



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

**OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADO UTILIZANDO
CONTROLE FUZZY**

por

Kamilla Henrique Mendonça

Otimização do Consumo Energético de um Sistema Automatizado de Irrigação
Pressurizado Utilizando Controle *Fuzzy*

João Pessoa – Paraíba

Outubro de 2020

KAMILLA HENRIQUE MENDONÇA

**OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADO UTILIZANDO
CONTROLE FUZZY**

Tese de Doutorado Apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal da
Paraíba como critério para obtenção do título
de doutora.

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M539o Mendonca, Kamilla Henrique.

Otimização do consumo energético de um sistema automatizado de irrigação pressurizado utilizando controle Fuzzy / Kamilla Henrique Mendonca. - João Pessoa, 2020.

107 f. : il.

Orientação: Heber Gomes.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Sistemas de irrigação. 2. Controlador. 3. Lógica Fuzzy. I. Gomes, Heber. II. Título.

UFPB/BC

CDU 626.81/.84(043)

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY

por

KAMILLA HENRIQUE MENDONÇA

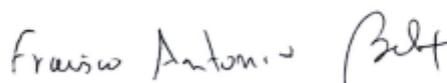
Tese aprovada em 14 de outubro de 2020



Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador - UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA
Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA
Examinador Externo – UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda comunidade acadêmica e científica, que enxerga no ensino, na pesquisa e na ciência os únicos caminhos para o crescimento, desenvolvimento e fortalecimento de qualquer sociedade.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor, Dr. Heber Pimentel Gomes, pelas orientações e incentivos a pesquisa ao longo dos últimos quatro anos.

Ao professor Dr. Juan Maurício Villanueva, pelas orientações e incentivos a pesquisa ao longo dos últimos quatro anos.

Aos meus colegas de laboratório, Thommas, Lucas, João, Caio, Marlio, Camila e demais que me auxiliaram ao longo desses quatro anos de pesquisa.

Agradeço aos meus pais e irmãs pelos incentivos e palavras de apoio em todos os momentos de minha vida.

Agradeço ao meu companheiro de sempre Edilandro Porfírio, pelo imenso amor, carinho, dedicação, apoio e incentivo.

Aos meus amigos Laís e Moisés Salvino pelo apoio, ensinamentos, orientações, conselhos e amizade.

Agradeço aos meus professores da graduação em Engenharia Civil e da Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, pela excelente formação.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso. A todos os demais que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY

RESUMO

No setor da agricultura irrigada, para o aumento da produtividade e da rentabilidade faz-se necessário o aumento da eficiência no uso da água e da energia elétrica. Com isso, o uso de processos operacionais que maximizam a produtividade no setor, reduzindo o consumo de água e energia elétrica, vem ganhando cada vez mais espaço. Essa tese propôs o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente com base na Lógica Fuzzy, para controlar a pressão e a vazão nas entradas das parcelas de um sistema coletivo de irrigação pressurizada. Os testes desenvolvidos para validação da proposta foram aplicados em uma bancada experimental que emula um sistema automatizado de distribuição de água (SADA), instalado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB). O controle da pressão foi feito pela variação da frequência do conjunto motobomba, enquanto a vazão foi controlada a partir da variação da abertura das válvulas de controle a montante da entrada de cada uma das parcelas. Com a aplicação da metodologia proposta, o sistema de bombeamento registrou uma redução de 27% em sua frequência do sistema de impulsão, quando comparada ao seu valor nominal de operação. A partir da redução da lâmina bruta de irrigação, o sistema apresentou uma redução de até 34% no consumo de água. Por fim, através da análise energética realizada, após a aplicação do controlador, o sistema foi capaz de reduzir em até 52%, o consumo de energia elétrica. Os resultados encontrados validam o uso do controlador em diferentes cenários de irrigação, mostrando que a rede foi capaz de controlar as vazões e pressões de projeto com diferentes set points.

Palavras-Chave: Sistemas de irrigação. Controlador. Lógica *Fuzzy*.

**OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO PRESSURIZADO UTILIZANDO
CONTROLE FUZZY**

ABSTRACT

In the irrigated agriculture sector, in order to increase productivity and profitability, it is necessary to increase the efficiency in the use of water and electricity. With this, the use of operational processes that maximize productivity in the sector, reducing the consumption of water and electricity, is gaining more and more space. This thesis proposed the development of an intelligent control system based on Fuzzy Logic, to control the pressure and flow at the entrances to the plots of a collective pressurized irrigation system. The tests developed to validate the proposal were applied to an experimental bench that emulates an automated water distribution system (SADA), installed at the Laboratory of Energy and Hydraulic Efficiency in Sanitation at the Federal University of Paraíba (LENHS / UFPB). The pressure control was done by varying the frequency of the pump set, while the flow was controlled by varying the opening of the control valves upstream of the entrance of each of the plots. With the application of the proposed methodology, the pumping system registered a reduction of 27% in its frequency of the propulsion system, when compared to its nominal operation value. From the reduction of the gross irrigation blade, the system showed a reduction of up to 34% in water consumption. Finally, through the energy analysis performed, after the application of the controller, the system was able to reduce electricity consumption by up to 52%. The results found validate the use of the controller in different irrigation scenarios, showing that the network was able to control the design flows and pressures with different set points.

Keywords: Irrigation system. Controller. *Fuzzy* logic.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivos Gerais	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	4
2. CAPÍTULO 2	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.3 CONSIDERAÇÕES	15
3. CAPÍTULO 3	16
3.1 INTRODUÇÃO	16
3.2 SISTEMAS DE CONTROLE.....	16
3.3 SISTEMAS DE CONTROLE <i>FUZZY</i>	19
3.3.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	20
3.3.2 Variáveis Linguísticas	22
3.3.3 Funções de Pertinência	23
3.3.4 Implicação Lógica, Regras de Inferência e Métodos de Inferência de Mamdani.....	24
3.3.5 Fuzzyficação e Defuzzyficação	25
3.4 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.....	27

3.5	SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADOS	33
3.6	CONSIDERAÇÕES	36
4.	CAPÍTULO 4	37
4.1	INTRODUÇÃO	37
4.2	ESTUDO DE CASO	38
4.3	DESCRIÇÃO DA BANCADA	38
4.4	SETORES DE IRRIGAÇÃO	42
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA SADA	43
4.6	CONTROLADOR FUZZY	45
4.6.1	Sistema Descentralizado	47
4.7	CONSIDERAÇÕES	50
5.	CAPÍTULO 5	51
5.1	INTRODUÇÃO	51
5.2	DIMENSIONAMENTO DOS CENÁRIOS DE IRRIGAÇÃO	52
5.3	ANÁLISE ENERGÉTICA DA BANCADA SADA	53
5.4	ANÁLISE HIDRÁULICA DA BANCADA SADA	56
5.5	DETERMINAÇÃO DOS ENSAIOS	57
5.6	CONTROLADOR APLICADO AO SISTEMA DESCENTRALIZADO – CENÁRIO - I	58
5.6.1	Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IA	59
5.6.2	Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IB	63
5.6.3	Análise Hidráulica e Energética do Sistema – Cenário I	67
5.7	CONTROLADOR APLICADO AO SISTEMA DESCENTRALIZADO – CENÁRIO II	69
5.7.1	Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário IIA	69
5.7.2	Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IIB	73
5.7.3	Análise Hidráulica e Energética do Sistema – Cenário II	77

5.8 CONCLUSÕES	78
6 CAPÍTULO 6.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A.....	87
DIMENSIONAMENTO DOS SETORES DE IRRIGAÇÃO.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de blocos, sistema de inferência Fuzzy	7
Figura 3.1 – Comparativo entre os sistemas em malha aberta e malha fechada	17
Figura 3.2– Funções de pertinência triangulares e trapezoidal	24
Figura 3.3 – Esquema simplificado de um sistema <i>fuzzy</i>	26
Figura 3.4 – Método de defuzzyficação pelo centro de gravidade	27
Figura 3.5 (a) – Esquema de um sistema genérico de irrigação por gotejamento	29
Figura 3.6 (b) – Esquema de um sistema genérico de irrigação por gotejamento.....	29
Figura 4.1 – Descrição dos procedimentos metodológicos adotados	37
Figura 4.2 – Estudo de caso.....	38
Figura 4.3 – Vista frontal da bancada SADA	39
Figura 4.4 - Conjunto motobomba	40
Figura 4.5 – Sensores e atuadores presentes na planta	40
Figura 4.6 – Analisador de energia – Fluke.....	44
Figura 4.7 – Fluxograma de operação do controlador.....	46
Figura 4.8 – Variáveis de entrada e saída do controlador da pressão na ZB.....	50
Figura 5.1– Diagrama de blocos do controlador	51
Figura 5.2– Curvas de rendimento do CMB para a ZB.....	54
Figura 5.3 – Variação da potência elétrica - ZB.....	54
Figura 5.4 – Curvas de rendimento do CMB para a ZA.....	55
Figura 5.5 – Variação da potência elétrica – ZA	55
Figura 5.6 - Controle da pressão ZB (Cenário - IA).....	59
Figura 5.7 - Controle da vazão ZB (Cenário IA).....	60
Figura 5.8 - Controle da pressão ZA (Cenário - IA)	61
Figura 5.9 - Controle da vazão ZA (Cenário IA)	61
Figura 5.10 – Elementos de controle cenário - IA.....	62
Figura 5.11 - Controle da pressão ZB (Cenário – IB)	63

Figura 5.12 – Controle da vazão ZB (Cenário – IB)	64
Figura 5.13 – Controle da pressão ZA (Cenário – IB)	64
Figura 5.14 – Controle da vazão ZA (Cenário - IB).....	65
Figura 5.15 – Elementos de controle (Cenário – IB).....	66
Figura 5.21 - Controle da pressão ZB (Cenário – IIA).....	70
Figura 5.22 - Controle da vazão ZB (Cenário – IIA)	70
Figura 5.23 - Controle da pressão ZA (Cenário – IIA)	71
Figura 5.24 - Controle da vazão ZA (Cenário – IIA)	71
Figura 5.25 - Elementos de controle – Cenário IIB.....	72
Figura 5.16 – Controle da pressão ZA (Cenário – IIB).....	73
Figura 5.17 – Controle da vazão ZA (Cenário – IIB).....	74
Figura 5.18 - Controle da pressão ZB (Cenário – IIB).....	75
Figura 5.19 - Controle da vazão ZA (Cenário – IIB)	75
Figura 5.20 – Elementos de controle – Cenário IIB	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros de solo de cultura	42
Tabela 4.2 – Parâmetros meteorológicos.....	43
Tabela 4.3 – Especificações técnicas do analisador de energia.....	45
Tabela 4.4 – Variáveis de entrada e saída do controlador para as ZB e ZA.....	48
Tabela 4.5 – Funções de pertinência para o controle da vazão na ZB	48
Tabela 4.6 – Funções de pertinência para o controle da pressão na ZB	48
Tabela 4.7 - Funções de pertinência para o controle da vazão na ZA.....	49
Tabela 4.8 - Funções de pertinência para o controle da pressão na ZA	49
Tabela 5.1 – Calendário de irrigação da batata e do feijão.....	52
Tabela 5.2 - Vazões e pressões para as entradas das parcelas nas duas zonas da rede.	53
Tabela 5.3 – Variação das vazões e pressões para todas as saídas abertas.....	56
Tabela 5.4 - Variação das vazões e pressões para ZA.....	56
Tabela 5.5 – Variação das vazões e pressões para ZB	57
Tabela 5.6– Simulações de operação da rede	58
Tabela 5.7 – Vazões e Pressões para as entradas das parcelas nas duas zonas da rede.....	58
Tabela 5.8 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário - IA.....	62
Tabela 5.9 - Parâmetros de controle – Cenário - IA.....	63
Tabela 5.10 – Parâmetros da planta com atuação do controlador	66
Tabela 5.11 - Parâmetros de controle Cenário - IB	67
Tabela 5.12 – Consumo de água nos dois cenários de irrigação	67
Tabela 5.13 – Parâmetros de projeto para o cálculo do custo anual com bombeamento	68
Tabela 5.16 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário IIA	72
Tabela 5.17 - Parâmetros de controle – Cenário IIA.....	73
Tabela 5.14 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário - IIB	76
Tabela 5.15 - Parâmetros de controle – Cenário - IIB.....	77
Tabela 5.18 – Consumo de água nos dois cenários de irrigação	77
Tabela 5.19 – Parâmetros de projeto para o cálculo do custo anual com bombeamento	78

LISTA DE QUADRO

Quadro 4.1 - Especificações técnicas do <i>booster</i> e do CMB.....	58
Quadro 4.2 – Especificações técnicas dos PT, FT e CV	59
Quadro 4.3 – Informações técnicas sobre o inversor de frequência	59
Quadro A.1– Relação de gotejadores	106
Quadro B.1– Comprimento máximo da linha lateral	106

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu_A(x)$	Grau de pertinência
X	Elemento do conjunto
C	Conjunto
U	Universo
$f_c(u)$	Função característica
U	Conjunto de elementos
\in	Pertence
\notin	Não pertence
\subset	Está contido
$\mu_{A \cap B}$	Intersecção
$\mu_{A \cup B}$	União
$\mu_{A^c}(x)$	Complemento
$^{\circ}C$	Graus Celsius
γ	Peso específico
η	Rendimento
$\$$	Custo unitário

LISTA DE ABREVIACOES

CMB	Conjunto Motobomba
VMF	Válvulas Multifuncionais
VRP	Válvulas Redutoras de Pressão
CV	Válvulas de Controle
PT	Transdutor de Pressão
FT	Medidor de Vazão
FAO	Food and Agriculture Organization
ADC	Conversor Analógico/Digital
DAC	Conversor Digital Analógico
T_d	Tempo de atraso
T_p	Tempo de pico
T_r	Tempo se subida
T_s	Tempo de acomodaco
ANA	Agência Nacional de guas
CLP	Controlador Lógico Programável
DAQ	Dispositivo de Aquisio de Dados
LabVIEW®	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench
NI	National Instruments
VI	Instrumentos Virtuais
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
MCA	Metro de Coluna de gua
SADA	Sistema Automatizado de Distribuo de gua
RD	Ramal de Descarga
RNF	Reservatório de Nível Fixo

CV	Cavalo Vapor
ZB	Zona Baixa
ZA	Zona Alta
K_c	Coefficiente da Cultura
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
T_{\min}	Temperatura mínima
T_{\max}	Temperatura máxima
Q	Vazão
H	Altura manométrica
P_{el}	Potência Elétrica
P_{hid}	Potência Hidráulica
L_b	Lâmina bruta
CI	Cenário I
CII	Cenário II
EFT	Erro FT-1 e FT-2
DEFT	Derivada do Erro
EPT	Erro PT-3 e PT-5
DEPT	Derivada do Erro
$\Delta VRP_{CV-1 / CV-2 / CV-3}$	Delta do Ângulo
DF	Delta da frequência
ENGA	Erro Negativo Alto
ENG	Erro Negativo
EZ	Erro Zero
EP	Erro Positivo
EPA	Erro Positivo Alto
DENA	Derivada do Erro Negativo Alto
DEN	Derivada do Erro Negativo
DES	Derivada do Erro Zero
DEP	Derivada do Erro Positivo
DEPA	Derivada do Erro Positivo Alto
DANA	Delta Ângulo Negativo Alto
DAN	Delta Ângulo Negativo
DAZ	Delta Ângulo Zero

DAP	Delta Ângulo Positivo
DAPA	Delta Ângulo Positivo Alto
DFPA	Delta Frequência Positivo Alto
DFP	Delta Frequência Positivo
DFZ	Delta Frequência Zero
DAN	Delta Frequência Negativo
DFNA	Delta Frequência Negativo Alto
MIMO	Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas
MISO	Múltiplas Entradas Única Saída

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

No setor da agricultura irrigada, para melhoria da produtividade e da rentabilidade faz-se necessário o aumento da eficiência no uso da água e da energia elétrica. Cerca de 70% de toda a água consumida no mundo está destinada ao setor de agricultura irrigada. Jägermeyr et al. (2015), em um estudo sobre a eficiência dos sistemas de irrigação atuantes no mundo, empregados no período de 2004 a 2009, registrou um consumo de 2469 km³ de água para irrigação. No entanto, apenas 1257 km³ foram efetivamente utilizados, sendo o restante perdido para evapotranspiração, interceptação ou transporte.

A agricultura e produção alimentícia são áreas que dependem de recursos hídricos e energéticos. Em um levantamento realizado em 2014, o uso de bombeamento destinado aos 300 milhões de hectares irrigados no mundo foi responsável pelo consumo de cerca de 62 TWh/ano (FAO, 2014).

No relatório Atlas Irrigação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), em 2015, a irrigação se mostrava como a maior consumidora de água no Brasil, responsável por 46% das retiradas nos corpos hídricos e por 67% do consumo, com 6,95 milhões de hectares equipados para irrigação. O grande volume de água usado na irrigação justifica o desenvolvimento de processos de utilização e manuseio cada vez mais eficientes, reduzindo ao máximo os desperdícios no sistema, e proporcionando o volume ideal para o favorável desenvolvimento do setor.

Segundo Pires *et al* (2008), não existe um sistema ideal de irrigação. O que aumenta a importância em se analisar individualmente cada projeto, respeitando as condições

climáticas, topológicas, culturais e econômicas de cada região. Pires ainda ressalta a necessidade de se escolher com perícia o tipo de sistema de irrigação, para que não haja prejuízo nem desperdícios de água e energia elétrica.

Para efficientização no uso da água e energia, a automação surge como uma importante ferramenta para auxiliar o alcance desse objetivo. Com a automação dos sistemas de irrigação, é possível monitorar e corrigir imperfeições em tempo real, reduzindo os períodos de ineficiência decorrentes de problemas gerados nos períodos de operação da rede. Com os sistemas automatizados pode-se adotar controladores que otimizem as operações delegadas e feitas, muitas vezes, de maneira empírica e sem os devidos cuidados técnicos, requeridos em sistemas de tamanha magnitude (BEZERRA e GOMES, 2013).

A aplicação de técnicas de automação e controle em algumas etapas do processo de irrigação auxiliam no manejo mais eficiente e otimizado da água e da energia, estimulando ao máximo o crescimento da planta e, desta forma, possibilitando um aumento na produtividade e uma redução nos desperdícios encontrados em campo.

Atualmente, o uso de sensores de umidade do solo e válvulas de controle automáticas são bastante frequentes no campo da irrigação. A operação dos sistemas que utilizam estes equipamentos tem, por princípio, a verificação dos parâmetros das condições de campo (sistema solo/planta) e sua comparação com os valores de projeto. Desta forma, com o sensor de umidade, o operador pode analisar a condição real do solo, e com as válvulas de controle, regular a quantidade de água enviada para a planta.

Há também registro de automação no ligamento e desligamento do conjunto motobomba (CMB), por meio da utilização de temporizadores que acionam a bomba a partir dos intervalos de rega e em períodos já definidos. No entanto, esta prática denominada de irrigação por turnos pode contribuir para dois erros comuns: excesso de água que pode levar a lixiviação desnecessária do solo; ou falta de água, que pode ocasionar um déficit hídrico para a cultura, interferindo em seu pleno desenvolvimento. Logo, o uso de sensores que analisam o nível de umidade do solo e determinam a quantidade de água exata para atingir o nível de umidade ótima são mais indicados, caracterizando a irrigação por demanda.

Para sistemas coletivos de irrigação pressurizados, que trabalham com valores fixos de pressão na entrada de suas parcelas (áreas ocupadas pelas culturas), para que possam fornecer as vazões necessárias, a análise do nível de umidade é de extrema funcionalidade. A partir da análise da umidade do solo, se associa a abertura ou fechamento de válvulas

multifuncionais que regulam a pressão em cada parcela a partir da introdução de certa perda de carga, decorrente do seu fechamento parcial.

A bancada utilizada para aplicação deste trabalho emula um sistema de irrigação pressurizado com duas parcelas, dotadas de medidores de vazão e pressão em cada uma de suas saídas. As condições de vazão e pressão no cabeçal podem variar conforme a dinâmica da rede. A simulação dos períodos de irrigação foi proposta com base no calendário de irrigação fornecido pelo programa CROPWAT, um *software* livre desenvolvido pela Food and Agriculture Organization (FAO) uma agência especializada das Nações Unidas.

O controle da pressão e vazão nas entradas das parcelas será realizado a partir da variação da rotação do CMB de forma automática, e alteração da angulação de válvulas de controle instaladas na saída das redes. O controle foi elaborado com base na Lógica Fuzzy. Para o desenvolvimento de controles aplicados a sistemas automatizados de irrigação, é frequente o uso da Lógica Fuzzy. Para Zhang, Wu e Tilt (1996): “a lógica *fuzzy* visa modelar os modos imprecisos de raciocínio que desempenham um papel essencial na notável capacidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão”. Dado o número considerável de variáveis incertas tais como: umidade do solo, do ar, velocidade do vento, chuvas, temperatura, dentre as quais lidam os sistemas de irrigação, o uso da Lógica Fuzzy visa inserir o conhecimento do operador no reconhecimento de padrões de alteração das condições variáveis de operação do sistema.

Esta tese aborda uma problemática bastante comum a sistemas de irrigação. Em um sistema com múltiplas parcelas, têm-se as Parcelas I e II representando diferentes culturas que recebem uma determinada quantidade de vazão por meio da irrigação controlada. O controle da pressão e da vazão nas entradas das parcelas usualmente é realizado através de válvulas multifuncionais (VMF). Entretanto este controle gera uma perda de carga a jusante para atender às necessidades diferenciadas de pressão em cada setor. As ações propostas neste trabalho sugerem a operação otimizada das VMF, ao conciliar o uso de inversores de frequência e válvulas de controle regulando a pressão e vazão na entrada de cada parcela a irrigar.

Este trabalho propõe a criação de um controlador inteligente que simula não apenas a ação da mão-de-obra empregada em campo, como também obtém, analisa e avalia os parâmetros hidráulicos e elétricos obtidos pelos sensores instalados. As ações propostas giram em torno da abertura e fechamento de válvula de controle, bem como o controle da rotação do CMB associado à rede.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente com base na Lógica Fuzzy, para controlar a pressão e a vazão nas entradas das parcelas de um sistema coletivo de irrigação pressurizado. A configuração proposta visa controlar as vazões e pressões em quatro diferentes cenários de operação da rede hidráulica, com vistas a reduzir o consumo de água e energia na rede. O controle da pressão é realizado pela variação da frequência do CMB e a vazão é controlada a partir da variação da angulação das válvulas de controle localizadas a montante de cada uma das duas saídas presentes na bancada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização hidráulica da bancada experimental a partir do estudo do rendimento do CMB para diferentes frequências;
- Análise hidroenergética do sistema a partir de um comparativo entre a rede controlada nos quatro cenários propostos e o sistema atuando sem controle;
- Propor uma metodologia de dimensionamento de redes coletivas automatizadas de irrigação, com as vazões e pressões controladas para cada lâmina bruta do calendário de irrigação.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Ao final deste trabalho, espera-se propor uma nova configuração de rede pressurizada de irrigação, com o uso do calendário de irrigação associado ao controle de vazão e pressão na entrada das parcelas, conforme a necessidade hídrica das culturas. Além disso, com a nova configuração, espera-se uma redução significativa no consumo de água e de energia elétrica, cuja validação pode ser confirmada pela manutenção do rendimento do CMB associado ao uso de inversor de frequência. O que justificaria, a longo prazo, o investimento em equipamentos e instrumentos de automação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Para sistemas cuja modelagem matemática se mostre complexa, com dados imprecisos e variações em seu comportamento, a utilização da Lógica Fuzzy se apresenta como uma alternativa, visto que seu conjunto de regras lida com informações subjetivas e sob constante alterações.

Datam de 1964, os primeiros trabalhos relacionados à lógica difusa ou nebulosa, como também é conhecida a Lógica Fuzzy. Esses trabalhos foram coordenados por Lotfi A. Zadeh, professor da Universidade da Califórnia, em Berkeley, que até então trabalhava no campo da Inteligência Artificial (ORTEGA, 2001). No entanto, alguns estudiosos afirmam que os princípios básicos da Lógica Fuzzy surgiram por volta de 1920, desenvolvidos pelo pesquisador polonês Jan Lukasiewicz, que introduziu as noções de conjuntos com grau de pertinência 0, $\frac{1}{2}$ e 1, evoluindo, futuramente, para um universo infinito entre os números 0 e 1 (RIGNEL, *et al*, 2011).

Desta forma, Zadeh (1973) formulou o princípio da incompatibilidade:

À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca deste sistema diminui, até que um limiar é atingido além do qual precisão e significância (ou relevância) torna-se quase que características mutuamente exclusivas.

Zadeh (1987) analisou a pertinência e não pertinência de alguns elementos em determinados conjuntos. Ele concluiu que alguns elementos são mais pertinentes do que outros, criando assim uma escala gradual que varia de 0 até 1, onde 0 (zero) indica a exclusão e 1 (um) a inclusão, ambos completos em seus extremos. Tais valores numéricos podem ser vistos como resultados da transformação de valores qualitativos, convertidos em variáveis linguísticas e posteriormente em valores numéricos correspondentes.

Em âmbito comercial, as primeiras aplicações de Lógica Fuzzy datam de 1976, com a criação de um forno de cimento, que incorporava as experiências dos técnicos da área, garantindo um melhor desempenho do carvão siderúrgico, utilizado na moagem (YEN; LANGARI, 1999). Em 1987, o governo japonês investiu na aplicação da teoria da lógica nebulosa no controle do metro de Sendai, no Japão. Foram realizadas mais de 300.000 simulações com o intuito de garantir a confiabilidade e segurança do sistema. Ainda em 1987, a Panasonic foi a primeira empresa a criar um produto voltado para o uso direto dos consumidores, foi lançado o primeiro chuveiro elétrico, cujo princípio de funcionamento tinha por base o Fuzzy. Em 1990, a Matsushita lançou a máquina de lavar roupas, contribuindo para a dispersão da lógica nebulosa aplicada em diversos setores industriais e comerciais (CAMBOIM *et al*, 2014).

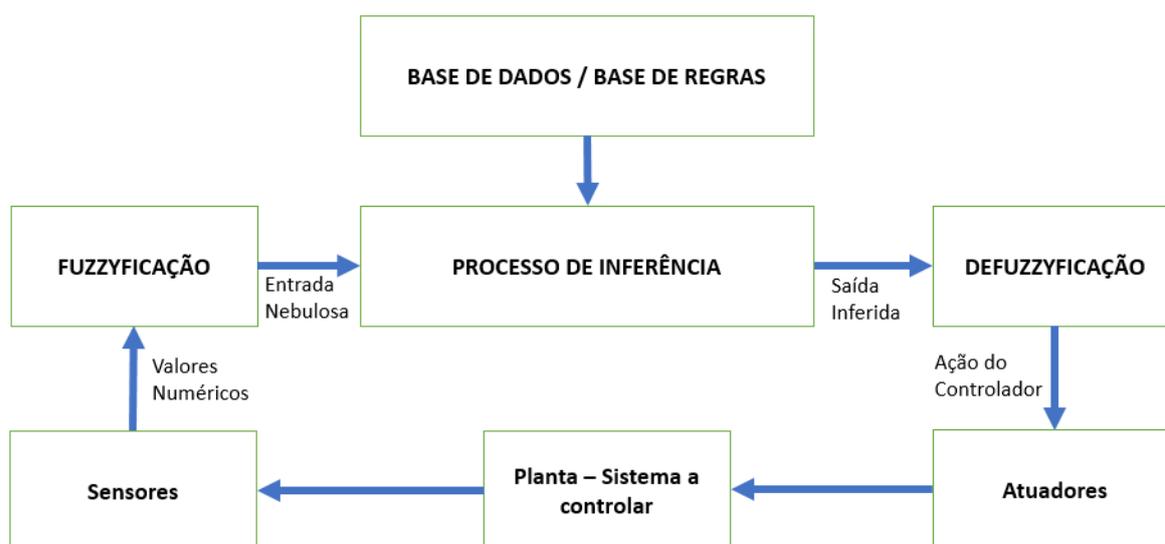
Hoje em dia, a Lógica Fuzzy já está completamente disseminada e é aceita em diversos setores científicos, por ser uma linguagem que adota não apenas valores extremos, mas também nuances em questões onde apenas o “SIM” ou o “NÃO”, não são as únicas respostas aceitas. Ampliando, assim, o conceito da lógica booleana.

Com estes conceitos, é possível introduzir a lógica humana de forma compreensível ao computador. As máquinas que operam sob os conjuntos Fuzzy são capazes de tomar decisões, segundo controles programáveis, de forma que se assemelhe a uma operação humana. Em setores onde as operações técnicas se tornam empíricas, as suscetibilidades ao erro são mais comuns. Nessas áreas, os controles associados às operações de máquinas e equipamentos tornam o sistema mais eficiente.

