



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação



CONTROLE *FUZZY* ESPACIALMENTE DIFERENCIADO PARA UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Rafaelle de Aguiar Correia Feliciano

Natal-RN
2012

RAFAELLE DE AGUIAR CORREIA FELICIANO

**CONTROLE *FUZZY* ESPACIALMENTE DIFERENCIADO
PARA UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Área de Concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica e Computação.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Meneghetti
Ugulino de Araújo

Natal-RN
2012

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Feliciano, Rafaelle de Aguiar Correia

Controle *fuzzy* espacialmente diferenciado para um sistema de irrigação.
/ Rafaelle de Aguiar Correia Feliciano. – Natal, RN, 2013.
120 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica e da Computação.

1. Lógica *fuzzy* – Dissertação. 2. Sistema de irrigação - Dissertação. 3. Controle *fuzzy* – Dissertação. 4. Umidade de solo – Dissertação. 5. *ZigBee* – Dissertação. 6. Nó sensor sem fio – Dissertação. I. Araújo, Fábio Meneghetti Ugulino de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 0004.312

Controle *Fuzzy* Espacialmente Diferenciado para um Sistema de Irrigação

Rafaelle de Aguiar Correia Feliciano

Dissertação de Mestrado aprovada em 20 de dezembro de 2012 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo (Orientador)

DCA/UFRN

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli

DCA/UFRN

Prof. Dr. Oscar Gabriel Filho

PRH-PB20

Aos meus alunos do Curso Técnico em Eletrônica do IFPB, que me inspiraram a buscar a qualificação acadêmica como forma de melhorar minha prática pedagógica para o ensino de Engenharia.

Agradecimentos

A Deus, por permitir que esse sonho se concretizasse.

Ao meu orientador, Professor Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo, por compartilhar seus conhecimentos técnicos, pela generosidade com seu tempo de orientação e sua amizade; agradeço imensamente por acolher minhas ideias e pelo privilégio de ter sido sua orientanda.

Aos meus amigos, companheiros de mestrado e minha família durante o estágio acadêmico na UFRN, Professores Márcio Emanuel, Marcílio Onofre Filho e Marcos Meira. A estes últimos, idealizadores do Projeto MINTER, obrigada pela dedicação para o desenvolvimento desta pós-graduação, pelo incentivo ao meu trabalho e, principalmente, pela amizade fortalecida nos momentos de convívio fraterno em Natal.

Aos amigos, Professores Márcio Emanuel, José Aniceto e Jobson Silva, e Vitor Ataíde, pelas orientações técnicas e contribuições valiosas no desenvolvimento da infraestrutura deste trabalho.

Aos colegas do IFPB, Francisco Marconi e Kennedy, pelas conversas sobre controle e irrigação; Valdith, James e Manoel Filho, pelo empréstimo de recursos laboratoriais; Seu Assis, Seu Antônio da Marcenaria e Eduardo (eletrotécnico), pelos trabalhos de apoio e montagem do experimento.

À UFCG, na pessoa do Professor Euler Macedo, pelo empréstimo dos sensores de umidade do solo e pelas conversas técnicas.

Aos companheiros minteristas, Professores José Nedício, Roberto de Castro, Emanuel Guerra, Antônio Dália, Leonardo Telino, Fábio Lima, Guilherme Régis, Jailton Moreira, Fernando Hilton, Ivo Oliveira, pela companhia nos grupos de estudo e pela convivência amigável.

Aos Professores Dr. Andrés Ortiz Salazar, Dr. José Bezerra de Menezes e Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves, respectivamente, Coordenadores Acadêmico e Operacional do Projeto MINTER e Coordenador do PPgEEC, pela condução desta pós-graduação UFRN/IFPB/CAPES.

Aos demais professores do Projeto MINTER, em especial aos Professores Dr. André Laurindo Maitelli e Dr. Anderson Cavalcanti, por contribuírem para o encaminhamento deste projeto acadêmico e pelo ensino dos conhecimentos essenciais para este trabalho.

Ao Professor Dr. Oscar Gabriel Filho, por aceitar fazer parte da banca de defesa do mestrado.

A CAPES, SETEC, UFRN e IFPB, em especial aos gestores do IFPB, o Magnífico Reitor Professor João Batista de Oliveira, a Pró-Reitora de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação, Professora Dra. Nelma Míriam e o Diretor do *Campus* João Pessoa, Professor Dr. Joabson Nogueira, pela articulação e apoio ao programa MINTER de aperfeiçoamento e pós-graduação.

Aos meus familiares, meu esposo Antonio Feliciano, meu filho Antonio Neto, meus pais Ronaldo e Marluce, minha irmã Raquel Cristina, minha irmã espiritual Mara, minhas filhas do coração Juliana, Raphaela e Natália e meus netos do coração Júlia e João, pelo carinho, pelo amparo, por compreenderem as horas dedicadas ao estudo e por vibrarem pelas minhas conquistas.

Resumo

Projetos de irrigação tradicionais não determinam localmente a disponibilidade de água no solo. Assim, podem ocorrer ciclos irregulares de irrigação: alguns insuficientes, o que provoca déficit de água; outros em demasia, o que causa falta de oxigenação nas plantas. Devido à natureza não-linear do problema e do ambiente multivariável de processos de irrigação, a lógica *fuzzy* é sugerida como substituta aos sistemas comerciais de irrigação tipo *ON-OFF* com temporização pré-definida. Outra limitação das soluções comerciais é que os processos de irrigação não atendem às diferentes necessidades hídricas dos ciclos de crescimento das culturas nem às mudanças nas variáveis climáticas. Dessa maneira, para atender necessidades agrícolas baseadas em localização, é indicado monitorar dados ambientais usando sensores sem fio, interligados a um sistema de controle inteligente. Isso é mais evidente em aplicações de agricultura de precisão. Este trabalho apresenta o desenvolvimento teórico e experimental de um sistema de controle *fuzzy* espacialmente diferenciado para um sistema de irrigação, baseado no sensoramento da umidade do solo com nós sensores sem fio. A arquitetura do sistema de controle é modular: um sistema supervisor *fuzzy* determina o *set point* de umidade do solo da região de atuação do nó sensor (de acordo com o conjunto solo-planta-clima) e outro *fuzzy*, embarcado no nó sensor, faz o controle local e atua no sistema de irrigação. O sistema de controle *fuzzy* foi simulado com a ferramenta de programação SIMULINK[®] e foi construído experimentalmente como sistema embarcado em um dispositivo móvel SunSPOT[™] operando com *ZigBee*. Modelos de controladores foram desenvolvidos e avaliados em diferentes combinações de variáveis de entrada e base de regras de inferência.

Palavras-chave: Controle *fuzzy*. Sistema de irrigação. Umidade do solo. *ZigBee*. Nó sensor sem fio.

Abstract

Traditional irrigation projects do not locally determine the water availability in the soil. Then, irregular irrigation cycles may occur: some with insufficient amount that leads to water deficit, other with excessive watering that causes lack of oxygen in plants. Due to the non-linear nature of this problem and the multivariable context of irrigation processes, fuzzy logic is suggested to replace commercial ON-OFF irrigation system with predefined timing. Other limitation of commercial solutions is that irrigation processes either consider the different watering needs throughout plant growth cycles or the climate changes. In order to fulfill location based agricultural needs, it is indicated to monitor environmental data using wireless sensors connected to an intelligent control system. This is more evident in applications as precision agriculture. This work presents the theoretical and experimental development of a *fuzzy* system to implement a spatially differentiated control of an irrigation system, based on soil moisture measurement with wireless sensor nodes. The control system architecture is modular: a fuzzy supervisor determines the soil moisture set point of each sensor node area (according to the soil-plant set) and another fuzzy system, embedded in the sensor node, does the local control and actuates in the irrigation system. The fuzzy control system was simulated with SIMULINK[®] programming tool and was experimentally built embedded in mobile device SunSPOT[™] operating in *ZigBee*. Controller models were designed and evaluated in different combinations of input variables and inference rules base.

Keywords: *Fuzzy* control. Irrigation system. Soil moisture. *ZigBee*. Wireless sensor node.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Diagrama do sistema de controle <i>fuzzy</i>	22
Figura 2.1– Componentes do solo com médias gerais (METED, 2012).....	25
Figura 2.2 – Triângulo das classes texturais de solo (FALKER, 2008).....	25
Figura 2.3 – Espaço poroso em solo arenoso vs. solo argiloso (METED, 2012).....	26
Figura 2.4 – Condições gerais da umidade do solo (METED, 2012).....	26
Figura 2.5 – Cc e Pm para diferentes classes de solo (FALKER, 2008).....	29
Figura 2.6 – Representação do conjunto “zero”	34
Figura 2.7 – Representação do número ou conjunto <i>fuzzy</i> QUASE ZERO	34
Figura 2.8 – Saídas discretas <i>defuzzificadas</i> (adaptada de SANDRI E CORREA, 1999)	38
Figura 2.9 – <i>Hardware</i> básico de um nó sensor	38
Figura 3.1– Esquema ilustrativo do sistema experimental	42
Figura 3.2 – Foto do sistema de controle de irrigação.....	43
Figura 3.3 – Foto da amostra de solo coletada em canavial (Santa Rita-PB).....	44
Figura 3.4 – Sensor capacitivo ECH ₂ O modelo EC-5 (DECAGON, 2011)	46
Figura 3.5 – Sensor capacitivo ECH ₂ O modelo EC-10 (DECAGON, 2011).....	46
Figura 3.6 – Dispositivo SunSPOT™ (ARAÚJO JÚNIOR, 2011).....	47
Figura 3.7 – Distribuição de pinos de entrada e saída	48
Figura 3.8 – Eletroválvula ou válvula-solenoide utilizada como atuador	49
Figura 3.9 – Circuito de interface SunSPOT-Eletroválvula	49
Figura 3.10 – Foto do circuito de acionamento da eletroválvula	49
Figura 4.1 – Diagrama do sistema <i>fuzzy</i> para controle de umidade do solo.....	51
Figura 4.2 – Modelo de inferência <i>fuzzy</i> para <i>set point</i> de umidade do solo.....	52
Figura 4.3 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável TSOLO.....	54
Figura 4.4 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável TPLAN-Z.....	55
Figura 4.5 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável TPLAN-Y.....	56
Figura 4.6 – Variação de K _C (baseado em CARAMORI, 2006).....	57
Figura 4.7 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável ESTAG.....	58
Figura 4.8 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável ATEMP	58
Figura 4.9- Termos linguísticos e funções de pertinência da variável AUMD	59

Figura 4.10 - Termos linguísticos e funções de pertinência da variável RUMD	59
Figura 4.11 – Arquitetura do controle em JAVA TM (ARAÚJO JR., 2011)	61
Figura 5.1– Diagrama de blocos do sistema <i>fuzzy</i> 1 no SIMULINK [®]	67
Figura 5.2 – Variação de K_C da cana-de-açúcar [adaptado de SILVA et al. (2012)].....	68
Figura 5.3– Variação de ESTAG (K_C) via <i>Signal Builder</i> do <i>SIMULINK</i> [®]	68
Figura 5.4 – Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) – 6 regras.....	69
Figura 5.5 – Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) – 12 regras.....	70
Figura 5.6 – Função senoidal contínua para a variável ATEMP.....	71
Figura 5.7- Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 6 regras	71
Figura 5.8 - Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 8 regras	72
Figura 5.9 - Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 12 regras	72
Figura 5.10 - Perfil do <i>set point</i> (areia/cana-de-açúcar) para CT07, CT08 e CT09	73
Figura 5.11 – <i>Set point</i> quantizado (areia/cana-de-açúcar) – 12 regras.....	74
Figura 5.12 – Perfil do <i>set point</i> (argila-arenosa/cana-de-açúcar) – 12 regras.....	75
Figura 5.13 – Perfil do <i>set point</i> (argila-arenosa /cana-de-açúcar) – 24 regras.....	75
Figura 5.14 – <i>Set point</i> (argila-arenosa/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 12 regras	76
Figura 5.15 – <i>Set point</i> (argila-arenosa/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 16 regras	77
Figura 5.16 – Destaque do perfil de RUMD e mínimos de ATEMP senoidal.....	77
Figura 5.17 – <i>Set point</i> (argila-arenosa/cana-de-açúcar) ATEMP senoidal – 24 regras	78
Figura 5.18 – <i>Set point</i> quantizado (argila-arenosa/cana-de-açúcar) – 24 regras.....	79
Figura 5.19 - Diagrama de blocos do sistema de controle – solo 1	80
Figura 5.20 - Diagrama de blocos do sistema de controle – solo 2.....	81
Figura 5.21 – Resposta simulada do solo 1 (arenoso) ao controle <i>fuzzy</i> -TSK	82
Figura 5.22 - Detalhes da resposta simulada do solo 1 ao controle <i>fuzzy</i> -TSK.....	83
Figura 5.23 – Resposta real do solo 1 (arenoso) ao controle <i>fuzzy</i> -TSK.....	84
Figura 5.24 – Resposta real do solo 1 com filtro de média móvel	85
Figura 5.25 – Sinal de controle <i>fuzzy</i> -TSK ao processo-solo 1	85
Figura 5.26 – Curva sugerida para a resposta real do sistema-solo 1.....	86
Figura 5.27 – Resposta simulada do solo 2 (argila-arenosa) ao controle <i>fuzzy</i> -TSK	86
Figura 5.28 - Detalhes da resposta simulada do solo 2 ao controle <i>fuzzy</i> -TSK.....	87
Figura 5.29 – Sinal de controle simulado ao processo-solo 2	88
Figura 5.30 – Resposta real do solo 2 (argila-arenosa) ao controle <i>fuzzy</i> -TSK	88
Figura 5.31 - Resposta real do solo 2 com filtro FIR de média móvel.....	89
Figura 5.32 – Sinal de controle <i>fuzzy</i> -TSK ao processo-solo 2	89
Figura 5.33 – Curva sugerida para a resposta real do sistema-solo 2.....	90

Figura 6.1 – Esquema ilustrativo de um ambiente de teste multissensor	94
Figura 7.1 – Coleta de amostra de solo no município de Santa Rita-PB.....	95
Figura 7.2 – Coleta de amostra de solo no município de Sapé-PB	95
Figura 7.3 – Material e montagem para calibração do Sensor ECH ₂ O EC-5.....	97
Figura 7.4 – Pesagem do conjunto recipiente-solo-sensor	97
Figura 7.5 – Medição de umidade do solo e potencial elétrico do Sensor ECH ₂ O EC-5.....	98
Figura 7.6 – Curva de calibração do sensor EC-10	99
Figura 7.7 - Curva de calibração do sensor EC-5.....	99
Figura 7.8 – Resposta do solo 1 (arenoso) ao degrau unitário de vazão	107
Figura 7.9 - Polinômio interpolador para a resposta do solo 1 ao degrau	108
Figura 7.10 - Reta tangente ao ponto de inflexão da resposta ao saldo (solo 1)	108
Figura 7.11 – Resposta do solo 2 (argila-arenosa) ao degrau unitário de vazão	109
Figura 7.12 - Polinômio interpolador para a resposta do solo 2 ao degrau	110
Figura 7.13 – Reta tangente ao ponto de inflexão da resposta ao saldo (solo 2).....	110

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Classificação das partículas do solo (GOMES, 1994)	25
Tabela 3.1 – Resumo dos dados das amostras de solo coletadas	44
Tabela 3.2 – Constante dielétrica de materiais	45
Tabela 3.3 – Especificações técnicas dos sensores EC-5 e EC-10 (DECAGON, 2010).....	45
Tabela 3.4 – Características elétricas dos pinos de entrada/saída	48
Tabela 4.1 – Valores de P_m e C_c (OTTONI FILHO, 2003)	53
Tabela 4.2 – Valores de P_m e C_c para texturas de solo siltosas (FALKER, 2008).....	53
Tabela 4.3 – Profundidade efetiva das raízes (GOMES, 1994; PIRES et al., 1999).....	54
Tabela 4.4 – Déficit hídrico tolerável para diferentes culturas.....	56
Tabela 4.5 – Termos linguísticos da variável TPLAN-Y	56
Tabela 4.6 – Valores médios de K_C (GOMES, 1994; MARIANO, 2008)	57
Tabela 4.7 – Termos linguísticos da variável ESTAG	58
Tabela 4.8 – Termos linguísticos e UD Mamdani para variável RUMD	60
Tabela 4.9 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável UERR.....	64
Tabela 4.10 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável DERR.....	64
Tabela 4.11 – Matriz de associação das regras de inferência <i>fuzzy</i> -TSK	65
Tabela 4.12 – Coeficientes teóricos das funções paramétricas Sugeno	65
Tabela 5.1 – Coeficiente K_C médio para cana-de-açúcar (Silva et al., 2012)	68
Tabela 5.2 – Parâmetros do cenário de teste CT01	69
Tabela 5.3 – Parâmetros do cenário de teste CT04	71
Tabela 5.4– Parâmetros do cenário de teste CT10	74
Tabela 5.5 – Termos Sugeno das funções paramétricas de saída.....	90
Tabela 7.1 – Dados da coleta das amostras de solo.....	96
Tabela 7.2 – Dados da análise laboratorial das amostras de solo coletadas.....	96
Tabela 7.3 – Base de regras do <i>fuzzy</i> Mamdani – Solo arenoso e ATEMP constante	101
Tabela 7.4 – Base de regras do <i>fuzzy</i> Mamdani – Solo arenoso e ATEMP senoidal	102
Tabela 7.5 – Base de regras do <i>fuzzy</i> Mamdani – Solo argila-arenosa e ATEMP constante .	103
Tabela 7.6 - Base de regras do <i>fuzzy</i> Mamdani – Solo argila-arenosa e ATEMP senoidal....	105

Lista de Símbolos e Abreviaturas

atm	Atmosfera (unidade de medida de Pressão)
A/D	Analógico para Digital
ADR	<i>Amplitude Domain Reflectometry</i>
°C	Grau Celsius
CAD	Capacidade de Água Disponível
cb	Centibar (unidade de medida de Pressão)
Cc	Capacidade de Campo
CLP	Controlador Lógico Programável
Das	Densidade Aparente do Solo
dBm	Decibel miliwatt
Ds	Densidade do Solo
DTA	Disponibilidade Total de Água
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração
ET _p	Evapotranspiração Potencial Diária
eSPOT	Placa-mãe do SunSPOT™
FDR	<i>Frequency Domain Reflectometry</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> (filtro digital de resposta ao impulso finita)
FP	Função de Pertinência
FT	Função de Transferência
Fuzzy-TSK	Sistema <i>Fuzzy</i> modelo Takagi-Sugeno-Kang
g	Grama
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GHz	Giga (10 ⁹) Hertz
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

IEEE 802.11	Padrão IEEE para Protocolo de Redes sem Fio – <i>Wi-Fi</i>
IEEE 802.15.1	Padrão IEEE para Protocolo de Redes sem Fio – <i>Bluetooth</i>
IEEE 802.15.4	Padrão IEEE para Protocolo de Redes sem Fio – <i>ZigBee</i>
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Paraíba
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical (Radio Band)</i>
J2ME	<i>Java To Platform Micro Edition</i>
JVM	<i>Java Virtual Machine</i> (Máquina Virtual Java)
k	Kilo (10^3)
K_c	<i>Crop coefficient</i>
kbps	Kilobits por segundo
K_D	Ganho derivative
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
K_P	Ganho proporcional
kPa	Kilo Pascal
l	Litro
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LI-ION	<i>Lithium-Ion</i> (tipo de bateria de íons de Lítio)
LIS	Laboratório de Irrigação e Salinidade da UFCG
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
m	Metro
m^2	Metro Quadrado
m^3	Metro Cúbico
MAC	<i>Media Access Control</i>
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MHz	Mega (10^6) Hertz
NBR	Norma Brasileira de Referência
P_o	Pressão que atua sobre a Água Padrão
Pa	Pascal (unidade de medida de Pressão)
PHY	<i>Physical Layer</i>
PD	Proporcional-Derivativo
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
Pm	Ponto de Murcha ou Murchamento
PMP	Ponto de Murcha Permanente

PVC	<i>PolyVinyl Chloride</i> (Policloreto de Vinila, tipo de material plástico)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Raiz Média Quadrática = valor eficaz)
RS-485	<i>Recommended Standard 485</i> (padrão de comunicação serial TIA/EIA-485)
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
SunSPOT TM	<i>Sun Small Programmable Object Technology</i>
TAS	Tensão da Água do Solo
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
TR	Tempo de Rega
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
V _{CA}	Tensão de Corrente Alternada
V _{CC}	Tensão Corrente Contínua
W	Watt
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
γ	Densidade Volumétrica
Ψ	Potencial de Água no Solo

Sumário

1. Introdução	18
1.1 Motivação do trabalho	18
1.2 Revisão bibliográfica	20
1.3 Objetivos do trabalho	22
1.4 Conteúdo dos capítulos	23
2. Fundamentação teórica	24
2.1 Sistemas de irrigação	24
2.1.1 O solo	24
2.1.2 Relação solo/água/clima/planta	26
2.1.3 Técnicas de medição de parâmetros para irrigação	30
2.2 Sistemas inteligentes com lógica <i>fuzzy</i>	32
2.2.1 Princípios da lógica <i>fuzzy</i>	33
2.2.2 Estrutura básica de um controlador <i>fuzzy</i>	35
2.3 Sensores sem fio	38
2.3.1 Padrão IEEE 802.15.4/ZigBee	40
2.4 Comentários e conclusão	41
3. Estrutura experimental	42
3.1 Ambiente de teste e o sistema de irrigação	42
3.2 Amostras de solo	43
3.3 Sensores	44
3.4 Dispositivo móvel ZigBee	47
3.5 Atuadores	48
3.2 Comentários e conclusões	50
4. Modelamento dos sistemas <i>fuzzy</i>	51
4.1 Sistema <i>fuzzy</i> para referência de umidade do solo	51

4.1.1	Variáveis do Sistema <i>Fuzzy</i> Mamdani	53
4.2	Sistema de controle em ambiente J2ME	60
4.2.1	Modelagem do processo-solo	62
4.2.2	Controle <i>fuzzy</i> -TSK	63
4.3	Comentários e conclusões	65
5.	Resultados obtidos	66
5.1	Cenários de teste – <i>set point</i>	66
5.2	Controle embarcado em J2ME	79
5.2.1	Controlador <i>fuzzy</i> -TSK	82
5.3	Comentários e conclusões	91
6.	Conclusões e perspectivas	92
6.1	Estudos futuros	93
7.	Anexos	95
	Anexo I – Coleta e análise das amostras de solo	95
	Anexo II - Calibração dos Sensores ECH ₂ O EC-5 e EC-10	97
	Anexo III – Base de regras do <i>fuzzy</i> para <i>set point</i> de umidade do solo	101
	Anexo IV – Resposta do sistema-solo ao degrau	107
	Referências	112

1. Introdução

O uso da irrigação já é conhecido como um dos responsáveis pelo aumento da produção agrícola e pela maior rentabilidade aos produtores rurais. Contudo, o manejo de irrigação é majoritariamente operado por seres humanos habituados à análise qualitativa das necessidades do solo e das culturas (BERNARDO, 1987; ZHANG et al., 1996; YUSOFF et al., 2007).

Segundo Lima (2007), tradicionalmente os projetos de irrigação não controlam localmente a disponibilidade de água no solo. A ausência dessa informação pode ocasionar erros na frequência de irrigação, por insuficiência ou demasia. Os ciclos irregulares de irrigação são responsáveis pelo déficit de água nas plantas, e o prejuízo do desenvolvimento da plantação pode ser irreversível (BERNARDO, 1987; RESENDE et al., 1988; YUSOFF et al., 2007).

Em contrapartida, o excesso de irrigação (*over-watering*, *over-spraying*) acarreta a saturação do solo, a falta de oxigenação das plantas, o escoamento de nutrientes e fertilizantes, além do próprio desperdício de água (LIMA, 2007).

Assim, é primordial o uso de um sistema de controle automático de irrigação e o estabelecimento da dotação hídrica adequada às condições climáticas, aos tipos de solo e à demanda de cada cultura (YUSOFF et al., 2007). Uma alternativa é o emprego de controle inteligente aplicado à irrigação de precisão e ao controle da umidade ideal do solo durante todo o ciclo de desenvolvimento vegetativo (LIMA, 2007). Além da utilização eficiente dos recursos hídricos, essa estratégia implicará a diminuição de mão de obra humana, redução do consumo de energia e custos operacionais, bem como a minimização dos impactos ambientais (BERNARDO, 1987; ZHANG et al., 1996).

1.1 Motivação do trabalho

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho está associada a dois aspectos. Do ponto de vista socioeconômico, o Brasil necessita ampliar a área de culturas irrigadas. É importante desenvolver sistemas de controle de irrigação eficazes, flexíveis, de alta durabilidade e de baixo custo que sejam viáveis para o médio produtor rural brasileiro.

Dados do último Censo Agropecuário publicado pelo IBGE (BRASIL, 2006) informam que apenas 6,3% dos estabelecimentos rurais do Brasil empregam algum método de irrigação

e 61,5% deles não receberam orientação técnica para implantação do referido método. As propriedades rurais que adotam técnicas de irrigação correspondem a menos de 8% da área total de lavouras existentes no país (BRASIL, 2006).

Do ponto de vista tecnocientífico, técnicas de controle e sensoriamento objetivam contribuir com novas alternativas às limitações dos produtos comerciais para irrigação. Bahat et al. (2000) e Lima (2007) destacam que diversas soluções comerciais operam com política de irrigação periódica e controles pré-definidos de temporização. Esses sistemas ainda dependem da experiência do agricultor ou da presença de profissionais técnicos para a tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar.

Os controladores comerciais tipo *ON-OFF* também não atendem às necessidades hídricas das culturas ao longo do tempo, não consideram as mudanças nas variáveis climáticas e nem os ciclos de crescimento vegetativo (GOMES, 1994; LIMA, 2007). Bernardo (1987), Bahat et al. (2000) e Yusoff et al. (2007) destacam que o volume necessário de água e o momento da irrigação dependem de parâmetros de natureza agrícola (tipo de planta, tipo de solo, estágio de crescimento da plantação, evapotranspiração etc.) e de natureza física (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, umidade do solo etc.). Os parâmetros agrícolas são fixos por ciclo de irrigação, no entanto, os físicos são variáveis e devem ser medidos ao longo do processo de irrigação para determinar as alterações no volume de água a ser aplicado.

Ainda, o uso de métodos clássicos de controle por realimentação, como PID, não apresenta resultados satisfatórios para o tratamento do aspecto temporal das variáveis de solo-água-planta-clima, em especial, devido às características não-lineares de sensores utilizados (XIAHONG et al., 2009).

Dessa maneira, o uso da lógica nebulosa ou *fuzzy* é indicado como substituto à operacionalização de sistemas comerciais de irrigação tipo *ON-OFF* (ZHANG et al., 1996; BAHAT et al., 2000; LIMA, 2007; YUSOFF et al., 2007; ZHAO et al., 2007; XIAOHONG et al., 2009). Sistemas de controle *fuzzy* se mostram apropriados tanto pela natureza nebulosa do problema quanto do ambiente multivariável de processos de irrigação.

Aliada aos sistemas de controle *fuzzy*, a instrumentação com sensores sem fio se apresenta como uma solução tecnológica de crescente aplicabilidade em irrigação de precisão. Suas características de mobilidade, flexibilidade, adaptabilidade (a qualquer tipo de relevo topográfico e cultura agrícola) e redução de custos operacionais permitem a instalação massiva de sensores na zona radicular das plantas (LIMA, 2007; KIM et al., 2008).

No entanto, há escassa literatura que envolva sistemas inteligentes *fuzzy* e sensores sem fio em agricultura de precisão. Este trabalho apresenta o desenvolvimento teórico e

experimental de um sistema de controle *fuzzy* espacialmente diferenciado para um sistema de irrigação, baseado no sensoriamento da umidade do solo com nós sensores sem fio, e analisa seu desempenho.

1.2 Revisão bibliográfica

Diversas pesquisas na área de sistemas de controle têm sido efetuadas com o propósito de automatizar o manejo de irrigação (SAWADOGO et al., 1998; BAHAT et al., 2000; LITRICO AND FROMION, 2006; YUSOFF et al., 2007; WEYER, 2008; AGUILAR et al., 2009; DURSUN AND OZDEN, 2010). Sistemas de controle em malha aberta trabalham com parâmetros pré-definidos de temporização e vazão. Sistemas de controle em malha fechada utilizam alguns dos parâmetros de natureza física (temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo, velocidade do vento etc.) para decidir o quantitativo de recursos hídricos a serem aplicados (BAHAT et al., 2000).

Em virtude da natureza nebulosa dos parâmetros de sistemas de irrigação, Zhang et al. (1996), Bahat et al. (2000), Lima (2007), Yusoff et al. (2007), Zhao et al. (2007) e Xiaohong et al. (2009) sugerem sistemas inteligentes com lógica *fuzzy* aplicados ao controle de processos de irrigação.

Zhang et al. (1996) investigam a eficiência de um controle de irrigação com lógica *fuzzy* face às não-linearidades e atrasos de resposta de sensores de umidade do solo. O controle *fuzzy* de Zhang et al. (1996) determina o momento da irrigação baseado no potencial de água no solo, medido indiretamente por sensores de umidade do solo.

Bahat et al. (2000) simulam um sistema *fuzzy* modular composto por um subsistema de *set point* de umidade do solo, um estágio que modela a função de evaporação do solo e um subsistema para controle da abertura de eletroválvulas. O subsistema *fuzzy* que define o *set point* da umidade do solo utiliza 4 (quatro) variáveis de entrada (temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e orçamento hídrico).

Xiaohong et al. (2009) implementaram um sistema *fuzzy* para controlar um sistema de irrigação composto de sensores de umidade do solo, uma rede de tubos e eletroválvulas, com comunicação *ZigBee*. O controlador *fuzzy*, proposto por Lima (2007), objetiva manter o potencial matricial da água no solo por meio do controle da vazão e da velocidade de um conjunto motobomba. Yusoff et al. (2007) comparam controladores *fuzzy* baseados nos modelos de inferência Mamdani e Takagi-Sugeno-Kang (**TSK**), aplicados em um sistema de irrigação de gramados.

A plataforma para irrigação de precisão em citricultura, desenvolvida por Torre-Neto et al. (2007), empregou sensores de umidade do solo e temperatura do ar. Em Torre-Neto (2002), foram utilizados um pluviômetro e sondas enterradas no solo contendo sensores de temperatura e tensiômetros de pressão para medição do potencial matricial do solo.

Kim et al. (2008) apresenta um sistema de irrigação variável baseado em uma rede de sensores sem fio georreferenciada por GPS (*Global Positioning System*). O sistema de controle com **CLP** (Controlador Lógico Programável) monitora a umidade e a temperatura do solo, a umidade relativa e a temperatura do ar, a precipitação, a velocidade e direção do vento e a radiação solar.

Comparando os trabalhos mencionados, pode-se afirmar que a definição das variáveis do processo é feita para melhor caracterizar as necessidades de dotação hídrica das culturas sem comprometer a complexidade do controlador *fuzzy*. Também se verifica que o parâmetro *umidade do solo* (*soil moisture*) está presente em todos os trabalhos aqui referenciados, o que corrobora com seu uso neste trabalho de pesquisa.

Em sistemas de controle reais para agricultura de precisão, o projeto de sensoriamento (tipos e quantitativo de sensores, topologia de distribuição, tecnologia de comunicação e custo de implantação) é um ponto relevante a ser considerado. Trabalhos de controle de irrigação realizados pela Embrapa apresentam soluções tecnológicas baseadas em sensoriamento sem fio (TORRE-NETO, 2001; TORRE-NETO, 2002; TORRE-NETO et al., 2003; TORRE-NETO et al., 2007).

Torre-Neto (2001; 2002) apresenta um sistema automatizado de irrigação com sondas de solo interligadas em rede via barramento serial multiponto padrão RS-485. A comunicação entre a estação em campo e o escritório central é feita por meio de um enlace de rádio de 900 MHz. Outra solução idealizada por Torre-Neto et al. (2007) trata da instrumentação sem fio para identificar zonas de manejo em citricultura com diferentes necessidades hídricas. Uma rede de sensores de umidade e da temperatura do solo é usada para irrigação de precisão espacialmente variável.

Pesquisas recentes (ZHANG et al., 2007; KIM et al., 2008; XIAOHONG et al., 2009; ZHOU et al., 2009) demonstram a eficiência de sensores sem fio aplicados à agricultura de precisão por agregar, às facilidades de instalação, mobilidade e manutenção, as características de autoformação (*self-forming*), autorregeneração (*self-healing*), autoconfiguração (*self-configuration*) e escalabilidade.

A rede de sensores de Zhou et al. (2009) é construída com padrão *ZigBee* para monitoramento da temperatura e umidade do ar em uma cultura de cogumelos comestíveis na

China. Os nós atuadores recebem sinais de controle para atuar em motobombas e em válvulas eletromagnéticas.

Zhang et al. (2007) compara os padrões *ZigBee*, *Bluetooth* e *Wi-Fi* nos quesitos custo, taxa de dados, número de nós, consumo de corrente e autonomia da bateria para monitoração e controle de temperatura, luminosidade e umidade em uma estufa. Outras referências (MALAFAYA et al., 2005; FERNANDES; 2010) também indicam o uso do padrão IEEE 802.15.4/*ZigBee* para comunicação entre nós sensores e dispositivos de controle em redes que demandam baixa taxa de transferência de dados, baixo custo e baixo consumo de energia.

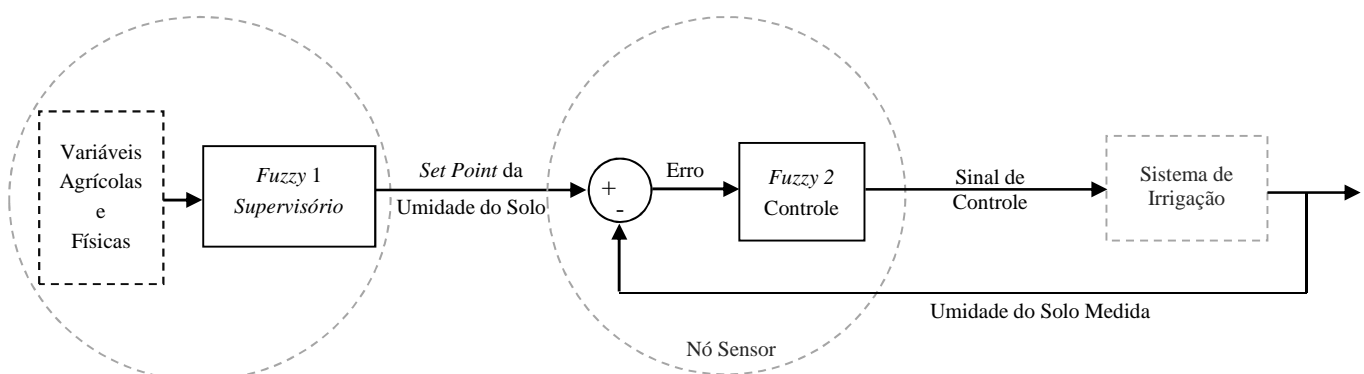
Verificam-se, nas diferentes referências comentadas, esforços de pesquisa em controle inteligente aplicados à agricultura de precisão ou em instrumentação sem fio, separadamente. Contudo, o presente trabalho identifica oportunidades para o desenvolvimento de um sistema *fuzzy* para controle de irrigação, integrado a um dispositivo de sensoriamento sem fio baseado na tecnologia *ZigBee*.

1.3 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal o projeto e a construção de um sistema supervisor *fuzzy* integrado a um controle *fuzzy* embarcado em um dispositivo sensor sem fio, para atuar em um sistema de irrigação. Assim, o supervisor *fuzzy* define uma referência de umidade do solo, de acordo com as necessidades de cada cultura vegetal e particularidades do ambiente monitorado, e o sistema *fuzzy* embarcado realiza o controle para que a referência seja alcançada.

