg Baixo	1,00
44	Pos Baixo	Neg Médio	Inc Neg Baixo	1,00
45	Pos Baixo	Neg Baixo	Inc Neg Baixo	1,00
46	Pos Baixo	Zero	Inc Neg Baixo	1,00
47	Pos Baixo	Pos Baixo	Inc Neg Baixo	1,00
48	Pos Baixo	Pos Médio	Inc Neg Baixo	1,00
49	Pos Baixo	Pos Alto	Inc Neg Baixo	1,00
50	Pos Médio	Neg Alto	Inc Neg Baixo	1,00
51	Pos Médio	Neg Médio	Inc Neg Baixo	1,00
52	Pos Médio	Neg Baixo	Inc Neg Médio	1,00
53	Pos Médio	Zero	Inc Neg Médio	1,00
54	Pos Médio	Pos Baixo	Inc Neg Médio	1,00
55	Pos Médio	Pos Médio	Inc Neg Médio	1,00
56	Pos Médio	Pos Alto	Inc Neg Médio	1,00
57	Pos Alto	Neg Alto	Inc Neg Médio	1,00
58	Pos Alto	Neg Médio	Inc Neg Médio	1,00
59	Pos Alto	Neg Baixo	Inc Neg Alto	1,00
60	Pos Alto	Zero	Inc Neg Alto	1,00
61	Pos Alto	Pos Baixo	Inc Neg Alto	1,00
62	Pos Alto	Pos Médio	Inc Neg Alto	1,00
63	Pos Alto	Pos Alto	Inc Neg Alto	1,00

Figura 3.32 - Base de regras dos controladores *fuzzy*

Para testar o funcionamento dos módulos *fuzzy* foi elaborado um software simulador em LabVIEW™ (ver Figura 3.33), que dado um valor para o Erro e para a DErro (entradas), dentro dos seus universos de discurso, gera um Incrém-Frequeñcia (saída). O código fonte do programa é apresentado na Figura 3.34. A Tabela 3.5 relaciona algumas entradas para testar valores para a saída.



Figura 3.33 – Tela do simulador *fuzzy*

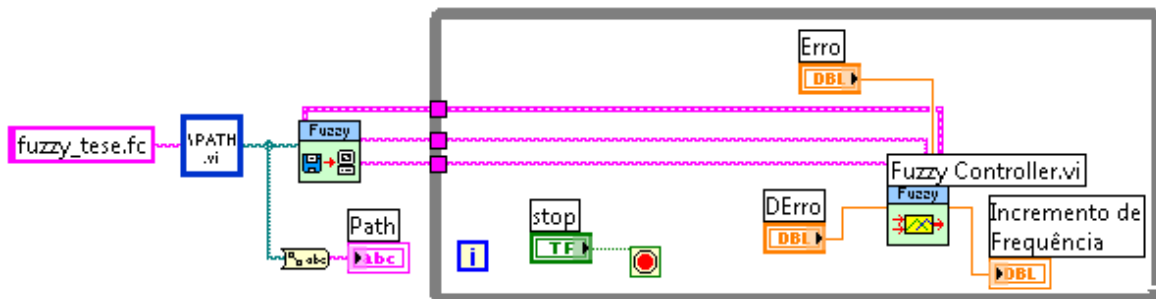
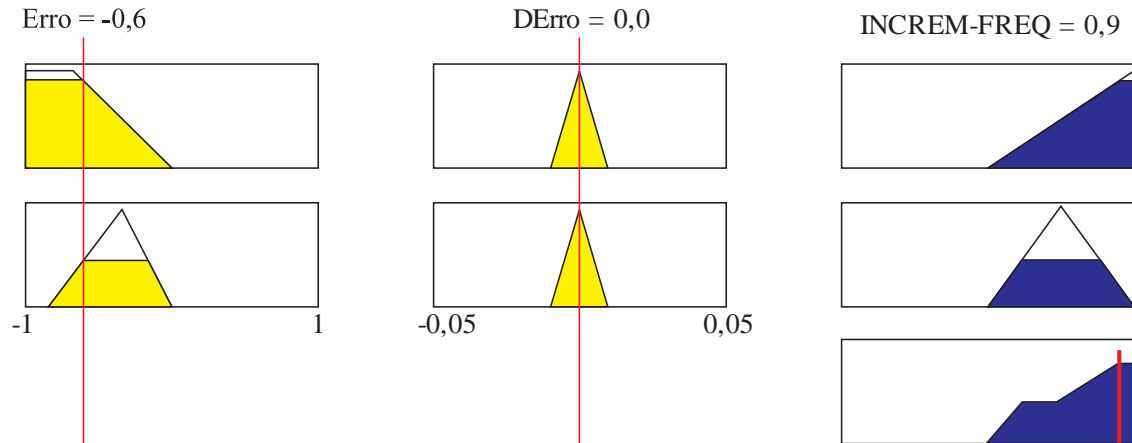


Figura 3.34 – Código fonte em LabVIEW do simulador *fuzzy*

Um exemplo prático de como o *fuzzy* processa a informação pode ser observado na Figura 3.35 para os dados de entrada: Erro = -0,6 e DErro = 0,0. Na *fuzzyficação* as entradas ativam as regras 4 (Neg Alta e Zero → Inc Pos Alto) e 11 (Neg Médio e Zero → Inc Pos Médio), que após *defuzzyficação* são obtidas duas áreas correspondentes que uma vez associadas, resulta numa terceira figura cujo centro do máximo corresponde a 0,9.

Tabela 3.5 – Entradas para teste de valores de saída

ENTRADAS		SAÍDA	ENTRADAS		SAÍDA
Erro	DErro	Incremento de Frequência	Erro	DErro	Incremento de Frequência
1,0000	0,0500	-1,0000	0,0500	-0,0010	-0,1474
-1,0000	-0,0500	1,0000	-0,0500	0,0010	0,1474
1,0000	-0,0500	-0,5000	0,0100	0,0001	-0,0432
-1,0000	0,0500	0,5000	-0,0100	-0,0001	0,0432
0,8000	0,0300	-0,9615	0,0100	-0,0001	-0,0415
-0,8000	-0,0300	0,9615	-0,0100	0,0001	0,0415
0,8000	-0,0300	-0,4732	0,0010	0,0001	-0,0048
-0,8000	0,0300	0,4732	0,0010	0,0001	0,0480
0,1000	0,0050	-0,2591	0,0010	0,0001	-0,0127
-0,1000	-0,0050	0,2591	0,0010	0,0001	0,0127
0,1000	0,0050	-0,2826	0,0001	0,0001	-0,0018
-0,1000	0,0050	0,2826	0,0001	0,0001	0,0018
0,0500	0,0010	-0,1529	0,0001	0,0001	-0,0005
-0,0500	-0,0010	0,1529	0,0001	0,0001	0,0005



A Figura 3.35 apresenta, de forma genérica e resumida, um diagrama com a implementação da lógica da programação *fuzzy*, que foi desenvolvida na linguagem G, utilizando o software LabVIEW™ 8.2, para controlar os motores dos conjuntos de impulsão (CMB e BST) do SADA Experimental (Sistema Automatizado de Distribuição de Água).

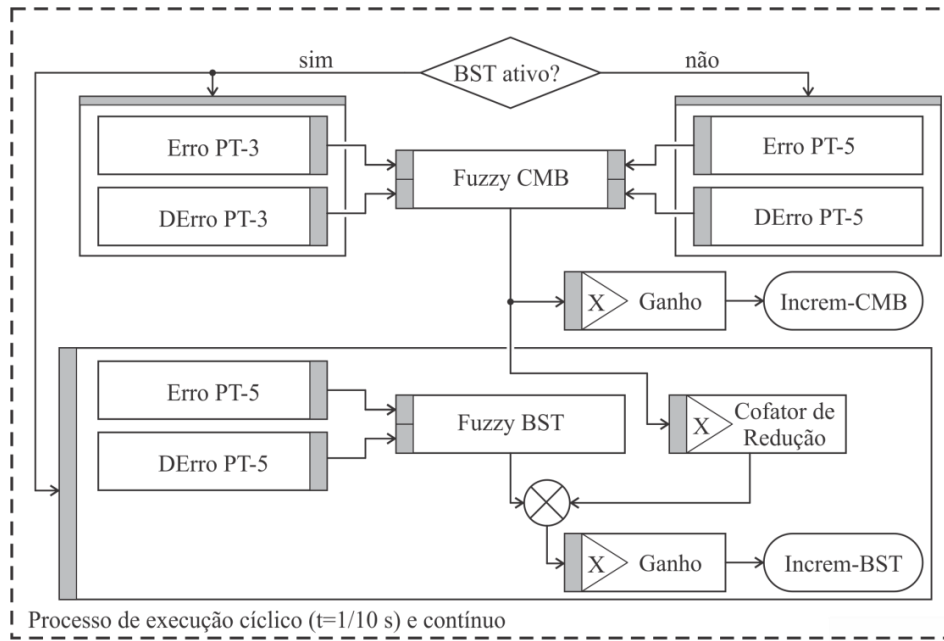


Figura 3.35 - Diagrama resumido da implementação da lógica de programação

O trecho de código da Figura 3.36, responsável pelo funcionamento do módulo *fuzzy*, faz parte do software supervisor de controle e aquisição de dados, desenvolvido para o SADA. Os arquivos com extensão *.fc (CMB.fc e BST.fc), cujos conteúdos são formados pelas variáveis de entrada e saída foram criados e configurados para possibilitar o funcionamento dos módulos *fuzzy*.

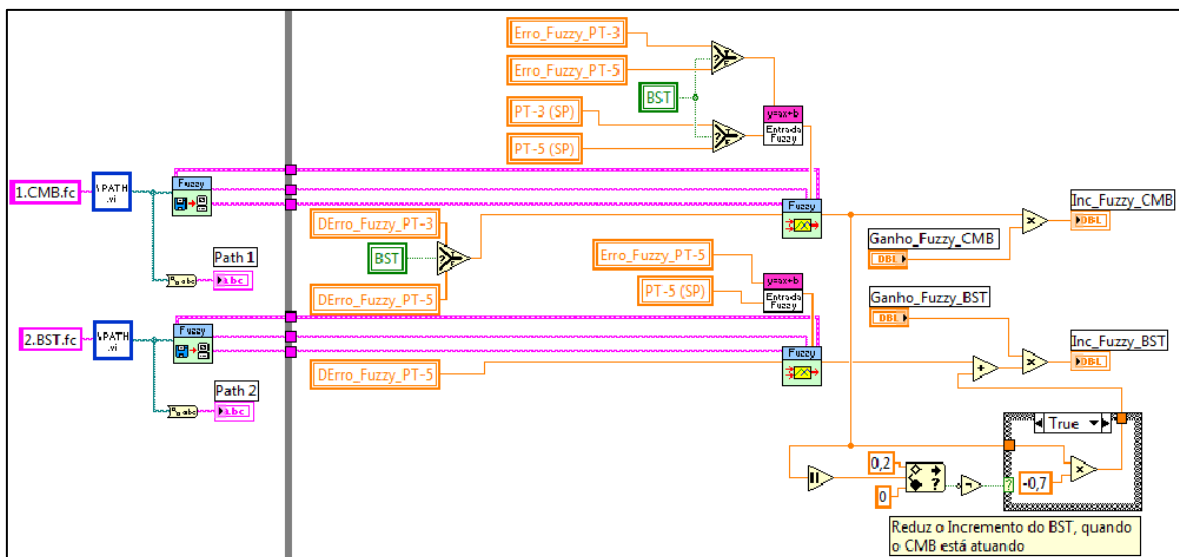


Figura 3.36 - Trecho do código LabVIEW™ para os controladores *fuzzy*

Para que os valores de entrada das variáveis Erro fiquem no intervalo $[-1, 1]$ é realizada uma parametrização (normalização) na alimentação de cada variável (subVI entrada *fuzzy*), antes do módulo *fuzzy* no trecho do programa apresentado.

Além das informações básicas exigidas pelo componente *fuzzy* o desenvolvimento de uma lógica computacional complementar também se fez necessária. Na identificação do sistema, durante os testes de funcionamento, foi detectado que, devido à associação em série dos motores (CMB+BST), o BST sofre a influência direta do CMB durante a sua aceleração e desaceleração.

Para mitigar este efeito, e melhorar a estabilidade do sistema, foi desenvolvido um trecho de código que utiliza um cofator que reduz o incremento do BST, quando o CMB está atuando. Também foi previsto no código um ajuste para aplicar um ganho nas saídas (valores incrementais de frequência), que podem ser modificados pelo usuário, em tempo de execução do programa.

Finalmente, como no sistema supervisorio existe a opção de operar a rede de abastecimento com apenas o conjunto de impulsão principal (CMB) – ver tópico 5.5.3 o trecho de código apresentado possui as configurações alternativas que permitem esta flexibilidade de funcionamento.

CAPÍTULO IV

RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 CONTROLADOR *FUZZY* APLICADO NA REDE EXPERIMENTAL

Como existe uma diferença de nível entre as zonas de abastecimento deve ser estabelecida uma diferença entre os valores das referências de pressão (*set points*) atribuídas aos ramais, para compensar a pressão que efetivamente estará disponível nas zonas de consumo da rede de abastecimento, sobretudo na zona alta.

No sistema real os pontos de distribuição para as zonas de consumo de uma rede de abastecimento possuem uma pressão associada. Como na rede experimental estes pontos descarregam livremente na atmosfera, as pressões nas saídas dos ramais da rede possuem pressão atmosférica.

Face ao exposto, existe outra condição necessária para a configuração da rede de abastecimento, que é a necessidade do fechamento parcial das válvulas de controle simuladoras de consumo CV-02 e CV-03, que deverão ser configuradas para um ângulo de fechamento que seja suficiente para criar uma pressão significativa, nas zonas de consumo da rede.

Para o funcionamento da rede de abastecimento, utilizando a opção de ativação do controlador, deverão ser informados ao sistema os níveis de pressão requeridos (*set points*), para os dois ramais de descarga (RD-1 e RD-2). O sistema deverá atingir, portanto, nos transdutores de pressão (PT-03) referente à zona baixa (ZB) e no (PT-05) referente à zona alta (ZA) os valores de pressão pré-estabelecidos.

4.2 ENSAIOS UTILIZANDO O CONTROLADOR *FUZZY*

ENSAIO 1 – VAZÃO MÁXIMA (CMB+BST+CV-1)

O Ensaio 1 demonstra a atuação do sistema de controle, utilizando os dois conjuntos de impulsão do sistema e válvula de controle (CMB+BST+CV-1) para equilibrar as pressões na rede. Nas duas configurações ensaiadas (Ensaio 1.1 e 1.2) o sistema partiu do repouso. A diferença é que na primeira configuração o sistema de controle inicia com a válvula de controle CV-1⁵ na posição 10° e na segunda a CV-1 inicia na posição 80°. Para fornecer as configurações necessárias, deve ser acessada a guia “CONTROLE” no programa do supervisor.

Parâmetros de configuração do Ensaio 1.1:

- Set point* de pressão para a zona baixa = 16 mca;
- Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca⁶;
- Válvula de controle CV-1 = 10°;
- Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 50°.

Após a realização das configurações descritas anteriormente e marcadas as caixas de controle (*check box*), para habilitar a CV-1 e o BST, deve ser dada a partida no sistema de controle e aquisição de dados, apertando-se o botão “Iniciar” (ver Figura 4.1).



Figura 4.1 - Botão iniciar e caixas de controle para ativar CV-1 e BST

⁵ Os 10° (dez graus) iniciais e finais da válvula de controle CV-1 não são utilizados, pois são ângulos que provocam modificações nulas ou desprezíveis nas pressões e vazões da rede.

⁶ O valor da pressão de *set point* para a zona alta é superior ao da zona baixa, compensando o desnível geométrico existente, para que as pressões disponibilizadas, nos ponto de consumo, sejam equivalentes.

No Ensaio 1.1, para que o sistema atingisse os níveis das pressões desejadas foram necessários aproximadamente 85 s (oitenta e cinco segundos), conforme o gráfico da Figura 4.2, que apresenta o acompanhamento do Erro Relativo⁷, em percentual. Após este tempo, o sistema estabilizou e entrou em regime permanente (ver Figura 4.3).

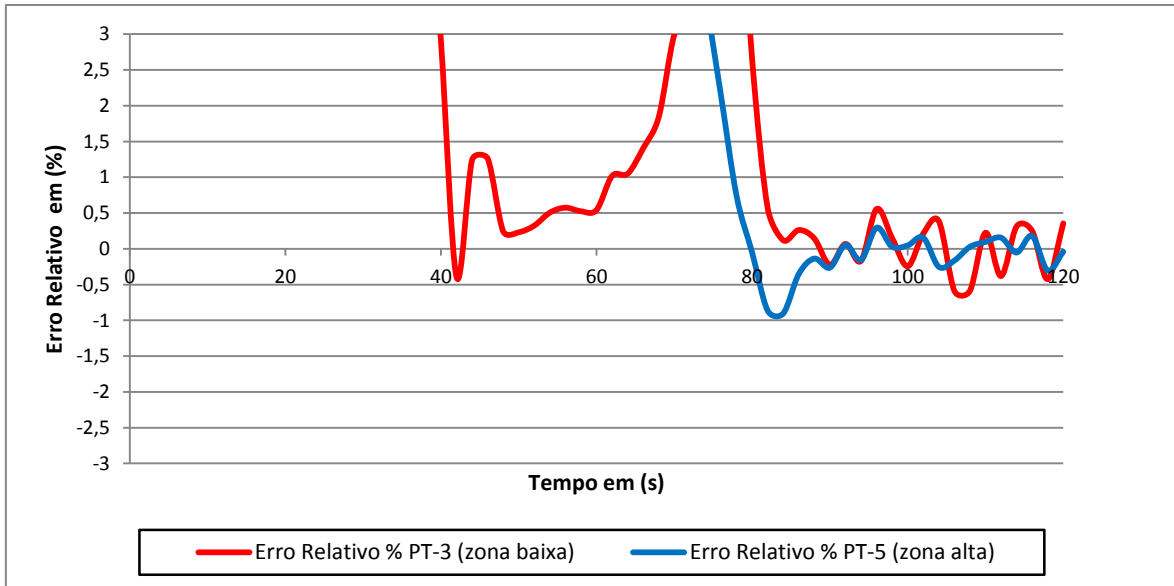


Figura 4.2 - Erro relativo das pressões do Ensaio 1.1

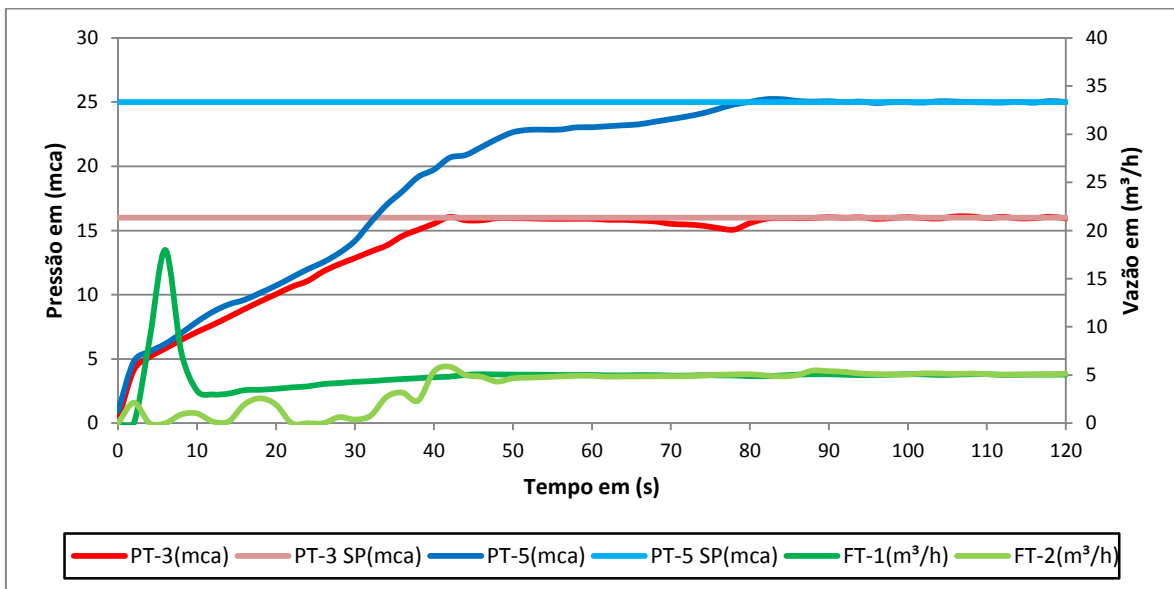


Figura 4.3 - Variáveis controladas para o Ensaio 1.1

⁷ O Erro relativo corresponde ao valor da diferença entre o *set point* de pressão atribuído para a zona de consumo da rede e o valor da pressão instantânea medida, dividido pelo *set point*. Para expressar o resultado obtido em %, basta multiplicar por 100.

Pela resposta do sistema de controle, constata-se que a sua atuação foi satisfatória, pois conseguiu atingir as pressões em um período de tempo relativamente curto, sem que houvesse nenhum efeito indesejado, por exemplo, sobressinal⁸. Todas as variáveis de controle atuaram para o equilíbrio do sistema de abastecimento, conforme pode ser observado na Figura 4.4.

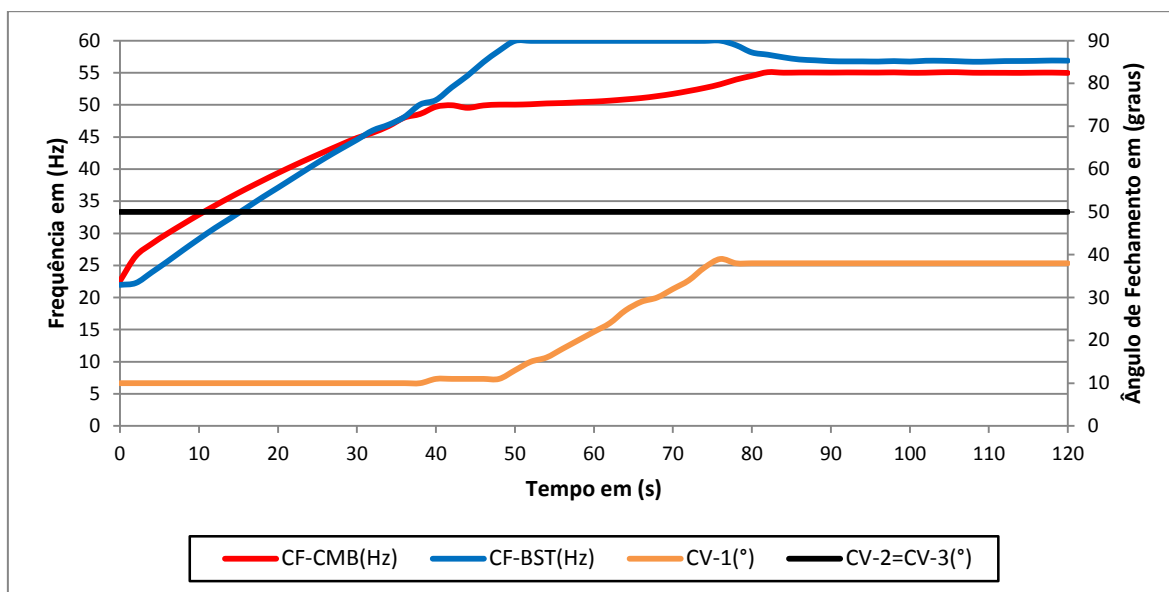


Figura 4.4 - Variáveis de controle para o Ensaio 1.1

A seguir estão relacionados os parâmetros das configurações necessárias para a realização do Ensaio 1.2:

- a) *Set point* de pressão para a zona baixa = 16 mca;
- b) *Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca;
- c) Válvula de controle CV-1 = 80°;
- d) Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 50°.

No Ensaio 1.2, para que o sistema atingisse os níveis das pressões desejadas, foram necessários aproximadamente 55 s (tempo de assentamento), conforme pode ser

⁸ Sobressinal é um erro de regime, que representa uma ultrapassagem indesejada no valor da variável a ser controlada, em relação ao valor de referência desejado. O limite percentual dessa ultrapassagem, em relação ao valor de referência, pode ser uma exigência de projeto para o controlador, que depende da criticidade do processo a ser controlado.

verificado na Figura 4.5. Após este tempo o sistema entrou em regime permanente (ver Figura 4.6).

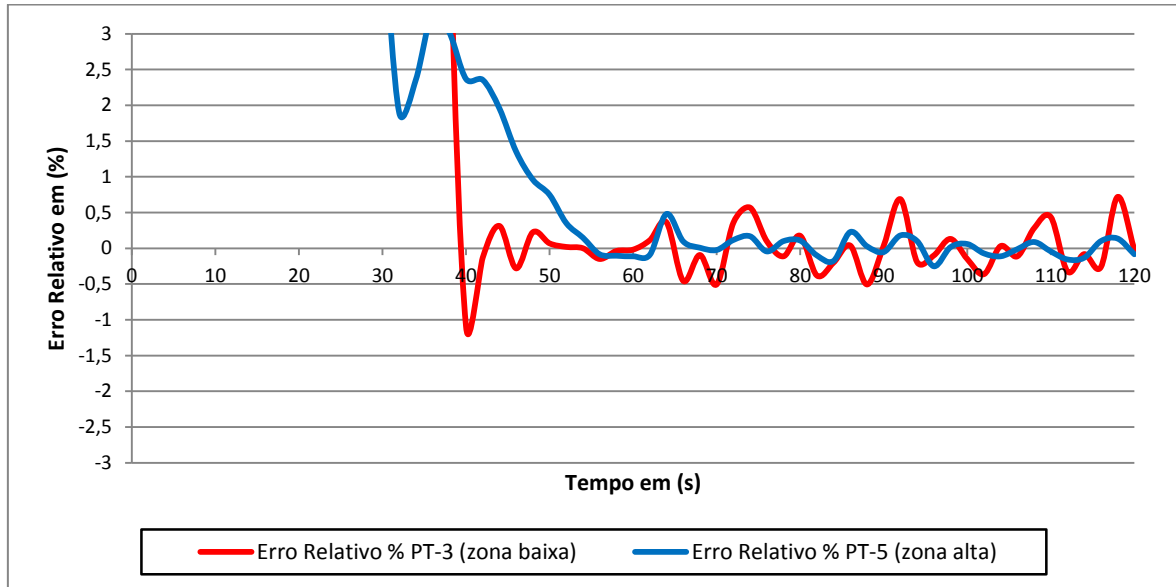


Figura 4.5 - Erro relativo das pressões do Ensaio 1.2

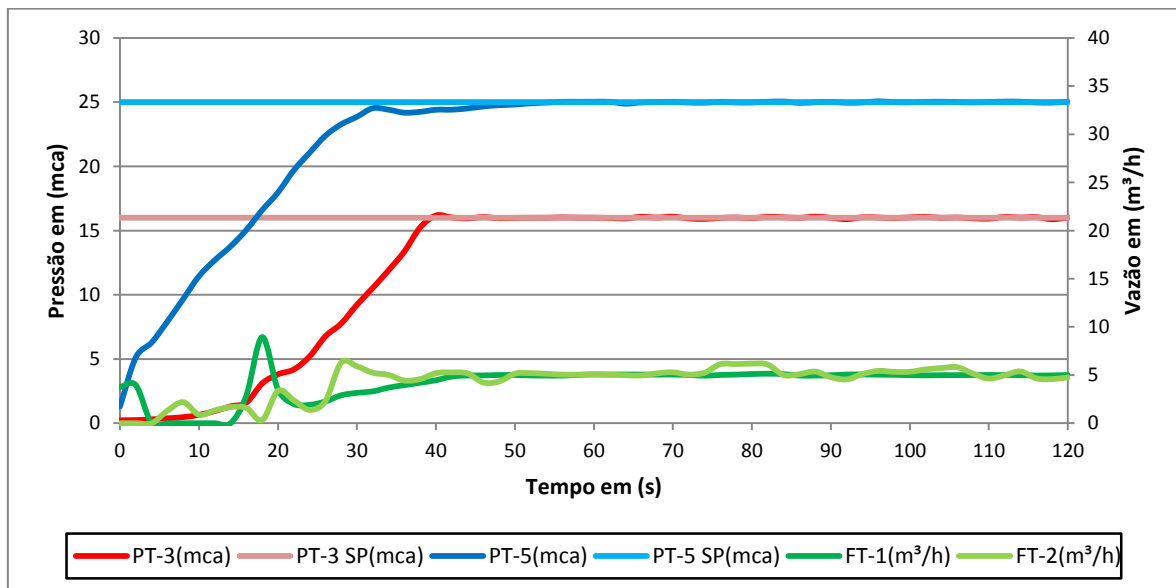


Figura 4.6 - Variáveis controladas para o Ensaio 1.2

É importante ressaltar, que ficou evidente na comparação dos dois Ensaio (1.1 *versus* 1.2), que a posição inicial da válvula de controle CV-1 pode determinar combinações diferentes nos elementos de controle, para um mesmo ponto de equilíbrio das pressões na rede de abastecimento. No ensaio 1.2 (ângulo CV-1 inicial = 80°) o sistema

conseguiu o equilíbrio do sistema 30 s (trinta segundos) mais rápido do que no Ensaio 1.1 (ângulo da CV-1 inicial = 50°).

Pela resposta do sistema de controle, constata-se que a sua atuação foi satisfatória, pois conseguiu atingir as pressões em um período de tempo relativamente curto, sem que houvesse efeito indesejado, por exemplo, sobressinal. Todas as variáveis de controle atuaram para o equilíbrio do sistema de abastecimento, conforme pode ser observado na Figura 4.7.

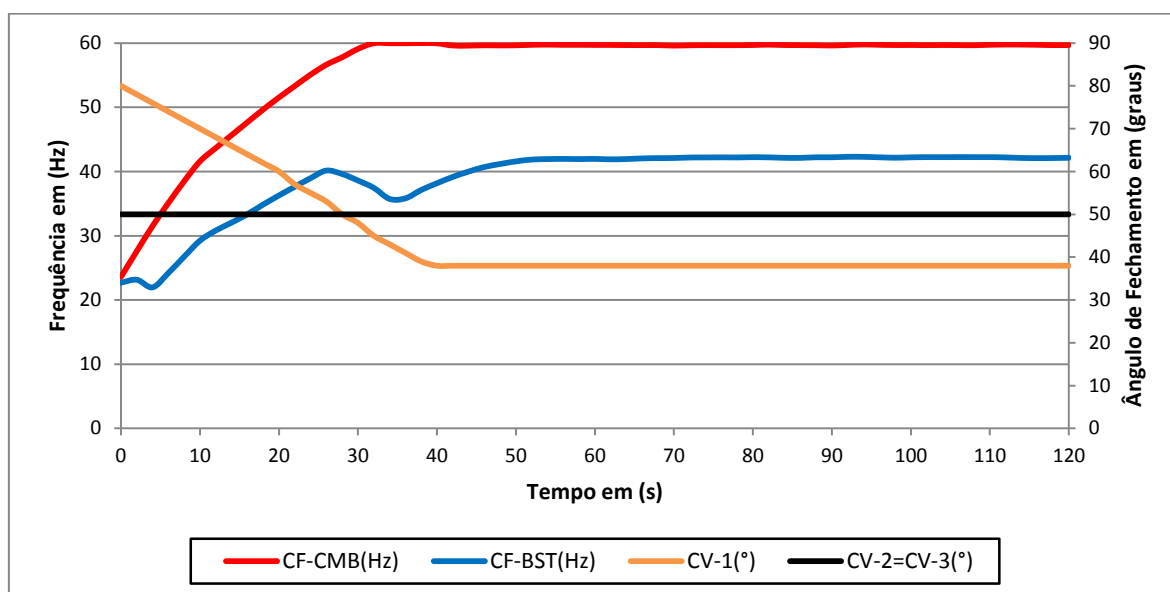


Figura 4.7 - Variáveis de controle para o Ensaio 1.2

ENSAIO 2 - REAÇÃO A DISTÚRBIOS (CMB+BST+CV-1)

Um sistema de controle para ser considerado robusto deve ser capaz de suportar distúrbios⁹ sem que isso o leve a instabilidade. Para promover distúrbios na rede de abastecimento foram utilizados registros manuais, instalados nas saídas das zonas de consumo da rede de abastecimento, os quais foram fechados bruscamente por um período de aproximadamente 5 s (cinco segundos).

No gráfico da Figura 4.8 observa-se que no tempo 120 s (cento e vinte segundos) foi provocado um distúrbio na zona baixa. O efeito do distúrbio foi o aumento de pressão

⁹ Distúrbios são situações reais que atuam de forma aleatória sobre a variável de saída de um sistema, provocando uma instabilidade momentânea.

registrado nas zonas de consumo da rede (Figura 4.9), sendo mais expressivo na zona baixa. No gráfico da Figura 4.10 observa-se que o sistema de controle percebeu as modificações nas pressões do sistema, de forma instantânea, procurando outra combinação das variáveis de controle para reestabelecer o equilíbrio das pressões na rede de abastecimento.