O controlador Fuzzy apresenta maior simplicidade de implementação e utilização quando comparados a outros controladores. Além disso, não há a necessidade de se realizar uma modelagem matemática. O que o torna mais eficiente com dados imprecisos fornecidos pela planta, sendo possível a realização de tarefas multiobjetivas que incorporam facilmente conhecimentos de atividades técnicas realizadas por seres humanos.

O funcionamento de um sistema de inferência Fuzzy segue a ordem: os dados de entrada passam por um processo denominado fuzzyficação, onde dados numéricos são convertidos em variáveis linguísticas, para então ocorrer a formulação e execução de uma estratégia de controle. Segue-se, então, a elaboração de um conjunto de regras que serve como base de conhecimento para realizar a inferência de valores de entrada para saída. Por fim, aplica-se a defuzzyficação, processo no qual há a conversão dos dados nebulosos obtidos em valores exatos, de simples visualização. O sistema Fuzzy segue o diagrama mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Diagrama de blocos, sistema de inferência Fuzzy



Segundo Salomão (2007), na fuzzyficação as variáveis linguísticas são determinadas de maneira subjetiva, assim como as funções de pertinência. Para isso é necessário: análise do problema, definição das variáveis, definição das funções de pertinência e criação das regiões. A relação entre as variáveis do modelo e regiões Fuzzy é feita através da proposição. Posteriormente tem-se a fase da defuzzyficação, etapa na qual as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema.

A lógica Fuzzy trabalha com problemas cujas fronteiras podem ser indefinidas. Os sistemas que a utilizam necessitam de valores mais suaves do que os extremos apresentados pela lógica binária. Sistemas de irrigação trabalham com valores fixos de vazão e pressão, no entanto, há uma variação na necessidade de água conforme as condições climáticas de uma região. Em sistemas automatizados empregam-se diversos tipos de controladores, neste trabalho, será dado enfoque ao tipo de controlador regido pela Lógica Fuzzy

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da leitura de livros, artigos em revistas e trabalhos acadêmicos elaborou-se um apanhado acerca das pesquisas desenvolvidas na área objeto desta tese. Foram consultados trabalhos que utilizaram a Lógica Fuzzy no desenvolvimento de controles em sistemas de irrigação, além de estudos relevantes diversos, que relacionavam a aplicação de controle com a lógica nebulosa.

Em 1965, Lotfi A. Zadeh, professor de engenharia elétrica e ciências da computação da Universidade de Berkeley na Califórnia nos EUA, apresentou um trabalho inovador. Motivado por considerar a teoria clássica dos conjuntos extremamente rígida, visto que só havia duas possibilidades para certo elemento: ou pertencia ou não pertencia a um dado conjunto. Zadeh trabalhava em *softwares* iterativos, capazes de tomar algumas decisões baseadas na lógica dos conjuntos, no entanto, isso reduzia as inúmeras possibilidades de respostas desses *softwares*. Com a implementação da Lógica Fuzzy pode-se criar valores de pertinência incluindo uma infinidade de possibilidades entre 1 (valor totalmente pertinente) e 0 (valor completamente fora de pertinência).

A partir daí foram surgindo técnicas que ampliaram a aplicação da lógica difusa. Em 1969, Marinos apresentou uma técnica para análise e síntese de funções baseadas em Lógica Fuzzy, implantadas em termos de portas lógicas. Segundo Marinos, a lógica difusa apresentava inúmeros valores entre 0 e 1, seu trabalho propôs reduzir o universo dessas possibilidades apresentando técnicas de simplificação das funções *fuzzy*. As aplicações são diversas, tanto no campo analógico: controle de qualidade, processos industriais e testes de componentes. Como no campo digital: reconhecimento e classificação de padrões. O trabalho foi considerado inovador visto que foi o pioneiro em aplicar funções difusas.

Em 1973, Zadeh compilou de forma mais sólida algumas definições que norteiam a base da lógica Fuzzy, bem como a compreensão das variáveis difusa, visto que nem todos os problemas apresentam valores bivalentes, tais como SIM ou NÃO, CERTO ou ERRADO. Ou seja, nem sempre as variáveis podem ser classificadas pela lógica booleana, sendo necessário definir fronteiras mais maleáveis, cujas mudanças sejam mais sensíveis.

Mamdani (1977), através das pesquisas de Zadeh, elaborou um método de aplicação da Lógica Fuzzy no projeto de controles para instalações industriais. O método foi utilizado em uma planta piloto que simulava uma situação real. O controlador de Mamdani foi fundamentado na seguinte estrutura: “Se A então B”, onde tanto a proposição antecedente

quando a consequente são variáveis linguísticas de dois diferentes conjuntos Fuzzy. Em 1983, Sugeno, em contrapartida a proposta de Mamdani (1975), sugeriu uma metodologia simplificada na tomada de decisão onde apenas o antecedente das regras é formado por variáveis *fuzzy*, e o resultado de cada regra é um valor numérico.

Segundo Zimmermann (1985), recorre-se a lógica difusa sempre que o sistema em questão não apresenta resposta satisfatória à lógica bivalente. Ou ainda, quando se deseja operar um mecanismo de maneira computacional, utilizando, para isso, implicações do próprio operador humano.

A aplicação de controladores fundamentados na lógica nebulosa em sistemas de irrigação traz registros do final dos anos 1990. Zhang, Wu e Tilt (1996) publicaram um trabalho enfatizando a eficiência de aplicar controladores elaborados a partir dos princípios da lógica difusa em sistemas não-lineares operados pela mão humana, suscetível a erros e com um elevado grau de imprecisão e incerteza. Os autores tinham como objetivo aplicar o controlador em uma estufa em laboratório, utilizando o parâmetro de umidade do solo como variável de decisão para a irrigação, bem como a escolha dos turnos de rega. Foram utilizados dois tipos de solo, um mais compacto e outro mais poroso, necessitando de um volume de irrigação maior. A análise dos resultados mostrou que, após a aplicação do controlador *fuzzy* constatou-se uma lixiviação mínima, controlando os turnos de rega e a intensidade de água de acordo com a necessidade do conjunto solo-planta.

A partir de então, com os conceitos de Lógica Fuzzy mais solidificados e sua comprovada eficiência na aplicação de controles de processos, foram desenvolvidos inúmeros trabalhos e pesquisas na área. Segundo Bahat *et al* (2000) existem dois tipos de sistemas de controle nas redes de irrigação, em malha aberta (o mais utilizado) e em malha fechada. No sistema em malha aberta, o operador pré-determina os períodos e irrigação, abertura de válvulas e frequência de irrigação, e apesar de ser o mais utilizado, não é o mais recomendado. Em detrimento, há o sistema em malha fechada, que utiliza as características do tipo de cultura, do solo e do clima para obter a quantidade ideal de água que deve ser aplicada no solo. Os autores utilizaram o sistema em malha fechada, admitindo como parâmetros de entrada: umidade do solo, temperatura, radiação, velocidade do vento, umidade do ar e salinidade. Como parâmetros de saída: abertura das válvulas para água e/ou fertilizante, e ajustando seus montantes em combinação, acionamento dos sistemas de energia (luzes, aquecimento, ventilação), abertura de paredes e telhados das estufas. Através do método de inferência Mamdani, constataram a validade do controlador em reduzir o

consumo de energia, aplicando a quantidade necessária de água requerida pelo solo em diferentes demandas.

Em contrapartida aos sistemas de controle de irrigação elaborados com taxa fixa, ou seja, operando apenas de forma a abrir e fechar válvulas; Umair e Usman (2010) propuseram uma análise comparativa entre os sistemas usuais ON/OFF e um sistema de irrigação inteligente utilizando Rede Neural Artificial (RNA). Utilizando como parâmetros de entrada: umidade do solo, temperatura, radiação, velocidade do vento, umidade do ar, salinidade e como parâmetros de saída: abrir / fechar as válvulas para água e / ou fertilizantes, e ajustando seus montantes em combinação, ligar / desligar os sistemas de energia (luzes, aquecimento, ventilação); abertura / fechamento de paredes e telhados das estufas. Após a realização das simulações, os autores constataram que o sistema ON/OFF se mostrou falho, devido a suas limitações. Além disso, ressaltam que o controle utilizando RNA se mostrou propício a economia de água e energia. Ambos os controladores não requerem um conhecimento prévio da operação do sistema, o que viabiliza sua implantação em qualquer sistema de irrigação.

Com o objetivo de tornar cada vez mais racional o uso da água e da energia em sistemas de irrigação, Gutiérrez et al. (2014) criaram um sistema automatizado de irrigação sem fio. A partir do algoritmo desenvolvido, puderam controlar os períodos e o volume de água a ser ministrado no solo, conforme as necessidades de irrigação da cultura, levando em consideração os teores de umidade do solo e temperatura do ar. Os valores foram obtidos a partir de sensores, que enviavam os dados coletados para os atuadores, controlando, via sistema sem fio, o volume de água necessário para irrigação das culturas. Além da comunicação via rede sem fio, o sistema foi alimentado por painéis de energia fotovoltaica e teve um link de comunicação duplex elaborado em uma interface celular-Internet que permitiu a inspeção dos dados e o planejamento da irrigação a ser programada através de uma página da web. Devido à sua autonomia energética e baixo custo, o sistema mostrou-se útil para regiões geograficamente isoladas e que apresentam uma reserva limitada de água.

Touati et al (2013), estimulados pelos trabalhos desenvolvidos na área de monitoramento remoto e banco de dados, propuseram uma solução técnica fundamentada em um sistema inteligente para um campo de hiper aridez em Doha – Catar. O sistema consistiu em um controlador lógico difuso de feedback que registrou os principais parâmetros do campo por meio de sensores específicos e uma plataforma de monitoramento remoto e banco de dados Zigbee – GPRS. Os autores enfatizaram que, em regiões áridas, o desenvolvimento de agendamento de irrigação em ambientes e culturas específicas que reduz

a perda de água via evapotranspiração é a chave para uma irrigação sustentável e mais bem gerenciada. Para uma determinada colheita, o controlador *fuzzy* adquiriu dados dos sensores e aplicou regras bem elaboradas para determinação do tempo apropriado e duração da irrigação. O sistema compensa a quantidade de água que é perdida por evapotranspiração, como previsto pelo modelo de Penman – Monteith e, permite prever o consumo futuro de água. Uma estação local processou e salvou os dados em tempo real recebidos do controlador de campo via protocolo Zigbee sem fio, e transmitiu esses dados para uma estação remota via link GPRS. Os autores concluíram que a implantação do controle difuso combinado com o registro remoto de dados promoveu um melhor gerenciamento de irrigação e recursos hídricos em terras hiperáridas como o Catar.

Moraes et al. (2014) realizaram um estudo em um protótipo que simulava a operação de um pivô central, montado no Laboratório de Hidráulica na Universidade Federal de Viçosa. O objetivo foi analisar a redução do custo da energia elétrica para irrigação com o uso de inversores de frequência sem comunicação digital, o inversor era acionado manualmente, sem qualquer técnica de controle aplicada. Um microcontrolador foi instalado no inversor de frequência de modo que, ao receber os dados de pressão obtidos em campo, pudesse agir na regulação da velocidade de rotação, variando o volume de vazão bombeado. Os autores também avaliaram as três curvas de rendimento da bomba: a do fabricante, com rotação fixa e com o inversor de frequência, os resultados obtidos mostraram que não há perdas no rendimento do conjunto motobomba ao se utilizar um inversor. Com os resultados, comprovou-se uma redução de 48% da energia elétrica, para uma linha lateral inclinada de 0% e uma redução de 16% da energia elétrica para uma inclinação na linha lateral de 30%.

Em 2014, Mousa et al. desenvolveram um algoritmo com base na lógica difusa com a intenção de propor um sistema de irrigação eficiente, aplicável a sistemas por aspersão ou gotejamento. Os autores tinham como objetivo realizar o manejo de água, evitando o estresse hídrico, e os efeitos de percolação ou lixiviação do solo, ao ser submetido a uma quantidade de umidade superior à recomendada. O algoritmo desenvolvido analisava os dados referentes à evapotranspiração e a quantidade de água necessária. Conforme a interação entre tais parâmetros se determinou a lâmina de água ideal para um desenvolvimento eficiente da cultura, realizando o acionamento da válvula no horário e local onde se fez necessário. A análise dos resultados obtidos com o modelo proposto mostrou a eficácia em nunca permitir que o solo atingisse um esgotamento no seu nível de umidade, bem como impedisse a aplicação desnecessária de água, quando não se fazia necessária tal ação.

Em 2015, Soni e Singh relataram a importância em se trabalhar com sensor sem fio em sistema de irrigação do tipo pivô central. Esta ferramenta permitiu o monitoramento de parâmetros como vazão, pressão e consumo de energia, possibilitando ao operador do sistema aplicar medidas de prevenção ou mesmo correção, tornando a rede mais otimizada e reduzindo os desperdícios gerados. Tais sensores permitiram o acesso à informação em tempo real, ideal para grandes áreas irrigáveis onde o deslocamento de equipes de monitoramento levaria horas.

Jägermeyr *et al.* (2015) publicaram um estudo acerca dos atuais sistemas de irrigação, realizando uma análise de sua eficiência e apontando os principais pontos críticos. Os autores enfatizaram o alto nível de ineficiência dos sistemas. O que permite que uma parcela significativa de água, inicialmente destinada para o cultivo das culturas, seja desperdiçada, gerando gastos que não podem ser convertidos em receita para os produtores e seus países. Este estudo apresentou, pela primeira vez, estimativas explícitas do desempenho dos sistemas de irrigação global para os principais tipos de culturas do mundo, com base no processo de simulação de condições biofísicas locais subjacentes. Os autores ainda afirmaram que, ao se substituir o sistema de irrigação por superfície pelo de aspersão ou gotejamento, foi possível verificar uma economia em relação ao consumo de água não efetivado. Os valores encontrados demonstram a importância em se escolher de forma criteriosa o método a ser adotado no sistema de irrigação, levando em consideração não apenas os aspectos agrícolas, como também aqueles relacionados à economia de água e energia, gerando um uso consciente destes recursos.

Segundo Jain *et al.* (2016) 85% dos recursos disponíveis de água doce na Índia são utilizados para produzir culturas agrícolas. Desta forma, os pesquisadores propuseram o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio inteligente com o objetivo de monitorar o nível de umidade do solo, permitindo a abertura das válvulas apenas nos horários onde haja a necessidade de irrigação. Os dados foram coletados e após serem analisados, foram enviados para um aplicativo disponível com o sistema operacional Android diretamente para o celular do operador do sistema de irrigação. Com o sistema proposto, foi possível melhorar o sistema de irrigação agrícola em diferentes regiões da Índia e em outros locais onde os sistemas não se mostram eficientes, reduzindo desperdícios de água e energia.

Utilizando cada vez mais a tecnologia como ferramenta para otimização dos sistemas de irrigação, Rawal (2017) propôs um sistema de irrigação inteligente fundamentado na IOT (internet das coisas). Os sensores utilizados mediram o índice de umidade do solo, acionando

os aspersores, apenas quando necessário, impedindo que haja um processo de sobre ou sub irrigação. Além disso, o sistema instalado permitiu que os dados obtidos em campo fossem enviados aos produtores, em tempo real, reduzindo os gastos com observação e monitoramento humano. Analisando os resultados obtidos o autor concluiu que pode haver um desenvolvimento considerável na agricultura com o uso de IOT e automação. Sendo o sistema uma solução potencial para os problemas enfrentados no processo pesado e manual de irrigação existente, permitindo uma utilização eficiente dos recursos hídricos.

Em 2017, Pooja et al. apresentaram um sistema inteligente de irrigação por gotejamento. O sistema utilizou sensores de baixo custo de temperatura e umidade do solo, para gerenciar e controlar o abastecimento de água em áreas com déficit hídrico. Os dados adquiridos em um nó do sensor foram enviados através de um controlador do tipo ADC (conversor analógico/digital) para um servidor centralizado de nuvem que controlava o abastecimento de água. Além disso, o sistema proposto verificou a disponibilidade de recursos necessários, como tanque de água, tanque de armazenamento de pesticidas, e, com base nisso, tomou decisões referentes aos turnos de rega. Os autores apontaram como uns dos benefícios a economia de água, energia e mão-de-obra, além de aumentar a produtividade no setor agrícola.

Em 2018, Hasan *et al* utilizaram a lógica difusa para o controle de vazão em um sistema automatizado de irrigação. O sistema de controle difuso processava a umidade estimada do conteúdo do solo de várias seções da terra. Usando o conhecimento linguístico para produzir uma saída de controle para uma válvula, que controlava a vazão. Com o sistema implantado, os autores conseguiram uma redução de 10 a 14 % no consumo de água.

JunHui *et al* (2019) realizaram um trabalho de implementação de um controle com base na Lógica Fuzzy associada à irrigação controlada pelo método dependente da luz, para economia de água. O sistema decidiu quando deveria ser a próxima irrigação através do teor de umidade do substrato, quantidade e nutrientes de irrigação. O sistema desenvolvido se mostrou eficiente ao resolver o problema de maneira oportuna, moderada e com economia do consumo de água para irrigação.

Fierro e Tello (2019) ressaltaram que a necessidade econômica e ambiental de usar a quantidade certa de água para irrigação levou ao desenvolvimento de diferentes sistemas tecnológicos, como sistemas automáticos simples que ativam o processo de irrigação em locais bem definidos. Mas os autores destacaram que a principal desvantagem desses sistemas é que eles não consideraram as quantidades reais de água necessárias para as

culturas, nem variáveis meteorológicas que influenciam seu desenvolvimento. Para tanto, propuseram como alternativa ao uso de sistemas automáticos, o uso de sistemas de irrigação que se concentram na dosagem real de água requisitada pelas culturas. Sob tal perspectiva, os autores desenvolveram um sistema de irrigação inteligente a partir da detecção da umidade do solo e de variáveis meteorológicas. A quantidade de água necessária para cada colheita foi determinada por design agrônomo. O objetivo foi realizar uma comparação da quantidade de água exigida pelo sistema de irrigação inteligente e irrigação por gravidade, obtendo uma economia estimada de 68%.

Na agricultura, o gerenciamento da água é crucial para reduzir a quantidade de água destinada à irrigação. O estudo apresentado por Prianda e Wahyu (2020) teve como objetivo desenvolver um sistema automático de irrigação implementado na Estufa do Departamento de Informática Ciência, Universidade IPB. O sistema era composto de válvulas solenoides e sensores de umidade do solo cuja quantidade era ajustada ao número de plantas. Este sistema de irrigação automático foi criado para apoiar o desenvolvimento da agricultura inteligente e de precisão na Indonésia. A irrigação era feita automaticamente e precisamente para cada planta, usando uma válvula solenoide e um relé. Os resultados da experiência mostraram que o protótipo realizava a leitura com sucesso do valor de umidade do solo e pode fazer a irrigação adequadamente, de acordo com as especificações funcionais requisitadas. Com base nos resultados dos testes experimentais, os valores da umidade do solo de 15 vasos (91,7% dos sujeitos do teste) foram lidos com sucesso e a irrigação foi realizada adequadamente.

Durante anos, a Lógica Fuzzy vem sendo desenvolvida e aprimorada com o intuito de se criar controles e sistemas inteligentes que operem de maneira eficiente. As técnicas desenvolvidas apontam para sistemas inteligentes que, apesar de operar de forma similar ao comportamento de técnicos e operadores humanos, otimizam os processos. Além disso, a Lógica Fuzzy facilita a interpretação e solução de problemas cujas variáveis não apresentam delimitações claras. Sua utilização em sistemas de irrigação, cujos parâmetros variam sob diversos aspectos, aponta de maneira satisfatória para a criação de metodologias mais eficientes que garantam uma operação otimizada e com consideráveis reduções de água e energia.

2.3 CONSIDERAÇÕES

Os trabalhos apresentados no item 2.2 estão centrados na determinação do momento perfeito para iniciar a irrigação, bem como sua suspensão, levando em consideração as necessidades hídricas da lavoura, a partir de dados estabelecidos pelos sensores de umidade instalados no solo. No entanto, mesmo com todo o progresso registrado na área de automação e controle associado à operação de sistemas de irrigação, não é comum o uso dessa tecnologia utilizada na operação da rede hidráulica e do sistema de impulsão, necessários para sistemas pressurizados. Este trabalho visa aumentar as possibilidades de controles em sistemas de irrigação, com o objetivo de otimizar a operação da rede hidráulica que alimenta as tubulações que levam água com vazão e pressão suficientes para as lavouras.

Nessa tese, será apresentada uma metodologia de controle de vazão e pressão buscando a otimização no uso da água e da energia elétrica, para um sistema pressurizado de irrigação com múltiplas parcelas. Dada a configuração da rede hidráulica que será utilizada para emular um sistema de irrigação, a metodologia proposta visa otimizar o uso da água no decorrer do ciclo de uma cultura, alterando os valores das vazões e pressões de referência na entrada da parcela, de acordo com a lâmina bruta requisitada pelo calendário de irrigação.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTRODUÇÃO

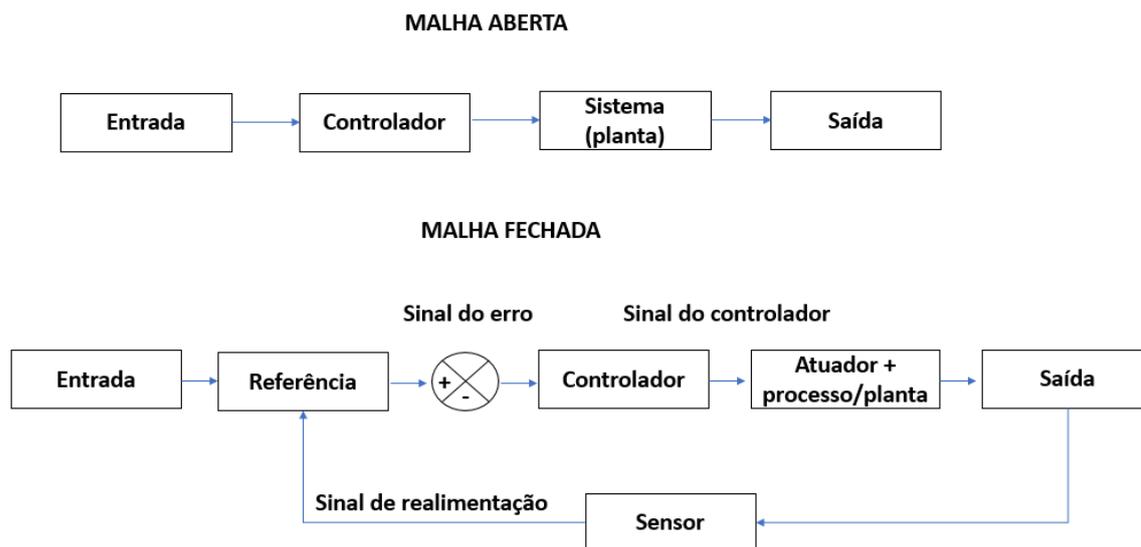
Este capítulo aborda os temas que norteiam a base teórica desta pesquisa. Foi realizado um levantamento dos sistemas automatizados de irrigação, sistemas de controle e Lógica Fuzzy, objetivando caracterizar os principais temas em suas teorias e conceitos.

3.2 SISTEMAS DE CONTROLE

Uma definição simplificada de sistema de controle pode classificá-lo como um determinado processo a ser realizado em uma planta qualquer, cujos elementos estão conectados entre si e interagem de modo a realizar uma determinada tarefa, sob certas condições pré-definidas (OGATA, 2010).

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou malha fechada. Um sistema em malha aberta geralmente é adotado em processos mais simplificados e cujo erro não gera alterações significativas na resposta final desejada. Nesse processo, não há o que se chama de retroalimentação pela medição do erro, ou seja, a saída não pode ser modificada ao se comparar a resposta obtida com a desejada. O cálculo do erro se dá pela diferença entre a resposta dada e o referencial estabelecido (set-point). No processo em malha fechada, o erro gerado pela diferença entre a referência e a saída da planta é utilizado pelo controlador para gerar um sinal de atuação enviado para a planta. Este sinal modificará a dinâmica do sistema gerando uma saída que se aproxime à referência desejada. A Figura 3.1 apresenta um comparativo entre os dois tipos de sistema.

Figura 3.1 – Comparativo entre os sistemas em malha aberta e malha fechada



A partir da utilização de sensores, é possível analisar o sinal de entrada ou saída de um sistema. O sinal elétrico fornece tensão ou corrente, enviando os dados necessários para o controle de uma tarefa. Os fenômenos físicos como pressão e vazão são medidos a partir de sinais analógicos, esses sinais são captados pelos transdutores de pressão e medidores de vazão. No controle discreto, é realizada a aquisição de dados do sinal de saída da planta através de um Conversor Analógico Digital (ADC), que envia esta informação para um sistema discreto no qual é implementado o controlador (supervisório controlador), que realizará a geração do sinal de atuação, sendo transformado em um sinal contínuo por meio de um Conversor Digital Analógico (DAC).

A primeira etapa para implementar um sistema de controle é identificar seus principais componentes e entender a relação que cada um deles possui no processo de interação realizado pela planta. O primeiro elemento a dar início ao processo é a referência, valor desejado da variável (s) a ser controlada; a seguir vem o comparador, que calcula o sinal do erro entre o valor desejado e o obtido; o controlador irá atuar no sinal do erro, criando um sinal de controle que será aplicado no sistema, com o intuito de corrigir a variável que será controlada; o controlador atua por meio dos atuadores, que recebem o sinal de controle, gerando um sinal com potência suficiente para atuar sobre a planta, que é o dispositivo que se deseja controlar. Por fim, em todo esse processo, faz-se uso dos sensores, que são transdutores responsáveis pela medição e conversão da variável (s) a ser controlada, com o objetivo de se realizar uma comparação e obter o erro de saída (ver Figura 3.1).

A escolha de um sistema, em detrimento a outro, varia de acordo com a necessidade do operador, ou as características de sua planta. Os sistemas em malha aberta são comandados apenas pelo sinal de entrada, o que não possibilita a correção de possíveis perturbações que ocorram à planta. As vantagens de um sistema em malha aberta estão na simplicidade de operação e no custo reduzido de implantação, no entanto, apresenta sensibilidade a ruídos, não gerando respostas confiáveis em sistemas mais complexos (OGATA, 2010).

Em contrapartida, no sistema em malha fechada há uma comparação entre a saída real e a saída estimada. Isto torna possível o cálculo do erro, aplicando correções ao sistema de acordo com a saída alcançada, facilitando a compensação de perturbações. Essa compensação ocorre através da realimentação com sua saída. Além de possuir menor sensibilidade à mudança de parâmetros, melhor rejeição a perturbações, melhor atenuação de ruídos, sendo capaz de gerar uma redução de erro em estado permanente, e um controle e ajuste no regime transitório. Suas desvantagens estão relacionadas à complexidade no projeto do controlador ou sintonização dos parâmetros, e os atrasos de tempo podem gerar oscilações na saída e instabilidade (OGATA, 2010).

Como estratégia de controle, os sistemas em malha aberta podem operar com os seguintes comandos: *on-off* (liga-desliga), ações temporizadas e sequências de chaveamento temporizados. E os sistemas em malha fechada operam em *on-off* (liga-desliga), ou ainda a partir da aplicação de um controlador, tais como: proporcional, integral, derivativo, PID (junção dos três anteriores), algoritmos genéticos, Redes Neurais Artificiais (RNA), ou um controlador cujas regras são fundamentadas na Lógica Fuzzy.

Após a escolha do tipo de malha que será utilizada e do controlador a ser aplicado, o próximo passo é realizar a análise de alguns parâmetros com o objetivo de caracterizar e validar o controlador e sua eficiência para o processo desejado (NISE, 2002):

- Tempo de atraso (T_d): tempo necessário para o sinal alcançar, pela primeira vez, metade do valor final;
- Tempo de subida (T_r): tempo necessário para o sinal ir de 10% a 90% de seu valor final;
- Instante de pico (T_p): Tempo necessário para a resposta atingir seu valor máximo pela primeira vez;
- Máxima ultrapassagem percentual: valor em porcentagem que representa o quanto o pico alcança em relação ao valor de referência;

- Tempo de assentamento ou tempo de acomodação (T_s): tempo necessário para que a resposta permaneça no interior de uma faixa de $\pm 2\%$ em torno de seu valor de referência.

Os parâmetros acima vão permitir ao projetista do controlador analisar se os resultados alcançados permitem validar o controlador adotado. Caso apresentem algumas inconsistências, as informações obtidas podem ser utilizadas como base para a adoção de soluções na programação ou na configuração do controlador.

Os sistemas de controle utilizam diversas ferramentas com o intuito de manobrar o sistema para se chegar a um dado resultado. Os controladores variam de acordo com a necessidade da planta ou processo a ser controlado. Para sistemas de irrigação, cujas variáveis são formuladas com base nas condições climáticas, e por isso apresentam bastante imprevisibilidade, o uso de controladores que se adaptem a tais mudanças e se adequem ao comportamento do agricultor no processo decisório é visto de forma promissora.