O sistema de irrigação espacialmente diferenciado é formado por 2 (dois) subsistemas *fuzzy*, como visto no diagrama da Figura 1.1:

Figura 1.1 - Diagrama do sistema de controle *fuzzy*



O presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- projetar um sistema supervisor *fuzzy* e um controle *fuzzy* para um sistema de irrigação em diferentes amostras de solo;
- utilizar diferentes sensores para o monitoramento de umidade do solo para o sistema de controle de irrigação;
- desenvolver alguns modelos do supervisor *fuzzy* em cenários/arquiteturas com diferentes combinações de variáveis de entrada e regras de inferência;
- embarcar o sistema de controle em dispositivo-sensor móvel e avaliar dados coletados;

1.4 Conteúdo dos capítulos

Os demais capítulos deste documento seguem uma sequência lógica para apresentação da fundamentação teórica, da construção experimental, do modelamento proposto e dos resultados obtidos. No capítulo 2, são introduzidos conceitos de sistemas de irrigação, da relação solo/água/clima/planta, de sistemas de controle inteligente com lógica *fuzzy* e sensores sem fio. O capítulo 3 detalha os elementos da construção experimental, assim como os dispositivos sensores e atuadores escolhidos. A modelagem dos subsistemas *fuzzy* e os critérios para a escolha das variáveis de entrada e de saída estão no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e os comparativos. As conclusões e estudo futuro deste trabalho aparecem no capítulo 6.

2. Fundamentação teórica

Neste capítulo, serão descritos fundamentos teóricos relevantes para o entendimento deste trabalho de pesquisa. Inicialmente, serão introduzidos conceitos de sistemas de irrigação, as características do solo, as relações entre solo/água/clima/planta e as técnicas utilizadas na medição de parâmetros físicos na agricultura. Em seguida, será apresentada uma breve descrição de sistemas inteligentes baseados na lógica *fuzzy*, com ênfase em seus princípios e a estrutura básica de um controlador nebuloso. Finalmente, as características básicas, os padrões de comunicação e os aspectos de dispositivos sensores sem fio da tecnologia *ZigBee* serão descritos de forma sucinta.

2.1 Sistemas de irrigação

A relevância da água para as plantas é indiscutível. Contudo, a disponibilidade da água para uso e consumo não está equiparada ao seu grau de importância para os seres vivos do planeta.

Assim, o uso da água em sistemas de irrigação requer uma aplicação eficiente. O conhecimento das inter-relações entre solo-água-clima-planta e o manejo de irrigação são questões-chave no planejamento e operação de projetos de irrigação (BERNARDO, 1987).

A seção seguinte introduzirá alguns conceitos sobre solo e parâmetros de sistemas de irrigação e, em seguida, apresentará algumas técnicas de medição das grandezas necessárias ao seu controle.

2.1.1 O solo

O solo é constituído de partículas sólidas (minerais e matéria orgânica) e espaço poroso (ar e água) (GOMES, 1994). Os espaços vazios ou poros ocupam aproximadamente 50% do volume total do solo, de acordo com as partículas minerais presentes em sua composição.

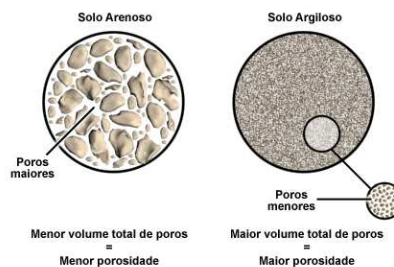
Assim, o grau de preenchimento do espaço poroso do solo com água é que determina o seu teor de umidade (METED, 2012). A Figura 2.1 ilustra essa divisão de espaços.

2.1.2 Relação solo/água/clima/planta

Para o dimensionamento de um projeto de irrigação, existe a necessidade de se conhecer algumas propriedades físicas do conjunto solo-água-clima-planta. Como o estudo aprofundado desse tema está além do escopo deste trabalho, a fundamentação teórica apresentada se restringe aos termos necessários para o entendimento deste trabalho.

- **Umidade do solo** - Corresponde ao teor percentual de água contida em uma amostra de solo. Solos argilosos, com partículas minerais e poros muito pequenos, oferecem um espaço poroso maior que os solos arenosos e, por isso, possuem maior porcentagem de água retida, como apresentado na Figura 2.3 (METED, 2012).

Figura 2.3 – Espaço poroso em solo arenoso vs. solo argiloso (METED, 2012)



Quando o espaço poroso do solo está totalmente preenchido com água, diz-se que o solo está saturado. O excesso de água é drenado para camadas mais profundas do solo até que se torna desprezível. Nessa situação, é dito que o solo atingiu a Capacidade de Campo (**Cc**) (GOMES, 1994; SILVA, 2007; METED, 2012).

À medida que ocorre o processo de evapotranspiração, as raízes das plantas absorvem água do solo até que a Tensão da Água do Solo (**TAS**) é tal que não conseguem mais retirar água. Nesse ponto, diz-se que o solo alcançou o Ponto de Murchamento (**Pm**) ou Ponto de Murcha Permanente (**PMP**). A Figura 2.4 ilustra os estados descritos anteriormente.

Figura 2.4 – Condições gerais da umidade do solo (METED, 2012)



- **Potencial ou Tensão da Água do Solo (TAS)** - Zhang et al. (1996) afirmam que a umidade do solo pode ser representada pelo Potencial ou Tensão de Água do Solo (TAS) ou o estado de energia da água no solo (Ψ) (ZAZUETA AND XIN, 1994; PEREIRA et al., 2006; METED, 2012).

Sistemas baseados em **TAS** são bastante empregados no manejo de irrigação: Zhang et al. (1996) usaram sensores de temperatura e de umidade do solo (tipo resistivo) para a definição do valor de Ψ ; Oliveira et al. (1999) analisaram o efeito do **TAS** para o manejo de irrigação da cultura do algodoeiro; em Yusoff et al. (2007), tensiômetros são utilizados para medir a tensão hídrica do solo como indicativo da umidade do solo e da necessidade de irrigação; Lima (2007) descreve que o potencial Ψ é função da posição e condição interna da água em certo ponto e é proporcional à umidade do solo, sendo medido experimentalmente com tensiômetros ou instrumentos de pressão/vácuo. As unidades do **TAS** (Ψ) são o Pascal (pressão em Pa) ou Centibar (pressão em cb).

- **Ponto de Murchamento (Pm) ou Ponto de Murcha Permanente (PMP)** - Qualitativamente, representa a condição mínima de umidade do solo ou o teor mínimo de água armazenada no solo, abaixo do qual as plantas podem sofrer deficiência hídrica irreversível, ou seja, murcham e não recuperam a turgidez (BERNARDO, 1987; LIMA, 2007; OLIVEIRA E RAMOS; 2008). Como exemplo, Yusoff et al. (2007) estabeleceram o momento de ativação da irrigação para quando o teor da umidade do solo for imediatamente superior ao **Pm** (*wilting point*).

- *Determinação do Pm* – Embora o **Pm** seja dependente do tipo de solo em questão, considera-se, para fins práticos, que o teor de umidade correspondente é aquele obtido em amostras de solo submetidas a uma pressão de 15 atm (≈ 1500 kPa), até que não haja mais escoamento de água da amostra (Bernardo, 1987; Gomes, 1994; OLIVEIRA E RAMOS, 2008).

- **Capacidade de Campo (Cc) ou do solo** - Definida como a quantidade máxima de água retida pelo solo, após ocorrer a drenagem do excesso d'água da irrigação pela ação gravitacional (GOMES, 1994; LIMA, 2007; OLIVEIRA E RAMOS, 2008). Kim et al. (2008) definiram a localização dos sensores de sua rede de monitoramento com base nos diferentes valores de **Cc** do solo (*field capacity*). Para Oliveira e Ramos (2008), a condição mais favorável para as plantas absorverem água e nutrientes se estabelece quando a umidade do solo atinge o valor de **Cc**.

- *Determinação da Cc* – Embora **Cc** possa ser determinada em campo, é comum utilizarem-se procedimentos em laboratório como o extrator de Richards (BERNARDO, 1987; OLIVEIRA E RAMOS, 2008). Para fins práticos, a literatura estabelece valores de **Cc** para cada tipo de solo (GOMES, 1994; LIMA, 2007; OLIVEIRA E RAMOS, 2008). Em solos siltosos e arenosos, a umidade correspondente à **Cc** é aquela obtida na tensão de 10 kPa ($\approx 0,1$ atm). Para solos argilosos em geral, **Cc** é obtido em 33 kPa ($\approx 1/3$ atm) e, em solos muito argilosos e orgânicos, o valor de **Cc** é obtido em 100 kPa (≈ 1 atm).

- **Conteúdo e disponibilidade de água no solo** - Conforme o conteúdo hídrico do solo, as plantas extraem nutrientes e água com maior ou menor facilidade. À medida que o solo seca, as forças de retenção (adesão e coesão) do solo aumentam, prendem as moléculas de água, e as plantas têm mais dificuldade em retirá-las. Assim, nem toda água encontrada no solo está disponível para as plantas, e a diminuição da umidade do solo implica redução dessa disponibilidade (GOMES, 1994; LIMA, 2007; OLIVEIRA E RAMOS, 2008).

Na literatura (BERNARDO, 1987; LIMA, 2007; YUSOFF et al., 2007; OLIVEIRA E RAMOS, 2008), a água disponível no solo está compreendida entre os valores de umidade correspondentes a **Cc** e o **Pm**. Assim, as dotações hídricas dos sistemas de irrigação devem manter a faixa de água disponível no solo (ou umidade do solo) entre os valores de **Cc** e **Pm** (GOMES, 1994; LIMA, 2007).

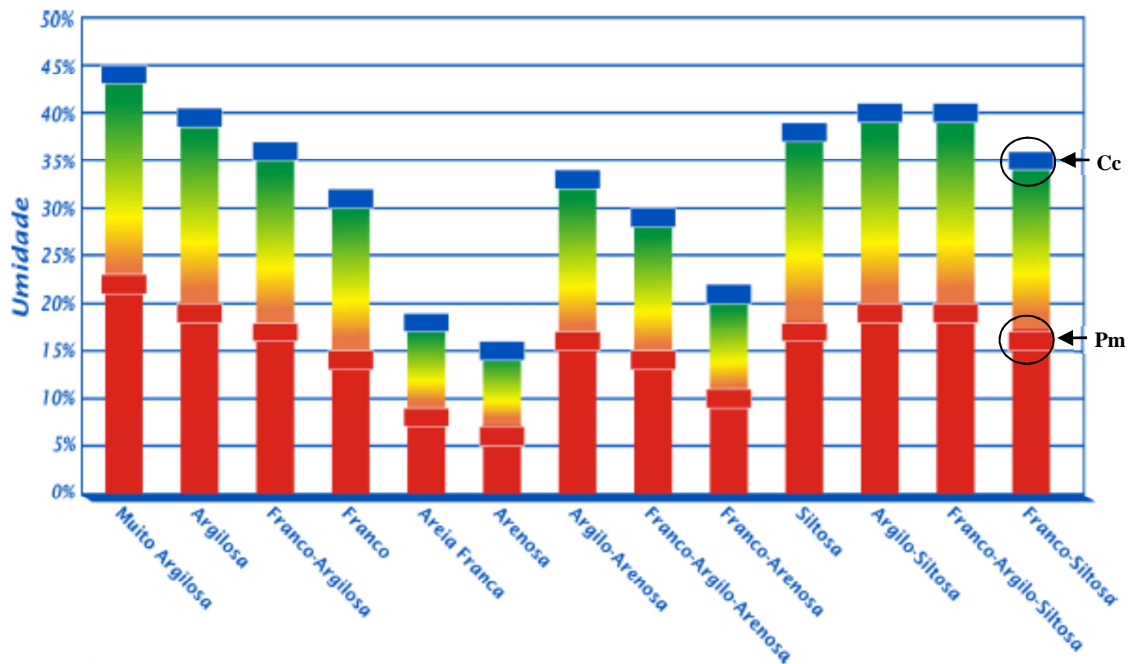
- *Cálculo da água disponível no solo ou Disponibilidade Total de Água (DTA)* – A **DTA** corresponde à lâmina d'água armazenada numa camada de solo de 1 cm de espessura entre os teores de umidade **Cc** e **Pm** (BERNARDO, 1987; OLIVEIRA E RAMOS, 2008). O cálculo é dado por,

$$DTA = \frac{10.(Cc-Pm)}{100} . Ds \quad (2.1)$$

em que: **Ds** é a densidade de solo.

Observa-se na Figura 2.5 os diferentes teores de umidade **Pm** e **Cc** para várias classes texturais de solo.

Figura 2.5 – Cc e Pm para diferentes classes de solo (FALKER, 2008)



No presente trabalho, a variável *fuzzy* para o **TIPO-DE-SOLO (TSOLO)** é representada por termos linguísticos associados aos teores de umidade **Cc** das texturas de solo mais populares (arenoso, médio, siltoso, argiloso, muito-argiloso). Os termos da variável *fuzzy* para a referência de **UMIDADE-DO-SOLO (RUMD)** estão distribuídos no intervalo [**Pm**, **Cc**].

- **Lâmina de água** - Segundo Oliveira e Ramos (2008), diz respeito à altura da camada que resulta da aplicação de certo volume de água numa área específica. Então, a quantidade de água aplicada no solo, por processos de irrigação, é expressa em milímetros.

$$Lâmina (mm) = \frac{Volume (L)}{Área (m^2)} = \frac{Volume (m^3)}{Área (ha)} \quad (2.2)$$

- **Densidade do solo (Ds)** - É a relação entre a massa de uma amostra de solo seco e o seu volume, conforme definido por Oliveira e Ramos (2008). O valor da densidade do solo é indicativo de seu nível de compactação, bem como de sua textura e estrutura.

$$Ds = \frac{massa\ de\ solo\ seco}{volume\ de\ solo} \quad (g/cm^3\ ou\ kg/m^3) \quad (2.3)$$

- **Densidade aparente do solo (Das)** - Em Lima (2007), **Das** (parâmetro adimensional) é a densidade do solo relativo à densidade da água. A densidade da água a 4° C é de 1 g/cm³.

- **Evapotranspiração (ET)** - É a combinação dos processos de evaporação (vaporização da água de superfícies) e transpiração (perda de água através das folhas), responsáveis por uma parcela da perda hídrica nos vegetais. Outra parte é perdida por meio dos processos de escoamento (deslocamento de águas superficiais) e percolação (deslocamento da água através do solo (YUSOFF et al., 2007).

ET é uma das variáveis *fuzzy* de entrada do controlador proposto por Yusoff et al. (2007) para determinar o momento e o volume de água requerido para irrigação. Em seu trabalho, Bahat et al. (2000) propuseram um modelo de 1ª ordem para determinar a umidade do solo, a partir da evapotranspiração do solo e do volume de água liberado por uma eletroválvula.

2.1.3 Técnicas de medição de parâmetros para irrigação

Existem inúmeras técnicas para medir as diversas propriedades físicas do conjunto solo-água-clima-planta. Contudo, para o propósito deste trabalho, serão apresentados alguns dos métodos mencionados na literatura e mais difundidos na prática (BERNARDO, 1987; LIMA, 2007; OLIVEIRA E RAMOS, 2008).

- **Determinação da época de irrigação**

Bernardo (1987) enumera 5 (cinco) métodos tradicionais para determinação da época de irrigação:

- *Medição da deficiência de água na planta* - Análise da turgescência (turgor vegetal) ou teor de umidade do vegetal;
- *Pelos sintomas de deficiência de água na planta* - Visualmente identificadas por meio do enrolamento da folha, de sua coloração etc.;
- *Medição da evapotranspiração* - Baseada nos processos de evapotranspiração ou evaporação das plantas realizada com tanques apropriados;
- *Pelo cálculo do Turno de Rega (TR)* - Método mais utilizado nos projetos de irrigação temporizada. A equação que o representa é dada por:

$$TR = 10. \frac{(Cc - Pm).Das.f.Z}{100.ET_p} \quad (2.4)$$

em que: **Cc** é a capacidade de campo, **Pm** é o ponto de murchamento permanente, **Das** é a densidade aparente do solo, **Z** é a profundidade do sistema radicular da cultura que será irrigada, **ET_p** é a evapotranspiração potencial diária em mm/dia e **f** é um índice dependente do tipo de cultura e possui intervalo [0,3; 0,7]. O **TR** é dado em dias.

- *Medição do percentual de umidade dos solo ou Tensão da Água do Solo (TAS)* - Um dos métodos mais usados para determinar, diariamente, a necessidade de irrigação. Quando o limite do teor de umidade do solo (% de umidade ou % de água disponível) for atingido, a irrigação é iniciada. Para cada tipo de cultura vegetal, ciclo de crescimento e tipo de solo, haverá limites distintos.

No presente trabalho, o sistema de controle *fuzzy* foi baseado no método de medição do percentual de umidade do solo. No item a seguir, estão descritas sucintamente as técnicas mais usuais de medição dos parâmetros associados ao referido método.

- **Medição da umidade do solo**

Existem métodos diretos e indiretos para determinar a umidade do solo, como os métodos gravimétricos, termogravimétricos, eletrométricos, tensiométricos, técnicas de radiação, propriedades térmicas e métodos químicos (BERNARDO, 1987; LIMA, 2007). Alguns dos mais simples e mais adotados em irrigação estão citados abaixo:

- *Métodos Gravimétrico e Termogravimétrico* - Métodos diretos baseados na pesagem de amostras do solo e processos de secagem em estufa em laboratório.

a) Método-padrão de estufa (padronizado pela NBR 06457)

$$\% \text{ de umidade} = \frac{Pa - Ps}{Ps - Pr} \cdot 100 = \frac{\text{peso d' água evaporada na estufa}}{\text{peso da amostra seca do solo (Ps) a } 105^{\circ}\text{C}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

em que: Pa = peso da amostra do solo antes da secagem, Ps = peso da amostra do solo seca a 105° C e Pr = peso do recipiente que acondiciona a amostra.

- *Método Tensiométrico* - Método direto para determinação da tensão da água no solo e indireto para o percentual de água no solo. Quando a umidade do solo diminui, a água do recipiente tubular de um tensiômetro é transferida para o solo por meio de uma cápsula porosa e provoca uma sucção nele (GOMES, 1994).
- *Método Eletrométrico* - Método indireto baseado em funções não-lineares de grandezas elétricas (condutividade elétrica e constante dielétrica do solo) detectadas por eletrodos/sondas/ponteiras enterrados no solo.

- a) Método de Bouyoucos - Baseado na variação da resistência elétrica (condutividade elétrica) entre dois eletrodos inseridos em um bloco de gesso que absorve ou perde umidade ao ser enterrado no solo. O sensor é de baixo custo, de fácil fabricação e faixa de resposta de 50 a 1500 kPa;
- b) Método de Colman - baseado no mesmo princípio de variação da resistência elétrica do método de Bouyoucos. O diferencial está no uso de eletrodos inseridos em um bloco de fibra de vidro e a presença de um termistor, inserido no bloco, para detecção da temperatura do solo;
- c) Técnicas Dielétricas ou com Reflectometria **TDR** (*Time Domain Reflectometry*), **FDR** (*Frequency Domain Reflectometry*) e **ADR** (*Amplitude Domain Reflectometry*) - Estimam o conteúdo de água no solo a partir da velocidade de propagação e atenuação de ondas ou pulsos eletromagnéticos através do solo. Esses valores dependem da constante dielétrica do solo que está associada ao conteúdo de água existente (LIMA, 2007; ZHAO et al., 2007).

Pelo exposto, os métodos gravimétrico, termogravimétrico e tensiométrico são pouco indicados para sensoriamento remoto e automação de sistemas de irrigação não-assistidos. Neste trabalho, foi utilizado o método eletrométrico de medição de umidade do solo com o emprego de sensores capacitivos.

A seguir, serão tratados os princípios e características de sistemas inteligentes *fuzzy* para o entendimento das escolhas do trabalho realizado.

2.2 Sistemas inteligentes com lógica *fuzzy*

Quando é possível obter-se modelos matemáticos lineares para caracterizar processos dinâmicos, é usual a utilização de técnicas clássicas bem conhecidas em Engenharia de Controle. Entretanto, há processos que não podem ser bem caracterizados por modelos lineares ou com dinâmica não completamente conhecida, como as relações do sistema solo/água/clima/planta.

Nesses casos, o controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é pouco adequado e a abordagem *fuzzy* ou a lógica nebulosa é empregada para traduzir a experiência de operadores humanos, expressando informações verbais, vagas e imprecisas, como valores numéricos compreensíveis por sistemas computacionais. A estratégia de controle *fuzzy* não exige conhecimentos complexos de matemática e suas implicações lógicas, do tipo SE <condição>

ENTÃO <ação>, modelam o sistema e descrevem as relações entre as variáveis do processo a ser controlado (SHAW E SIMÕES, 1999; JANTZEN, 2007).

A seguir, são apresentados os princípios básicos da lógica *fuzzy* e a estrutura básica de controladores nebulosos.

2.2.1 Princípios da lógica *fuzzy*

A utilização de valores binários ou bivalentes, como verdadeiro ou falso, faz parte da lógica clássica e não reflete a multivalência do mundo real analógico. Em contraste a essa lógica booleana bivalente, a lógica nebulosa ou *fuzzy* possibilita a expressão de graus de verdade ou pertinência em um intervalo numérico $[0,1]$, suportando o raciocínio não exato e as quantidades imprecisas comuns na comunicação humana (SHAW E SIMÕES, 1999; LIMA, 2007; CASTANHO E PEIXOTO, 2010).

- **Função de Pertinência (FP)**

Na teoria de conjuntos clássica, a pertinência de um elemento x a um conjunto A é indicada pela relação $x \in A$ e é expressa por uma função de pertinência bivalente $\mu_A(x)$:

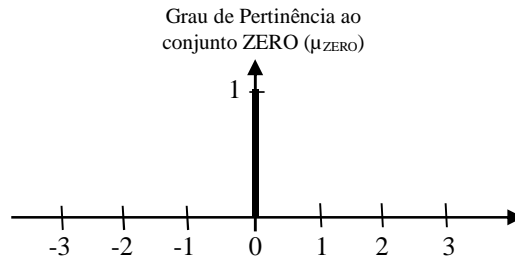
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.6)$$

Na lógica *fuzzy*, emprega-se a ideia de grau de pertinência ou pertinência parcial de elementos a um determinado conjunto, desenvolvida por Zadeh (1965). Assim, a transição entre a pertinência (grau de pertinência 100% ou 1) e a não-pertinência (grau de pertinência 0% ou 0) de elementos a um conjunto é gradual. Essa transição é representada por uma função contínua ou discreta, denominada **função de pertinência** $\mu_A(x)$, com valores dentro do intervalo $[0,1]$.

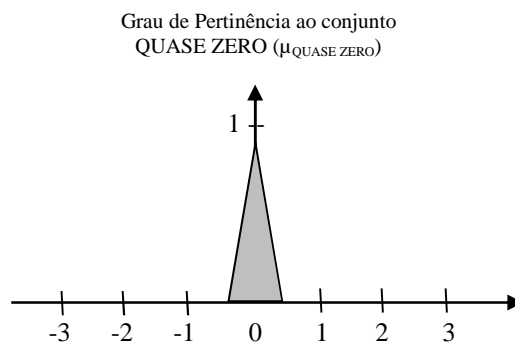
- **Números, conjuntos e variáveis *fuzzy***

A representação gráfica de um número real é uma linha bem definida sobre o eixo horizontal de um plano cartesiano, a exemplo do número zero na Figura 2.6. À linha desenhada no valor “0” pode-se atribuir um conjunto ZERO, cujos elementos pertencem completamente (grau de pertinência 1) ou não (grau de pertinência 0) a ele (SHAW E SIMÕES, 1999).

Figura 2.6 – Representação do conjunto “zero”



A representação gráfica de um termo linguístico denominado QUASE ZERO pode ser uma área triangular finita, como a da Figura 2.7. Portanto, diferente do conjunto ZERO que é uma abstração matemática de área nula e valores bivalentes, o QUASE ZERO é considerado um *número* ou *conjunto fuzzy*, pois o grau de pertinência de seus membros varia gradativamente.

Figura 2.7 – Representação do número ou conjunto *fuzzy* QUASE ZERO

Em sistemas do mundo real, informações imprecisas são codificadas por termos ou conceitos linguísticos como QUASE ZERO ou MUITO LENTO, usados para definir o estado de variáveis linguísticas ou *fuzzy*. Essa representação denomina-se **codificação fuzzy** ou **fuzzificação** dos valores exatos de uma variável. Em contrapartida, a conversão de valores *fuzzy* em números reais chama-se **decodificação fuzzy** ou **defuzzificação**.

- **Universo de discurso**

Shaw e Simões (1999) e Jantzen (2007) definem **universo de discurso** como um conjunto de elementos finitos ou o intervalo numérico que contempla todos os possíveis valores reais de um conjunto *fuzzy*.

- **Sistema de inferências fuzzy**

O raciocínio humano executa conexões entre causas e efeitos, ou entre condições e consequência, ao resolver problemas ou tomar decisões. Essas implicações lógicas do cérebro

humano são traduzidas pela lógica *fuzzy* na forma de regras de inferência, elaboradas com números e conjuntos *fuzzy*:

SE <condição=A> **ENTÃO** <ação=B> (2.7)

SE <calor=MUITO FORTE> **ENTÃO** <ligar ar condicionado=MUITO FRIO>

As inferências que modelam as relações entre as variáveis de entrada (condições) e de saída (ação) formam a base de regras do processo a ser controlado.

2.2.2 Estrutura básica de um controlador *fuzzy*

De modo geral (SHAW E SIMÕES, 1999; ARAÚJO, 2004; JANTZEN, 2007; CASTANHO E PEIXOTO, 2010), um controlador que emprega lógica *fuzzy* possui uma configuração básica composta de 3 (três) blocos funcionais que representam a transformação de valores numéricos do mundo real para o domínio *fuzzy*:

- **Interface de codificação *fuzzy* ou *fuzzificação*** - Mapeia valores numéricos (não-*fuzzy*) das variáveis de entrada para valores de um dos termos linguísticos do conjunto *fuzzy*. Cada termo linguístico está definido por uma função de pertinência.

- *Funções de pertinência* - Função numérica gráfica ou tabulada que atribui graus ou valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável. As funções de pertinência mais comuns e mais fáceis de serem geradas são a triangular e a trapezoidal, embora existam outras funções como a gaussiana, sigmóide e *spline* cúbico (SHAW E SIMÕES, 1999; LIMA, 2007).
- *Vetor de possibilidades* - O mapeamento de um valor numérico real x para o domínio *fuzzy* produzirá um **vetor de possibilidades p** com m elementos, que são os graus de pertinência *fuzzy* de x em relação a cada termo linguístico representado pela respectiva função de pertinência.

- **Sistema de inferência *fuzzy*** - Consiste de uma base de dados composta das funções de pertinência associadas aos termos linguísticos *fuzzy*, uma base de regras que caracterizam os objetivos do sistema de controle e uma lógica de tomada de decisões. O sistema de inferência gera as ações de controle (consequentes) inferidas de acordo com as condições de entrada (antecedentes).

- *Controladores *fuzzy* clássicos ou baseados em regras* - Baseiam-se em condições que implicam uma determinada ação ou consequência. Um modelo muito conhecido é o

Mamdani, cuja implementação possui 4 (quatro) processos: *fuzzificação* das variáveis de entrada, avaliação de regras, agregação/cominação das saídas das regras e *defuzzificação* (YUSOFF et al., 2007). A forma geral de inferência ou associação lógica *fuzzy* é dada por:

$$\begin{aligned} & SE \text{ <condição=A> ENTÃO <conclusão=B>} \\ & \text{ou} \\ & SE \text{ <antecedente> ENTÃO <conseqüente>} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Em um sistema *fuzzy* multientradas e multissaídas empregam-se a *agregação* dos conjuntos de entrada e a *combinação* dos conjuntos de saída por meio de operadores de implicação *fuzzy* (SANDRI E CORREA, 1999). Segundo Shaw e Simões (1999), as *t*-normas *min* e *produto* são os operadores de interseção (“E” ou “AND”) mais comuns utilizados na composição ou *agregação* dos vários conjuntos *fuzzy* de entrada.

A família de operadores denominados *t-conormas* ou *s-normas* é utilizada para implementar a operação de união (“OU” ou “OR”) de conjuntos *fuzzy* (SANDRI E CORREA, 1999). A *s-norma max* é um dos operadores mais práticos e comuns para a composição ou *combinação* das saídas *fuzzy* de cada regra de inferência (SHAW E SIMÕES, 1999).

O subsistema 1 deste trabalho é baseado no controle *fuzzy* clássico, modelo Mamdani, com 6 (seis) variáveis de entrada, operador de interseção (*agregação*) *min*, e com 1 (uma) variável de saída, operador de união (*combinação*) *max*.

- o *Controladores fuzzy paramétricos ou por interpolação* - Utilizam um método *fuzzy* híbrido baseado em regras com uma componente matemática (SHAW E SIMÕES, 1999). Um modelo muito conhecido é o de Takagi-Sugeno-Kang (**TSK**) (TAKAGI AND SUGENO, 1985; SUGENO AND KANG, 1988), cujo consequente da regra é uma combinação linear das variáveis de entrada parametrizada por coeficientes constantes (SANDRI E CORREA, 1999). O formato genérico de uma inferência na forma paramétrica é dado por:

$$SE (e_1 = A_1, e_2 = A_2, \dots, e_k = A_k) ENTÃO s_i = f(e_1, e_2, \dots, e_k) \quad (2.9)$$

ou

$$SE (e_1 = A_1, e_2 = A_2, \dots, e_k = A_k) ENTÃO s_i = a_0^i + a_1^i e_1 + \dots + a_k^i e_k \quad (2.10)$$

em que: e_k é a k -ésima variável de entrada, A_k é o k -ésimo termo linguístico, s_i é a variável de saída da i -ésima regra da base de conhecimento do controlador *fuzzy* e o coeficiente a_k^i faz parte do conjunto de parâmetros a ser identificado para cada regra.

O subsistema 2 deste trabalho é baseado no controle *fuzzy-TSK* paramétrico cujo consequente é uma combinação linear de 2 (duas) variáveis de entrada (erro e variação do erro da umidade do solo).

• **Decodificação *fuzzy* ou defuzzificação** - Converte valores *fuzzy* de saída, inferidos pela base de regras, em um valor discreto numérico a ser aplicado como sinal de controle nos processos reais (SANDRI E CORREA, 1999; JANTZEN, 2007). Essa interface de decodificação é utilizada nos controladores *fuzzy* clássicos. Alguns dos métodos de *defuzzificação* mais utilizados estão descritos a seguir:

- *Centro-de-Área ou Centro-de-Gravidade ou Centroide (C-o-A: Centre of Area)* - A saída discreta é o centro de gravidade da área formada pela união de todas as contribuições dos termos de saída *fuzzy*, gerados pelas regras de inferência (SHAW E SIMÕES, 1999). O cálculo é feito pela média ponderada da pertinência dos elementos desse conjunto, conforme equação (2.11) (JANTZEN, 2007).

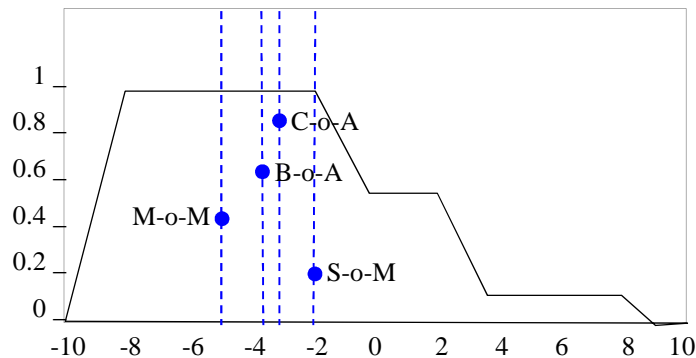
$$u_{C-o-A} = \frac{\sum_i x_i \cdot \mu_c(x_i)}{\sum_i \mu_c(x_i)} \quad (2.11)$$

Em que: x_i é a posição do centroide da função de pertinência individual e $\mu_c(x_i)$ é a área da função de pertinência do conjunto conclusão C . Neste trabalho, a saída do sistema supervisorio *fuzzy* utiliza o método centroide.

- *Bissetor-de-Área (B-o-A: Bisector of Area)* - Encontra a abscissa da linha vertical que particiona a área sob a função de pertinência do conjunto *fuzzy* de conclusão em duas sub-regiões de igual tamanho (JANTZEN, 2007). Ocasionalmente, pode coincidir com o centroide da área.
- *Média-dos-Máximos ou Solução Mais Plausível (M-o-M: Mean of Maxima)* - A saída *defuzzificada* é a média aritmética de todos os máximos, mesmo que cada função de pertinência tenha mais de um.
- *Primeiro ou Menor Máximo (Smallest of Maximum - S-o-M)* - O valor de saída *defuzzificada* corresponde ao ponto onde o grau de pertinência da função associada (área formada pela união de todas as contribuições de regras) atinge o primeiro valor máximo.

A Figura 2.8 apresenta a área resultante das contribuições das regras de um sistema *fuzzy* e os resultados dos valores *defuzzificados* para os métodos descritos anteriormente.

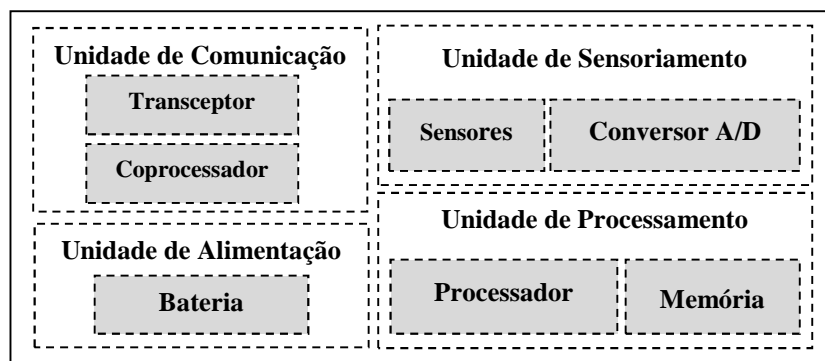
Figura 2.8 – Saídas discretas *defuzzificadas* (adaptada de SANDRI E CORREA, 1999)



2.3 Sensores sem fio

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) integram dispositivos autônomos, denominados nós, com capacidade de sensoriamento do ambiente, de processamento e armazenamento da informação coletada e de transmissão de dados via rádio no modo *multi-hop* (LOUREIRO et al., 2003).

Figura 2.9 – *Hardware* básico de um nó sensor



Os nós de rede possuem diferentes dimensões de acordo com a aplicação, no entanto, apresentam uma estrutura básica comum, conforme ilustrado na Figura 2.9 (AKYILDIZ et al., 2002; LOUREIRO et al., 2003; DARGIE AND POELLABAUER, 2010).

Os dispositivos móveis podem ter funcionalidades específicas, de acordo com o programa embarcado: *nós sensores* (produzem sinais mensuráveis para as mudanças físicas do ambiente monitorado), *nós atuadores* (executam uma ação de controle no objeto monitorado) e *nós transdutores* (agregam as duas funcionalidades anteriores) (LOUREIRO et al., 2003).

Em relação à hierarquia de rede, os nós podem ser classificados em *nós coordenadores* (desempenham funções administrativas para estabelecimento e manutenção da rede), *nós*

sortedouros ou *sink* (recebem dados das medições efetuados pelos outros nós), *nós gateway* (proveem comunicação entre nós de diferentes grupos ou *clusters*) e os *end-device* (nós sensores ou dispositivos finais).

A literatura (AKYILDIZ et al., 2002; LOUREIRO et al., 2003; KIM et al., 2008; FERNANDES, 2010) indica os padrões IEEE 802.11 (*Wi-Fi*), IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*) e IEEE 802.15.4 (*ZigBee*) como os protocolos de comunicação mais utilizados pelas redes de sensores por atenderem aos requisitos de simplicidade operacional, alcance, conservação de energia, baixo custo e taxa de transmissão de dados.

- **Aspectos gerais**

As redes de sensores sem fio se distinguem por características como a distribuição massiva de nós sensores, a capacidade de auto-organização e autoconfiguração da rede, o esforço cooperativo entre nós de rede para realização de tarefas, o processamento e armazenamento local de dados, a facilidade de comunicação à distância, topologia variável e instalação em locais de difícil acesso. A seguir, são enumerados alguns aspectos e particularidades dessas redes, citados por Loureiro et al. (2003):

- o *endereçamento dos sensores* deve ser usado quando for relevante identificar a localização dos dados coletados pelos nós;
- algumas aplicações, como agricultura de precisão, restringem a *mobilidade dos sensores*, uma vez que os sensores não podem se mover em relação ao sistema onde coletam os dados;
- a *escalabilidade* é uma característica intrínseca das redes de sensores sem fio e permite que a *quantidade de sensores* instalados atinja valores da ordem de milhares de nós, como em aplicações de monitoramento ambiental;
- a escolha dos protocolos de comunicação e algoritmos de gerenciamento da rede deve considerar a *limitação de energia disponível* para as entidades consumidoras (processador, sensor e interface de rádio) presentes em um nó sensor.