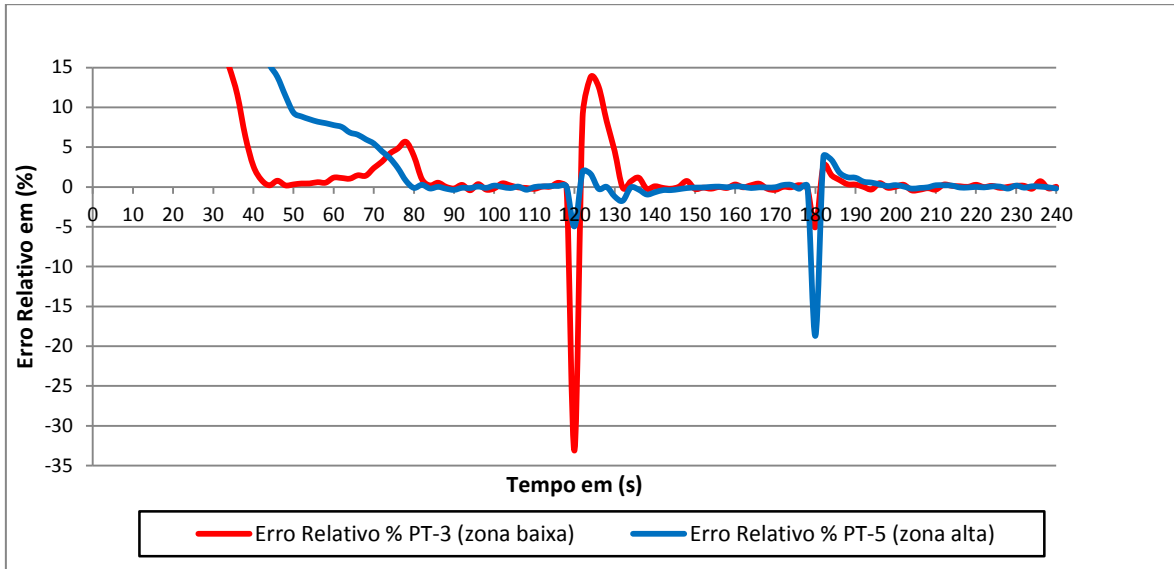


Figura 4.8 - Erro relativo das pressões do Ensaio 2

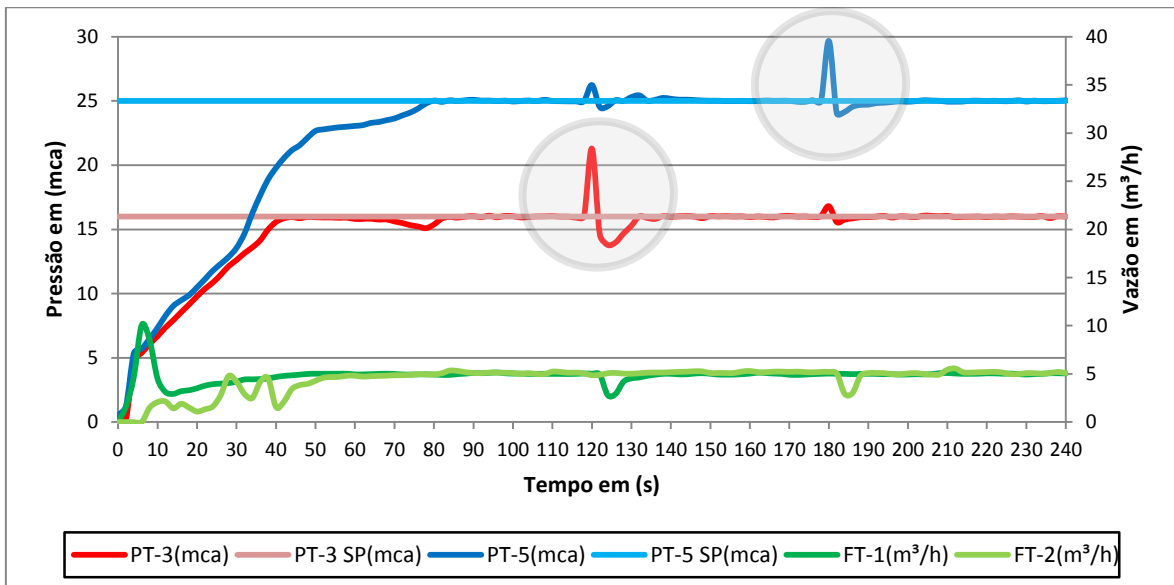


Figura 4.9 - Variáveis controladas para o Ensaio 2 (distúrbios)

Ainda no gráfico da Figura 4.8, observa-se que no tempo 180 s (cento e oitenta segundos), foi provocado um segundo distúrbio, desta feita na zona alta (ver Figura 4.9), utilizando o registro manual, instalado na saída desta zona de consumo da rede de abastecimento. Neste caso, constata-se que, para zona alta, os distúrbios são menos impactantes para o sistema de controle do que os provocados na zona baixa. Isto pode ser facilmente verificado no gráfico da Figura 4.10, visto que as mudanças efetuadas pelo controlador nas variáveis de controle, para reestabelecer o equilíbrio das pressões na rede, são pouco significativas.

Este ensaio mostra que o sistema de controle tem um tempo de resposta rápido e satisfatório, em relação às mudanças de operação a ele impostas.

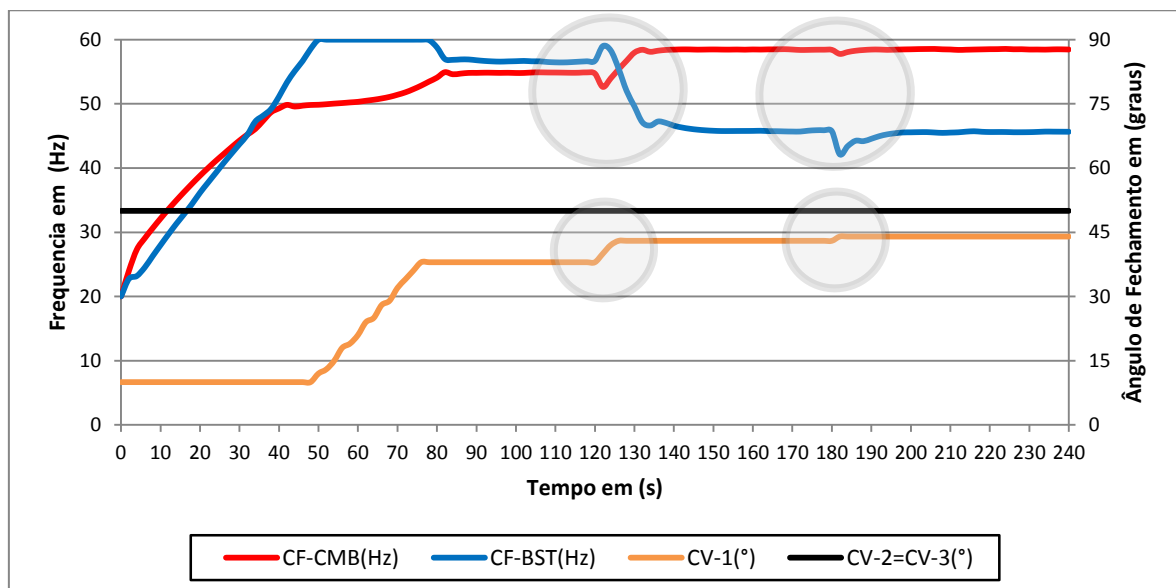


Figura 4.10 - Variáveis de controle para o Ensaio 2 (distúrbios)

ENSAIO 3 – MUDANÇA DE REFERÊNCIA (*SET POINT*)

Com a finalidade de demonstrar a flexibilidade do sistema, que pode funcionar em diversos *set points* de pressão, foi realizado este ensaio.

Com o sistema de bombeamento funcionando em regime permanente, equilibrado nos seguintes *set points* de pressão: 16 mca para a zona baixa e 25 mca para a zona alta e sistema de controle habilitado, foram atribuídos por 6 (seis) vezes novos valores para os *set points* de pressão para as zonas de consumo, da rede de abastecimento.

A seguir estão relacionados, com base na Figura 4.11, os valores das pressões para as zonas de consumo da rede e em que tempo elas foram informadas ao sistema de controle.

1. Zona baixa = 14 mca; zona alta = 23 mca e $t = 30$ s.
2. Zona baixa = 13 mca; zona alta = 20 mca e $t = 85$ s.
3. Zona baixa = 14 mca; zona alta = 23 mca e $t = 110$ s.
4. Zona baixa = 16 mca; zona alta = 25 mca e $t = 150$ s.
5. Zona baixa = 10 mca; zona alta = 19 mca e $t = 180$ s.
6. Zona baixa = 16 mca; zona alta = 25 mca e $t = 215$ s.

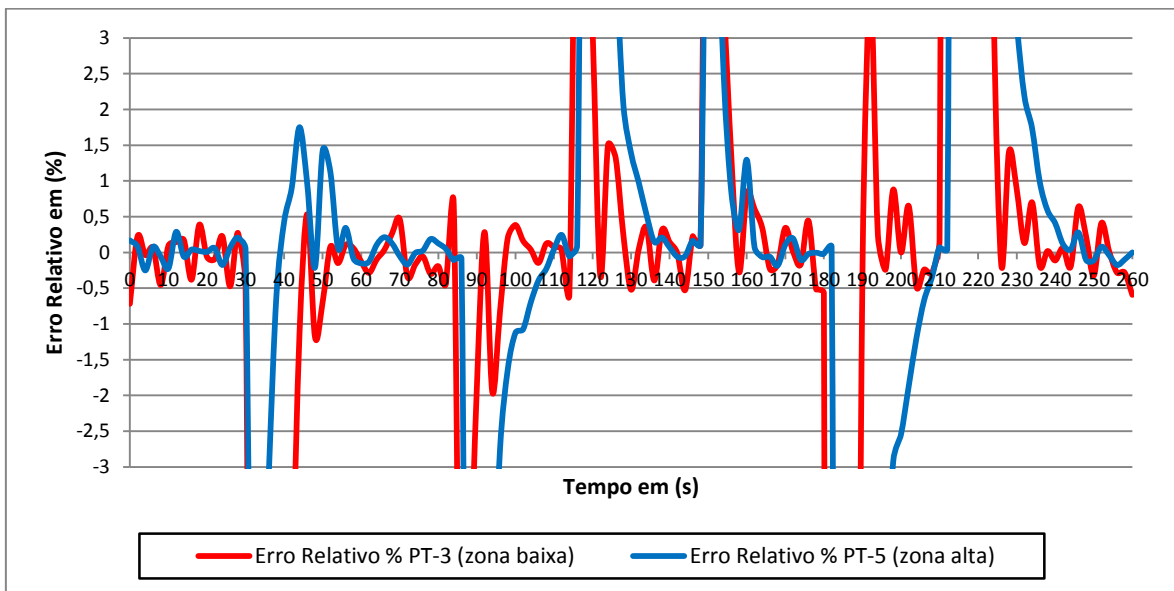


Figura 4.11 - Erro relativo das pressões do Ensaio 3

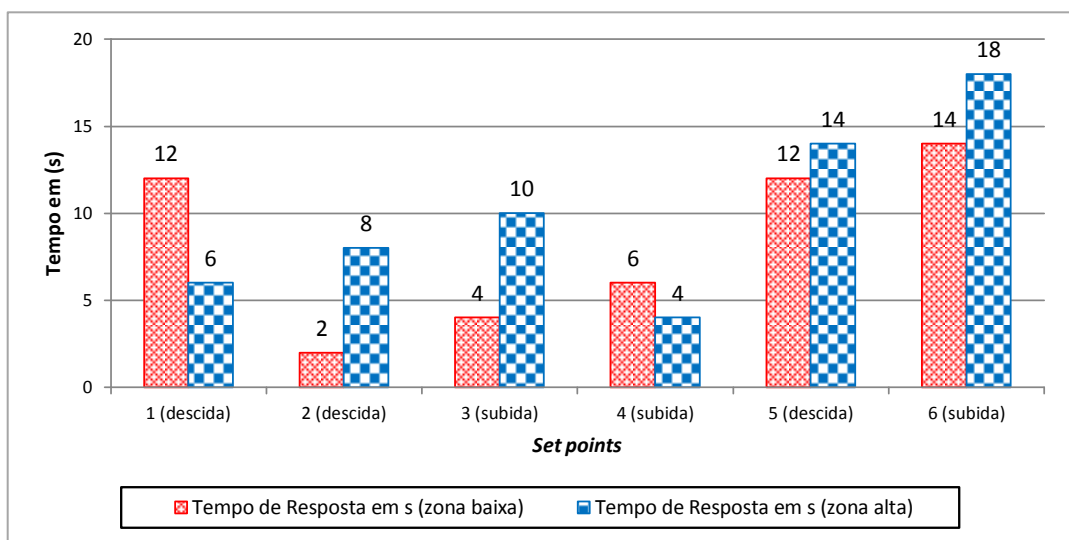


Figura 4.12 - Tempos de resposta para os set points de pressão atribuídos

O gráfico da Figura 4.12 apresenta os tempos de resposta, em cada modificação dos 6 (seis) *set points* de pressão atribuídos, para as zonas da rede de abastecimento.

Observando o gráfico da Figura 4.13 verifica-se que diante das modificações realizadas nas referências (*set points*), o sistema de controle acompanhou todas elas. No gráfico da Figura 4.14 fica evidente que o controlador realizou as modificações necessárias, sempre priorizando a mudança da frequência dos motores em detrimento da utilização da válvula CV-1, pois esta variável de controle é muito lenta se comparada com a ação dos motores.

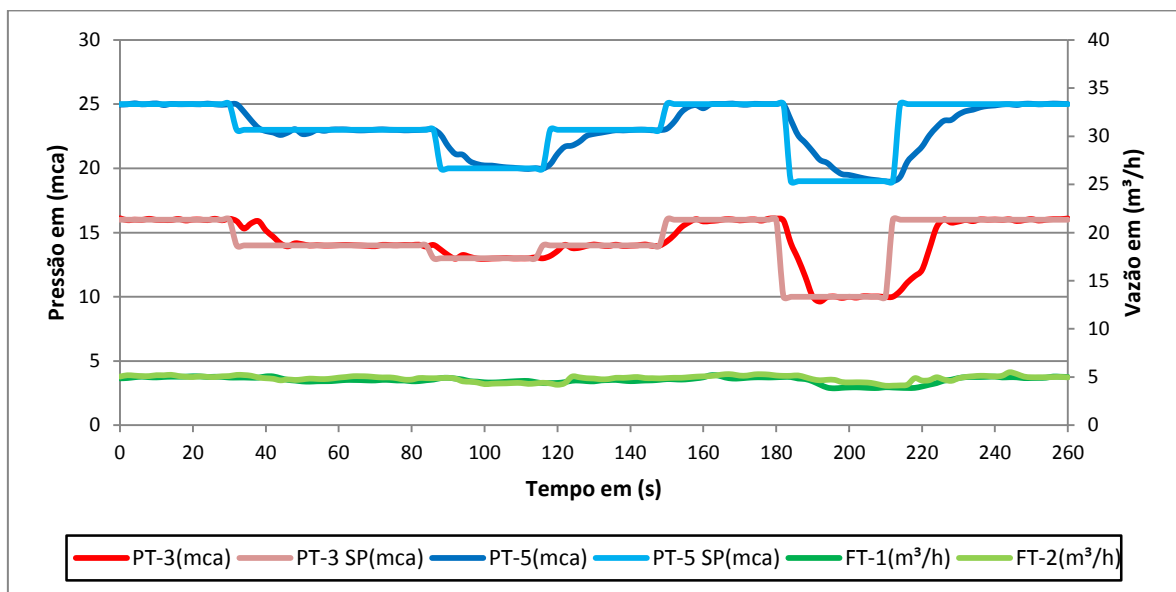


Figura 4.13 - Variáveis controladas para o Ensaio 3 (*set point*)

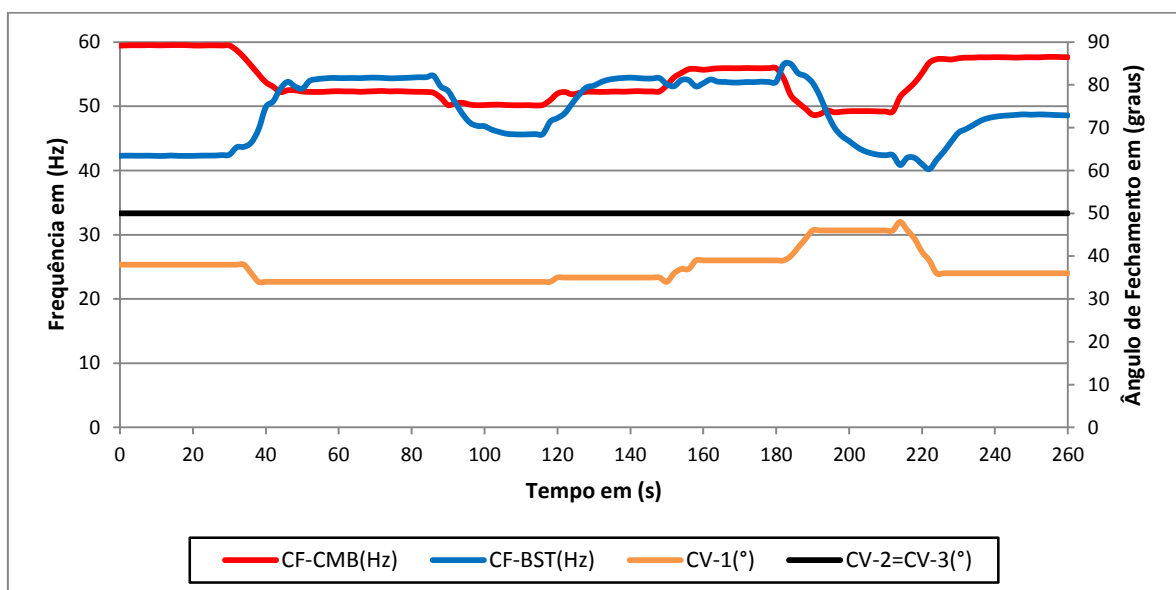


Figura 4.14 - Variáveis de controle para o Ensaio 3 (*set point*)

ENSAIO 4 – VAZÃO MÍNIMA (CMB+BST+CV-1)

O sistema de controle também foi testado em configurações de contorno onde as válvulas simuladoras de consumo CV-2 e CV-3 foram configuradas no ângulo de fechamento de 70°, estabelecendo para o sistema um consumo mínimo.

Da mesma forma que ocorreu no Ensaio 1, o Ensaio 4 foi realizado de duas formas: com a CV-1 configurada inicialmente em 10° (Ensaio 4.1) e em 80° (Ensaio 4.2).

A seguir estão relacionados os parâmetros das configurações necessárias para a realização do Ensaio 4.1:

- a) *Set point* de pressão para a zona baixa = 16 mca;
- b) *Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca;
- c) Válvula de controle CV-1 = 10°;
- d) Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 70°.

No gráfico da Figura 4.15 observa-se que as pressões entram em regime permanente por volta dos 60 s (sessenta segundos), sem que haja qualquer efeito indesejado em termos de controle (ver Figura 4.16).

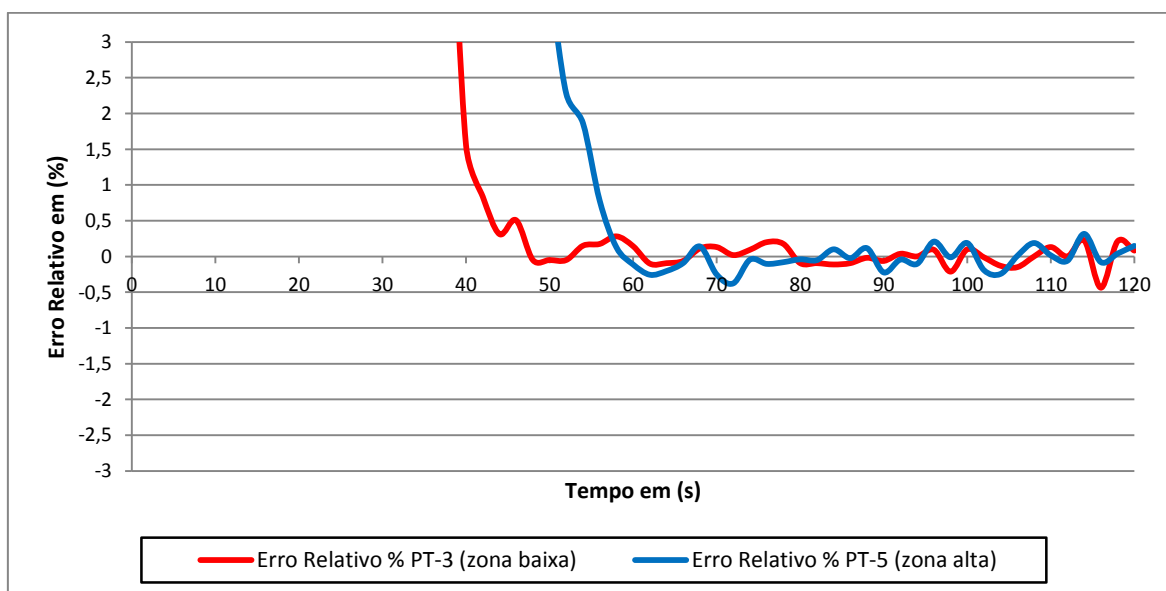


Figura 4.15 - Erro relativo das pressões do Ensaio 4.1

Neste ensaio ficou comprovado que o sistema de controle quase não necessitou utilizar a CV-1, uma vez que os motores foram suficientes para estabelecer as pressões

necessárias para as zonas de consumo da rede de abastecimento (ver Figura 4.17). Isto acontece pois os níveis de pressão na rede, nesta configuração, exige um baixo nível de potência, por parte do sistema de bombeamento.

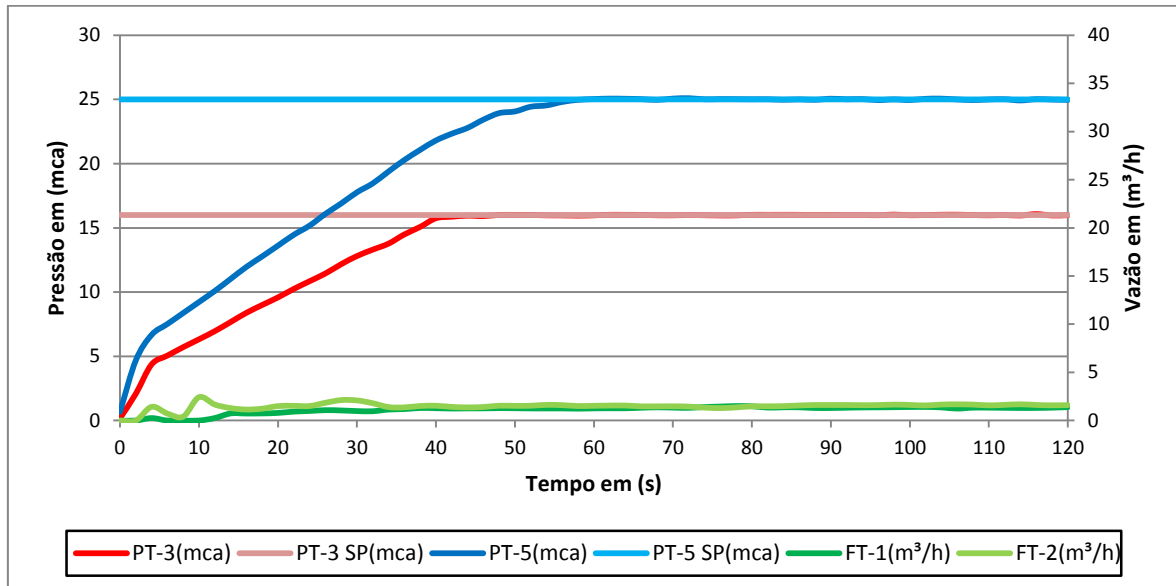


Figura 4.16 - Variáveis controladas para o Ensaio 4.1 (vazão mínima)

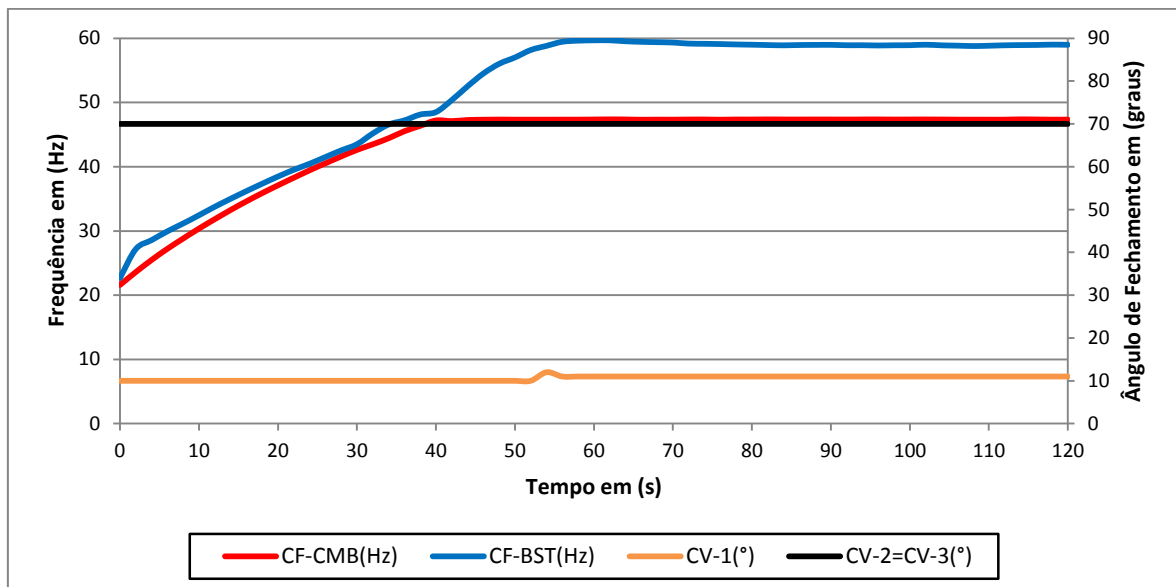


Figura 4.17 - Variáveis de controle para o Ensaio 4.1 (vazão mínima)

A seguir estão relacionados os parâmetros das configurações necessárias para a realização do Ensaio 4.2:

- a) *Set point* de pressão para a zona baixa = 16 mca;

- b) *Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca;
- c) Válvula de controle CV-1 = 80°;
- d) Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 70°.

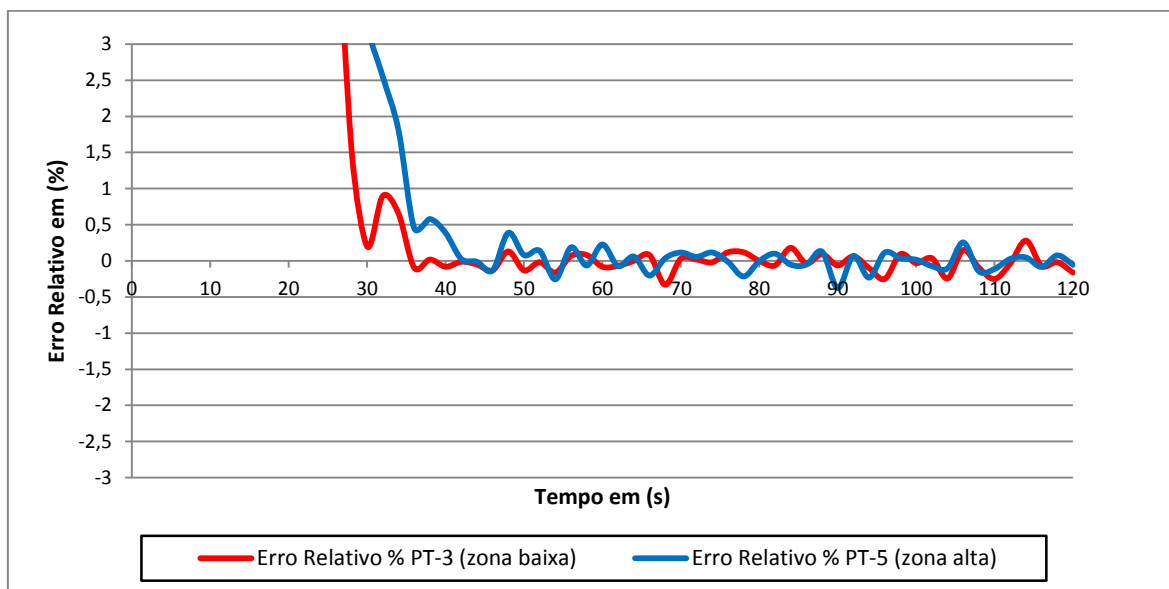


Figura 4.18 - Erro relativo das pressões do Ensaio 4.2

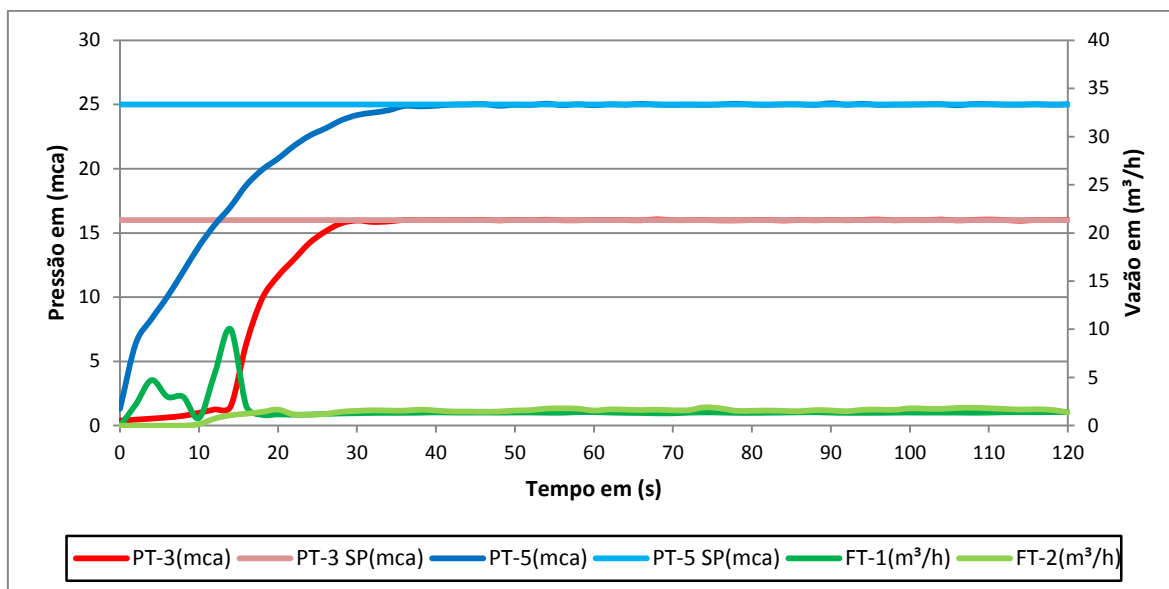


Figura 4.19 - Variáveis controladas para o Ensaio 4.2 (vazão mínima)

No gráfico da Figura 4.18 observa-se que as pressões entram em regime permanente, por volta dos 40 s (quarenta segundos), sem que haja qualquer efeito

indesejado, em termos de controle (ver Figura 4.19). O Ensaio 4.2 foi mais rápido do que o Ensaio 4.1 em 20 s (vinte segundos).

No Ensaio 4.2 o posicionamento inicial da CV-1 favoreceu o controle do ponto de vista do tempo. Do ponto de vista da utilização da CV-1, que provoca uma perda de carga para reduzir as pressões na zona baixa, ela estacionou em 50°. Isto aconteceu pois a CV-1 mesmo atuando de forma contínua desde o início do Ensaio 4.2, no sentido da sua abertura, devido a sua baixa velocidade de reconfiguração, perdeu prioridade no algoritmo de controle, para os motores do sistema de bombeamento (ver Figura 4.20).