Os sistemas de controle elaborados com base na Lógica Fuzzy apresentam uma metodologia mais simplificada, quando comparados a outros tipos de sistemas. No entanto, sua implantação exige um conhecimento detalhado da planta. Isso porque sua base de regras e suas funções de pertinência devem ser fundamentadas no conhecimento dos operadores que operam a rede real.

3.3 SISTEMAS DE CONTROLE *FUZZY*

A Lógica Fuzzy foi inicialmente proposta pelo professor Lotfi A. Zadeh, em 1965. Desde então, tem sido amplamente difundida e utilizada em diversos setores e não apenas nos meios acadêmicos. Suas aplicações na indústria são diversas, principalmente em campos onde as informações obtidas nem sempre são precisas e as operações são realizadas por técnicos e especialistas com base em suas experiências profissionais. A Lógica Fuzzy permite converter informações imprecisas, descritas em linguagem natural, em um formato numérico, abordando os conhecimentos de forma subjetiva e objetiva.

Um controlador com base na Lógica Fuzzy recebe dados numéricos, ou valores exatos, relativos a algum processo ou variável, e a partir daí passa pelo processo denominado de fuzzyficação, onde as variáveis numéricas são transformadas em variáveis linguísticas. Com essas variáveis, e com o conhecimento do operador acerca de determinada operação, criam-se as bases de regras para o processo de inferência, onde uma entrada se conecta a

uma determinada saída por um ou mais conectivos lógicos. No entanto, essas variáveis não apresentam praticidade para operação de máquinas, ou processos exatos, logo, a fase seguinte é a defuzzyficação, processo onde as variáveis que passaram pela inferência são caracterizadas em dados numéricos, tornando-se compreensíveis ao operador e sua planta.

Como algumas vantagens de controles que utilizam o princípio da lógica difusa, pode-se citar o emprego do conhecimento prático dos operadores de uma planta, cujas estratégias de controle estão embasadas nos resultados obtidos pela experiência prática, e não apenas no emprego de modelagem matemática; além de permitir o envolvimento de um elevado número de entradas (SHAW e SIMÕES, 2007).

Apesar de não se mostrar complexa em sua fase de aplicação, a lógica difusa é composta por alguns princípios básicos que regem seu funcionamento, tornando sua compreensão indispensável para a elaboração de um controlador eficiente. Tais princípios podem ser divididos nos seguintes tópicos: conjuntos *fuzzy*, variáveis linguísticas, funções de pertinência, implicação lógica e regras de inferência, fuzzyficação e defuzzyficação.

3.3.1 Conjuntos *Fuzzy*

A Lógica Fuzzy é fundamentada na teoria dos conjuntos *fuzzy* (A), que são definidos por **funções de pertinência** (GOMIDE *et al*, 1995). Pode-se dizer que um conjunto *fuzzy* faz a conexão entre uma variável linguística e seu equivalente numérico, por meio da atribuição de um grau de pertinência $\mu_A(x)$, entre 0 e 1 para cada elemento de x no universo (U).

A partir do exposto acima, conclui-se que os conjuntos *fuzzy* são elaborados a partir da teoria clássica dos conjuntos, que relaciona a pertinência ou não de um elemento às condições impostas por aquele universo de valores. Na teoria clássica, um elemento pode estar ou não contido em um determinado conjunto, ou seja, dado um elemento qualquer de um conjunto C em relação a um universo U, os elementos de U, dados por u, podem pertencer ou não ao conjunto C. Essa definição pode ser expressa pela seguinte função característica:

$$f_c(u) = \begin{cases} 1, & \text{se somente se } u \in C \\ 0, & \text{se somente se } u \notin C \end{cases}$$

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla do conceito de pertinência de um elemento a um conjunto. Para Zadeh (1965) dado elemento pode pertencer mais a um

conjunto do que a outro. Logo, para valores iguais a 0, a indicação é de total exclusão, enquanto os valores iguais a 1 indicariam uma total pertinência. Seja U um universo de discurso (contínuo ou discreto) formado por um conjunto de elementos (u), um conjunto *fuzzy* A , no universo U , pode ser definido por uma função de pertinência que assume valores em um intervalo de $[0,1]$. Ou seja:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

Sendo o conjunto *fuzzy* A no universo de discurso U , um conjunto de pares ordenados, do tipo:

$$A = \{\mu_A(u)/u\}, u \in U$$

Um conjunto *fuzzy* é definido por sua função de pertinência, que reflete a relação de intensidade de um determinado parâmetro ou objeto pertencente a um conjunto *fuzzy*. Assim como para os conjuntos clássicos, os conjuntos *fuzzy* possuem propriedades e podem se relacionar a partir de operações, tais como interseção, união e complemento.

Shaw e Simões (2007) apresentam a definição para a intersecção e união, respectivamente, de conjuntos nebulosos: “Seja U o universo de discurso e $x \in U$, e sejam os conjuntos $A \subset U$ e $B \subset U$. A intersecção é a parte comum dos conjuntos A e B , e é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais A e B ”. Sendo o vetor de pertinência calculado por:

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

A união pode ser compreendida como o menor subconjunto no universo de discurso que inclui ambos os conjuntos, A e B , simultaneamente. Como a união é o contorno de ambos os conjuntos, a união é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais, A ou B . E seu vetor de pertinência é dado por:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

E, por fim, a definição de complemento de um conjunto *fuzzy*. Seja U o universo de discurso, onde $A \subset U$, o complemento de A , dado por A' , são todos os elementos de U que não pertencem a A . Seu vetor de pertinência é dado por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Há problemas físicos teóricos ou práticos, onde o sistema necessita de operações entre conjuntos de diferentes universos de discurso. Tais operações possibilitam a criação de uma base de conhecimentos do sistema em questão, a partir de um mapeamento entre os sinais de entrada e de saída. Para Garcia (2009), a partir do uso das funções de pertinência, e regras do tipo SE-ENTÃO, é possível realizar uma inferência do tipo: SE x E y ENTÃO z . Onde x e y são variáveis de entrada e z é a variável de saída. Os conectivos SE, E e ENTÃO compõem as regras de inferência. Para a intersecção entre universos de discursos diferentes, utiliza-se um produto cartesiano entre os conjuntos.

3.3.2 Variáveis Linguísticas

As variáveis linguísticas se apresentam como valores que caracterizam os conjuntos *fuzzy*. As variáveis são formadas por funções de pertinência que mais se adequam ao problema em questão. Com cada valor sendo um número *fuzzy* definido em um universo de discurso. “Uma variável linguística é aquela cujo valor é expresso por termos linguísticos, de natureza subjetiva, e expressos por funções de pertinência” (BELLUCCI, 2009).

Os valores de uma variável linguística podem ser construídos a partir de sentenças, conectivos lógicos ou determinadores. Segundo Tanscheit (1995), as variáveis linguísticas possuem a seguinte caracterização: (N, T(N), X, G, M).

Onde,

N: nome da variável;

T(N): conjunto de termos de N;

X: universo de discurso;

G: regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de T(N), ou seja, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores.

M: regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* em X.

Em uma linguagem qualquer, cada palavra x pode ser entendida como uma descrição de um subconjunto $M(x)$, em um universo de discurso U , no qual $M(x)$ representa o significado de x , (ZADEH, 1973). Ou seja, a variável linguística pode ser representada por uma ou mais função de pertinência que irá caracterizá-la em um universo de valores. Desta forma, para cada variável proposta no sistema, é possível associar funções cujo objetivo é mapear o comportamento e os níveis de pertinência de tal variável em um universo de interesse de valores reais.

Dada uma determinada variável, composta por um número “ n ” de conjuntos ou funções de pertinência, a diferenciação entre os conjuntos ou funções são dados através de: termos primários, que nomeiam os conjuntos; conectivos lógicos, tais como “não”, “e”, “ou”, “mas” etc.; modificadores, que caracterizam a intensidade de determinado conjunto dentro do universo considerado; e delimitadores, como simples parêntesis (GOMIDE *et al*, 2017).

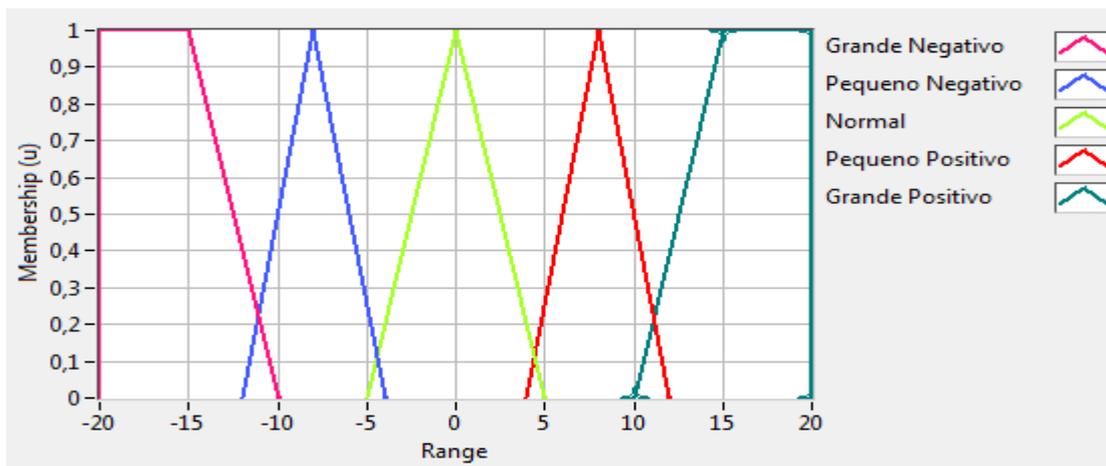
3.3.3 Funções de Pertinência

Não é possível abordar variáveis linguísticas sem relacioná-las às funções de pertinência. Para Shaw e Simões (2007): “uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável em seu universo de discurso”.

As funções de pertinência podem ser representadas em diversos formatos, tais como: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, spline cúbico, dentre outros. A quantidade de funções, bem como o formato a ser adotado vai depender da experiência e conhecimento do controlador em relação ao processo a ser controlado. Neste trabalho, será utilizado os formatos triangular e trapezoidal.

A Figura 3.2 traz um exemplo de uma variável linguística, representada por funções de pertinência em formatos triangular e trapezoidal. No eixo horizontal há os intervalos onde determinada variável pode transitar, com cada função variando dentro do seu próprio conjunto. No eixo vertical há a indicação do grau de pertinência de determinada variável dentro de um dado conjunto.

Figura 3.2– Funções de pertinência triangulares e trapezoidal



Na fase de elaboração das funções de pertinência de cada variável que se deseja controlar, além da experiência do operador em relação à variação e comportamento dos parâmetros que regem o funcionamento da planta, é preciso que se analisem certos aspectos das funções, tais como:

- Número de funções de pertinência por variável: a escolha varia de acordo com os conhecimentos que se tem da planta, no entanto, as bibliografias consultadas alertam que valores entre 5 e 7 apresentam confiáveis resultados;
- Superposição das funções de pertinência: recomenda-se um mínimo de 25% e um máximo de 75% para o grau de superposição.

3.3.4 Implicação Lógica, Regras de Inferência e Métodos de Inferência de Mamdani

Ao se conhecer o processo que se deseja controlar, é possível a elaboração de um banco de dados, alimentado pelas informações que regem o comportamento da planta em questão. Essa base de dados é fundamental para que se possa, a partir de regras de inferência, obter implicações lógicas, ou seja, para cada entrada, há uma saída que se corresponde de forma encadeada com o comportamento do processo estudado.

As regras de inferência são formadas relacionando uma entrada com uma saída através de conectivos lógicos. Ou seja, resultados de avaliações de problemas corriqueiros, onde se estabelece uma lógica em seu efeito a partir das causas.

As sentenças lógicas utilizam os mesmos conectivos da lógica clássica: “e”, “ou”, “se...então” e “se somente se”. A palavra “não” é utilizada para realizar a negação de uma sentença, assim como o “e” (conjunção) tem como objetivo reunir elementos comuns de determinadas sentenças. O “ou” (disjunção) é utilizado para realizar a união de conjuntos. Assim como o “se...então” cria sentenças condicionais e “se somente se” é utilizado quando se deseja operar com equivalência lógica entre duas ou mais sentenças.

A escolha do método de inferência mais adequado a se aplicar no controlador varia conforme as especificações do processo, e as necessidades do operador em termos de resposta que a planta pode fornecer. Há alguns registros de modelos de inferência, nesse trabalho, foi utilizado o método de Mamdani. Nesse método, o modelo de inferência pode ser descrito como no exemplo seguinte: **IF** (SE) demanda **IS** (ESTÁ) aumentando muito **AND** (E) pressão está baixa, **THEN** (ENTÃO) aumentar a rotação do conjunto motobomba.

Em um sistema criado a partir da Lógica Fuzzy, a máquina de inferência recebe, a partir do fuzzyficador, os valores *fuzzy*, que anteriormente passaram por uma conversão de escalares para os números *fuzzy*. Na etapa seguinte, a partir das funções de pertinência, os valores convertidos serão mapeados no intervalo [0,1]. Logo a seguir, a máquina de inferência executa as regras dispostas no banco de regras, garantindo assim um conjunto *fuzzy* de saída. Finalmente o conjunto gerado será enviado para o defuzzyficador, responsável pela conversão em valores escalares. Pelo modelo de Mamdani, a regra semântica utilizada para o processamento de inferência é o método máximo-mínimo, através das operações de união e intersecção entre os conjuntos.

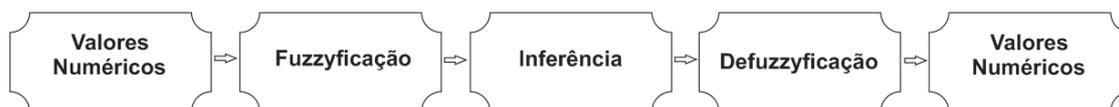
3.3.5 Fuzzyficação e Defuzzyficação

O processo de associar um valor numérico real a um conjunto *fuzzy*, a partir de um mapeamento do domínio de valores discretos para o domínio dos números *fuzzy* é denominado de fuzzyficação. Segundo Shaw e Simões (2007), é uma espécie de pré-processamento dos sinais de entrada, reduzindo a quantidade de valores a serem processados. Na fase de fuzzyficação utilizam-se os conhecimentos do operador, especialista no sistema ou na planta. Com esses conhecimentos, é possível criar as funções de pertinência, ou os conjuntos *fuzzy*, cujos intervalos de variação obedecem a uma discriminação proposta pelos especialistas do processo a ser executado.

O sistema de inferência realiza o mapeamento relacionando as entradas e a base de regras proporcionando um valor de saída. A conclusão apontada na fase de inferência se apresenta como um número *fuzzy*, o que não teria utilidade prática para informar ao operador ou controlador qual saída deve ser adotada. Por isso, é necessário que o resultado encontrado passe por um processo denominado defuzzyficação, que irá transformar os valores ou números *fuzzy* em valores reais ou compreensíveis a planta.

A defuzzyficação é o processo realizado após a obtenção do conjunto *fuzzy* por meio da inferência, onde é feita uma interpretação das informações obtidas e uma posterior conversão dos dados recebidos em resultados precisos. Ou seja, o valor da variável linguística recebido será inferido pelas regras difusas e convertido a um valor discreto, que pode ser interpretado pelo operador ou controlador na fase de tomada de decisão para realização de um determinado processo (ver Figura 3.3).

Figura 3.3 – Esquema simplificado de um sistema *fuzzy*.



Fonte: Modificado de Bauchspiess, 2008.

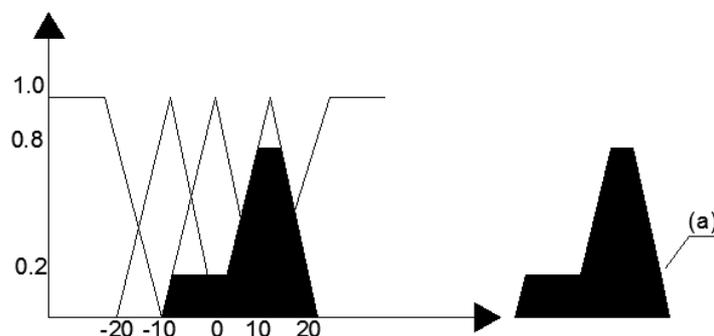
Após a interação entre as variáveis de entrada pelo método de inferência adotado, o sinal de saída ou mesmo a resposta esperada pode ser encontrada dentro de uma região de pertinência. Nesta etapa, adotam-se métodos que executam a defuzzyficação, tais como o centro de área, centro de máximo e média do máximo.

- **Centro de gravidade:** calcula o centroide da área representada pelo termo de saída *fuzzy*. Esse termo é formado pela união de todas as contribuições de regras;
- **Centro de máximo:** neste método, apenas os picos das funções de pertinência (representados por setas), no universo de discurso da variável de saída são utilizados, sendo as áreas delimitadas pelas funções de pertinência, desprezadas;
- **Média do máximo:** neste método, é realizada uma média de todos os máximos valores de pertinência obtidos.

Este trabalho irá utilizar, como método de defuzzyficação, o centro de gravidade. Esse método fornece a média das áreas das figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto *fuzzy*. A Figura 3.4 representa o cálculo de defuzzyficação pelo método

de centro de gravidade. É feito o cálculo do centro de área da região hachurada (a), o valor obtido apresenta um resultado compreendido entre -10 e 20.

Figura 3.4 – Método de defuzzyficação pelo centro de gravidade



3.4 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

As dimensões territoriais do Brasil o caracterizam como um país com variedades de climas e incidência pluviométrica, fazendo com que cada região desenvolva e aplique o método de irrigação mais adequado a suas características naturais. Em regiões com maiores índices pluviométricos, a irrigação é utilizada apenas para suprir curtos períodos de estiagem no decorrer do desenvolvimento da cultura. Enquanto em regiões como o semiárido brasileiro, a aplicação artificial de água na terra é a garantia de uma produção eficiente e com menor risco de perda para o produtor.

Assim, não é possível eleger a melhor metodologia de desenvolvimento com base em padrões gerais, é necessário que se analise cada região separadamente, para que se respeite as necessidades específicas de cada área.

Os sistemas de irrigação possuem diversas configurações, cabe ao projetista, juntamente com o produtor, adotar aquelas que mais se adequem às características da cultura, clima, solo e temperatura de uma região. As primeiras diferenças surgem com a escolha do método de irrigação, ou seja, a forma como a água é aplicada ao solo; que varia conforme as condições econômicas, ambientais, culturais ou sociais do produtor. Os métodos de irrigação podem ser divididos em quatro grupos gerais: superfície, subterrânea, aspersão e localizada.

O método de irrigação localizada é indicado para locais onde a água é cara e escassa, os solos são salinos, pedregosos ou com topografia acidentada, e para áreas que produzem

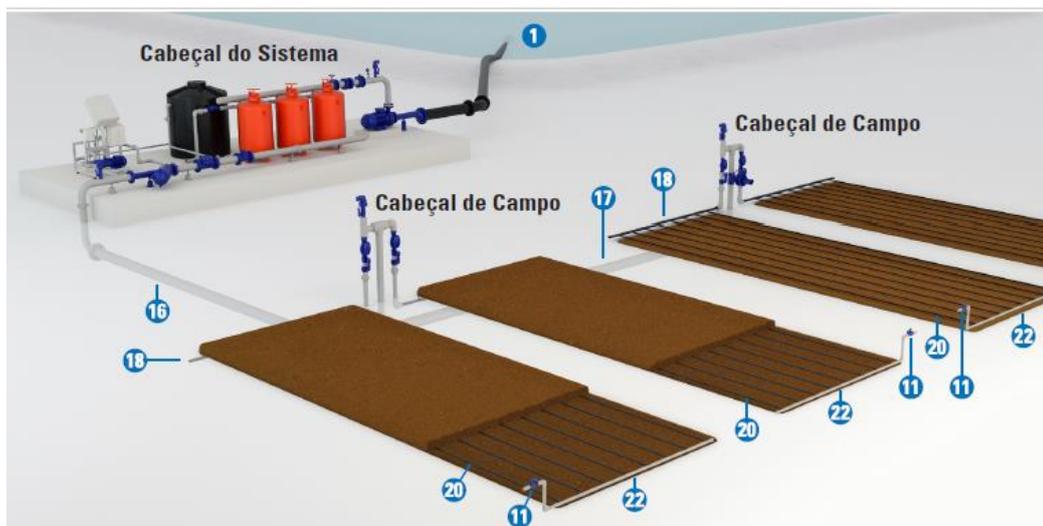
culturas de alto valor comercial. Sendo o Nordeste a região brasileira que mais utiliza esse método em seus processos de irrigação (BRASIL, 2019).

Entende-se por irrigação localizada o método no qual a deposição de água no solo ocorre em áreas limitadas, utilizando pequenos volumes sob pressão e com alta frequência. Segundo Silva e Silva (2002): “a irrigação localizada é mais indicada para culturas perenes, com maiores espaçamentos entre plantas e fileiras”. Os autores ainda destacam as maiores vantagens dos sistemas de irrigação localizada:

- Maior eficiência no uso da água, defensivos agrícolas e fertilizantes, visto que esses sistemas não molham toda a superfície do solo;
- Redução de mão-de-obra, quando comparados aos sistemas como aspersão convencional;
- Apresentam boa adaptação a diferentes tipos de solo e topografia;
- Maior eficiência no controle fitossanitário por não irrigar ervas daninhas e não molhar a parte aérea dos vegetais, o que reduz a incidência de patógenos nas folhagens e frutos, minimizando os gastos com herbicidas, inseticidas e fungicidas.

Os métodos de irrigação localizada podem ser divididos em duas categorias: micro aspersão ou gotejamento. Para Bezerra e Gomes (2015), uma das grandes vantagens dos sistemas de irrigação por gotejamento está em sua operação sob reduzidas pressões de serviços, o que reduz o consumo de energia requerido pelo conjunto motobomba utilizado no local. Os gotejadores funcionam como dissipadores de energia, visto que devem reduzir a pressão nominal, que varia de 5 mca a 20 mca, para zero na saída dos bocais. A Figura 3.6 traz o esquema de um sistema genérico de irrigação por gotejamento.

Figura 3.5 (a) – Esquema de um sistema genérico de irrigação por gotejamento



Cabeçal do Sistema

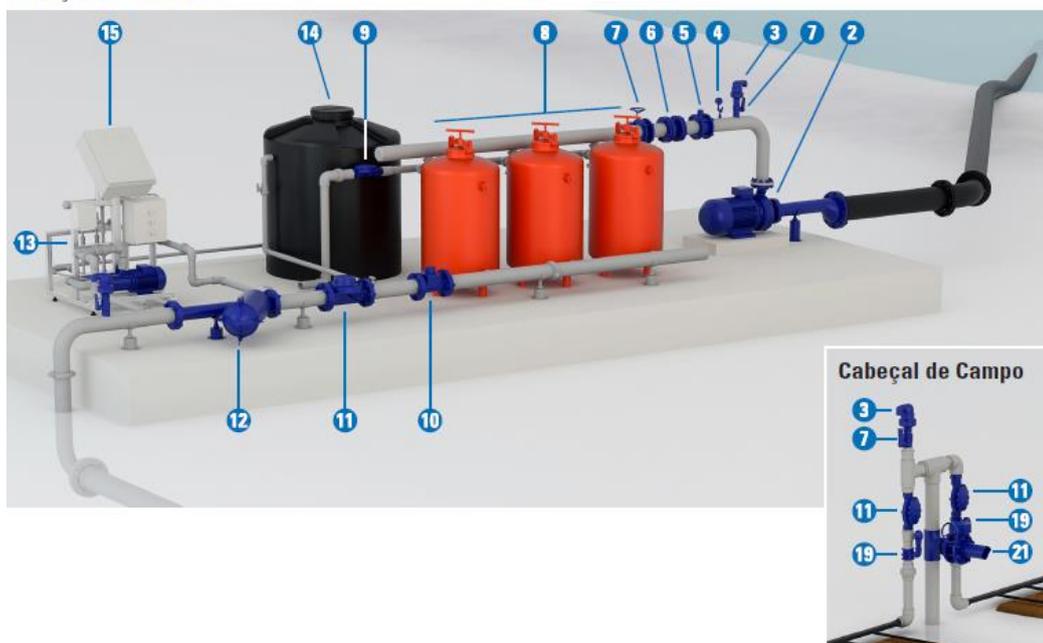


Figura 3.6 (b) – Esquema de um sistema genérico de irrigação por gotejamento

- | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| 1 Fonte de água | 9 Princ. válv. de drenagem de filtr. autom. | 17 Linha sub-principal |
| 2 Est. de bombeamento | 10 Medidor de água | 18 Linha de distribuição |
| 3 Válvula de ar | 11 Válvula hidráulica | 19 Válv. cinética (anti-vácuo) |
| 4 Medidor de pressão | 12 Unid. de filtragem secundária | 20 Tubo gotejador |
| 5 Válvula de verific. | 13 Unidade de dosagem | 21 Válvula de descarga |
| 6 Absorv. de choque | 14 Tanque de fertilizante | 22 Tubulação de descarga |
| 7 Válvula manual | 15 Controlador de irrigação | 23 Filtro de fertilizante |
| 8 Princ. unid. de filtragem | 16 Linha principal | |

Fonte: Manual Netafim Gotejamento (2014).

Após a adoção do método de irrigação, o passo seguinte é definir a configuração da rede. Por questões econômicas e de otimização no uso do solo, a utilização de sistemas de irrigação pressurizados para a distribuição de água em sistemas de múltiplas parcelas vem sendo largamente difundido. Esses sistemas são compostos pela estação de bombeamento, com um dispositivo de regulação e controle, e rede coletiva de distribuição, com suas peças de controle de fluxo de água (BEZERRA e GOMES, 2015).

Para o dimensionamento das unidades de bombeamento e tubulações das redes de distribuição, é preciso estimar o volume necessário para suprir as demandas hídricas das culturas a serem irrigadas, garantindo aos solos as condições de umidade ótima. Portanto, a primeira fase para elaboração de um projeto de irrigação pressurizado é a determinação das necessidades hídricas. O levantamento da lâmina de água necessária a se aplicar ao solo leva em consideração características como: temperatura, velocidade do vento, especificações da cultura, condutividade elétrica, umidade e horas de radiação solar. Aplicando as metodologias existentes, encontra-se o volume de água ideal a ser aplicado ao solo para que se atinja as melhores condições de umidade para o desenvolvimento da cultura.

Segundo Gomes (2013): “os aspectos agronômicos básicos necessários para a elaboração de um projeto de irrigação se resumem a duas questões: a primeira consiste na determinação da quantidade de água útil admitida pelo solo e a segunda corresponde à determinação das necessidades hídricas da planta”.

O solo, formado pelas partículas sólidas, de origem orgânica ou inorgânica, mais a água e o ar constituem o substrato necessário para que as raízes possam retirar os nutrientes necessários ao seu pleno desenvolvimento. As características do solo como textura, porosidade, densidade, velocidade de infiltração e estrutura, vão determinar a velocidade de infiltração da água que chega à superfície do solo e é encaminhada até seu interior. A água que se infiltra no solo e fica disponível para a zona radicular das plantas é a água de capilaridade. Após a infiltração da água e passado seu processo de saturação, o solo atinge a fase de capacidade de campo, nível de umidade ótima.

Quando se inicia o processo de evaporação, pelas condições climáticas, e transpiração da planta, e não se torna a aplicar água para manter a capacidade de campo, o solo pode atingir o ponto de murcha. Ou seja, nível extremamente baixo de umidade que pode interferir diretamente no crescimento e desenvolvimento saudável da cultura.

Outro parâmetro a ser levantado é a profundidade efetiva, que determina a profundidade do sistema radicular, onde é possível determinar a camada de solo que é

utilizada para o cálculo da lâmina de água. Entre o intervalo de uma irrigação e outra, antes que a planta atinja seu ponto de murchamento, há o déficit hídrico tolerável, ou seja, período que a permite continuar na sua fase de desenvolvimento, mesmo sem a aplicação de uma nova lâmina de água.

A determinação da necessidade de irrigação vai variar conforme o balanço hídrico realizado. O balanço hídrico leva em consideração a necessidade de irrigação líquida, a evapotranspiração da cultura, a precipitação efetiva, dotação de água por capilaridade e a reserva de água existente no solo, no início do intervalo de tempo considerado.

A frequência de aplicação da água no solo pode variar conforme o estágio de desenvolvimento da cultura, no entanto, o mínimo valor a ser considerado é aquele que leva ao período de máximo déficit hídrico, onde a necessidade de irrigação líquida é máxima. Quando se adota a aplicação de água no solo por demanda, e não por frequências de turno de rega, é feito um levantamento em campo dos índices de umidade do solo. Sempre que esses índices atingem valores abaixo dos pré-estabelecidos, é feita a irrigação do sistema.