Nas redes de automação industrial, a demanda de comunicação entre os nós sensores e dispositivos de controle é plenamente atendida com tecnologias de baixa taxa de transferência de dados, baixa latência e baixo consumo de energia para preservar a vida útil das baterias (MALAFAYA et al., 2005). Fernandes (2010) destaca que o uso de padrões de rede do tipo LR-WPAN (*Low Rate - Wireless Personal Area Network*), como o IEEE 802.15.4/*ZigBee*,

atende aos requisitos citados anteriormente, necessários para aplicação com sensoriamento remoto de que trata este trabalho.

O nó sensor utilizado neste trabalho é o dispositivo SunSPOT™ (*Sun Small Programmable Object Technology*) da Sun Microsystems, Inc., que opera como um nó de rede sem fio IEEE 802.15.4 (SUN MICROSYSTEMS, 2009).

2.3.1 Padrão IEEE 802.15.4/ZigBee

O padrão IEEE 802.15.4 foi desenvolvido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*). As especificações desse padrão contemplam a camada física (*PHY*) e a camada de controle de acesso ao meio (*MAC*). O protocolo *ZigBee* foi desenvolvido pela *ZigBee Alliance*, a partir dos serviços oferecidos pela norma do IEEE. Outros serviços foram adicionados como os de rede, de segurança e de aplicação (FERNANDES, 2010).

- **Características da LR-WPAN/IEEE 802.15.4/ZigBee**

A literatura (MALAFAYA et al., 2005; ZHOU et al., 2009; FERNANDES, 2010) destaca as seguintes características das redes LR-WPAN:

- são definidas 3 (três) *topologias de rede* para o padrão *ZigBee*: *estrela (star)*, provê maior tempo de operação para as baterias; *malha (mesh)*, possui maior nível de confiabilidade e escalabilidade; e *árvore (tree)*, combina benefícios das topologias anteriores;
- as *taxas de transmissão de dados* permitidas são 20 kbps, 40 kbps, 100 kbps e 250 kbps;
- as *bandas de frequência* disponíveis para a tecnologia *ZigBee* estão na faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). A canalização utilizada está nas faixas de 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz e bandas **UWB** (*Ultra Wide Band*);
- existem 2 (dois) *tipos de dispositivos funcionais*: o **RFD** (*Reduced-Function Device*) e o **FFD** (*Full-Function Device*). O primeiro opera com funções reduzidas e em aplicações muito simples (tipo liga-desliga), que utilizam as menores taxas de dados e poucos recursos de processamento e memória. Os dispositivos **FFD** usam todas as funções disponíveis e podem operar em 3 (três) classes: dispositivo final (*end-device*), roteador (*router*) ou coordenador da rede (*coordinator*);
- o padrão *ZigBee* permite um máximo de 65.535 nós por coordenador;

- a duração das baterias utilizadas pelos dispositivos *ZigBee* varia de 100 (cem) a 1.000 (mil) dias, e o alcance máximo é de 100 (cem) metros;

2.4 Comentários e conclusão

Foram introduzidos os fundamentos teóricos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa proposta. As inter-relações entre solo/água/clima/planta e algumas técnicas de medição de parâmetros físicos na agricultura foram apresentadas. Os princípios da lógica *fuzzy* e a estrutura básica de um controlador nebuloso foram descritos, enfatizando as características que deverão ser usadas adiante. Finalmente, alguns aspectos dos nós sensores sem fio e itens do padrão IEEE 802.15.4/ZigBee foram abordados, uma vez que foram aplicados ao sistema *fuzzy* embarcado deste trabalho.

Com o embasamento teórico visto, o capítulo seguinte descreve a construção experimental do sistema inteligente *fuzzy* especialmente diferenciado para um sistema de irrigação. Será apresentada uma breve descrição dos dispositivos de *hardware*, sensores e atuadores utilizados no projeto do controlador.

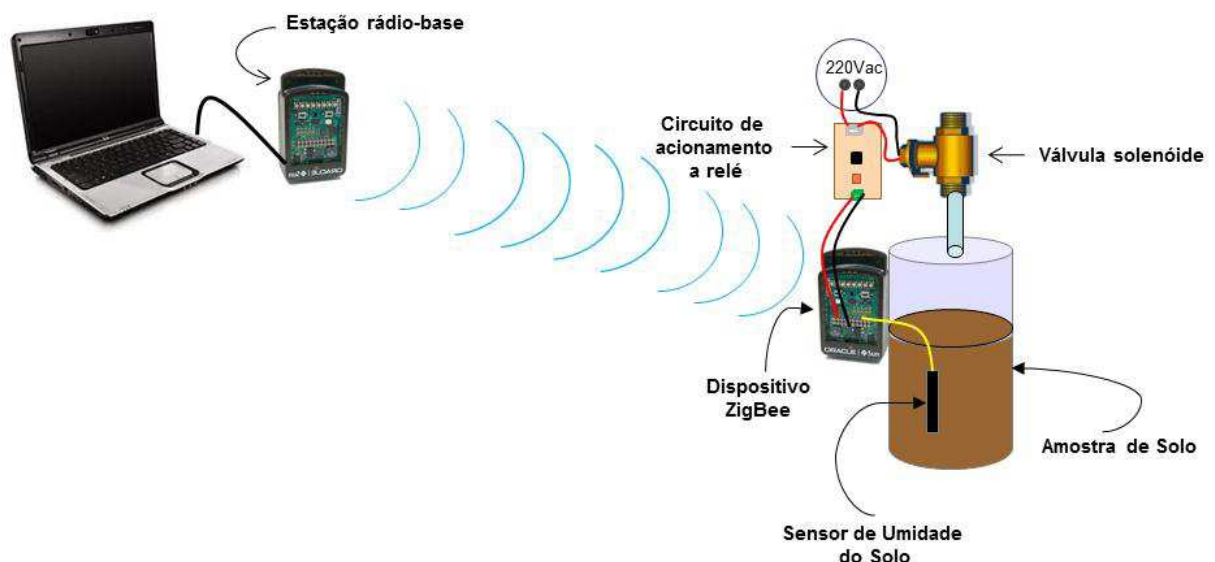
3. Estrutura experimental

Este capítulo apresenta a estrutura experimental do sistema inteligente com lógica *fuzzy* espacialmente diferenciado para controle de um sistema de irrigação. As subseções descrevem, na sequência, o ambiente de teste e o sistema de irrigação construído, as amostras de solo coletadas, os sensores utilizados no experimento, o dispositivo sensor sem fio e o elemento atuador usados no controle do conjunto solo-planta.

3.1 Ambiente de teste e o sistema de irrigação

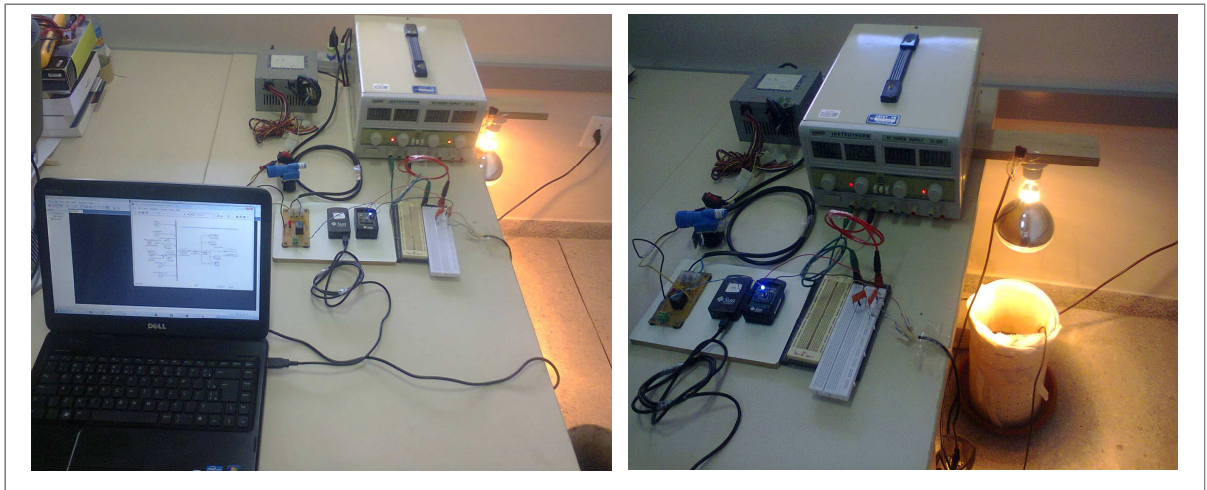
O sistema de irrigação experimental foi instalado no IFPB (*Campus* João Pessoa) e se compõe de recipientes que acondicionam as amostras de solo, sensores de umidade do solo, dispositivos móveis SunSPOT™ e um circuito de acionamento do atuador, de acordo com representação na Figura 3.1.

Figura 3.1– Esquema ilustrativo do sistema experimental



As amostras de solo foram colocadas em recipientes feitos de tubo de PVC, com 30 cm de diâmetro e 50 cm de altura. Cada cilindro e sua respectiva base foram perfurados para permitir a evaporação e o escoamento da água. Para simular a ação da radiação solar no processo de secagem natural do solo, foi instalada uma lâmpada infravermelha de secagem 220V_{CA}/250W. A montagem do ambiente de teste simplificado está ilustrada na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Foto do sistema de controle de irrigação



Em cada recipiente de PVC, foi colocada uma amostra de solo distinta e um sensor de umidade do solo diferente (sensores Decagon EC-5 e EC-10), de forma a criar um ambiente espacialmente diferenciado. Em relação à alimentação DC/AC do experimento, foram utilizadas 3 (três) tipos de fonte de tensão: uma fonte de 12V_{CC} (modelo ATX de microcomputadores) para o circuito de acionamento do atuador, uma fonte regulável digital simétrica 0-30V_{CC} (Instrutherm FA-3030) para alimentação dos sensores e a tensão monofásica de rede 220V_{CA} para a eletroválvula.

As especificidades das amostras de solo coletadas, dos sensores de umidade do solo, do circuito de acionamento, do atuador e do dispositivo móvel SunSPOT™ ZigBee serão apresentadas nas seções seguintes.

3.2 Amostras de solo

Segundo a Embrapa (2009), a amostragem do solo demanda cuidados especiais, para que não se comprometa a validade técnica dos procedimentos que identificam suas características físico-químicas.

Squiba et al. (2011) indicam que, para a amostra do solo representar fielmente essas características, amostras simples devem ser retiradas de pontos distintos do terreno, para posteriormente serem misturadas e formar uma amostra composta. No entanto, para o propósito desta pesquisa, foram coletadas apenas amostras simples de ponto único, retiradas com pá de jardinagem, em áreas rurais de alguns municípios do estado da Paraíba, conforme ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Foto da amostra de solo coletada em canavial (Santa Rita-PB)



A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos dados das amostras de solo coletadas.

Tabela 3.1 – Resumo dos dados das amostras de solo coletadas

Amostra	Tipo de solo	Local da coleta
1	Areia	Zona Rural de Santa Rita (PB)
2	Argila-arenosa	Zona Rural de Sapé (PB)

As amostras foram submetidas à análise físico-química, realizada pelo Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) da UFCG. A referida análise indicou as propriedades utilizadas (granulometria, classe textural, condutividade elétrica) para a variável de entrada **TSOLO (TIPO-DE-SOLO)** do sistema *fuzzy* Mamdani e para a escolha da equação de calibração dos sensores instalados. Os dados da análise de cada amostra de solo estão no Anexo I deste documento.

3.3 Sensores

Para o sensoriamento da umidade do solo, foram utilizados 2 (dois) sensores capacitivos da Decagon Devices, Inc. (DECAGON, 2011) e foram realizados procedimentos de calibração específica para o tipo de solo no qual estavam inseridos, conforme as recomendações do fabricante.

A seguir, estão descritas as características técnicas básicas de cada tipo/modelo de sensor:

- **Sensores capacitivos ECH₂O – modelos EC-5 e EC-10**

O uso de sondas de capacitância tem se destacado como método indireto para determinação da umidade do solo por aliarem baixo custo e boa exatidão (TARDIF, 2003; BORIM E PINTO, 2006; MIRANDA et al., 2007; RÊGO SEGUNDO, 2010). Os sensores capacitivos ECH₂O EC-5 e EC-10 da Decagon Devices, Inc. medem a constante dielétrica do solo e determinam indiretamente o conteúdo volumétrico de água (*Volumetric Water Content* – VWC). Como a constante dielétrica da água é significativamente maior que a do ar e dos minerais presentes no solo, a variação da constante dielétrica do solo indica o teor de água presente (vide Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Constante dielétrica de materiais

Material	Constante dielétrica (ou permissividade relativa ϵ) [*]
Vácuo	1
Ar	1,0006
Areia seca	2,5
Silte seco	3,5
Minerais	≤ 12
Água destilada	80

* Segundo Miranda et al. (2007) e Rêgo Segundo (2010)

Os sensores da Decagon fornecem leituras de potencial elétrico em mV proporcionais à constante dielétrica do conjunto solo-água-ar e, portanto, à umidade volumétrica do solo (MIRANDA et al., 2007). A seguir, estão descritas as especificações técnicas dos sensores ECH₂O EC-5 e EC-10:

Tabela 3.3 – Especificações técnicas dos sensores EC-5 e EC-10 (DECAGON, 2010)

Especificação	EC-5	EC-10
Tempo de medição	10 ms	10 ms
Precisão	$\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 (\pm 2\%)^*$	$\pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3 (\pm 2\%)^*$
Resolução	$0,001 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$
Faixa de medição	0-Saturação	0-40% VWC
Alimentação	$2,5V_{CC}$ - $3,6V_{CC}$ @10mA	$2,5V_{CC}$ @2mA a $5V_{CC}$ @7mA
Saída	10-40% da Tensão de Excitação	10-40% da Tensão de Excitação
Dimensões	8,9cm x 1,8cm x 0,7cm	14,5cm x 3,17cm x 0,15cm

* Com calibração específica de solo

As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram os sensores capacitivos utilizados neste trabalho.

Figura 3.4 – Sensor capacitivo ECH₂O modelo EC-5 (DECAGON, 2011)



Figura 3.5 – Sensor capacitivo ECH₂O modelo EC-10 (DECAGON, 2011)



Para obtenção da curva de calibração, os procedimentos utilizados basearam-se nos descritos na literatura (MIRANDA et al., 2007; LEITE et al., 2007; DECAGON, 2010). O estudo foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção I do IFPB (*Campus* João Pessoa) com as amostras de solo I e II, descritas na seção 3.2.

Os detalhes da calibração específica dos sensores capacitivos EC-5 e EC-10, por tipo de solo, bem como os dados, o gráfico da curva e a equação obtidos estão no Anexo II deste documento.

• Outros sensores

Para a definição da referência de umidade do solo, outras grandezas físicas podem ser medidas. O dispositivo sem fio SunSPOT™, utilizado neste trabalho (descrito na seção 3.4), possui um conjunto de sensores embarcados (sensor de temperatura, sensor de luminosidade e acelerômetro) para serem utilizados em aplicações diversas. No entanto, como o objetivo deste trabalho é a utilização apenas dos sensores de umidade do solo, foram utilizadas funções

matemáticas conhecidas para caracterizar as variáveis climáticas, em substituição a sensores reais.

3.4 Dispositivo móvel ZigBee

O sistema de comunicação sem fio utilizado é do tipo LR-WPAN, construído com o dispositivo SunSPOT™ (*Sun Small Programmable Object Technology*) da Sun Microsystems, Inc., que opera como um nó de rede sem fio IEEE 802.15.4 (SUN MICROSYSTEMS, 2009). A Figura 3.6 apresenta a plataforma de *hardware* que contém um processador principal ARM920T de 32 bits, operando como máquina virtual JAVA™ *Squawk* (JVM – *Java Virtual Machine*).

Figura 3.6 – Dispositivo SunSPOT™ (ARAÚJO JÚNIOR, 2011)



A comunicação de rede com os dispositivos SunSPOT™ dá-se por meio de um rádio transceptor com antena integrada, compatível com padrão 802.15.4, operando na faixa de 2,4 GHz a 2,4835 GHz (faixa não-licenciada), potência de transmissão variando de -24dBm a 0dBm, sensibilidade de recepção de -90 dBm e taxa efetiva de bits de 250 kbps.

Estes dispositivos possuem 2 (duas) configurações (SUN MICROSYSTEMS, 2009):

- Estação-base (*basestation*) faz o papel de *gateway* entre outros elementos SunSPOT™ e o computador (*host workstation*). Esse nó é alimentado via conexão USB diretamente ao computador, por isso não possui bateria. Também não tem placa de aplicação com sensores;

- Nó eSPOT ou nó-sensor, possui bateria recarregável de LI-ION e a placa eDEMO (placa-filha) com acelerômetro de 3 (três) eixos, sensor de luz ambiente, sensor de temperatura, 8 (oito) LEDs tricolores, 2 (duas) chaves tipo *push-buttons*, 6 (seis) entradas analógicas A0-A5, 5 (cinco) portas gerais de entrada/saída D0-D4 e 4 (quatro) saídas especiais H0-H3 (Figura 3.7 e Tabela 3.4).

Figura 3.7 – Distribuição de pinos de entrada e saída



Tabela 3.4 – Características elétricas dos pinos de entrada/saída

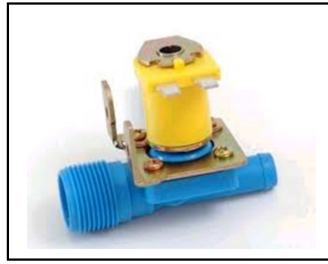
Pino	Descrição	Tensão/Corrente
SW1	Chave <i>push-button</i>	V _{CC} (+3V)
SW2	Chave <i>push-button</i>	V _{CC} (+3V)
V _{CC}	Saída especial	+3V _{CC} – 100 mA
V _{+5V}	Saída especial	+5V _{CC} – 100 mA
V _H	Entrada especial	+4.5V _{CC} até 18V _{CC}
A0-3	4 Entradas analógicas	10bits, 0V _{CC} até +3V _{CC}
D0-4	5 Entradas/Saídas programáveis	-
H0-3	4 Saídas <i>high-voltage</i>	0 V _{CC} até V _H – 125 mA
GND	Terra	-

Para este trabalho, foi estabelecida a seguinte configuração para os pinos de entrada e saída: pino A2, entrada do sinal do sensor de umidade do solo em mV; pino H0, saída do pulso de +3V_{CC} para o circuito atuador.

3.5 Atuadores

O subsistema de controle *fuzzy-TSK* deverá atuar sempre que houver uma diferença (ou erro) entre o *set point* e a umidade do solo medida. O sinal de controle será aplicado no atuador do sistema físico de irrigação e, neste experimento, foi utilizada uma válvula-solenóide de máquina de lavar roupa, como a ilustrada na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Eletroválvula ou válvula-solenoide utilizada como atuador



O sinal de controle do subsistema *fuzzy* 2 será um pulso de duração variável enviado pelo controlador embarcado no SunSPOT™ ao circuito de acionamento da válvula-solenoide (Figura 3.9). A duração do pulso em segundos é igual a 10 (dez) vezes o valor da tensão calculada pelo controlador *fuzzy*-TSK.

- **Circuito de acionamento da eletroválvula ou válvula-solenoide**

Como a tensão de acionamento das eletroválvulas é de 220 V_{CA} (RMS) e o sinal de controle aplicado pelo SunSPOT™ é um sinal PWM de amplitude +3 V_{CC}, foi necessária a construção de um circuito de interface entre esses dispositivos. A Figura 3.9 apresenta o esquema e os componentes do circuito de acionamento da eletroválvula.

Figura 3.9 – Circuito de interface SunSPOT-Eletroválvula

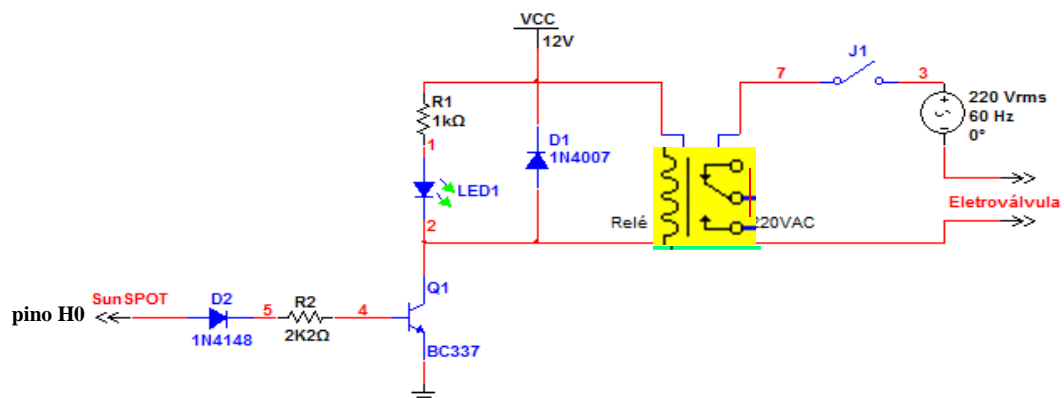


Figura 3.10 – Foto do circuito de acionamento da eletroválvula



Quando o pino de saída do SunSPOT™ (H0) envia o pulso de controle, o transistor BC337 conduz, fazendo com que circule uma corrente pela bobina do relé $+12V_{CC}/10A-220V_{CA}$. Os terminais de contatos do relé se fecham e a eletroválvula é acionada. Os diodos de proteção D1 (1N4007) e D2 (1N4148) são usados para proteger o transistor e o SunSPOT™, respectivamente, de correntes reversas.

3.2 Comentários e conclusões

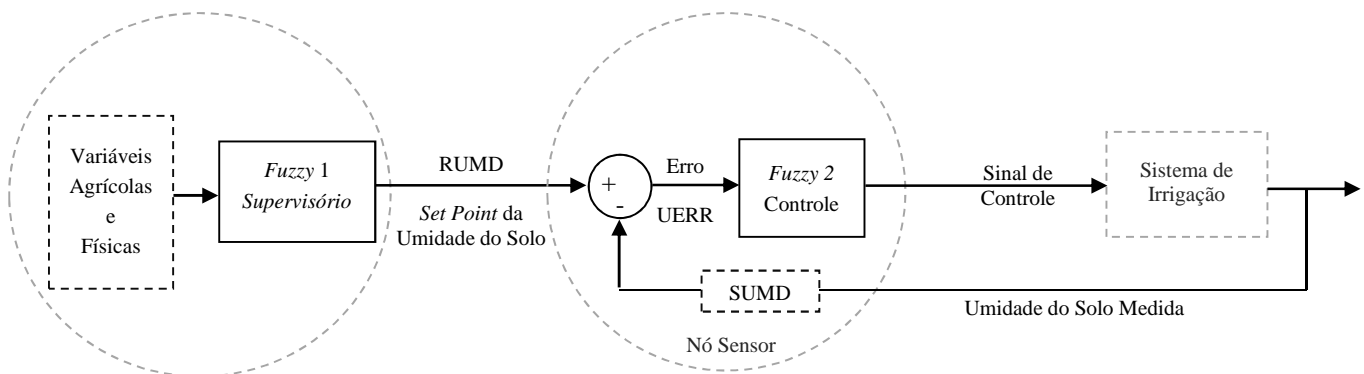
Foram descritos o arranjo experimental e os dispositivos empregados no sistema inteligente para controle espacialmente diferenciado de um sistema de irrigação. As amostras de solo coletadas foram indicadas. A tecnologia e as características dos sensores de umidade do solo foram mostradas. A escolha dos atuadores foi baseada nas dimensões da infraestrutura do experimento e no custo final do trabalho de pesquisa.

Apresentadas as definições e os ajustes da implementação experimental, o capítulo seguinte discorrerá sobre a arquitetura do sistema de controle *fuzzy*, as escolhas das variáveis de entrada e saída e as diferentes bases de regras.

4. Modelamento dos sistemas *fuzzy*

Este capítulo apresenta a arquitetura do sistema *fuzzy* para controle espacialmente diferenciado de um sistema de irrigação, conforme diagrama da Figura 4.1. A primeira seção descreve o subsistema *fuzzy* Mamdani para definição da referência (*set point*) da umidade do solo de acordo com as necessidades hídricas do conjunto solo-planta. Será, também, detalhada a escolha das variáveis de entrada e saída do citado modelo de inferência. Na seção seguinte, serão apresentados os parâmetros do subsistema de controle *fuzzy*-TSK para seguimento da referência de umidade do solo estabelecida.

Figura 4.1 – Diagrama do sistema *fuzzy* para controle de umidade do solo



4.1 Sistema *fuzzy* para referência de umidade do solo

Segundo Gomes (1994), o projeto de um sistema de irrigação requer o conhecimento das particularidades do conjunto solo-planta-clima para definir as dotações hídricas suportadas pelo solo e que, simultaneamente, satisfaçam as necessidades das culturas em seus diversos estágios de desenvolvimento. Assim, estes aspectos agrônômicos básicos nortearam a arquitetura do sistema *fuzzy* Mamdani que define o *set point* de umidade do solo:

- **Determinação da quantidade de água suportada pelo solo**

Depende das *características físicas e hídricas do solo* e do *tipo de planta* a ser cultivada. Na prática, a quantidade de água suportada pelo solo está associada à Lâmina de Irrigação Líquida Máxima (L_{lm}), relacionada a Capacidade de campo (Cc) e o Ponto de murchamento (Pm) do solo. Os parâmetros Cc e Pm são características físicas associadas às

classes texturais do solo. Outros parâmetros importantes são a profundidade efetiva das raízes (Z_R) e o déficit hídrico tolerável de umidade (Y) suportado pela planta, parâmetros inerentes à espécie vegetal cultivada.

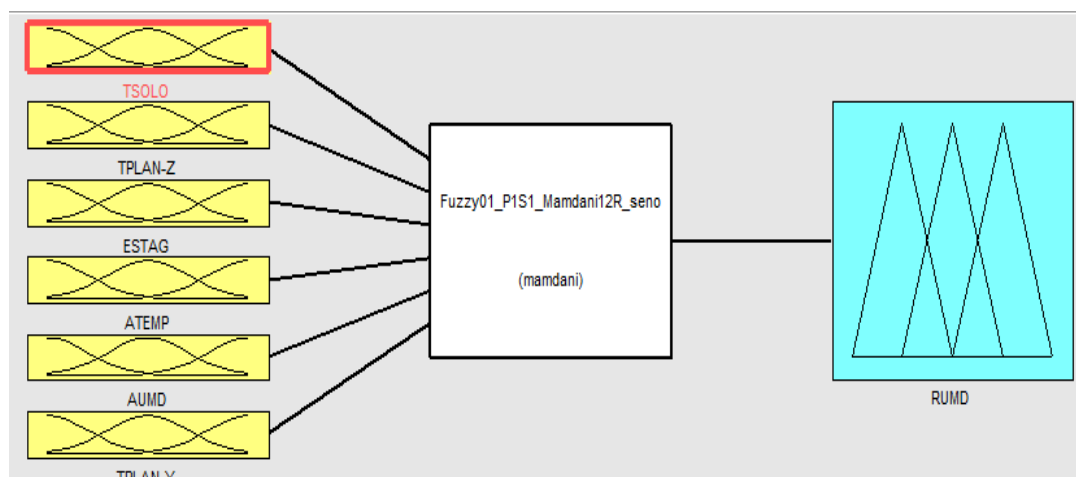
As variáveis **TSOLO** (**TIPO-DE-SOLO**), representada pela característica física **Cc**, **TPLAN-Z** (**TIPO-DE-PLANTA-RAIZ**), representada pelo parâmetro Z_R , e **TPLAN-Y** (**TIPO-DE-PLANTA-DEFICIT-HIDRICO**), que representa o parâmetro Y , foram definidas como variáveis de entrada do sistema *fuzzy* Mamdani. O parâmetro **Pm** não foi utilizado uma vez que a variável **TPLAN-Y** garantirá que o *set point* de umidade de solo não atingirá o ponto de murchamento.

- **Determinação das necessidades hídricas das plantas segundo seu desenvolvimento**

Depende do *tipo de cultura* e das *condições climáticas* da região de plantio. Na prática, os conhecimentos da Necessidade de Irrigação Líquida (N_l) e da Lâmina de Irrigação Líquida Máxima (L_{lm}) permitem a determinação da frequência de irrigação ou Turno de Rega (**TR**) a ser aplicado. O parâmetro N_l depende da Evapotranspiração Potencial da cultura (ET_p), do Coeficiente de Cultivo (K_c) e da disponibilidade hídrica da região. Neste trabalho, a variável *fuzzy* **ESTAG** (**ESTÁGIO-DE-CRESCIMENTO-DA-PLANTA**) representa a variação do Coeficiente de Cultivo K_c (associado a ET_p) ao longo do desenvolvimento da planta e as variáveis *fuzzy* **ATEMP** (**TEMPERATURA-DO-AR**) e **AUMD** (**UMIDADE-DO-AR**) representam as condições climáticas da região.

Neste trabalho, a umidade do solo é definida dinamicamente de acordo com as necessidades hídricas da planta, em diferentes tipos de solo, estágios de crescimento e condições climáticas. Com o *set point* de umidade do solo determinado, o controle *fuzzy* atuará sobre o sistema de irrigação, objetivando seguir a referência.

Figura 4.2 – Modelo de inferência *fuzzy* para *set point* de umidade do solo



Em resumo, as variáveis de entrada do subsistema *fuzzy* serão relacionadas à quantidade de água suportada pelo solo (**TSOLO**, **TPLAN-Z**), às necessidades hídricas das plantas (**TPLAN-Y**, **ESTAG**) e às condições climáticas da região (**ATEMP**, **AUMD**) e determinarão a variável de saída **RUMD** (**REFERENCIA-DE-UMIDADE-DO-SOLO**) ou o *set point* de umidade do solo, segundo o modelo de inferência ilustrado na Figura 4.2.

4.1.1 Variáveis do Sistema *Fuzzy* Mamdani

a) Variáveis de entrada

a.1) **TSOLO (TIPO-DE-SOLO)**: As dotações hídricas dos sistemas de irrigação devem manter a faixa de água disponível no solo entre os valores de **Pm** e **Cc**, para evitar déficit hídrico ou saturação (GOMES, 1994; LIMA, 2007). Assim, o Universo de Discurso (**UD**) dos termos da variável **TSOLO** foi baseado nos valores de **Cc** de diversas texturas de solo (Tabelas 4.1 e 4.2), para evitar que a *defuzzificação* do sistema gerasse uma saída próxima do **Pm** ou uma dotação hídrica *fuzzy* muito aquém da necessidade da planta.

Tabela 4.1 – Valores de **Pm** e **Cc** (OTTONI FILHO, 2003)

Textura	Pm	Cc	Referência
Areia	2,4	9,0	Salter & Williams (1965b, apud Ottoni Filho, 2003)
Areia	3,0	14,5	Choudhury & Millar (1981, apud Ottoni Filho, 2003)
Areia/Areia franca	4,0	13,7	Salter & Williams (1965b, apud Ottoni Filho, 2003)
Areia/Areia franca	6,1	19,9	Oliveira & Melo (1971, apud Ottoni Filho, 2003)
Areia franca/Areia	3,3	10,3	Macedo et al. (1998, apud Ottoni Filho, 2003)
Areia franca	5,1	17,6	Choudhury & Millar (1981, apud Ottoni Filho, 2003)
Franco arenosa	8,7	17,0	Fabian & Ottoni Filho (2000, apud Ottoni Filho, 2003)
Franco argilo arenosa	11,0	24,0	Macedo et al. (1998, apud Ottoni Filho, 2003)
Franco argilo siltosa	18,5	34,5	Salter & Williams (1965b, apud Ottoni Filho, 2003)
Franco argilosa	16,3	30,1	Salter & Williams (1965b, apud Ottoni Filho, 2003)
Argila	20,0	28,0	Araújo Filho (1992, apud Ottoni Filho, 2003)
Muito argilosa	23,5	31,3	Araújo Filho (1992, apud Ottoni Filho, 2003)
Muito argilosa	23,0	36,0	Freire (1979, apud Ottoni Filho, 2003)
Muito argilosa	36,6	47,0	Medina & Oliveira (1987, apud Ottoni Filho, 2003)

Os valores de **Cc** para solos siltosos foram baseados nos indicados por Falker (2008).

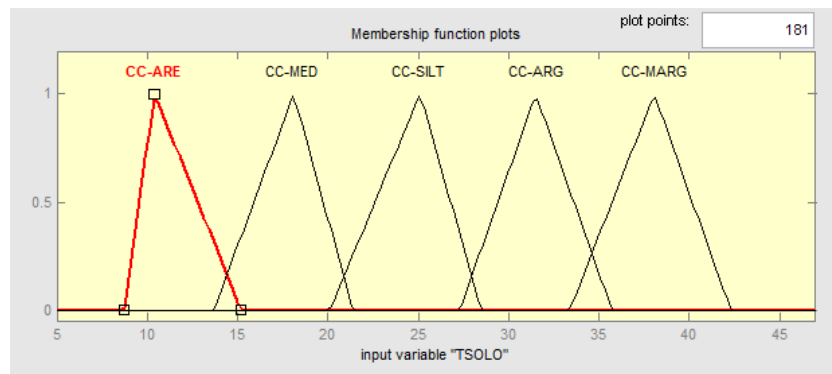
Tabela 4.2 – Valores de **Pm** e **Cc** para texturas de solo siltosas (FALKER, 2008)

Textura	Pm	Cc	Referência
Argilo-siltosa	19,2	39,9	Falker (2008)
Franco-argilo-siltosa	18,7	39,8	Falker (2008)
Siltosa	17,2	38,4	Falker (2008)
Franco-siltosa	16,0	35,3	Falker (2008)

Os termos linguísticos de **TSOLO** são {CC-ARE, CC-MED, CC-SILT, CC-ARG, CC-MARG}, indicativos das classes texturais mais popularmente conhecidas dos tipos de solo brasileiros, respectivamente: arenoso, médio, siltoso, argiloso e muito argiloso. O uso dos valores de **Capacidade de Campo (Cc)** para definir o **UD** desses termos remete ao conceito de disponibilidade de água (**DT**) para a planta.

As funções de pertinência dos termos da variável **TSOLO** estão representadas na Figura 4.3:

Figura 4.3 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **TSOLO**



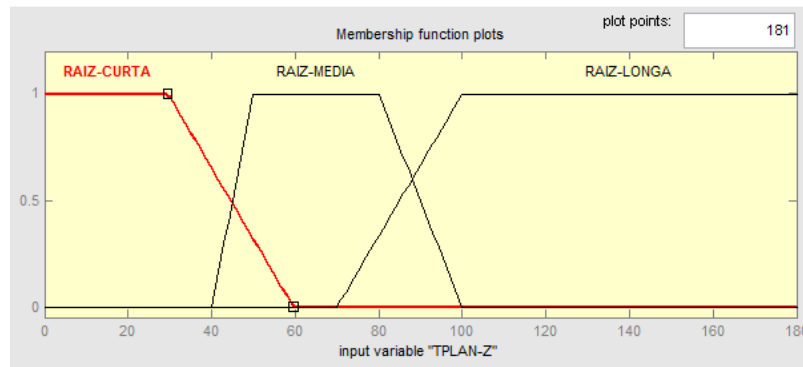
a.2) **TPLAN-Z (TIPO-DE-PLANTA-RAIZ)**: Essa variável *fuzzy* está associada à profundidade do sistema radicular da planta no solo, ou, à Profundidade Efetiva das raízes da planta (**Z_R**) onde se concentram 80% de suas raízes. A Tabela 4.3 mostra valores de **Z_R** para alguns tipos de cultura (GOMES, 1994; PIRES et al., 1999).