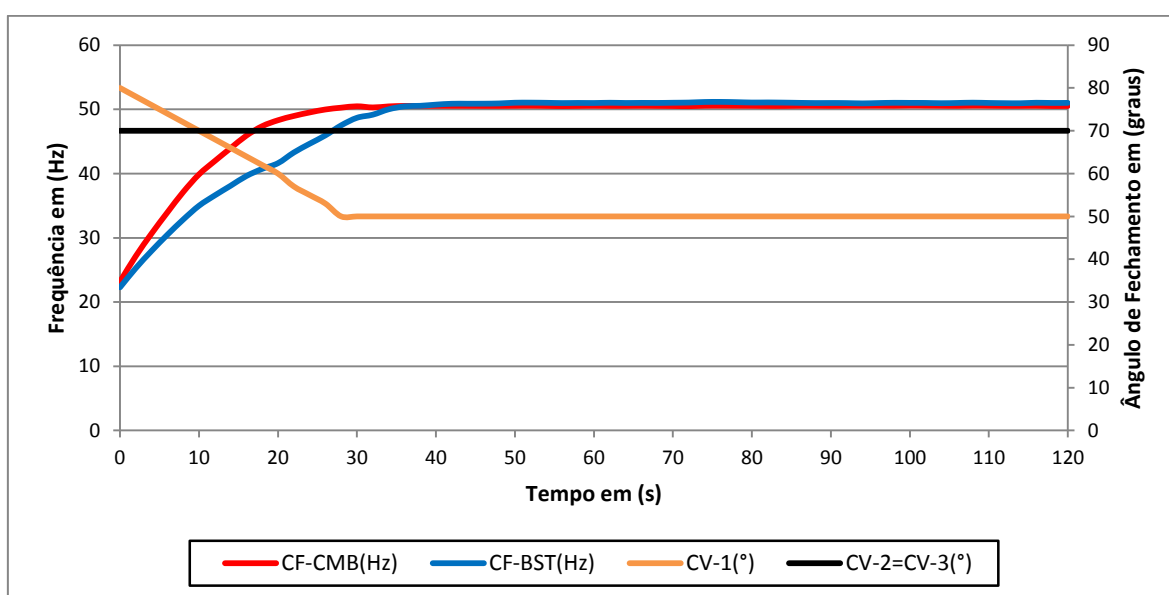


Figura 4.20 - Variáveis de controle para o Ensaio 4.2 (vazão mínima)

ENSAIO 5 – VAZÃO MÍNIMA (CMB+CV-1)

O sistema de controle, neste ensaio, foi configurado para controlar as pressões na rede utilizando, apenas, um conjunto de impulsão (CMB), associado à operação da válvula de controle CV-1. Utilizando a mesma metodologia realizada nos ensaios anteriores, este ensaio foi realizado, também, em duas situações diferentes. No primeiro ensaio (Ensaio 5.1) a válvula de controle CV-1 inicia com 10°; no segundo ensaio (Ensaio 5.2) a válvula de controle CV-1 inicia com 80°.

A seguir estão relacionados os parâmetros das configurações necessárias para a realização do Ensaio 5.1:

- Set point de pressão para a zona baixa = 16 mca;

- b) *Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca;
- c) Válvula de controle CV-1 = 10°;
- d) Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 70°.

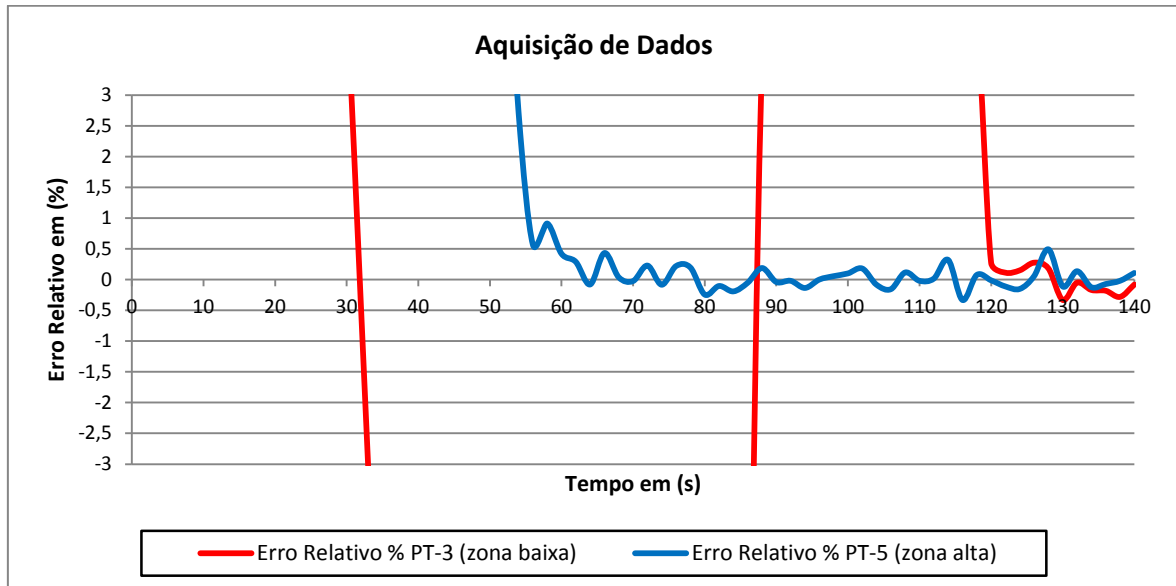


Figura 4.21 - Erro relativo das pressões do Ensaio 5.1

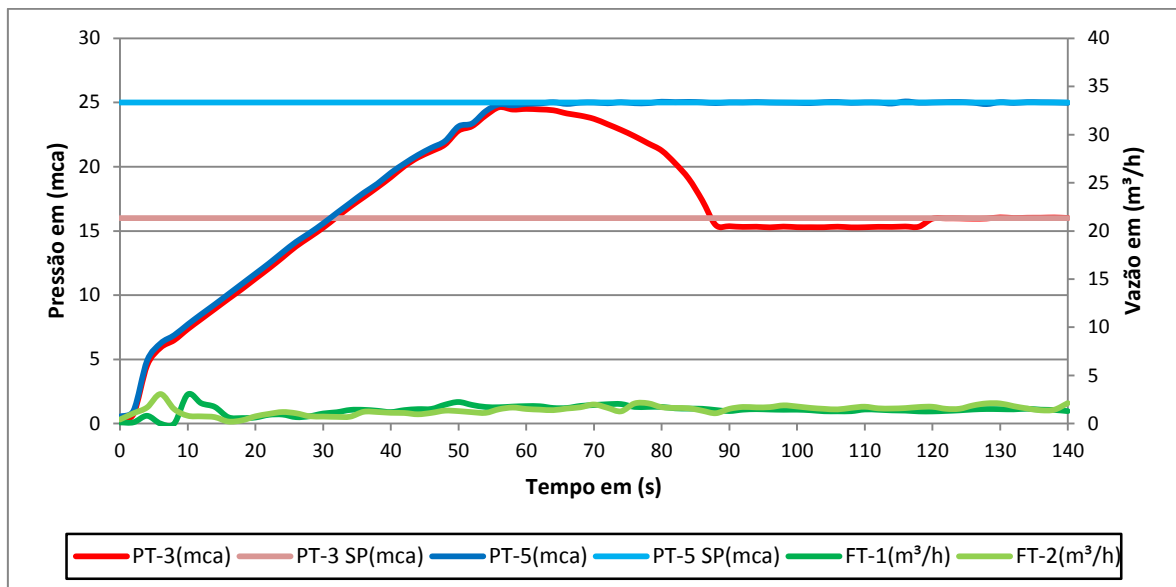


Figura 4.22 - Variáveis controladas para o Ensaio 5.1 (vazão mínima)

No gráfico da Figura 4.22 observa-se que as pressões entram em regime permanente por volta dos 120 s (cento e vinte segundos). Este ensaio expõe

definitivamente a lentidão do deslocamento da válvula de controle CV-1, em relação aos conversores que configuram os motores dos sistemas de bombeamento (ver Figura 4.23).

Observando o gráfico da Figura 4.21 verifica-se que no momento em o sistema de controle detecta que a pressão na zona baixa é atingida ele comanda a CV-1. Isto acontece por volta dos 32 s (trinta e dois segundos). Como o sistema continua a acelerar o CMB para atingir o nível de pressão para a zona alta e a CV-1 demora a atingir um ângulo de abertura capaz de reduzir, em tempo hábil, as pressões na zona baixa, é provocado um sobressinal na zona baixa (ver Figura 4.22).

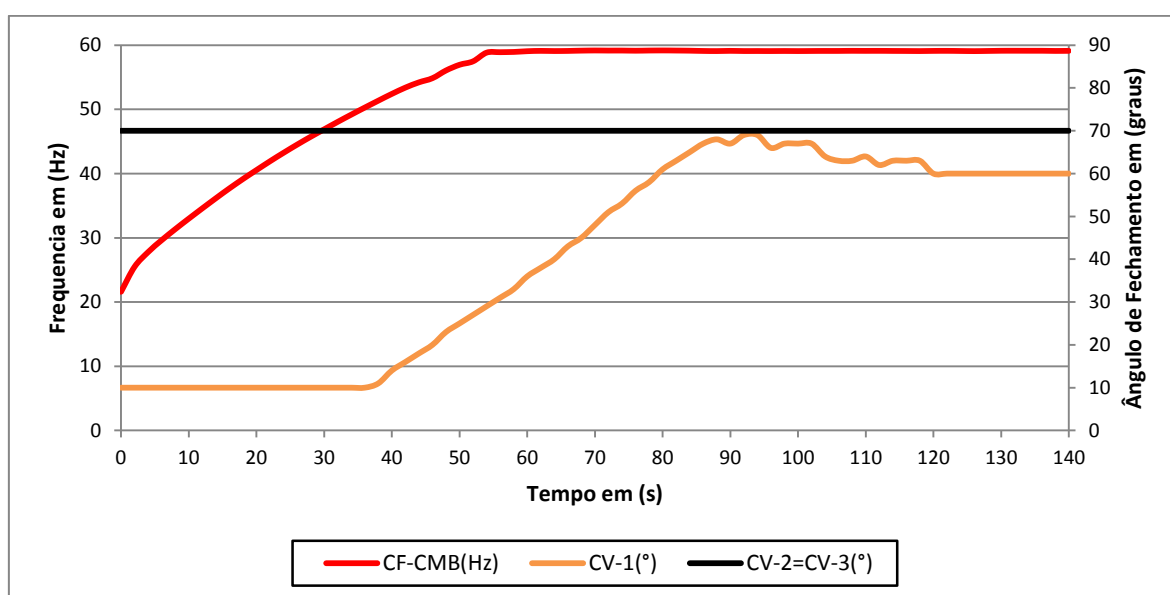


Figura 4.23 - Variáveis de controle para o Ensaio 5.1 (vazão mínima)

A seguir estão relacionados os parâmetros das configurações necessárias para a realização do Ensaio 5.2:

- Set point* de pressão para a zona baixa = 16 mca;
- Set point* de pressão para a zona alta = 25 mca;
- Válvula de controle CV-1 = 80°;
- Válvulas simuladoras de consumo CV-2 = CV-3 = 70°.

No gráfico da Figura 4.25 observa-se que as pressões entram em regime permanente, por volta dos 95 s (noventa e cinco segundos). Em relação ao Ensaio 5.1, as pressões entraram em regime permanente 25 s (vinte e cinco segundos) mais rápido. Mais uma vez fica comprovado que o posicionamento inicial da CV-1 influencia no tempo de

resposta necessário para que o sistema de controle consiga atingir e equilibrar as pressões nas zonas de consumo da rede de abastecimento.

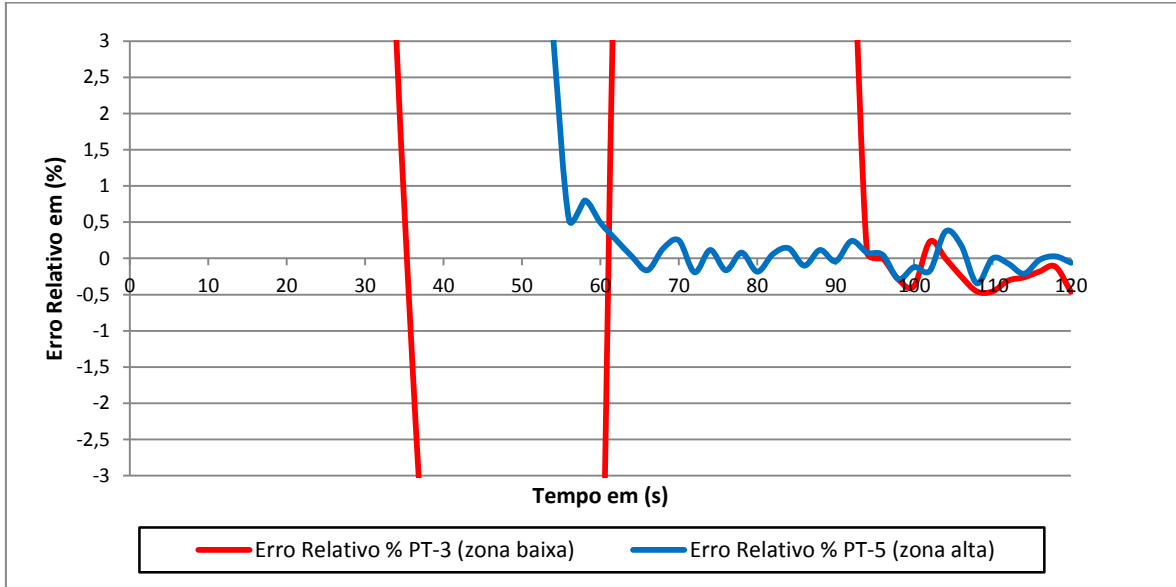


Figura 4.24 - Erro relativo das pressões do Ensaio 5.2 (vazão mínima)

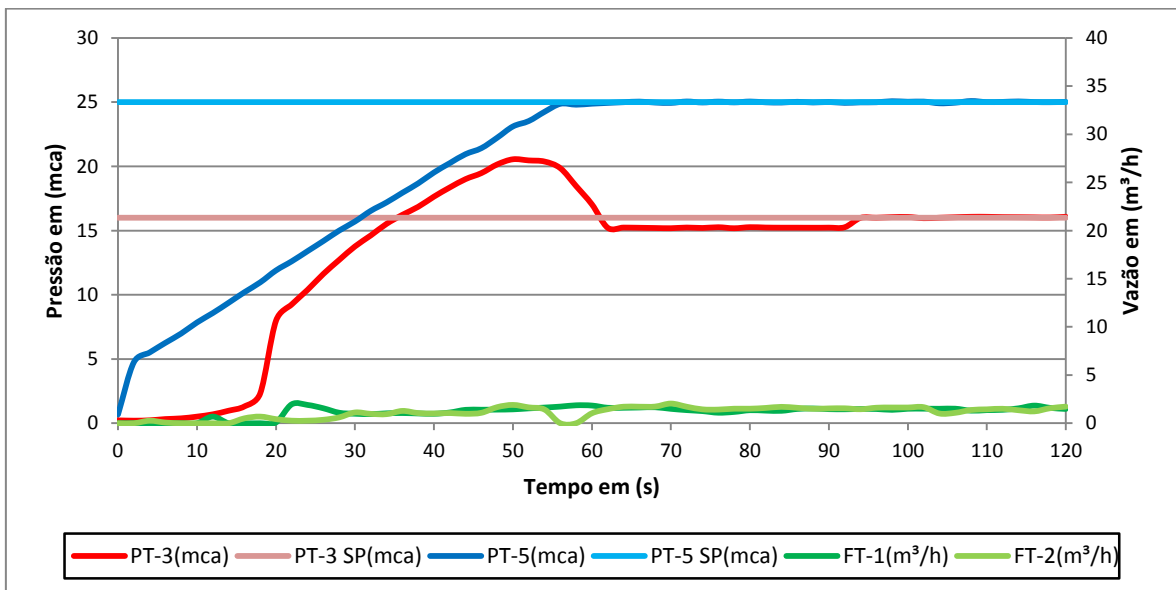


Figura 4.25 - Variáveis controladas para o Ensaio 5.2 (vazão mínima)

No início a CV-1 começa diminuindo o ângulo de fechamento (abrindo), para aumentar a pressão na zona baixa. Por volta dos 35 s (trinta e cinco segundos), o sistema percebe que a pressão de serviço para a zona baixa foi atingido e para de atuar. Entretanto, como o sistema de controle continua acelerando o CMB para atingir o nível de pressão

necessário para a zona alta, a válvula CV-1 começa novamente atuar, por volta dos 45 s (quarenta e cinco segundos), para retirar o excesso de pressão registrado na zona baixa (ver Figura 4.26).

Como a válvula se encontrava num ponto mais próximo do local onde ela deveria ser configurada para que a zona baixa estabilizasse no nível de pressão desejado, verificou-se que o sobressinal deste ensaio foi inferior ao do Ensaio 5.1 (ver Figura 4.25).

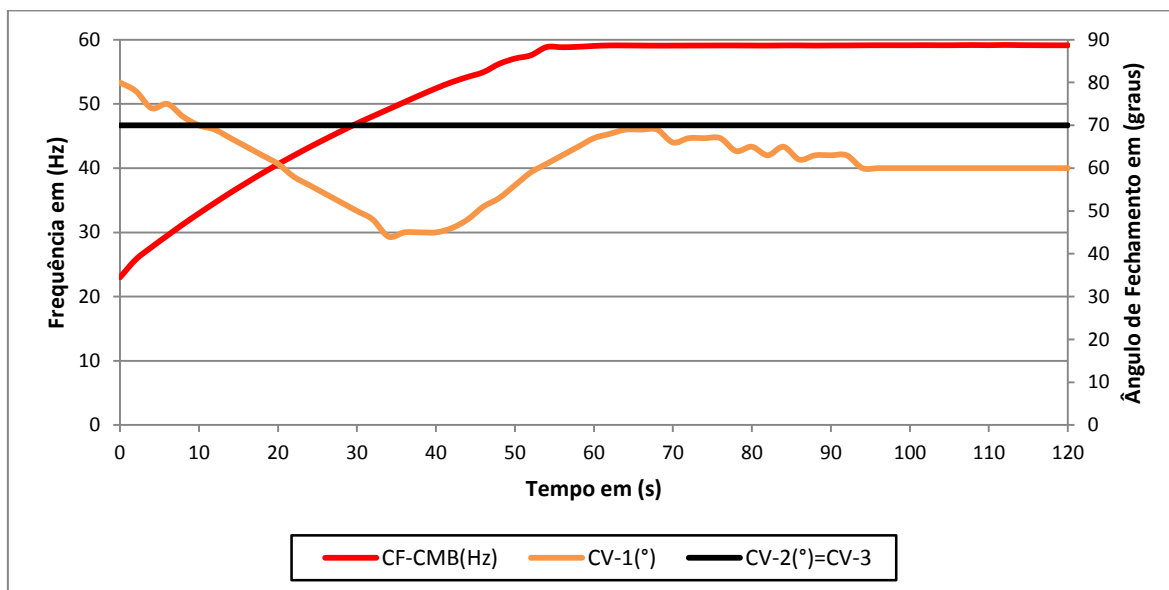


Figura 4.26 - Variáveis de controle para o Ensaio 5.2 (vazão mínima)

Em sistemas de abastecimento o sobressinal não compromete o seu desempenho, sobretudo em condições extremas, como a que foi ensaiada, quando o sistema sai do repouso, desde que não ultrapasse o nível máximo de pressão suportado pela tubulação.

4.3 CONFIGURAÇÕES DA REDE PARA ANÁLISE ENERGÉTICA

4.3.1 Introdução

O Sistema de controle desenvolvido, apoiado na lógica *fuzzy*, regras e condicionantes configuráveis pelo usuário, consegue ajustar automaticamente a impulsão do sistema, sustentando os níveis de pressão desejados para as duas zonas de abastecimento da rede experimental. Como o sistema de controle é capaz de manter o sistema de bombeamento da rede de abastecimento funcionando em torno dos níveis

desejados de pressão e vazão, ele já pode ser considerado como otimizado, do ponto de vista hidráulico. No entanto, do ponto de vista energético, deverá ser realizado um estudo para determinar em que situações o sistema deverá operar com um ou com os dois conjuntos de impulsão.

Visando este estudo, foram criadas alternativas e condições diversas de funcionamento, capazes de possibilitar uma análise energética comparativa, considerando as duas condições de operação possíveis, ou seja, o sistema funcionando com os dois conjuntos motobomba (CMB+BST) e com apenas um conjunto, o (CMB).

Considerando que os sistemas de abastecimento devem dar suporte ao fornecimento de uma demanda de consumo variável, o sistema experimental foi modelado para atender a esta característica.

Nos próximos tópicos é apresentada a modelagem necessária para criar faixas de consumo nas zonas da rede de abastecimento, além da realização de vários ensaios para possibilitar medições e comparações energéticas.

4.3.2 Válvulas Simuladoras de Consumo

Para simular uma demanda variável no sistema experimental foram utilizadas duas válvulas de controle proporcionais (CV-2 e CV-3), localizadas nos ramais de consumo, que representam as zonas baixa e alta, respectivamente. Estas válvulas desempenham o papel dos consumidores. Quando estão configuradas com ângulos menores de fechamento, simulam consumos maiores e quando configuradas com ângulos maiores de fechamento, simulam consumos menores.

Para entender melhor o funcionamento das válvulas, ver Figura 4.27. As válvulas foram configuradas para o seguinte funcionamento: 0° (zero grau), para totalmente aberta e 90° (noventa graus), para totalmente fechada. Como o valor do ângulo vai aumentando na direção do fechamento, ao se referir ao ângulo da válvula foram convencionadas as seguintes nomenclaturas: grau(s) de fechamento ou ângulo(s) de fechamento. Para analisar o consumo energético do sistema, foram idealizadas 06 (seis) faixas de consumo. Cada faixa de consumo corresponde a uma configuração de fechamento angular da válvula. Esta variação refere-se ao intervalo compreendido entre 50° (cinquenta graus) e 75° (setenta e cinco graus) de fechamento (ver Figura 4.28).

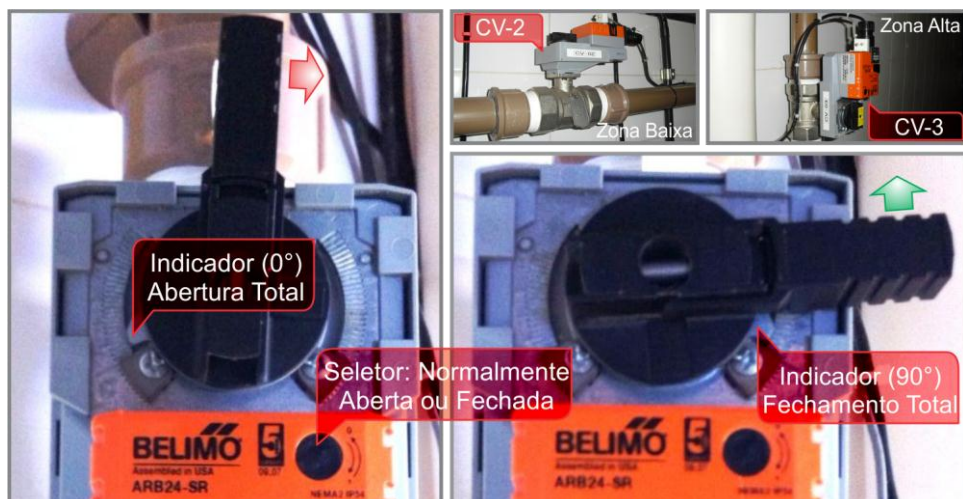


Figura 4.27 - Detalhe do funcionamento das válvulas proporcionais CV-2 e CV-3

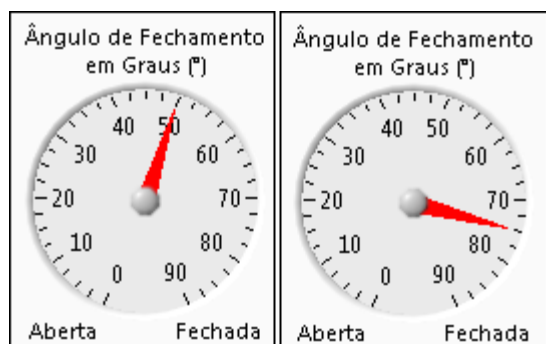


Figura 4.28 - Limites máximo e mínimo do consumo simulado pelas CVs 2 e 3

4.3.3 Definição da Faixa de Consumo

Baseado no estudo de identificação realizado para o Sistema Automatizado de Distribuição de Água Experimental (SADA), para a realização da análise energética, foi selecionada uma faixa de consumo, onde praticamente inexistente a influência do *booster* (BST), na zona baixa, quando este se encontra em operação.

Para determinação dos limites de operação do sistema para as análises energéticas, foram realizados ensaios para determinação dos valores máximos e mínimos de pressão e vazão, considerando a impulsão associada (CMB+BST) e única (CMB).

Os ensaios realizados determinaram as curvas ($H \times Q$) para as zonas alta e baixa do sistema, considerando a impulsão associada CMB+BST e a única CMB, numa faixa de consumo que é simulada pelo grau de fechamento das válvulas de controle CV-2 e CV-3,

onde 50° (cinquenta graus) representa o consumo máximo e 75° (setenta e cinco graus) o consumo mínimo para o sistema.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.29 mostram os valores obtidos e o gráfico, respectivamente, para a rede de abastecimento impulsionada pelo CMB+BST, na faixa de consumo a ser estudada, para a zona baixa (ZB).

Tabela 4.1 - Valores de vazão e pressão para zona baixa (CMB+BST)

Zona Baixa (CMB=BST=60 Hz)			Zona Baixa (Variando CMB e BST)				
Ângulos CVs 2 e 3	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Freq Hz	CV2=CV3=75°(ZB)		CV2=CV3=50°(ZB)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,0	26,3	20	0,4	3,0	1,7	2,9
72°	0,4	26,0	30	0,5	6,6	2,9	6,0
54°	3,2	24,9	40	0,7	11,6	4,0	10,3
36°	8,2	20,9	50	0,9	18,0	5,0	15,9
18°	15,4	12,1	60	1,0	25,6	5,9	22,4
0°	18,6	7,8					

A Tabela 4.2 e a Figura 4.30 mostram o gráfico e os valores obtidos, respectivamente, para a rede de abastecimento impulsionada pelo CMB+BST, na faixa de consumo a ser estudada, para a zona alta (ZA).

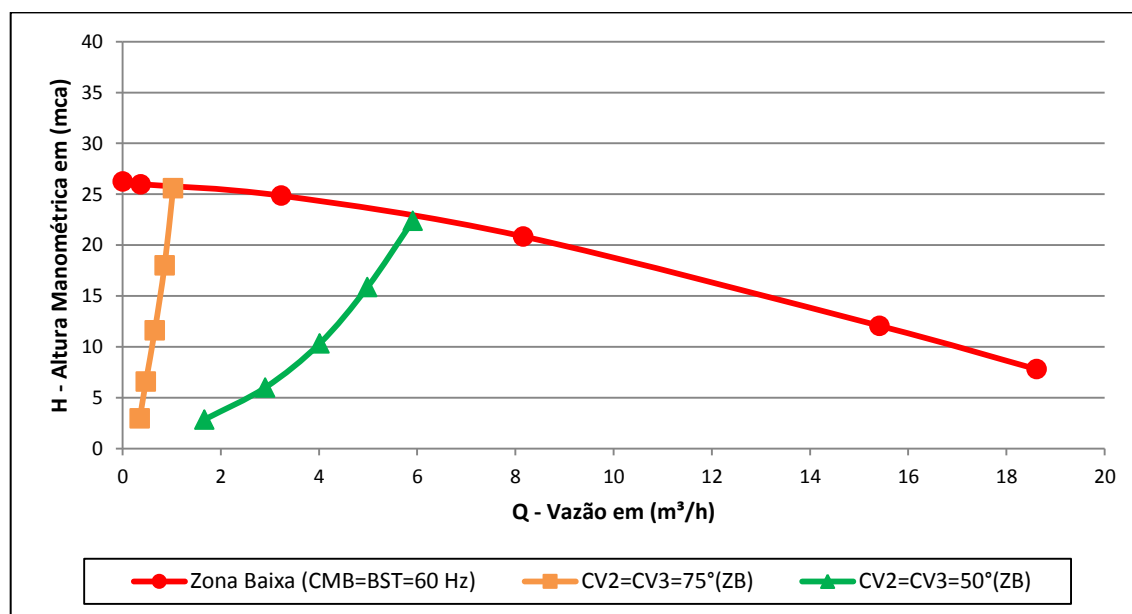


Figura 4.29 - Gráfico (H x Q) para a zona baixa (CMB+BST)

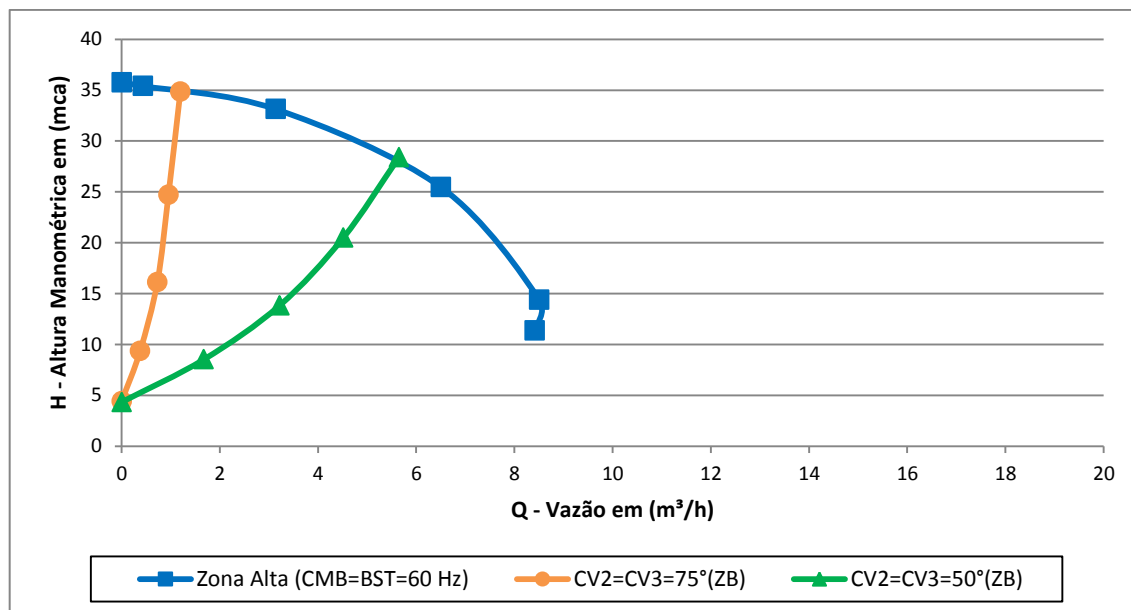


Figura 4.30 - Gráfico (H×Q) para a zona alta (CMB+BST)

Tabela 4.2 - Valores de vazão e pressão para zona alta (CMB+BST)

Zona Alta (CMB=BST=60 Hz)			Zona Alta (Variando CMB e BST)				
Ângulos CVs 2 e 3	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Freq Hz	CV2=CV3=75°(ZB)		CV2=CV3=50°(ZB)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,0	35,8	20	0,0	4,4	0,0	4,3
72°	0,4	35,4	30	0,4	9,3	1,7	8,5
54°	3,1	33,1	40	0,7	16,1	3,2	13,8
36°	6,5	25,5	50	1,0	24,7	4,5	20,5
18°	8,5	14,4	60	1,2	34,8	5,6	28,4
0°	8,4	11,4					

A Tabela 4.3 e a Figura 4.31 mostram os valores obtidos e o gráfico, respectivamente, para a rede de abastecimento impulsionada apenas pelo CMB, na faixa de consumo a ser estudada, para a zona baixa (ZB).