Existem diversos métodos para se determinar a demanda hídrica, frequência e período de irrigação. Atualmente uma das metodologias mais indicadas para se determinar a demanda hídrica da cultura, bem como a frequência de irrigação é através do uso do programa CROPWAT. Um *software* livre desenvolvido pela Food and Agriculture Organization (FAO), a Organização das Nações Unidas (ONU) para a Alimentação e a Agricultura. Inserindo todos os valores no programa CROPWAT, é possível obter o calendário de irrigação. O calendário indica os dias para se realizar a rega, bem como a lâmina bruta que deve ser aplicada, levando-se em consideração a evapotranspiração e as condições de solo e clima. O objetivo do programa é fazer o balanço hídrico e informar a necessidade de irrigação por período de colheita.

O CROPWAT é um programa que utiliza o método da FAO Penman-Monteith para determinar a evapotranspiração das culturas (ET), sendo a radiação solar estimada com os dados de insolação. Os valores de ET são utilizados posteriormente para estimar os requerimentos de água dos cultivos e o calendário de irrigação.

Através de seus oito módulos (cinco de entradas de dados e três de cálculo) é possível fazer o levantamento da exigência de água pela cultura, a frequência de irrigação, e o esquema de irrigação para uma ou mais cultura dentro de uma determinada área (SALES, et al, 2016). Seus módulos de entrada de dados são:

- Clima: neste primeiro módulo serão inseridos dados referentes a temperatura, velocidade do vento, umidade do ar e horas de insolação, e será fornecida a evapotranspiração;
- Chuva: neste segundo módulo serão inseridos dados referentes às precipitações, para que o CROPWAT possa fornecer a precipitação efetiva. Obtida pelo método proposto pelo USDA Soil Conservation Service (USDA-SCS). Este método foi desenvolvido por meio de balanços hídricos relacionando-se a entrada de precipitação com as saídas por escoamento superficial e percolação, bem como a água retida na zona radicular, para várias culturas (MINUZZI e RIBEIRO, 2012).
- Cultura: neste módulo necessita-se fornecer ao programa informações sobre a cultura, tais como coeficiente de cultivo, profundidade das raízes conforme nível de crescimento e fator de depleção;
- Solo: neste quarto módulo torna-se necessário o conhecimento das características do solo onde a cultura irá se desenvolver;
- Requerimento de água do cultivo: este último módulo é calculado após o preenchimento de dados dos módulos anteriores, e utilizado como dado de entrada para o levantamento dos últimos módulos.

Os critérios adotados para determinação da lâmina líquida durante todo o ciclo das culturas foram os seguintes: irrigar quando a água facilmente disponível (AFD) estiver próxima a zero, período no qual a planta ainda pode extrair água do solo sem passar por déficit hídrico; e aplicar uma lâmina de água variável para atingir a capacidade de campo do solo.

Finalizando a inserção dos dados para o levantamento do requerimento de água pela cultura, o passo seguinte é realizar o dimensionamento dos três últimos módulos: cronograma de irrigação das culturas; padrão de colheita; esquema de irrigação. O dimensionamento e cálculo dos parâmetros de interesse são realizados a partir do default do próprio programa, recomendado pela FAO.

Em algumas etapas do processo de irrigação é possível a introdução de controladores com o intuito de otimizar a realização da operação do sistema. Os controladores podem ser utilizados para monitorar e controlar os níveis de água e fertilizantes a serem despejados no solo, surgindo como mais uma ferramenta para reduzir os gastos e desperdícios encontrados.

3.5 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADOS

O aumento da produtividade na agricultura está associado aos investimentos realizados na melhoria e modernização dos processos empregados no campo. Como exemplo, podem-se citar: utilização de equipamentos eficientes, projetos de irrigação bem elaborados e com embasamento técnico e científico, manutenção regular dos maquinários e tubulações e controle no volume de água aplicado ao solo.

O conseqüente aumento do volume de água gera também um aumento na energia aplicada aos sistemas elétricos que fazem parte da rede de irrigação, tais como os conjuntos motobomba. Assim, ao se priorizar um aumento na produtividade, é importante que o produtor se comprometa em utilizar recursos como água e energia de forma eficiente. Para isso, adotam-se técnicas que permitam o aumento do volume de água de forma otimizada, reduzindo os desperdícios e eliminando métodos ineficientes de irrigação.

A partir da problemática abordada acima, e sabendo que o Brasil está entre os dez países com maior área equipada para irrigação do mundo, segundo dados da *Food and Agriculture Organization* – FAO (2017) apud ANA (2017); a automação aplicada a sistemas de irrigação surge como alternativa. Com a automação, o produtor poderá acompanhar, em tempo real, toda sua rede, localizando os pontos de ineficiência e, assim, podendo traçar planos de melhoria e recuperação. A aplicação da automação em sistemas de irrigação já é uma realidade em diversos países. No Brasil, há vários relatos de trabalhos técnicos que apresentam bons resultados ao utilizarem sensores e medidores que auxiliam no monitoramento do sistema de forma automatizada.

Por definição, entende-se por automação qualquer técnica computadorizada, eletrônica e/ou mecânica, para diminuir ou suprir a interferência humana em algum processo. A necessidade de sistemas automatizados para o setor agrícola vem se mostrando cada vez mais urgente.

Segundo Biscaro (2014): “Com a tecnologia disponível atualmente, é possível automatizar praticamente todo o sistema de irrigação, desde o acionamento de bombas, válvulas hidráulicas, injeção de fertilizantes e retrolavagem de filtros, até a impressão de relatórios de operação do sistema”.

Para Gomes (2013) os principais motivos que justificam o investimento em técnicas de automação são:

- Economia de recursos hídricos e aumento da produtividade das culturas;

- Economia com os custos energéticos;
- Melhor administração da propriedade ou projeto agrícola;
- Maior flexibilidade na operação;
- Substancial economia de mão-de-obra.

Um sistema automatizado completo é dotado de instrumentos físicos dispostos convenientemente ao longo da rede de distribuição. Esses equipamentos podem ser classificados principalmente em sensores e atuadores, que se comunicam com o computador por meio de um Controlador Lógico Programável (CLP), ou placas de aquisição de dados, ou seja, um dispositivo do tipo DAQ.

O DAQ intermedia os sinais captados por sensores e um computador, digitalizando sinais analógicos de entrada, de forma a tornar suas leituras compatíveis com o sistema de computador utilizado, tais como saídas digitais. As entradas ou saídas digitais possuem apenas dois níveis lógicos: 0 – ligado ou 1 – desligado; as analógicas, que apresentam sinais contínuos, trabalham em uma faixa de valores, por exemplo de 4 a 20 mA, se o sinal medido ou captado for corrente elétrica, ou 0 a 10 V se estiver trabalhando com tensão. A medição desses parâmetros, ou o envio de comandos, ocorre por meio do uso de sensores e atuadores, que são instalados ao longo dos pontos de interesse na planta.

- Sensores: utilizados para converter parâmetros físicos, tais como vazão do fluido, temperatura ambiente e pressão, em sinais monitoráveis como corrente e tensão;
- Atuadores: são dispositivos que controlam o movimento ou a ação mecânica de um determinado dispositivo.

O *software* utilizado neste trabalho, que atua como interface entre as placas de aquisição de dados e o usuário é o LabVIEW®. É nesse ambiente de programação onde se estabelece o projeto e o gerenciamento do sistema de controle, através do protocolo de comunicação de automação Modbus. O LabVIEW® (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), utiliza uma linguagem de programação predominantemente visual desenvolvida pela *National Instruments* (NI), conhecida por Linguagem G. A mecânica de programação deste *software* difere das linguagens usuais, pois incorpora um compilador gráfico aperfeiçoado para maximizar o desempenho do sistema, ao invés de utilizar as tradicionais linhas de código. Os programas gerados pelo LabVIEW® são chamados de instrumentos virtuais (Vi's), por possuírem a aparência e operacionalidade que simulam equipamentos reais. Esses são compostos pelo painel frontal (Front Painel), que contém a

interface, e pelo diagrama de blocos (Block Diagram), que contém o código gráfico do programa.

Atualmente, é possível encontrar registro de diversos tipos de controladores utilizados em sistemas de irrigação. Esses controladores podem ser aplicados em malha aberta, sem retroalimentação; ou em malha fechada, quando a saída irá sempre se ajustar ao valor medido em campo em relação ao referencial pré-determinado. Boa parte dos controladores em malha aberta encontrados atualmente no mercado é de microprocessadores que atuam como uma espécie de temporizador, controlando o liga e desliga da bomba para manter um determinado nível de umidade no solo. Seu baixo custo e facilidade de manuseio o tornam bastante atrativo para os produtores, no entanto, falha por não conseguir se adaptar às mudanças decorrentes do comportamento dinâmico inerente aos sistemas de irrigação.

Para os sistemas de controles desenvolvidos em malha fechada, a robustez do processo permite que mudanças ocorram na fase decisória do controlador, mesmo com as variações imprevisíveis que ocorrem no clima no decorrer de um dia. Nesse tipo de processo, a adição de um sensor de umidade no solo permite a readaptação dos parâmetros inicialmente propostos para o acionamento ou não dos atuadores.

Alguns exemplos de automação em sistemas de irrigação podem ser detectados quando fazem uso de equipamentos como sensores de umidade conectados a válvulas volumétricas. Blocos de resistência elétrica, tensiômetro, condutividade térmica e sistema gasoso de controle de irrigação são alguns métodos de medição instantânea para controle e monitoramento da umidade do solo.

Além dos sensores e atuadores que podem trabalhar sem a interferência humana, há também controladores e microcontroladores que registram as informações obtidas pelos sensores e mandam linhas de comando para controle dos atuadores. Permitindo que o agricultor realize a programação dos dias e horas dos períodos de irrigação. O uso de automação em irrigação permite ao agricultor não apenas aumentar sua produtividade, como também reduzir gastos com energia e os desperdícios de água e fertilizantes, que passam a ser utilizados em suas concentrações necessárias. Bezerra e Gomes (2015) fizeram um levantamento de algumas aplicações de automação em sistemas de irrigação.

- Sistemas de Irrigação Operando em Tempo Real: a irrigação ocorre apenas quando há registro da real necessidade em se aumentar os níveis de umidade do solo. Com o uso de sensores de umidade, os dados são enviados por telemetria ao supervisor, que após analisar

os níveis atuais e comparar com os valores estabelecidos como ideal, inicia o processo de rega. A operação em tempo real também permite o uso de sensores de chuva, que contribuem para a redução no consumo de água e energia, visto que pode funcionar como um interruptor no processo de irrigação.

- **Sistemas de Irrigação com Controladores Comerciais:** Geralmente são utilizados em sistemas de pequeno e médio porte. Os controladores podem ser aplicados para abertura ou fechamento de válvulas, limpeza de filtros, na fertirrigação ou acionamento de válvulas. Os comandos podem ser programados em função do tempo de irrigação ou volume de água fornecido ao solo.

- **Sistema de Bombeamento com Controle On/Off:** Os controladores aplicados no CMB operam, principalmente, em função do nível dos reservatórios que alimentam a rede. São introduzidos dois pontos de referência, um que desliga o CMB, quando o reservatório atinge o nível máximo; e outro que permite a ligação quando o reservatório apresenta seu nível mínimo. A utilização de dois níveis de segurança é recomendada para impedir que o CMB seja acionado com muita frequência, o que poderia causar danos ao equipamento e prejuízo ao produtor.

- **Sistema de Bombeamento Típico com Medição de Vazão e Pressão:** O controle automático em um sistema de bombeamento pode proporcionar economia de energia elétrica, escorva automática da bomba, medição de parâmetros como vazão e pressão, além de outras vantagens. Nesse sistema, são utilizados medidores de vazão, transdutores de pressão e válvulas de controle. As informações são enviadas por telemetria, cabeamento, ou qualquer outro meio possível, e podem ser lidas e analisadas no supervísório. Nesse sistema, também é possível o uso de inversores de frequência.

3.6 CONSIDERAÇÕES

A automação representa não apenas um avanço, como também uma necessidade para os sistemas, principalmente os de grande porte, que apresentam um grande volume de produção. Aliar ao sistema de monitoramento, um sistema de controle capaz de realizar manobras operacionalizadas com o intuito de reduzir as perdas de água e o consumo de energia elétrica, aumentando conseqüentemente a produtividade, torna-se imprescindível nos dias de hoje.

CAPÍTULO 4

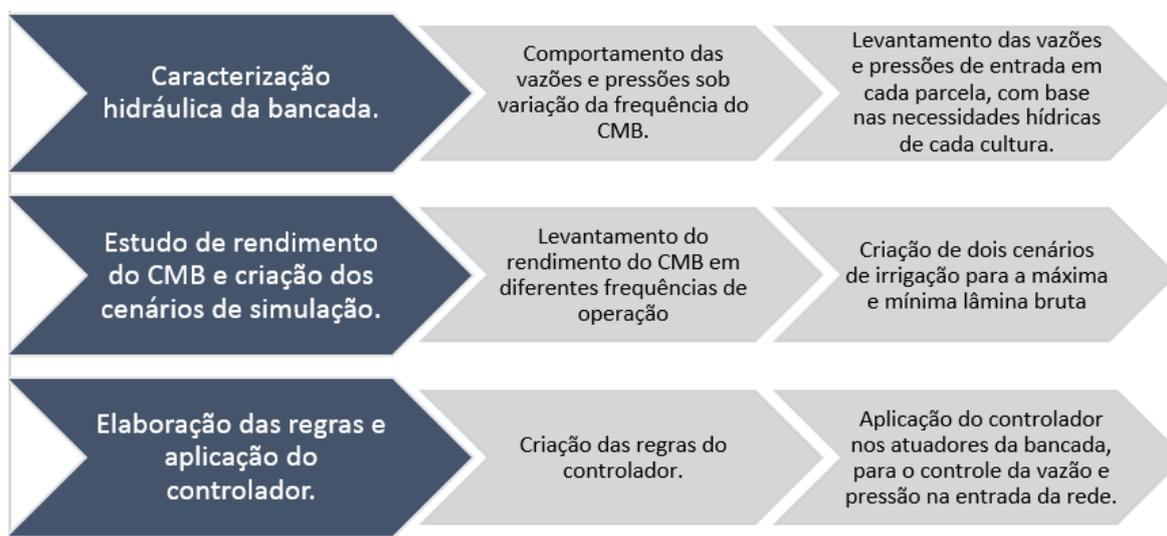
MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordados os aspectos relativos aos materiais empregados e descrição da bancada utilizada para aplicação da técnica de controle proposta. Além disso, serão apresentados os estudos realizados no CMB, para descrever suas características de operação; caracterização das parcelas a serem irrigadas, bem como a definição dos cenários de atuação para aplicação do controlador proposto. Criando, desta forma, embasamento técnico suficiente para elaboração das regras *fuzzy*.

O procedimento experimental adotado para desenvolvimento desta tese está sucintamente descrito na Figura 4.1

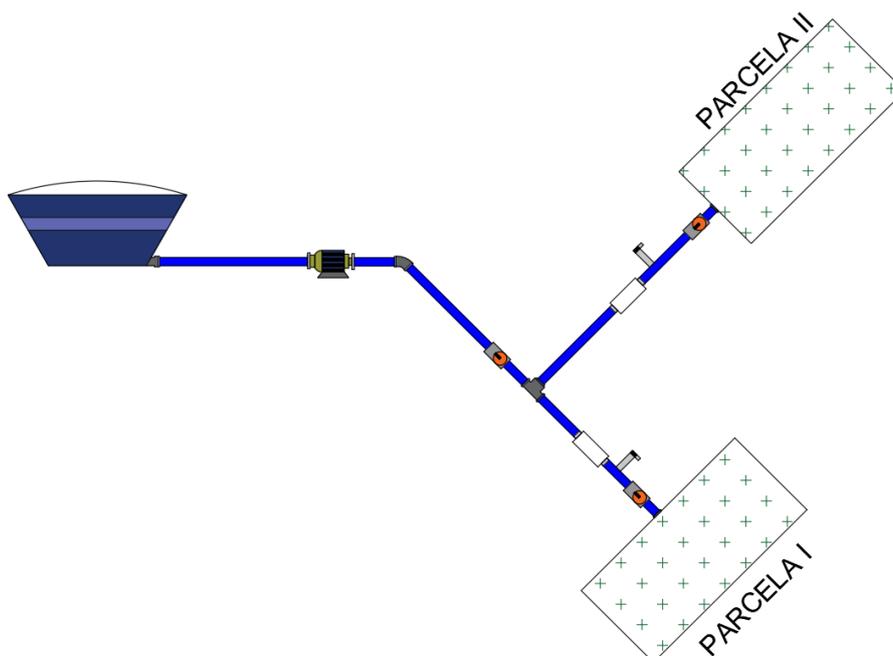
Figura 4.1 – Descrição dos procedimentos metodológicos adotados



4.2 ESTUDO DE CASO

Os testes realizados foram aplicados em um sistema automatizado de distribuição de água instalado no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB). As duas saídas da rede real, conforme esquema ilustrado na Figura 4.2, configuram as entradas das múltiplas parcelas do sistema pressurizado de irrigação proposto.

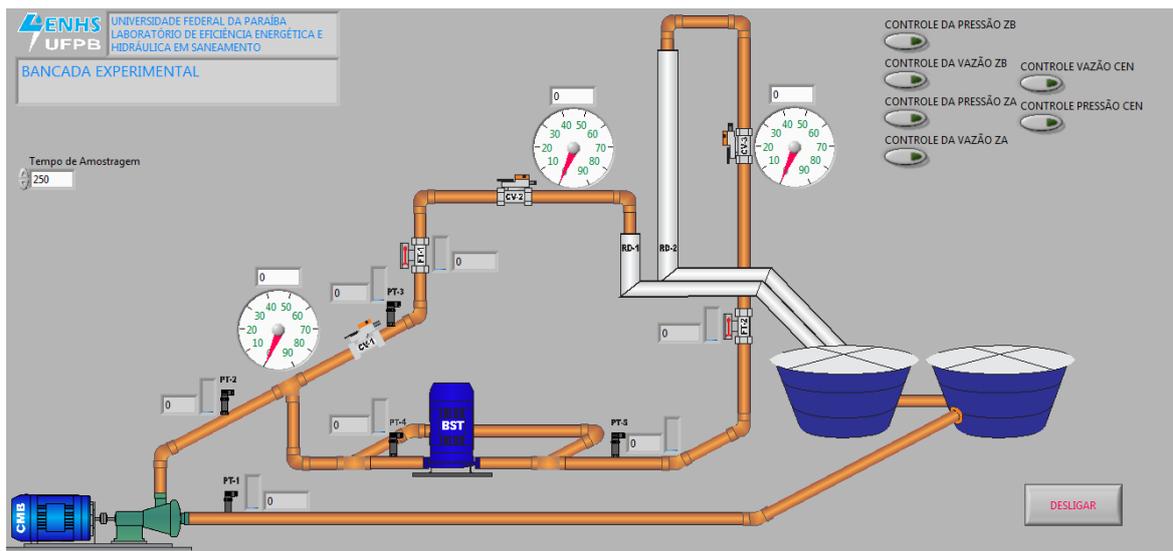
Figura 4.2 – Estudo de caso



4.3 DESCRIÇÃO DA BANCADA

A bancada utilizada simula um sistema com duas zonas com topografias diferenciadas e é denominada de Sistema Automatizado de Distribuição de Água (SADA). Totalmente instrumentalizada e automatizada, possibilita o desenvolvimento de estudos e pesquisas em redes hidráulicas automatizadas voltadas primordialmente para eficiência energética e uso consciente da água. A Figura 4.3 apresenta uma disposição dos principais elementos da bancada.

Figura 4.3 – Vista frontal da bancada SADA



O SADA simula um sistema de distribuição de água setorizado, composto por duas zonas de pressão, cujos ramais de descarga possuem cotas topográficas diferenciadas. A zona baixa (ZB) possui cota de 1,50 m e a zona alta (ZA) uma cota de 6,50 m. Entende-se por zona baixa todo o trecho percorrido continuamente (sem ramificações) desde o reservatório de alimentação (RNF) até o ramal de descarga RD-1. A zona alta é representada pelo trecho percorrido do reservatório até o ramal de descarga RD-2.

A estação elevatória do sistema é composta por um CMB (ver Figura 4.4), com motor de indução trifásico, 220/380 V de 3 cv. O acionamento do CMB é realizado através de um inversor de frequência. Quando associado a um sistema de controle automático o inversor permite manter as pressões de serviço em níveis constantes pré-estabelecidos, adequando, assim, o funcionamento da elevatória às frequentes variações de demanda que possam ocorrer. Com isso, é possível evitar sobrepensões e gastos energéticos dispensáveis. As informações técnicas do CMB estão enunciadas no Quadro 4.1. Os valores de vazão e altura manométrica são referentes a frequência nominal de 60 Hz.

Figura 4.4 - Conjunto motobomba



Quadro 4.1 - Especificações técnicas do CMB

Especificações	CMB
Fabricante	Schneider
Modelo	BC-21 R 1 ½
Potência do motor	3 cv
Frequência de alimentação	60 Hz
Diâmetro nominal de recalque	1 ½"
Diâmetro nominal de sucção	2"
Vazão mínima	17 m ³ /h
Vazão máxima	34 m ³ /h
Altura manométrica mínima	15 mca
Altura manométrica máxima	23 mca

A Figura 4.5 apresenta os medidores de vazão (A), válvulas de controle (B) e os transdutores de pressão (C). Suas informações técnicas estão listadas no Quadro 4.2.

Figura 4.5 – Sensores e atuadores presentes na planta



Quadro 4.2 – Especificações técnicas dos PT, FT e CV

Transdutor de Pressão (PT)		Medidor de Vazão (FT)		Válvula de Controle (CV)	
Especificações	Características	Especificações	Características	Especificações	Características
Fabricante	ACROS	Fabricante	INCONTROL	Fabricante	BELIMO
Modelo	TP-ST18	Modelo	VMS038BU22040	Modelo	ARX24-SR(-T)
Corrente de alimentação	4 mA – 20 mA	Série	VV16897	Corrente de alimentação	4mA - 20mA
Voltagem	0V - 10V	Sinal de Saída	Pulso 4 A – 20 mA	Tensão de alimentação	24V
Temperatura ambiente	40 °C	Alimentação	24 V em CC	Temperatura ambiente	-30°C - 40 °C
Frequência	0 Hz - 60 Hz	Faixa de Velocidade	0,3 a 10,0 m/s	Frequência	50/60 Hz
Pressão	0 mca - 40 mca	Diâmetros Nominais	1/2” a 4”	Grau de abertura	90°
		Temperatura Normal de Operação	50°C	Grau de fechamento	0°
		Tipo	Eletromagnéticos de fluxo		

Para os inversores de frequência, associado ao sistema de impulsão, as informações são apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Informações técnicas sobre o inversor de frequência

Especificações	Inversor de Frequência
Fabricante	WEG - Equipamentos Elétricos S.A.
Modelo	CFW-08
Tensão de alimentação	380-480 V
Faixa de frequência	3 Hz - 66 Hz
Corrente nominal	3 – 7,8 A
Temperatura ambiente	0°C - 40°C
Umidade relativa do ar	5% - 90%

A leitura dos parâmetros hidráulicos fornecidos pelos sensores e atuadores é realizada a partir da comunicação estabelecida entre duas placas de aquisição de dados da *National Instruments* (DAQmx 6221 – 6229) e o software supervisor LabVIEW®. Bem como a execução de ações de comando sobre as válvulas proporcionais e os inversores de frequência.

A etapa seguinte ao conhecimento de todos os componentes e elementos da bancada que será utilizada foi a realização da calibração dos medidores de vazão (FT) e aferição dos valores dos transdutores de pressão (PT) e das válvulas de controle (CV). Com todos os sensores e atuadores devidamente calibrados e aferidos, é possível atestar a validade dos dados que serão apresentados no capítulo referente aos resultados.

4.4 SETORES DE IRRIGAÇÃO

Como já enunciado, a proposta desta tese é aplicar um controlador, com base na lógica *fuzzy* em uma bancada experimental que emula um sistema automatizado e pressurizado de irrigação com duas parcelas, contendo características diferenciadas de operação. O objetivo central é controlar além das pressões nas entradas das parcelas, suas vazões. Validando o controlador a partir de regras criadas com a experiência do agricultor, reduzindo os gastos energéticos com o CMB. A Tabela 4.1 traz os parâmetros elegidos como valores de entrada para caracterização de cada parcela.

Tabela 4.1 – Parâmetros de solo de cultura

Dados fenológicos da cultura										
Parâmetros da cultura	Inicial		Vegetativa		Intermediária		Maturação		Colheita	
	Batata	Feijão	Batata	Feijão	Batata	Feijão	Batata	Feijão	Batata	Feijão
Coefficiente da cultura Kc	0,45	0,35			1,15	1,1			0,85	0,9
Duração da fase fenológica	10	10	30	20	50	45	15	15	105	90
Profundidade da raiz	0,6	0,2			0,8	0,4				
Fração crítica de água no solo	0,4	0,5			0,4	0,5	0,4	0,5		
Fator de resposta da cultura	0,6	0,2	0,6	1,1	0,7	0,75	0,2	0,2		
Dados edafológicos.										
Parâmetros do solo	Batata					Feijão				
Total de umidade disponível no solo (mm/metro)	140					140				
Taxa de infiltração máxima de chuva (mm/dia)	35					35				
Profundidade máxima da raiz (cm)	60					70				
Percentual crítico de umidade do solo (%)	0					0				

Além dos parâmetros elegidos para caracterização do solo e da cultura também foi necessário inserir dados climáticos. Os valores são referentes ao período de 2010 a 2018 e foram obtidos diretamente do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, conforme Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Parâmetros meteorológicos

2010-2018						
Mês	T _{Max} (°C)	T _{Min} (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Precipitação (mm/dia)	Irradiação (horas)
Jan	31,1	25,0	75	3,6	98,1	7,2
Fev	31,5	25,0	74	3,5	92,8	6,6
Mar	31,7	25,0	75	3,6	119,4	7,4
Abr	31,3	24,4	78	3,4	174,3	6,4
Mai	30,7	23,6	80	3,9	196,3	6,3
Jun	29,8	22,6	81	3,9	222,9	5,5
Jul	29,0	22,2	81	4,6	191,0	5,7
Ago	29,3	22,0	76	4,9	82,7	7,3
Set	29,7	23,3	74	4,1	56,0	7,2
Out	30,5	24,8	72	3,8	14,4	8,1
Nov	31,0	25,5	72	3,3	11,3	8,5
Dez	31,3	25,6	73	3,4	29,1	8,1

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA SADA

Os controladores elaborados a partir dos preceitos da lógica Fuzzy exigem do projetista um conhecimento aprofundado acerca do comportamento do processo que se deseja controlar. Torna-se necessário que o desenvolvedor das regras seja um especialista na operação e funcionamento da rede, nos mais diversos cenários de operação. Por tratar-se de um sistema hidráulico, optou-se pelo desenvolvimento de dois estudos preliminares a fase de criação e aplicação do controlador:

- Estudo 1 – rendimento do conjunto motobomba mediante variação da frequência;
- Estudo 2 – análise das pressões e vazões da rede.

- Estudo 1: levantamento do rendimento do CMB mediante variação da frequência

Com base no levantamento bibliográfico apresentado no capítulo 2, constatou-se a necessidade em se levantar a curva de rendimento do CMB, visto que a proposta do controlador tem como base alterar as frequências do motor para que o sistema se ajuste às novas demandas nas entradas de cada setor.

Para que esse procedimento se mostre viável, ao se alterar as frequências de rotação do motor, o rendimento do CMB não deve apresentar oscilações bruscas. Logo, se propõe o

levantamento do rendimento para diferentes frequências, obedecendo a seguinte metodologia operacional.

- a) Encontra-se a potência hidráulica pela Equação 4.1

$$P_{\text{hid}} = \gamma QH \quad (4.1)$$

Onde,

P_{hid} = potência útil ou hidráulica fornecida ao fluido pela bomba, em W;

γ = peso específico da água (kgf/m^3);

Q = vazão a ser bombeada (m^3/s);

H = altura manométrica (m).

- b) Em seguida encontra-se a potência elétrica do CMB: a leitura dos parâmetros elétricos foi realizada através do uso de um analisador de energia, (maleta Fluke – ver Figura 4.6), que disponibiliza, através de sua IHM, dados relativos à corrente elétrica, tensão e fator de potência.

Figura 4.6 – Analisador de energia – Fluke



Com esses dados, foi possível calcular a potência elétrica para cada faixa de valores de operação do inversor. A Tabela 4.3 apresenta as especificações técnicas da Maleta Fluke.

Tabela 4.3 – Especificações técnicas do analisador de energia

Modelo	434 / Fluke
Tensão máxima de entrada	1000 Vrms
Entrada de corrente	1 – 400 Arms
Frequência nominal	40 – 70 Hz
Resolução	16 bits
Taxa máxima de amostragem	200kS/s por canal
Comunicação	Serial USB

c) Encontra-se o rendimento do CMB

$$\eta_{CMB} = \frac{P_{hid}}{P_{el}} \quad (4.2)$$

Onde,

η_{CMB} = rendimento do conjunto motobomba;

P_{hid} = potência hidráulica (W);

P_{el} = potência do motor elétrico (W);

- Estudo 2: análise das pressões e vazões da rede.