Tabela 4.3 – Profundidade efetiva das raízes (GOMES, 1994; PIRES et al., 1999)

Cultura	Gomes (1994)	Pires et al. (1999)
Abacaxi	30-60	20-70
Hortaliças (ex. alface)	20-40	10-15
Arroz	-	10-25
Algodão	80-180	30
Cana-de-açúcar	50-100	70
Cítricos (ex. laranja)	90-150	60
Melancia	100-150	-
Melão	70-100	-
Milho	60-120	40
Morango	-	30
Tomate	60-120	50

A relevância desse parâmetro é evidenciada por Gomes (1994): “(...) esta profundidade efetiva determina a espessura da camada de solo que é utilizada no cálculo da lâmina de água nos projetos dos sistemas de irrigação (...)”. Assim, quanto maior a profundidade Z_R , maior a necessidade de dotação hídrica. Os termos linguísticos para a variável **TPLAN-Z** serão associados aos intervalos de Z_R , conforme representação das funções de pertinência abaixo:

Figura 4.4 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **TPLAN-Z**



Os valores do **UD** que definem cada termo linguístico estão distribuídos numa escala de [0,180], conforme média dos valores descritos na Tabela 4.3. Os intervalos para cada tipo são: RAIZ-CURTA = [0,60]; RAIZ-MEDIA = [40,100]; RAIZ-LONGA = [70,180].

a.3) **TPLAN-Y (TIPO-DE-PLANTA-DÉFICIT-HÍDRICO)**: O déficit hídrico tolerável (**Y**) representa a tolerância das plantas à redução do conteúdo de água no solo, mantendo, ainda, sua capacidade de absorção de água (GOMES, 1994). **Y** é dado pela porcentagem entre a Capacidade de Água Disponível (**CAD**), no teor limite de umidade do solo (U_Y), e a Disponibilidade Total de Água (**DT**). Quanto maior o valor de **Y**, maior a resistência da planta à diminuição do conteúdo de água no solo e menor a necessidade de dotação hídrica (ou menor lâmina d'água).

Dessa forma, considera-se como premissa para determinação da referência de umidade do solo que:

$$U_Y \leq RUMD \leq Cc, \quad (4.1)$$

em que: U_Y é a umidade do solo crítica de acordo com o parâmetro **Y** da planta, Cc é teor de umidade do solo na Capacidade de Campo e **RUMD** é a variável *fuzzy* de saída que estabelece o *set point* da umidade do solo.

A equação (4.2) estabelece a relação entre os referidos parâmetros:

$$U_Y = Cc - Y.(Cc - P_m) \quad (4.2)$$

A Tabela 4.4 mostra valores de Déficit Hídrico Tolerável para alguns tipos de cultura.

Tabela 4.4 – Déficit hídrico tolerável para diferentes culturas

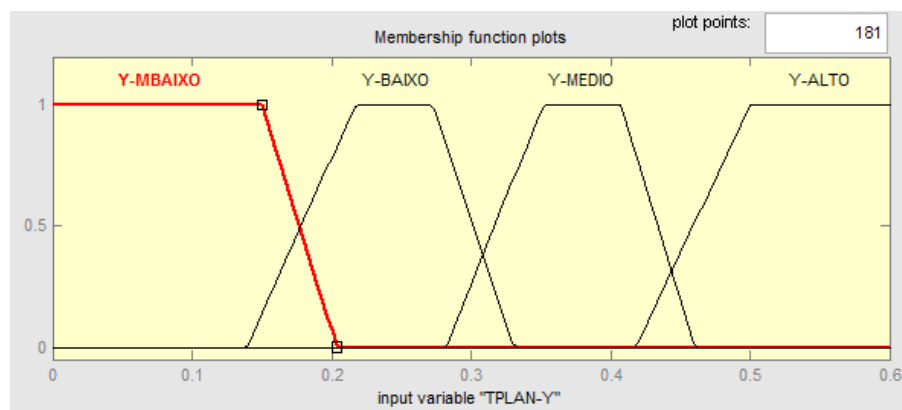
Cultura	Déficit Hídrico Tolerável (%)
	Gomes (1994)
Alface	35
Cana-de-açúcar	15
Feijão	50
Laranja	35
Melão	20
Milho	40
Morango	10
Tomate	45

Exemplificando para o tomate: a absorção de água pelas suas raízes fica comprometida quando a retirada é maior que 45% ($Y = 45$) da capacidade de água disponível (**CAD**) no solo (CARAMORI, 2006). Os termos linguísticos para a variável **TPLAN-Y** são {Y-MBAIXO, Y-BAIXO, Y-MEDIO, Y-ALTO}. Os significados estão descritos na Tabela 4.5 e as funções de pertinência estão ilustradas na Figura 4.5:

Tabela 4.5 – Termos linguísticos da variável **TPLAN-Y**

Y-MBAIXO	Y (Déficit Hídrico Tolerável) Muito Baixo
Y-BAIXO	Y (Déficit Hídrico Tolerável) Baixo
Y-MEDIO	Y (Déficit Hídrico Tolerável) Médio
Y-ALTO	Y (Déficit Hídrico Tolerável) Alto

Figura 4.5 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **TPLAN-Y**



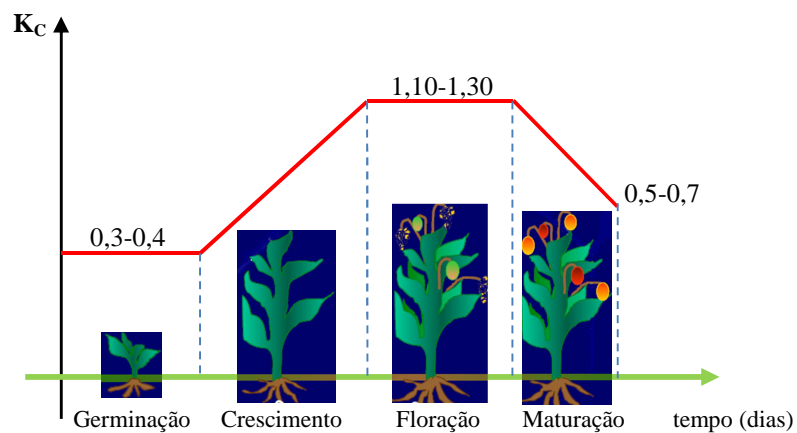
Neste trabalho, o **UD** dos termos linguísticos dessa variável corresponde ao intervalo de $[0.1,0.6]$, conforme valores indicados na literatura (GOMES, 1994; CARAMORI, 2006).

a.4) **ESTAG (ESTÁGIO-DE-CRESCIMENTO-DA-PLANTA)**: Em geral, a planta tem um aumento progressivo de consumo hídrico até o período de floração e frutificação. Assim, para atender apropriadamente à demanda de água da planta, é necessário que se conheça o fenômeno da evapotranspiração da cultura (GOMES, 1994).

O Coeficiente de Cultivo K_C exprime a relação entre a evapotranspiração potencial ou máxima (ET_P) e a evapotranspiração de referência (ET_0). Assim, quanto maior o coeficiente K_C , maior a necessidade de dotação hídrica no período associado.

A variável *fuzzy* **ESTAG** está associada ao coeficiente K_C , que assume diferentes valores de acordo com o tipo de cultura e a fase de crescimento da planta, como visto na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Variação de K_C (baseado em CARAMORI, 2006)



A Tabela 4.6 apresenta os valores médios de K_C dados em função de alguns tipos de cultura e de seu período vegetativo (GOMES, 1994; MARIANO, 2008).

Tabela 4.6 – Valores médios de K_C (GOMES, 1994; MARIANO, 2008)

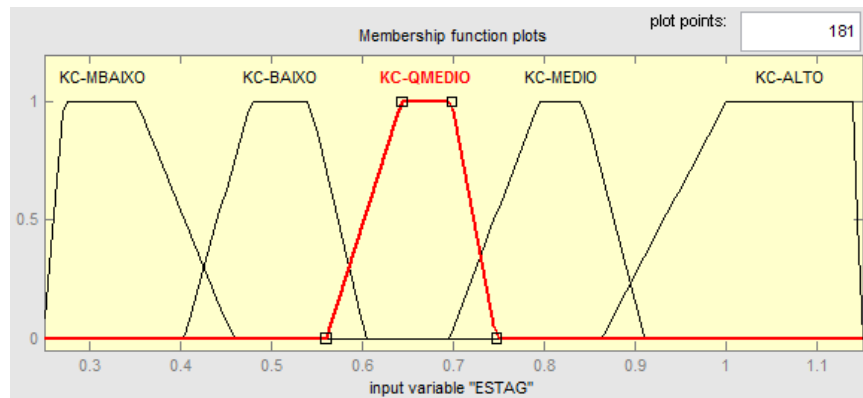
Cultura	Plantio-Germinação	Crescimento	Floração	Maturação
	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Alface	0,45	0,60	1,00	0,90
Cana-de-açúcar	0,50	1,00	1,10	0,65
Cítricos (ex. laranja)	0,65	0,70	0,70	0,65
Melão	0,45	0,75	1,00	0,75
Milho	0,40	0,80	1,15	1,00
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,80

Os termos linguísticos para a variável **ESTAG** foram definidos de acordo com as faixas de valores de K_C em cada período de crescimento vegetativo. O **UD** está distribuído no intervalo de $[0.25, 1.15]$. Os termos *fuzzy* são {KC-MBAIXO, KC-BAIXO, KC-QMEDIO, KC-MEDIO, KC-ALTO}, cujos significados estão descritos na Tabela 4.7 e cujas funções de pertinência estão ilustradas na Figura 4.7.

Tabela 4.7 – Termos linguísticos da variável **ESTAG**

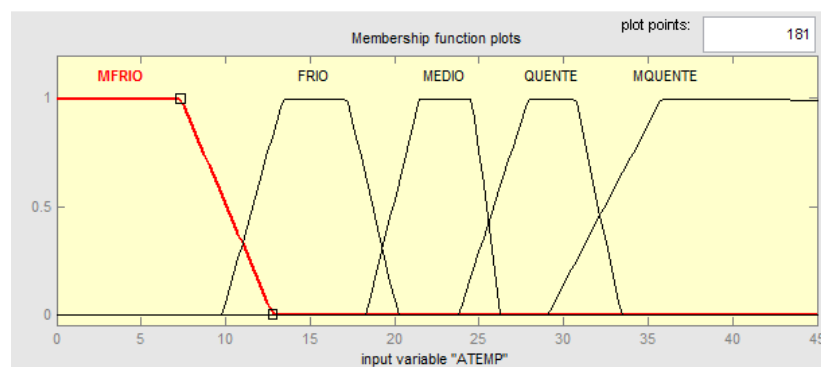
KC-MBAIXO	KC (Coeficiente de cultivo) Muito Baixo
KC-BAIXO	KC (Coeficiente de cultivo) Baixo
KC-QMEDIO	KC (Coeficiente de cultivo) Quase Médio
KC-MEDIO	KC (Coeficiente de cultivo) Médio
KC-ALTO	KC (Coeficiente de cultivo) Alto

Figura 4.7 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **ESTAG**



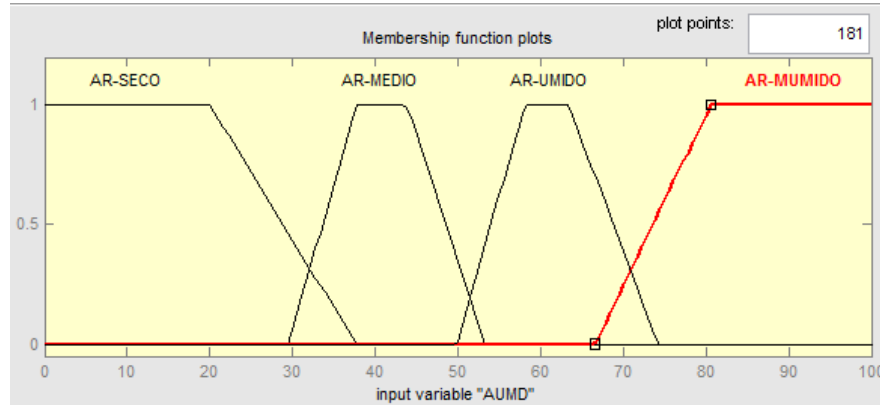
a.5) **ATEMP (TEMPERATURA-DO-AR)**: Essa variável *fuzzy* está associada à temperatura do ar (em graus Celsius), medida na região da cultura em questão. Os termos linguísticos para a variável **ATEMP** são {MFRIIO, FRIO, MEDIO, QUENTE, MQUENTE}, cujo **UD** corresponde a valores distribuídos numa escala de $[0, 45]$. A representação das funções de pertinência está ilustrada na Figura 4.8:

Figura 4.8 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **ATEMP**



a.6) **AUMD (UMIDADE-DO-AR)**: Essa variável *fuzzy* está associada à umidade relativa do ar (em porcentagem), medida na região da cultura vegetativa em questão.

Figura 4.9- Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **AUMD**

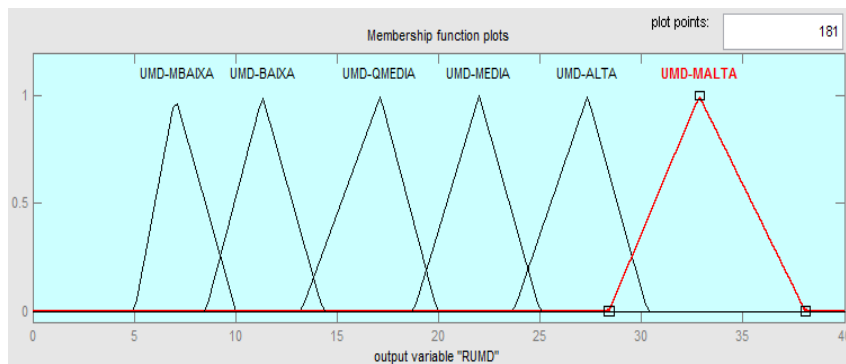


Os termos linguísticos para a variável **AUMD** são {AR-SECO, AR-MEDIO, AR-UMIDO, AR-MUMIDO}, cujas funções de pertinência estão na Figura 4.9. O **UD** corresponde a valores distribuídos num intervalo de [0,100].

b) Variável de saída

b.1) **RUMD (REFERÊNCIA-DE-UMIDADE-DO-SOLO)**: A variável *fuzzy* de saída **RUMD** estabelece a referência de umidade do solo (*set point*) para o controlador 2. Como o sistema *fuzzy* 1 utiliza o **modelo Mamdani**, o **UD** dessa variável foi definido de forma a estabelecer que a dotação hídrica seja igual ou superior ao valor crítico de umidade do solo (U_Y) suportada pela planta e inferior ao máximo suportado pelo solo (Cc). Esses valores foram baseados na equação (4.2). A representação das funções de pertinência está Figura 4.10.

Figura 4.10 - Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **RUMD**



Os termos linguísticos de **RUMD** são {UMD-MBAIXA, UMD-BAIXA, UMD-QMEDIA, UMD-MEDIA, UMD-ALTA, UMD-MALTA}. O significado dos termos e os valores do **UD** estão indicados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Termos linguísticos e **UD** Mamdani para variável **RUMD**

Termo	Descrição	UD
UMD-MBAIXA	Umidade Muito Baixa	[5,10]
UMD-BAIXA	Umidade Baixa	[8,14]
UMD-QMEDIA	Umidade Quase Média	[13,20]
UMD-MEDIA	Umidade Média	[18,25]
UMD-ALTA	Umidade Alta	[23,30]
UMD-MALTA	Umidade Muito Alta	[28,38]

- **Definição das regras de inferência**

A existência de múltiplas variáveis *fuzzy* de entrada, associadas às diversas funções de pertinência por variável, pode gerar um número demasiadamente grande de regras de inferência e comprometer o tempo de processamento do controlador. Por isso, foi decidido que as regras de inferência do sistema *fuzzy* 1 deveriam utilizar apenas termos linguísticos aplicáveis às amostras de solo coletadas, às características da cultura vegetal escolhida e às condições climáticas da região Nordeste.

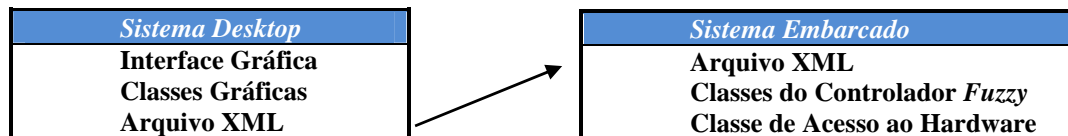
Em relação às variáveis climáticas **AUMD** e **ATEMP**, foram realizadas simulações com dois cenários distintos: cenários com valores médios constantes para a umidade relativa e a temperatura do ar, para simplificar a base de regras, e cenários onde a variável **ATEMP** foi caracterizada como uma função senoidal variante no tempo, cujo *offset* era igual ao valor médio utilizado nos cenários anteriores. As diversas bases de regras no modelo Mamdani estão descritas no Anexo III deste documento.

4.2 Sistema de controle em ambiente J2ME

O subsistema de controle 2 é baseado no trabalho de Araújo Jr. (2011), que propõe uma solução desenvolvida em JAVATM/J2ME para controladores embarcados em dispositivos móveis. A escolha da plataforma JAVATM/J2ME está relacionada à sua portabilidade para diferentes plataformas de *hardware* e sistemas operacionais, bem como pela flexibilidade para desenvolvimento de aplicações a serem executadas em dispositivos móveis (ARAÚJO JR., 2011; JAVA, 2011).

A estratégia de controle *fuzzy-TSK*, implementada por Araújo Jr. (2011), é denominada FuzzME e foi projetada com arquitetura modular. Existe uma interface gráfica para construção e sintonia do controlador (executada em computador *desktop*) e um sistema que gera o código para o controlador embarcado (executado em dispositivo móvel com suporte a J2ME). A Figura 4.11 ilustra a comunicação entre os referidos módulos de *software* da solução FuzzME.

Figura 4.11 – Arquitetura do controle em JAVA™ (ARAÚJO JR., 2011)



A customização dos controladores embarcados para o subsistema 2 foi desenvolvida diretamente via código J2ME, utilizando o ambiente de desenvolvimento *Net Beans* 6.9.1. Devido à modularidade de construção do sistema em JAVA, a classe responsável pelo acesso ao *hardware* do SunSPOT™ é a mesma para ambos os controladores (ARAÚJO JR., 2011).

Assim, foram aproveitados os pacotes de código-fonte e as classes JAVA™ pré-existent: classes para comunicação com o *hardware* do SunSPOT™, para interface com sistema SunSPOT™ base-*desktop* e classes implementadas para o controlador *fuzzy-TSK*, criadas por Araújo Jr. (2011).

Para viabilizar a comunicação entre os subsistemas *fuzzy* 1 (desenvolvido no SIMULINK®) e o *fuzzy* 2 (gerado em código JAVA™), foram implementadas as seguintes adaptações:

- criação da classe *msocket* para implementação de *socket* de comunicação de dados entre as linguagens MATLAB® e JAVA™ (*script msocket.m*);
- inserção do bloco *S-Function* para comunicação *on-line* de dados de saída do SIMULINK® para o MATLAB® (*script msocket-sfunction.m*);
- criação de interface em JAVA™ (*public interface SetpointListener.java*) para recebimento dos valores dinâmicos do perfil de referência do sistema-solo enviados pelo MATLAB®;
- criação de *thread* para temporização e acionamento da eletroválvula conforme sinal de controle de tensão;
- plotagem dos gráficos da referência de umidade do solo (*set point*), valor medido de umidade do solo (variável de processo) e o sinal de controle de tensão (variável de controle) via ambiente MATLAB®.

As variáveis de entrada e de saída e as características dos referidos sistemas de controle do subsistema 2 serão discutidas nas seções seguintes.

4.2.1 Modelagem do processo-solo

Embora o ajuste dos parâmetros de um controlador *fuzzy* não dependa do conhecimento exato do processo a ser controlado, nem da existência de um modelo matemático que o caracterize, este trabalho utilizou um modelo simplificado do processo-solo, conforme sugestão de Bazanella e Silva Jr. (2005). O objetivo de tal decisão foi facilitar a etapa de simulação do comportamento do referido controlador, antes da implementação real do sistema de controle embarcado.

Assim, segundo os referidos autores, o cálculo das grandezas que caracterizam minimamente o processo pode ser realizado através do *método da resposta ao degrau*, determinado empiricamente por Ziegler e Nichols (1942).

Nesse trabalho, cada amostra de solo foi submetida a um ensaio em malha aberta, conforme indicado pelo método ZIEGLER-NICHOLS (ZN) (BAZANELLA E SILVA JR., 2005; ARAÚJO, 2007), aplicando-se uma vazão unitária de 1ml/s (variável manipulada) e coletando-se os dados da resposta a esta entrada.

- **Identificação do sistema-solo**

O modelo matemático mais simples, sugerido por Ziegler e Nichols (1942), para caracterizar esse processo é representado por uma Função de Transferência (FT) de ordem 1 com atraso de transporte, conforme apresentada em (4.3).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = e^{-Ls} \frac{K}{Ts+1} \quad (4.3)$$

$$a \approx \frac{K.L}{T} \quad (4.4)$$

em que: **L** é o atraso aparente, **T** é a constante de tempo dominante, **a** é o ganho integral equivalente e **K** é o ganho do processo. Para os processos-solo deste trabalho, a entrada U(s) é a vazão (ml/s) e a saída Y(s) é a umidade do solo (%).

A partir da resposta ao degrau de vazão e da utilização de diferenciação numérica por diferenças finitas centrais, foi determinado o ponto de inflexão da curva de resposta (HORNBECK, 1975; BARROSO et al., 1988; ARAÚJO, 2007). A tangente ao referido

ponto é utilizada para obter-se os parâmetros **L**, **a**, **K** e **T** das funções de transferência simplificadas.

A equação (4.5) apresenta a **FT** obtida para o solo S1 (arenoso),

$$G(s)_{solo1} = e^{-203s} \frac{9,4}{572s+1} \quad (4.5)$$

Para o solo S2 (argila-arenosa), a **FT** obtida é,

$$G(s)_{solo2} = e^{-390s} \frac{9}{1468s+1} \quad (4.6)$$

A partir das equações (4.5) e (4.6) foi empregada uma **aproximação de Padé** de primeira ordem, segundo indicação de Aguirre (2004). Para definir as aproximações de Padé dos sistemas-solo deste trabalho, foi utilizado o programa MATLAB®.

Para o cenário com solo 1 (arenoso), a **FT** com aproximação de Padé é

$$G_x(s)_{solo1} = \frac{-9,4s+0,09261}{572s^2+6,635s+0,009852} = K_1 \frac{(s-0,009852)}{(s+0,009852)(s+0,001748)} \quad (4.7)$$

em que o ganho estático do processo é **K₁ = -0,016434**.

Para o cenário com solo 2 (argila-arenosa), a **FT** com aproximação de Padé é,

$$G_x(s)_{solo2} = \frac{-9s+0,04615}{1468s^2+8,528s+0,005128} = K_2 \frac{(s-0,005128)}{(s+0,005128)(s+0,0006812)} \quad (4.8)$$

em que o ganho estático do processo é **K₂ = -0,0061308**.

Os detalhes da obtenção das curvas de resposta ao degrau pelo método Ziegler-Nichols e das funções de transferência dos processos-solo estão no Anexo IV deste documento.

4.2.2 Controle *fuzzy*-TSK

- **Variáveis de entrada e de saída**

- Variável de entrada **UERR (ERRO-UMIDADE)**: Essa variável representa o erro ou a diferença entre a referência de umidade do solo (**RUMD**) e o valor medido da umidade (**SUMD**). A Tabela 4.9 apresenta os valores dos termos linguísticos de **UERR** {UERR-NEG, UERR-ZERO, UERR-POS}, representativos dos intervalos erro-negativo, erro-zero e erro-positivo, respectivamente.

Tabela 4.9 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **UERR**

Função	Vértice A		Vértice B		Vértice C	
	Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2
UERR-NEG	-600	-600	-0,5	-1	-0,05	-0,05
UERR-ZERO	-0,15	-0,25	0	0	1,5	2
UERR-POS	1	1	2	2	600	600

Para reduzir a complexidade do código em JAVATM e a facilidade de sua construção, as funções de pertinência são do tipo triangular.

- b) Variável de entrada **DERR (DERIVADA-ERRO-UMIDADE)**: Representa a derivada ou a variação do erro entre a referência de umidade do solo (**RUMD**) e o valor medido da umidade (**SUMD**). Para o controlador *fuzzy-TSK*, os termos linguísticos de **DERR** são {DERR-NEG, DERR-ZERO, DERR-POS}, representativos dos intervalos derivada-erro-negativo, derivada-erro-zero e derivada-erro-positivo, respectivamente. Novamente, as funções de pertinência são do tipo triangular para cada termo e estão representadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Termos linguísticos e funções de pertinência da variável **DERR**

Função	Vértice A		Vértice B		Vértice C	
	Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2
DERR-NEG	-50	-50	-0,02	-0,075	-0,005	-0,015
DERR-ZERO	-0,03	-0,05	0	0	0,03	0,05
DERR-POS	0,005	0,015	0,02	0,075	50	50

- c) Variável de saída **TENSÃO**: Na saída desse controlador, foram associadas 3 (três) funções paramétricas que definem os valores discretos relativos à duração do pulso (+3V) que dispara o circuito de acionamento da eletroválvula. A função paramétrica geral está demonstrada em (4.9):

$$\text{Sugeno-i} = a_0 + a_1 \cdot \text{UERR} + a_2 \cdot \text{DERR} \quad (4.9)$$

Os valores otimizados dos coeficientes a_0 , a_1 e a_2 , para cada sistema-solo, serão apresentados junto com os resultados das simulações no capítulo 5.

- **Regras de inferência**

Conforme exposto no item 4.2, este trabalho utilizou as mesmas classes JAVATM para a lógica *fuzzy* desenvolvidas em Araújo Jr. (2011). Assim, as 9 (nove) regras de inferência do controlador são o resultado da combinação das 3 (três) **FP** da entrada **UERR** e das 3 (três) **FP** da entrada **DERR**. A Tabela 4.11 apresenta a matriz de associação das regras desse controlador e a Tabela 4.12 indica os coeficientes teóricos das equações paramétricas utilizadas nas simulações do sistema de controle *fuzzy-TSK*.

Tabela 4.11 – Matriz de associação das regras de inferência *fuzzy-TSK*

Erro/Derivada-Erro	DERR-NEG	DERR-ZERO	DERR-POS
UERR-NEG	Sugeno-0	Sugeno-0	Sugeno-0
UERR-ZERO	Sugeno-1	Sugeno-1	Sugeno-1
UERR-POS	Sugeno-2	Sugeno-2	Sugeno-2

Tabela 4.12 – Coeficientes teóricos das funções paramétricas Sugeno

Solo	Coeficiente	Sugeno-0	Sugeno-1	Sugeno-2
S1 (arenoso)	$a_1 (K_P)$	0	0,048	0,048
	$a_2 (K_D)$	0	5	4,5
	$a_0 (offset)$	0	0,095	0,082
S2 (argila-arenosa)	$a_1 (K_P)$	0	0,062	0,062
	$a_2 (K_D)$	0	12	12
	$a_0 (offset)$	0	0,225	0,24

4.3 Comentários e conclusões

As características do sistema inteligente para controle espacialmente diferenciado de um sistema de irrigação foram apresentadas. Foram discutidos o modelo Mamdani e as premissas para definição das variáveis *fuzzy* para o sistema *fuzzy* supervisor. Os elementos do subsistema de controle, modelo *fuzzy-TSK* foram descritos.

O capítulo a seguir apresenta as simulações de diferentes configurações dos referidos subsistemas de controle de acordo com as necessidades hídricas de cada conjunto solo-planta. Serão discutidos os resultados e as escolhas das arquiteturas dos controladores para serem embarcados no dispositivo móvel SunSPOTTM.

5. Resultados obtidos

A seção inicial deste capítulo descreve os diferentes cenários de testes e os resultados das simulações do subsistema *fuzzy* Mamdani para definição da referência de umidade do solo. A etapa de simulação computacional proporcionou a sintonia das funções de pertinência e o teste de variadas combinações das regras de inferência.

A seção seguinte apresenta as respostas do subsistema 2 embarcado no dispositivo móvel SunSPOTTM, quando o controlador é do tipo *fuzzy* Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

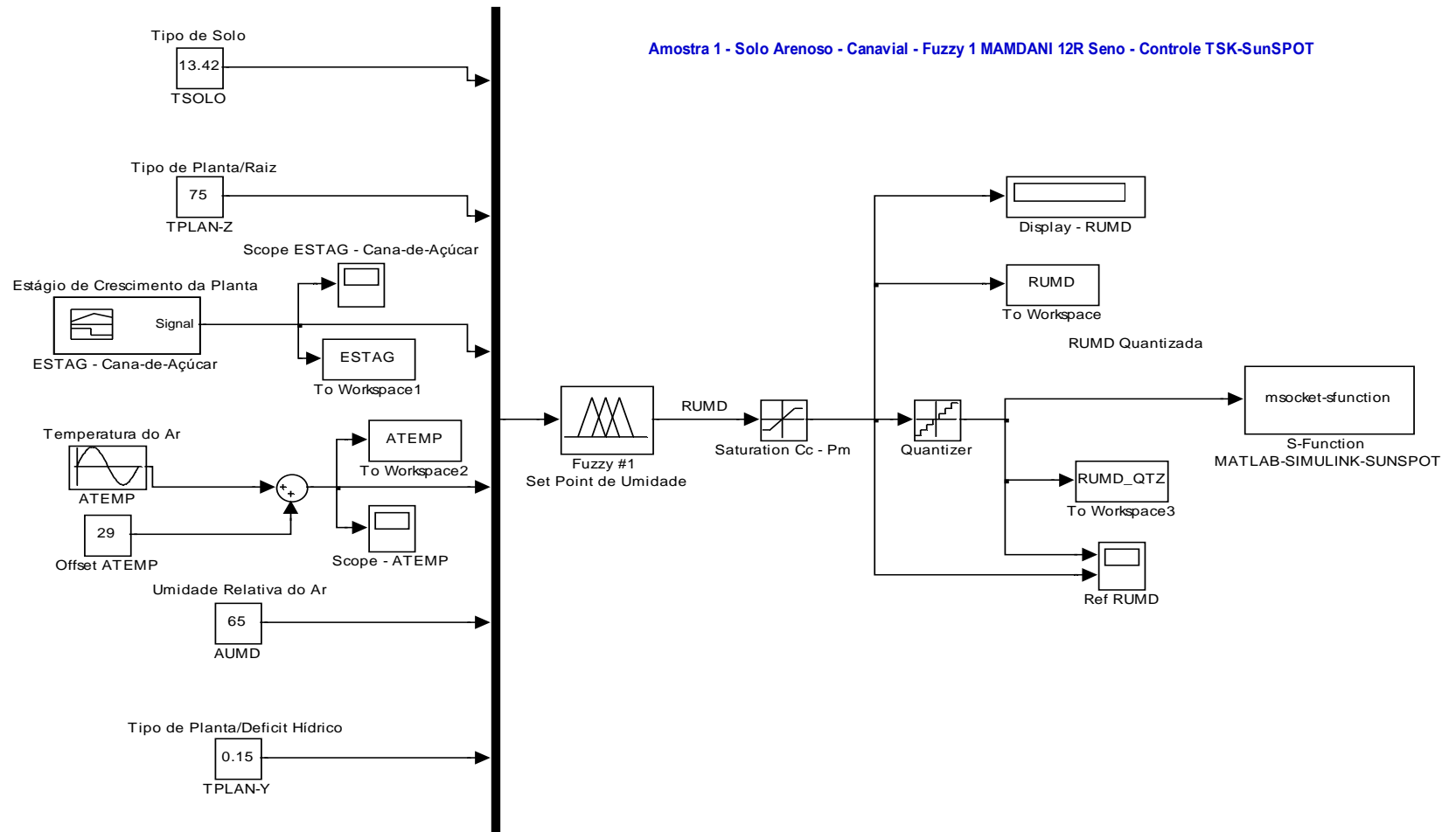
5.1 Cenários de teste – *set point*

O subsistema *fuzzy* 1, modelo de inferência Mamdani, foi implementado no *Fuzzy Logic Toolbox* e SIMULINK[®], do programa computacional MATLAB[®]. Foram idealizados cenários de teste para 1 (um) tipo de planta (cana-de-açúcar), cultivada em 2 (dois) tipos de solo distintos (arenoso e argila-arenosa), conforme amostras analisadas e especificadas na seção 3.2.

Cada cenário foi testado com diferentes bases de regras, que variaram de 6 (seis) a 48 (quarenta e oito) inferências, de acordo com o acréscimo dos termos linguísticos relevantes para a combinação final da saída *fuzzy* (*defuzzificação*). As bases de regras de inferências de todos os cenários estão detalhadas no Anexo III.

A Figura 5.1 apresenta um dos diagramas de blocos desenvolvidos no SIMULINK[®] para a modelagem do *set point* de umidade do solo. Os resultados das simulações estão descritos ao longo desta seção.

Figura 5.1– Diagrama de blocos do sistema *fuzzy* 1 no SIMULINK®



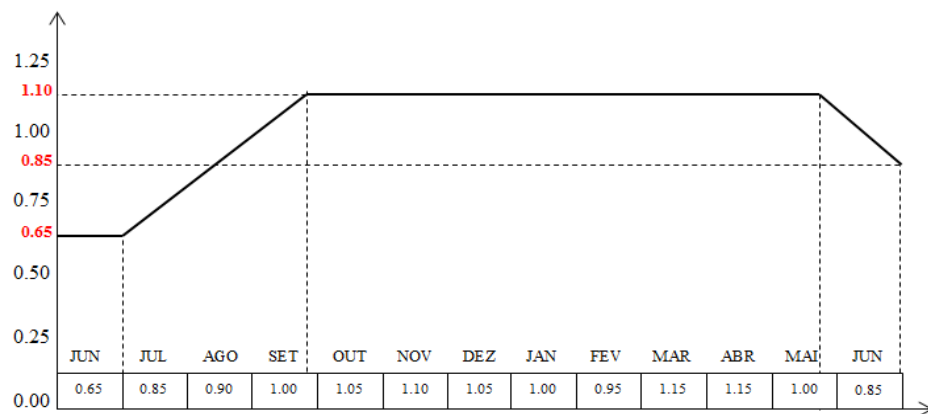
- **Parâmetros gerais dos cenários de teste**

A escolha do tipo de vegetal, neste caso a cana-de-açúcar, define valores constantes para as variáveis de entrada **TPLAN-Y** e **TPLAN-Z**, cujos valores são 0,15 e 75 cm, respectivamente. A variável *fuzzy* **ESTAG**, associada às fases de crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, assume a variação média temporal do coeficiente **K_C** de acordo com a Tabela 5.1 e o gráfico da Figura 5.2.

Tabela 5.1 – Coeficiente **K_C** médio para cana-de-açúcar (Silva et al., 2012)

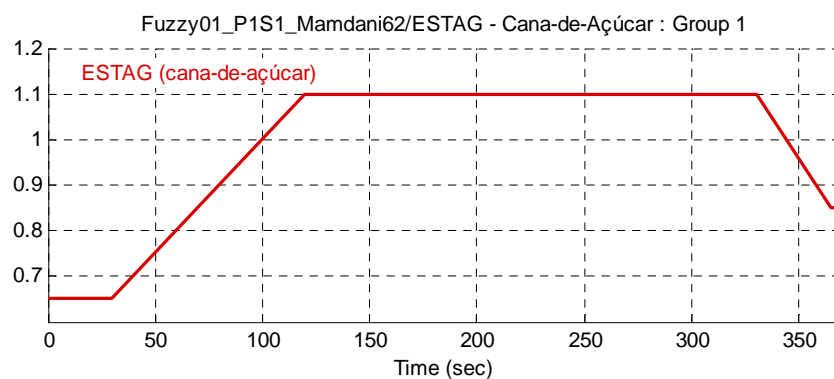
K_C médio	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
Cana-de-Açúcar	0,65	0,85 → 1,00	1,10	1,00 → 0,85

Figura 5.2 – Variação de **K_C** da cana-de-açúcar [adaptado de SILVA et al. (2012)]



Como o ciclo vegetativo da cana-de-açúcar no Nordeste é de 12 a 14 meses (ASSIS et al., 2004; SILVA et al., 2012), inicialmente, o tempo de simulação do sistema *fuzzy* 1 foi definido igual a 365 (trezentos e sessenta e cinco) segundos para representar o período de 1 (um) ano. O gráfico da variável **ESTAG**, construído com o bloco *Signal Builder* do SIMULINK®, está ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3– Variação de **ESTAG (K_C)** via *Signal Builder* do SIMULINK®



As variáveis correspondentes às condições climáticas **ATEMP** e **AUMD** foram, inicialmente, definidas com valores médios constantes, respectivamente 29° C e 65%. Posteriormente, alguns cenários de teste foram simulados considerando a variável **ATEMP** como uma função senoidal, com *offset* de 29° C e variação de $\pm 4^\circ$ C (BAHAT et al., 2000).