Tabela 4.3 - Valores de vazão e pressão para zona baixa (CMB)

Zona Baixa (CMB=60 Hz)			Zona Baixa (Variando CMB)				
Ângulos CVs 2 e 3	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Freq Hz	CV2=CV3=75°(ZB)		CV2=CV3=50°(ZB)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,0	26,2	20	0,5	3,0	1,9	2,8
72°	0,4	25,9	30	0,6	6,6	2,9	6,1
54°	3,2	24,9	40	0,8	11,7	4,0	10,5
36°	8,3	21,4	50	0,9	18,1	4,9	16,2
18°	16,0	13,1	60	1,0	25,7	5,9	22,8
0°	19,6	8,8					

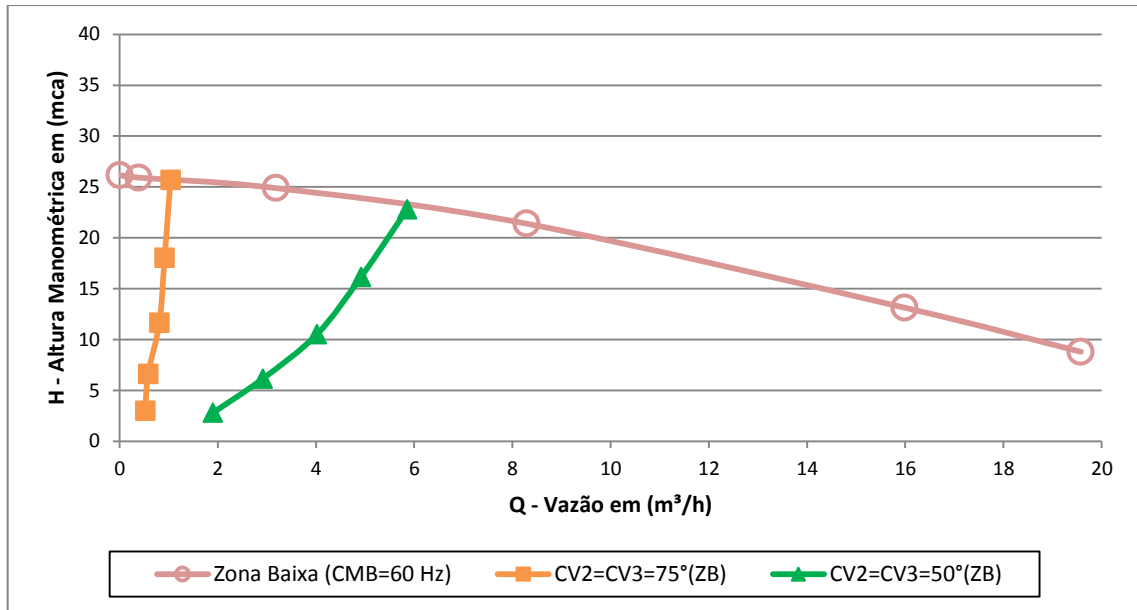


Figura 4.31 - Gráfico (H x Q) para a zona baixa (CMB)

A Figura 4.32 e a Tabela 4.4 e a mostram o gráfico e os valores obtidos, respectivamente, para a rede de abastecimento impulsionada apenas pelo CMB, na faixa de consumo a ser estudada, para a zona Alta (ZA).

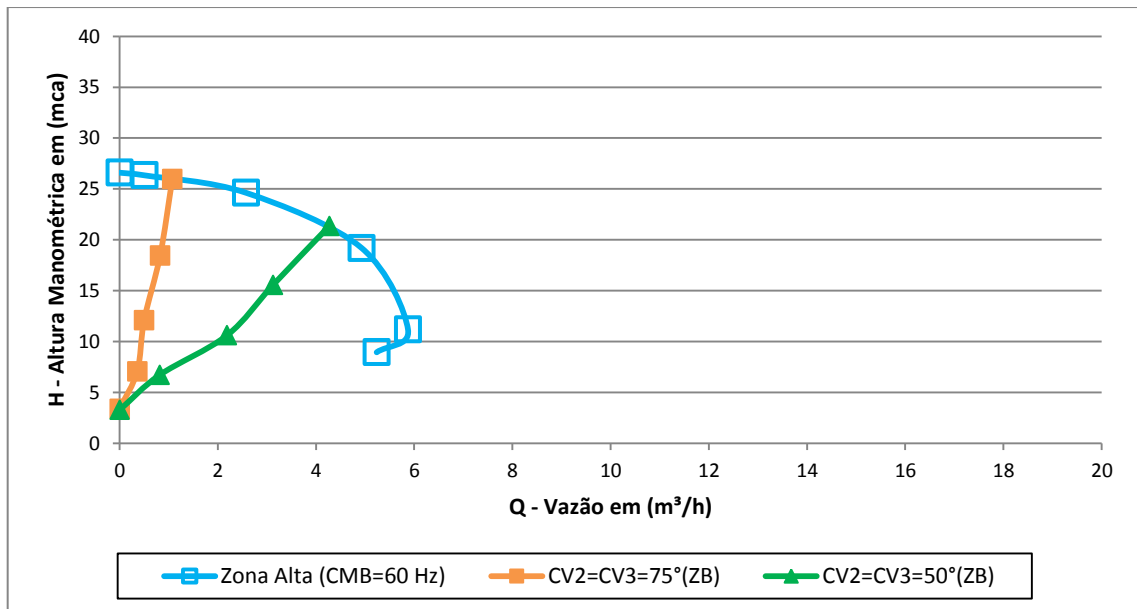


Figura 4.32 - Gráfico (H x Q) para a zona alta (CMB)

Tabela 4.4 - Valores de vazão e pressão para zona alta (CMB)

Zona Alta (CMB=60 Hz)			Zona Alta (Variando CMB)				
Ângulos CVs 2 e 3	Variando CVs 2 e 3 (ZB)		Freq Hz	CV2=CV3=75°(ZB)		CV2=CV3=50°(ZB)	
	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)		Q (Vazão)	H (Alt. Man.)	Q (Vazão)	H (Alt. Man.)
90°	0,0	26,6	20	0,0	3,4	0,0	3,3
72°	0,5	26,3	30	0,4	7,1	0,8	6,7
54°	2,6	24,6	40	0,5	12,1	2,2	10,6
36°	4,9	19,2	50	0,8	18,4	3,1	15,6
18°	5,9	11,2	60	1,1	26,0	4,3	21,4
0°	5,2	8,9					

4.3.4 Simulação de Demanda nas Zonas da Rede

Com o objetivo de analisar a energia consumida necessária, para operar o sistema, nos diversos patamares de consumo, foi estabelecido que o sistema permanecesse em operação por um tempo determinado, em cada faixa de consumo, considerando os seguintes *set points* de pressão: 16 (dezesesseis) mca, para a zona baixa e 25 (vinte e cinco) mca, para a zona alta.

Com o auxílio do sistema de controle *fuzzy*, inicia-se preliminarmente o processo de ensaio equilibrando as pressões das zonas de consumo, nos *set points* e com as válvulas configuradas em 50° (cinquenta graus) de fechamento. Em seguida, o analisador de energia é preparado, tendo-se o cuidado de sincronizar o seu relógio com o do sistema supervisorio, se necessário. Após a realização das configurações e ajustes necessários, iniciou-se, ao mesmo tempo, a aquisição de dados no sistema supervisorio e no analisador de energia.

Decorridos 180 s (cento e oitenta segundos), na primeira configuração, as válvulas fecham 5° (cinco graus), passando para o segundo ponto de consumo, que é representado por 55° (cinquenta e cinco graus) de fechamento. Por conseguinte, as válvulas vão fechando de 05 (cinco) em 05° (cinco graus), a cada 180 s (cento e oitenta segundos), até atingirem o valor máximo de 75° (setenta e cinco graus). Desta forma, o sistema trabalhará em 06 (seis) faixas de consumo, perfazendo um tempo total de funcionamento contínuo de 1080 s (um mil e oitenta segundos) ou 18 min (dezoito minutos), conforme apresentado na Figura 4.33. Todo o procedimento é realizado de forma automática pelo sistema supervisorio. Os dados adquiridos são armazenados no banco de dados a cada 02 s (dois segundos).

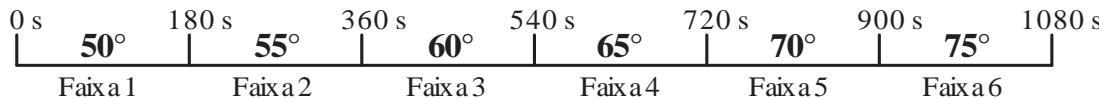


Figura 4.33 - Faixas de consumo e ângulos de fechamento das válvulas CV-2 e CV-3

Com a finalidade de realizar efetivamente os comparativos energéticos para o sistema de bombeamento, quando o mesmo é operado com e sem a influência do Sistema de Controle *fuzzy*, bem como funcionar nas duas possibilidades de impulsão possíveis, CMB+BST ou CMB foram ensaiadas 04 (quatro) situações de funcionamento:

1. O sistema de bombeamento foi configurado com os 02 (dois) conjuntos motobomba (CMB+BST), com as suas frequências de operação ajustadas pelo controlador automático *fuzzy* e as válvulas CV-2 e CV-3 variando dentro da faixa de consumo.
2. O sistema de bombeamento foi configurado com os 02 (dois) conjuntos motobomba (CMB+BST), com os conversores de frequência ajustados em 60 (sessenta) Hz, ou seja, impulsão plena (carga máxima) e as válvulas CV-2 e CV-3 variando dentro da faixa de consumo.
3. O sistema de bombeamento foi configurado com apenas 01 (um) um conjunto motobomba (CMB), com a sua frequência de operação ajustada pelo controlador automático *fuzzy* e as válvulas CV-2 e CV-3 variando dentro da faixa de consumo.
4. O sistema de bombeamento foi configurado com apenas 01 (um) conjunto motobomba (CMB), com o seu respectivo conversor de frequência ajustado em 60 (sessenta) Hz, ou seja, impulsão plena (carga máxima) e as válvulas CV-2 e CV-3 variando dentro da faixa de consumo.

Nas situações de funcionamento dos Ensaios 1 e 3, onde o sistema de controle está atuando, quando os ângulos das válvulas CV- 2 e CV-3 são modificados para simular um novo patamar de consumo, o sistema de bombeamento e/ou a válvula de controle CV-1 iniciam de forma imediata as suas reconfigurações, mitigando os efeitos do aumento das pressões nas zonas de consumo do sistema. Ou seja, para manter e estabilizar o sistema nos níveis de pressão desejados, em cada zona de consumo, o controlador reconfigura os conversores de frequência dos motores e o ângulo de fechamento da válvula de controle CV-1, caso seja necessário.

Além das situações de controle estudadas, também foram ensaiadas as situações 2 e 4, em que o sistema de bombeamento opera na sua capacidade máxima, para todas as faixas de consumo configuradas. Nestes ensaios, não existe controlador atuando na impulsão do sistema de bombeamento, nem tampouco na válvula de controle CV-1, para sustentar as pressões nas zonas de consumo. A ausência de controle faz com que as pressões sejam bem superiores às necessárias. Com base nestas configurações, são obtidos os consumos máximos, em termos energéticos, para o sistema de bombeamento.

Para sintetizar as condições de funcionamento, para os Ensaios descritos anteriormente, foi desenvolvida a Figura 4.34.

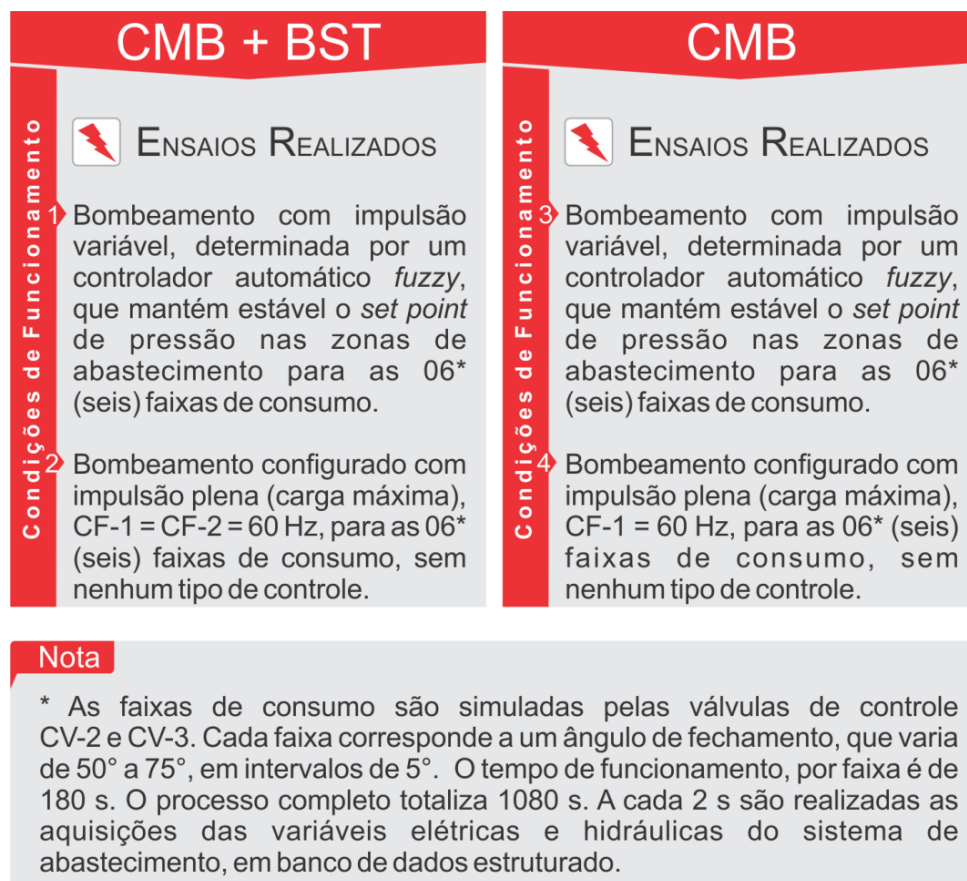


Figura 4.34 - Ensaios realizados para análise energética da rede experimental

Para a geração dos dados obtidos nos ensaios realizados, foram utilizados dois arquivos. Um arquivo contendo o banco de dados das variáveis do sistema de controle, oriundo do software desenvolvido na plataforma LabVIEWTM; o outro arquivo com as informações elétricas foi gerado pelo analisador de energia. A Figura 4.35 mostra os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

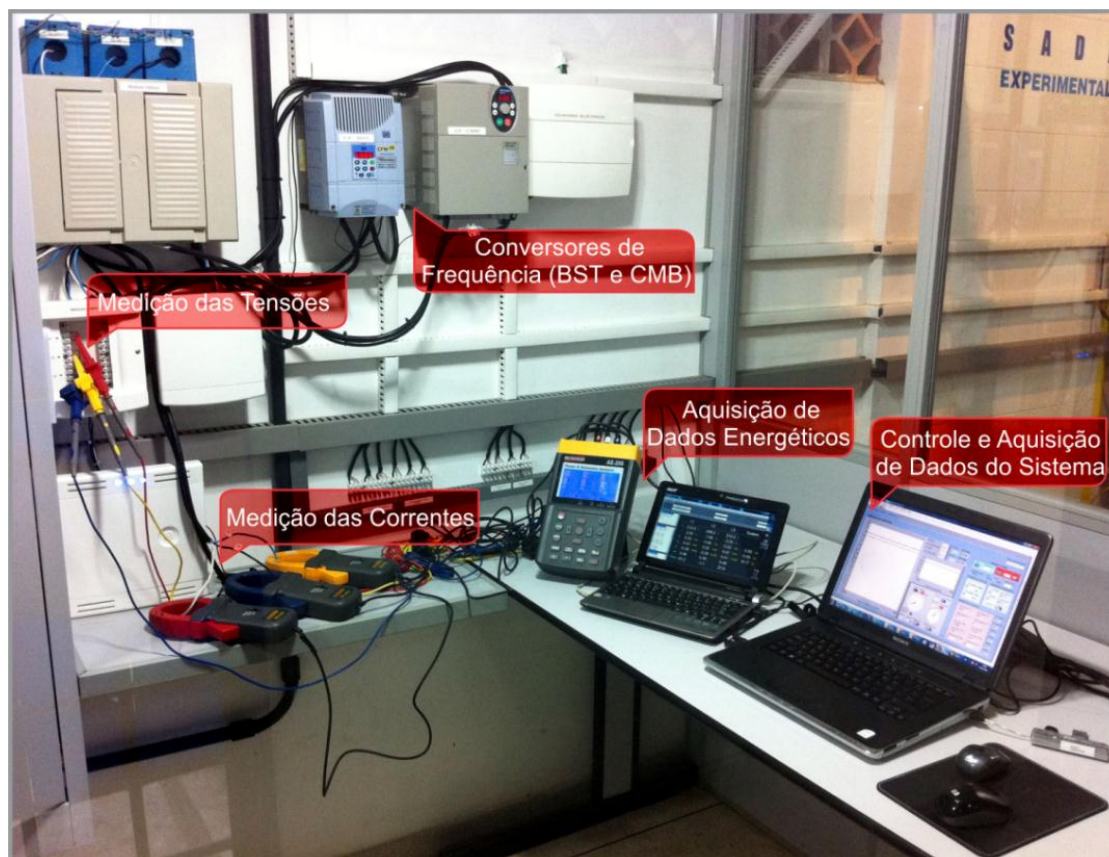


Figura 4.35 - Equipamentos utilizados para realizar os ensaios

Para realizar a coleta de dados, vale registrar que o analisador de energia foi devidamente sincronizado com o relógio do sistema de controle. O início do processo de aquisição de dados acontece de forma simultânea, garantindo a sincronia temporal entre os dados lidos no sistema de controle e os elétricos, registrados e acumulados pelo analisador de energia.

A filtragem, sistematização e tabulação dos dados são fundamentais para a obtenção dos resultados. Para consistir a grande massa de dados produzidas nos ensaios, foi desenvolvido um software com a finalidade de unificar os dois arquivos de dados obtidos. Uma vez unificados e devidamente trabalhados, foram produzidas subtabelas, novos campos calculados e diversos gráficos, que serviram de apoio para elaborar a interpretação dos dados provenientes dos ensaios realizados e apresentados neste trabalho de pesquisa.

4.4 ENSAIOS ENERGÉTICOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

ENSAIO 1 (CMB+BST) COM CONTROLE

O sistema de bombeamento foi configurado com os 02 (dois) conjuntos motobomba (CMB+BST), com as suas frequências de operação ajustadas pelo controlador *fuzzy*. O processo de aquisição inicia-se ajustando no sistema de controle as válvulas CV-2 e CV-3 na primeira faixa de consumo, que corresponde a 50° (cinquenta graus), bem como os níveis de pressão: 16 mca (zona baixa) e 25 mca (zona alta). Em seguida, o sistema de controle é ligado para que o mesmo atue, nos motores e na válvula de controle CV-1, para atingir os níveis de pressão exigidos, de forma automática, até entrarem em regime permanente. Com o sistema funcionando de forma estável, e na primeira faixa de consumo, é iniciado o processo de aquisição de dados no sistema supervisorio e no analisador de energia, de forma simultânea.

O sistema de controle foi programado para realizar as configurações de mudança de operação nos equipamentos da rede de abastecimento de forma automática. Baseado no temporizador do programa supervisorio, ele incrementa 05° (cinco graus) nas válvulas de controle CV-2 e CV-3, a cada 180 (cento e oitenta) segundos. Como o algoritmo de controle está atuando, serão compensados os aumentos de pressão nas zonas de consumo, por ocasião do fechamento das válvulas simuladoras de consumo, reduzindo a rotação dos conjuntos de impulsão da rede e alterando o ângulo de fechamento da válvula de controle CV-1, se necessário, mantendo os níveis de pressão desejados.

As aquisições são armazenadas no banco de dados a cada 02 (dois) segundos, e produzem um total de 540 (quinhentos e quarenta) registros, que representam um tempo total para o ensaio de 1080 (um mil e oitenta) segundos.

O gráfico apresentado na Figura 4.36 apresenta as variáveis controladas pelo sistema de controle, que são as pressões e vazões registradas no sistema supervisorio, durante todo o processo de ensaio. A Figura 4.37 apresenta as variáveis de controle, responsáveis pela reconfiguração do sistema de abastecimento, que são as frequências dos conversores (CF-CMB e CF-BST) e o ângulo de fechamento da válvula de controle CV-1.

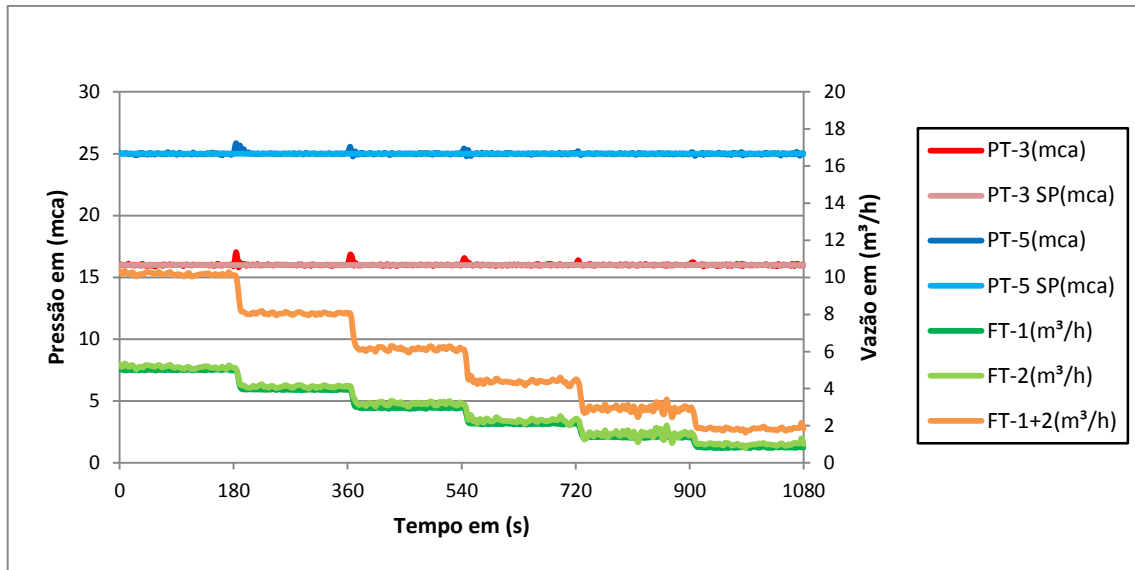


Figura 4.36 - Variáveis controladas do Ensaio 1

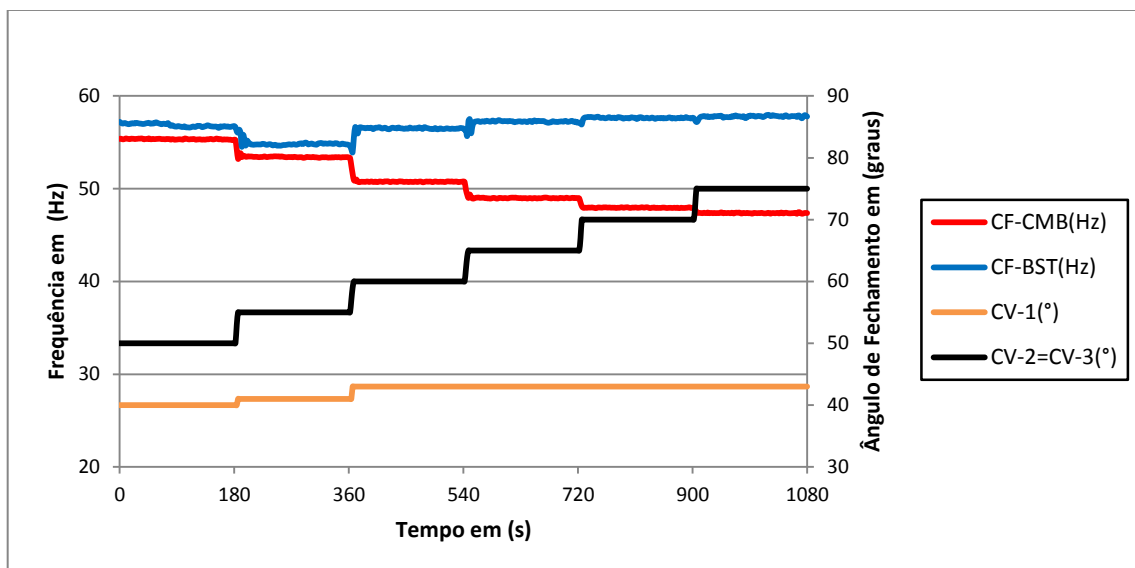


Figura 4.37 - Variáveis de controle do Ensaio 1

Com os dados das vazões registradas para as zonas de consumo (FT-1+FT-2), em cada faixa de consumo, é calculada uma vazão média. Estes valores representam a vazão que seria produzida pelo sistema, caso o mesmo permanecesse em cada configuração no período de 01 (uma) hora. Para determinar o consumo energético do sistema, foram calculadas as médias de consumo, registradas para cada faixa. O valor de cada faixa de consumo corresponde ao consumo energético do sistema de bombeamento no período de 180 (cento e oitenta) segundos (kW/180 s). Para converter este valor para kWh, multiplica-

se o valor da potência média obtida, para cada faixa, pelo cofator 20 (vinte). Este cofator é o resultado da divisão: 3600 s/180 s.

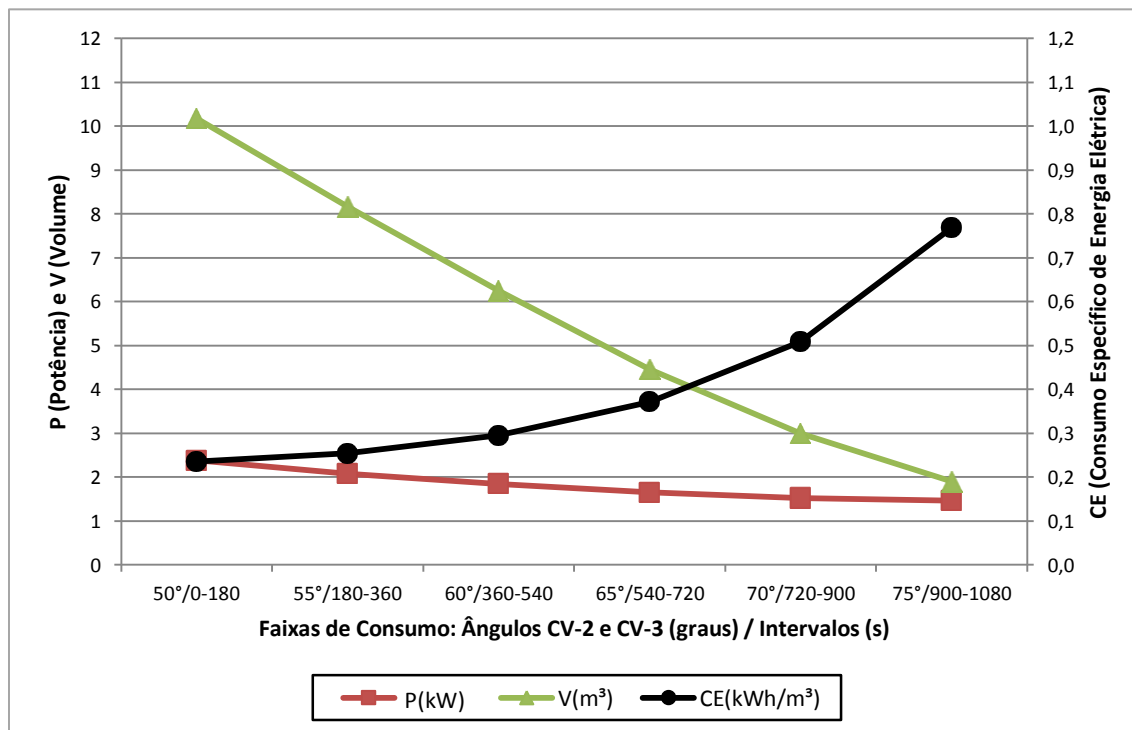


Figura 4.38 - Consumo energético do sistema para o Ensaio 1

Utilizando as vazões médias registradas e o consumo energético acumulado (extrapolado para uma hora), referente a cada faixa de consumo, foi gerado o gráfico da Figura 4.38, que representa o consumo energético do sistema de bombeamento, em função da produção de água, ou seja, o Consumo Específico de Energia Elétrica (CE), expresso em kWh/m³.

ANÁLISE DOS DADOS DO ENSAIO 1

No gráfico referente às variáveis controladas da Figura 4.36, observa-se que o sistema de controle atuou de forma adequada em todas as configurações do sistema de abastecimento. As pressões foram mantidas estáveis, nas duas zonas de consumo, através do reposicionamento dos conversores de frequência (CF-1 e CF-2) e da válvula de controle (CV-1), cujas ações foram provocadas pelo fechamento das válvulas de simulação de consumo (CV-2 e CV-3), para simular cada faixa de consumo (ver Figura 4.37).

Analisando o gráfico do consumo energético do sistema de bombeamento da Figura 4.38, através da variável CE, observa-se que com a diminuição da potência requerida, provocada pela redução do consumo, vai tornando o sistema menos econômico, na medida em que o volume produzido decresce numa proporção muito maior do que a potência consumida.

ENSAIO 2 (CMB+BST) SEM CONTROLE

O sistema de bombeamento foi configurado com os 02 (dois) conjuntos motobomba (CMB+BST), com os conversores de frequência ajustados em 60 (sessenta) Hz, ou seja, impulsão plena (carga máxima).

Após a configuração dos conversores, ajuste das válvulas CV-2 e CV-3 na primeira faixa de consumo, que corresponde a 50° (cinquenta graus) e estabilizadas as pressões nas zonas de consumo, iniciou-se o processo de aquisição dos dados no programa supervisor e no analisador de energia, de forma simultânea.

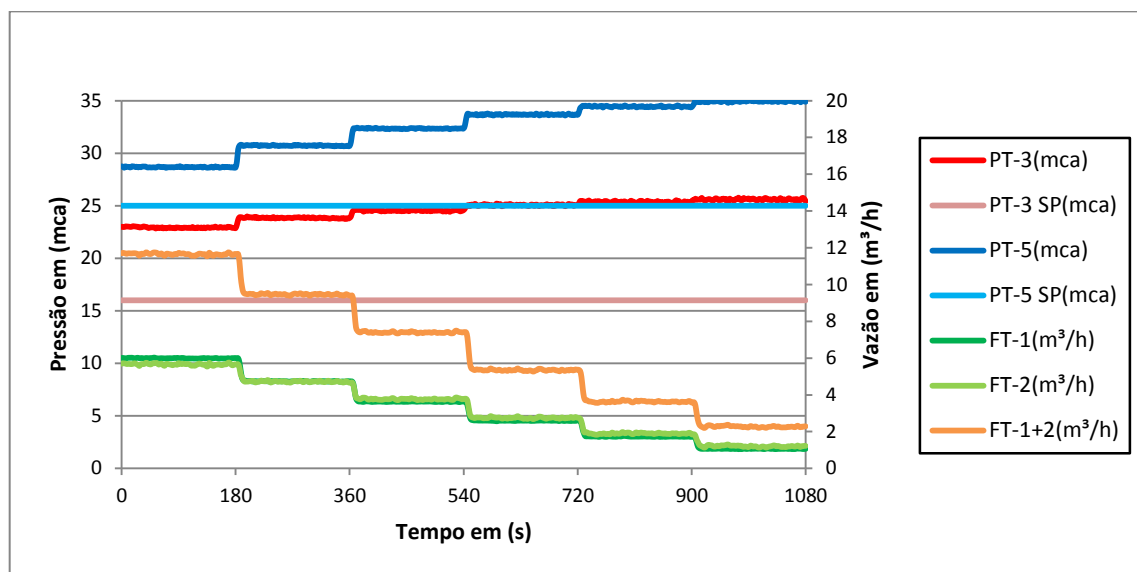


Figura 4.39 - Variáveis controladas para o Ensaio 2

O sistema de controle foi programado para realizar as configurações de mudança de operação nos equipamentos do sistema de abastecimento, de forma automática. Baseado no temporizador do supervisor foram incrementados 05° (cinco graus) nas válvulas simuladoras de consumo CV-2 e CV-3, a cada 180 (cento e oitenta) segundos. Neste

ensaio, como o algoritmo de controle *fuzzy* não estava habilitado, o sistema de controle não compensou os aumentos de pressão nas zonas de consumo, por ocasião do fechamento das válvulas simuladoras de consumo.