Além do estudo descrito acima, que também verifica o consumo da potência elétrica requisitada pelo CMB em diferentes faixas de frequência; também é preciso que o operador da rede conheça as variações hidráulicas que ocorrem. O estudo proposto visa à análise das variações de pressões e vazões nas saídas da rede, ou entradas das parcelas de irrigação, a partir da variação na rotação do CMB.

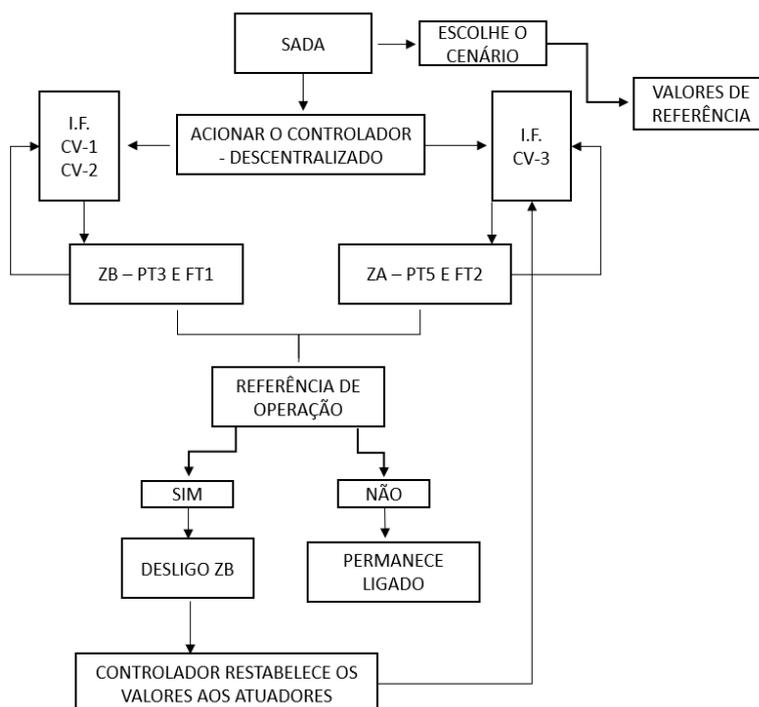
4.6 CONTROLADOR FUZZY

A bancada utilizada possui duas zonas de pressão, nomeadas como zona baixa (leituras de vazão no FT-1 e pressão no PT-3) e zona alta (leituras de vazão no FT-2 e pressão no PT-5). A partir dos resultados obtidos com as simulações descritas, foram criadas as regras do controle *fuzzy*. Levando-se em consideração o elevado número de variáveis, optou-se pela criação de um controlador descentralizado.

O controle descentralizado, em um sistema que opera com duas zonas diferenciadas, atua de forma individual nos atuadores, para que as variáveis de interesse atinjam seus valores de referência. Na bancada utilizada para validação do controlador proposto, foram controladas 4 variáveis, PT-3, FT-1, PT-5 e FT-2. A pressão no PT-3 foi controlada a partir da atuação do controlador no inversor de frequência e na CV-1/VRP. A pressão no PT-5 foi controlada a partir da atuação do controlador no inversor de frequência.

O controle da vazão na ZB (FT-1) foi realizado a partir da atuação do controlador na válvula CV-2. E, por fim, o controle de FT-2 foi resultado da atuação do controlador na válvula CV-3. A estrutura do controlador elaborado está representado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Fluxograma de operação do controlador



De acordo com a Figura 4.11, após iniciar o sistema, elege-se o cenário de atuação, visto que cada cenário proporcionará diferentes valores de referência para as vazões e pressões na rede. Após a escolha do cenário, o controle descentralizado é acionado separadamente para cada um dos quatro sensores. Os atuadores para PT-3 são o inversor de frequência (I.F.) e o ângulo da CV-1, enquanto o atuador para o controle de FT-1 é a angulação de CV-2. Para o controle do PT-5 o atuador é o I.F. e a vazão na ZA é controlada a partir da variação da angulação da CV-3.

Caso os sensores atinjam seus valores de referência, o sistema é desligado. Caso contrário, o controlador deve continuar atuando no I.F e nas válvulas, para que os sensores atinjam os set-points estabelecidos para cada cenário.

4.6.1 Sistema Descentralizado

O sistema proposto visa controlar as vazões e pressões em duas parcelas abastecidas por um único sistema de impulsão. Devido a dinâmica do sistema e a complexidade em se controlar vazão e pressão de forma simultânea em uma rede hidráulica, optou-se pelo uso do controle em um sistema descentralizado. Neste sistema, as regras são elaboradas de forma a atuar separadamente nos atuadores, levando os sensores aos seus valores de referência.

Para criação do sistema descentralizado foram elaborados quatro controles. Para o controle da pressão na ZB foram utilizadas duas variáveis de entrada e duas variáveis de saída, caracterizando um controlador do tipo MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas). As variáveis de entrada escolhidas foram o erro do PT-3 e a derivada do erro, enquanto as variáveis de saídas foram um delta de incremento para a frequência e um delta de incremento para a angulação da válvula. A interação das duas variáveis de entrada com as duas variáveis de saída se deu a partir do uso de 5 funções de pertinência. A interação das variáveis de entrada com as variáveis de saída gerou 25 regras.

Para o controle da vazão na ZB foram utilizadas como variáveis de entrada o erro de FT-1 e a derivada do erro, e a variável de saída, um delta de incremento para a CV-2, caracterizando a elaboração de um controlador do tipo MISO (múltiplas entradas e uma saída). Com o uso de cinco funções de pertinência, a interação entre as variáveis de entrada e a variável de saída originou 25 regras.

Para o controle de PT-5, o sistema foi do tipo MISO, onde as variáveis de entrada foram o erro de PT-5 e a derivada do erro, e como variável de saída optou-se pelo incremento do delta do inversor de frequência. E finalizando o controle das variáveis da ZA, para o controle da vazão (FT-2), utilizou-se como variáveis de entrada o erro e sua derivada, e como variável de saída o incremento do delta do ângulo da CV-3. A interação entre as variáveis de entrada e saída de PT-5 e FT-2 foi possível a partir da criação de 5 funções de pertinência, para cada um dos sensores. Ou seja, o controle descentralizado proposto foi criado a partir da elaboração de 100 regras: 25 para o controle da vazão; 25 para o controle da pressão na

ZB; adicionadas a mais 25 regras para o controle da vazão e 25 regras no controle da pressão na ZA. As variáveis de entrada e saída adotadas para a ZB e ZA estão descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Variáveis de entrada e saída do controlador para as ZB e ZA

Sistema Descentralizado			
Variáveis De Entrada	Sigla	Variáveis De Saída	Sigla
Erro FT-1 e FT-2	EFT	ΔVRP (CV-1)	DA
Derivada do Erro	DEFT	ΔIF	DF
Erro PT-3 e PT-5	EPT	ΔCV (CV-2)	DA
Derivada do Erro	DEPT	ΔCV (CV-2)	DA

Para cada variável de entrada e de saída foram criadas cinco funções de pertinência. A Tabela 4.5 apresenta a interação das variáveis de entrada com as variáveis de saída, formulando-se então, as 25 regras para o controle da vazão na ZB. Para o controle da pressão, a Tabela 4.6 apresenta suas regras conforme ilustrado a seguir.

Tabela 4.5 – Funções de pertinência para o controle da vazão na ZB

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DAV2PA	DAV2P	DAV2Z	DAV2N	DAV2NA
DEN	DAV2PA	DAV2P	DAV2Z	DAV2N	DAV2NA
DEZ	DAV2PA	DAV2P	DAV2Z	DAV2N	DAV2NA
DEP	DAV2PA	DAV2P	DAV2Z	DAV2N	DAV2NA
DEPA	DAV2PA	DAV2P	DAV2Z	DAV2N	DAV2NA

Tabela 4.6 – Funções de pertinência para o controle da pressão na ZB

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DFNA/DAPA	DFN/DAP	DFZ/DAZ	DFP/DAN	DFPA/DANA
DEN	DFNA/DAPA	DFN/DAP	DFZ/DAP	DFP/DAN	DFPA/DANA
DEZ	DFNA/DAPA	DFN/DAP	DFZ/DAZ	DFP/DAN	DFPA/DANA
DEP	DFNA/DAPA	DFN/DAP	DFZ/DAZ	DFP/DAN	DFPA/DANA
DEPA	DFNA/DAPA	DFN/DAP	DFZ/DAZ	DFP/DAN	DFPA/DANA

A Tabela 4.7 apresenta as 25 regras para o controle da vazão na ZA. Para o controle da pressão, a Tabela 4.8 apresenta suas regras conforme ilustrado a seguir.

Tabela 4.7 - Funções de pertinência para o controle da vazão na ZA

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DAP	DAP	DAP	DAP	DAN
DEN	DAZ	DAZ	DAZ	DAZ	DAZ
DEZ	DAZ	DAZ	DAZ	DAN	DAZ
DEP	DAZ	DAZ	DAZ	DAZ	DAZ
DEPA	DAN	DAN	DAN	DAN	DAN

Tabela 4.8 - Funções de pertinência para o controle da pressão na ZA

	ENGA	ENG	EZ	EP	EPA
DENA	DFNA	DFNA	DFN	DFPA	DFPA
DEN	DFNA	DFNA	DFNA	DFP	DFPA
DEZ	DFN	DFN	DFZ	DFZ	DFN
DEP	DFP	DFP	DFP	DFP	DFPA
DEPA	DFPA	DFPA	DFP	DFP	DFPA

Onde,

ENGA – Erro Negativo Alto

ENG – Erro Negativo

EZ – Erro Zero

EP – Erro Positivo

EPA – Erro Positivo Alto

DENA – Derivada do Erro Negativo Alto

DEN – Derivada do Erro Negativo

DEZ – Derivada do Erro Zero

DEP – Derivada do Erro Positivo

DEPA – Derivada do Erro Positivo Alto

DANA – Delta Ângulo Negativo Alto

DAN – Delta Ângulo Negativo

DAZ – Delta Ângulo Zero

DAP – Delta Ângulo Positivo

DAPA – Delta Ângulo Positivo Alto

DFPA – Delta Frequência Positivo Alto

DFP – Delta Frequência Positivo

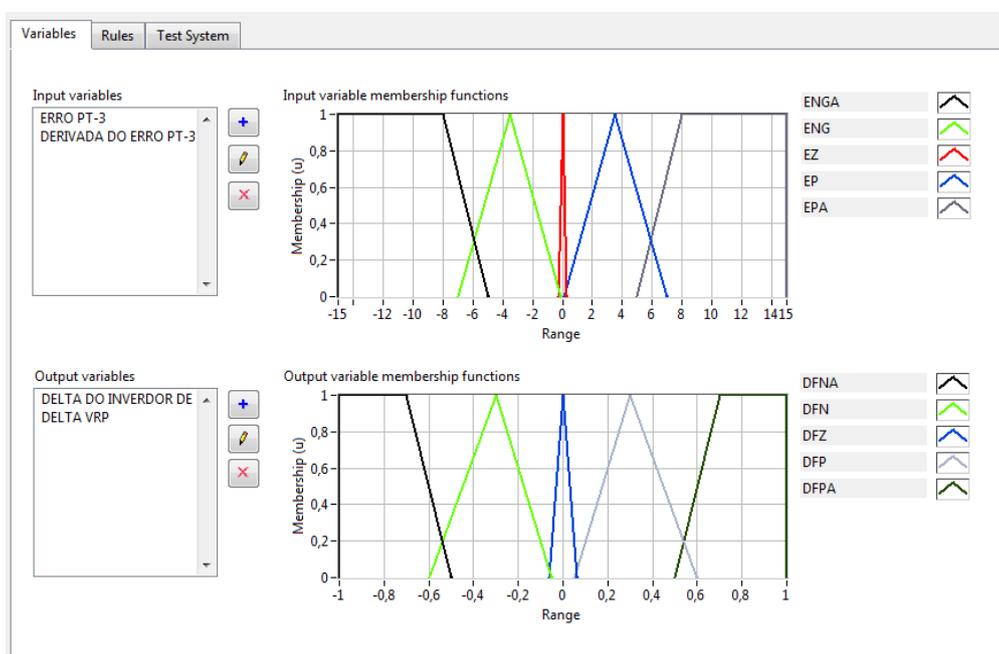
DFZ – Delta Frequência Zero

DFN – Delta Frequência Negativo

DFNA – Delta Frequência Negativo Alto

O layout do LabVIEW® para inserção das variáveis de entrada e a interação, através das funções de pertinência, com as variáveis de saída do controlador na pressão na ZB está representado na Figura 4.8. O controlador, ao ser acionado, irá atuar da seguinte forma: ao identificar um erro negativo alto (região entre -15 e -5), bem como a derivada do erro negativa alta, a resposta de saída será um delta negativo alto (entre -1 e -0,5) da frequência atual registrada no inversor de frequência, bem como um delta positivo alto (fechando o ângulo, gerando perda de carga e reduzindo a pressão em PT-3) na VRP.

Figura 4.8 – Variáveis de entrada e saída do controlador da pressão na ZB



4.7 CONSIDERAÇÕES

Com a aplicação dos métodos acima descritos, espera-se que os objetivos inicialmente propostos sejam alcançados, validando assim não só a proposta de tese, junto com sua problemática, bem como sua própria metodologia associada.

CAPÍTULO 5

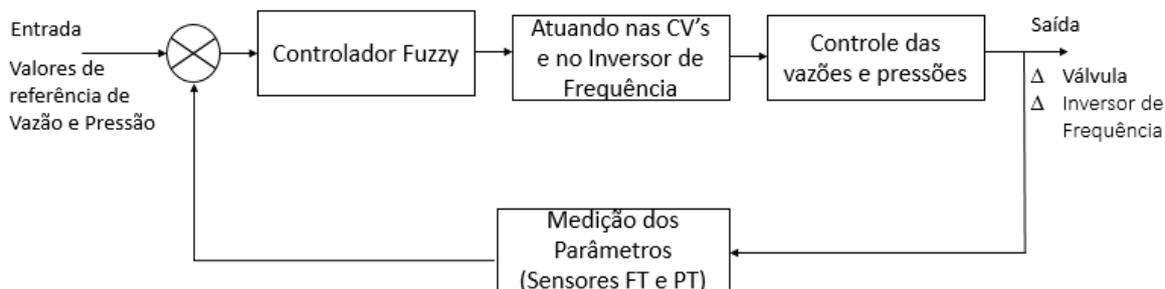
RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Os procedimentos metodológicos descritos no capítulo 4 permitem entender o funcionamento da rede e identificar os pontos de melhorias e de falha em sua execução. Ao se optar por utilizar um controlador criado a partir da lógica Fuzzy, é preciso que se entenda toda a operação do sistema, simulando os diversos cenários com as variáveis de campo, delegando ao controlador as atribuições de um operador.

O controle será aplicado em quatro atuadores: no inversor de frequência que aciona o CMB, na VRP, que é representada na planta como CV-1, localizada a montante da ZB e nas válvulas de controle em cada uma das duas saídas, com o objetivo de regular as vazões. Importante salientar que o uso de válvulas redutoras de pressão é útil não apenas para regular a pressão a jusante do ponto que se deseja controlar, como também para permitir o descolamento da curva característica do sistema para seu ponto de máxima eficiência. A Figura 5.1 apresenta um diagrama do controlador desenvolvido.

Figura 5.1– Diagrama de blocos do controlador



5.2 DIMENSIONAMENTO DOS CENÁRIOS DE IRRIGAÇÃO

Para a determinação do calendário de irrigação, bem como da lâmina bruta a ser aplicada no solo, utilizou-se o software CROPWAT (FAO). Ao inserir no programa os dados relativos ao tipo de solo, cultura e características climáticas da região a ser irrigada, obteve-se o calendário de irrigação. O calendário fornecido indicou os dias para se realizar a rega, bem como a lâmina bruta que deve ser aplicada, levando-se em consideração a evapotranspiração e as condições de solo e clima. A Tabela 5.1 apresenta o calendário de irrigação para o feijão e a batata.

Tabela 5.1 – Calendário de irrigação da batata e do feijão

BATATA		FEIJÃO	
Lbruta (mm)	Data	Lbruta (mm)	Data
51,50	31/08/2019	40,10	26/08/2019
52,80	11/09/2019	41,30	01/09/2019
51,70	20/09/2019	46,80	10/09/2019
54,40	29/09/2019	43,10	19/09/2019
53,40	06/10/2019	45,50	26/09/2019
51,20	12/10/2019	40,20	01/10/2019
49,70	18/10/2019	45,30	08/10/2019
49,00	24/10/2019	46,40	14/10/2019
48,70	30/10/2019	53,30	21/10/2019

Para a determinação dos valores de referência da vazão e pressão nas ZB e ZA, utilizou-se os procedimentos metodológicos ilustrados em Gomes (2013) para um sistema de irrigação do tipo gotejamento. O levantamento da lâmina bruta foi realizado pelo CROPWAT. Com estes dados, utilizou-se a maior e a menor lâmina bruta de cada cultura para os cálculos das vazões e pressões de referência (ver Anexo A).

Segundo o calendário de irrigação, a maior necessidade de lâmina bruta da batata foi de 54,40 mm e sua menor lâmina foi de 48,70 mm. Para o feijão, a maior lâmina registrada foi 53,30 mm e a menor foi de 40,10 mm. Com o intuito de validar o controlador, foram elaborados dois cenários de simulação, e para cada cenário, foram determinados diferentes set points de referência para os sensores, para a situação de máxima e mínima lâmina bruta, respectivamente. O objetivo foi verificar a resposta do controlador para diferentes cenários de operação, além de propor um sistema comparativo capaz de fornecer diferentes lâminas

de água, de acordo com a necessidade de desenvolvimento da cultura. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros que caracterizam cada cenário proposto.

Tabela 5.2 - Vazões e pressões para as entradas das parcelas nas duas zonas da rede.

Parâmetros	Cenário - I				Cenário - II			
	C-IA (máx demanda)		C-IB (mín demanda)		C-IIA (máx demanda)		C-IIB (máx demanda)	
	ZB	ZA	ZB	ZB	ZA	ZA	ZB	ZA
Pressão (mca)	11,0	16,00	12,00	12,00	15,00	15,00	12,00	17,00
Vazão (m ³ /h)	9,0	4,00	7,00	7,00	3,00	3,00	7,00	5,00
Lâmina bruta (mm)	54,40	53,30	54,40	54,40	40,10	40,10	54,40	53,30
Área de cultivo (m x m)	120 x 100	70 x 65	140 x 100	140 x 100	90 x 68	90 x 68	140 x 100	90 x 68

De acordo com os dados da Tabela 5.2, no Cenário I, a ZB foi destinada a irrigação da batata cultivada em uma área de 120 m x 100 m, enquanto a ZA foi destinada a irrigação do feijão em uma área de 70 m x 65 m. O Cenário IA foi projetado para fornecer à cultura a maior lâmina bruta registrada pelo calendário da Tabela 5.1. Para a menor lâmina bruta registrada no calendário, o Cenário IB apresenta as vazões e pressões que devem operar na rede em cada zona.

Utilizando a mesma rede hidráulica, porém agora destinada a maiores áreas de cultivo, o procedimento realizado para criação do Cenário I foi replicado, permitindo que a rede operasse com diferentes parâmetros hidráulicos.

5.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DA BANCADA SADA

A Figura 5.2 mostra as curvas de rendimento para a faixa de variação de frequência de 30Hz a 60 Hz, com o sistema operando com a ZA fechada. Acompanhada do gráfico que representa a variação da potência elétrica com a demanda do sistema (ver Figura 5.3).

Para as frequências de 30Hz e 35Hz, os maiores rendimentos registrados foram de 42% e 44%, respectivamente. Ao analisar o gráfico da Figura 5.2, observa-se que apenas tais curvas, de menores frequências, apresentaram maiores rendimentos para as menores vazões. De 40 Hz a 60 Hz, há pouca variação no rendimento, em torno de 45%, para um intervalo de vazão de 9 m³/h a 12,6 m³/s, o que viabiliza o uso do inversor em situação de topografia favorável, com o uso de inversor de frequência associado ao CMB.

Figura 5.2– Curvas de rendimento do CMB para a ZB

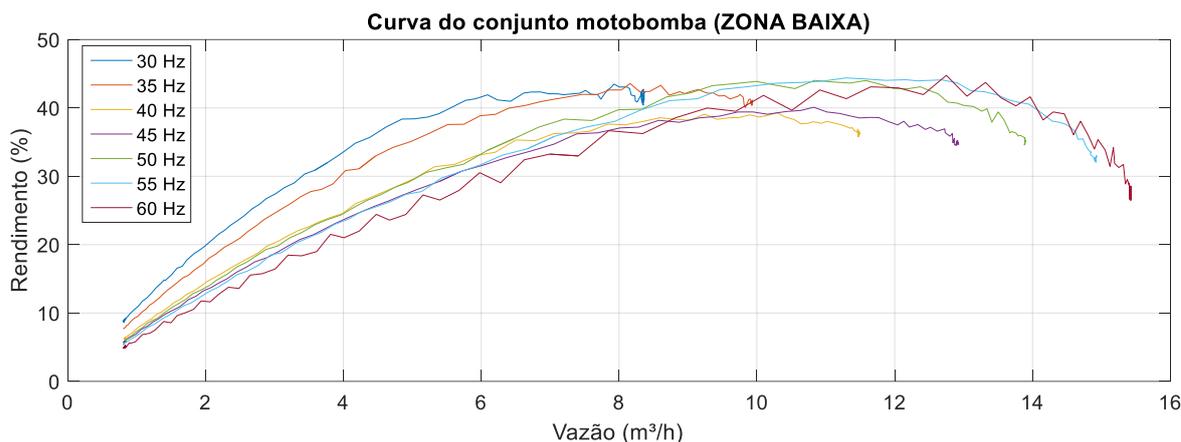
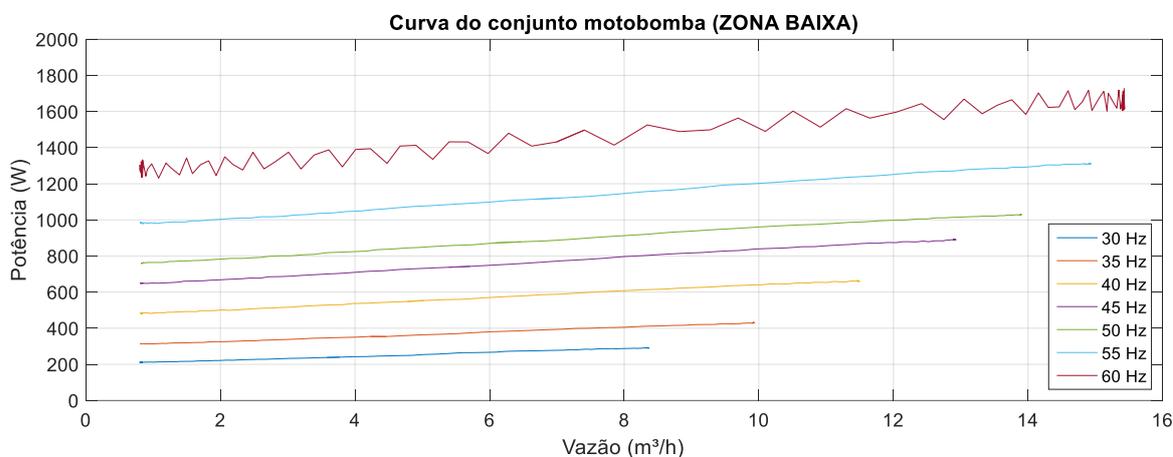


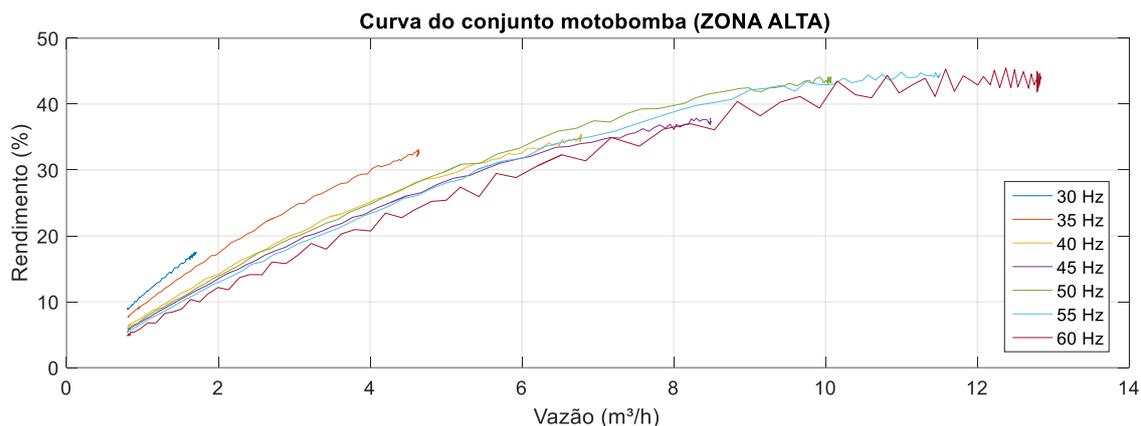
Figura 5.3 – Variação da potência elétrica - ZB



As medições para levantamento da potência elétrica foram realizadas de forma online, com o sistema operando em diferentes faixas de frequência de rotação do CMB. Conforme observa-se na Figura 5.3, para maiores vazões, a potência elétrica tende a aumentar seu valor, visto que o sistema passa a requisitar uma maior energia do sistema de impulsão. Além disso, conforme esperado, para maiores frequências há um consumo energético mais elevado, evidenciando a importância em se buscar metodologias operacionais mais eficientes.

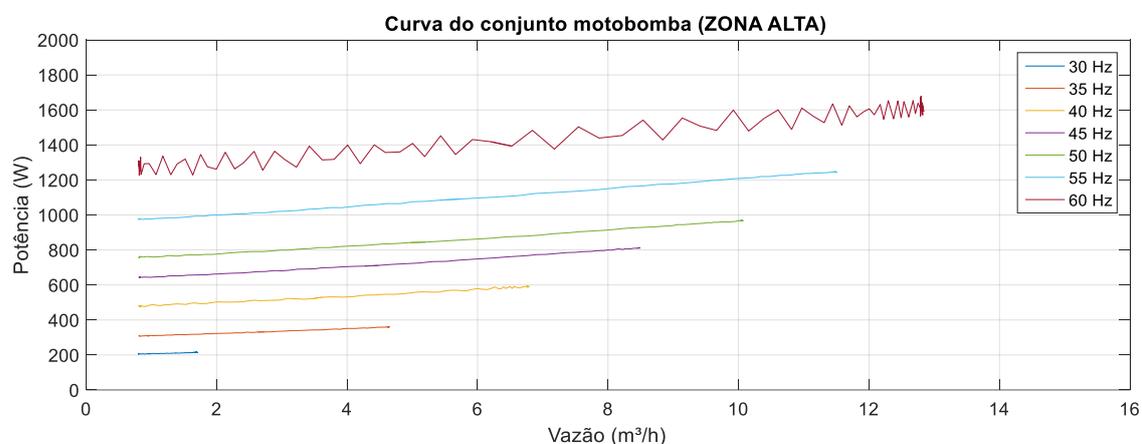
A Figura 5.4 apresenta as curvas de rendimento para o sistema operando apenas com a ZA aberta, bem como a variação das demandas com a potência elétrica (ver Figura 5.5).

Figura 5.4 – Curvas de rendimento do CMB para a ZA



Ao analisar o gráfico da Figura 5.4 observa-se que a ZA requer maiores pressões, por ter que vencer um maior desnível geométrico imposto a sua topografia. Isso faz com que, para menores frequências, as vazões registradas sejam mais baixas. No entanto, as curvas de rendimento para frequências de 30 Hz e 35 Hz apontam maiores distanciamentos das demais, o que também as configuram como frequências de maior rendimento para menores vazões. Para as duas menores frequências, o sistema não consegue atingir maiores vazões, não ultrapassando 5,4 m³/h. Entre 40 Hz a 60 Hz, as curvas estão próximas umas das outras, o que sugere uma irrelevante variação no rendimento do sistema para variações mais significativas de frequência.

Figura 5.5 – Variação da potência elétrica – ZA



O comportamento energético do sistema operando apenas com a ZA em funcionamento (ver Figura 5.4) é semelhante a operação da rede descrita na Figura 5.2. Com o sistema obedecendo as mesmas potências elétricas para as mesmas faixas de vazão.

5.4 ANÁLISE HIDRÁULICA DA BANCADA SADA

O estudo do comportamento das vazões e pressões foram divididos em três análises. A Análise 1 foi realizada com as duas zonas abertas; a Análise 2 foi feita a partir do fechamento da ZB; e por fim, a Análise 3 foi feita com o fechamento da ZA.