- **Cenários de teste com solo arenoso**

Como foram considerados 2 (dois) tipos de solo para cultivo da cana-de-açúcar, arenoso (amostra 1) e argila-arenosa (amostra 2), a variável **TSOLO** foi definida de acordo com a característica física **Cc** dos referidos solos. Os cenários de teste CT01 a CT09 foram realizados considerando **TSOLO** para solo arenoso, cujo valor 13,42 (CC-ARE) foi obtido da análise laboratorial do LIS/UFCG.

- **Cenário de Teste 01 – CT01**

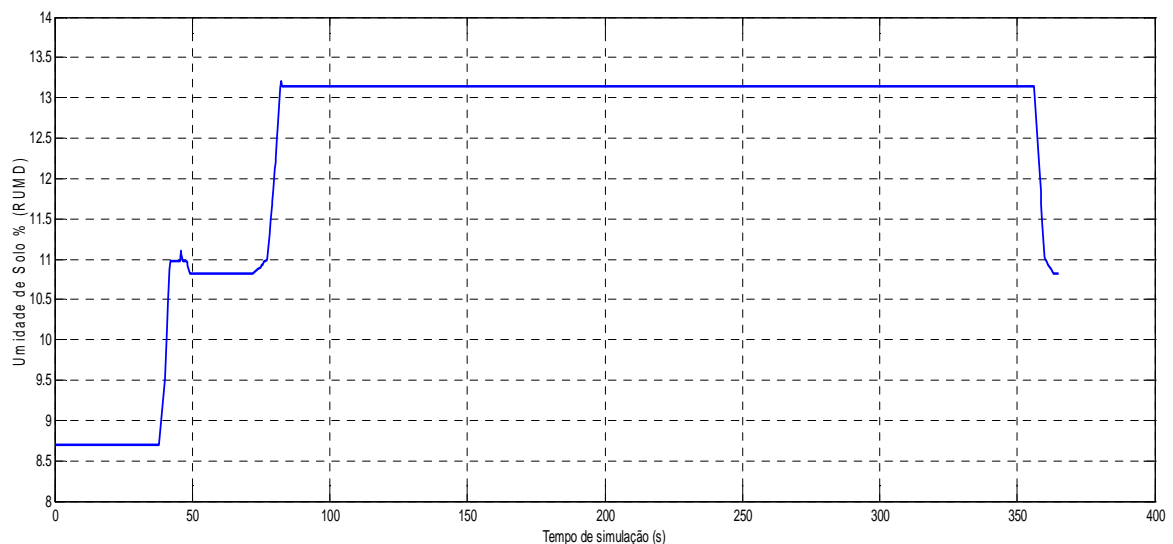
A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros e valores utilizados neste cenário.

Tabela 5.2 – Parâmetros do cenário de teste CT01

SOLO/PLANTA	TSOLO	TPLAN-Y	TPLAN-Z	ESTAG	AUMD	ATEMP
Arenoso/Canavial	13.42 (Cc)	0.15	75	Fig. 5.3	65	29
TERMOS FUZZY	CC-ARE	Y-MBAIXO Y-BAIXO	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO KC-MEDIO KC-ALTO	AR-UMIDO	QUENTE
Nº REGRAS = 06						

O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.4.

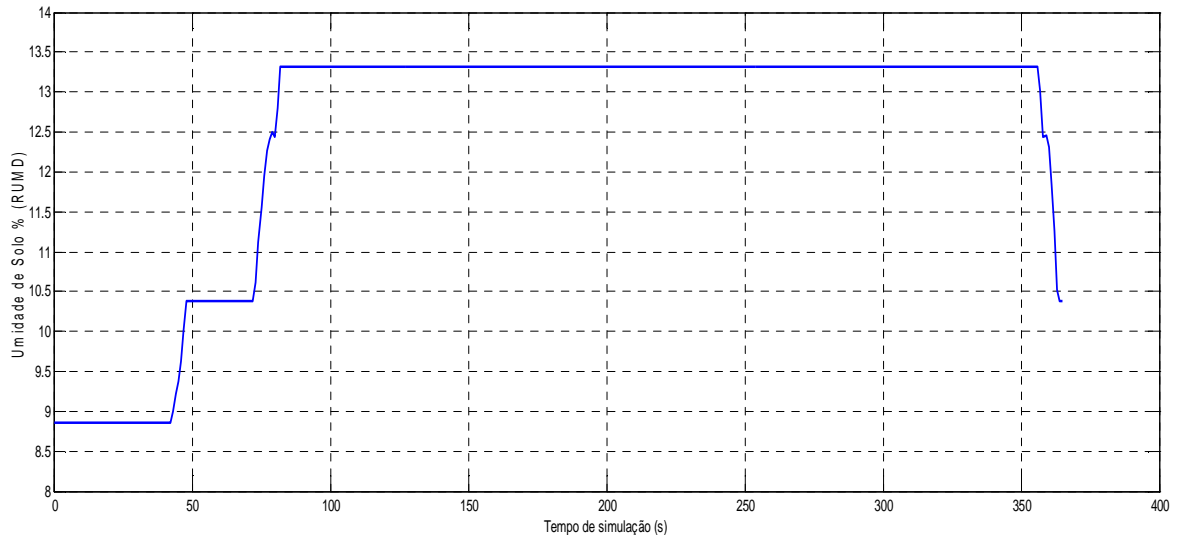
Figura 5.4 – Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) – 6 regras



- **Cenário de Teste 02 – CT02**

Às regras criadas no cenário CT01, foram utilizadas mais 6 (seis) inferências, uma vez que foi acrescentado o termo linguístico {RAIZ-LONGA} da variável **TPLAN-Z**. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) – 12 regras

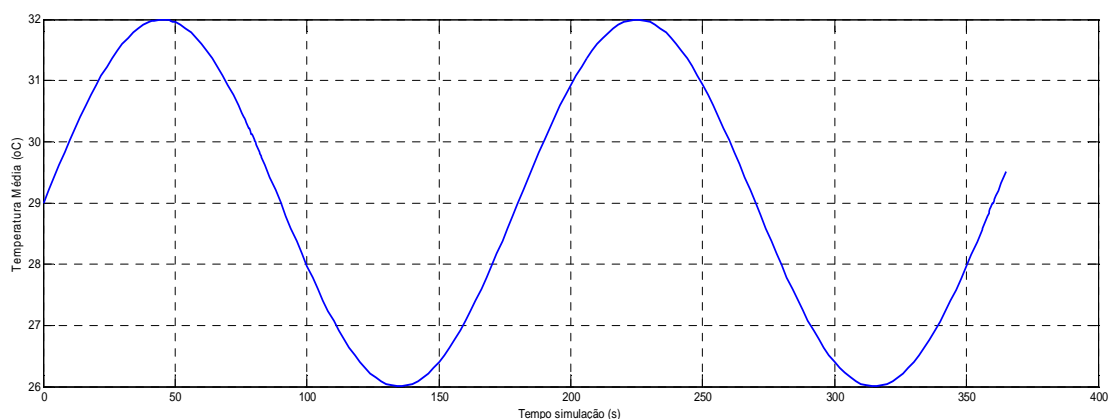


- **Cenário de Teste 03 – CT03**

A partir do cenário CT02, foram adicionadas mais 12 (doze) inferências, relativas ao acréscimo do termo *fuzzy* {MQUENTE} da variável **ATEMP**. No entanto, o perfil da variável *fuzzy* de saída **RUMD** permaneceu o mesmo da Figura 5.5. Ao se comparar os cenários anteriores, observa-se que a adição de termos linguísticos e de novas regras suavizou o perfil do *set point* de umidade do solo e elevou ligeiramente os valores dos intervalos *flat* do gráfico.

- **Cenários de teste com ATEMP senoidal**

Para aproximar os cenários simulados às condições climáticas da região Nordeste, a variável de entrada **ATEMP** foi configurada como uma função senoidal contínua, em conformidade com Bahat et al. (2000). A função seno escolhida tem frequência de 0,0349 rad/s ($2\pi/180s$), amplitude de 4° C e *offset* de 29° C, para representar as variações de temperatura durante 180 (cento e oitenta) dias ou 6 (seis) meses na região Nordeste. A Figura 5.6 ilustra o gráfico da variável **ATEMP**.

Figura 5.6 – Função senoidal contínua para a variável **ATEMP**

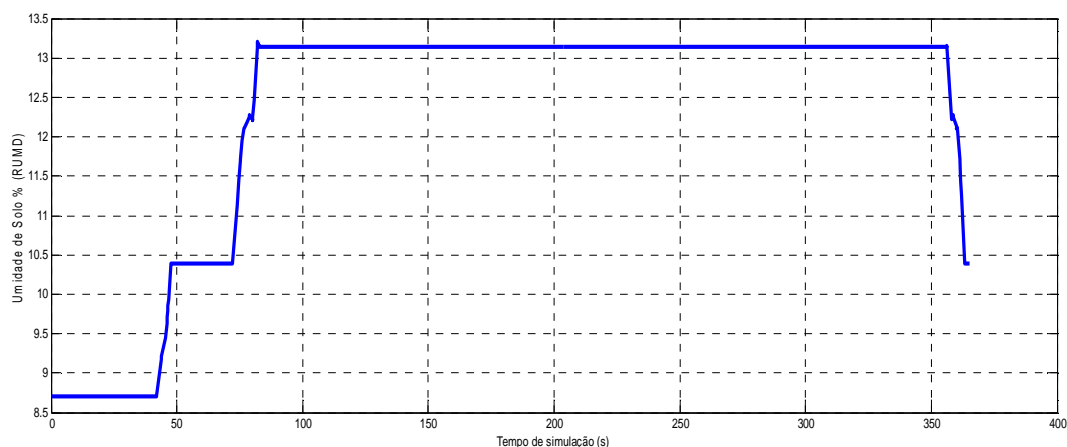
• Cenário de Teste 04 – CT04

A base de regras desse cenário foi construída utilizando os mesmos termos linguísticos do antecedente do cenário CT01, mas os termos consequentes foram modificados para tratar a variação senoidal de **ATEMP**. Os parâmetros desse cenário estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros do cenário de teste CT04

SOLO/PLANTA	TSOLO	TPLAN-Y	TPLAN-Z	ESTAG	AUMD	ATEMP
Arenoso/Canavial	13.42 (Cc)	0.15	75	Fig.5.3	65	Senoidal (Fig. 5.6)
TERMOS FUZZY	CC-ARE	Y-MBAIXO Y-BAIXO	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO KC-MEDIO KC-ALTO	AR-UMIDO	QUENTE
Nº REGRAS = 06						

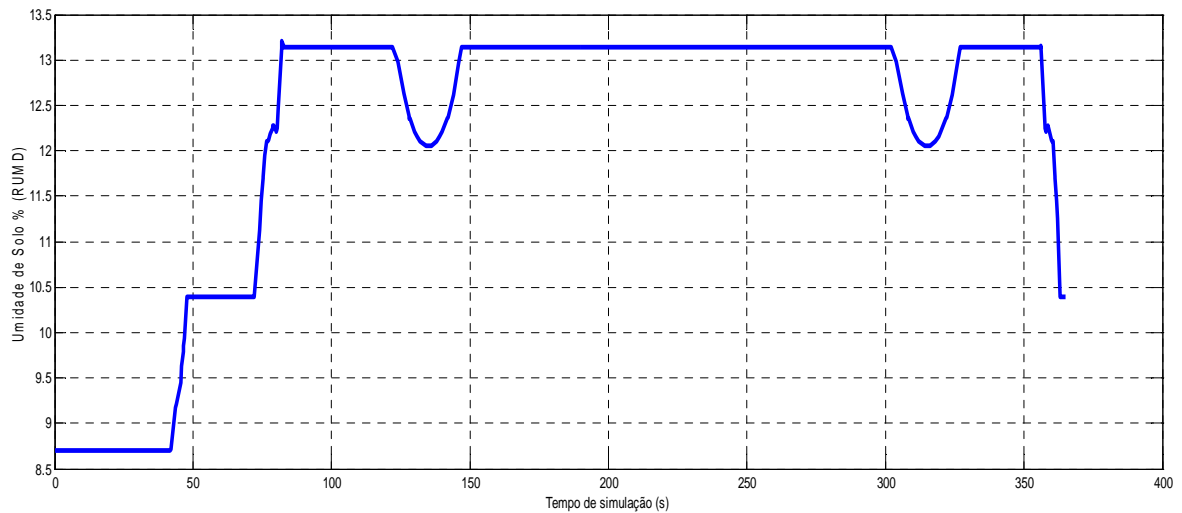
O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.7.

Figura 5.7- Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 6 regras

- **Cenário de Teste 05 – CT05**

Às regras criadas no cenário anterior, foram utilizadas mais 2 (duas) inferências, ao ser acrescentado o termo linguístico {MEDIO} da variável **ATEMP**. As novas regras contemplaram os valores mínimos da referida função senoidal ocorridos nos instantes de máximos de **ESTAG** {KC-ALTO}. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.8.

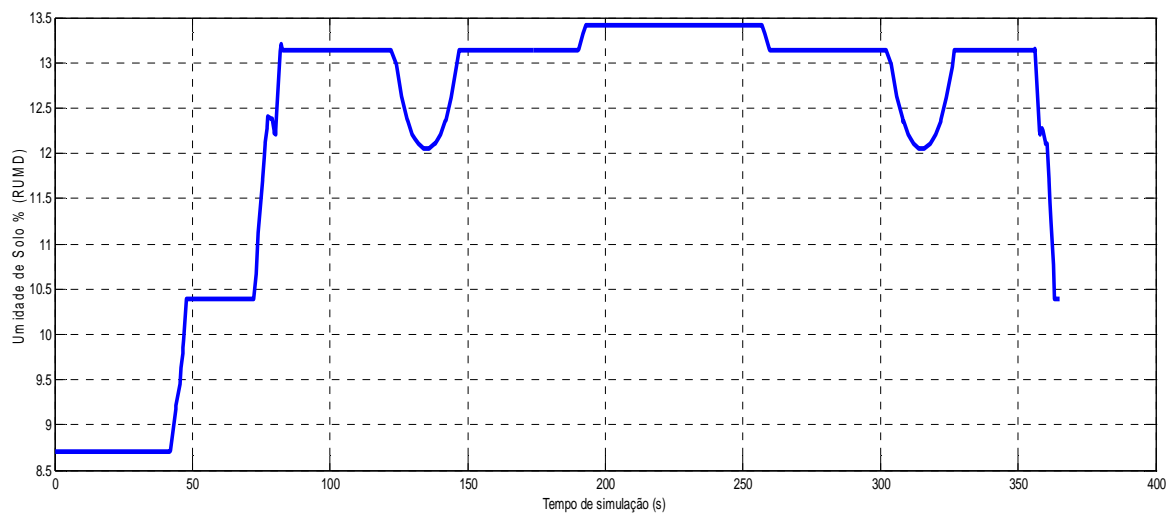
Figura 5.8 - Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 8 regras



- **Cenário de Teste 06 – CT06**

Partindo do cenário CT05, foram inseridas mais 4 (quatro) inferências ao ser acrescentado o termo linguístico {MQUENTE} da variável **ATEMP**.

Figura 5.9 - Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 12 regras

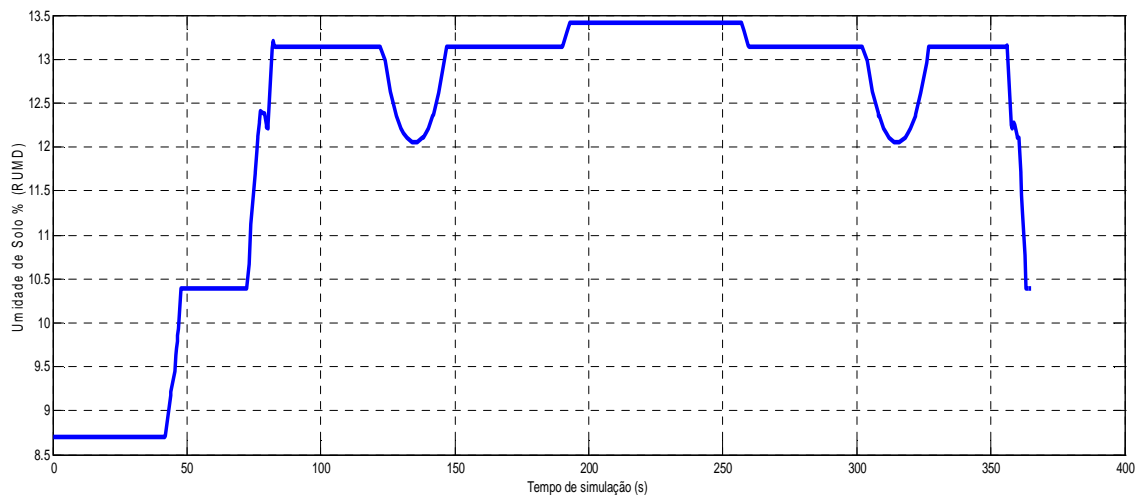


As novas regras contemplaram os valores máximos da referida função senoidal. Tais valores de temperatura ocorreram em intervalos de **ESTAG** pertencentes aos termos {KC-ALTO, KC-MEDIO}. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.9.

- **Cenários de Teste 07 a 09 – CT07 a CT09**

Os cenários CT07 (18 regras), CT08 (20 regras) e CT09 (24 regras) contêm inferências que contemplam o termo linguístico {RAIZ-LONGA} da variável **TPLAN-Z**, combinado com os termos {MEDIO, QUENTE, MQUENTE} da variável **ATEMP**. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** é o mesmo do cenário anterior, CT06, e está ilustrado na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Perfil do *set point* (areia/cana-de-açúcar) para CT07, CT08 e CT09

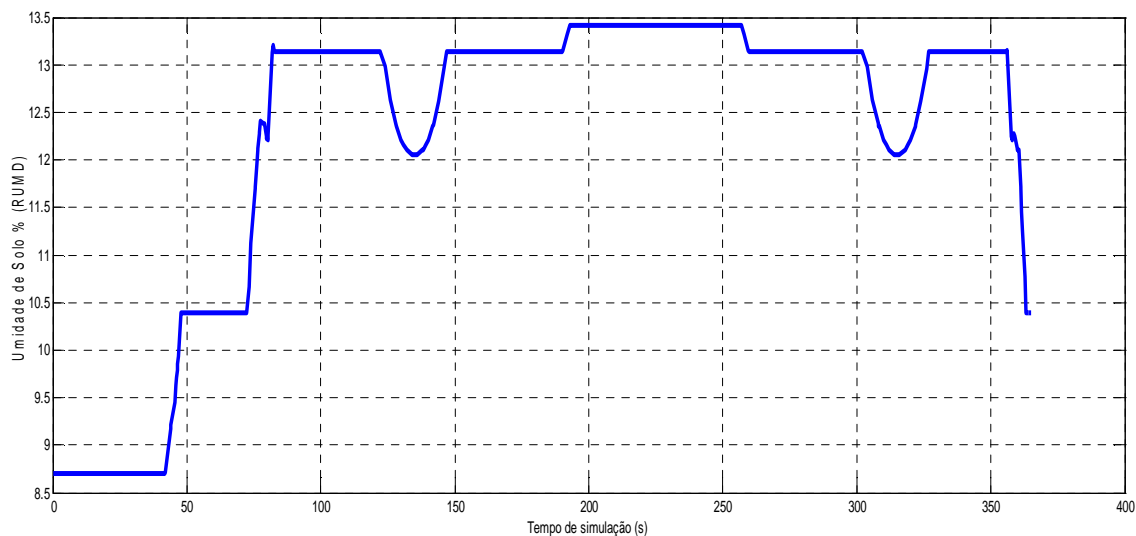


Ao se fazer a comparação com todos os cenários de teste (CT01 a CT09) para o conjunto solo arenoso/cana-de-açúcar, verifica-se que a variável climática **ATEMP**, quando representada por uma função senoidal, altera significativamente o perfil do *set point* de umidade do solo. No entanto, dos gráficos de **RUMD** para **ATEMP** senoidal, apenas os dos cenários CT06 a CT09 apresentam o mesmo perfil.

Assim, foi definido que o cenário **CT06** (12 regras) seria utilizado para fins de implementação real do sistema de controle embarcado (*set point* mais adequado para solo-planta-clima e base de regras com menor complexidade).

O citado perfil foi submetido aos seguintes blocos da biblioteca **SIMULINK®**: quantizador (intervalo de quantização = 1), para criar degraus de umidade do solo, e bloco saturador, para limitar os valores máximo e mínimo de **RUMD** aos teores de umidade **Cc** e **Pm** do solo arenoso. O perfil quantizado está ilustrado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Set point quantizado (areia/cana-de-açúcar) – 12 regras



Importante ressaltar que, nesse cenário escolhido, a referência de umidade do solo se aproxima mais do teor da capacidade de campo (**Cc**) do solo arenoso, uma vez que a cana-de-açúcar pertence ao grupo de plantas com baixa tolerância à deficiência hídrica.

- **Cenários de teste com solo argila-arenosa**

Para o tipo de solo argila-arenosa (amostra 2), a variável **TSOLO** foi definida de acordo com o valor de **Cc** igual a 28,45 (CC-SILT;CC-ARG), obtido da análise laboratorial do LIS/UFCG. Os cenários de teste CT10 a CT19 foram realizados para esse novo conjunto solo-planta.

- **Cenário de Teste 10 – CT10**

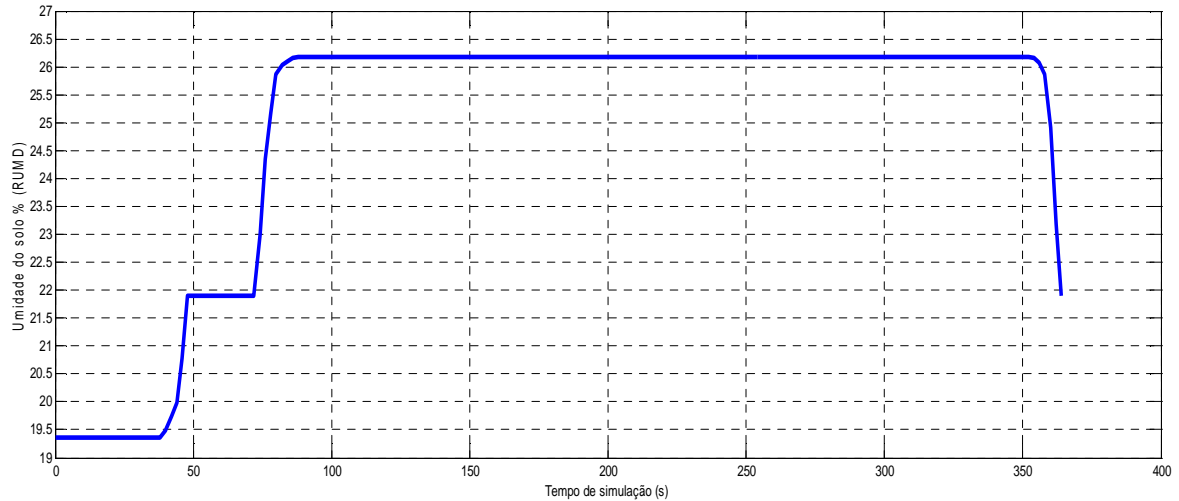
A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros e valores utilizados nesse cenário:

Tabela 5.4– Parâmetros do cenário de teste CT10

SOLO/PLANTA	TSOLO	TPLAN-Y	TPLAN-Z	ESTAG	AUMD	ATEMP
Argila-arenosa/Canavial	28.45 (Cc)	0.15	75	Fig. 5.3	65	29
TERMOS FUZZY	CC-SILT CC-ARG	Y-MBAIXO Y-BAIXO	RAIZ- MEDIA	KC-QMEDIO KC-MEDIO KC-ALTO	AR- UMIDO	QUENTE
Nº REGRAS = 12						

O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.12.

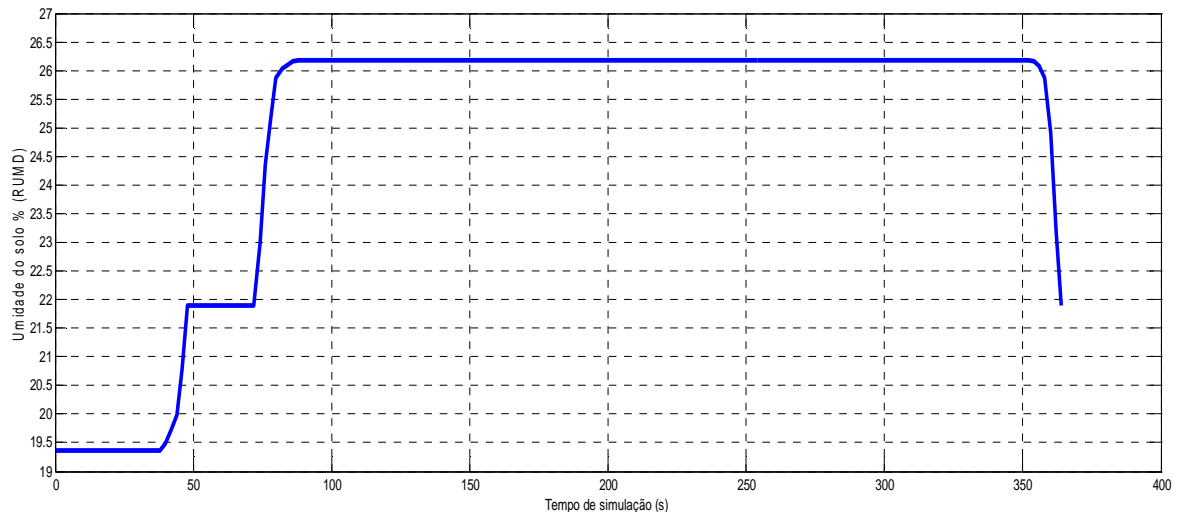
Figura 5.12 – Perfil do *set point* (argila-arenosa/cana-de-açúcar) – 12 regras



• Cenário de Teste 11 – CT11

Às regras criadas no cenário CT10, foram utilizadas mais 12 (doze) inferências, uma vez que foi acrescentado o termo linguístico {RAIZ-LONGA} da variável **TPLAN-Z**. O perfil obtido para a variável *fuzzy* **RUMD** em CT11 é quase o mesmo do cenário anterior, à exceção do degrau inicial, e está apresentado na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Perfil do *set point* (argila-arenosa /cana-de-açúcar) – 24 regras



• Cenários de Teste 12 e 13 – CT12 e CT13

Os cenários CT12 (36 regras) e CT13 (48 regras) contêm inferências que contemplam o termo linguístico {MQUENTE} da variável **ATEMP**, combinado com os termos {RAIZ-MEDIA, RAIZ-LONGA} da variável **TPLAN-Z**. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** é o mesmo do cenário anterior, CT11, já ilustrado na Figura 5.13.

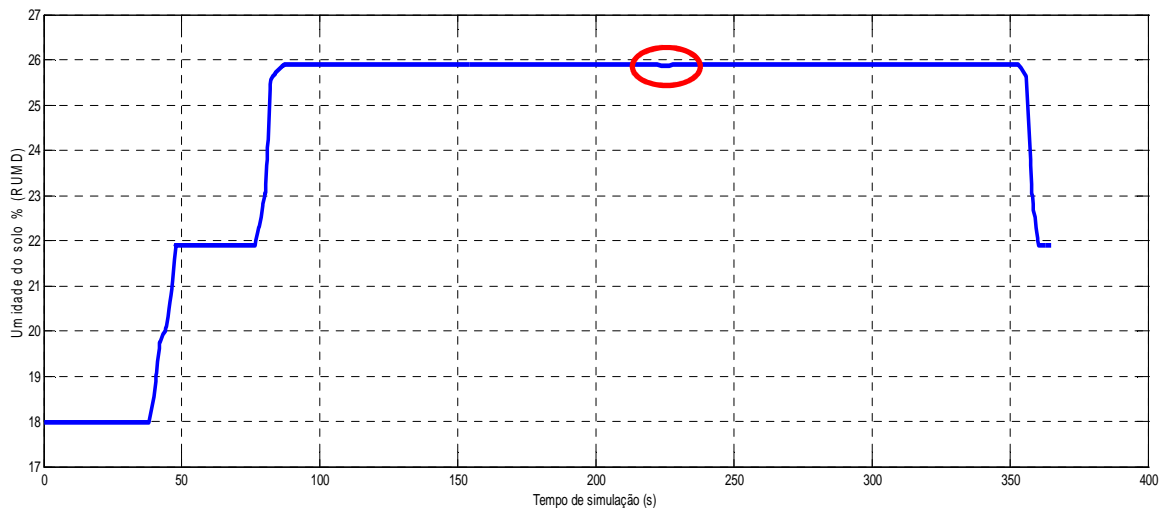
- **Cenários de teste com ATEMP senoidal**

Os cenários a seguir, CT14 a CT19 (solo argila-arenosa), apresentam o comportamento do subsistema *fuzzy* 1 quando a variável de entrada **ATEMP** é configurada como uma função senoidal contínua (Figura 5.6). A função seno apresenta as mesmas características anteriormente utilizadas.

- **Cenário de Teste 14 – CT14**

A base de regras desse cenário foi construída utilizando os mesmos parâmetros, termos linguísticos e consequentes do cenário CT10. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.14.

Figura 5.14 – *Set point* (argila-arenosa/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 12 regras



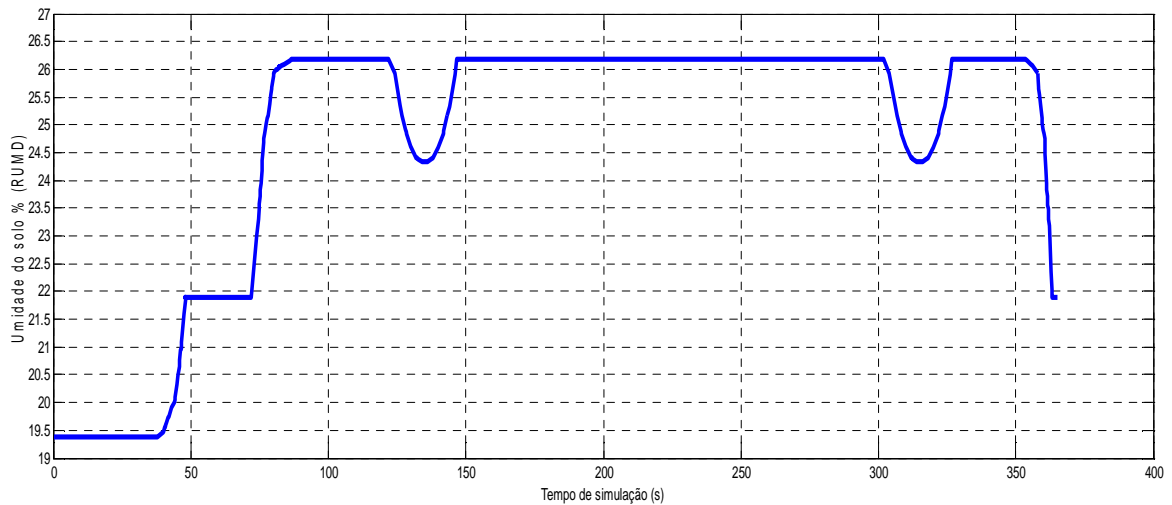
Foi observado que o perfil do *set point* de umidade do solo apresentava uma discreta depressão, destacada na Figura 5.14, não associada aos instantes de mínimo da função senoidal **ATEMP**. Esta ocorrência peculiar foi causada pelas contribuições dos conjuntos *fuzzy* de saída e foi eliminada após a realização de ajustes nas funções de pertinência dos termos das regras específicas.

- **Cenário de Teste 15 – CT15**

Às regras criadas no cenário CT14 foram utilizadas mais 4 (quatro) inferências, ao ser acrescentado o termo linguístico {MEDIO} da variável **ATEMP** para contemplar os valores mínimos da referida função senoidal. No cenário CT15, algumas depressões no perfil ocorreram com maior destaque, no entanto, as mesmas coincidem com os instantes de valor mínimo da variável **ATEMP**. Tal fato, indica intervalos de redução do teor desejado de

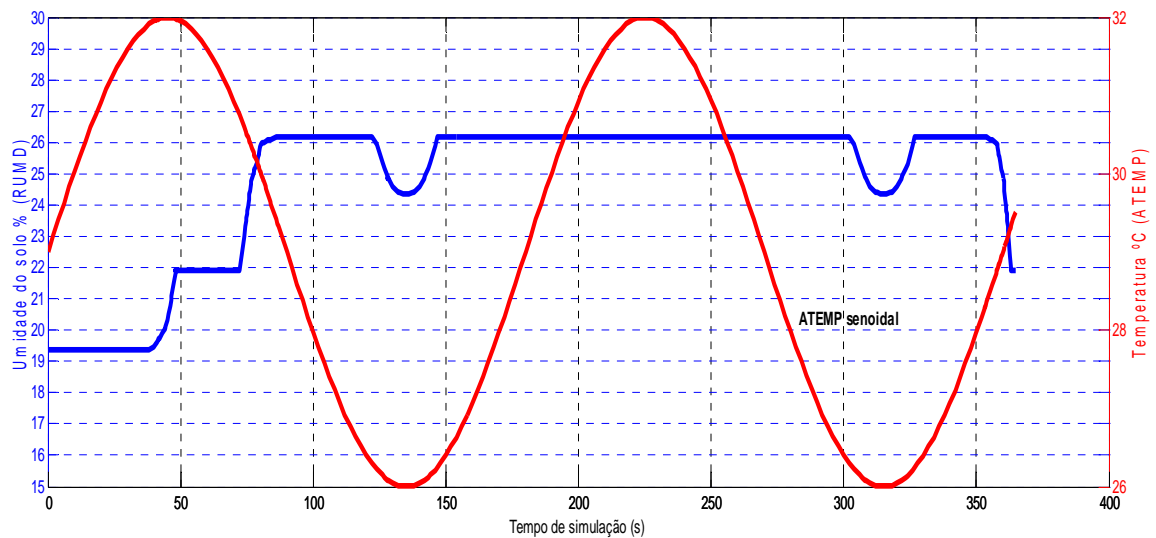
umidade do solo em virtude da diminuição da temperatura. O perfil resultante para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.15.

Figura 5.15 –Set point (argila-arenosa/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 16 regras



A Figura 5.16 destaca essas alterações no perfil de umidade do solo juntamente aos momentos de mínimo da função senoidal da variável **ATEMP**.

Figura 5.16 – Destaque do perfil de **RUMD** e mínimos de **ATEMP** senoidal

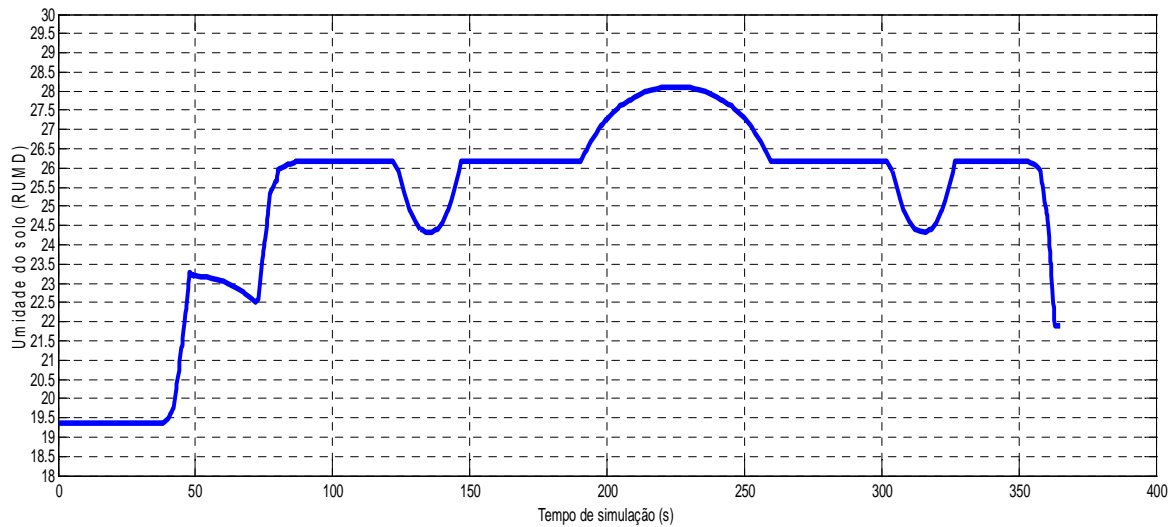


• Cenário de Teste 16 – CT16

Em CT16 foram inseridas mais 8 (oito) inferências ao cenário anterior, ao ser acrescentado o termo linguístico {MQUENTE} da variável **ATEMP** para contemplar os valores máximos da referida função senoidal. Tais valores de temperatura ocorreram em intervalos de **ESTAG** pertencentes aos termos {KC-ALTO, KC-MEDIO}.