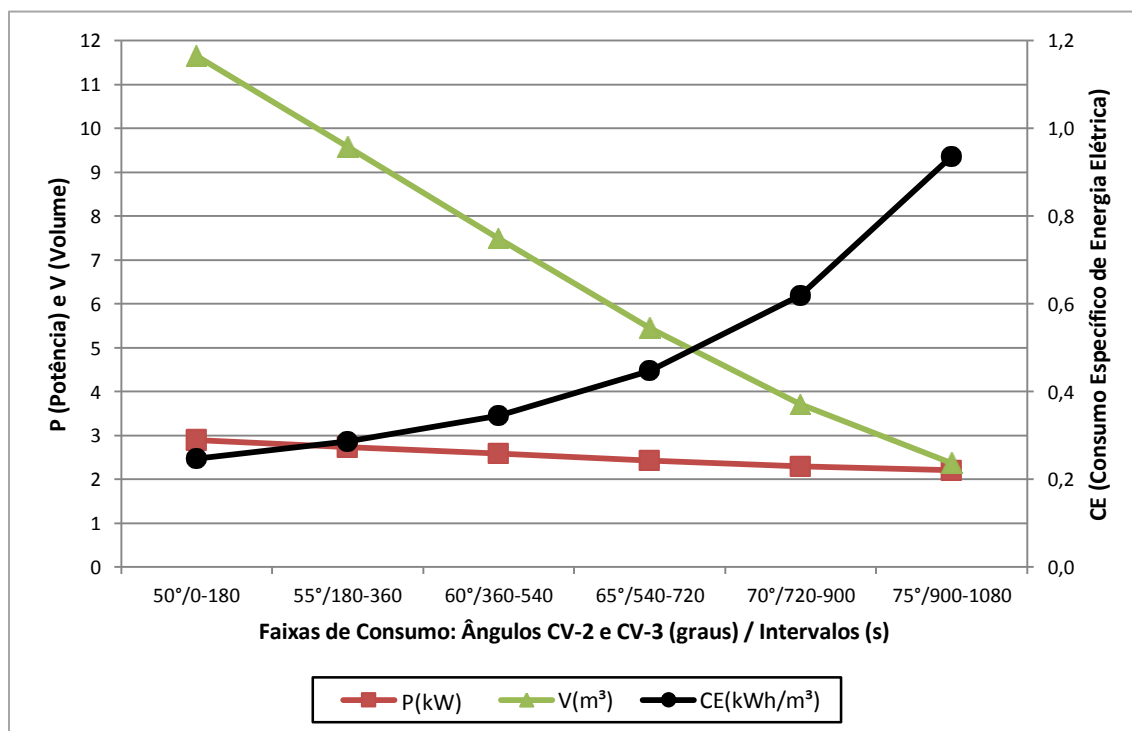


Figura 4.40 - Consumo energético do sistema de bombeamento para o Ensaio 2

Como neste modo de operação não há controle atuando na rede de distribuição, foi apresentado, somente, as variáveis controladas, na Figura 4.39. O comportamento energético para o sistema de bombeamento pode ser observado no gráfico da Figura 4.40.

ENSAIO 1 VERSUS ENSAIO 2

Ao confrontar os dois ensaios realizados, o que mais chama a atenção são as pressões excedentes observadas nos ramais de consumo, no Ensaio 2. Em nenhuma faixa de consumo as pressões estabelecidas foram obedecidas.

Na Tabela 4.5, são apresentadas as diferenças das pressões observadas (sobrepensões), em relação às pressões estabelecidas (*set points*), para cada zona de consumo, para o Ensaio 1 (com controle) e para o Ensaio 2 (sem controle).

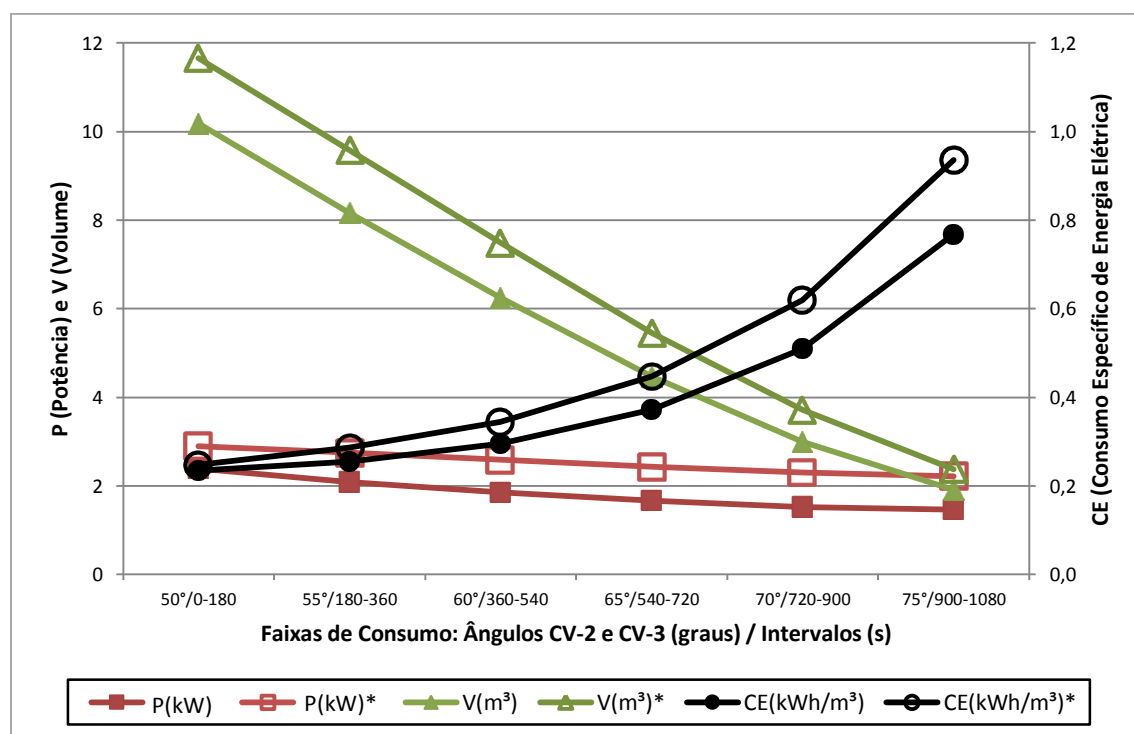
Tabela 4.5 - Diferenças das pressões médias observadas nas duas zonas de consumo

FAIXAS DE CONSUMO	PRESSÕES MÉDIAS OBSERVADAS (mca)				SOBREPRESSÃO	
	Zona Baixa (PT-3)		Zona Alta (PT-5)		Zona Baixa* (mca)	Zona Alta** (mca)
	S/ CONTROLE	C/ CONTROLE	S/ CONTROLE	C/ CONTROLE		
1	22,93	16,00	28,68	25,00	6,93	3,68
2	23,85	16,03	30,73	25,04	7,85	5,73
3	24,53	16,03	32,35	25,01	8,53	7,35
4	25,07	16,02	33,68	25,01	9,07	8,68
5	25,37	16,01	34,44	25,00	9,37	9,44
6	25,60	16,01	34,93	25,00	9,60	9,93

Pressões de referência (*set point*): * 16 mca e ** 25 mca

No que se refere aos consumos energéticos, como já era esperado, o Ensaio 2 apresentou valores superiores, em relação ao Ensaio 1, para todas as faixas de consumo simuladas. Esta constatação evidencia que o sistema sem controle é menos econômico do que o controlado, apesar do Ensaio 2 ter produzido maiores vazões e pressões para o sistema, verificou-se que a sua relação custo/benefício ainda é menor do que o do Ensaio 1.

Para ilustrar o comparativo energético, foi elaborado o gráfico comparativo da Figura 4.41 para confrontar os Ensaio 1 e 2, com as variáveis envolvidas no cálculo e na análise do consumo energético, para o sistema de bombeamento.



* Valores referentes ao Ensaio 2

Figura 4.41 - Gráfico comparativo Ensaio 1 *versus* Ensaio 2

Para simular o custo diário para o funcionamento do sistema de distribuição de água, uma curva de demanda foi criada e ajustada, para as vazões registradas pelo sistema, nas diversas faixas simuladas, distribuindo as vazões, ao longo do dia, como ocorre nas redes de abastecimento reais.

O comportamento da curva de demanda obedece, normalmente, a seguinte configuração: nas primeiras horas do dia são registradas as menores vazões e nas horas próximas ao meio dia (antes e depois) são registradas as maiores vazões.

A Tabela 4.6 apresenta os dados para construção da curva de demanda, baseado nos dados do Ensaio 1.

Tabela 4.6 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 1

Tempo (h)	0/24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vazão (m³/h)	1,91	1,91	1,91	2,99	2,99	2,99	4,47	4,47	4,47	6,25	8,16	10,18
Vazão Acum (m³/h)	1,91	3,82	5,72	8,72	11,71	14,71	19,17	23,64	28,10	34,35	42,51	52,69
Consumo (kWh)	1,47	1,47	1,47	1,52	1,52	2,99	1,66	1,66	1,66	1,85	2,08	2,39
Cons. Acum. (kWh)	1,466	2,932	4,398	5,922	7,445	10,44	12,1	13,76	15,42	17,27	19,35	21,74

Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Vazão (m³/h)	10,18	10,18	8,16	8,16	6,25	6,25	4,47	4,47	4,47	2,99	2,99	2,99
Vazão Acum (m³/h)	62,87	73,05	81,21	89,37	95,62	101,87	106,33	110,80	115,26	118,26	121,25	124,25
Consumo (kWh)	2,39	2,39	2,08	2,08	1,85	1,85	1,66	1,66	1,66	1,52	1,52	1,52
Cons. Acum. (kWh)	24,14	26,53	28,61	30,69	32,54	34,38	36,04	37,71	39,37	40,89	42,42	43,94

O gráfico da Figura 4.42 mostra a curva de demanda e o consumo energético acumulado para o Ensaio 1, com base na Tabela 4.6.

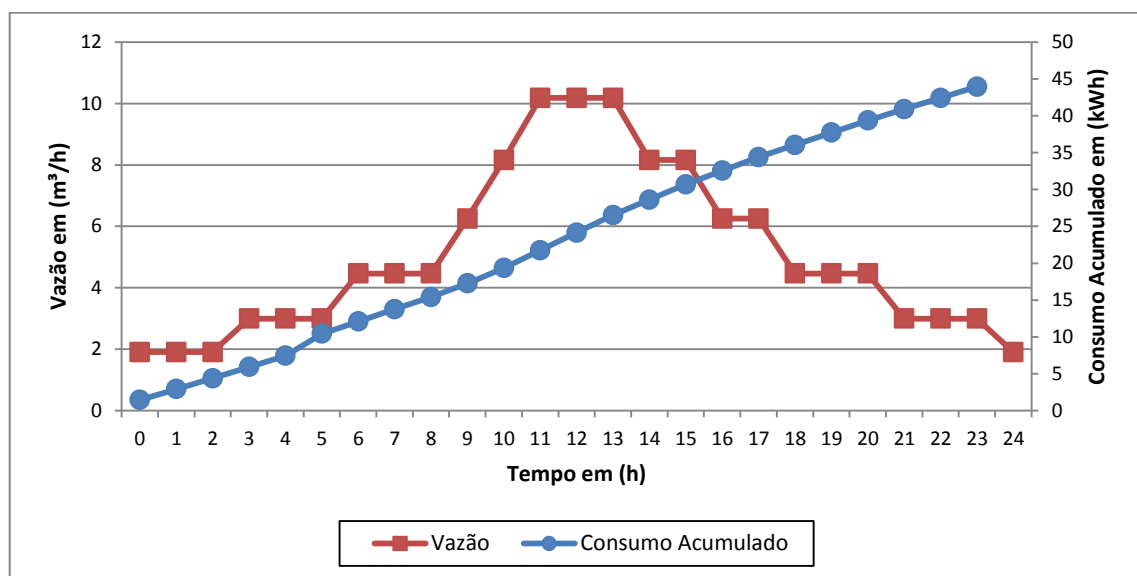


Figura 4.42 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 1

A Tabela 4.7 apresenta os dados para construção da curva de demanda, baseado nos dados do Ensaio 2.

Tabela 4.7 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 2

Tempo (h)	0/24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vazão (m ³ /h)	2,37	2,37	2,37	3,72	3,72	3,72	5,45	5,45	5,45	7,50	9,58	11,66
Vazão Acum (m ³ /h)	2,37	4,74	7,11	10,82	14,54	18,26	23,71	29,16	34,62	42,12	51,69	63,35
Consumo (kWh)	2,22	2,22	2,22	2,30	2,30	3,72	2,43	2,43	2,43	2,59	2,74	2,89
Cons. Acum. (kWh)	2,22	4,43	6,65	8,95	11,25	14,97	17,40	19,84	22,27	24,86	27,60	30,50

Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Vazão (m ³ /h)	11,66	11,66	9,58	9,58	7,50	7,50	5,45	5,45	5,45	3,72	3,72	3,72
Vazão Acum (m ³ /h)	75,01	86,67	96,25	105,82	113,32	120,82	126,28	131,73	137,18	140,90	144,62	148,33
Consumo (kWh)	2,89	2,89	2,74	2,74	2,59	2,59	2,43	2,43	2,43	2,30	2,30	2,30
Cons. Acum. (kWh)	33,39	36,28	39,02	41,76	44,35	46,94	49,37	51,81	54,24	56,54	58,85	61,15

O gráfico da Figura 4.43 mostra a curva de demanda e o consumo energético acumulado para o Ensaio 2, com base na Tabela 4.7.

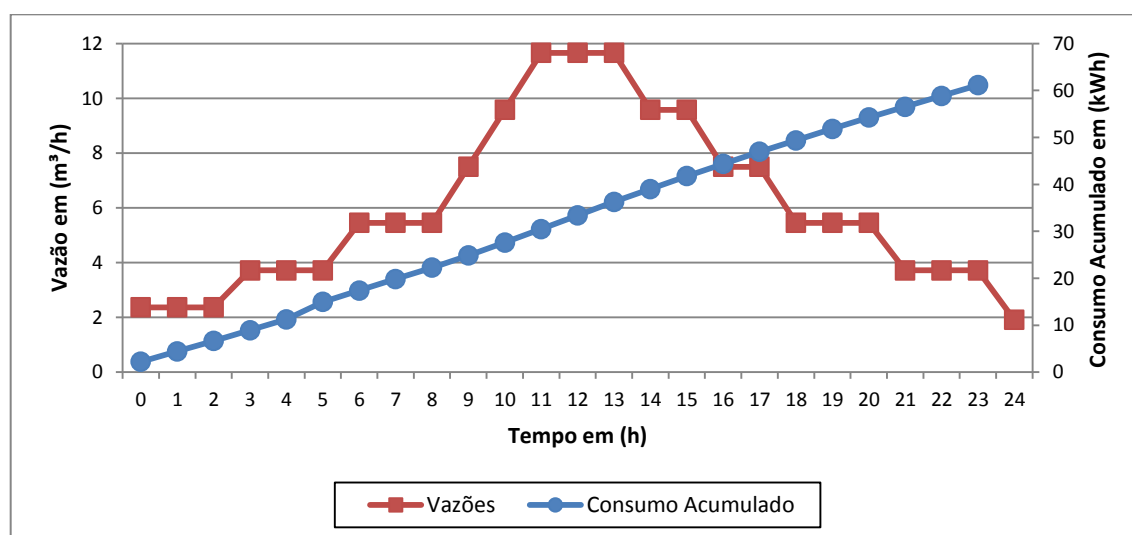


Figura 4.43 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 2

Após a distribuição das vazões, em função das potências requeridas, para cada Ensaio, pode-se estimar o consumo energético, para as duas situações e extrapolar os valores de consumo diário, para mensal e anual. Considerando que o valor do kWh seja R\$ 0,37664 (para simplificar – consumidor residencial), também podem ser estimados valores monetários para referência (ver Tabela 4.8). Obs.: as companhias de saneamento possuem um desconto de 15% na tarifa de energia em relação ao consumidor comercial/residencial.

Tabela 4.8 - Ensaio 1 *versus* Ensaio 2 (consumo elétrico e monetário)

ENSAIO	CONSUMOS ENERGÉTICOS E VALORES MONETÁRIOS							
	DIÁRIO		MENSAL		ANUAL		DIFERENÇA ANUAL	
	(kWh)	(R\$)	(kWh)	(R\$)	(kWh)	(R\$)	(R\$)	(%)
1	43,94	16,55	1.318,20	496,49	15.818,40	5.957,84	2.333,51	39,17
2	61,15	23,03	1.834,50	690,95	22.014,00	8.291,35		

* Custo do kWh R\$ 0,37664

Com base no estudo realizado, no Ensaio 2, além das elevadas pressões de serviço registradas nas zonas de medição, tem-se, também, um aumento considerável do consumo energético do sistema da ordem de 39,17%, em relação ao Ensaio 1, como também o aumento da vazão em 24,08 m³/dia ou 8.668,80 m³/ano.

ENSAIO 3 (CMB) COM CONTROLE

O sistema de bombeamento foi configurado para funcionar com apenas 01 (um) um conjunto motobomba (CMB), com a sua frequência de operação ajustada pelo controlador *fuzzy*. O processo de aquisição inicia-se ajustando no sistema supervisor as válvulas CV-2 e CV-3 na primeira faixa de consumo, que corresponde a 50° (cinquenta graus), bem como os níveis de pressão: 16 mca (zona baixa) e 25 mca (zona alta). Como apenas um conjunto motobomba será utilizado, a caixa de verificação (*check box*) existente no programa do supervisor, referente a atuação deste dispositivo deverá ser desmarcada. Em seguida, o sistema de controle é ligado para que o mesmo atinja os níveis de pressão exigidos de forma automática. No entanto, para as primeiras faixas de consumo, com apenas um conjunto de impulsão em funcionamento, a rede de abastecimento não consegue atingir os níveis de pressão exigidos para a zona alta. O sistema de bombeamento só consegue suprir com a pressão exigida para a zona alta nas três últimas faixas de consumo (ver Figura 4.44).

Após o sistema de controle estabilizar a pressão exigida para a zona baixa, na primeira faixa de consumo (CV-2 = CV-3 = 50°), uma vez que na zona alta a pressão não será atingida, inicia-se o processo de aquisição de dados no sistema supervisor e no analisador de energia, de forma simultânea.

O sistema supervisor foi programado para realizar as configurações de mudança de operação dos equipamentos da rede de abastecimento de forma automática. Baseado no temporizador do programa supervisor são incrementados 05° (cinco graus) nas válvulas

de controle CV-2 e CV-3, a cada 180 (cento e oitenta) segundos. Como o algoritmo de controle está atuando, o sistema de controle compensará os aumentos das pressões nas zonas de consumo, por ocasião do fechamento das válvulas, reduzindo a rotação do conjunto de impulsão do sistema (CMB), para manter os níveis de pressão desejados (nas faixas de consumo onde for possível atingir a pressão de serviço para a zona alta).

As aquisições são armazenadas a cada 02 (dois) segundos no banco de dados, e produzem um total de 540 (quinhentos e quarenta) registros, que representam os 1080 (um mil e oitenta) segundos, do tempo total do ensaio.

O gráfico apresentado na Figura 4.44 mostra as variáveis controladas pelo sistema de controle *fuzzy*, que são as pressões e as vazões registradas no sistema durante todo o processo de ensaio.

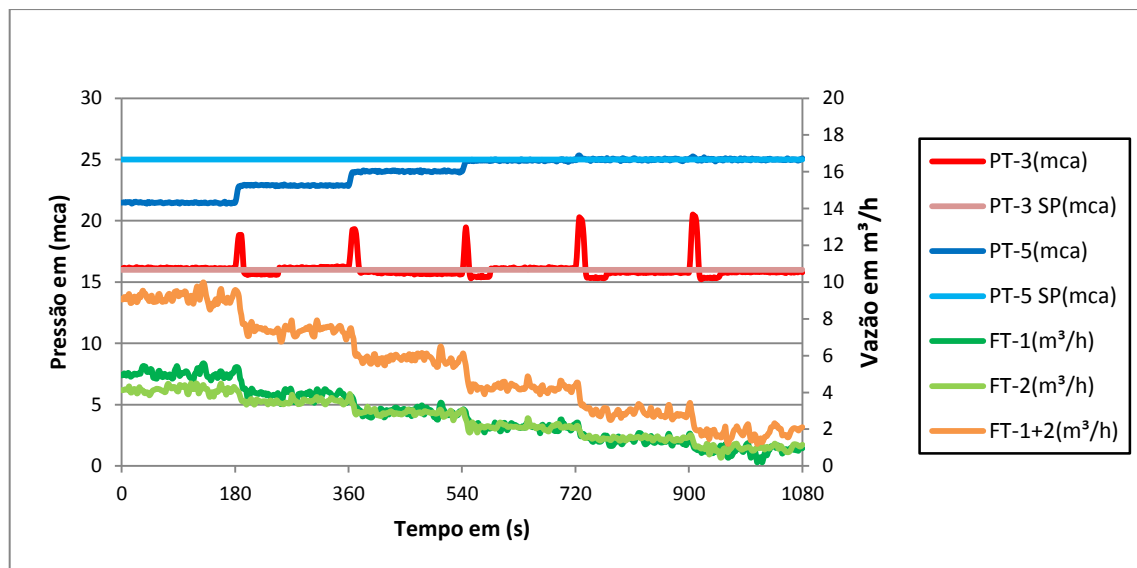


Figura 4.44 - Variáveis controladas do Ensaio 3

A Figura 4.45 apresenta as variáveis de controle do Ensaio 3, responsáveis pela reconfiguração do sistema de bombeamento, que são a frequência do conversor de frequência (CF-CMB) e o ângulo de fechamento da válvula de controle CV-1, bem como as válvulas simuladoras de consumo CV-2 e CV-3.

De posse dos dados das vazões registradas para as zonas de consumo pelos transdutores de vazão (FT-1+FT-2), em cada faixa de consumo, são calculadas as vazões médias. Estes valores representam o volume que seria produzido pelo sistema, caso o mesmo permanecesse em cada configuração no período de 01 (uma) hora. Para calcular os dados referentes ao consumo do sistema foram computadas as médias reais de consumo

registradas para cada faixa. O valor de cada faixa de consumo corresponde ao consumo energético do sistema no período de 180 (cento e oitenta) segundos (kW/180 s). Extrapolando para uma hora, ou seja, converter este valor em kWh, multiplica-se o valor da potência média obtido, para cada faixa, pelo cofator 20 (vinte). Este cofator é o resultado da divisão: 3600 s/180 s.

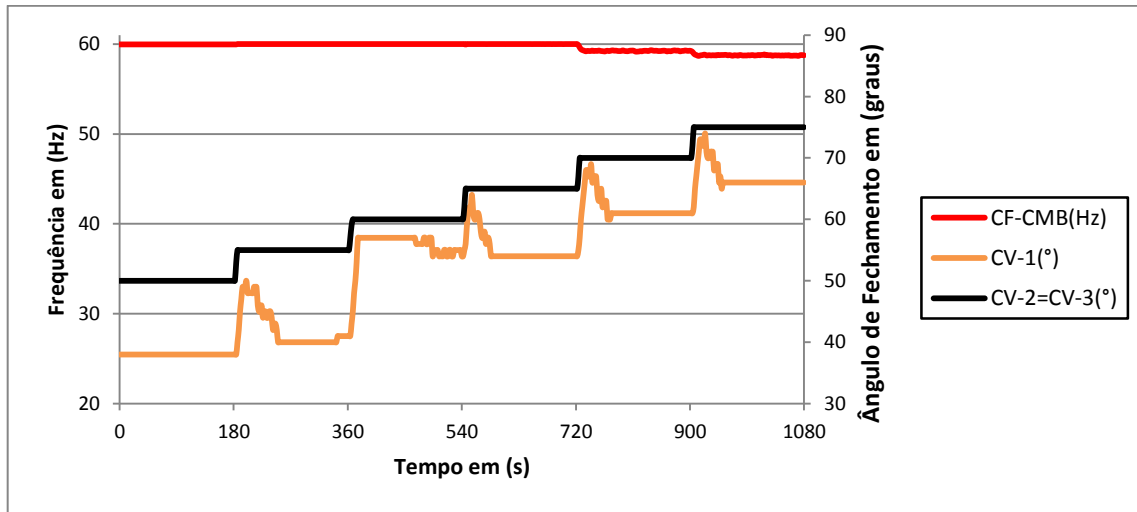


Figura 4.45 - Variáveis de controle do Ensaio 3

Com as médias dos volumes médios e as médias acumuladas de consumo energético, para cada faixa de consumo, foi gerado o gráfico da Figura 4.46, resultando no Consumo Específico de Energia para o sistema (CE), expresso em kWh/m³.

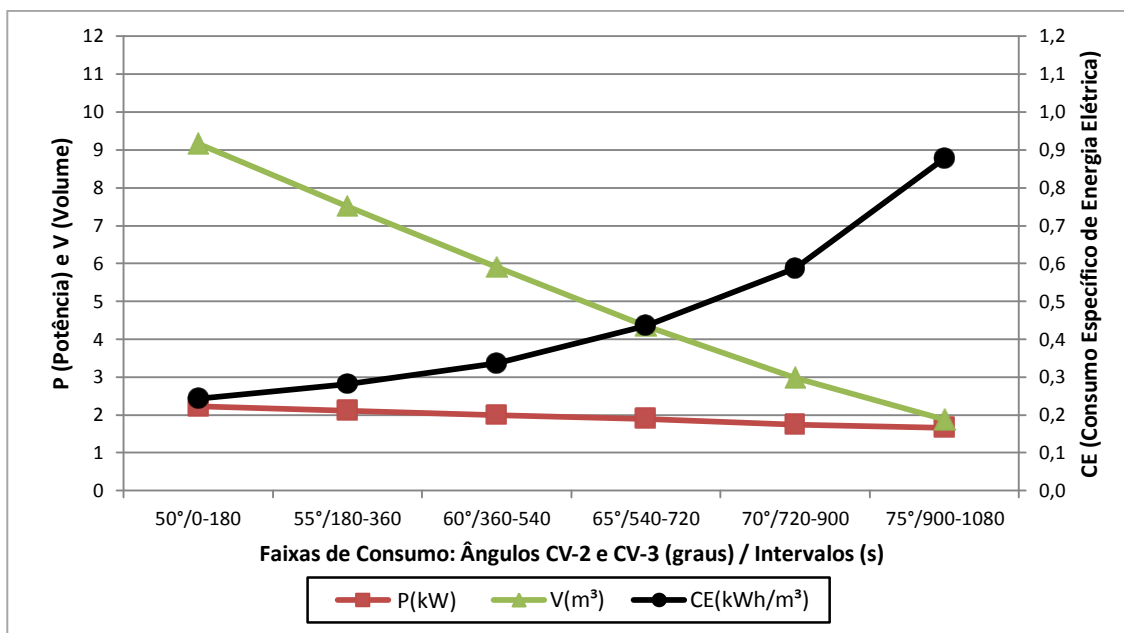


Figura 4.46 - Consumo energético do sistema do Ensaio 3

ANÁLISE DOS DADOS DO ENSAIO 3

No gráfico referente às variáveis controladas da Figura 4.44, observa-se que o sistema de controle atuou para manter a pressão desejada na zona baixa, sobretudo utilizando a válvula de controle CV-1 (Figura 4.45). Nas três primeiras faixas de consumo o sistema de bombeamento não conseguiu atingir a pressão de serviço para a zona alta. Na zona baixa a pressão foi mantida estável, em torno da pressão de serviço. No entanto, observaram-se picos de pressão, por ocasião das mudanças de faixas de consumo. Isto se deve à atuação da CV-1 que é muito lenta, se comparada com a ação dos motores, operados pelos conversores de frequência.

Para as últimas três faixas de consumo a rede de abastecimento atingiu a pressão desejada na zona alta de consumo. Observa-se, também, que a atuação do CF-CMB só se verificou nas três últimas faixas de consumo. Nas demais faixas ele permaneceu saturado, ou seja, na sua capacidade máxima de funcionamento 60 Hz (ver Figura 4.44).

Em resumo, o sistema de controle atuou de forma satisfatória, mantendo as pressões de serviço estáveis, quando possível.

Finalmente, analisando o gráfico do consumo energético do sistema da Figura 4.46, observa-se que com a diminuição da potência do sistema, provocada pela redução do consumo, vai tornando o sistema menos econômico (ver comportamento da variável CE), na medida em que o volume decresce.

ENSAIO 4 (CMB) SEM CONTROLE

O sistema de bombeamento foi configurado com o conjunto motobomba (CMB), com o conversor de frequência ajustado em 60 (sessenta) Hz, ou seja, impulsão plena (carga máxima). Como neste ensaio não há controle atuando no sistema de bombeamento, serão apresentadas, somente, as variáveis controladas (ver Figura 4.47).

Com o sistema de controle funcionando apenas com um conjunto de impulsão (CMB) e sem a presença da válvula de controle CV-1, para eliminar o excesso de pressão para a zona baixa, verifica-se que, desde o início do ensaio, as pressões registradas para a zona baixa ultrapassaram o *set point* de 16 mca em mais de 7 mca.

Para a zona alta, nas três faixas de consumo iniciais não foi atingida a pressão de *set point* exigida (25 mca), fato ocorrido, apenas, na quarta faixa de consumo. Para as duas

últimas faixas houve uma pequena ultrapassagem da pressão exigida, porém esse valor foi inferior a 2 mca.

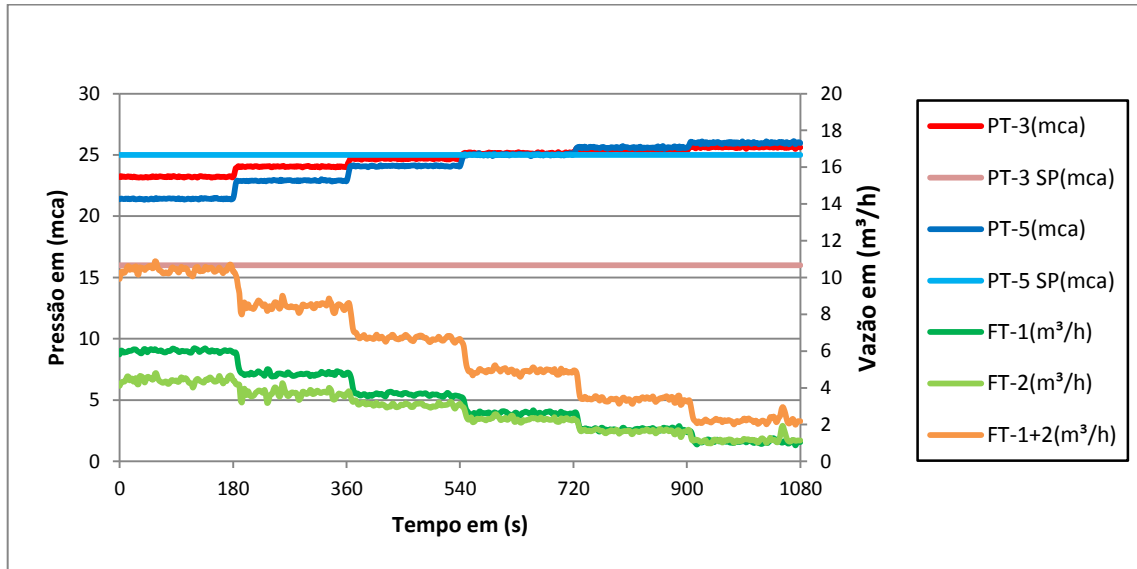


Figura 4.47 - Variáveis controladas do Ensaio 4

A Figura 4.48 apresenta o gráfico das variáveis que determinam o consumo energético para o Ensaio 4.

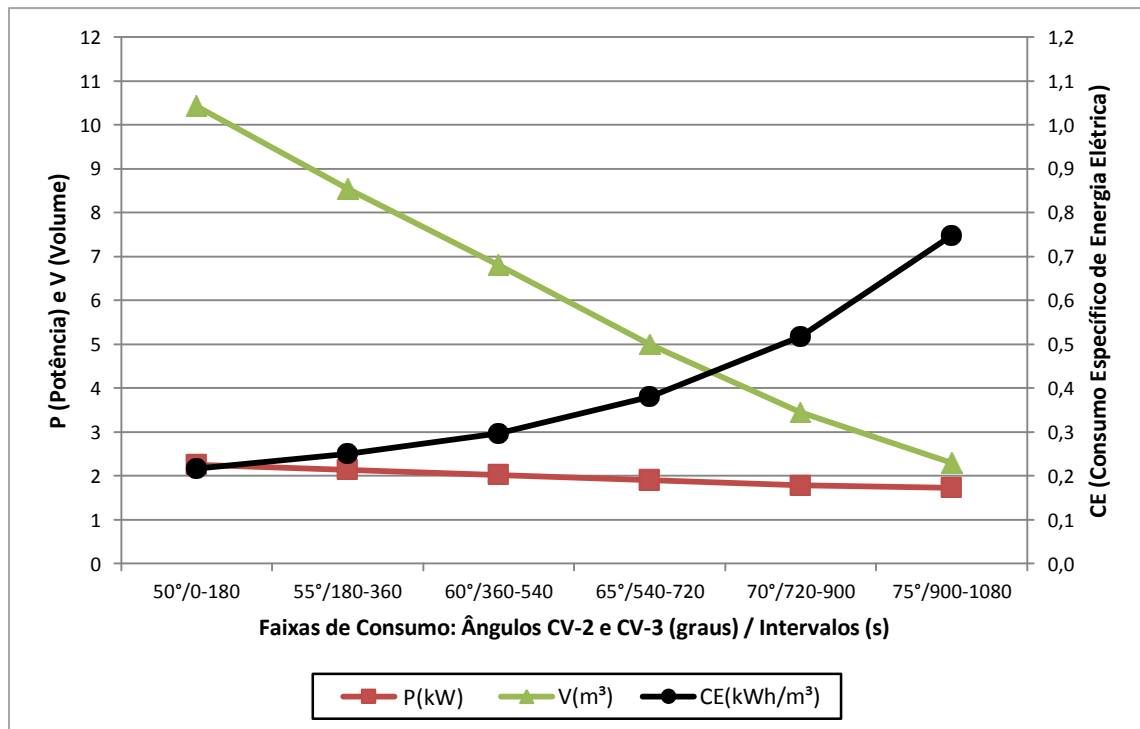


Figura 4.48 - Consumo energético do sistema de bombeamento do Ensaio 4

ANÁLISE DOS DADOS DO ENSAIO 4

No gráfico referente às variáveis controladas da Figura 4.47 observa-se que as pressões nas zonas da rede de abastecimento vão aumentando a cada reconfiguração das válvulas simuladoras de consumo quando da mudança de faixa, uma vez que o controlador não atua nos elementos de controle do bombeamento (conversores de frequência) e/ou na válvula de controle CV-1.