Análise 1 – Todas as saídas abertas com o CMB variando de 30 a 60 Hz (ver Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Variação das vazões e pressões para todas as saídas abertas

Frequência (Hz)	ZONA BAIXA		ZONA ALTA	
	PT_3 (mca)	FT_1 (m³/h)	PT_5 (mca)	FT_2 (m³/h)
30	5,00	5,04	7,00	1,08
35	6,80	5,76	8,50	1,80
40	8,50	6,48	9,50	2,70
45	10,00	7,20	12,30	3,24
50	12,40	7,92	13,80	3,96
55	14,00	8,64	15,00	4,32
60	16,80	9,36	18,60	4,68

A Análise 1 foi feita a partir do fechamento das válvulas CV-2 e CV-3 a 30°, simulando uma redução na vazão do sistema. Observou-se que a partir do aumento da frequência, as pressões registradas na ZA são maiores quando comparadas a ZB, no entanto é na ZB onde se observam as maiores vazões.

Análise 2 – ZB fechada com o CMB variando de 30 Hz a 60 Hz, conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Variação das vazões e pressões para ZA

Frequência (Hz)	ZONA BAIXA		ZONA ALTA	
	PT_3 (mca)	FT_1 (m³/h)	PT_5 (mca)	FT_2 (m³/h)
30	7,60	0	8,30	3,7
35	8,53	0	8,69	4,93
40	10,18	0	10,06	6,59
45	12,06	0	11,58	8,17
50	14,07	0	13,21	9,54
55	15,88	0	14,72	10,04
60	18,55	0	16,92	12,10

A segunda análise foi feita a partir do fechamento da ZB, e deixando a CV-3 totalmente aberta. Com o CMB abastecendo apenas a ZA, as pressões e vazões registradas são bem maiores do que aquelas registradas na Análise 1.

Análise 3 – ZA fechada com o CMB variando de 30 Hz a 60 Hz, conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Variação das vazões e pressões para ZB

Frequência (Hz)	ZONA BAIXA		ZONA ALTA	
	PT_3 (mca)	FT_1 (m ³ /h)	PT_5 (mca)	FT_2 (m ³ /h)
30	4,30	9,50	3,97	0
35	4,80	10,19	4,72	0
40	5,80	11,45	5,63	0
45	6,60	12,75	6,66	0
50	7,10	13,82	7,55	0
55	7,90	13,97	7,88	0
60	8,10	15,12	8,76	0

Por fim, a partir da última análise proposta, tem-se um panorama geral de funcionamento da rede, bem como suas vazões e pressões para diferentes cenários de operação.

5.5 DETERMINAÇÃO DOS ENSAIOS

Optou-se pela aplicação do controlador em quatro diferentes cenários, com um sistema descentralizado, onde as regras são aplicadas no controle da vazão e da pressão, separadamente, para cada zona de pressão. No sistema descentralizado, o controlador desenvolvido foi do tipo MIMO, ou seja, múltiplas entradas (erro da pressão e derivada do erro) e múltiplas saídas (ângulo da VRP, I.F.), para o controle da pressão na ZB. Para o controle da vazão na ZB, bem como da pressão e vazão na ZA, o controlador desenvolvido foi do tipo MISO, ou seja, múltiplas entradas (erro pressão/vazão e derivada do erro) e uma saída (delta do I.F. para pressão e ângulo das CV-2 e CV-3).

Para cada uma das quatro simulações propostas, foram testados diferentes set points para cada variável de controle. Para as duas zonas de pressão, foram estabelecidos os valores de referência da vazão e pressão, para a maior e para a menor lâmina bruta do calendário de irrigação. Os set points foram calculados a partir da metodologia descrita no Apêndice A. A Tabela 5.6 traz uma descrição resumida de cada cenário definido.

Tabela 5.6– Simulações de operação da rede

Teste	Operação	Descrição
I	Cenário - IA	ZB e ZA foram projetadas para irrigar o solo em seu período de maior demanda, ou seja, $L_{bruta} = 54,40$ e $53,30$, respectivamente.
II	Cenário - IB	ZB e ZA foram projetadas para irrigar o solo em seu período de menor demanda, ou seja, $L_{bruta} = 48,70$ e $40,10$, respectivamente.
III	Cenário - IIA	ZB e ZA foram projetadas para irrigar o solo em seu período de maior demanda, ou seja, $L_{bruta} = 54,40$ e $53,30$, respectivamente.
IV	Cenário - IIB	ZB e ZA foram projetadas para irrigar o solo em seu período de menor demanda, ou seja, $L_{bruta} = 48,70$ e $40,10$, respectivamente.

Com a escolha da lâmina bruta, e seguindo os procedimentos de dimensionamento descritos no Apêndice A, chegou-se aos valores de referência para a vazão e pressão em cada zona (ver Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Vazões e Pressões para as entradas das parcelas nas duas zonas da rede.

Parâmetros	Cenário-I				Cenário-II			
	C-IA		C-IB		C-IIA		C-IIB	
	ZB	ZA	ZB	ZA	ZB	ZA	ZB	ZA
Pressão (mca)	11,00	16,00	7,00	10,50	12,00	17,00	10,00	15,00
Vazão (m ³ /h)	9,00	4,00	8,00	4,00	7,00	5,00	5,00	3,00

5.6 CONTROLADOR APLICADO AO SISTEMA DESCENTRALIZADO – CENÁRIO - I

Diferentemente de outros sistemas hidráulicos, o sistema de irrigação não apresenta variação de demanda, após o início do momento de irrigação. No entanto, o solo apresenta diferentes necessidade de lâmina bruta no decorrer do desenvolvimento da cultura. Dessa forma, o uso de um controlador capaz de se adaptar as variadas demandas do sistema solo/planta, utilizando uma única rede hidráulica e um sistema de impulsão permite ao produtor maior flexibilidade, quando comparado aos sistemas atuais.

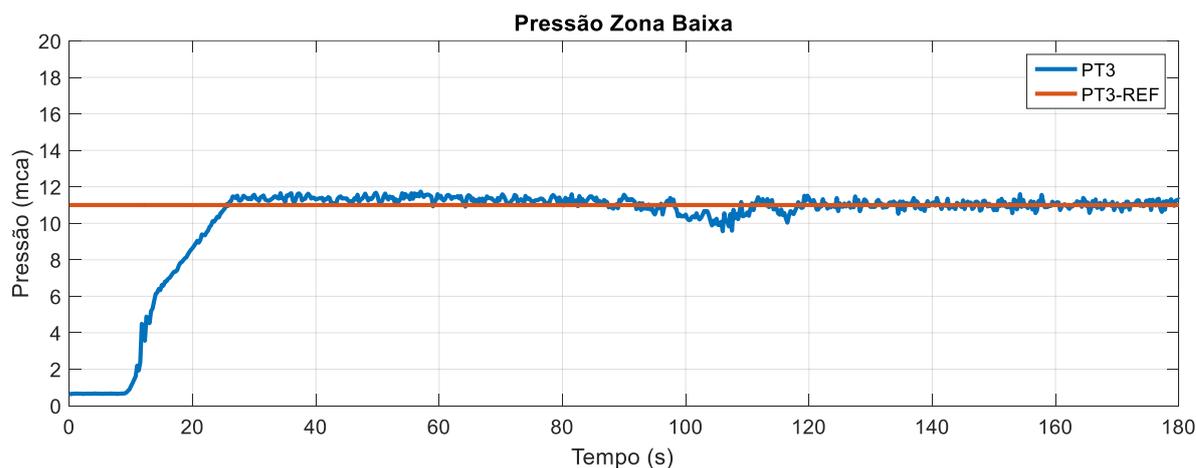
A variação das vazões e pressões na entrada da rede, para cada faixa de vazão e pressão, permite ao sistema encontrar configurações de frequência do CMB e angulação das CV's mais eficientes, levando a uma economia de água e energia. A seguir serão apresentados os resultados para os Cenários - IA e IB.

5.6.1 Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IA

O primeiro cenário proposto foi dimensionado utilizando a maior lâmina bruta fornecida pelo calendário de irrigação do CROPWAT. O controlador deve levar a pressão a sua referência de 11 mca, e a vazão a sua referência de 9 m³/h, na ZB. Para a ZA, o controlador deve atuar para que a pressão no PT-5 seja de 16 mca e a vazão em FT-2 seja de 4 m³/h. Com a atuação do controlador, espera-se que os valores de referência sejam atingidos com o sistema operando com uma frequência inferior ao valor nominal do CMB. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam a atuação do controlador no controle da pressão e da vazão, respectivamente, na ZB.

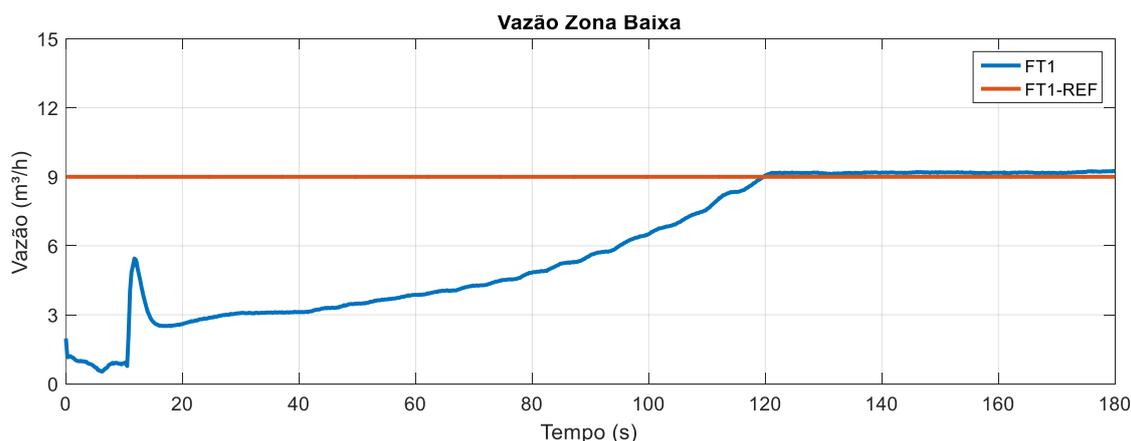
De acordo com o gráfico representado na Figura 5.6, o sinal de resposta apresenta uma zona morta de aproximadamente 10 segundos, além de caracterizar o comportamento de um sistema de primeira ordem. Apesar não apresentar overshoot significativo, o sinal de resposta apresenta uma instabilidade entre 100 e 120 segundos.

Figura 5.6 - Controle da pressão ZB (Cenário - IA)



Com relação ao sinal do FT-1 (ver Figura 5.7), a zona morta registrada foi de 10 a 12 segundos, levando a vazão ao seu valor de referência após 120 segundos. De acordo com o estudo das vazões e pressões do SADA, a variação da angulação da CV-1, para levar FT-1 ao seu valor de referência, interfere no sinal da pressão, sendo um dos motivos para o retorno da estabilidade após o assentamento de FT-1.

Figura 5.7 - Controle da vazão ZB (Cenário IA)

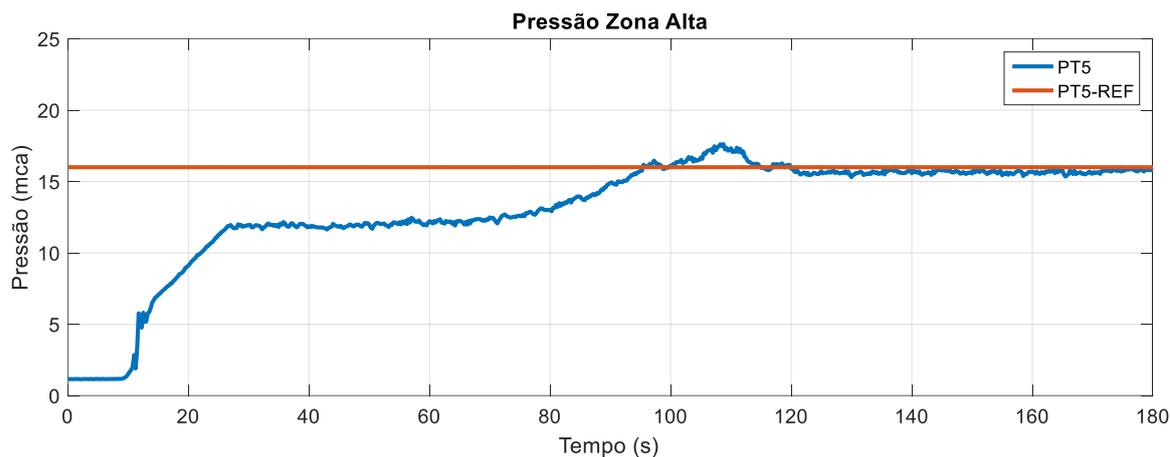


Após a análise comportamental do sistema, verificou-se que para as vazões de entrada das parcelas, as válvulas CV-2 e CV-3 deveriam iniciar sua operação na rede a 60°, levando o ajuste gradual da angulação, de forma a permitir o controle das vazões nas duas zonas.

Em redes hidráulicas, o controle da pressão ou o controle da vazão, realizados de forma individual é bastante comum. No entanto, o sistema proposto opera controlando de forma simultânea quatro variáveis hidráulicas, cujos atuadores interferem na resposta de cada uma delas. Por exemplo, ao se aumentar a frequência do inversor, há um aumento das pressões e vazões. Para a redução da pressão na ZB, altera-se a angulação da VRP, a montante de PT-3. O fechamento da válvula interfere nas vazões das duas zonas, diminuindo a vazão da ZB e aumentando a vazão na ZA. Para o controle das vazões, é necessário que os atuadores ajam nas válvulas de controle CV-2 e CV-3, que ao serem parcialmente fechadas, modificam o padrão de pressões na rede. Essa dinâmica precisa ser entendida pelo controlador *fuzzy*, que deve encontrar os valores ideais para o I.F. e para o ângulo das válvulas. As respostas de PT-5 e FT-2 estão representadas nas Figuras 5.8 e 5.9.

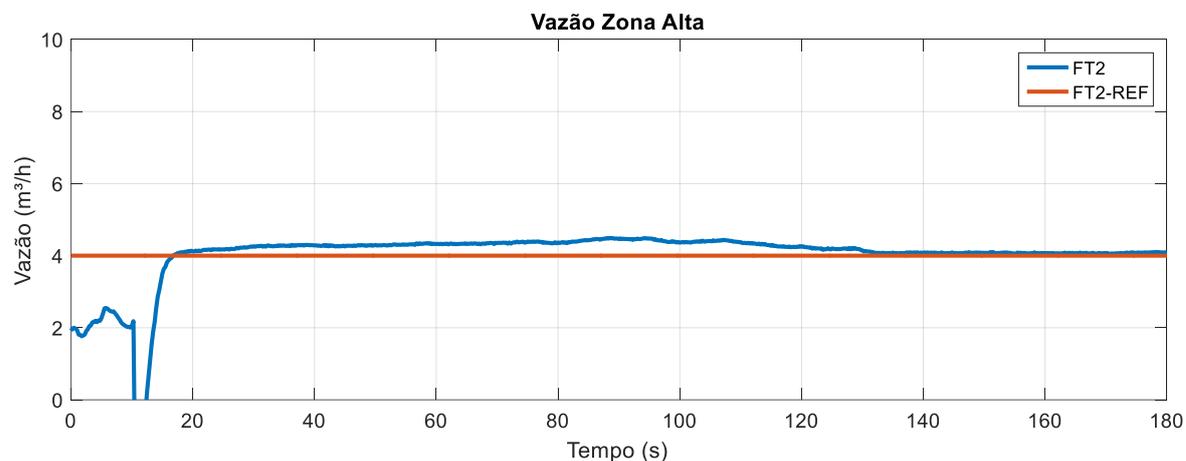
Na Figura 5.8, a resposta de PT-5 apresenta uma zona morta de 10 a 12 segundos, e um pequeno overshoot, mudando a resposta para um sistema de segunda ordem. Para uma análise mais crítica do comportamento da pressão na ZA, após ativação do controlador, faz-se necessário o entendimento de PT-3 na ZB. A instabilidade representada em PT-3 (ver Figura 5.6), ocorre entre 100 e 120 segundos, período este que leva PT-5 ao overshoot, até que o controlador leve os atuadores aos seus valores ideais, controlando assim a pressão.

Figura 5.8 - Controle da pressão ZA (Cenário - IA)



Finalizando as respostas das variáveis, a Figura 5.9 representa o sinal de FT-2. Em menos de 20 segundos, o controlador leva o sensor ao seu valor de referência, no entanto, devido a influência dos demais atuadores, FT-2 só atinge sua resposta após 2 minutos.

Figura 5.9 - Controle da vazão ZA (Cenário IA)

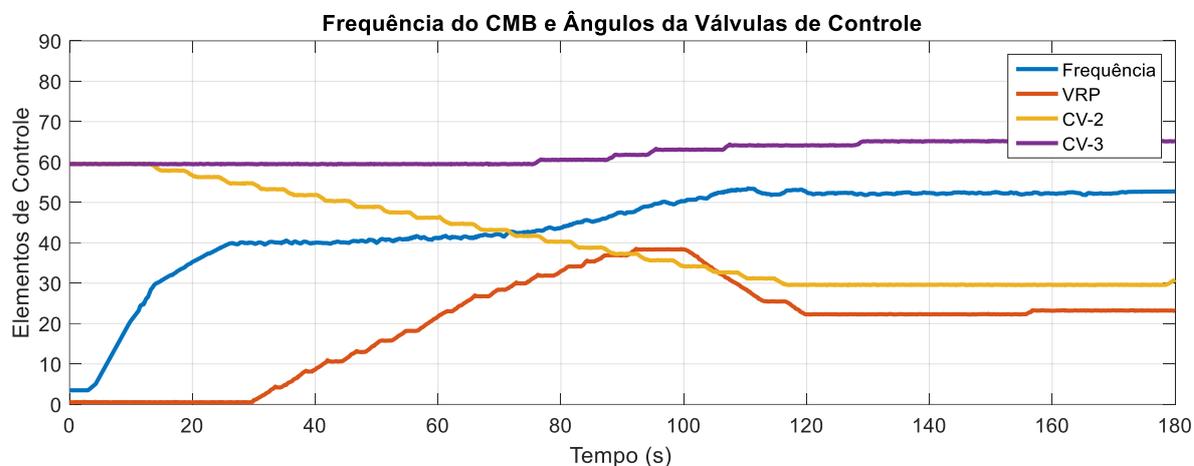


Os atuadores responsáveis pelas modificações de condições de operação do sistema foram as válvulas de controle (VRP/CV-1, CV-2 e CV-3) e inversor de frequência. O comportamento destas variáveis está representado na Figura 5.10.

Logo quando acionado, o controle atuou no sistema para levar os sinais das pressões e vazões aos seus valores de referência. Na ZB, a pressão chegou ao seu valor de referência com um sobressinal de 5,96%, em menos de 30 segundos de atuação do controlador. Enquanto a vazão foi controlada após 2 minutos, com um sobressinal inferior a 1%. Na ZA,

houve um registro de sobressinal (inferior a 2 mca) em PT-3, assim como para a vazão, no entanto, o valor registrado foi inferior a 1 m³/h.

Figura 5.10 – Elementos de controle cenário - IA



Com relação aos atuadores, o inversor controlou as pressões nas duas zonas com uma frequência de 52,31 Hz. As válvulas CV-2 e CV-3 iniciaram a operação do sistema a 60° e controlaram as duas vazões em 30° e 65°, respectivamente. A Tabela 5.8 apresenta os valores após o estabelecimento do controlador com as variáveis de entrada e as de saída.

Tabela 5.8 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário - IA

Parâmetros da Planta	Zona Baixa		Zona Alta	
	Valor do Sistema	Valor de Referência	Valor do Sistema	Valor de Referência
Pressão (mca)	11,08	11,00	15,90	16
Vazão (m ³ /h)	9,18	9,00	4,05	4,00
VRP (°)	22,67°			
CV-2 (°)	29,60			
CV-3 (°)	65°			
CMB (Hz)	52,31			

Sabendo que os sistemas de bombeamento das redes de irrigação, em sua maioria, operam com valores nominais da frequência, ou seja, 60 Hz, as reduções representam uma significativa melhora no setor energético do sistema de irrigação. No Cenário I, houve uma redução de 12,82%, controlando as pressões e vazões nas duas parcelas de irrigação. Os quatro parâmetros de controle analisados, tempo de subida, sobressinal, tempo de estabelecimento e erro de regime estão dispostos na Tabela 5.9. O tempo de subida é calculado levando-se em consideração um erro em regime estacionário de até 2%.

Tabela 5.9 - Parâmetros de controle – Cenário - IA

Parâmetros	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro de Regime (ess)
PT-3 (mca)	13,00 s	5,96%	25,50 s	0,73%
FT-1 (m ³ /h)	102,00 s	0,87%	119,5 s	1,96%
PT-5 (mca)	78,50 s	10,8%	114,75 s	0,63%
FT-2 (m ³ /h)	15,25 s	10,86%	17 s	1,23%

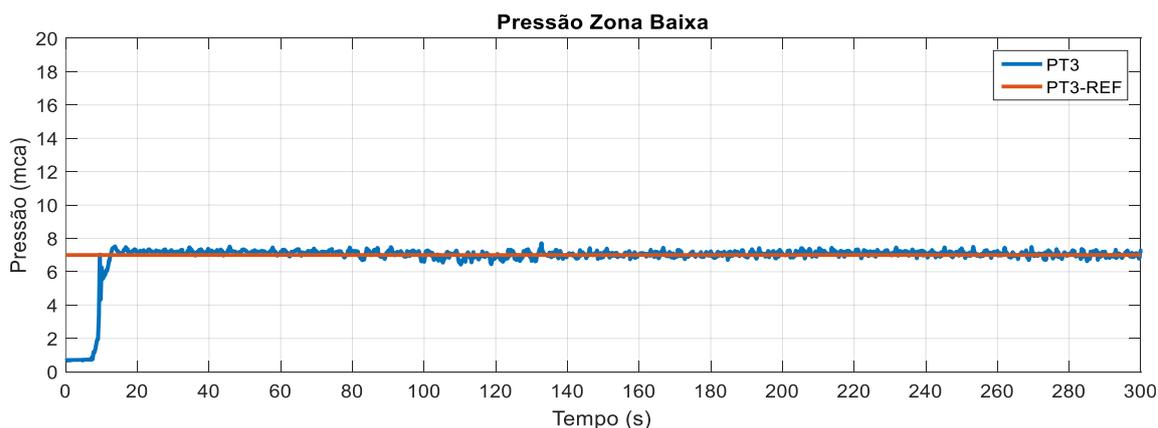
Os tempos de subida registrados pelas vazões são significativamente maiores quando comparados aos tempos de subida das pressões. Esse atraso é decorrente do tempo de resposta das CV's, responsáveis pelo controle das vazões. As CV's levam um segundo para cada variação de angulação, enquanto o I.F. varia 1 Hz a cada 0,0167s. No entanto, mesmo apresentando um tempo de subida e estabelecimento superior a 1 min, o controlador atuou de forma eficiente. Ou seja, controlou as vazões e pressões com o CMB operando a frequência inferior a 60 Hz.

5.6.2 Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IB

O Cenário - IB foi dimensionado utilizando a menor lâmina bruta fornecida pelo calendário de irrigação do CROPWAT. A alteração da lâmina bruta permitiu a variação dos valores de referência da rede, ou seja, o controlador atuou no mesmo sistema de irrigação, mas levando as pressões e vazões aos seus novos patamares de projeto. Com isso, espera-se que o produtor tenha uma maior flexibilidade de produção, lhe permitindo alterar as condições de cultivo e operar com diferentes cenários de irrigação, para uma mesma cultura.

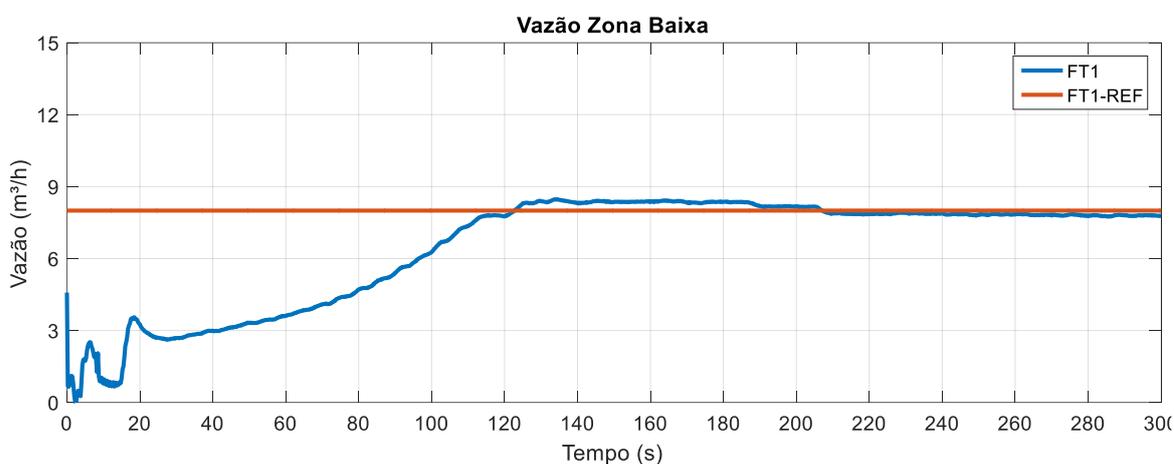
No Cenário -IB, a ZB deve operar com uma pressão de 7 mca e uma vazão de 8 m³/h. E a ZA deve operar com uma vazão de 4 m³/h e uma pressão de 10,5 mca (ver Figura 5.11).

Figura 5.11 - Controle da pressão ZB (Cenário – IB)



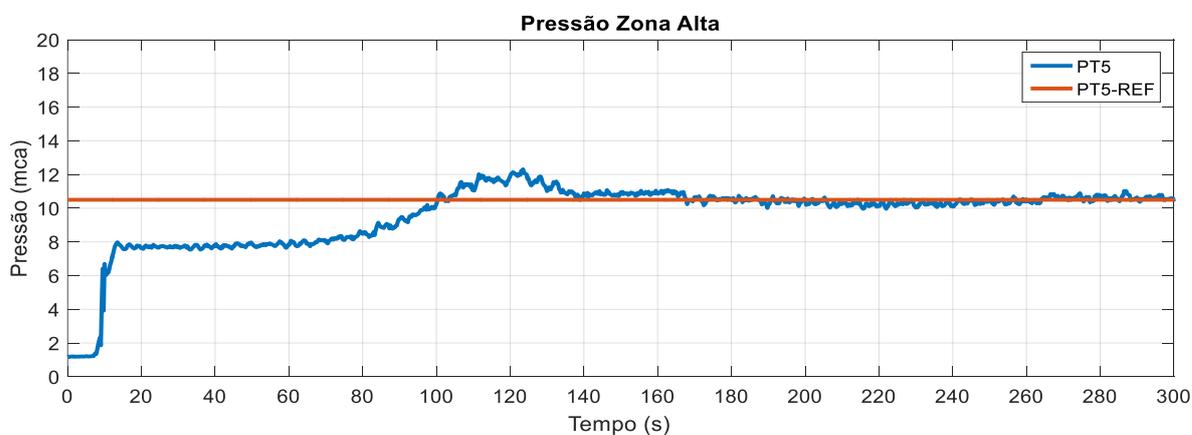
Ao analisar a resposta da variável vazão, representada na Figura 5.12, verifica-se, novamente o comportamento de um controle atuando em um sistema de primeira ordem, sem apresentar overshoot. Com uma zona morta de aproximadamente 1 minuto e 20 segundos, e uma resposta com uma constante de tempo de 18 segundos.

Figura 5.12 – Controle da vazão ZB (Cenário – IB)



No Cenário - IB, o controlador apresentou um tempo maior de estabelecimento, bem como um sobressinal para vazão bem maior do que aquele registrado no Cenário - IA. No entanto, após cerca de 2 minutos e 20 segundos da atuação do controlador no sistema, a vazão atingiu seu valor de referência.