O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** está apresentado na Figura 5.17.

Figura 5.17 – *Set point* (argila-arenosa/cana-de-açúcar) **ATEMP** senoidal – 24 regras



- **Cenários de Teste 17 a 19– CT17 a CT19**

Os cenários CT17 (36 regras), CT18 (40 regras) e CT19 (48 regras) contêm inferências que contemplam o termo linguístico {RAIZ-LONGA} da variável **TPLAN-Z**, combinado com os termos {MEDIO, QUENTE, MQUENTE} da variável **ATEMP**. O resultado obtido para a variável *fuzzy* de saída **RUMD** é o mesmo do cenário anterior, CT16 (24 regras), e já está ilustrado na Figura 5.17.

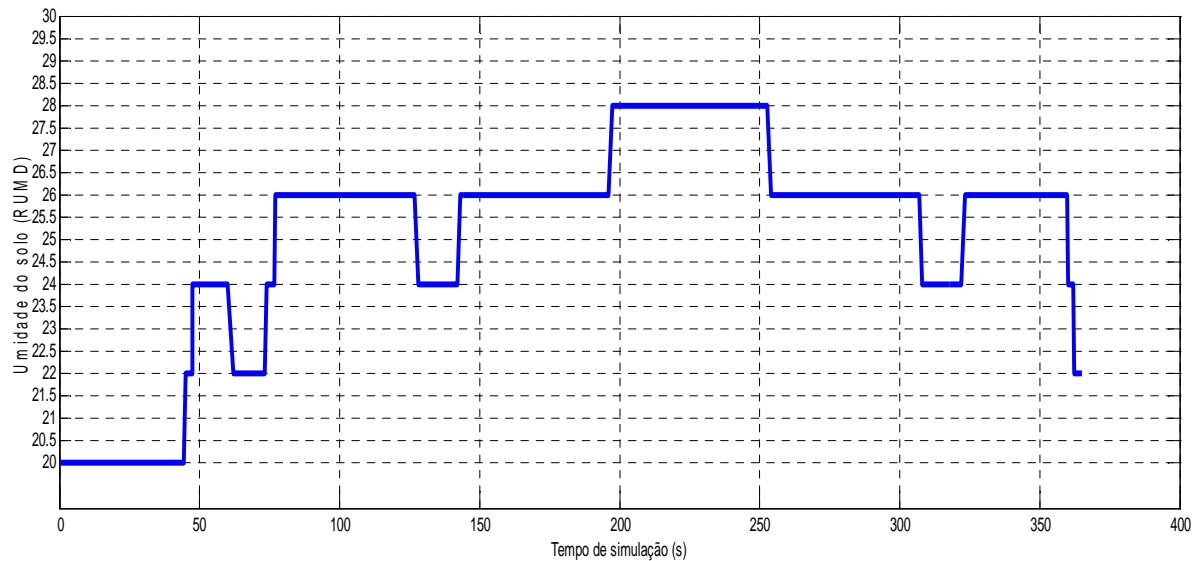
Ao ser feita a comparação entre todos os cenários de teste (CT10 a CT019) para o conjunto solo argila-arenosa/cana-de-açúcar, verifica-se que a variável climática **ATEMP**, quando representada por uma função senoidal, altera significativamente o perfil do *set point* de umidade do solo. No entanto, dos gráficos de **RUMD** para **ATEMP** senoidal, apenas os dos cenários CT16 a CT19 apresentam o mesmo perfil.

Assim, foi definido que o cenário **CT16** (24 regras) seria utilizado para fins de implementação real do sistema de controle embarcado, tanto por gerar o *set point* mais adequado para o conjunto solo-planta-clima como por possuir a base de regras com menor complexidade.

O citado perfil foi submetido aos seguintes blocos da biblioteca SIMULINK®: quantizador (intervalo de quantização = 2), para criar degraus de umidade do solo, e bloco saturador, para limitar os valores máximo e mínimo de **RUMD** aos teores de umidade **Cc** e **Pm** do solo arenoso.

O perfil quantizado está ilustrado na Figura 5.18.

Figura 5.18 – *Set point* quantizado (argila-arenosa/cana-de-açúcar) – 24 regras



Importante ressaltar que, nesse cenário escolhido, a referência de umidade do solo se aproxima mais do teor da capacidade de campo (C_c) do solo argila-arenosa, uma vez que a cana-de-açúcar pertence ao grupo de plantas com baixa tolerância à deficiência hídrica.

5.2 Controle embarcado em J2ME

Antes de implementar os controladores em código JAVATM e embarcá-los no dispositivo móvel SunSPOTTM, foram realizadas simulações para ajustar os parâmetros dos referidos sistemas de controle, a partir dos valores teóricos apresentados no capítulo 4.

Conforme informado na seção 5.1, os perfis quantizados gerados nos cenários de teste **CT06** (solo arenoso) e **CT16** (solo argila-arenosa) foram utilizados como referência para os sistemas de controle em malha fechada. O tempo de simulação foi redefinido para 80.000 (oitenta mil) segundos de forma a manter a proporcionalidade com o atraso de transporte da **FT** dos sistemas-solo. As funções que definem as variáveis **ESTAG** e **ATEMP** também foram redimensionadas de acordo.

Nas seções a seguir, estão apresentados os resultados das ações simuladas e reais da estratégia de controle *fuzzy-TSK*, modelada no capítulo anterior. A Figura 5.19 ilustra o diagramas de blocos do sistema de controle completo (*set point* com *fuzzy* Mamdani + controle com *fuzzy-TSK*) para o processo-solo 1 e a Figura 5.20 para o processo-solo 2.

Figura 5.19 - Diagrama de blocos do sistema de controle – solo 1

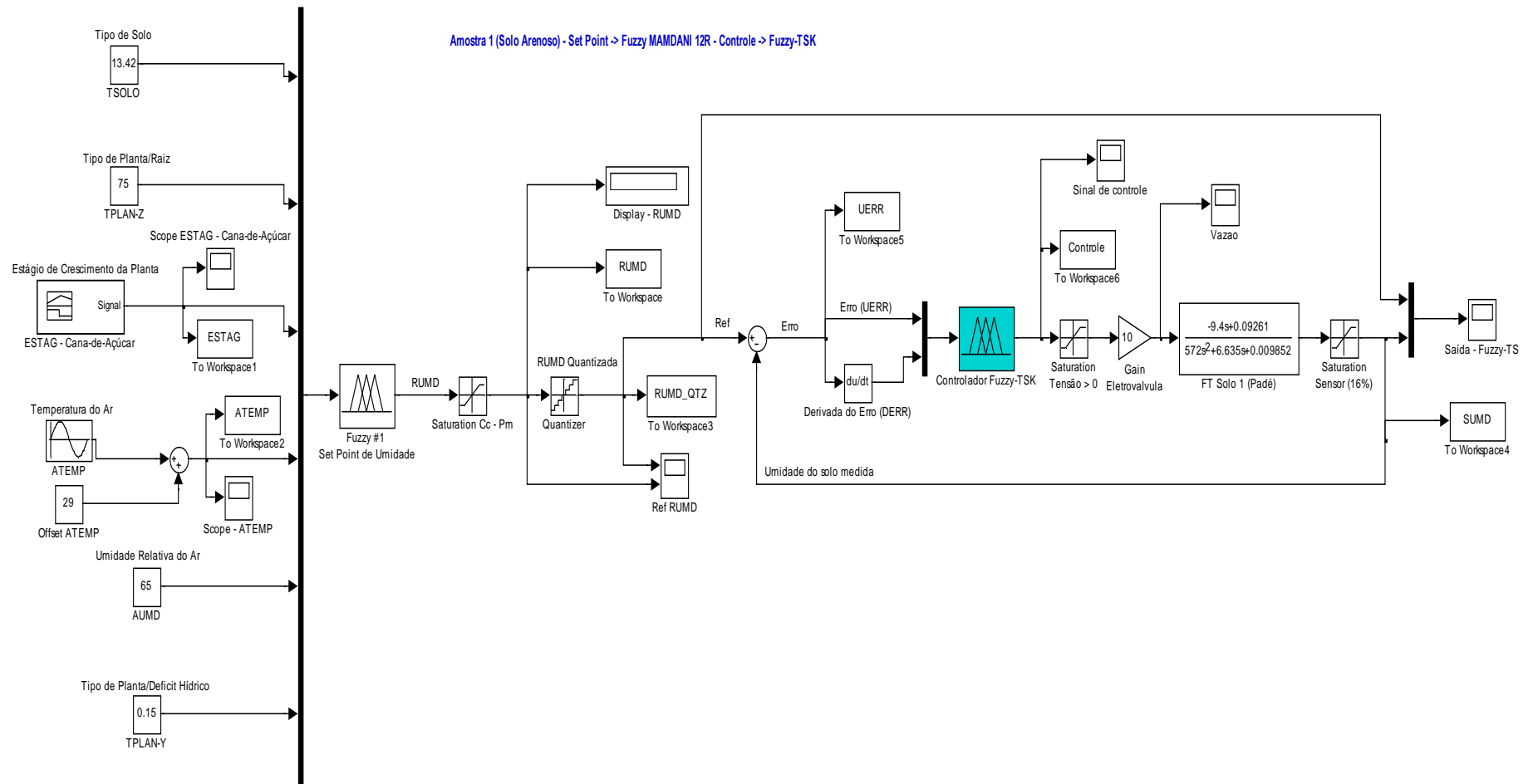
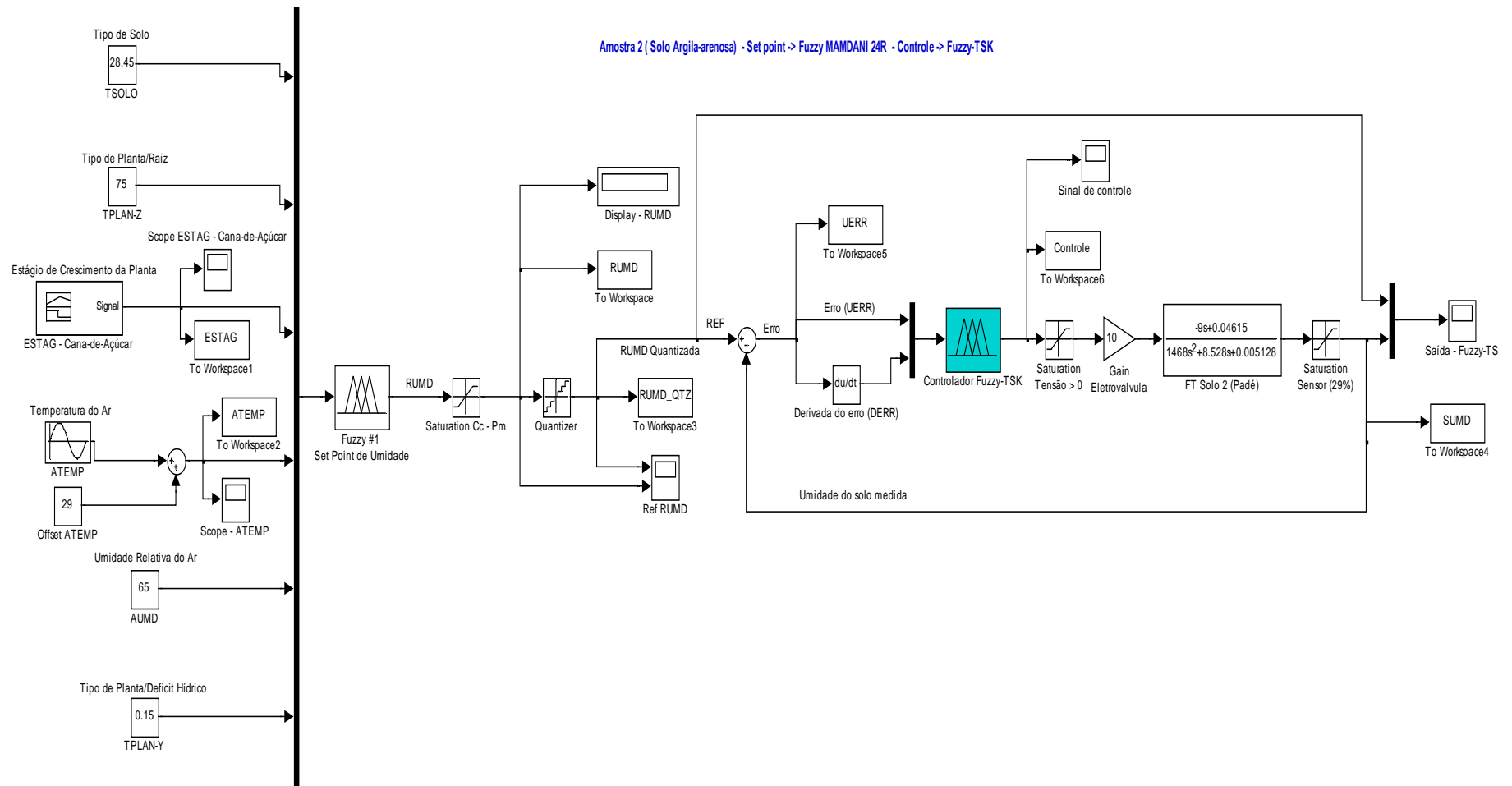


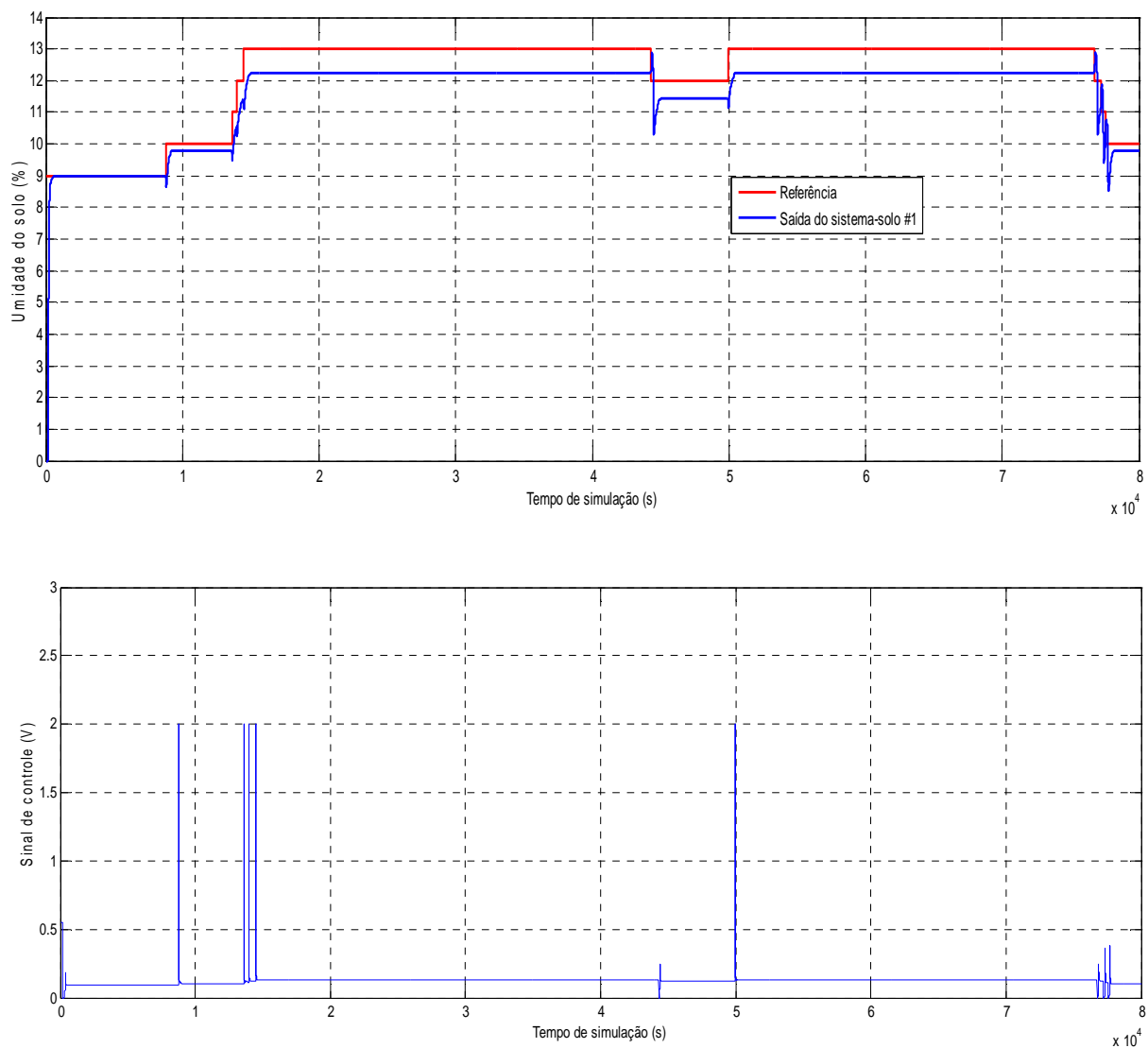
Figura 5.20 - Diagrama de blocos do sistema de controle – solo 2



5.2.1 Controlador *fuzzy*-TSK

As Figuras a seguir ilustram as respostas simuladas e reais dos sistemas-solo 1 e 2 à estratégia de controle *fuzzy*-TSK. A Figura 5.21 ilustra as curvas da referência, da resposta simulada do processo-solo 1 e do sinal de controle *fuzzy*-TSK após o bloco saturador ($V_{\text{limiar}} = 2\text{V}$).

Figura 5.21 – Resposta simulada do solo 1 (arenoso) ao controle *fuzzy*-TSK

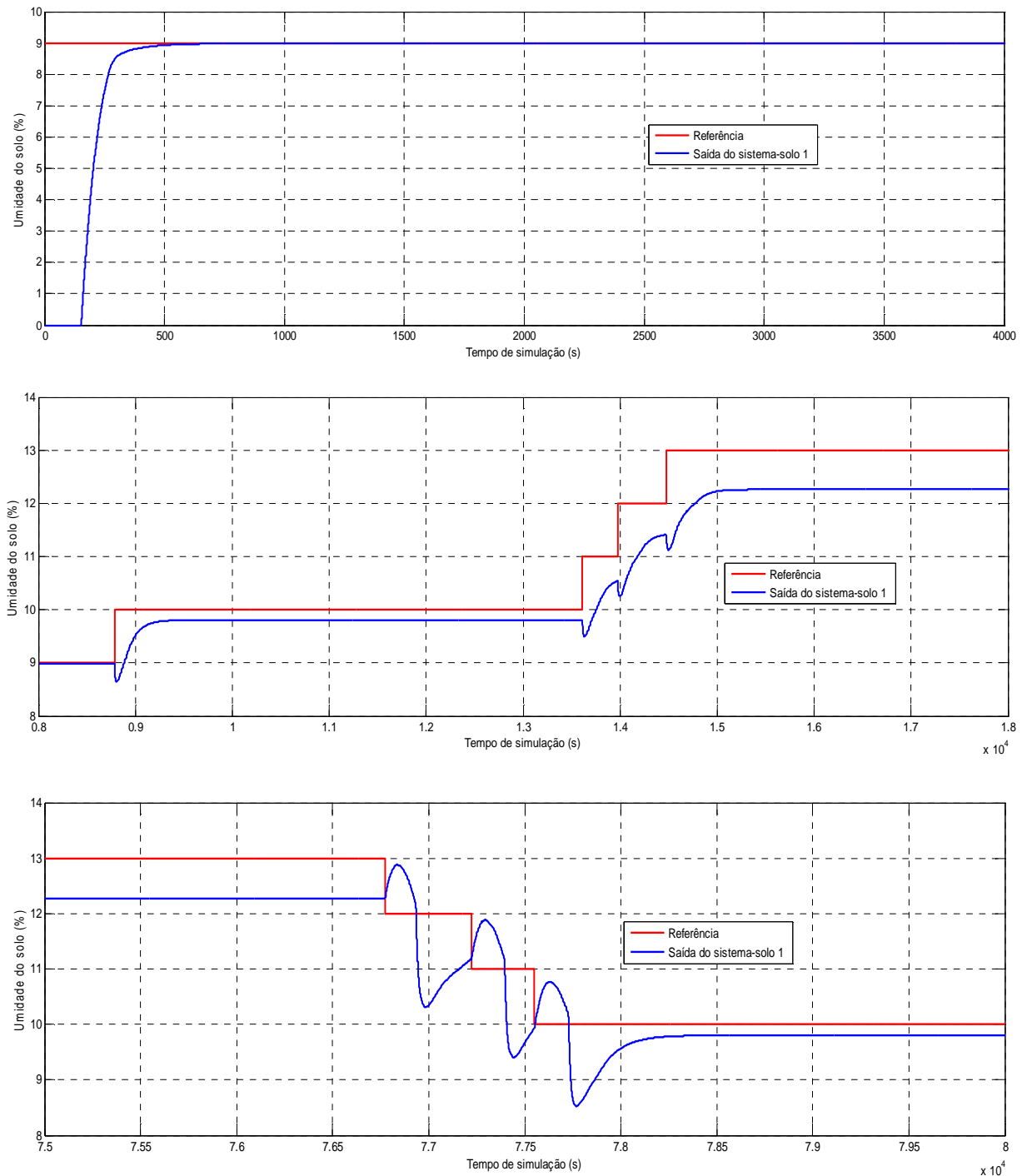


Não ocorre sobressinal no início do perfil de referência e a resposta do referido sistema-solo apresenta comportamento subamortecido nas transições crescentes de nível de referência. Verifica-se que o erro de regime permanente e_{∞} não se anula em nenhum dos trechos do perfil de referência, mas é estável. O valor de e_{∞} varia entre 0,013 ($e_{\%} = 0,14\%$ em relação ao *set point* de 9%) e 0,74 ($e_{\%} = 5,7\%$ em relação ao *set point* de 13%).

No segundo gráfico da Figura 5.21, verifica-se que o sinal de controle aplicado para abertura da eletroválvula não apresenta oscilações nos trechos relativos ao regime permanente. Os picos de tensão, referentes ao limiar de 2 V, ocorrem nas transições crescentes de referência que demandam os maiores esforços de controle.

A Figura 5.22 apresenta os detalhes da resposta simulada ao citado controle, particularmente, o degrau inicial e as alterações intermediárias de nível do processo-solo arenoso.

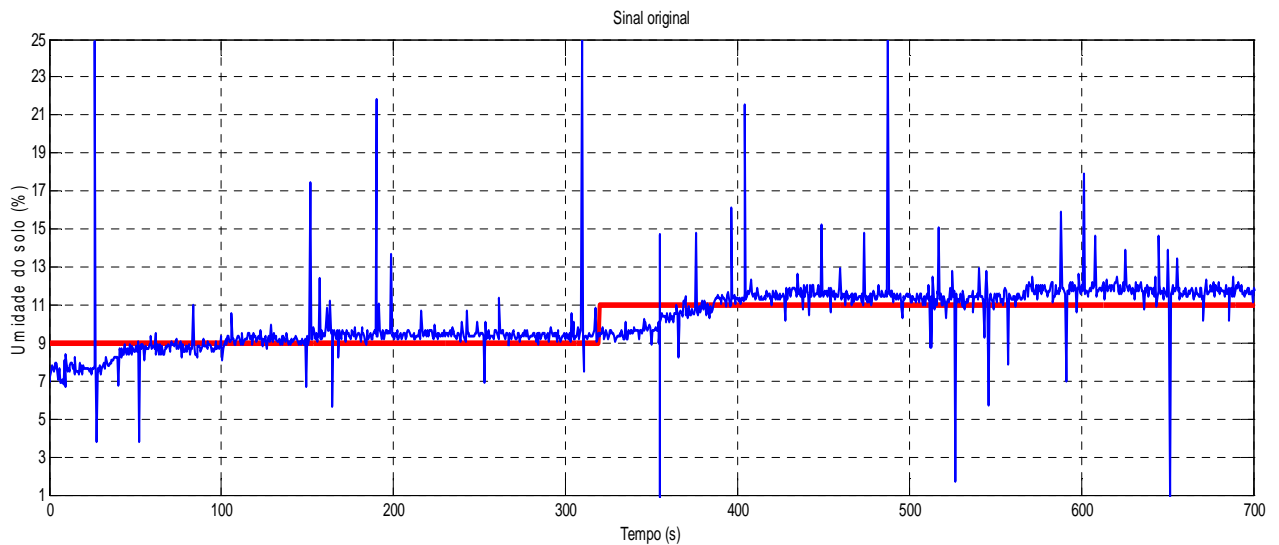
Figura 5.22 - Detalhes da resposta simulada do solo 1 ao controle *fuzzy-TSK*



A Figura 5.22 mostra que nas transições decrescentes do *set point* há presença de sobressinal, cujo valor máximo é de 8% na transição do nível 12% para 11% de umidade do solo. Nota-se, finalmente, que a estratégia **fuzzy-TSK** simulada não acompanha a referência do sistema-solo 1 em todos os trechos, pois o coeficiente \mathbf{a}_0 (*offset*) deste controlador não executa a mesma ação integral do erro que o parâmetro correspondente de um controle **PID**.

Para a implementação real com o sistema embarcado no dispositivo SunSPOT™, foi definida uma faixa de operação de 9% para 11% como referência do nível de umidade do solo. A Figura 5.23 ilustra o comportamento do processo-solo 1 para o controlador **fuzzy-TSK** embarcado.

Figura 5.23 – Resposta real do solo 1 (arenoso) ao controle **fuzzy-TSK**



Observa-se no gráfico da Figura 5.23 que a resposta do sistema experimental apresenta picos considerados como ruído de medição. Tal ruído indica a presença de falhas da montagem experimental como mau contato, solda fria, interferência eletromagnética etc. Por esta razão, foi aplicada a técnica de filtragem não recursiva de tempo discreto (FIR) nos dados coletados, mais especificamente o filtro de média móvel, para minimizar a variabilidade do sinal devido ao excesso de ruído (OPPENHEIM E WILLSKY, 2010). A forma geral de um filtro FIR de média móvel é representada pela equação (5.1),

$$y[n] = \frac{1}{(N+M+1)} \sum_{k=-N}^M x[n+k] \quad (5.1)$$

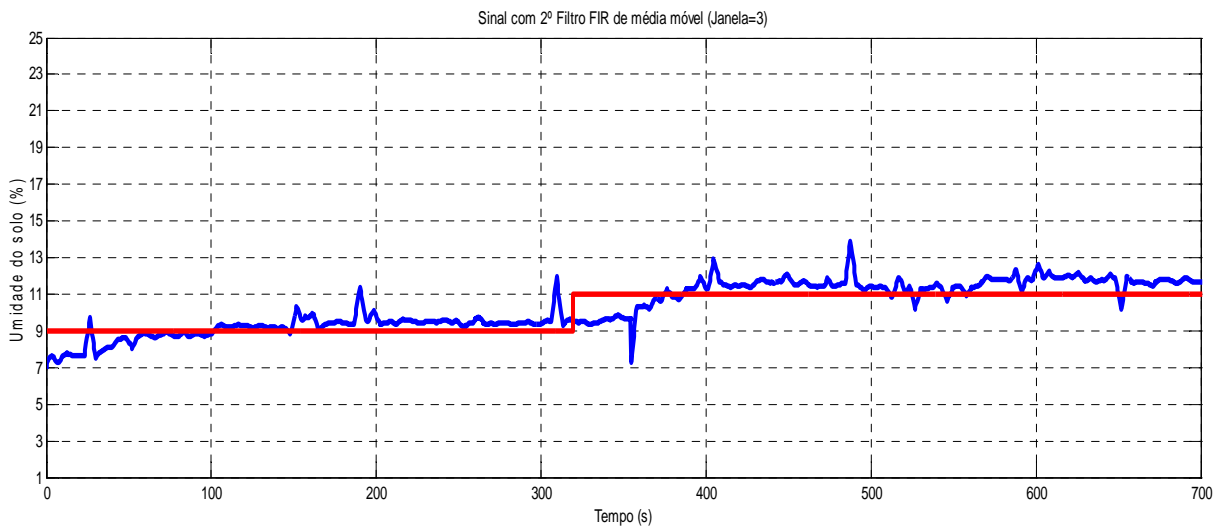
em que: a saída $y[n]$ é a média dos valores vizinhos a $x[n]$ contidos no intervalo $x[n-N]$ até $x[n+M]$, $x[n]$ é a n -ésima amplitude do sinal medido (n -ésima entrada do filtro), N é o limite inferior e M é o limite superior da janela de amostragem.

Foi definido que o filtro FIR de média móvel teria janela de amostragem igual a 3 ($N=M=3$) e a equação (5.2) foi aplicada duas vezes aos dados medidos da Figura 5.23

$$y[n] = \frac{1}{7} \sum_{k=-3}^3 x[n+k] = \frac{x[n-3]+x[n-2]+x[n-1]+x[n]+x[n+1]+x[n+2]+x[n+3]}{7} \quad (5.2)$$

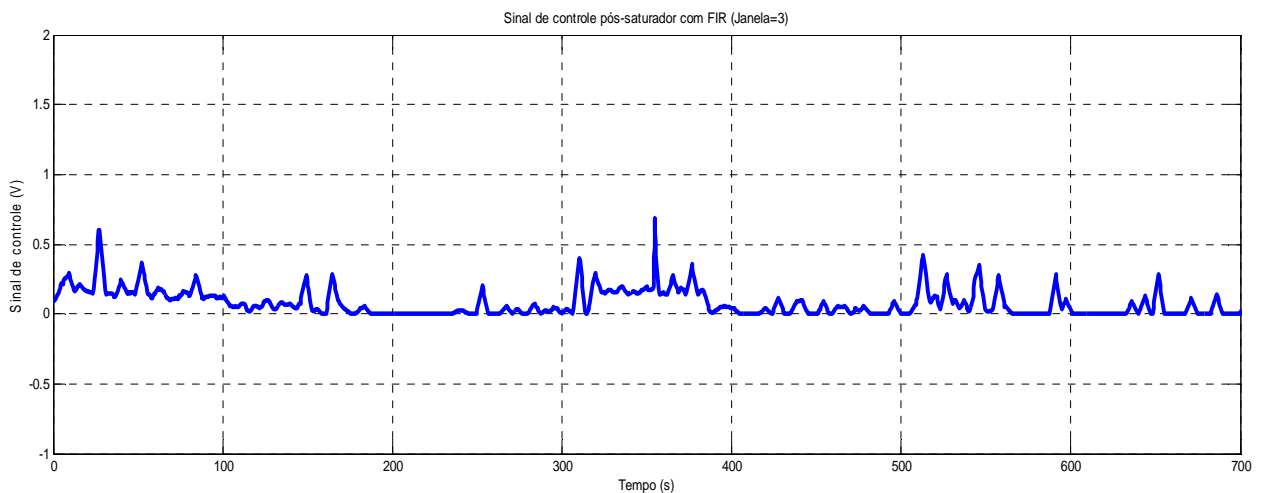
A Figura 5.24 apresenta o sinal duplamente filtrado e a Figura 5.25 mostra a curva do sinal de controle *fuzzy-TSK*:

Figura 5.24 – Resposta real do solo 1 com filtro de média móvel



O valor médio de e_{∞} é -0,41 no trecho do *set point* de 9% ($e_{\%} = -4,4\%$) e é igual a -0,63 no trecho do *set point* de 11% ($e_{\%} = -5,7\%$). Verifica-se, assim, que o erro de regime permanente e_{∞} não se anula em nenhum dos trechos do perfil de referência, mas, pode-se considerar que o sistema de controle *fuzzy-TSK* real consegue seguir a referência de umidade do solo.

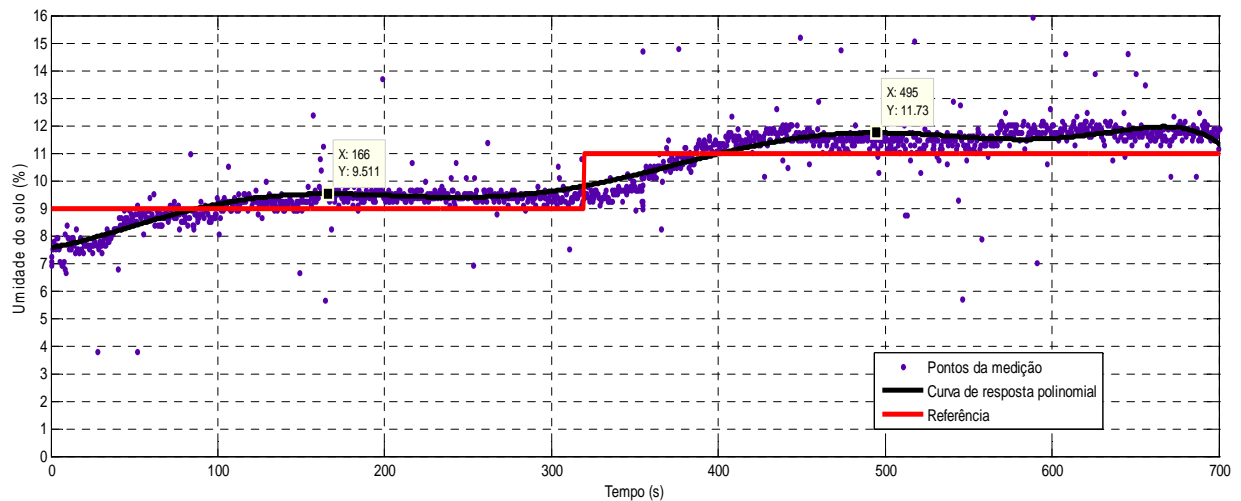
Figura 5.25 – Sinal de controle *fuzzy-TSK* ao processo-solo 1



Verifica-se que há esforço de controle mais destacados nas transições crescentes de referência. No entanto, o seguimento do *set point* de 9% apresenta quase o mesmo nível de sinal de controle que para o degrau de 11%. Isto se dá porque o controlador percebe uma amplitude do degrau igual a 2% em ambos os casos, uma vez que o sistema 1 já estava com umidade de solo inicial próxima de 7%. Como e_{∞} é não nulo, a curva do sinal de controle apresenta algumas oscilações nos trechos relativos ao regime permanente.

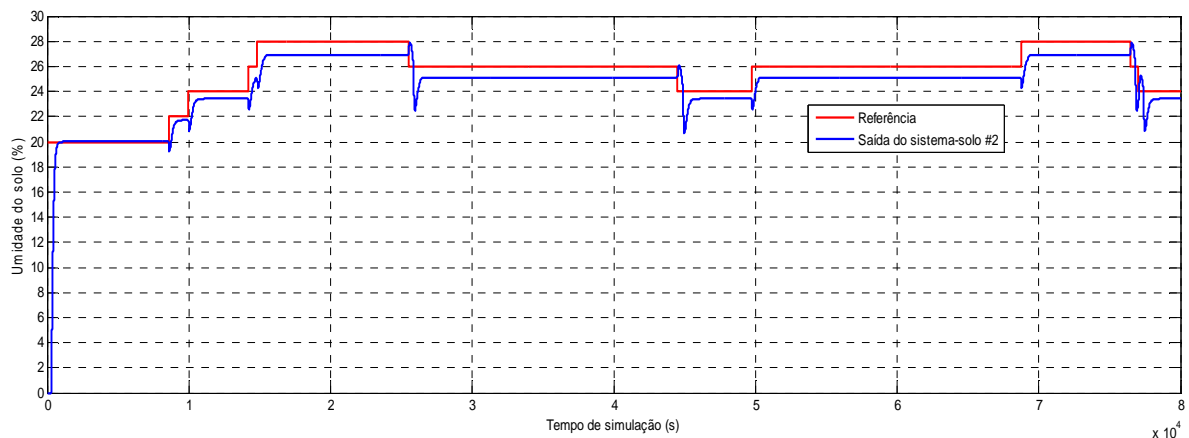
Outro ponto a destacar é que o sistema-solo real apresenta sobressinal discreto nas transições crescentes de nível de referência. O primeiro sobressinal é de 5,7% (trecho do *set point* de 9%) e o segundo sobressinal é de 6,6% (trecho do *set point* de 11%). A Figura 5.26 apresenta a curva de resposta gerada pelo *toolbox cftool* do MATLAB® e destaca os valores citados.