Analisando o gráfico do consumo energético do sistema de bombeamento da Figura 4.48, observa-se que com a diminuição da potência do sistema, provocada pela redução do consumo, vai tornando o sistema menos econômico (ver variável CE), na medida em que o volume produzido pelo sistema de bombeamento decresce.

ENSAIO 3 *VERSUS* ENSAIO 4

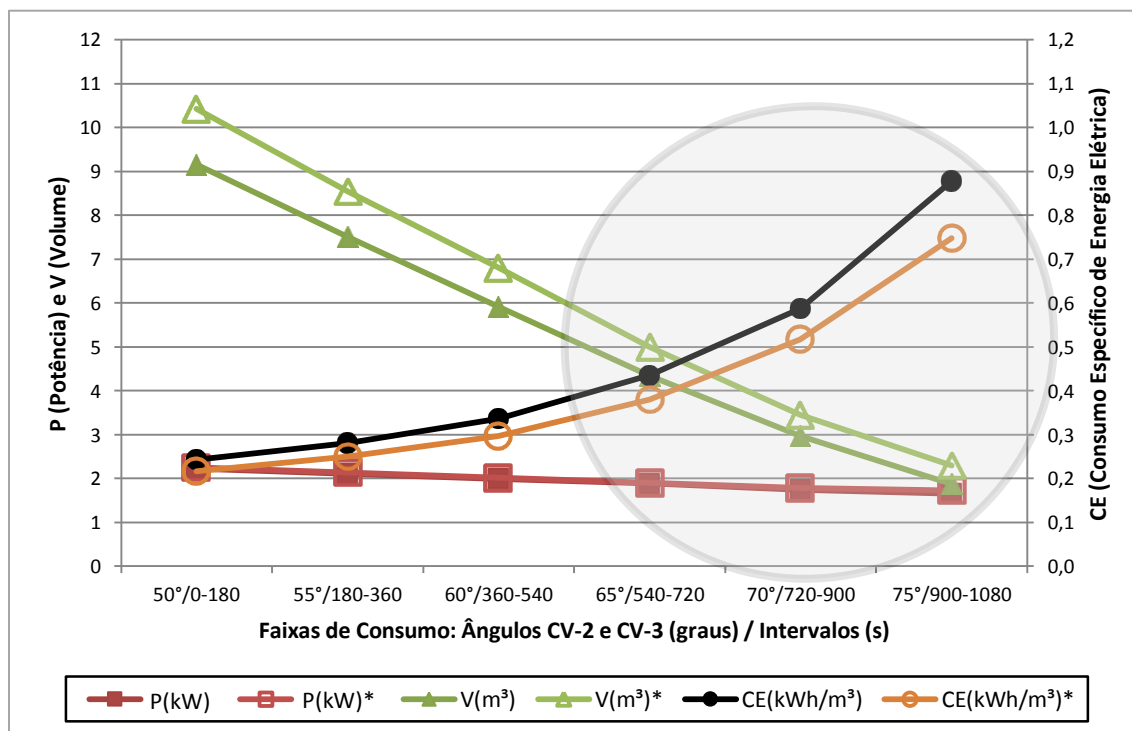
Nos Ensaio 3 e 4 para as três primeiras faixas de consumo, o sistema de bombeamento não conseguiu suprir a zona alta com a pressão necessária. Portanto, estas faixas serão descartadas do estudo comparativo, por não atenderem às exigências dos níveis de pressão exigidas para as zonas de consumo da rede de abastecimento. Por isso, as análises realizadas se restringem às três últimas faixas de consumo simuladas.

Comparando os ensaios nas três últimas faixas de consumo o sistema de bombeamento, com controle, apresentou um CE maior no Ensaio 3 (com controle), em relação ao Ensaio 4 (ver gráfico da Figura 4.49).

Este aumento do CE, em relação ao Ensaio 4, foi provocado pela atuação da válvula de controle CV-1, no Ensaio 3, que para reduzir as pressões na zona baixa, provoca perdas de carga localizadas e a conseqüente diminuição do volume de água produzido.

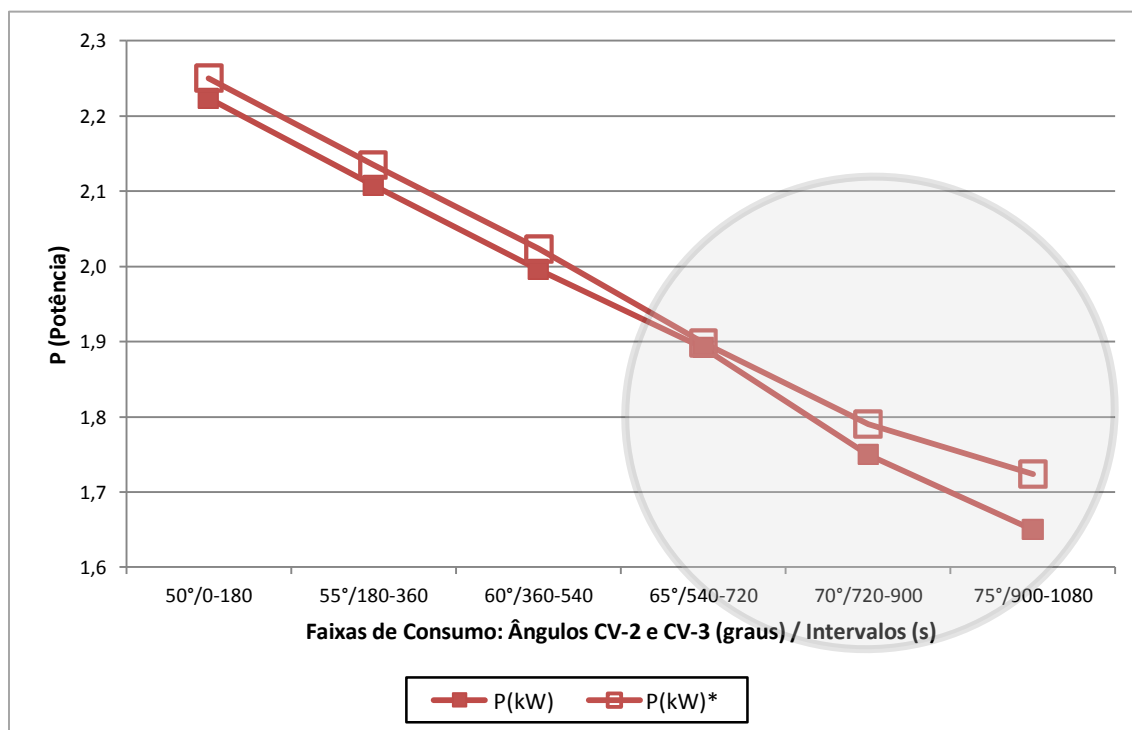
Neste caso, o correto é comparar, apenas, as potências registradas para os dois ensaios. Analisando o gráfico da Figura 4.50, verifica-se que os valores são bastante próximos. Entretanto, no Ensaio 4 (sem controle), a potência registrada nos três pontos estudados foi superior.

Para as últimas três faixas de consumo comparadas, ao confrontar os Ensaio 3 e 4, o que mais chama a atenção são às pressões excedentes observadas nos ramais de consumo no Ensaio 4, sobretudo na zona baixa.



* Valores referentes ao Ensaio 4.

Figura 4.49 - Gráfico comparativo do consumo energético do Ensaio 3 versus Ensaio 4



* Valores referentes ao Ensaio 4.

Figura 4.50 - Gráfico comparativo do Ensaio 3 versus Ensaio 4 (potências)

Na Tabela 4.9, são apresentadas as diferenças das pressões observadas (sobrepessões), em relação às pressões estabelecidas (*set points*), para cada zona de consumo, nas três faixas de consumo estudadas.

Tabela 4.9 - Diferenças das pressões médias observadas nas três faixas de consumo

FAIXAS DE CONSUMO	PRESSÕES MÉDIAS OBSERVADAS (mca)				SOBREPRESSÃO	
	Zona Baixa (PT-3)		Zona Alta (PT-5)		Zona Baixa* (mca)	Zona Alta** (mca)
	S/ CONTROLE	C/ CONTROLE	S/ CONTROLE	C/ CONTROLE		
4	25,14	16,00	25,02	25,00	9,14	0,02
5	25,42	16,00	25,60	25,00	9,42	0,60
6	25,64	16,00	25,98	25,00	9,64	0,98

Pressões de referência (*set point*): * 16 mca e ** 25 mca

Para os três últimos pontos de consumo simulados, e que satisfazem as exigências de pressão mínima para as zonas de consumo, em termos energéticos, pode-se afirmar que operar com ou sem controle, exige o mesmo consumo energético. A diferença é que operar o sistema de abastecimento sem a válvula de controle CV-1, faz com que as pressões na zona baixa atinjam valores elevados, o que poderá acarretar significativas perdas reais de água, por possíveis vazamentos nas tubulações, indo na contramão da otimização.

A elevação das pressões é um forte motivo para justificar a necessidade da existência de um sistema de controle atuando na rede de abastecimento.

ENSAIO 1 VERSUS ENSAIO 3

Ficou evidente que o sistema de bombeamento funcionando com apenas o conjunto de impulsão principal (CMB) não atende às três primeiras faixas de consumo, devido às características topológicas da rede de abastecimento. Nestas faixas de consumo, verificou-se que o limite de pressão exigido para a zona alta de consumo não é atingido. Portanto, só serão objetos de comparação às três últimas faixas de consumo.

O comparativo entre os Ensaios 1 e 3 é fundamental para que seja conhecida a melhor alternativa de funcionamento. Até este ponto, pode-se concluir que para operar o sistema nas três primeiras faixas de consumo só é possível com a utilização dos dois conjuntos de impulsão. Observando-se o gráfico da Figura 4.51, que apresenta o consumo energético do bombeamento nos Ensaios 1 e 3, para as faixas 4, 5 e 6, conclui-se que para as três faixas de consumo estudadas, é mais econômico operar a rede com os dois conjuntos de impulsão de forma simultânea.

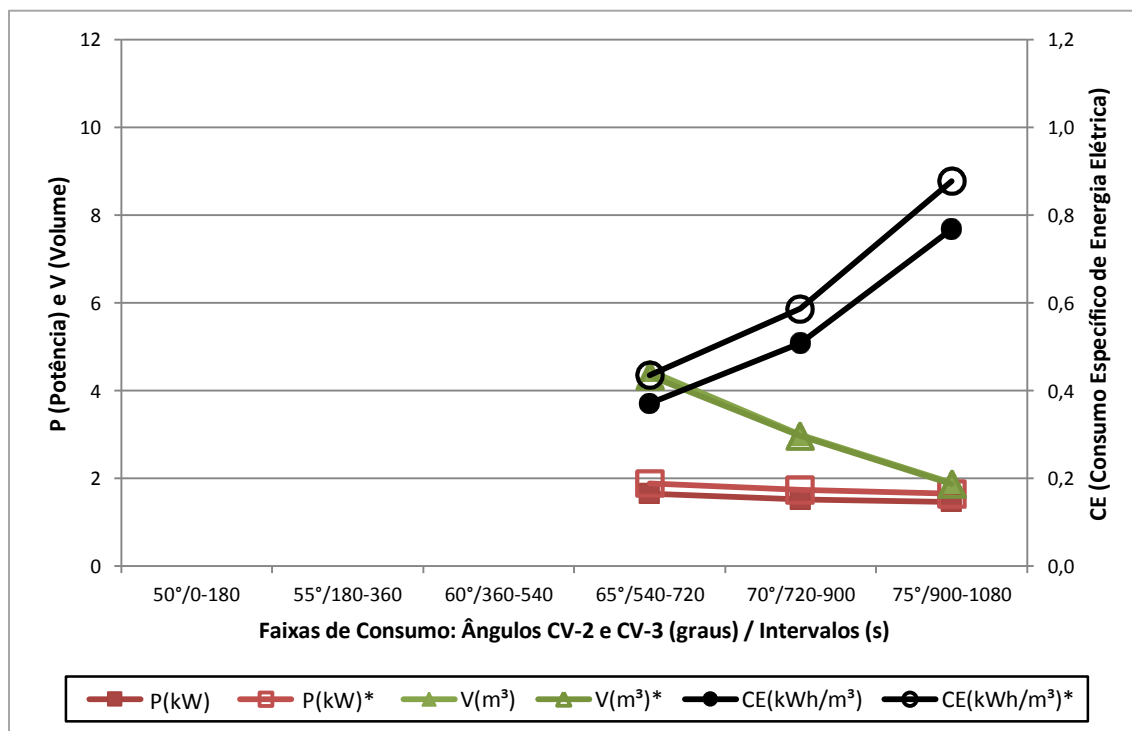


Figura 4.51 - Gráfico comparativo do Ensaio 1 versus Ensaio 3

Para determinar o impacto no aumento dos custos energéticos, caso o sistema seja operado nestas faixas de consumo, apenas com o conjunto principal (CMB) ou com (CMB+BST), foram estabelecidas curvas de demanda para cada caso.

Para quantificar o comparativo foi criada a curva de demanda para as três faixas de consumo representadas pelo funcionamento do sistema com apenas o CMB operando (ver Tabela 4.10 e Figura 4.52) e com os valores anteriormente calculados no Ensaio 1 (adaptado) para a opção de impulsão combinada CMB+BST (ver Tabela 4.11 e Figura 4.53).

Tabela 4.10 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 3

Tempo (h)	0/24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vazão (m³/h)	1,88	1,88	1,88	2,97	2,97	2,97	4,35	4,35	4,35	0,00	0,00	0,00
Vazão Acum (m³/h)	1,88	3,76	5,64	8,61	11,59	14,56	18,91	23,26	27,60	27,60	27,60	27,60
Consumo (kWh)	1,65	1,65	1,65	1,75	1,75	2,97	1,89	1,89	1,89	0,00	0,00	0,00
Cons. Acum. (kWh)	1,65	3,3	4,95	6,699	8,448	11,42	13,31	15,21	17,1	17,1	17,1	17,1
Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Vazão (m³/h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,35	4,35	4,35	2,97	2,97	2,97
Vazão Acum (m³/h)	27,60	27,60	27,60	27,60	27,60	27,60	31,95	36,30	40,65	43,62	46,60	49,57
Consumo (kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,89	1,89	1,89	1,75	1,75	1,75
Cons. Acum. (kWh)	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	18,99	20,88	22,77	24,52	26,27	28,02

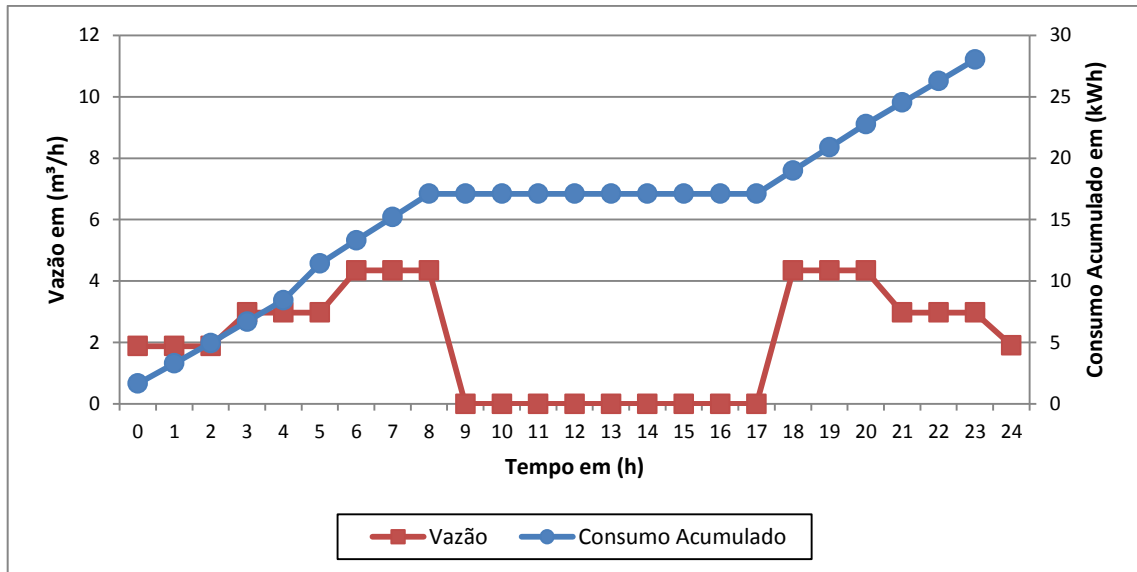


Figura 4.52 - Curva de demanda e consumo energético acumulado para o Ensaio 3

Tabela 4.11 - Dados de vazão e potência baseados no Ensaio 1 (adaptado)

Tempo (h)	0/24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vazão (m³/h)	1,91	1,91	1,91	2,99	2,99	2,99	4,47	4,47	4,47	0,00	0,00	0,00
Vazão Acum (m³/h)	1,91	3,82	5,72	8,72	11,71	14,71	19,17	23,64	28,10	28,10	28,10	28,10
Consumo (kWh)	1,47	1,47	1,47	1,52	1,52	2,99	1,66	1,66	1,66	0,00	0,00	0,00
Cons. Acum. (kWh)	1,466	2,932	4,398	5,922	7,445	10,44	12,1	13,76	15,42	15,42	15,42	15,42

Tempo (h)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Vazão (m³/h)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,47	4,47	4,47	2,99	2,99	2,99
Vazão Acum (m³/h)	28,10	28,10	28,10	28,10	28,10	28,10	32,57	37,03	41,50	44,49	47,48	50,48
Consumo (kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66	1,66	1,66	1,52	1,52	1,52
Cons. Acum. (kWh)	15,42	15,42	15,42	15,42	15,42	15,42	17,08	18,75	20,41	21,93	23,46	24,98

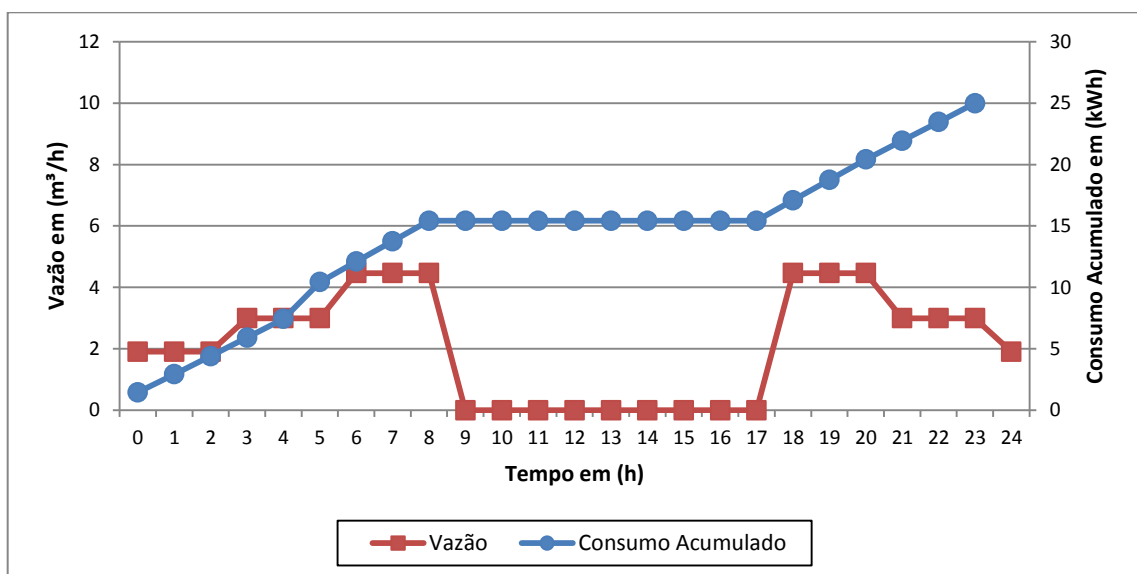


Figura 4.53 - Curva de demanda e cons. energético acum. para o Ensaio 1 (adaptado)

Após a distribuição das vazões, em função das potências requeridas, para cada Ensaio, pode-se estimar o consumo energético, para as duas situações e extrapolar os valores de consumo diário, para mensal e anual. Considerando que o valor do kWh seja R\$ 0,37664 (para simplificar – consumidor residencial), também podem ser estimados valores monetários para referência (ver Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Ensaio 1 (adaptado) *versus* Ensaio 3 (consumo elétrico e monetário)

ENSAIO	CONSUMOS ENERGÉTICOS E VALORES MONETÁRIOS							
	DIÁRIO		MENSAL		ANUAL		DIFERENÇA ANUAL	
	(kWh)	(R\$)	(kWh)	(R\$)	(kWh)	(R\$)	(R\$)	(%)
1	24,98	9,41	749,40	282,25	8.992,80	3.387,05	412,19	12,17
3	28,02	10,55	840,60	316,60	10.087,20	3.799,24		

As vazões produzidas para um dia pela rede de abastecimento nos dois casos deveriam ser iguais, entretanto verificou-se uma pequena diferença de 1,85% (Ensaio 1 (modificado) = 50,48 m³/dia e Ensaio 3 = 49,57 m³/dia), plenamente justificável, pois está dentro da margem da incerteza de medição dos transdutores de vazão.

Ficou comprovado que operar o sistema com os dois motores, em vez de apenas um, é mais econômico do ponto de vista energético, para as faixas de consumo simuladas, onde as duas possibilidades de operação são admitidas. A economia de energia é da ordem de 12,17%.

Por outro lado, para o controlador do sistema, quando foram utilizados os dois conjuntos de impulsão (CMB+BST) verificou-se um melhor desempenho, para atingir e manter estáveis as pressões nas referências pré-estabelecidas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho de tese foi concebida, modelada e construída uma rede de abastecimento experimental e desenvolveu-se um sistema supervisor e de controle, utilizando o software LabVIEW™. O sistema de controle que tem como objetivo comandar a impulsão do sistema foi apoiado na lógica *fuzzy*. Devido à estratégia de controle escolhida ser flexível, pois administra o erro registrado nas pressões do sistema em relação aos valores de referência (set point), possibilita a sua aplicação em redes de distribuição de água que possuam zonas de consumo bem definidas e com impulsão distribuída.

Nos ensaios realizados, em várias situações, foi observada a presença de transientes hidráulicos. Estes fenômenos podem ser vistos nos gráficos onde existe a evolução das pressões e vazões da rede experimental, sobretudo quando o sistema parte do repouso, na aceleração e desaceleração dos motores, operação de válvulas e no momento em que começa a verter água na zona alta da rede. Como as magnitudes dos transientes não foram relevantes, principalmente quando o sistema atinge o regime permanente, não foi capaz de leva-lo a instabilidade em nenhum dos ensaios realizados. Contribuíram para a minimização dos efeitos dos transientes a escolha de válvulas de abertura e fechamento lento e o uso de conversores de frequência nos motores das bombas, possibilitando alterar o fluxo na rede de forma suave e gradual.

O sistema de controle desenvolvido ajustou e manteve satisfatoriamente o equilíbrio das pressões nas zonas de consumo da rede de abastecimento, em todos os ensaios de controle, que contemplam as várias maneiras de operar o sistema (com um ou

dois conjuntos de impulsão) manipulando inteligentemente os elementos de controle disponibilizados.

Com base nos diversos ensaios realizados neste trabalho, utilizando a rede de abastecimento experimental, foi possível validar o sistema de controle, do ponto de vista hidráulico e energético.

A seguir são destacadas as conclusões que foram reveladas pelo controle da rede de abastecimento, do ponto de vista hidráulico:

- ✓ O sistema de bombeamento distribuído se mostrou mais adequado para impulsionar o sistema, se comparado ao sistema de bombeamento único.
- ✓ Confirmação de que operar uma rede de abastecimento com um sistema de controle adequado, possibilita regular a pressão nas zonas de uma rede.
- ✓ O sistema de controle reagiu bem a mudanças bruscas de objetivo (*set points*) – item 6.1.3, obtendo como tempo de resposta máximo 18 segundos.
- ✓ Em todos os ensaios realizados, os erros relativos das pressões, nas duas zonas de abastecimento, em regime permanente, foram inferiores a $\pm 1\%$.
- ✓ Nos ensaios de vazão mínima, onde o sistema pode ser operado na sua totalidade, para todas as faixas de consumo, com um ou dois conjuntos de impulsão, os tempos de assentamento para o sistema funcionando com dois conjuntos de impulsão, para as mesmas condições de contorno, obteve um tempo de assentamento 100% mais rápido, do que com apenas um conjunto (CMB+BST; CV-1 inicial = 10° foi de 60 s e 80° foi de 40 s) e (CMB; CV1 inicial = 10° foi de 120 s e 80° foi de 95 s).
- ✓ Todos os ensaios obtiveram êxito, quanto ao equilíbrio das pressões nos ramais da rede de abastecimento, para os *set points* exigidos.

Do ponto de vista energético, os ensaios forneceram subsídios que remeteram as seguintes conclusões:

- ✓ Operar uma rede de abastecimento sem controle é menos econômico, do que com controle, além de promover pressões elevadas e vazões desnecessárias nas zonas de distribuição da rede. No caso da utilização de dois conjuntos de impulsão (CMB+BST), o consumo de energia elétrica da operação sem controle foi 39,17% maior se comparada com o sistema sem controle. O volume de água bombeado desnecessariamente atingiu o valor de 24,08 m³/dia ou 8.668,80 m³/ano.

- ✓ No comparativo realizado de operação da rede com dois *versus* um conjunto de impulsão, operar o sistema com apenas um conjunto (CMB) resultou num consumo de energia elétrica de 12,17% a mais, em relação à combinação de dois conjuntos (CMB+BST).

Para evidenciar as principais vantagens obtidas, quando se utiliza o sistema de controle automatizado, desenvolvido utilizando a rede de abastecimento, destacam-se:

- ✓ Distribuição das pressões de forma adequada.
- ✓ Provável redução de vazamentos.
- ✓ Redução da potência instalada da impulsão.
- ✓ Monitoramento em tempo real.
- ✓ Redução do consumo de água.
- ✓ Redução do consumo de energia elétrica.
- ✓ Construção de um banco de dados com as informações de operação e de todas as variáveis do sistema.
- ✓ Conhecendo o sistema e seu histórico de funcionamento, os gestores poderão tomar decisões mais adequadas.

Além da teoria de controle estudada e aplicada à rede de abastecimento experimental, também foram realizados outros ensaios para determinar os custos energéticos de operação da rede. Para a situação de contorno que foi proposta e estudada neste trabalho de pesquisa ficou evidente que uma rede de abastecimento automatizada com impulsão distribuída possui vantagens importantes, em relação a um mesmo sistema, concebido com impulsão única. São elas:

- ✓ Facilitar o equilíbrio das pressões.
- ✓ Possibilitar a economia de energia elétrica.
- ✓ Reduzir a potência instalada do sistema, através da otimização da combinação dos elementos de controle.
- ✓ Proporcionar o acréscimo de pressões pontuais na rede, sem afetar outros setores.

5.2 RECOMENDAÇÕES

As recomendações sugeridas a título de complementação desta pesquisa são as seguintes:

- ✓ Estudar os limites de perda de carga na aplicação de *boosters*, em função da distância destes em relação ao bombeamento principal.
- ✓ Estudar a associação de *boosters* em série e em paralelo.
- ✓ Acoplar ao sistema de bombeamento um monitoramento elétrico, em tempo real, dentro do sistema supervisório, para também servir como parâmetro de decisão para o controlador.
- ✓ Desenvolver indicadores de desempenho para avaliar a performance de sistemas de abastecimento de água.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHONEN T., TIAINEN R., VIHOLAINEN J., AHOLA J., e . KESTILÄ J., 2008 - *Pump operation monitoring applying frequency converter. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. IEEE E-ISBN 978-1-4244-1664-6, pp. 184-189.

AHONEN T., TIAINEN R., VIHOLAINEN J., AHOLA J., e . KESTILÄ J., 2009 - *Water Pumping System with PLC and Frequency Control. JJMIE Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. ISSN 1995-6665, V.3, N.3, pp. 216-221.

ALMEIDA, A. B. e KOELLE, E., 1992. *Fluid transientes in pipe networks. Computacional Mechanic Publication, Southampton*.

ARAÚJO, W.R., LEITE, L.C., MOREIRA, S.G., PEREIRA, V.M.P. e SILVA JÚNIOR, A.R., 2008. Aplicação de técnicas de inteligência artificial visando eficiência energética e estimação de parâmetros em sistemas motrizes industriais. *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 4, Brasil.

BEZERRA, S.T.M, 2009. Sistema *fuzzy* para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando à economia de água e energia. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

CAMBOIM, W.L.L., 2008. Aplicações de técnicas de controle *fuzzy* para sistemas de abastecimento de água. Dissertação Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

CAMPOS, E.A.V. e SILVA, H.C., 2008. Sistema Inteligente para tomada de decisões utilizando lógica *fuzzy*. *Anuário da Produção Acadêmica Docente*, vol. XII, no. 2, Anhanguera Educacional S.A., Valinhos, São Paulo, SP, Brasil.

CARVALHO, J.S.F., 2009. Controle adaptativo aplicado em um robô manipulador de dois graus de liberdade planar. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

CARVALHO, P. S. O., GOMES, H.P., SOUSA, A.S., ROCHA, N. B. S., TORRES, T. G., CARNEIRO, G. B., CARDOSO, P. H. e ALMEIDA, T. S., 2011 - Análise hidráulica e energética na aplicação de *boosters* e válvulas redutoras de pressão para otimizar sistemas de abastecimento de água. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

CASTRO, A.C., 2006. Projeto de controladores robustos descentralizados de ordem reduzida para amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

CRUZ, P.P. e FIGUEROA, F.D.R., 2010. *Inteligente Control Systems with LabVIEW*. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México, DF, ISBN: 978-1-84882-683-0.

DORF, R.C. e BISHOP, R.H., 2001. Sistemas de controle modernos. 8 ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ISBN: 85-216-1242-7.

EL-BAROUDY, I. e SIMONOVIC, S.P., 2006. *Application of the fuzzy performance measures to the city of London water supply system*. Canadian Journal of Civil Engineering. v. 33, n. 3, pp. 255-265, Canadá.

ELETROBRAS, 2005. Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Programa nacional de conservação de energia elétrica (PROCEL). Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GOMES, H.P., 2009. Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento - Análise Econômica de Projetos. 2ª Ed., UFPB/Ed. Universitária, João Pessoa, PB, Brasil, 146p. ISBN: 978-85-7745-461-7.

GOMES, H.P., GARCÍA, R.P. e REY P.L.I. (organizadores), 2007. Abastecimento de água – O estado da arte e técnicas avançadas. UFPB/Ed. Universitária, João Pessoa, PB, Brasil, 386p, ISBN: 978-85-7745-078-3.

IVANQUI, J., 2005. Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica *fuzzy*. Dissertação de M.Sc., Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

JAIN R., SIVAKUMARAN N. e RADHAKRISHNAN T.K., 2011 - *Design of self tuning fuzzy controllers for nonlinear systems. Expert Systems with Applications*. Elsevier, V. 38, pp. 4466-4476.

JANTZEN, J., 2007. *Foundations of fuzzy control* - Technical University of Denmark, Inglaterra. Ed. Jonh Wiley & Sons, Ltd., , 209p. ISBN: 978-0-470-02963-3

JÚLIO, E.F.X., 2010. Controlador *fuzzy* aplicado a um sistema de controle de posição acionador por motores de indução trifásicos. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

KEHTARNAVAZ, N. e KIM, N., 2005. *Digital signal processing system - Level design using LabVIEW*. Elsevier, Burlington, MA 01803, USA, ISBN: 0-7506-7914.

KHATCHATOURIAN, O. e TRETER, J., 2010. Aplicação da lógica *fuzzy* para avaliação econômico-financeira de cooperativas de produção. Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação, vol. 7, no. 1, p. 141-162, TECSI FEA USP, SP, Brasil.

LIAW, C.M. e WANG, J.B., 1991. *Design and implementation of a fuzzy controller for a high performance induction motor drive*. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., v. 21,n. 4, pp. 921-929.

LIMA, F.M.C, 2007. Desenvolvimento de um sistema de controle *fuzzy* do potencial matricial da água no solo visando à otimização de processos de irrigação. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

LUNA FILHO, F.M. e GOSMANN, H.L., BAUCHSPIESS, A., 2002. Controle *fuzzy* para sistemas de nível de líquidos. XIV – Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN, Brasil.