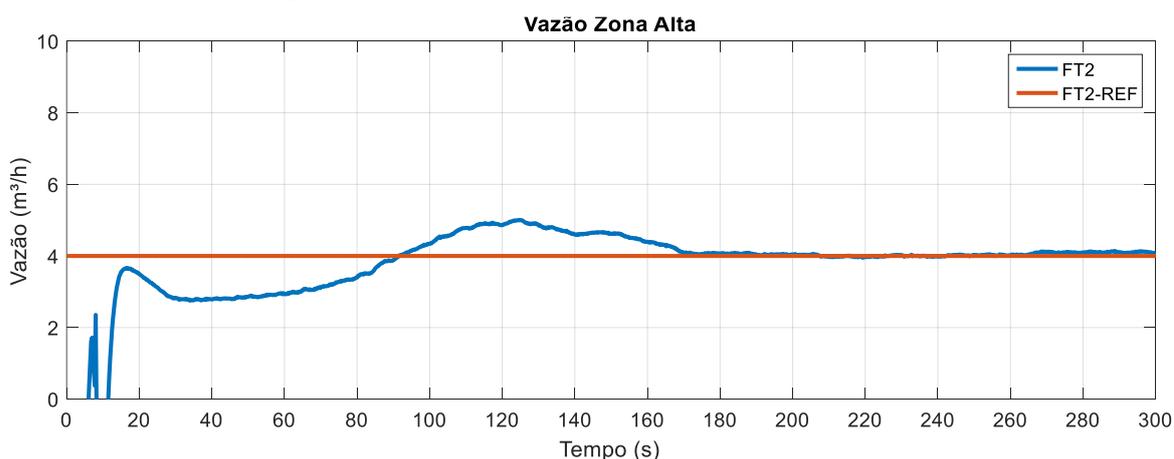
Figura 5.13 – Controle da pressão ZA (Cenário – IB)



A resposta das variáveis FT-2 e PT-5 configuraram o comportamento de um sistema de segunda ordem. Conforme Figura 5.13, a pressão apresenta uma zona morta de 8 segundos e uma resposta no tempo de aproximadamente 12 segundos.

A Figura 5.14 representa a resposta de FT-2 após atuação do controlador. Em 1 minuto e 10 segundos, o sensor passa pelo valor de referência, mas devido a atuação da CV-3 em ajustar a angulação para que FT-2 atinja o set point desejado, o sinal só atinge seu regime estacionário cerca de 2 minutos e 50 segundos após acionamento do controlador.

Figura 5.14 – Controle da vazão ZA (Cenário - IB)

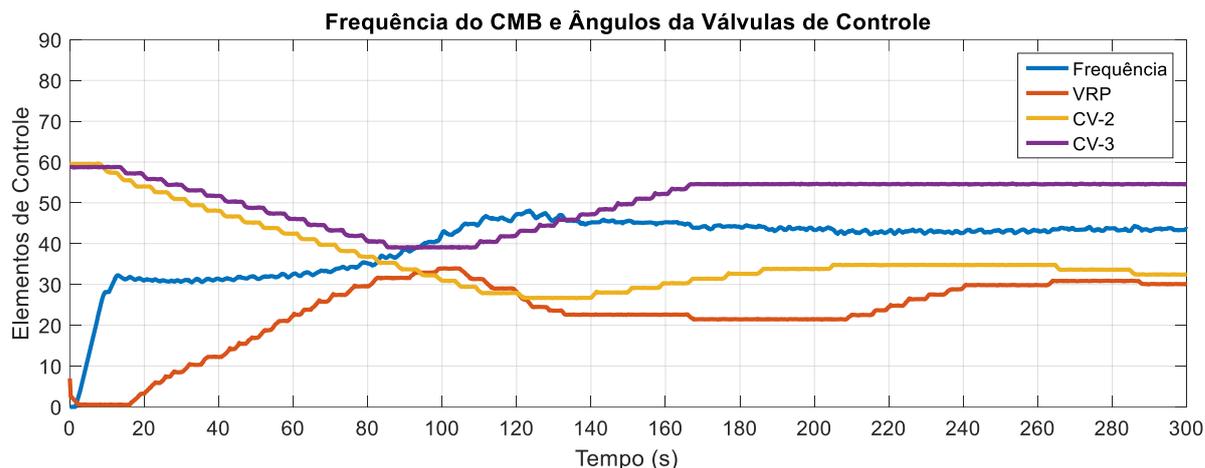


O controlador desenvolvido permite o ajuste simultâneo das quatro variáveis de controle. Esta operação simultânea em uma rede hidráulica eleva a complexidade de comportamento do sistema. Em redes hidráulicas, o controle da pressão ou o da vazão, realizados de forma individual é bastante comum. O que não se encontra, devido a variação correlacionada da vazão com a pressão, é o controle concomitante das duas variáveis. No entanto, as respostas apresentadas pelos sensores asseguram a eficiência do controlador elaborado em levar as pressões e vazões aos seus valores de referência.

Os atuadores responsáveis pelas modificações de condições de operação do sistema foram as válvulas de controle (VRP, CV-2 e CV-3) e inversor de frequência. O comportamento destas variáveis está representado na Figura 5.15.

De acordo com a Figura 5.15, os atuadores atingem seu regime estacionário entre 160 e 180 segundos. O inversor de frequência associado a CV-3 são os dois primeiros atuadores a entrar em regime estacionário. O que reflete diretamente no controle da ZB, visto que estes dois elementos atuam diretamente no controle da vazão e pressão desta zona.

Figura 5.15 – Elementos de controle (Cenário – IB)



Para levar as vazões das duas zonas aos seus valores de referência, percebe-se uma abertura gradual da CV-2, o que gera uma redução da pressão na ZB (PT-3), enquanto a CV-3 atua no fechamento da válvula, aumentando a pressão no PT-5. A variação da angulação das CV-2 e CV-3 interferem nas pressões das duas zonas. Dessa forma, o controlador desenvolvido precisou atuar de forma inteligente, de modo a suprir o aumento ou a redução de pressão, que ocorreu nas duas zonas. Para isso, variou a angulação das válvulas, e alterou o valor da frequência do CMB, bem como do ângulo da VRP.

A Tabela 5.10 apresenta os valores após o estabelecimento do controlador com as variáveis de entrada e as de saída.

Tabela 5.10 – Parâmetros da planta com atuação do controlador

Parâmetros da Planta	Zona Baixa		Zona Alta	
	Valor do Sistema	Valor de Referência	Valor do Sistema	Valor de Referência
Pressão (mca)	7,07	7,00	10,43	10,50
Vazão (m ³ /h)	8,06	8,00	4,05	4,00
VRP (°)	27,00			
CV-2 (°)	34,00			
CV-3 (°)	54,00			
CMB (Hz)	43,38			

Segundo os dados da Tabela 5.10, o sistema atuando com o controlador apresentou uma redução de 27,70% em sua frequência, ao compará-la com seu valor nominal de 60 Hz. Além disso, ao se ajustar a lâmina bruta com o calendário de irrigação, a redução calculada foi de 17,07%, com relação ao Cenário – IA. A Tabela 5.11 apresenta os parâmetros de controle associados ao funcionamento do SADA para o Cenário - IB.

Tabela 5.11 - Parâmetros de controle Cenário - IB

Parâmetros	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro de Regime (ess)
PT-3 (mca)	11,75 s	9,19 %	12,50 s	0,99%
FT-1 (m ³ /h)	100,00 s	5,15 %	114,00 s	0,75%
PT-5 (mca)	90,50 s	18,02 %	178,00 s	0,67%
FT-2 (m ³ /h)	15,50 s	23,46%	170,00 s	1,25%

Os maiores valores registrados, dentre os parâmetros apresentados na Tabela 5.11, foram do tempo de subida e do tempo de estabelecimento. Isso se deve ao fato de o controle descentralizado atuar individualmente em cada um dos quatro sensores. Todos os parâmetros controlados apresentam erro de regime inferior a 2%, o que comprova a eficiência do controlador em levar todas as variáveis aos seus valores de referência. A dinâmica da rede, ao controlar a vazão, altera os valores de pressão, o que requer do controlador sensibilidade para manter seus valores, mesmo com alterações externas as suas variáveis.

5.6.3 Análise Hidráulica e Energética do Sistema – Cenário I

Através do controle das vazões, é possível controlar a lâmina de água necessária para o desenvolvimento da cultura em todos os seus estágios de desenvolvimento, enviando para as parcelas apenas a quantidade de água requisitada pelo sistema dimensionado. Com o objetivo de analisar a redução de água, a partir do controle da vazão, calculou-se o consumo de água do Cenário – IA (máxima lâmina bruta) e do Cenário – IB (mínima lâmina bruta). A Tabela 5.12 apresenta uma simulação de demanda de água os dos dois cenários.

Tabela 5.12 – Consumo de água nos dois cenários de irrigação

Variável	Cenário - IA		Cenário - IB	
Frequência de irrigação (dia)	1		1	
Tempo diário disponível de bombeamento (hora)	12		12	
Tempo de aplicação (hora)	3		3	
Vazão na entrada da parcela (m ³ /h)	9,18	4,05	8,06	4,05
Consumo de água para um período de 7 dias (m ³)	192,78	85,05	169,26	85,05
Consumo de água por sistema (m ³ /semana)	277,83		254,31	

De acordo com as informações extraídas da Tabela 5.12, para um período de aplicação diária de água no solo de 3 horas, durante 7 dias, o Cenário – IA tem uma demanda semanal de 277,83 m³, enquanto o Cenário - IB apresenta uma demanda de 254,31 m³. Ao

se adaptar as vazões da rede à demanda do sistema de irrigação, a rede proposta apresentou uma redução de 8,47% no consumo semanal de água.

O uso de técnicas operacionais que levam a um menor consumo energético por parte dos sistemas de impulsão em redes pressurizadas de irrigação geram economia e aumentam a eficiência no setor de agricultura irrigada. Para ilustrar a redução energética registrada com o uso do controlador na rede, foram levantadas as potências elétricas requisitadas pelo sistema de impulsão. Foram analisadas as potências elétricas da rede operando com o CMB a 60 Hz sem o uso do controlador Fuzzy, e as frequências alcançadas no Cenário – IA e Cenário – IB, operando com o controlador. Assim, foi possível calcular o custo com bombeamento para os dois cenários controlados, e realizar um comparativo da rede operando sem o controlador, com sua frequência nominal.

Para o cálculo do custo semanal de bombeamento, foram levados em consideração alguns parâmetros de projeto, conforme indicados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Parâmetros de projeto para o cálculo do custo anual com bombeamento

Parâmetros de Projeto	Sem controlador	Com Controlador (Cenário - IA)	Com Controlador (Cenário - IB)
Número de horas de bombeamento (h/dia)	12	12	12
Frequência (Hz)	60	52,31	43,38
Potência Elétrica (kW)	1,67	1,42	0,96
Tarifa (\$/kWh)*	0,27	0,27	0,27
Número de horas de bombeamento/semana	84	84	84
Custo com bombeamento (\$)	37,88	32,16	21,77

*Tarifa adotada segundo regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEL)

Ao analisar os dados extraídos da Tabela 5.13, verifica-se que o Cenário – IA registrou uma redução de 15,10% no custo semanal com bombeamento. Enquanto a redução alcançada pelo Cenário – IB foi de 42,53%. Ambas calculadas com relação ao sistema operando sem o uso do controlador. A redução da potência elétrica calculada entre os sistemas operando com a máxima e a mínima lâmina bruta, de acordo com o calendário de irrigação, foi de 32,39%.

5.7 CONTROLADOR APLICADO AO SISTEMA DESCENTRALIZADO – CENÁRIO II

Devido a limitação física do espaço laboratorial na elaboração de um protótipo real de um sistema de irrigação, optou-se pela validação do controlador na partir do uso do SADA em dois diferentes cenários de irrigação. Com isso, foi possível atestar se o controlador proposto é capaz de adaptar-se a diferentes cenários, com as mesmas culturas, e as mesmas lâminas brutas, destinadas a diferentes áreas de cultivo.

Adotando-se diferentes áreas, conseqüentemente foi necessário realizar modificações nos parâmetros de dimensionamento. O que levou a diferentes valores de operação na entrada de cada parcela. O sistema apresentou as respostas ilustradas nos tópicos seguintes, dadas pelos Cenários - IIA e IIB.

5.7.1 Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário IIA

O Cenário – II possui diferentes áreas de cultivo, e foi dividido em duas simulações: Cenário -IIA, com a rede operando com as vazões e pressões necessárias para levar ao solo a máxima lâmina bruta. E o Cenário – IIB, projetado para levar ao solo a mínima lâmina bruta, estabelecida pelo calendário de irrigação.

A partir na análise do comportamento de PT-3, representado na Figura 5.21, verifica-se que o sinal de resposta apresenta maior ruído, quando comparado ao sinal de reposta da vazão na ZB. Além disso, o controle registrou uma zona morta de 12 segundos, além de um leve sobressinal, antes de atingir seu valor de referência e permanecer em seu regime estacionário. O ruído detectado pelo sensor pode ser oriundo do próprio transdutor de pressão, ou mesmo de um ajuste mais fino das funções de pertinência do controlador.

Figura 5.16 - Controle da pressão ZB (Cenário – IIA)

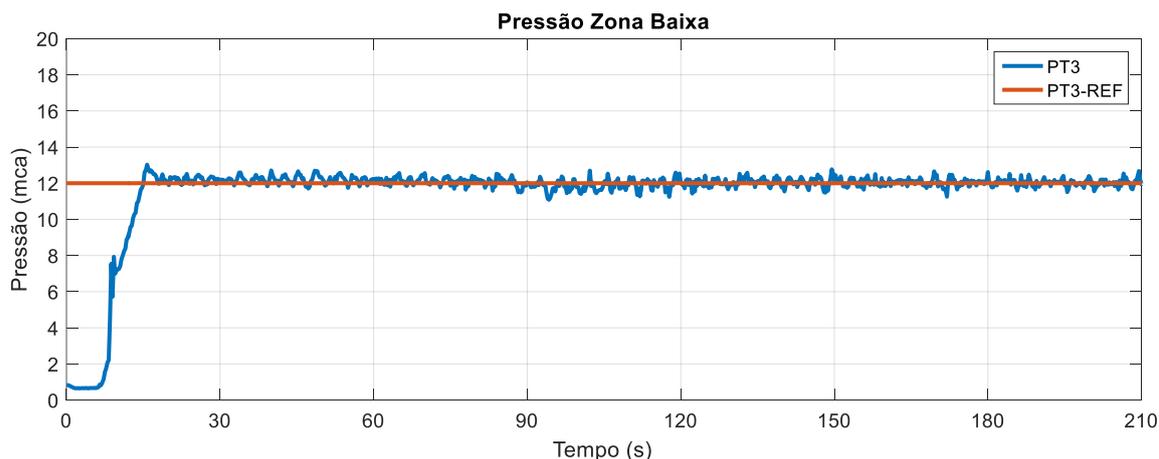
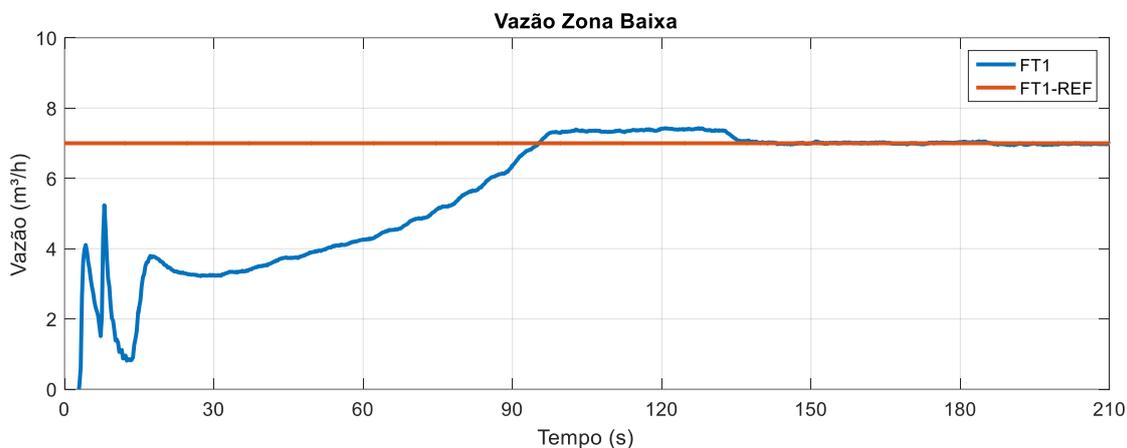


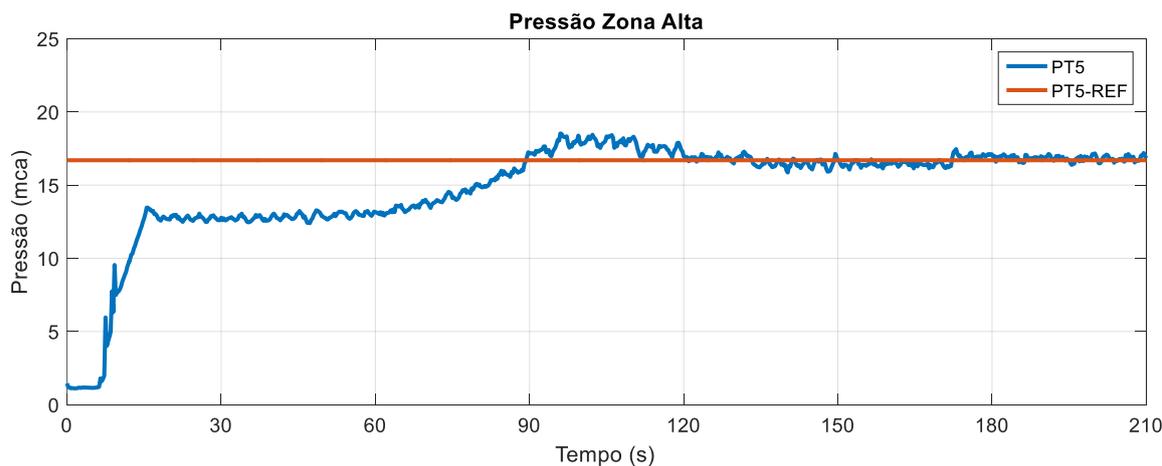
Figura 5.17 - Controle da vazão ZB (Cenário – IIA)



A Figura 5.22 apresenta o sinal de resposta de FT-1, a partir da aplicação do controlador no atuador da vazão na ZB. O sistema apresenta uma resposta característica de um sistema de segunda ordem, além de variações mais bruscas nos vinte segundos iniciais de atuação do controlador.

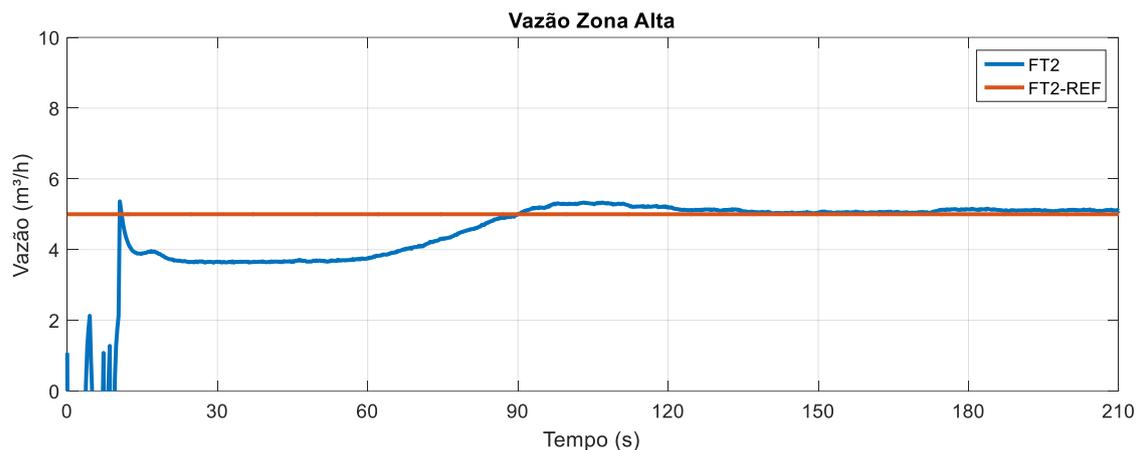
Para o controle dos sinais de referência da ZA, a Figura 5.23 traz o comportamento de PT-5 após atuação do controlador. O sistema também apresenta ruído na resposta, além de um sobressinal 1 minuto e 30 segundos após acionamento do controlador, e uma zona morta de 8 segundos.

Figura 5.18 - Controle da pressão ZA (Cenário – IIA)



Finalmente apresenta-se o comportamento de FT-2, que também apresenta variações bruscas de resposta no início da operação do sistema. O sinal ultrapassa a referência em cerca de 13 segundos, retorna para os valores requisitado pelo controle, e após um leve sobresinal, atinge seu regime estacionário, dentro do valor de referência estabelecido.

Figura 5.19 - Controle da vazão ZA (Cenário – IIA)

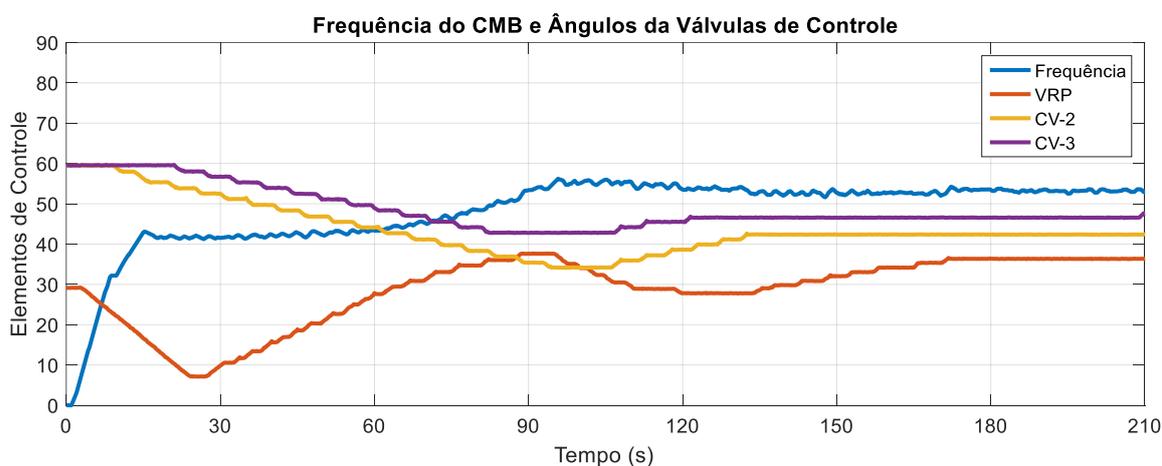


As alterações bruscas dos sinais de resposta das vazões nos dois sensores (FT-1 e FT-2) não invalidam as respostas obtidas, visto que tais alterações só ocorrem nos 20 segundos iniciais de operação da rede, quando submetida ao controlador. Essa alteração na resposta pode ser atribuída ao estado de conservação do equipamento, dado seu tempo e uso; ou mesmo a calibração do próprio sensor, levando em consideração o tempo entre as calibrações realizadas no início da realização dos testes de bancada e a aplicação final do controlador nos atuadores. No entanto, levando em consideração os dados obtidos no estudo e

caracterização da bancada, registrados no Capítulo 3, após os 20 segundos iniciais de instabilidade, as respostas obtidas pelos sensores são coerentes e não invalidam os resultados.

Por se tratar de um cenário com maior exigência de água para as parcelas simuladas, devido ao aumento da lâmina bruta (54,4 mm e 53,3 mm), a frequência de operação do Cenário – IIA é 16% maior do que a frequência de operação registrada no Cenário – IIA. No entanto, ainda apresenta um valor 11,67% menor quando comparado ao sistema operando sem o controlador, ou seja, com uma frequência nominal de 60 Hz no CMB. A Figura 5.25 traz a atuação do inversor de frequência, bem como das três válvulas de controle.

Figura 5.20 - Elementos de controle – Cenário IIB



A Tabela 5.16 traz um resumo das variáveis hidráulicas, do Cenário - IIA. As pressões foram controladas com uma frequência de 53Hz e com a VRP a 36,33°. Enquanto o controle das vazões em FT-1 e FT-2 levaram as CV-2 e CV-3 a uma angulação de 42,36° e 46,58°, respectivamente.

Tabela 5.14 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário IIA

Parâmetros da Planta	Zona Baixa		Zona Alta	
	Valor do Sistema	Valor de Referência	Valor do Sistema	Valor de Referência
Pressão (mca)	12,06	12,00	16,94	17,00
Vazão (m³/h)	7,12	7,00	5,10	5,00
VRP (°)	36,33°			
CV-2 (°)	42,36°			
CV-3 (°)	46,58°			
CMB (Hz)	53,00			

Paralela a análise dos parâmetros hidráulicos, também foram realizadas as análises dos parâmetros de controle (ver Tabela 5.17), com o intuito de avaliar o controlador elaborado e aplicado. O tempo de subida dos quatro sensores foi inferior a 1 minuto e 40 segundos, assim como seu tempo de estabelecimento. Valores estes levantados para sinais com erro de regime menor ou igual a 2%. O PT-5 foi o sensor que apresentou maior sobressinal no Cenário – IIA, superior aos demais, porém inferior a 10%.

Tabela 5.15 - Parâmetros de controle – Cenário IIA

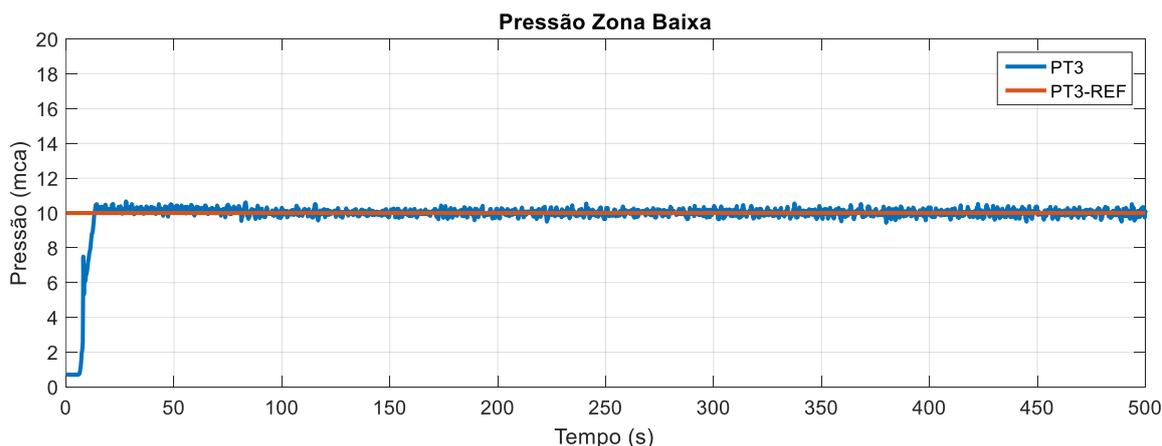
Parâmetros	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro de Regime (ess)
PT-3 (mca)	6,50 s	8,01 %	12,00 s	0,50 %
FT-1 (m ³ /h)	1 min e 29,5s s	4,35 %	1 min e 35,50 s	1,69 %
PT-5 (mca)	1 min e 15,15 s	9,41 %	1 min e 30 s	0,35%
FT-2 (m ³ /h)	1 min e 10 s	4,56%	1 min e 30 s	2,00%

5.7.2 Controlador Aplicado ao Sistema Descentralizado – Cenário - IIB

Finalizando a apresentação dos resultados a partir dos ensaios propostos para validação do controlador apresentado, as figuras abaixo trazem o comportamento do sistema para o Cenário – IIB. Nesse cenário, os novos valores de referência adotados foram estimados a partir do dimensionamento da rede hidráulica, para as novas áreas de cultivo, e utilizando como parâmetro de solo, a mínima lâmina bruta de irrigação, requerida pelas culturas.

A partir da modificação dos valores de referência do controlador, o sistema deve operar com uma vazão de 5 m³/h e uma pressão de 10 mca, na ZB.

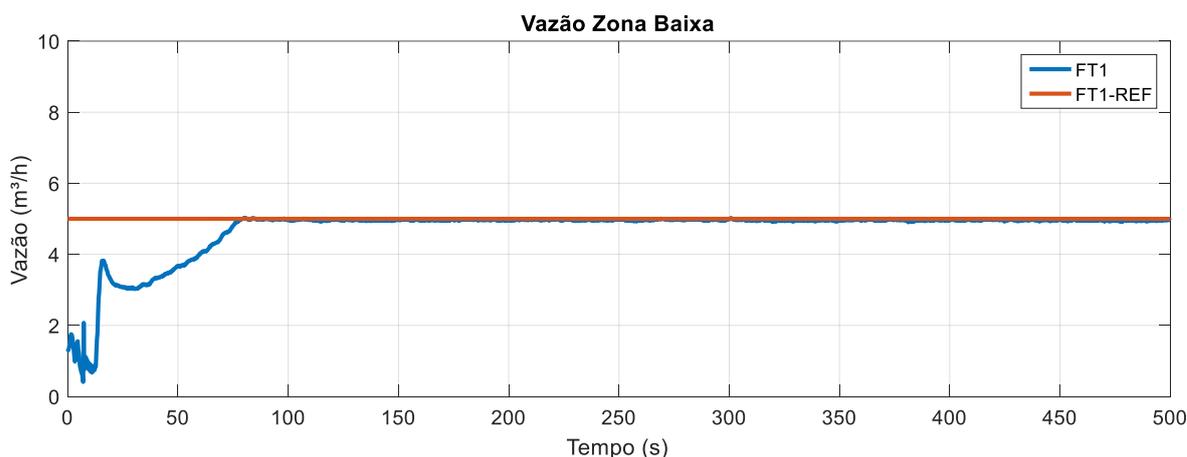
Figura 5.21 – Controle da pressão ZA (Cenário – IIB)



A Figura 5.16 apresenta o sinal de resposta de PT-3. A zona morta registrada no início da operação é de 9 segundos, com uma resposta sem overshoot, caracterizando um sistema de primeira ordem.