Figura 5.26 – Curva sugerida para a resposta real do sistema-solo 1



A Figura 5.27 apresenta as curvas do sinal de referência, da resposta simulada do processo-solo 2.

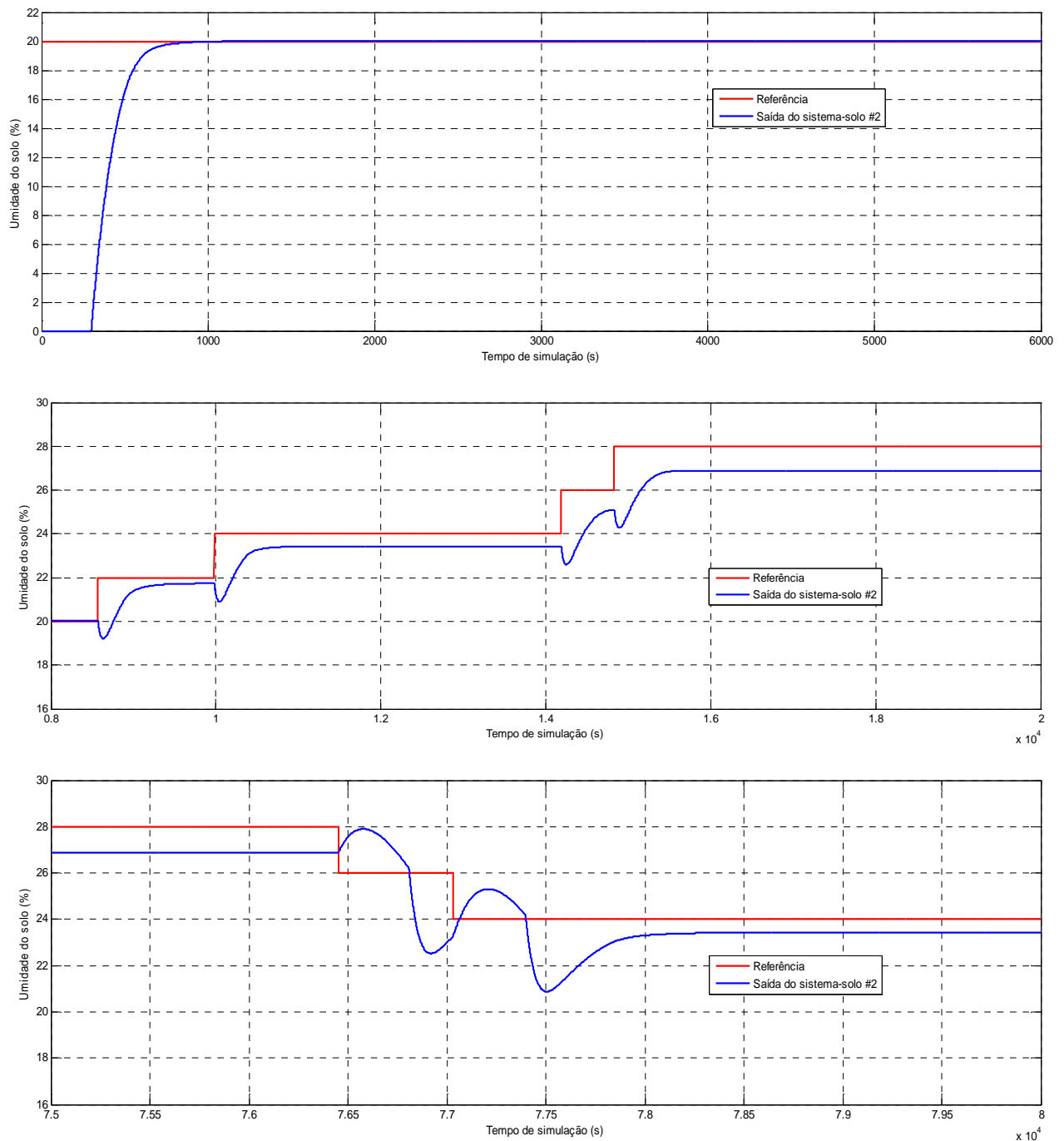
Figura 5.27 – Resposta simulada do solo 2 (argila-arenosa) ao controle *fuzzy-TSK*



A resposta do referido sistema-solo também apresenta comportamento subamortecido nas transições crescentes de nível de referência (como para o solo 1). É observado que o erro de regime permanente e_{∞} é diferente de zero em todos os trechos do perfil de referência, mas é estável. O valor de e_{∞} varia entre -0,04 ($e_{\%} = -0,2\%$ em relação ao *set point* de 20%) e +1,23 ($e_{\%} = +4,4\%$ em relação ao *set point* de 28%). Nas transições decrescentes do *set point* há presença de sobressinal, cujo valor máximo é de 8,7% na transição do nível 26% para 24% de umidade do solo.

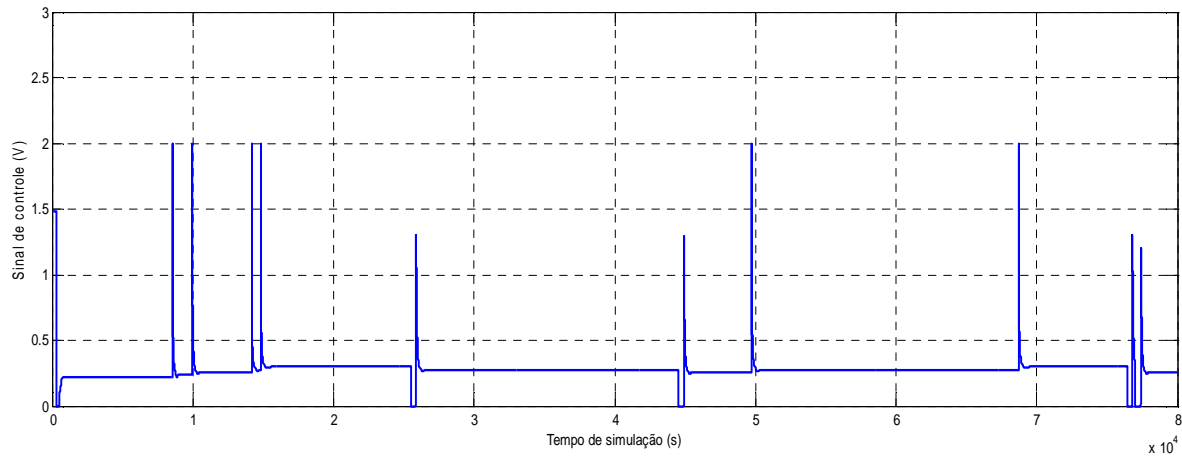
A Figura 5.28 ilustra os detalhes da resposta simulada do solo 2 ao controle *fuzzy-TSK*.

Figura 5.28 - Detalhes da resposta simulada do solo 2 ao controle *fuzzy-TSK*



A Figura 5.29 ilustra o sinal de controle *fuzzy-TSK* após o bloco saturador ($V_{\text{limiar}} = 2\text{V}$).

Figura 5.29 – Sinal de controle simulado ao processo-solo 2

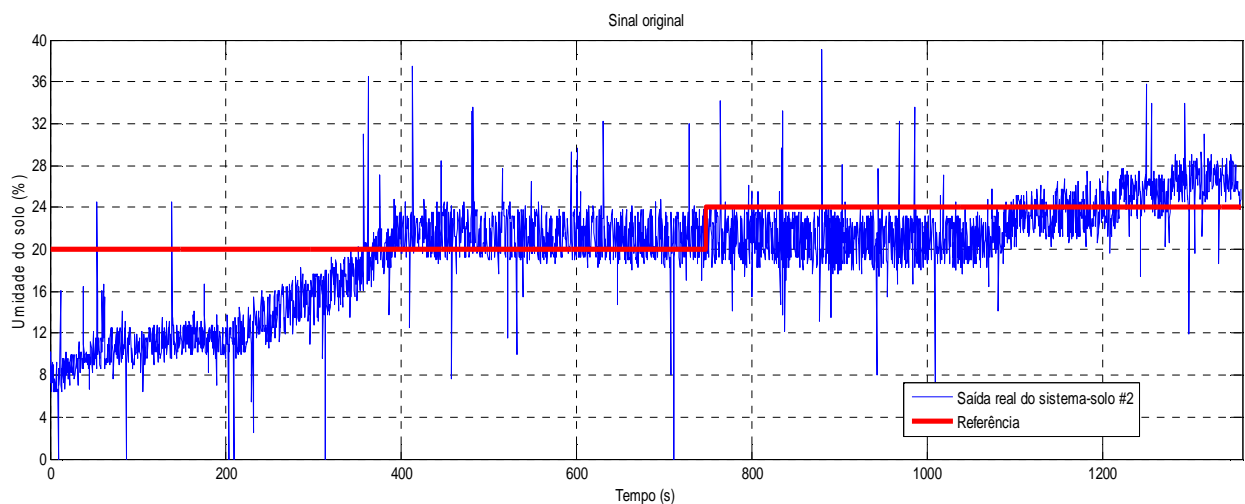


O sinal de controle aplicado, ilustrado na Figura 5.29, não apresenta oscilações nos trechos relativos ao regime permanente. Igualmente ao ocorrido com o sinal de controle aplicado ao processo-solo 1, os picos de tensão, referentes ao limiar de 2 V, ocorrem nas transições crescentes de referência que demandam os maiores esforços de controle.

Nota-se, que a estratégia *fuzzy-TSK* simulada não acompanha a referência do sistema-solo 2 em todos os trechos, assim como ocorreu para o solo 1. O coeficiente a_0 (*offset*) deste controlador não executa a mesma ação integral do erro que o parâmetro correspondente de um controle **PID**. Para o sistema de controle real embarcado no dispositivo SunSPOT™, foi definida uma faixa de operação de 20% para 24% como referência do nível de umidade do solo.

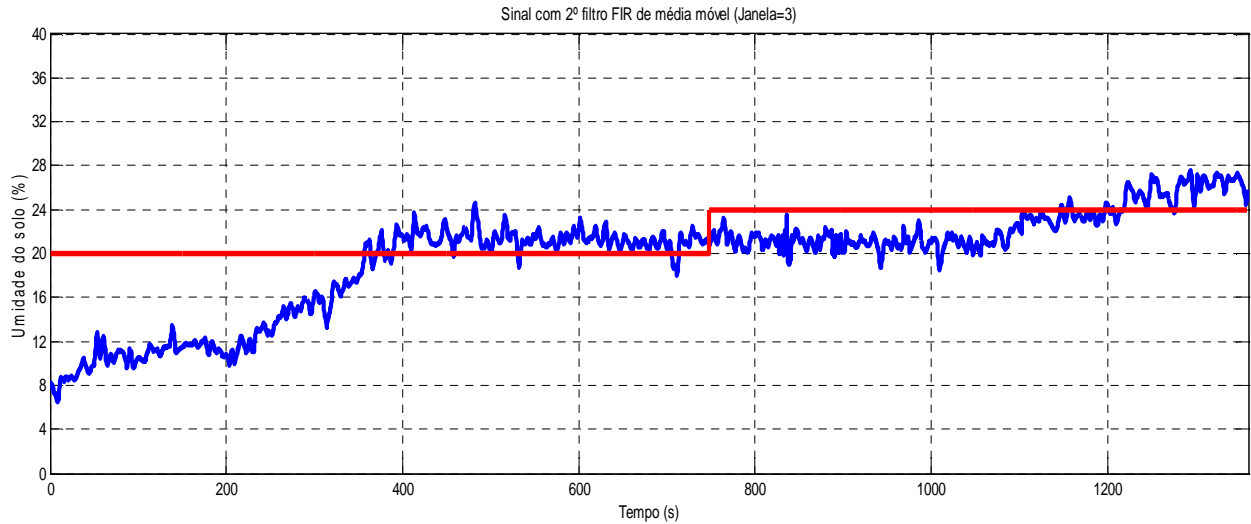
A Figura 5.30 mostra o comportamento real do processo-solo 2 para o controlador *fuzzy-TSK* embarcado.

Figura 5.30 – Resposta real do solo 2 (argila-arenosa) ao controle *fuzzy-TSK*



Similar ao ocorrido na medição do experimento anterior, picos considerados como ruído de medição são observados no gráfico da Figura 5.30. Foi aplicado o filtro FIR de média móvel, com janela de amostragem igual a 3, aos dados originais medidos na saída do processo-solo 2. O sinal duplamente filtrado está representado na Figura 5.31.

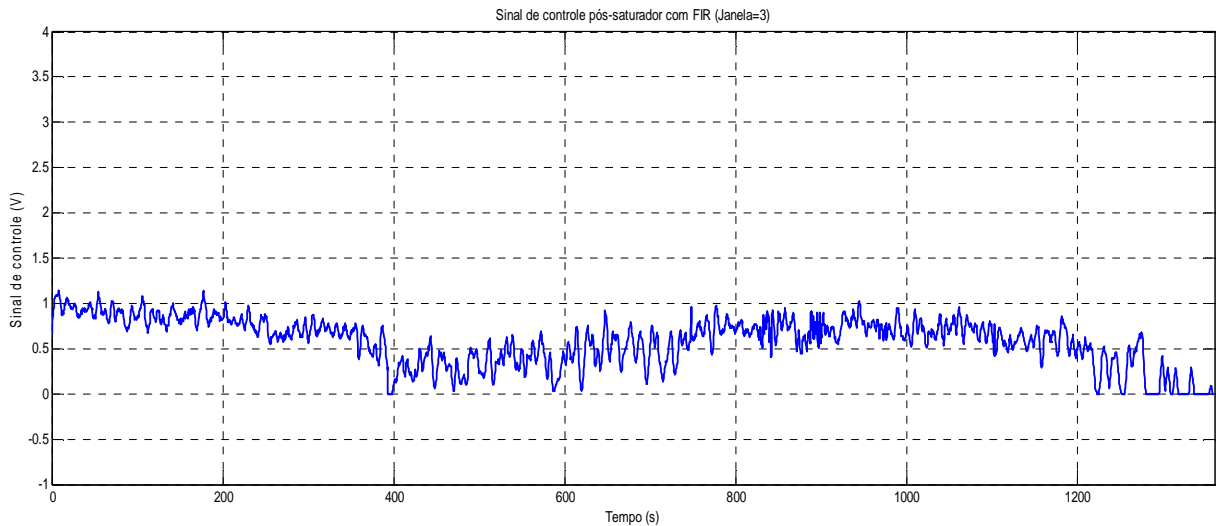
Figura 5.31 - Resposta real do solo 2 com filtro FIR de média móvel



O valor médio de e_{∞} é -1,29 no trecho do *set point* de 20% ($e_{\%} = -6,5\%$) e é igual a -1,78 no trecho do *set point* de 24% ($e_{\%} = -7,4\%$). Como verificado para o processo-solo anterior, o erro de regime permanente e_{∞} não se anula em nenhum dos trechos do perfil de referência, mas, pode-se considerar que o controlador *fuzzy-TSK* real para o solo 2 consegue seguir a referência de umidade do solo.

A Figura 5.32 ilustra a curva do sinal de controle *fuzzy-TSK* ao processo-solo 2.

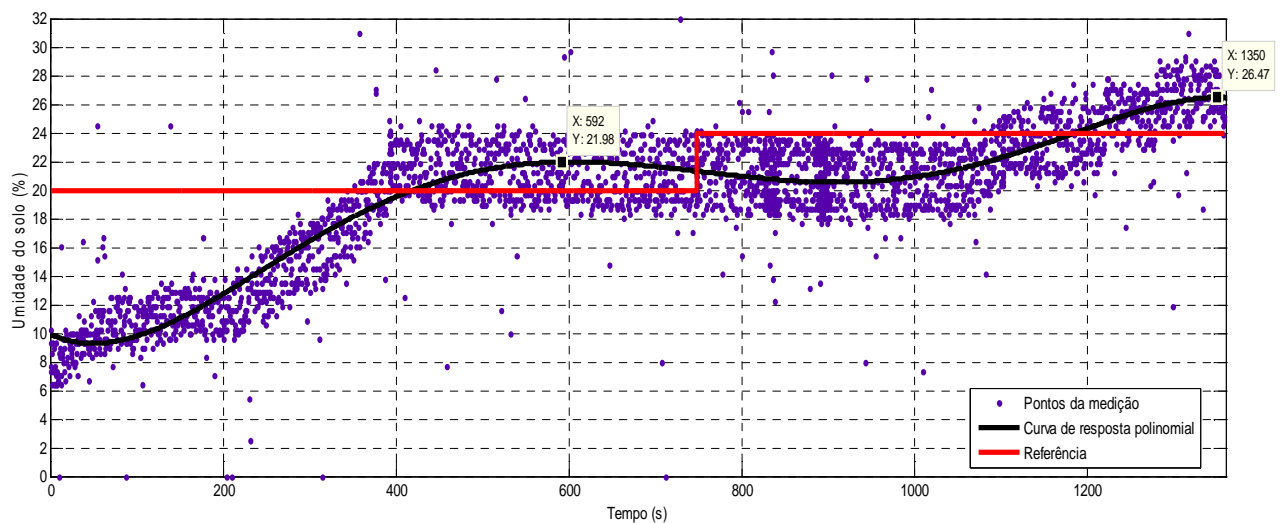
Figura 5.32 – Sinal de controle *fuzzy-TSK* ao processo-solo 2



Verifica-se que há dois momentos de maior esforço de controle nas transições crescentes de referência: um correspondente à tentativa de seguimento do *set point* de 20% de umidade do solo e o outro ao seguimento do degrau de 24%. Como e_{∞} é não nulo, a curva do sinal de controle apresenta oscilações nos trechos relativos ao regime permanente.

O sistema-solo 2 real também apresenta sobressinal aceitável nas transições crescentes de nível de referência. O primeiro sobressinal é de 9,9% (trecho do *set point* de 20%) e o segundo é de 10,3% (trecho do *set point* de 24%). A Figura 5.33 apresenta o aspecto sugerido da curva de resposta (gerada pelo *toolbox cftool* do MATLAB®) e destaca os valores citados.

Figura 5.33 – Curva sugerida para a resposta real do sistema-solo 2



O controlador *fuzzy-TSK* assemelha-se a um controle **PD**, uma vez que os termos a_1 e a_2 têm a mesma função dos ganhos K_P e K_D , respectivamente. A Tabela 5.5 apresenta os referidos parâmetros, otimizados de forma heurística, para os cenários com solo **S1** (arenoso) e com solo **S2** (argila-arenosa).

Tabela 5.5 – Termos Sugeno das funções paramétricas de saída

Solo	Coefficiente	Sugeno-0	Sugeno-1	Sugeno-2
S1 (arenoso)	a_1 (K_P)	0	0,048	0,048
	a_2 (K_D)	0	0,5	0,5
	a_0 (<i>offset</i>)	0	0,095	0,082
S2 (argila-arenosa)	a_1 (K_P)	0	0,062	0,062
	a_2 (K_D)	0	0,5	0,5
	a_0 (<i>offset</i>)	0	0,225	0,24

5.3 Comentários e conclusões

Os sistemas supervisórios *fuzzy* idealizados para os cenários de teste dos processos-solo arenoso e argila-arenosa foram simulados e integrados aos sistemas de controle embarcados no dispositivo móvel SunSPOTTM. Foram definidos os parâmetros dos controladores embarcados, do tipo *fuzzy-TSK*, e foram mostrados os resultados da referida estratégia de controle.

O funcionamento correto e adequado dos sistemas de controle *fuzzy* demonstram a eficácia da proposta de aplicá-los em agricultura de precisão espacialmente diferenciada, conforme o propósito deste trabalho.

No entanto, o desempenho dos controladores projetados é passível de melhorias em pesquisas futuras, uma vez que não faz parte do escopo deste trabalho buscar a sintonia ótima dos sistemas apresentados. Em cenários que demandem o seguimento de referência com melhor desempenho, novas estratégias de controle poderão ser testadas e discutidas para a implementação em campo, como exemplo a utilização de um controle **PID**-escalonado.

6. Conclusões e perspectivas

Este trabalho apresentou o desenvolvimento teórico e experimental de um sistema de controle *fuzzy* espacialmente diferenciado aplicado a um sistema de irrigação, baseado no sensoriamento da umidade do solo com nós sensores sem fio. Os sistemas de controle *fuzzy-Takagi-Sugeno-Kang* (TSK) para diferentes processos-solo foram simulados com a ferramenta de programação SIMULINK® e foram construídos experimentalmente como sistemas embarcados em um dispositivo móvel SunSPOT™ operando com tecnologia de comunicação *ZigBee*.

A arquitetura modular do sistema permitiu a realização de testes para diferentes cenários de sistemas-solo, combinações de variáveis de entrada e base de regras de inferência. Desta forma, o objetivo principal proposto por este trabalho, qual seja o projeto de um sistema *fuzzy* para definição de uma referência de umidade do solo de acordo com as necessidades hídricas de uma cultura vegetal, foi atendido. Os objetivos específicos relativos à diversidade de sensores, cenários de teste, base de regras e uso de controladores embarcados em dispositivos sem fio também foram atendidos.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, buscou-se definir a configuração do supervisor *fuzzy* com o menor número de regras possível, de acordo com as variáveis de entrada do conjunto solo-planta e as variações climáticas. Contudo, é importante destacar que o subsistema *fuzzy* 1 (modelo Mamdani) determina dinamicamente o *set point* de umidade do solo, não só conforme os parâmetros de entrada estáticos (tipo de solo, tipo de planta), mas, sobretudo, de acordo com os valores dinâmicos assumidos pelas variáveis climáticas e o estágio de crescimento da planta.

Assim, se forem empregadas outras variáveis físicas (temperatura do solo, radiação solar, velocidade do vento etc) e/ou se ocorrerem condições climáticas diversas das tratadas aqui, poderão ser gerados diferentes perfis de referência de umidade do solo, embora usados os mesmos tipos de solo e plantas considerados neste trabalho.

Foi testada a estratégia *fuzzy-TSK* para cada processo-solo, objetivando executar o controle embarcado no nó sensor e atuar no sistema de irrigação. Os controladores foram avaliados quanto ao *overshoot* (máximo sobressinal) e o erro de regime. Em todos os resultados obtidos, o tempo de acomodação e os níveis de sobressinal foram considerados aceitáveis para os sistemas-solo de segunda ordem.

Todavia, há que se registrar que o desempenho dos referidos controladores nos quesitos erro permanente (e_{∞}) e seguimento do perfil de referência, particularmente nas mudanças de nível, está relacionado às condições experimentais do trabalho. Isto é, o atraso de transporte nas resposta dos processos-solo está mais evidenciado porque a dinâmica dos testes está mais acelerada do que o que ocorreria em um sistema de irrigação em campo. Caso fosse implementado um sistema de controle *fuzzy* com intervalo de medição e atuação diários, o atraso de transporte se tornaria desprezível.

Finalmente, o funcionamento correto e adequado dos sistemas de controle *fuzzy*, tanto em simulação quanto experimentalmente, demonstram sua eficácia e viabilidade para aplicações em agricultura de precisão espacialmente diferenciada, conforme o propósito deste trabalho.

6.1 Estudos futuros

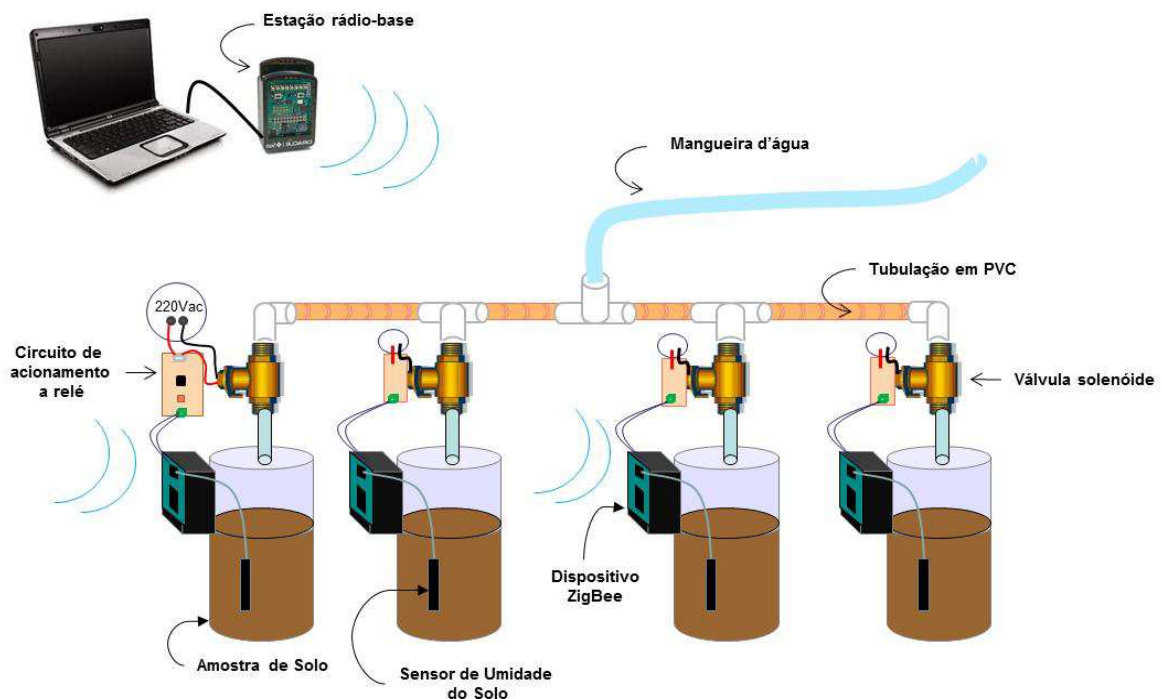
Embora os objetivos definidos no escopo deste trabalho tenham sido alcançados, existem oportunidades de desenvolvimento de trabalhos futuros como continuação deste trabalho de dissertação:

- Uso de **RSSF** com controle *fuzzy* central gerando múltiplos *set points* dinâmicos e com comunicação ponto-a-ponto com o nó-sensor do sistema solo-clima específico;
- Utilização de técnicas híbridas de lógica *fuzzy* e Inteligência Artificial (**IA**), como *neuro-fuzzy* ou *fuzzy-GA* (*Genetic Algorithm*) para aprendizado e sintonia das funções de pertinência do supervisor *fuzzy* e do controlador *fuzzy-TSK*;
- Aplicação de outras estratégias de controle como *fuzzy-PI* ou *fuzzy-PID* escalonado para definição dinâmica dos ganhos/parâmetros dos controladores conforme alterações do perfil de referência de umidade do solo;
- Inclusão de sensor de chuva para estudar como as perturbações climáticas afetam o comportamento do sistema *fuzzy*;
- Aplicação da arquitetura de sistema *fuzzy* espacialmente diferenciado para controle de outros insumos como fertilizantes, defensivos agrícolas, controle de temperatura e/ou controle de umidade do ar inerentes à agricultura de precisão ou outros sistemas ambientais;
- Uso de Rede de Sensores Sem Fio (**RSSF**) agregados ao uso de mapas georreferenciados para aplicações em agricultura de precisão em campos vastos;

- Uso de sensores/transdutores reais para as grandezas físicas como umidade do ar, temperatura do ar, temperatura do solo e sensores de chuva para geração de novos perfis de referência de umidade do solo;
- Estudo e construção de sensores de umidade do solo de baixo custo com diferentes tecnologias de medição (**TDR**, resistivo, capacitivo etc); estudo e construção de soluções para autonomia energética dos nós sensores sem fio (painéis solares); estudo do desempenho do sistema de controle para diferentes atuadores do sistema de irrigação (ex: motobombas);
- Implementação de sistema *fuzzy* espacialmente diferenciado com rede de nós sensores sem fio em outros padrões de comunicação, como IEEE 802.11 (*Wi-Fi*) ou IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), e análise de desempenho de rede/controlador relativo a parâmetros como concorrência entre nós, interferência, conservação de energia e alcance da rede.

Como sugestão para futuros estudos, um sistema de irrigação multissensor experimental poderá ter o arranjo ilustrado na Figura 6.1. Ele deverá ser composto de um sistema de tubulação hidráulica, de recipientes que acondicionarão as amostras de solo, sensores de umidade do solo, dispositivos móveis e circuitos de acionamento dos atuadores, de acordo com representação abaixo.

Figura 6.1 – Esquema ilustrativo de um ambiente de teste multissensor



7. Anexos

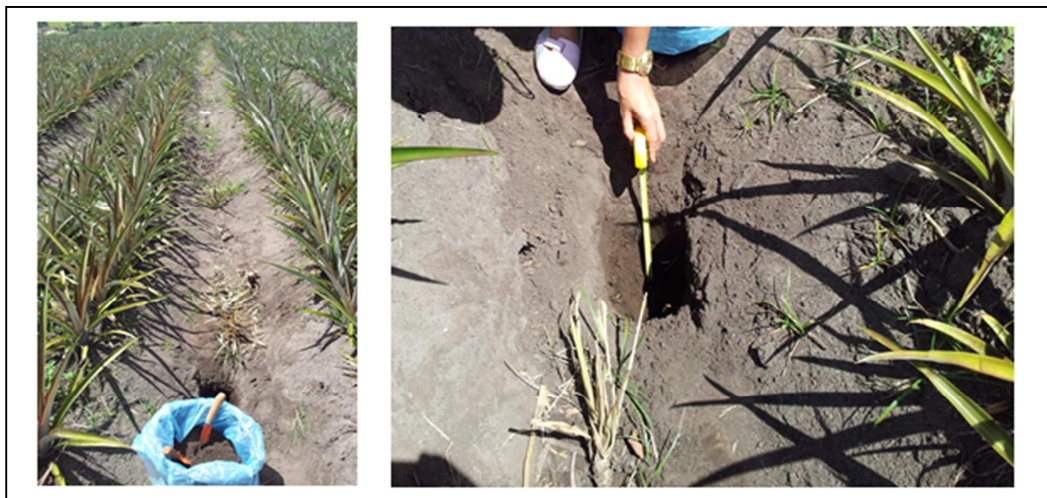
Anexo I – Coleta e análise das amostras de solo

Foram coletadas amostras simples, de ponto único, retiradas com pá de jardinagem em áreas rurais de alguns municípios do estado da Paraíba, como apresentado nas Figuras 7.1 e 7.2.

Figura 7.1 – Coleta de amostra de solo no município de Santa Rita-PB



Figura 7.2 – Coleta de amostra de solo no município de Sapé-PB



O procedimento de coleta das amostras foi baseado nas recomendações de Squiba et al. (2011), e foram retiradas em profundidades variando de 10cm a 30cm, conforme Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Dados da coleta das amostras de solo

Amostra	Tipo de solo	Profundidade	Cultura	Localização
1	Areia	10-30 cm	Canavial	Zona Rural de Santa Rita (BR230 Km 44,5)
2	Argila-arenosa	10-20 cm	Abacaxi	Zona Rural de Sapé (PB004–3 km antes de Sapé/JPA→SPH)

As amostras de solo coletadas foram submetidas à análise laboratorial de propriedades físico-químicas, realizada pelo Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) da UFCG. A Tabela 7.2 apresenta um quadro-resumo dos indicadores encontrados. Esses dados foram utilizados para definição dos valores da variável de entrada **TSOLO** do sistema *fuzzy* que define o *Set Point* de umidade do solo e para escolha da equação de calibração dos sensores instalados. A cópia dos laudos originais está anexada a este documento.

Tabela 7.2 – Dados da análise laboratorial das amostras de solo coletadas

Amostras	1 (33002)	2 (33004)
Granulometria (%)		
Areia	92,20	59,63
Silte	1,65	5,72
Argila	6,15	34,65
Classificação Textural	Areia	Argila Arenosa
Ds - Densidade do Solo (g/cm³)	1,50	1,11
Densidade de Partículas (g/cm³)	2,69	2,73
Porosidade %	44,24	59,34
Θ - Umidade %		
Natural	0,5	1,52
Cc (0,33 atm)	13,42	28,45
Pm (15,0 atm)	1,80	12,49
DT - Água Disponível (Cc-Pm)	11,62	15,96
Condutividade Elétrica (mmhos/cm ou dS/m)	0,14	0,12

No laudo emitido pelo LIS/UFCG, os valores de **Água Disponível (DT)** informados são diferentes dos apresentados na literatura (GOMES, 1994). Observa-se que, na análise físico-química realizada pelo LIS/UFCG, não foi utilizada a equação completa para definição da grandeza **DT**, apenas a subtração entre os valores **Cc** e **Pm**.

Anexo II - Calibração dos Sensores ECH₂O EC-5 e EC-10

Para obtenção da curva de calibração dos sensores da EC-5 e EC-10, os procedimentos utilizados basearam-se nos descritos na literatura (MIRANDA et al., 2007; LEITE et al., 2007; DECAGON, 2010). O conjunto recipiente-solo-sensor foi instalado sobre uma bancada do Laboratório de Materiais de Construção I do IFPB (*Campus* João Pessoa), e foi utilizado tecido de algodão, tipo fralda, como forro interno do recipiente de PVC para evitar perda de solo (Figura 7.3).

Figura 7.3 – Material e montagem para calibração do Sensor ECH₂O EC-5



O estudo foi conduzido de forma a determinar a umidade do solo pelo método gravimétrico e pelo eletrométrico. O conjunto foi pesado diariamente, em vários horários, utilizando-se 2 (duas) balanças eletrônicas: balança de plataforma Líder modelo B-160, com indicador digital LD1050, precisão de $\pm 1g$, e balança de precisão Bel Engineering modelo L10001, com precisão $\pm 0,1g$ (Figura 7.4).

Figura 7.4 – Pesagem do conjunto recipiente-solo-sensor



Foram realizadas 3 (três) leituras em cada período de coleta de dados (peso e potencial elétrico), para utilização da média dos valores lidos na construção da curva de calibração de cada sensor. A medição do potencial elétrico de saída dos sensores EC-5 e EC-10 foi realizada com um multímetro digital Politem modelo VC9808, exatidão $\pm(0,5\%+3d)$. Os sensores foram submetidos a uma excitação de entrada de 2,5 V_{CC}, fornecida pela fonte Instrutherm FA-3030 (Figura 7.5).

Figura 7.5 – Medição de umidade do solo e potencial elétrico do Sensor ECH₂O EC-5



Para obtenção da curva de calibração dos sensores, foi utilizado o programa MATLAB® e o *toolbox cftool* (*curve fitting tool*) para o ajuste da curva a uma função linear. Como a equação fornecida pelo fabricante utiliza a umidade volumétrica do solo em percentual (%), é necessário que se estabeleça uma relação entre a umidade volumétrica (U_v) e a umidade gravimétrica (U_g) do solo (LIER, 2012):

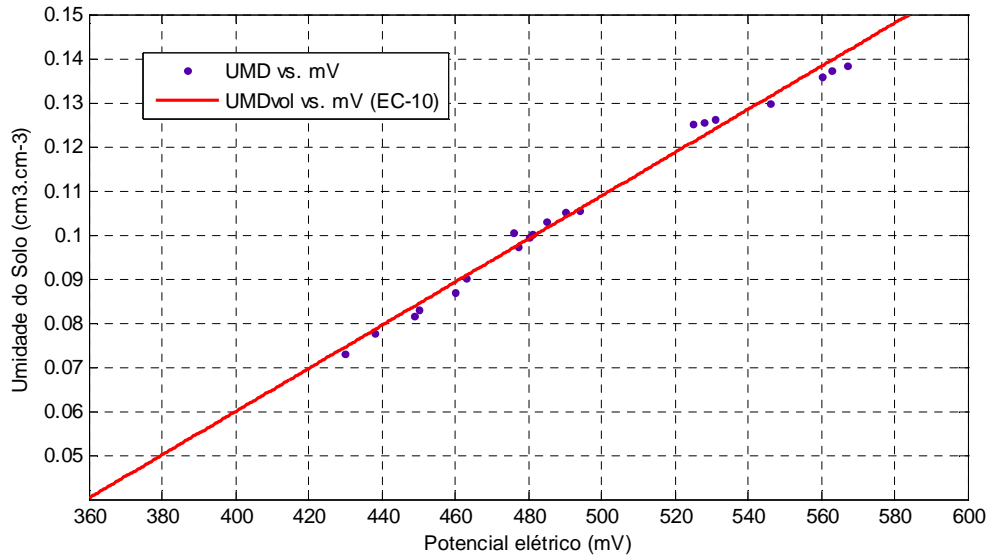
$$U_g = \frac{\text{massa de água (g)}}{\text{massa de solo (g)}} \times 100 \quad (7.1)$$

$$\Theta = (U_g \times \frac{D_s}{D_a}) \times 100 \quad (7.2)$$

em que: D_a é a densidade da água (g/cm^3), D_s é a densidade do solo (g/cm^3), U_g é a umidade gravimétrica (g.g^{-1}) e Θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

A curva de calibração do sensor EC-10, inserido na amostra 1 (33002- Areia/Cana-de-açúcar), está ilustrada na Figura 7.6, e a equação da reta que o caracteriza está descrita em (7.3).