MACHADO, M.M., 2003. Sistema inteligente para gerenciamento de cargas elétricas de edifícios. Dissertação Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

MAMDANI, E.H., 1973. Applications of *fuzzy* algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEEE 121, vol. 12, p. 1585-1588.

MARIANO, V., 2005. Controle adaptativo aplicado a um eixo posicionador de mesa de máquina-ferramenta. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

MENDONÇA, G.L.F., 2008. Aplicação da técnica de controle *fuzzy* na absorção de vibrações em estruturas apertadas. Tese D. Sc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

MIRANDA, G.H.B., MARQUES, P.M.A. e FELIPE, J.C., 2009. Aplicação de conceitos da lógica nebulosa à classificação BI-RADS de nódulos de mama. *Journal of Health Informatics*, ano 01, vol. 01, São Paulo, SP, Brasil. <http://www.jhisbis.saude.ws/ojs-jhi/index.php>.

NBR 5410, 2004. Instalações elétricas de baixa tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NÓBREGA SOBRINHO, C. A., 2011. Controlador neural aplicado a um sistema posicionador acionado por motores de indução trifásicos. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

RAJU V., BALU K., COLLIER G. e DURAN O., 2011 - *Automated Testing of Satellite Data Configuration Modules using LabVIEW. 2nd International Conference on Space Technology (ICST)*. Athens, ISBN 978-1-4577-1874-8, pp. 1-4.

RUFINO, F.A.O., 2003. Desenvolvimento de um robô inteligente com visão digital. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

SANTOS, A.J.V., 2005. Posicionamento via rádio e visão de um robô móvel de esteiras. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

SIMÕES, M. G., 2007. Controle e modelagem *fuzzy*. ed. Blucher FAPESP, São Paulo, SP, Brasil. 186 p. ISBN: 978-85-212-0416-9.

TARDELLI FILHO, J., 2004. Controle e redução de perdas. Capítulo 10. In: Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

TRAVIS, J. e KRING, J., 2006. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. 3 ed., ISBN: 978-0-13-185672-1.

TSUTIYA, M. T., 2001. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. ABES. São Paulo, SP, Brasil. 185 p.

TSUTIYA, M. T., 2004. Abastecimento de água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

VENTURINI, M.A.A.G.; BARBOSA, P.S.F. e LUVIZOTTO JUNIOR, E., 2001. Estudo de alternativas de reabilitação para sistemas de abastecimento de água. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais... Aracajú: ABRH, 2001, 1 CD-ROM.

WENHAI H., 2009 - *Testing System of Hydraulic Head of Mine Pump based on LabVIEW*. International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. IEEE, ISBN 978-1-4244-3331-5, pp. 291-295.

WU-QUAN HE, MING-KE CAI, YU-BAO WANG e XIAO-JIAN WANG, 2010 - *Automatic water supply control system of graded constant pressure by variable frequency speed and its application to pipeline irrigation. Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*. Wuhan, Hubei China, ISBN 978-0-7695-4304-8, pp. 385-388.

XAVIER FILHO, A.F., 2008. Controlador *fuzzy* aplicado a um sistema de controle de posição. Dissertação, Mc., Universidade Federal da Paraíba, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB, Brasil.

YANG Z., WU L. e DONG X, 2010 - *Control System Design For Constant-pressure Water Supply. Second International Conference on MultiMedia and Information Technology*. Kaifeng, ISBN 978-0-7695-4008-5, pp. 55-57.

YATIM, A.H.B.M. e UTOMO, W.M., 2005. “*Neuro-fuzzy on-line optimal energy control for variable speed compressor motor drive system*”. In: International Conference on Power Electronics and Drives Systems, v. 1, pp. 776-780, Jan.

ZADEH, L., 1965. *fuzzy Sets. Information and Control*, USA, vol. 8, pp 338-353.

APÊNDICE A (código fonte MATLAB)

Código fonte desenvolvido no software MATLAB, para construção da Figura 2.7 do Capítulo III.

```
function [u_cda] = mamdani(erro)
clc % Limpando a tela
% Definindo o conjunto de termos da conclusão, com o valor
% de pertinência para cada um dos cinco pontos do universo
% Definindo os vetores de entrada
neg = [1 0.93 0.05 0 0];
zero = [0 0.61 1 0.61 0];
pos = [0 0 0.05 0.93 1];
% Criando a matriz "entrada" e exibindo os dados
entrada = [neg;zero;pos]
% Definindo o vetor que representa o "Universo da Conclusão" (Eixo "X")
u = [-100 -50 0 50 100];
% Definindo o intervalo, obtido através do vetor "u"
intervalo = abs(u(2)-u(1));
% Determinando o índice correspondente ao erro (-50)
indice = 1 + (erro + 100)/intervalo;
% Definindo a coluna correspondente ao erro (dado de entrada)
neg_m = min( neg, neg(indice));
zero_m = min( zero, zero(indice));
pos_m = min( pos, pos(indice));
% Criando a matriz "mamdani" e exibindo os dados
mamdani = [neg_m;zero_m;pos_m]
% Criando o vetor "acumulado" considerando o número de elementos
% do vetor "neg_m"
acumulado = 1:length(neg_m);
% Criando o vetor de saída "acumulado"
for i = 1:length(neg_m)
acumulado(i) = max( max( neg_m(i), zero_m(i) ), pos_m(i) );
```

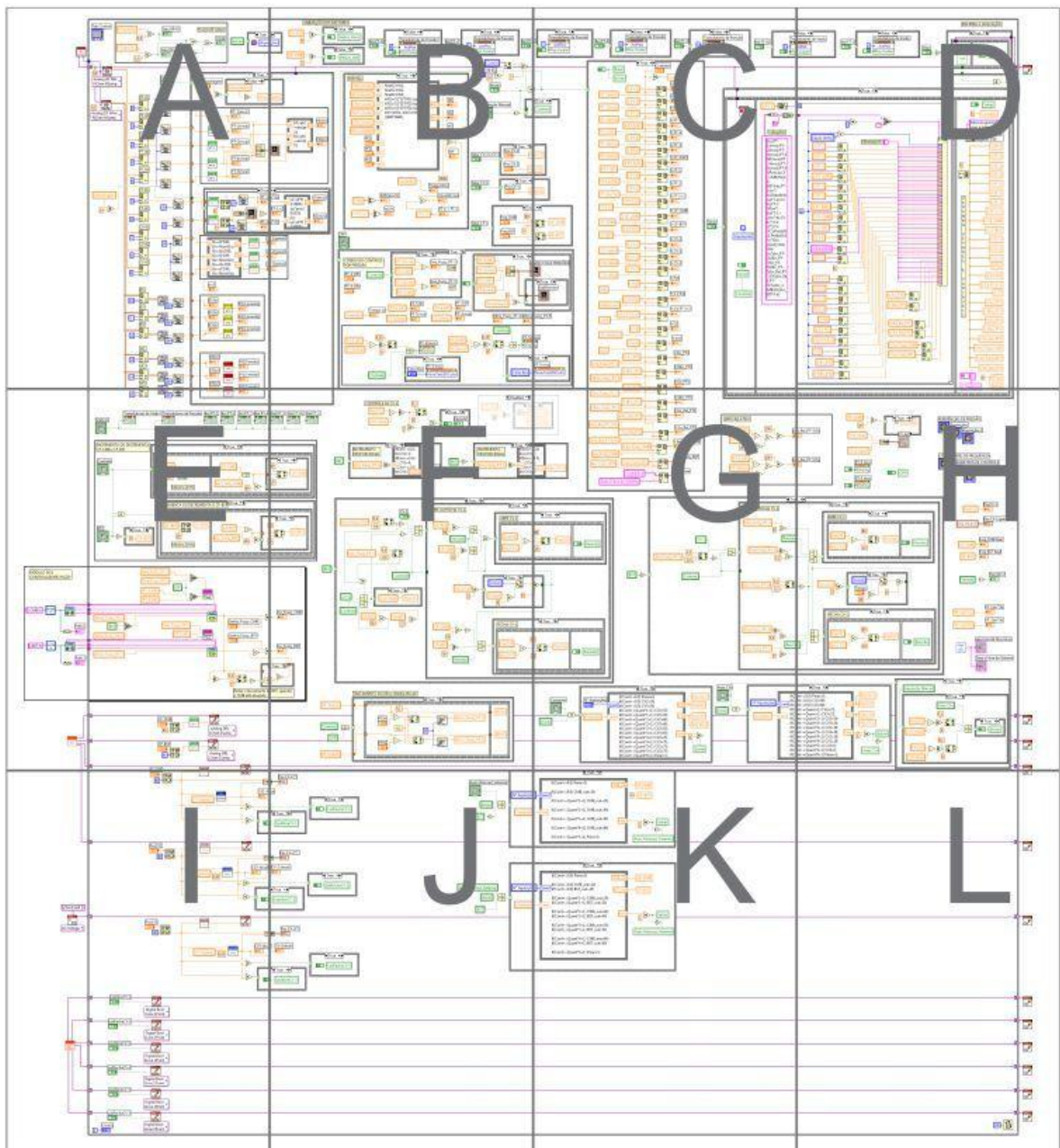
```

end
% Exibindo o vetor "acumulado"
acumulado
% Definindo variáveis
u_cda = 0;
denominador = 0;
% Determinando o valor do sinal de controle
for i = 1:length(neg_m)
    u_cda = u_cda + (u(i)*acumulado(i));
    denominador = denominador + acumulado(i);
end
% Valor do sinal de controle
u_cda = u_cda/denominador;
% Plotando os dados de entrada e saída numa mesma figura
figure(1)
subplot(3,3,1); plot(u, neg);
title('Negativo - Error');
subplot(3,3,2); plot(u, neg_m);
title('Negativo - Control');
subplot(3,3,4); plot(u, zero);
title('Zero - Error');
subplot(3,3,5); plot(u, zero_m);
title('Zero - Control');
subplot(3,3,6); plot(u, acumulado);
title('Acumulado');
subplot(3,3,7); plot(u, pos);
title('Positivo - Error');
subplot(3,3,8); plot(u, pos_m);
title('Positivo - Control');
end

```


APÊNDICE B (código fonte LabVIEW™ do programa supervisorio)

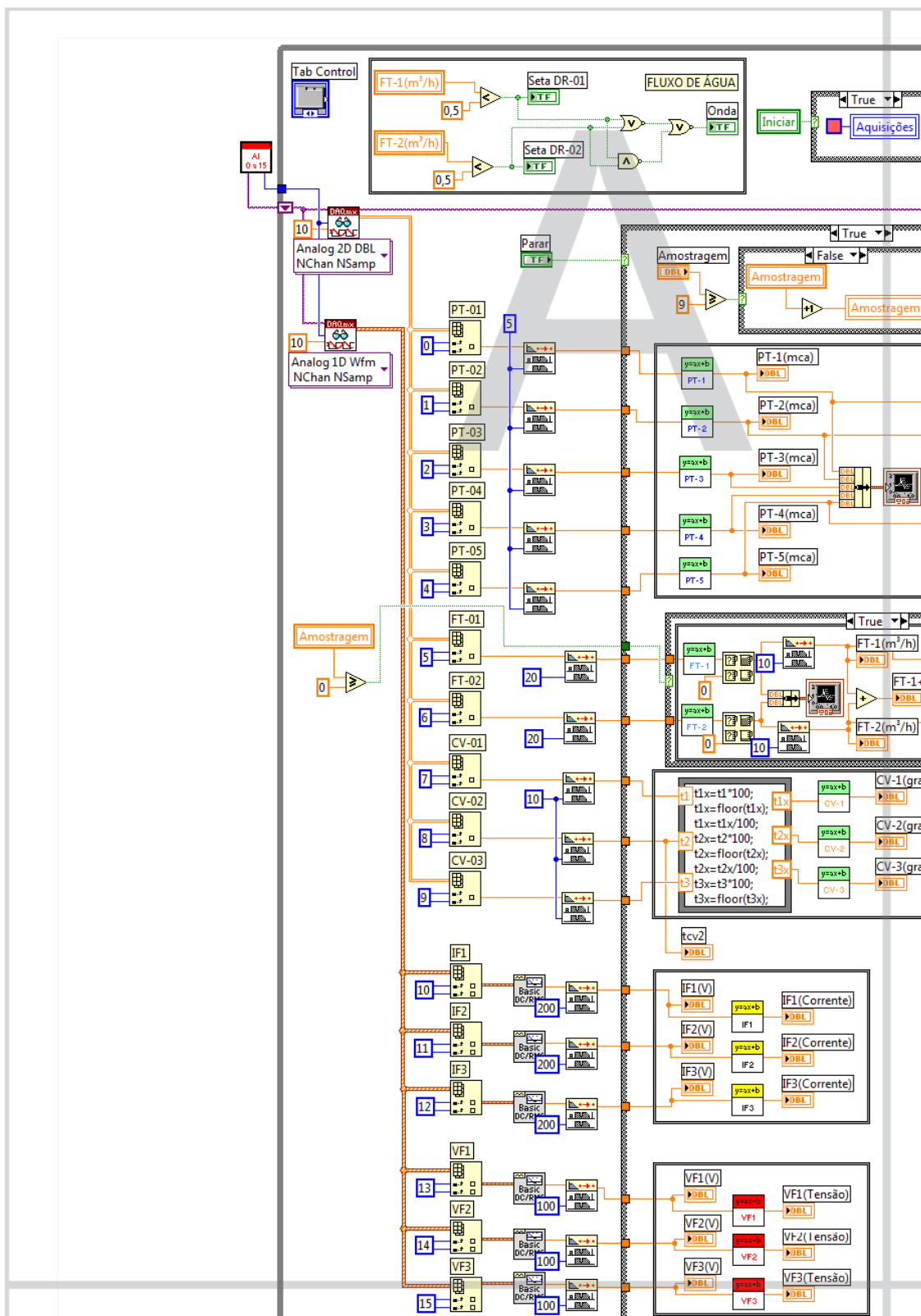
Para possibilitar a legibilidade da programação computacional, foi desenvolvida a figura a seguir (espécie de mapa), que serve de referência para a montagem do código fonte do programa supervisorio, que foi desenvolvido na plataforma LabVIEW™ 8.2, responsável pela execução das funcionalidades de controle e ensaios que foram realizados e apresentados neste Trabalho de Tese, utilizando a rede de abastecimento de água experimental.