O sinal de FT-1 não apresenta sobressinal, caracterizando-se como um sistema de primeira ordem e uma zona morta inferior a 20 segundos com uma resposta no tempo de 18 segundos, conforme observa-se na Figura 5.17. Diferente das pressões, que apresentam uma resposta mais ágil no tempo, as vazões levam mais tempos para serem controladas, visto a demora da própria válvula em alterar seu ângulo de abertura.

Figura 5.22 – Controle da vazão ZA (Cenário – IIB)



No Cenário – IIB, a partir da modificação dos parâmetros de dimensionamento, o sistema deve operar com uma pressão de 15 mca e uma vazão de 6 m³/h (ver Figuras 5.18 e 5.19). O Cenário - IIB opera na situação de mínima lâmina bruta, por isso apresenta valores de referência inferiores ao Cenário - IIA.

A Figura 5.18 apresenta o comportamento de PT-3 sob atuação do controlador. O sinal de resposta não apresenta sobressinal significativo, o que caracteriza um sistema de primeira ordem. O controlador leva cerca de 4 minutos para ajustar o sinal da resposta ao seu valor de referência.

Figura 5.23 - Controle da pressão ZB (Cenário – IIB)

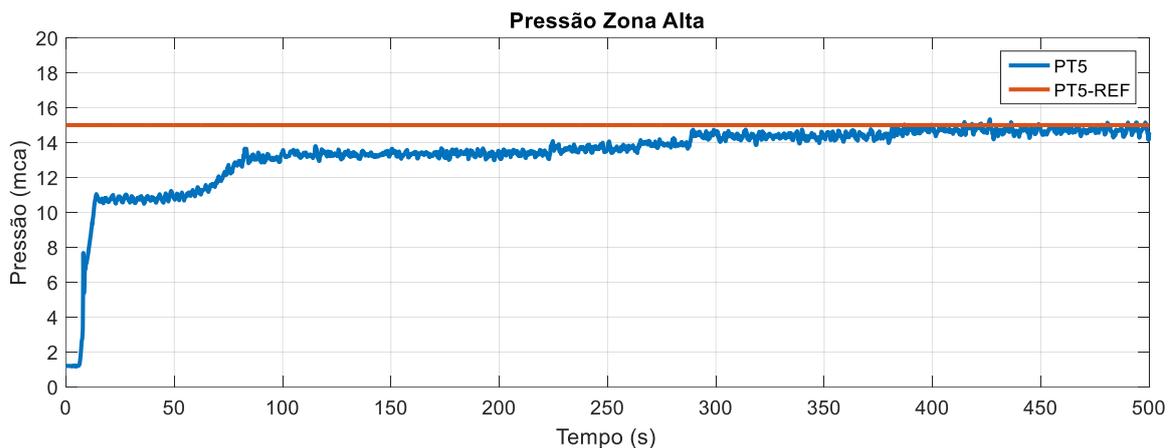
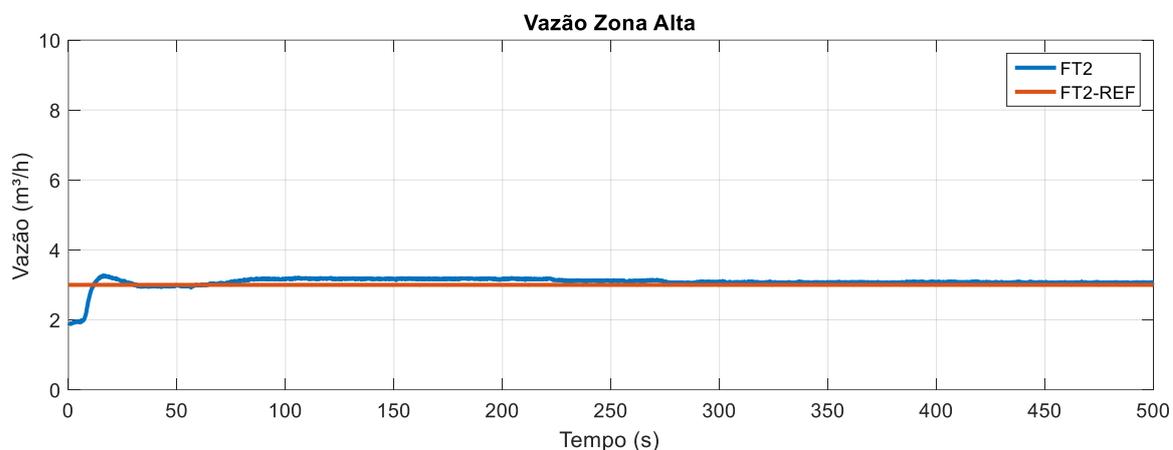


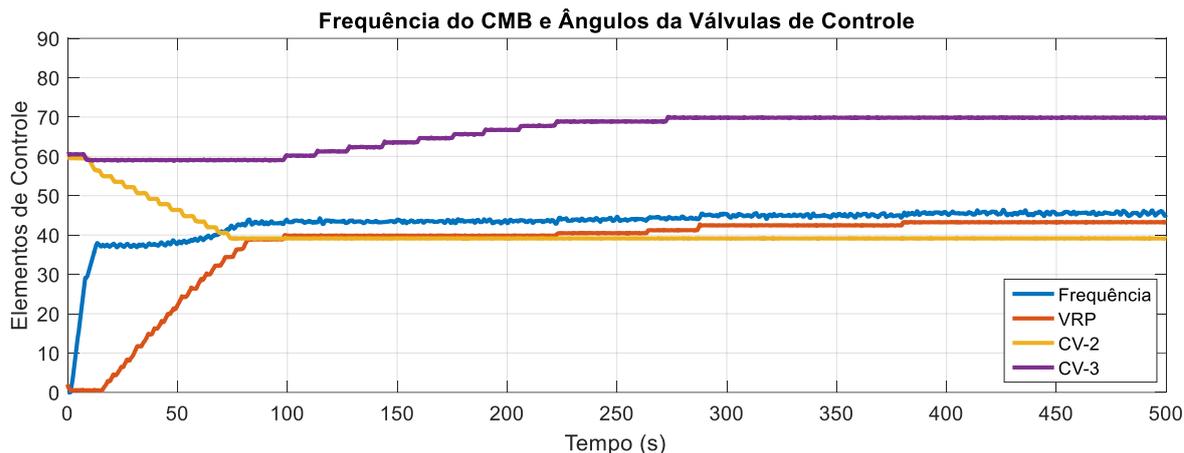
Figura 5.24 - Controle da vazão ZA (Cenário – IIB)



Ao contrário do PT-3, FT-1 rapidamente atingiu seu valor de referência. O sobressinal apresentado logo no início da operação do sistema, sinaliza uma resposta de segunda ordem, com uma zona morta inferior a 10 segundos.

Para os novos valores de referência da vazão e pressão nas duas zonas setorizadas, houve um novo ajuste das válvulas bem como da frequência do CMB. Os atuadores encontraram os valores ótimos para as válvulas e I.F., conforme Figura 5.20.

Figura 5.25 – Elementos de controle – Cenário IIB



A apresentação gráfica dos resultados, após a atuação do controlador no sistema, mostra sua eficácia ao levar o sinal da vazão e pressão, em cada uma das duas zonas, aos seus valores de referência. Por se tratar de um controle elaborado por meio da Lógica Fuzzy, ao se adotar novos valores de referência, foi necessário mudar apenas o range de atuação das regras. No entanto, as regras utilizadas foram as mesmas, o que permite adaptação de valores e controladores para diferentes sistemas. A Tabela 5.14 apresenta os valores dos atuadores após o sistema atingir seu regime estacionário

Tabela 5.16 – Parâmetros da planta com atuação do controlador – Cenário - IIB

Parâmetros da Planta	Zona Baixa		Zona Alta	
	Valor do Sistema	Valor de Referência	Valor do Sistema	Valor de Referência
Pressão (mca)	10,04	10,00	14,72	15,00
Vazão (m³/h)	4,96	5,00	3,07	3,00
VRP (°)	42,00°			
CV-2 (°)	39,14°			
CV-3 (°)	69,83°			
CMB (Hz)	44,53			

No Cenário – IIB, o sistema foi controlado a uma frequência de 44,53 Hz, e as válvulas CV-2 e CV-3, que atuaram no controle das vazões, apresentaram ângulo de abertura de 39,14° e 69,83°, respectivamente.

Dentre os parâmetros de controle analisados, os atuadores apresentaram boas respostas (ver Tabela 5.15). Para o tempo de subida, apenas FT-1 levou mais do que 1 minuto para atingir 90% do seu valor em regime. Nenhum dos quatro sensores apresentaram sobressinal superior a 6,50%, o que demonstra a estabilidade do sistema. Para o tempo de

estabelecimento, FT-1 e PT-5 foram os sinais que apresentaram um maior tempo para atingir seu regime estacionário. O que não gera prejuízos à rede hidráulica, visto que este tempo é consideravelmente pequeno, quando se trata de uma rede que opera em períodos de 3 a 12 horas. No Cenário - IIB, todos os sensores obtiveram um erro de regime menor ou igual a 2%.

Tabela 5.17 - Parâmetros de controle – Cenário - IIB

Parâmetros	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro de Regime (ess)
PT-3 (mca)	6,00 s	6,27 %	13,25 s	0,40%
FT-1 (m ³ /h)	1 min e 33,5 s	4,21 %	4 min e 20,75 s	2,00%
PT-5 (mca)	9 75 s	5,16 %	4 min e 34,50 s	1,87 %
FT-2 (m ³ /h)	58,75 s	1,41 %	1 min e 19 s	0,80%

5.7.3 Análise Hidráulica e Energética do Sistema – Cenário II

A validade da metodologia proposta, aplicando um controlador com base na Lógica Fuzzy para controle das vazões e pressões em um sistema coletivo pressurizado de irrigação é atestada quando o sistema proposto apresenta redução no consumo de água e energia. A Tabela 5.18 apresenta os dados hídricos do sistema para o Cenário II.

Tabela 5.18 – Consumo de água nos dois cenários de irrigação

Variável	Cenário - IIA		Cenário - IIB	
Frequência de irrigação (dia)	1		1	
Tempo diário disponível de bombeamento (hora)	12		12	
Tempo de aplicação (hora)	3		3	
Vazão na entrada da parcela (m ³ /h)	4,96	3,07	7,12	5,13
Consumo de água para um período de 7 dias (m ³)	104,16	64,47	149,52	107,73
Consumo de água por sistema (m ³ /semana)	168,63		257,25	

Ao aplicar a lâmina bruta necessária a rede, fazendo sua redução perante os cenários proposto, o sistema apresentou uma economia de 34,45% no consumo semanal de água. Ou seja, houve uma redução semanal de 88,62 m³ no consumo de água.

A redução do consumo de água para a metodologia proposta nessa tese tem como base a adaptação dos valores de referência da rede ao calendário de irrigação. Com isso, é possível alterar os parâmetros iniciais de vazão e pressão do sistema, sem alterar os equipamentos ou a rede. A associação dessa metodologia com os sensores de umidade podem otimizar ainda mais a redução no consumo de água.

Para a análise energética, após o controlador entrar em regime permanente, observou-se a frequência do CMB, e através do uso do analisador de energia, fez-se o levantamento da potência elétrica do sistema. O Cenário - IIA registrou um consumo de energia elétrica 52,10% inferior ao sistema operando sem controlador, e uma redução de 36% quando comparado ao Cenário - IIB. Já o Cenário - IIB apresentou uma redução de 25,15% no consumo de energia elétrica, quando comparado ao sistema operando sem controlador. Essa redução reflete diretamente do custo anual que a rede de irrigação gasta com bombeamento. A redução da potência elétrica calculada entre os sistemas operando com a máxima e a mínima lâmina bruta, de acordo com o calendário de irrigação, foi de 36%.

Tabela 5.19 – Parâmetros de projeto para o cálculo do custo anual com bombeamento

Parâmetros de Projeto	Sem controlador	Com Controlador (Cenário - IIA)	Com Controlador (Cenário - IIB)
Número de horas de bombeamento (h/dia)	12	12	12
Frequência (Hz)	60	53,00	44,53
Potência Elétrica (kW)	1,67	1,25	0,80
Tarifa (\$/kWh)*	0,27	0,27	0,27
Número de horas de bombeamento/semana	84	84	84
Custo com bombeamento (\$)	37,88	28,35	18,15

*Tarifa adotada segundo regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEL)

Conforme os valores apresentados na Tabela 5.19, com a aplicação do controlador proposto, o sistema apresentou uma redução no consumo energético de 36%, quando se compara os cenários IIA e IIB. Ao optar-se pela não aplicação do controlador, a redução no consumo de energia da rede operando com a máxima lâmina bruta, ao comparada com a rede operando com a potência elétrica nominal foi de 25,15%.

5.8 CONCLUSÕES

Ao final deste capítulo foram analisados quatro diferentes cenários de operação da rede SADA, emulando um sistema de irrigação coletivo pressurizado, com diferentes demandas de vazão e pressão. A partir dos resultados já discutidos nas seções anteriores, pode-se concluir que os controladores propostos foram eficientes em levar os sinais de resposta aos seus valores de referência. Sob ação do controlador, o sistema foi capaz de reduzir o consumo de água e energia, ratificando a eficiência hidro-energética do sistema inicialmente proposto.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os avanços registrados nos setores de engenharia de controle e automação vem possibilitando o uso de diversas ferramentas na melhoria dos processos voltados para sistemas de irrigação. Atualmente, é vasta a aplicação de sensores que analisam o nível de umidade do solo e calculam a quantidade exata de água a ser enviada ao solo. No entanto, a automação inteligente associada às redes hidráulicas responsáveis pela alimentação do sistema não vem recebendo a mesma atenção. O objetivo deste trabalho foi apresentar um controlador com base na lógica Fuzzy para o controle dinâmico de uma rede hidráulica voltada para alimentar um sistema coletivo de irrigação pressurizada.

Com a aplicação do controlador proposto, o sistema se mostrou capaz de controlar não apenas a pressão, variável comum de ser controlada em sistemas hidráulicos, como também controlou a vazão na entrada das parcelas simuladas. Com isso, a rede hidráulica requisitou do CMB, apenas a frequência necessária para permitir que a rede operasse com seus valores de referência. Mesmo após alteração dos valores de referência, com dois cenários de operação, o sistema ainda se mostrou eficiente, controlando rapidamente as novas vazões e pressões demandadas pela rede.

No Cenário I, houve uma redução de até 27,70% na frequência do CMB, enquanto o Cenário II registrou uma redução de até 25,78% em sua frequência, ambas calculadas em relação a frequência nominal de 60 Hz. No cenário hidro-energético simulado, ao se criar dois cenários de operação com diferentes demandas hidráulicas, de acordo com a lâmina bruta solicitada pela cultura, esperava-se registrar uma redução no consumo de água e de energia, o que, de fato, ocorreu. Ao reduzir a lâmina bruta de irrigação, e assim, a vazão na entrada da rede, o sistema apresentou uma redução de 8,47% - Cenário I, e uma redução de

34,45% - Cenário II, no consumo semanal de água. Por fim, através da análise energética realizada, redução da potência elétrica calculada entre os sistemas operando com a máxima e a mínima lâmina bruta, de acordo com o calendário de irrigação, foi de 32,39% (Cenário I), e de 36% (Cenário II).

A partir da análise dos resultados apresentados, pode-se concluir que, para os atuais sistemas automatizados de irrigação, que já utilizam inversores de frequência associados aos sistemas de impulsão e válvulas de controle, a aplicação da metodologia Fuzzy no desenvolvimento de controles inteligentes apresenta-se como uma alternativa de simples implantação.

Dessa forma, com o uso do sistema proposto, é possível operar em parcelas com diferentes valores de referência em um sistema coletivo de irrigação, permitindo a operação com os exatos valores requisitados pela rede hidráulica. O que garante ao produtor maior flexibilidade de manuseio, redução no consumo de água e energia, para as diferentes fases de desenvolvimento de uma cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ANA] – Agência Nacional de Águas. **Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, 2012.

[ANA] – Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília, 2017.

[EMBRAPA] – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Circular técnica nº 001 – **Tensiômetro: dispositivo prático para controle de irrigação**. Distrito Federal, 1999.

BRASIL. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Agência Nacional das Águas (ANA), 2019.

BAHAT, M. INBAR, G. YANIV, O. SCHNEIDER, M. A **Fuzzy irrigation controller system**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 13 (2000) 137 – 145. Tel Aviv, 2000.

BAUCHSPIESS, A. Introdução aos Sistemas Inteligentes: Aplicações em Engenharia de Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

BEZERRA, S. T. M GOMES, H.P. **Automação em sistemas de irrigação**. In: Heber Pimentel Gomes Org(s), Ed(s). **Sistemas de irrigação: Eficiência energética**. João Pessoa, 2015.

BISCARO, G.A., org. **Sistemas de Irrigação Localizada**. Ed. UFGD. Dourados, 2014.

CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S.A.; GOMES, H.P. **Aplicação de técnicas de controle Fuzzy em sistemas de abastecimento**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.19, n.1, Rio de Janeiro, 2014.

FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação). (2014), **FAO at World Water Week 2014 Why water and energy matter for agriculture?** Disponível em: <http://www.fao.org/land-water/news-archive/news-detail/en/c/267274/>. Acesso 02 jun 2020.

F. TOUATI, F. AL-HITMI, M. BENHMED, K. TABISH, R. **A fuzzy logic based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar.** In.: *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013. Disponível em: www.elsevier.com/locate/compag.

FIERRO, A. C. TELLO, J. T. **Fuzzy Logic that Determines Sky Conditions as a Key Component of a Smart Irrigation System.** In.: *2019 Sixth International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)*.

GOMES, H.P. **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética.** Editora Universitária. João Pessoa, 2013.

GOMES, H.P. **Sistemas de Abastecimento de Água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias.** Editora Universitária, 2ed. João Pessoa, 2009.

GOMIDE, F.A. GUDWIN, R.R. TANSCHKEIT, R. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações,** 2017. Disponível em: <ftp://calhau.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/gudwin/publications/ifsa95.pdf>. Acesso em fevereiro, 2018.

GUTIÉRREZ, J. VILLA-MEDINA, J. F. NIETO-GARIBAY, A. PORTA-GÁNDARA, M.A. **Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. V63, N01. 2014.

HASAN, M. F. HAQUE, M. M. KHAN, M. R. RUHI, R. I. CHARKABARTY, A. **Implementation of Fuzzy Logic in Autonomous Irrigation System for Efficient Use of Water.** In.: *2018 Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2018, and *2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR)*, 2018.

JÄGERMEYR, J. GERTEN, D. HEINKE, J. SCHAPHOFF, S. KUMMU, M. LUCHT, W. **Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages.** *Global simulation of irrigation*. V19, p3073–3091, 2015.

JAIN, R. KULKARNI, S. SHAIKH, A. SOOD, A. **Automatic Irrigation System For Agriculture Field Using Wireless Sensor Network (WSN).** *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. ISSN: 2395 -0056, V3, n4. India, 2016.

JUNHUI, W. YAPING, M. JIE, C. YUSHENG, W. **Fuzzy Control System of Substrate Lettuce Cultivation Based on Light-Dependent Irrigation Control Method.** 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics and Communication Engineering.

LIMA, F. M. C. SILVA, S. A. FILGUEIRA, H. J. A. GOMES, H. P. **Controle do Potencial Matricial da Água no Solo por Meio de Lógica Fuzzy.** *Irriga, Botucatu*, v. 15, n. 4, p. 431-442. 2010.

MAMDANI, E.H. **Application of Fuzzy Logic to Aproximate Reasoning Using Linguistic Synthesis.** *IEEE Transactions on Computers*. v. C-26, n. 12, 1977.

MARRO, A.A.; SOUZA, A.M.C.; CAVALCANTE, E.R.S.; BEZERRA, G.S.; NUNES, R.O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações.** Natal, 2009.

MORAES, M.J. OLIVEIRA FILHO, D. MANTOVANI, E.C. MONTEIRO, P.M.B. MENDES, A.L.C. DAMIÃO, J.H.A.C. **Automação em Sistema de Irrigação Tipo Pivô Central para Economia de Energia Elétrica.** *Eng. Agríc., Jaboticabal*. V34, n6, p. 1075-1088, 2014.

MOUSA, A.K. CROOCK, M.S. ABDULLAH, M.N. **Fuzzy based Decision Support Model for Irrigation System Management.** *International Journal of Computer Applications*. V104, n9, 2014.

NETAFIM – Manual de Irrigação por Gotejamento – Entendendo o Básico. V 001.01 - 2014

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física. Universidade de São Paulo. São Paulo, p.166. 2001.

NISE, Norman S. Engenharia de sistemas de controle. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC. 695 p. ISBN 8521613016, 2002

OCDE-FAO: Perspectivas Agrícolas 2015-2024. Disponível em: www.agri-outlook.org. Acesso em Abril, 2017.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil. 809 p. ISBN 9788576058106, 2003.

OTERO, O. L. C. GOMES, A. S. COURA, S. P. Diagnóstico de Sistemas. In: GOMES, Heber Pimentel (Organizador). **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2012. P. 252-296.

PAZ, V. P. S. FRIZZONE, J. A. BOTREL, T. A. FOLEGATTI, M. V. **Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.404-408, 2002.

PIRES, R. C. M. ARRUDA, F. B. SAKAI, E. CALHEIROS, R. O. BRUNINI, O. **Agricultura Irrigada**. *Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária*. Junho, 2008.

POOJA, P. PRANALI, D. ASMABI, S. PRIYANKA, N. **Future of the Drip Irrigation System: A Proposed Approach**. *Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology*. V4, n1, p.1055-1060. Índia, 2017.

PRIANDANA, K. WAHYU, R. A-F. **Development of Automatic Plant Irrigation System using Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture of Chili**. In.: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications (ICoSTA), 2020.

RAWAL, S. **IOT based Smart Irrigation System**. *International Journal of Computer Applications*. V159, n8. Índia, 2017.

RIGNEL, D.G.S.; CHENCI, G.P.; LUCAS, C.A. **Uma Introdução a Lógica Fuzzy**. *Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica*. Vol. 01, Nr. 01, 2011.

SALES, R.A. LOUZADA, J.M. OLIVEIRA, E.C. PINHEIRO, M.A.B. SALES, R.A. **Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus – ES**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.23;p. 2016.

SALOMÃO, J.M. **Introdução à Lógica Matemática – Lógica e Sistemas Difuso (Lógica Fuzzy)**. Curso de Engenharia Elétrica. Coordenadoria de Eletrotécnica, CEFTE-ES. Espírito Santo, 2007.

SALVINO, M. M. **Modelagem Computacional Visando a Reabilitação de Redes Hidráulicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 148. 2012.

SILVA, C. A. E SILVA, J. C. **Avaliação de Uniformidade em Sistemas de Irrigação Localizada**. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia* - ISSN 1677- 0293 Ano IV, Número 08, Dezembro de 2005.

SHAW, I.S. SIMÕES, M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2º ed. São Paulo: Editora Blucher: FAPESP. ISBN: 9788521204169. 2007.

SONI, G. SINGH, N. **Automatic Irrigation System Using Wireless Sensor Networks**. *International Journal of New Technology and Research*. ISSN: 2454-4116. V1, n2, p16-18. 2015.

UMAIR, S.M. USMAN, R. **Automation of Irrigation System Using ANN based Controller**. *International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS*. V10, N02, 2010.

ZADEH, L. A. **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes.** *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, Vol. Smc-3, No. 1, January 1973.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets and applications.** USA: John Wiley & Sons, 684p. 1987.

ZHANG, Q. WU, C-H. J. TILT, K. **Application of Fuzzy Logic in an Irrigation Control System.** IEEE: 0-7803-3 104-4. International Conference on Industrial Technology, Auburn, 1996.

ZIMMERMANN, H. J., **Fuzzy Set Theory and Its Applications**, U.S.A, Kluwer Nijhoff Publishing. 1985.

APÊNDICE A

DIMENSIONAMENTO DOS SETORES DE IRRIGAÇÃO

A.1 Introdução

Neste apêndice encontram-se as metodologias de cálculos, bem como as equações, quadros e tabelas necessários para o dimensionamento das parcelas irrigáveis utilizadas como exemplo nesta tese. A metodologia de dimensionamento adotada foi baseada no livro *Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética*, do professor da Universidade Federal da Paraíba, Heber Pimentel Gomes. Para a determinação da Lâmina Bruta, adotou-se o método de dimensionamento pelo CROPWAT.

A.2 Dimensionamento Hidráulico de um Sistema por Gotejamento

a) Lâmina bruta de irrigação (L_b)

$$L_b = N_b \times Fr \quad (A.7)$$

Onde

L_b : lâmina bruta de irrigação, em mm

N_{bm} : necessidade de irrigação bruta máxima, em mm/dia

Fr : frequência de irrigação, em dias

b) Tempo diário de aplicação da água no solo

$$t_r = \frac{t_h Fr}{N} \quad (A.8)$$

Onde

t_r : tempo diário de irrigação, em horas

t_h : tempo disponível diário de bombeamento, em horas

N: número de unidades operacionais para a parcela que será irrigada

c) Escolha do emissor

$$q = \frac{L_b A}{t_r n} \quad (\text{A.9})$$

Onde

q: vazão do gotejador, em L/h

L_b : lâmina bruta de irrigação, em mm

A: espaçamento, em m x m

t_r : tempo diário de irrigação, em horas

n: número de gotejadores por planta

Quadro A.1– Relação de gotejadores

H (mca)	Gotejadores						
	12-2	16-1	16-2	16-4	16-8	20-1,2	20-2
5	1,30	0,80	1,50	2,50	3,80	0,80	1,70
10	1,90	1,00	2,20	3,60	5,45	1,15	2,50
15	2,30	1,20	2,75	4,50	6,50	1,40	3,10
20	2,70	1,40	3,20	5,20	7,70	1,60	3,60
25	3,00	1,60	3,60	5,80	8,60	1,80	3,95
30	3,30	1,80	3,95	6,40	9,55	2,00	4,30
35	3,60	2,00	4,25	6,70	10,50	2,15	4,60

Fonte: Gomes, 2013.

Quadro B.1– Comprimento máximo da linha lateral

S (m)	Gotejadores						
	12-2	16-1	16-2	16-4	16-8	20-1,2	20-2
0,30	40	98	59	44	34	150	79
0,50	60	145	87	65	50	217	120
0,75	90	194	116	86	68	287	165
1,00	99	239	142	102	83	351	204
1,25	116	280	165	125	96	409	240
1,50	132	296	180	136	109	450	274

Fonte: Gomes, 2013.

Utilizando o quadro A.1, que relaciona a vazão do gotejador em (L/h), pressão de serviço (mca), diâmetro em (mm) e a descarga nominal do emissor, elege-se o tipo de gotejador ideal. Após a escolha do gotejador pelo quadro A.1 encontra-se o comprimento máximo da linha lateral, pelo espaçamento entre os gotejadores.

Com a vazão calcula para o gotejador, é possível obter o valor da pressão de serviço do gotejador, através das equações A.10 e A.11.

$$q = C_d h^x \quad (\text{A.10})$$

$$x = \frac{\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right)}{\log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}$$

Onde:

q: vazão do gotejador, em L/h

C_d : coeficiente calculado, adimensional

x: coeficiente calculado, adimensional

d) Vazão na entrada da linha lateral

$$Q = N \times q \quad (\text{A.11})$$

Onde

Q: vazão na entrada da linha lateral, em L/h

N: número de gotejadores na linha lateral

q: vazão de cada gotejador, em L/h

e) Pressão requerida na entrada da linha lateral

A perda de carga unitária ao longo da linha lateral será calculada pela fórmula de Darcy-Weissbach (A.12), e o coeficiente de atrito f pela fórmula de Blasius (A.13).

$$j = \frac{fv^2}{D2g} \quad (\text{A.12})$$

Onde

j: perda de carga unitária, em m/m

f: coeficiente de atrito, adimensional

v: velocidade de escoamento da água no tubo, em m/s

D: diâmetro do gotejador, em m

G: aceleração da gravidade, em m/s²

$$f = 0,316(R_e)^{-0,25} \quad (\text{A.13})$$

Onde

f: coeficiente de atrito, adimensional

Re: número de Reynolds

Logo, a pressão requerida na entrada da linha lateral será dada por:

$$H = h + 0,75h_f \pm \frac{\Delta Z}{2} \quad (\text{A.14})$$

Onde

H: altura manométrica na entrada da linha latera, em mca

h: pressão de serviço média do gotejador, em mca

h_f : perda de carga total ao longo da linha lateral devido aos gotejadores, em mca

ΔZ : diferença de cotas, em m

f) Vazão na entrada das linhas de derivação

De acordo com as características geométricas a área a ser irrigada, calcula-se a vazão na entrada das linhas de derivação.