Mapa para montagem do código fonte

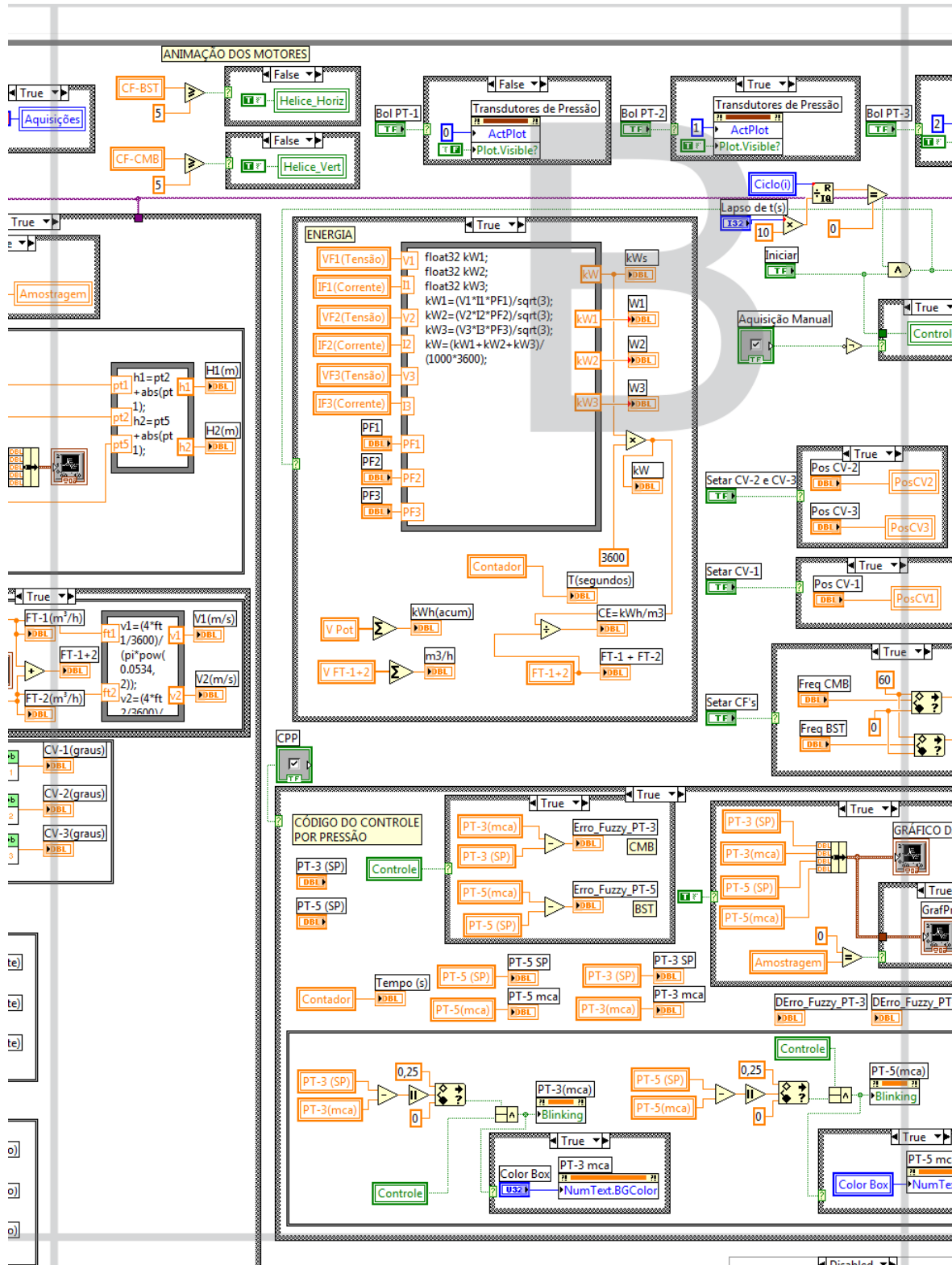
APÊNDICE B

Parte A para montagem do código fonte do programa supervisório



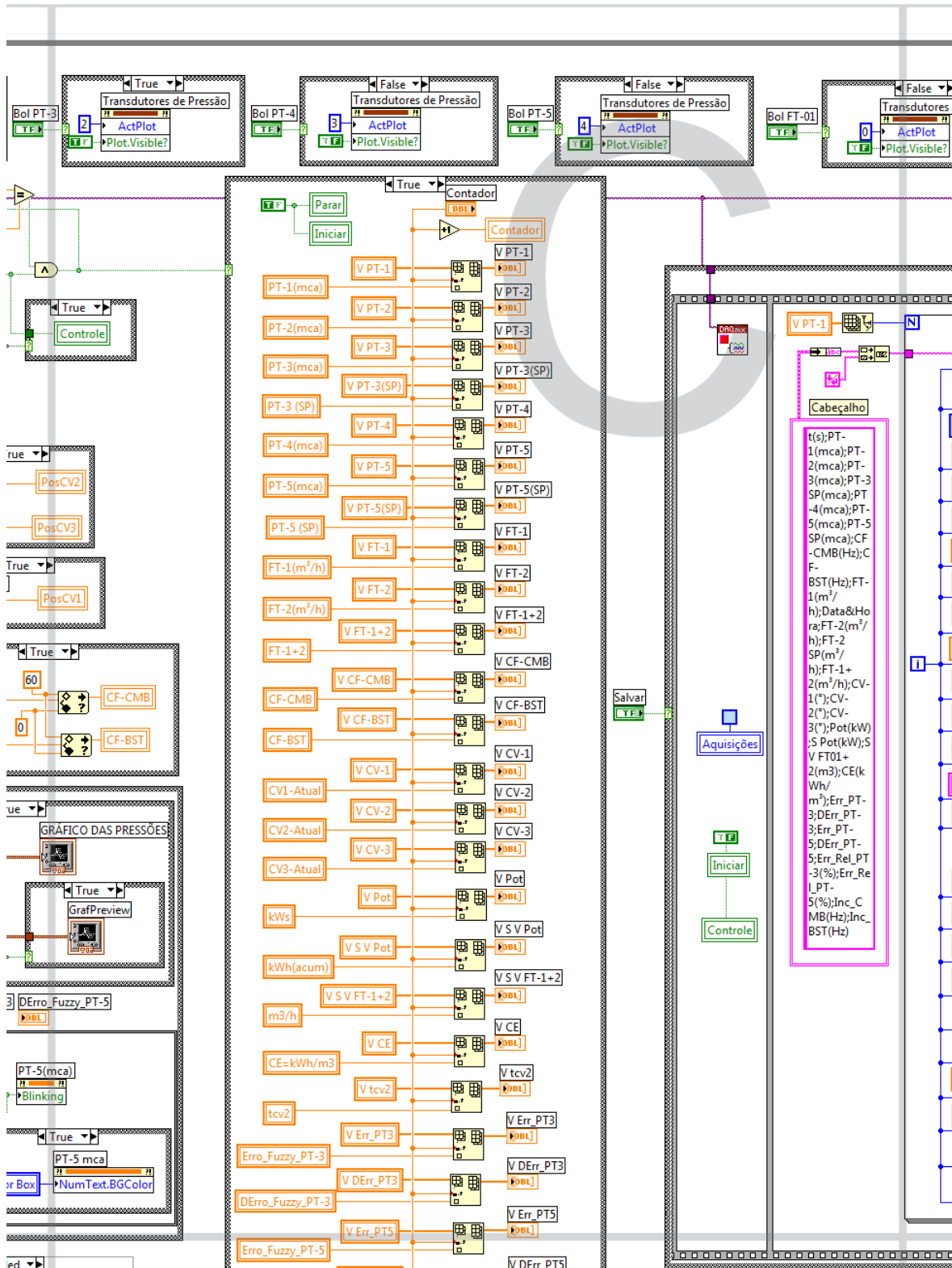
APÊNDICE B

Parte B para montagem do código fonte do programa supervisorio



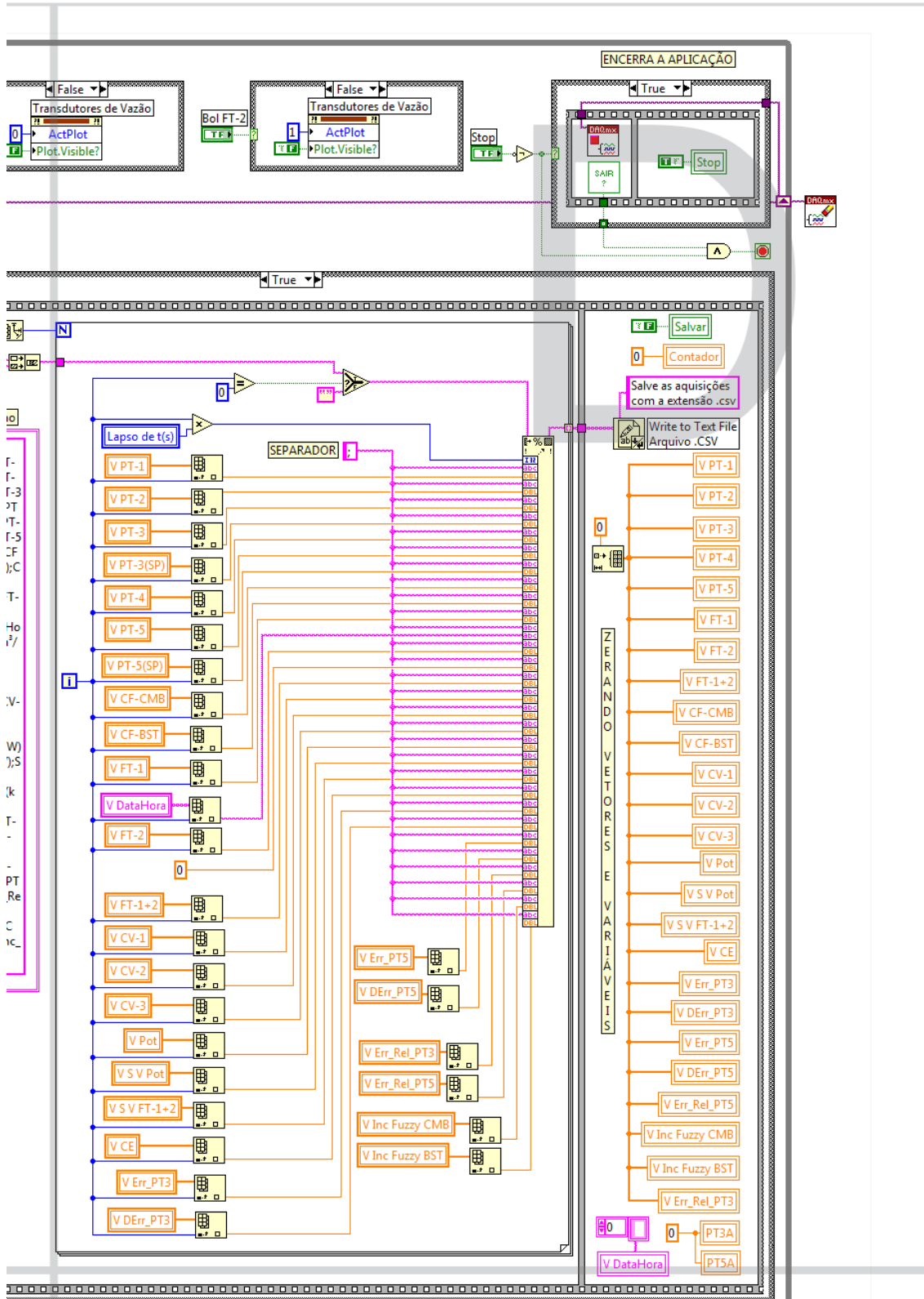
APÊNDICE B

Parte C para montagem do código fonte do programa supervisorio



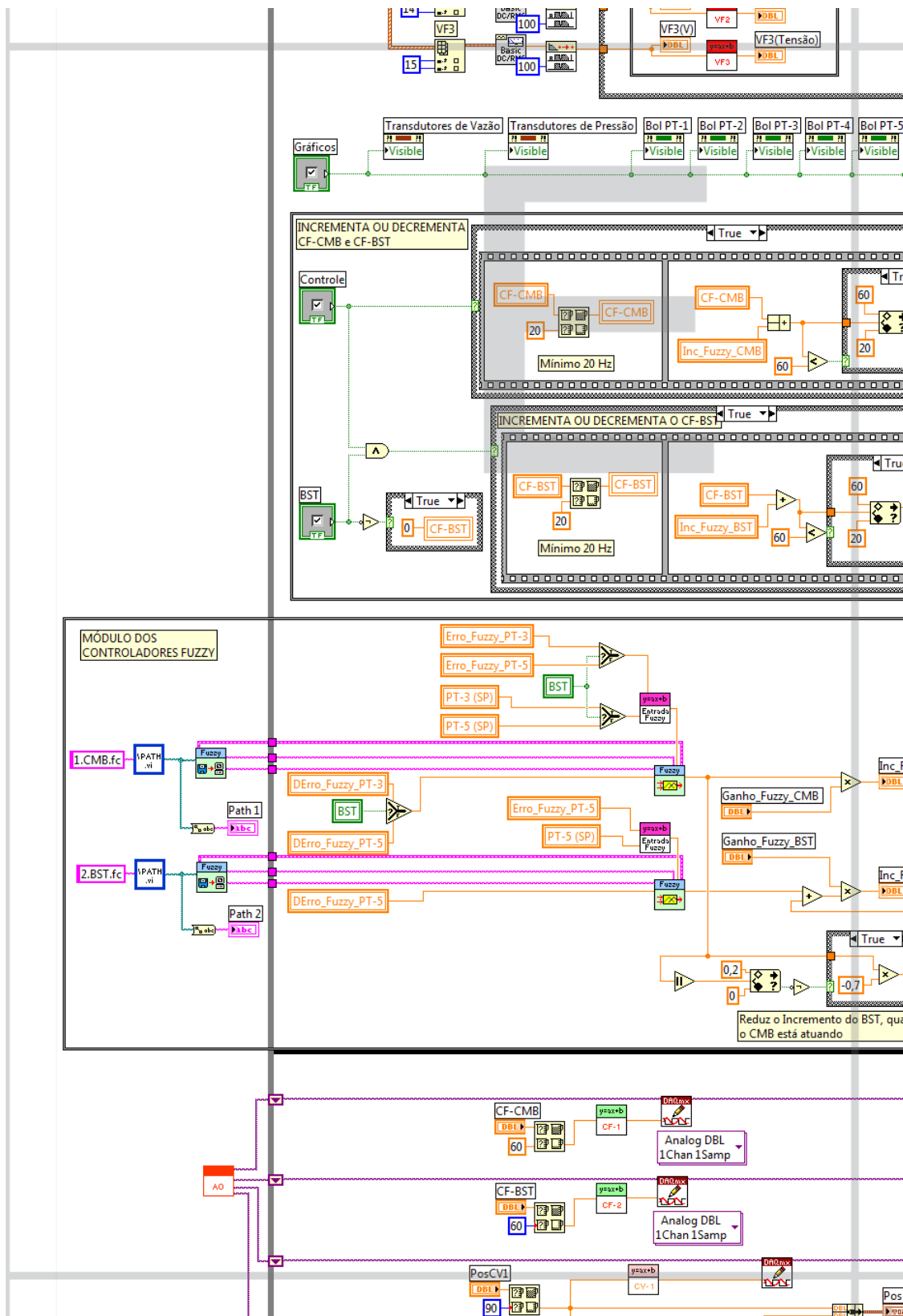
APÊNDICE B

Parte D para montagem do código fonte do programa supervisorio



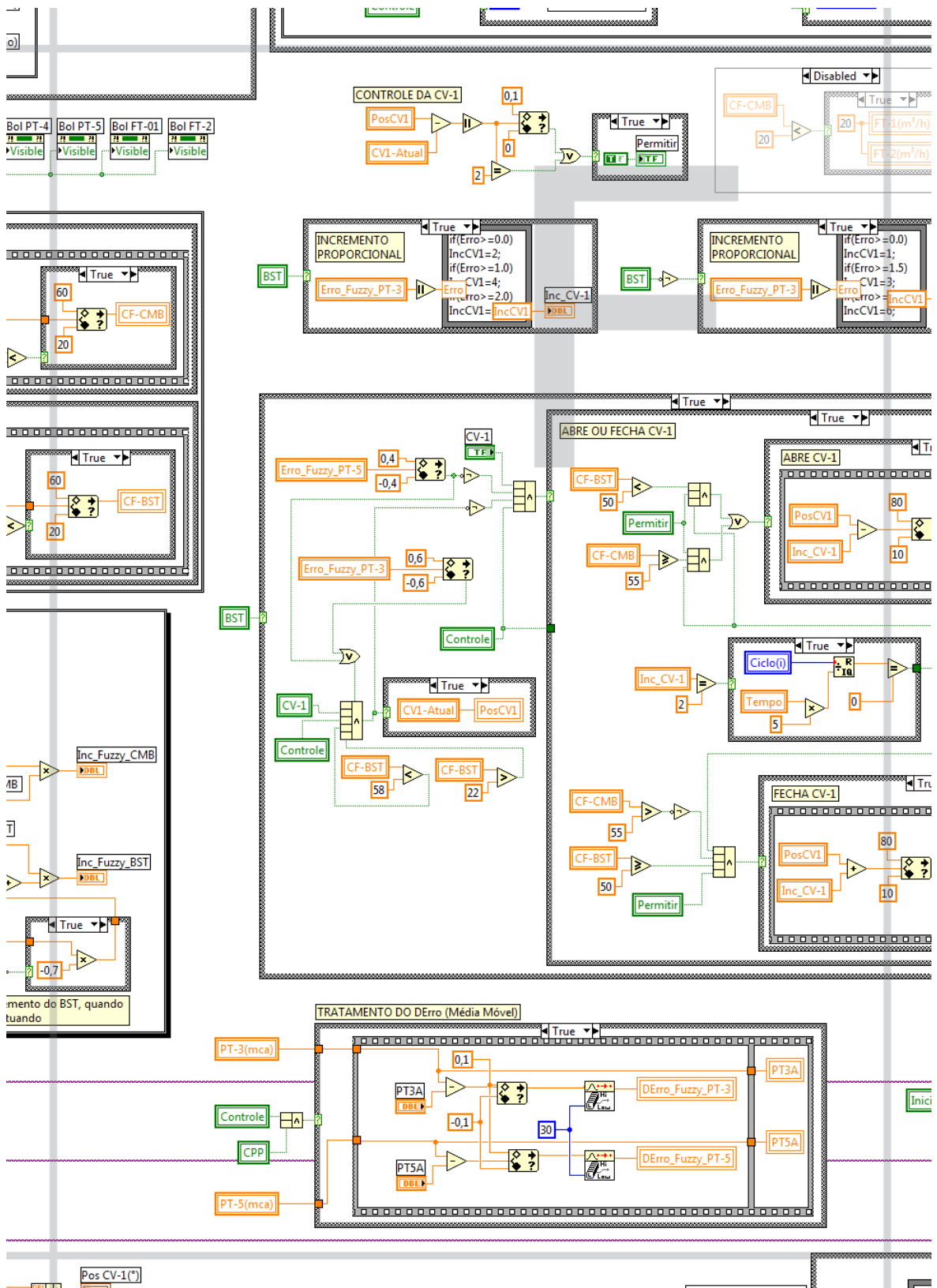
APÊNDICE B

Parte E para montagem do código fonte do programa supervisorio



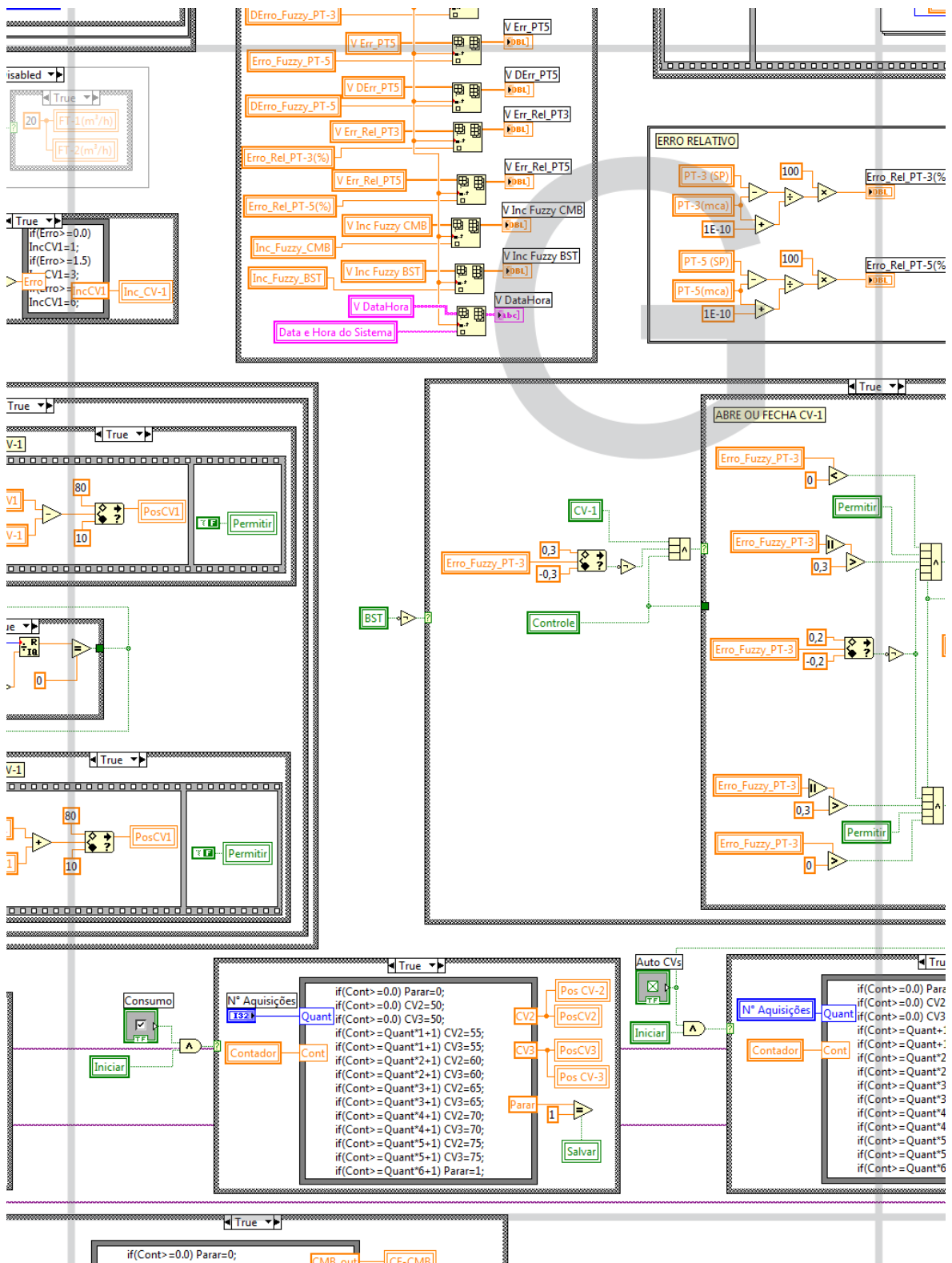
APÊNDICE B

Parte F para montagem do código fonte do programa supervisorio



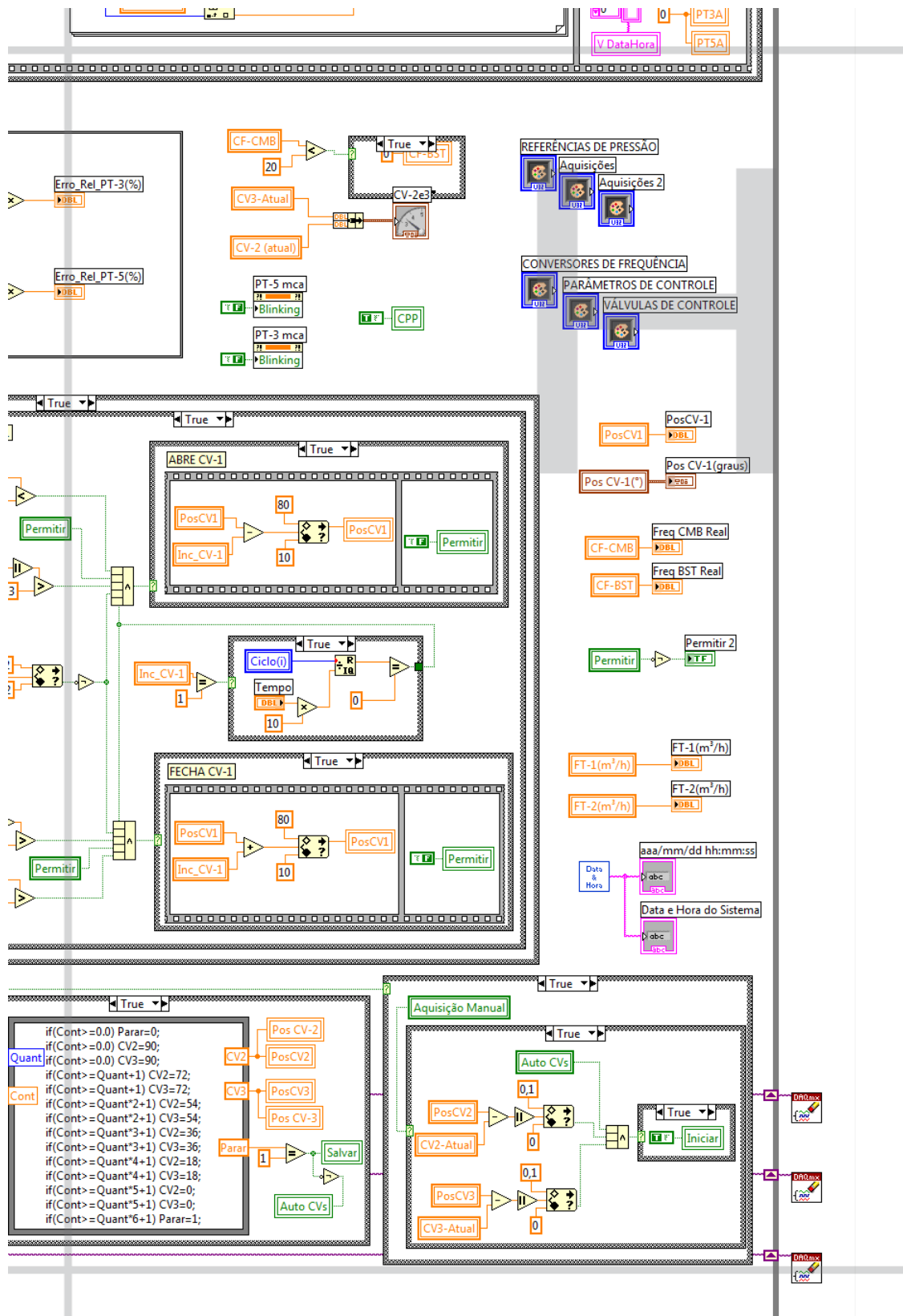
APÊNDICE B

Parte G para montagem do código fonte do programa supervisorio



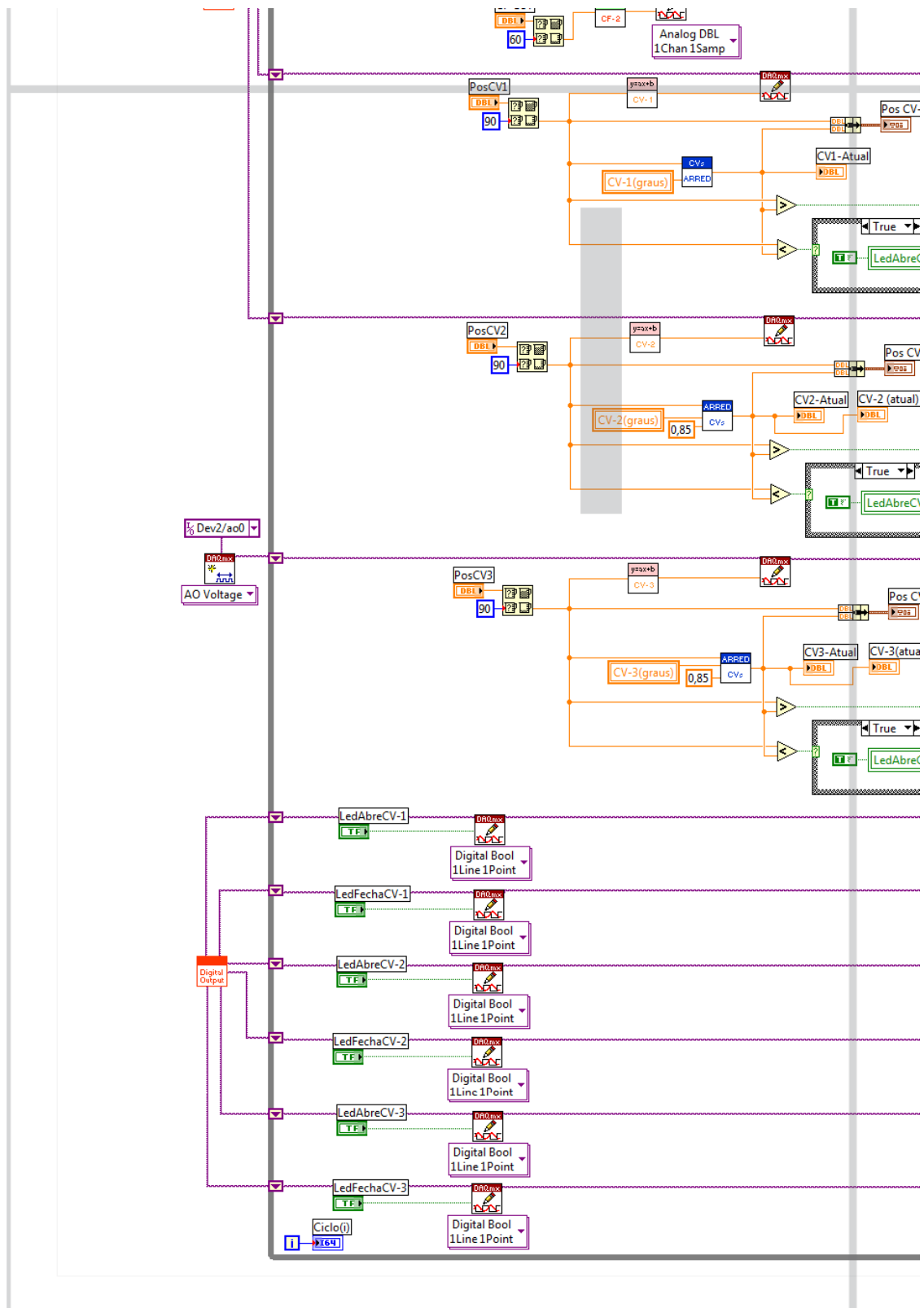
APÊNDICE B

Parte H para montagem do código fonte do programa supervisorio



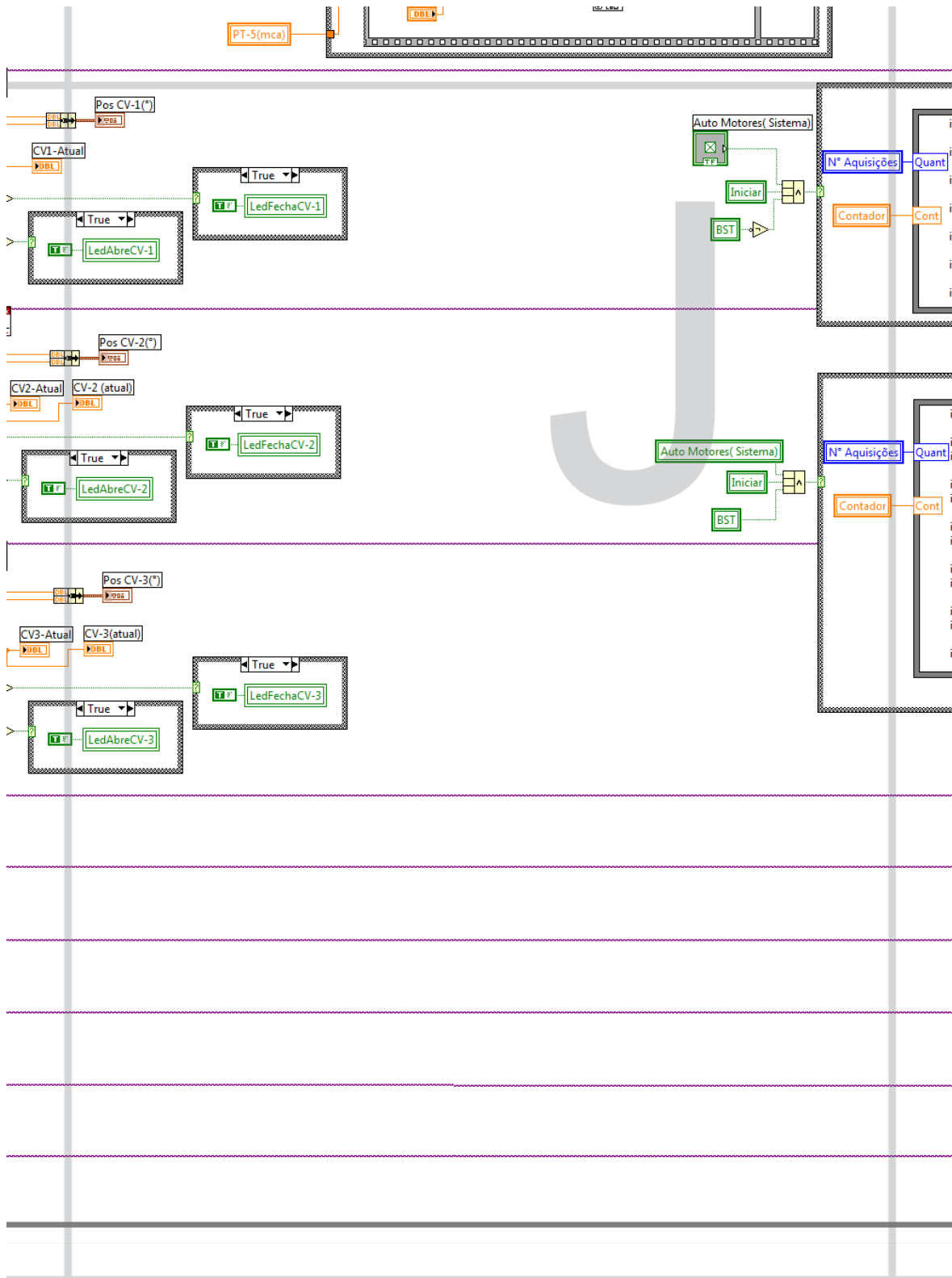
APÊNDICE B

Parte I para montagem do código fonte do programa supervisorio



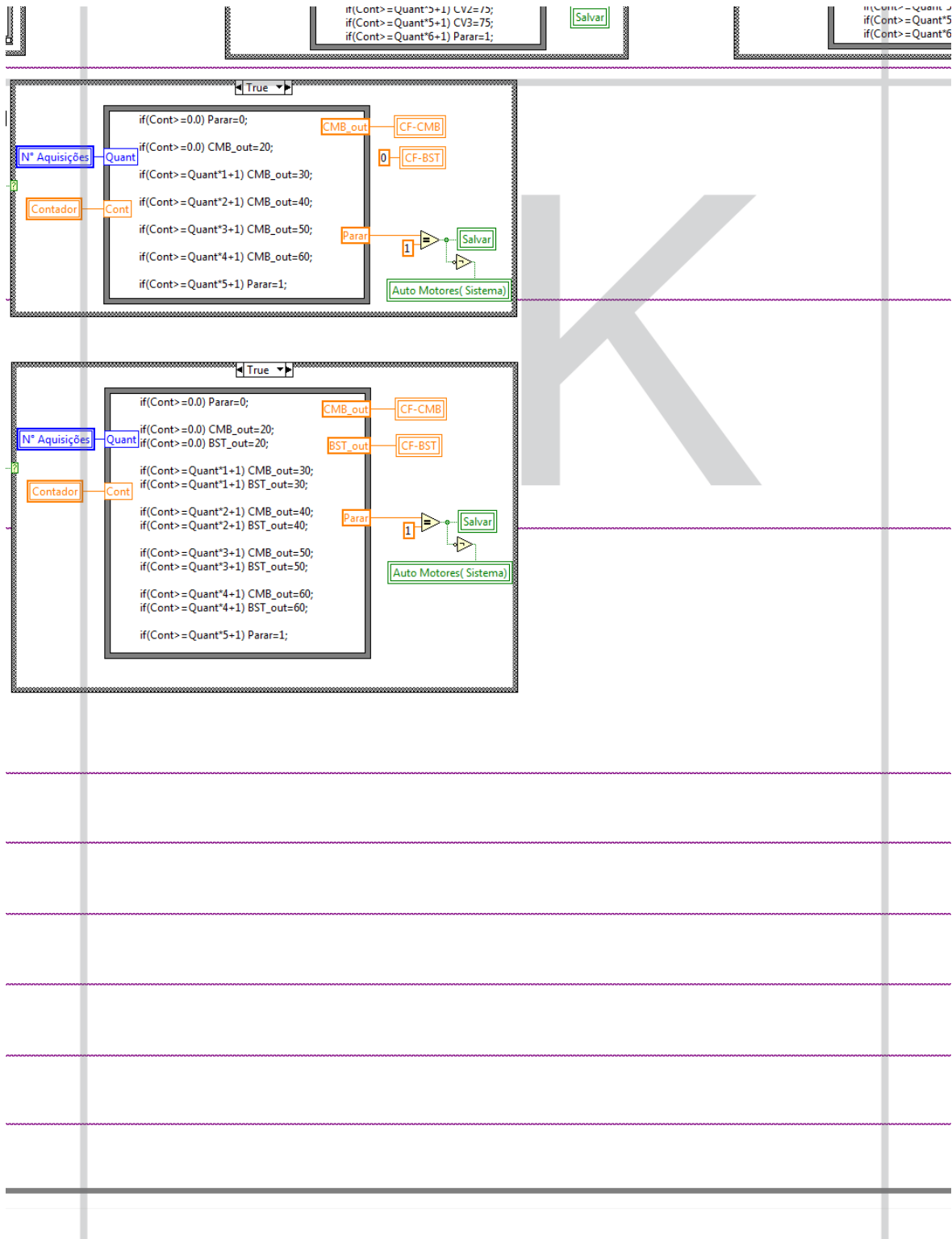
APÊNDICE B

Parte J para montagem do código fonte do programa supervisorio



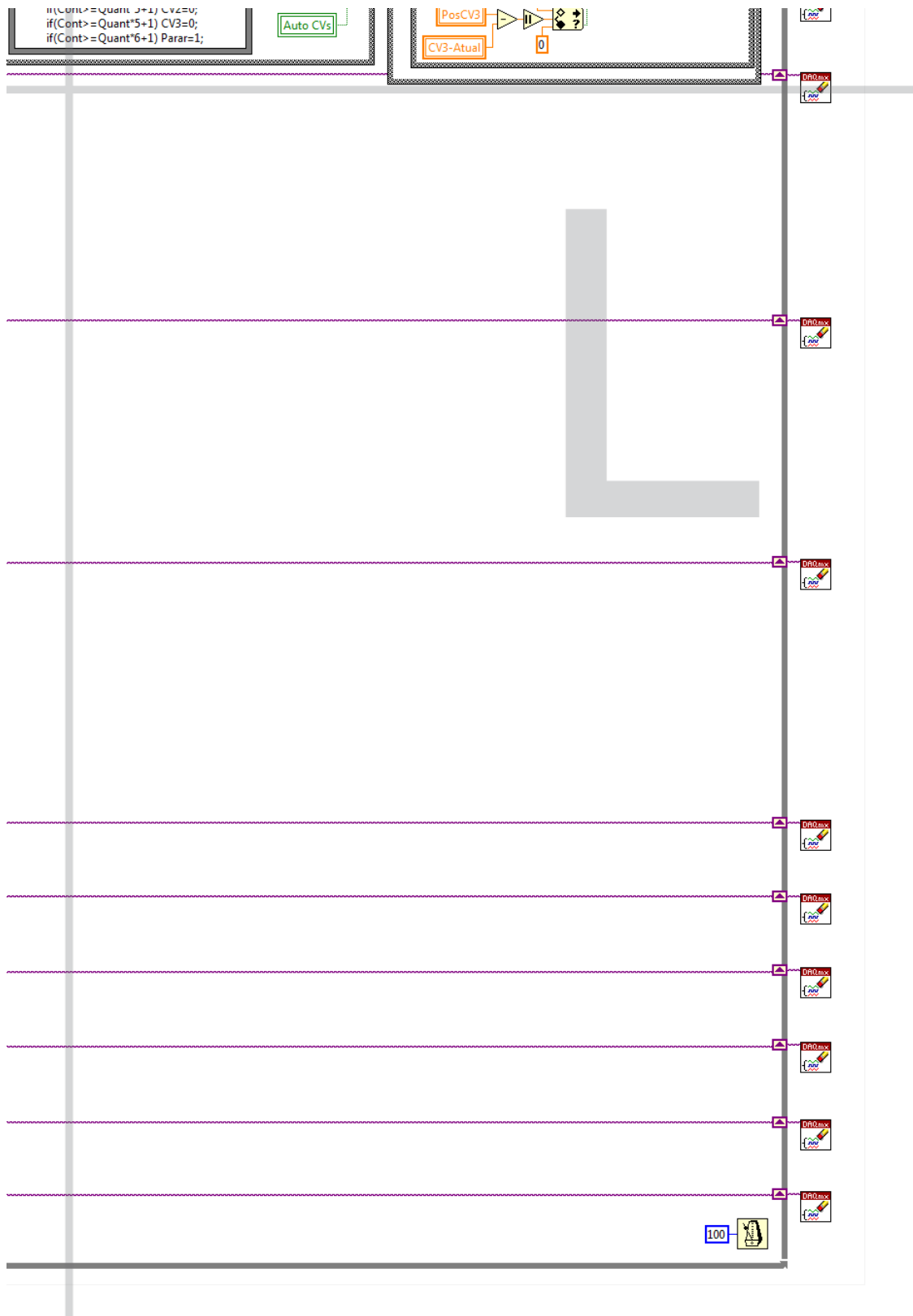
APÊNDICE B

Parte K para montagem do código fonte do programa supervisório



APÊNDICE B

Parte L para montagem do código fonte do programa supervisorio



APÊNDICE C (Procedimentos práticos)

Sistema de Proteção (Aterramento)

Por se tratar de um sistema que possui componentes elétrico-eletrônicos, não se pode ignorar a instalação de um sistema de aterramento eficiente. Há quem diga que o aterramento está para um sistema elétrico-eletrônico, assim como uma fundação está para uma edificação.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui uma norma que rege as instalações elétricas de baixa tensão. Essa norma é a NBR 5410. Consubstanciado na citada norma, bem como nas recomendações dos fabricantes dos equipamentos envolvidos no experimento, foi necessário dimensionar e executar um sistema de aterramento.

Um sistema de aterramento padrão é formado por barras metálicas cilíndricas (barras de *copperweld*), preferencialmente revestidas de uma generosa camada de cobre. Estas barras são cravadas no solo e interligadas por cabeamento que se fixam a estas através de conectores parafusados. Numa das barras, instala-se uma caixa plástica com uma tampa para inspeção futura. É nesta caixa que o cabo que conduzirá o aterramento ao sistema elétrico deve ser conectado.

Para garantir a eficiência do sistema de aterramento devem ser adquiridos materiais de boa qualidade. Outra característica importante refere-se à correta disposição das hastes. O posicionamento deve manter uma distância uniforme entre eles em torno de 3 m (três metros). A tipologia do aterramento utilizado para o experimento foi o triangular equilátero. Para evitar possíveis oxidações nas conexões das barras, foi utilizada uma massa de calafetar apropriada, para evitar a entrada de oxigênio e umidade nestes pontos críticos (ver Figura C.1).

Um aterramento eficiente garantirá que todos os equipamentos elétricos envolvidos no experimento estarão submetidos a um mesmo potencial, facilitando o funcionamento dos dispositivos de proteção, além de proteger o usuário de cargas estáticas e atmosféricas, viabilizando um caminho alternativo para a corrente ser desviada para a terra.

Para fins de registro, o aterramento instalado exclusivamente para este experimento, foi dimensionado e supervisionado quando da sua instalação, em 06/07/2010,

no terreno dos fundos do Laboratório de Hidráulica/LENHS, sob a responsabilidade de professores e profissionais do Departamento de Elétrica do Campus I da UFPB.



Figura C.1 - Fotos da execução do aterramento

Parametrização

Todos os equipamentos de medição e de controle trabalham com sinais elétricos. A comunicação entre a interface de aquisição de dados e o equipamento é realizada por meio de sinais de tensão ou de corrente dentro de uma faixa pré-estabelecida (depende dos limites dos equipamentos). É necessário que haja uma conversão de valores de tensão para unidades de medida ou vice-versa, para que a unidade da medida ou de comando de leitura seja corretamente interpretada e/ou apresentada.

O processo que converte os sinais elétricos em unidade de medida, ou vice-versa é denominado de parametrização¹⁰. Para exemplificar o procedimento, um conversor de frequência será parametrizado.

Os conversores de frequência podem ser comandados por um sinal elétrico em forma de tensão, normalmente na faixa compreendida entre 0 e 10 Volts. Como a unidade

¹⁰ A grande maioria dos equipamentos possui uma relação linear na representação da grandeza medida quer é fornecida, normalmente, na forma de corrente ou tensão. Portanto, basta conhecer dois pontos para definir a equação da reta. Caso esta relação não seja linear, o fabricante fornecerá uma equação específica.

de medida da frequência é em Hertz, geralmente na faixa compreendida entre 0 e 50 Hz (110 V) ou 0 e 60 Hz (220 V), se faz necessário converter Hertz em tensão (V). Esta tarefa torna-se simplificada, uma vez que todos os equipamentos de medição e de controle são concebidos e ajustados, de fábrica, para que as suas faixas de medição tenham um comportamento linear. Desta forma, podem-se compatibilizar os valores de entrada com os valores de saída, através da definição da equação de uma reta. Para este tipo de equipamento deverá ser utilizada uma porta analógica de saída da interface de aquisição de dados.

Considerando que o conversor de frequência possui um fundo de escala variando entre 0 e 60 Hz e faixa de tensão para controle variando entre 0 e 10 V. Com base nestas duas coordenadas, foi construído o gráfico (Figura C.2) e determinou-se a equação da reta que corresponde à parametrização.

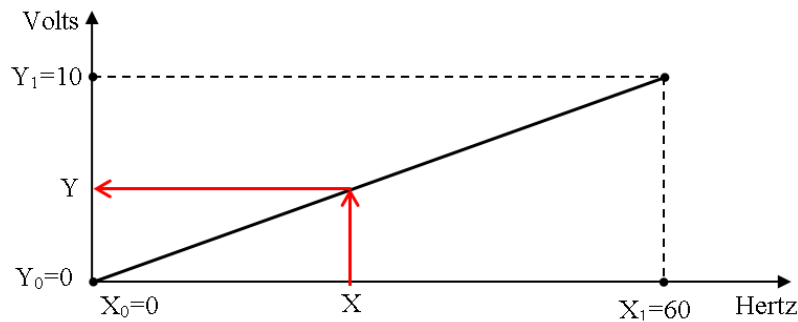


Figura C.2 - Gráfico da equação de parametrização do conversor de frequência

A Equação (Eq. C.1) de parametrização corresponde à equação da reta que passa pelos pontos (X_0, Y_0) e (X_1, Y_1) :

$$y = \left[\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right] x + \left[y_0 - \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} x_0 \right] \rightarrow y = \frac{1}{6} x \quad (\text{Eq. C.1})$$

Com base na equação encontrada, para que o conversor de frequência seja configurado em 25 Hz, por exemplo, o sinal elétrico correspondente a ser enviado pela porta analógica de saída da interface DAQ, na qual o equipamento foi conectado, deverá ser de 4,17 V.

No software do supervisorio desenvolvido, existem várias parametrizações realizadas. Para realização destas transformações, foram elaboradas várias subVIs. O código LabVIEW™ que representa a parametrização de um conversor de frequência, por exemplo, pode ser vista na Figura C.4.

O código é bastante simples. Ele processa a entrada xHzCF-1, aplicando na equação da reta que passa pelos pontos (X₀;Y₀) e (X₁;Y₁). O ponto a ser destacado é que os valores de entrada e limites foram multiplicados mil vezes, antes de serem processados pela equação. Já no resultado, é aplicada a operação inversa (dividir por mil vezes). Esse artifício matemático é muito utilizado em computação para criar casas decimais.

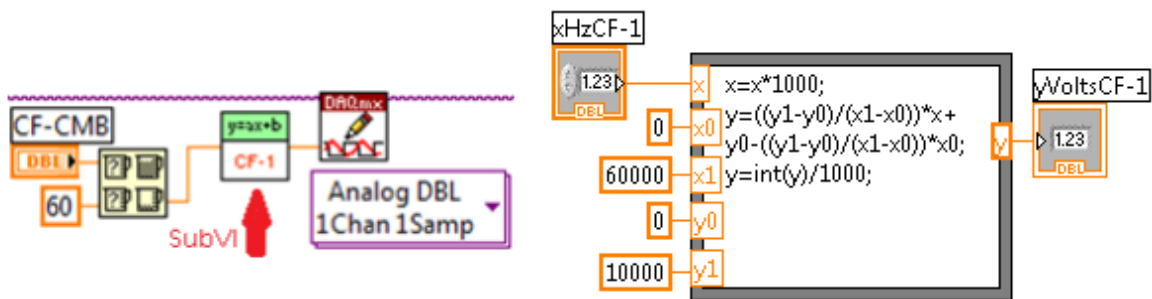


Figura C.4 - Ícone da SubVI no software supervisorio e o seu código em LabVIEW™

Calibração e Aferição dos Transdutores de pressão

Para a determinação correta dos limites de tensão, correspondentes ao fundo de escala dos equipamentos, foi utilizado um calibrador de pressão (Figura C.3). Estes limites de tensão obtidos foram utilizados nas equações de parametrização no programa de controle desenvolvido para o experimento.



Figura C.3 - Calibrador de pressão

O funcionamento do equipamento é o seguinte: o transdutor de pressão deve ser instalado no equipamento no local apropriado. Para compatibilizar as roscas, foi utilizado um adaptador. Para garantir que não haja vazamentos de ar, se faz necessário a utilização de fita veda rosca.

Após o devido acoplamento, para determinação do limite inferior de tensão, o transdutor deve ser energizado. O calibrador deve ser ligado e verificado se não existe ar residual. Para isso, basta esvaziar a câmara de pressão do equipamento, através de um registro localizado na sua lateral. Em seguida, deve-se zerar o aparelho e, com o auxílio de um multímetro, verificar a tensão emitida pelo transdutor. Para a determinação do limite superior de tensão, o usuário deverá utilizar a bomba de pressão do aparelho, até atingir o nível de pressão máximo do transdutor (fundo de escala), no caso 40 mca (um registro para fazer a sintonia fina ajudará nesta tarefa) e realizar a leitura da tensão correspondente no multímetro.