Figura 7.6 – Curva de calibração do sensor EC-10



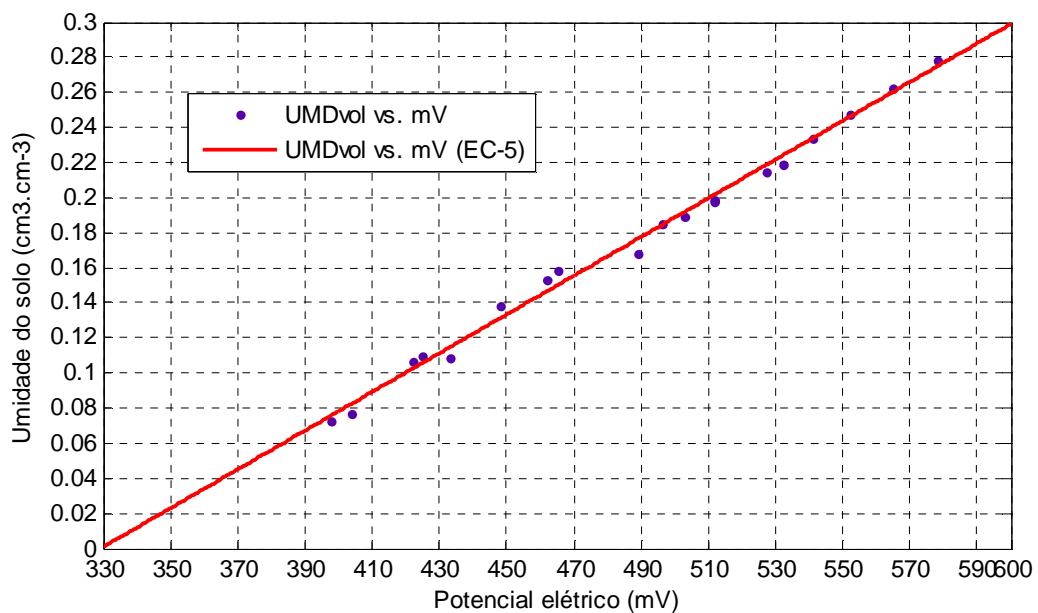
$$\Theta(\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}) = 0,0004898 \times \text{Potencial Elétrico Medido (mV)} - 0,1362 \quad (7.3)$$

$$\Theta(\%) = \Theta(\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}) \times 100\%$$

em que: Θ é a umidade ou conteúdo volumétrico da água (cm^3/cm^3) e mV é o valor da tensão de saída do sensor. A equação da curva obtida com *toolbox cftool* do MATLAB® obteve um coeficiente de correlação $r^2 = 0,9901$ (BARROSO et al., 1987).

A curva de calibração do sensor EC-5 inserido na amostra 2 (33004 - Argila-arenosa/Cana-de-açúcar), está ilustrada na Figura 7.7, e a equação da reta que o caracteriza está descrita em (7.4).

Figura 7.7 - Curva de calibração do sensor EC-5



$$\Theta \text{ (cm}^3\text{.cm}^{-3}\text{)} = 0,001104 \times \text{Potencial Eléctrico Medido (mV)} - 0,3637 \quad (7.4)$$

$$\Theta(\%) = \Theta(\text{cm}^3\text{.cm}^{-3}) \times 100\%$$

em que: Θ é a umidade ou conteúdo volumétrico da água (cm^3/cm^3) e mV é o valor da tensão de saída do sensor. A referida equação foi obtida com o *toolbox cftool* do MATLAB® com coeficiente de correlação $r^2 = 0,9936$ (BARROSO et al., 1987).

Anexo III – Base de regras do *fuzzy* para *set point* de umidade do solo

As regras do sistema *fuzzy* MAMDANI para o *set point* de umidade do solo foram criadas baseadas nos termos linguísticos aplicáveis aos conjuntos solo-planta existentes no experimento. Para a variável **TSOLO** são utilizados os termos {CC-ARE, CC-SILT, CC-ARG}, e a variável **TPLAN-Z** usou apenas 2 (dois) termos {RAIZ-MEDIA, RAIZ-LONGA}, de acordo com as amostras de solo coletadas em campo e o tipo de cultura associada (cana-de-açúcar com profundidade média da raiz = 75cm).

As Tabelas 7.3 e 7.4 apresentam as regras de inferência dos cenários associados ao conjunto solo arenoso/cana-de-açúcar. As Tabela 7.5 e 7.6 apresentam as regras de inferência dos cenários associados ao conjunto solo argiloso/cana-de-açúcar.

Tabela 7.3 – Base de regras do *fuzzy* Mamdani – Solo arenoso e **ATEMP** constante

Nº	TSOLO	TPLAN-Z	ESTAG	ATEMP	AUMD	TPLAN-Y	RUMD
Base de regras inicial – Mamdani-06 (CT01)							
1	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
2	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
3	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
4	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
5	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
6	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMED	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-12 (CT02)							
7	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
8	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
9	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
10	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
11	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
12	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-24 (CT03)							
13	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
14	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
15	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
16	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
17	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
18	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
19	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
20	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
21	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
22	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
23	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
24	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA

Tabela 7.4 – Base de regras do *fuzzy* Mamdani – Solo arenoso e **ATEMP** senoidal

Nº	TSOLO	TPLAN-Z	ESTAG	ATEMP	AUMD	TPLAN-Y	RUMD
Base de regras inicial – Mamdani-06 (CT04)							
1	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
2	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
3	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
4	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
5	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
6	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-08 (CT05)							
7	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MEDIO	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
8	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MEDIO	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-12 (CT06)							
9	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
10	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
11	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
12	CC-ARE	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-18 (CT07)							
13	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
14	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
15	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
16	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
17	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
18	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-20 (CT08)							
19	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MEDIO	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MBAIXA
20	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MEDIO	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MBAIXA
Base de regras adicionais – Mamdani-24 (CT09)							
21	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
22	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-BAIXA
23	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
24	CC-ARE	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-BAIXA

Tabela 7.5 – Base de regras do *fuzzy* Mamdani – Solo argila-arenosa e **ATEMP** constante

Nº	TSOLO	TPLAN-Z	ESTAG	ATEMP	AUMD	TPLAN-Y	RUMD
Base de regras inicial – Mamdani-12 (CT10)							
1	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
2	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
3	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
4	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
5	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
6	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
7	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MALTA
8	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
9	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
10	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
11	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
12	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
Base de regras adicionais – Mamdani-24 (CT11)							
13	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
14	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
15	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
16	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
17	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
18	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
19	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
20	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
21	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
22	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
23	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
24	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	QUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
Base de regras adicionais – Mamdani-36 (CT12)							
25	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
26	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
27	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-QMEDIA
28	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
29	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
30	CC-ARG	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
31	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MALTA
32	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
33	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
34	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
35	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
36	CC-SILT	RAIZ-MEDIA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA
Base de regras adicionais – Mamdani-48 (CT13)							
37	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
38	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
39	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
40	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
41	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
42	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
43	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA

44	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
45	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MEDIA
46	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
47	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
48	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-QMEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-QMEDIA

41	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-MALTA
42	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
43	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-ALTA
44	CC-ARG	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
45	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
46	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-MBAIXO	UMD-ALTA
47	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-ALTO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA
48	CC-SILT	RAIZ-LONGA	KC-MEDIO	MQUENTE	AR-UMIDO	Y-BAIXO	UMD-MEDIA

Anexo IV – Resposta do sistema-solo ao degrau

O método da resposta ao degrau permite a determinação de grandezas que caracterizam o processo a ser controlado e o cálculo dos parâmetros de um controlador **PID**, a partir de fórmulas empíricas definidas por Ziegler e Nichols (1942). Segundo Bazanella e Silva Jr. (2005), “(...) essa resposta pode ser caracterizada por três parâmetros: o *atraso aparente L*, o *ganho integral equivalente a* e a *constante de tempo dominante T*. Esses parâmetros representam o modelo do processo a ser utilizado neste método de ajuste (...)”.

Ogata (2011) e Bazanella e Silva Jr. (2005) apresentam o modelo simplificado de um processo obtido com a resposta ao degrau, ou a função de transferência (**FT**) de ordem 1 acrescida de um atraso de transporte, como a equação (7.5) ,

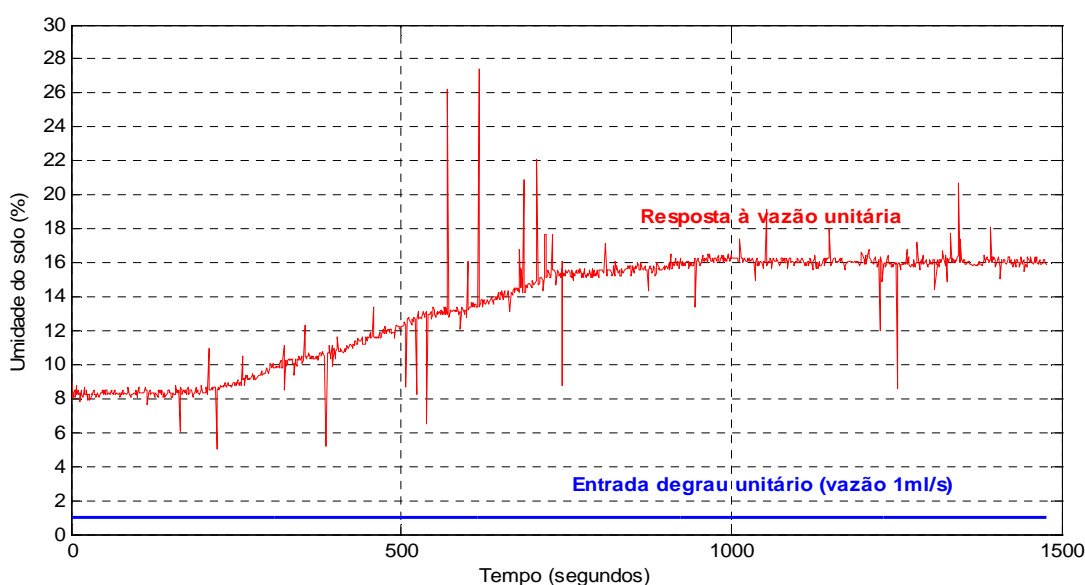
$$G(s) = e^{-Ls} \frac{K}{Ts+1} \quad (7.5)$$

em que: **L** é o atraso aparente, **T** é a constante de tempo dominante e **K** é o ganho do processo calculado pela equação (7.6).

$$a \approx \frac{K.L}{T} \quad (7.6)$$

A Figura 7.8 ilustra a resposta do processo-solo 1 (arenoso) ao ser aplicada uma vazão unitária de 1ml/s (variável manipulada) em malha aberta.

Figura 7.8 – Resposta do solo 1 (arenoso) ao degrau unitário de vazão

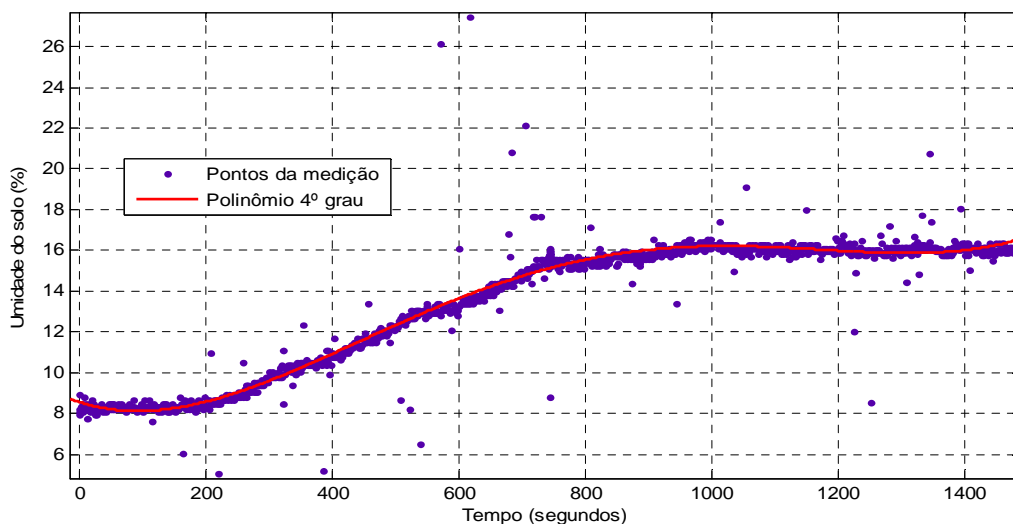


Foi utilizado o *toolbox cftool* do MATLAB® para obter-se um polinômio que caracterizasse a referida curva de resposta. A equação polinomial correspondente está em

(7.7) com coeficiente de correlação $r^2 = 0,9275$ (BARROSO et al., 1987). A Figura 7.9 mostra os pontos da medição e o traçado do polinômio interpolador.

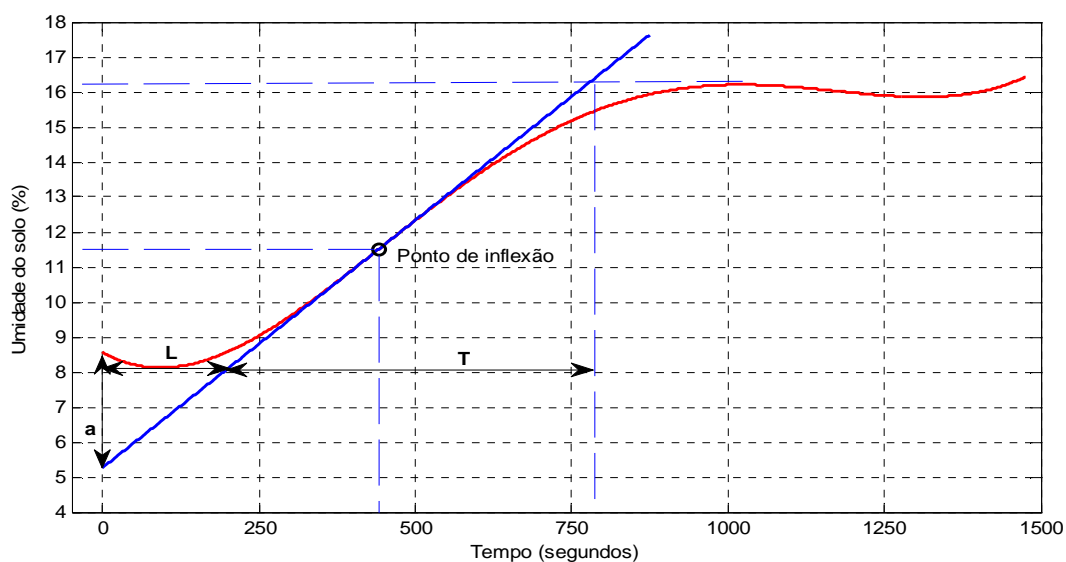
$$f(x) = 2,009 \cdot 10^{-11}x^4 - 6,505 \cdot 10^{-8}x^3 + 6,27 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,01011x + 8,571 \quad (7.7)$$

Figura 7.9 - Polinômio interpolador para a resposta do solo 1 ao degrau



A seguir, foi determinada a reta tangente ao ponto de inflexão da curva de resposta ao degrau (Figura 7.10) pelo método da Diferenciação Numérica por Diferenças Finitas Centrais, indicado por Araújo (2007) e Hornbeck (1975).

Figura 7.10 - Reta tangente ao ponto de inflexão da resposta ao saldo (solo 1)



A partir da referida reta tangente, pode-se obter os parâmetros **L** e **a**. O ponto de inflexão da citada curva ocorre aos 441,92 segundos com amplitude (umidade do solo) de 11,5%. A reta tangente a este ponto tem a equação (7.8)

$$y = 0,01413t + 5,256 \quad (7.8)$$

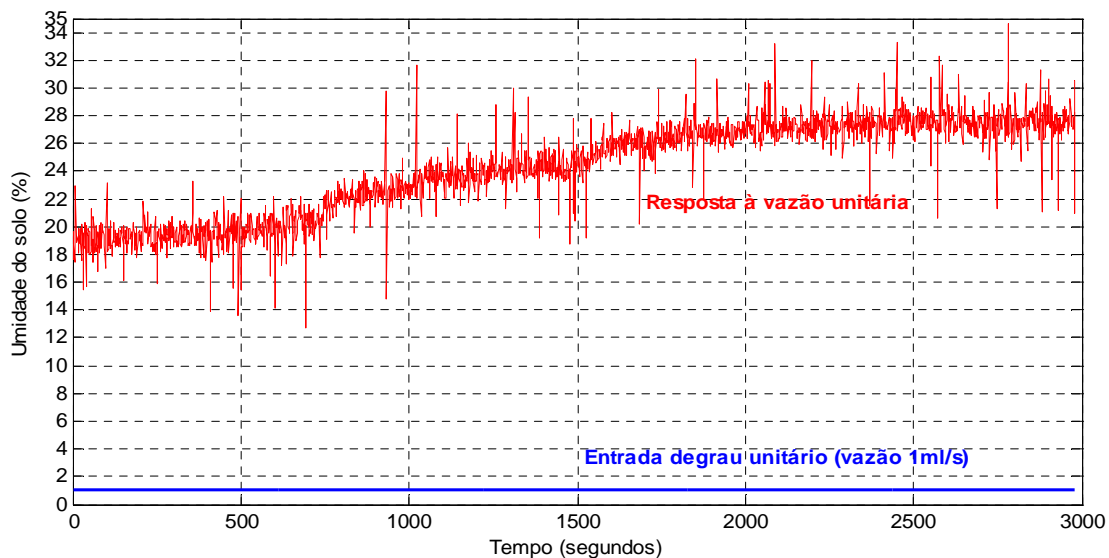
O valor de L é $202,85 \approx 203$ segundos e $a = 3,315 \approx 3,3$. A constante de tempo dominante T é determinada pela interseção da reta tangente com a linha correspondente ao valor em regime permanente da curva de resposta, passado o tempo L (ARAÚJO, 2007; OGATA, 2011). Nesse caso, o valor em regime permanente é igual a 16,2%. Para o cálculo correto de T , considerou-se o *offset* da curva de resposta, $y(0) = 8,6\%$, uma vez que a mesma não se inicia em 0%. Logo, $T = 572,13 \approx 572$ s. Pela fórmula (7.6), o ganho do processo K é igual a $9,35 \approx 9,4$

Para o cenário com solo 1 (arenoso), a FT é,

$$G(s) = e^{-203s} \frac{9,4}{572s+1} \quad (7.9)$$

Para o processo-solo 2 (argila-arenosa) foram adotados os mesmos procedimentos para identificação dos parâmetros L , a e T . Foi aplicada a mesma vazão unitária em malha aberta. Foi utilizado o *toolbox cftool* do MATLAB® para obter-se um polinômio que caracterizasse a curva de resposta ao degrau. A Figura 7.11 ilustra a resposta do sistema-solo 2 ao degrau de vazão unitária de 1ml/s.

Figura 7.11 – Resposta do solo 2 (argila-arenosa) ao degrau unitário de vazão

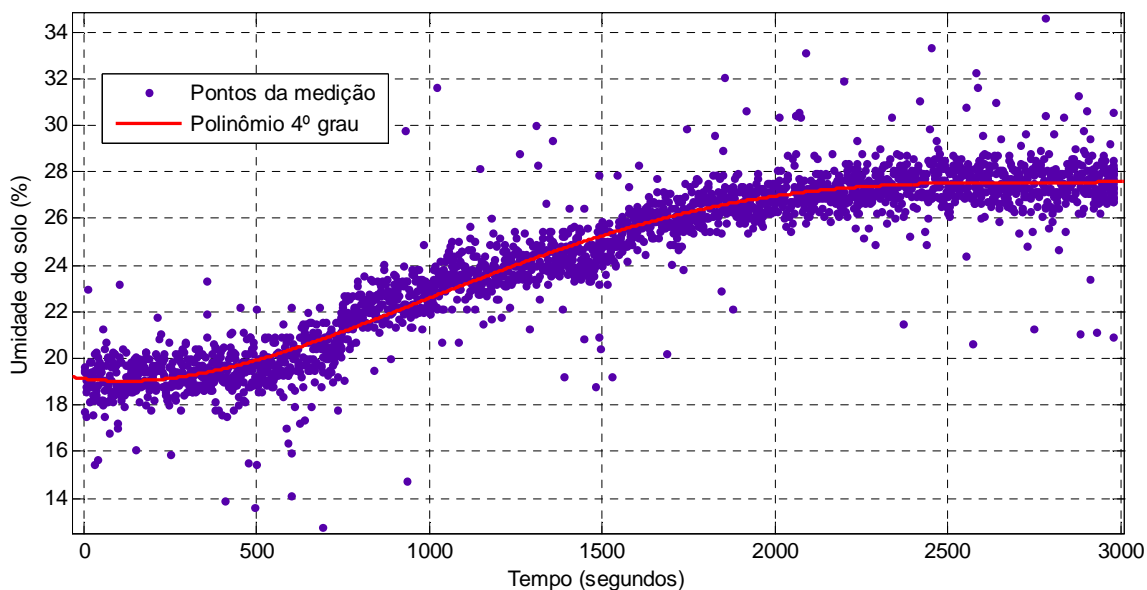


A equação polinomial de 4º grau correspondente está em (7.10) com coeficiente de correlação $r^2 = 0,8902$ (BARROSO et al., 1987).

$$f(x) = 5,594 \cdot 10^{-13}x^4 - 4,142 \cdot 10^{-9}x^3 + 8,981 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,001955x + 19,13 \quad (7.10)$$

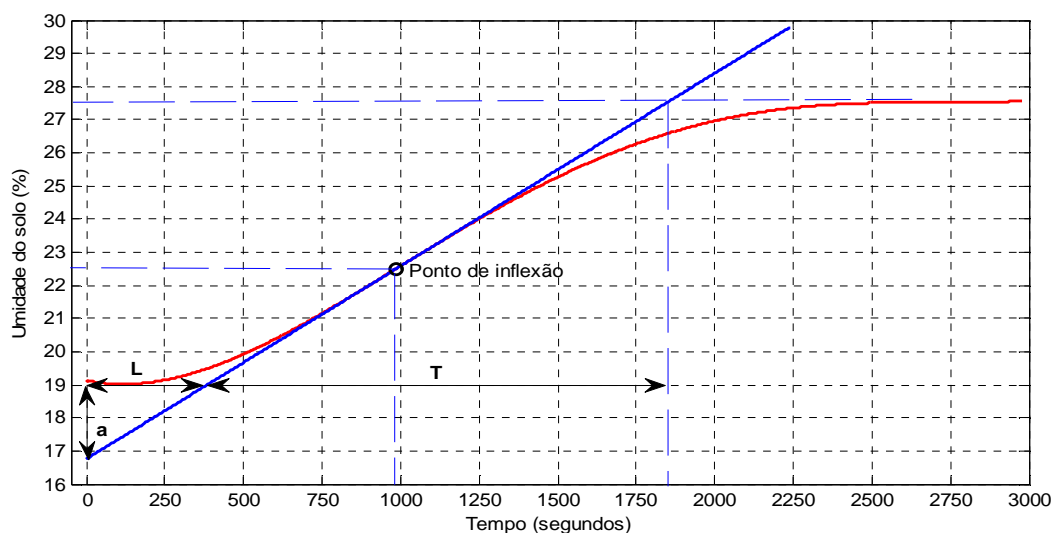
A Figura 7.12 mostra os pontos da medição e o traçado do polinômio interpolador.

Figura 7.12 - Polinômio interpolador para a resposta do solo 2 ao degrau



A Figura 7.13 apresenta a reta tangente ao ponto de inflexão da curva de resposta ao degrau determinada pelo mesmo método da Diferenciação Numérica por Diferenças Finitas Centrais. A partir da referida reta tangente, pode-se obter os parâmetros **L**, **a** e **T**.

Figura 7.13 – Reta tangente ao ponto de inflexão da resposta ao saldo (solo 2)



O ponto de inflexão da citada curva ocorre aos 984,65 segundos com amplitude (umidade do solo) de 22,5%. A reta tangente a este ponto tem a equação (7.11)

$$y = 0,00582t + 16,75 \quad (7.11)$$

A partir da reta tangente, determinou-se o valor de $L = 389,63 \approx 390$ segundos e $a = 2,38 \approx 2,4$. Para o cálculo da constante de tempo dominante T , considerou-se o *offset* da curva de resposta, $y(0) = 19,0\%$, e o valor em regime permanente da curva de resposta igual a $27,6\%$. Logo, $T = 1467,9 \approx 1468$ s. Pela fórmula (7.6), o ganho do processo K é igual a $9,03 \approx 9$.

Para o cenário com solo 2 (argila-arenosa), a **FT** é,

$$G(s) = e^{-390s} \frac{9}{1468s+1} \quad (7.12)$$

- **Aproximação de Padé**

Segundo Aguirre (2004), não se pode modelar exatamente sistemas dinâmicos reais com atraso puro de tempo por meio de funções de transferência, uma vez que a expressão $e^{-\tau_d s}$ não pode ser representada como uma razão de polinômios em s com grau finito. No entanto, pode-se utilizar uma **aproximação de Padé** definida por:

$$e^{-\tau_d s} \approx R_n(s) = \frac{Q_n(-\tau_d s)}{Q_n(\tau_d s)} \quad (7.13)$$

em que:

$$Q_n(s) = \sum_{j=0}^n \frac{(n+j)!}{j!(n-j)!} (\tau_d s)^{n-j} \quad (7.14)$$

Para os sistemas-solo deste trabalho, foram usadas aproximações de Padé de primeira ordem. Para o cenário com solo 1 (arenoso), a **FT** com aproximação de Padé (calculada no MATLAB[®]) é,

$$G_x(s)_{solo1} = \frac{-9,4s+0,09261}{572s^2+6,635s+0,009852} = K_1 \frac{(s-0,009852)}{(s+0,009852)(s+0,001748)} \quad (7.15)$$

Em que, o ganho estático do processo é $K_1 = -0,016434$.

Para o cenário com solo 2 (argila-arenosa), a **FT** com aproximação de Padé é,

$$G_x(s)_{solo2} = \frac{-9s+0,04615}{1468s^2+8,528s+0,005128} = K_2 \frac{(s-0,005128)}{(s+0,005128)(s+0,0006812)} \quad (7.16)$$

Em que, o ganho estático do processo é $K_2 = -0,0061308$.

Referências

AGUILAR, J.V.; LANGARITA, P.; LINARES, L.; RODELLAR, J. Automatic Control of Flows and Levels in an Irrigation Canal. **IEEE Transactions on Industry Applications**. December, 2009. v. 45, n. 6, p. 2198-2208.

AGUIRRE, L.A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-lineares**. Editora UFMG. 2. ed. Belo Horizonte, 2004.

AKYILDIZ, I.F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless Sensor Networks: A Survey. **Computer Networks**. 2002. v. 38, p. 393-422.

ALGEEB, A.; ALBAGUL, A.; ASSENI, A.; KHALIFA, O.; JOMAH, O.S. Design and Fabrication of an Intelligent Irrigation Control System. In: 2010. The 3rd WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACADEMY AND SOCIETY(WSEAS) INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SENSORS, SIGNALS AND MATERIALS (SENSIG '10/MATERIALS '10), Porto, Portugal. **Proceedings**. 2010. p. 119-124.

ALLEN, R. **Calibration of the Watermark 200SS Soil Water Potential Sensor**. University of Idaho, 2000. Disponível em http://www.kimberly.uidaho.edu/water/swm/calibration_watermark2.pdf. Acesso em: 10 fev. 2012.

ARAÚJO, F.M.U. **Controle Inteligente**. Apostila do Curso de Graduação em Engenharia de Computação e Automação. Departamento de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal-RN, 2004.

_____. **Sistemas de Controle**. Apostila do Curso de Graduação em Engenharia de Computação e Automação. Departamento de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal-RN, 2007. Disponível em <http://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle/scv20071.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2012.

ARAÚJO JÚNIOR, M.E.U. **Desevolvimento de um Ambiente para Projeto de Controladores Fuzzy para Dispositivos Móveis**. 2011. XXf. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Departamento de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal-RN, 2011.

ASSIS, P.C.O.; LACERDA, R.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS, J.N.; AZEVEDO, C.H.F. Resposta dos Parâmetros Tecnológicos da Cana-de-Açúcar a Diferentes Lâminas de Irrigação e Adubação. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. 2004, v. 4, n. 2, 2º Semestre.

BAHAT, M.; INBAR, G.; YANIV, O.; SCHNEIDER, M. A Fuzzy Irrigation Controller System. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. Elsevier, 2000. v. 13, p. 137-145.

BARROSO, L.C.; BARROSO, M.M.A.; CAMPOS FILHO, F.F., CARVALHO, M.L.B.; MAIA, M.L. **Cálculo Numérico (com Aplicações)**. Editora Harbra. 2. ed. São Paulo, 1987. BAZANELLA, A.S.; SILVA JR, J.M.G. **Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto**. 1. ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2005.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 4. ed. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, UFV, 1987.

BORIM, A.C.A.; PINTO, C.A.R. Medição de Umidade no Solo através de Sensores Capacitivos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. Valinhos, 2006. v. 1, n. 1.

BRASIL. **Censo Agropecuário 2006**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/brasil_2006/Brasil_censoagro2006.pdf>. Acesso em: 14 set. 2010.

_____. **Plano Agrícola e Pecuário 2010-2011**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 14 set. 2010.

BURGOS-ARTIZZU, X.P.; RIBEIRO, A.; SANTOS, M. Controlador Borroso Multivariable para el Ajuste de Tratamientos em Agricultura de Precisión. **Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial**. 2007, v. 4, n. 2, p. 64-71.

CAMILLI, A.; CUGNASCA, C.E.; SARAIVA, A.M., HIRAKAWA, A.R.; CORREA, P.L.P. From Wireless Sensors to Field Mapping: Anatomy of an Application for Precision Agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**. Elsevier, 2007. v. 58, p. 25-34.

CAMPOS, M.C.C.; QUEIROZ, S.B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. 2006, v. 6, n. 1.

CARAMORI, P.H. **Zoneamento Agroclimático das Principais Plantas Oleaginosas do Brasil**. II Simpósio do Agronegócio de Plantas Oleaginosas. ESALQ. Piracicaba. SP, 2006. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/File/biodiesel/Zoneamento.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012, 9h.

CARNIERI, I.M.R.S.A.; MONTE SERRAT, B.; LIMA, M.R. **Quais tipos de análises podem ser utilizados para avaliar o solo e a nutrição das plantas?** Disponível em: <http://www.soloplan.agrarias.ufpr.br/tiposdeanalise.htm>. Acesso em: 31 out. 2011, 15h30.

CASTANHO, M.J.P.; PEIXOTO, M.S. Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* no Matlab. In: **I CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS FUZZY**. Minicurso. Sorocaba, SP: novembro, 2010.

CHARD, J. **Watermark Soil Moisture Sensors: Characteristics and Operating Instructions**. Crop Physiology Laboratory. Utah State University, 2002.

COBOS, D.R. **Calibrating ECH₂O Soil Moisture Sensors**. Application Note. Decagon Devices Inc. 2009. Disponível em <http://www.decagon.com/assets/Uploads/CalibratingECH2OsoilMoistureProbes.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2011, 11h27.

DARGIE, W.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice**. USA: Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing, John Wiley and Sons Ltd., 2010.

DECAGON. Decagon Devices, Inc. Disponível em www.decagon.com. Acesso em: 20 ago. 2011.

_____. **EC-20, EC-10, EC-5 Soil Moisture Sensors – User’s Manual**. Version 10. 2010.

DURSUN, M.; OZDEN, S. A Prototype of PC Based Remote Control of Irrigation. In: 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND APPLICATIONS (ICEEA 2010), Singapore. **Proceedings**. 2010, p. 255-258.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2. ed. Brasília-DF. Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

_____. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. 2. ed. revisada e ampliada. Brasília-DF. Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

FALKER. **Aplicações do Hidrofarm**. Nota de Aplicação HFM 2010, n. 1, Rev. A, Dezembro, 2008. Disponível em: < http://www.falker.com.br/produto_artigos.php?id=7#>. Acesso em: 20 dez. 2010, 10h.

FAO. **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. 1998. Paper 56. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>. Acesso em: 28 dez. 2011.

FERNANDES, J.D. **Desenvolvimento de Sistemas Embarcados para Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio aplicadas em Unidades de Elevação de Petróleo do Tipo Plinger-Lift**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal, 2010.

GARCIA, L.R.; LUNADEI, L.; BARREIRO, P.; ROBLA, J.I. A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends. **Sensors**. 2009, v. 9, Issue 6, p. 4728-4750.

GOMES, H.P. **Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados Aspersão e Gotejamento**. João Pessoa-PB: Editora Universitária, UFPB, 1994.

GUNGOR, V.C.; HANCKE, G.P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2009, v. 56, n. 10, p. 4258-4265.

HORNBECK, R.W. **Numerical Methods**. USA: Quantum Publishers, Inc., 1975.

IRROMETER. Irrometer Company, Inc. Disponível em www.irrometer.com. Acesso em: 18 ago. 2011.

_____. **Watermark Soil Moisture Sensor with Voltage Output – Model 200SS-V.** Disponível em <http://www.irrometer.com/pdf/instruction%20manuals/sensors/200SS-V%20Volt%20Output%20Instructions.pdf>. Acesso em: 19 out. 2011.

JANTZEN, J. **Foundations of Fuzzy Control.** John Wiley & Sons Ltd., 2007.

JAVA. Site da plataforma de desenvolvimento JAVATM. Disponível em http://www.java.com/pt_BR/. Acesso em: 20 nov. 2011, 11h30.

KIM, Y.; EVANS, R.G.; IVERSEN, W.M. Remote Sensing and Control of an Irrigation System using a Distributed Wireless Sensor Network. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. 2008, v. 57, Issue 7, p. 1379-1387.

KIM, Y.; EVANS, R.G. Software Design for Wireless Sensor-based Site-specific Irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**. 2009, v. 66, p. 159-165.

LEITE, J.F.; BENETEL, G.; FERRAZ, M.R.; FARIA, L.A.; MARCHESIN, W.A. **Determinação da Umidade do Solo através da Metodologia Gravimétrica e do Aparelho ECHO.** 15º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo-SP, Novembro, 2007.

LIER, Q.J.V. **Cálculo de alguns parâmetros físicos do solo.** Nota LCE/ESALQ/USP. Disponível em http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce200/Calculo_parametros_solo.pdf. Acesso em: 20 jan. 2012, 9h30.

LIMA, F.M.C. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle Fuzzy do Potencial Matricial da Água do Solo, visando à Otimização de Processos de Irrigação.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2007.

LITRICO, X.; FROMION, V.H. Control of an Irrigation Canal Pool With a Mixed Control Politics. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. January, 2006. v.14, n. 1, p. 99-111.

LOUREIRO, A.A.F.; NOGUEIRA, J.M.S.; RUIZ, L.B.; MINI, R.A.F.; NAKAMURA, E.F.; FIGUEIREDO, C.M.S. Redes de Sensores Sem Fio. In: **21º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES.** Minicurso. Maio, 2003, Natal-RN. Disponível em: <<http://homepages.dcc.ufmg.br/~loureiro/cm/docs/sbr03.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2010.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, H.R.; SILVA, W.L.C.; CARRIJO, O.A. **Tensiômetros para Manejo da Irrigação em Hortaliças.** Disponível em <http://www.cnph.embrapa.br/public/folders/tensiometro.html>. Acesso em: 15 jan. 2012.

METED. **Curso Básico de Ciência Hidrológica – Estudo do Ciclo Hidrológico.** Meteorology Education and Training – University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Disponível em http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/HydrologicCycle_bp/print_version/04-surface_water.htm. Acesso em: 22 fev. 2012, 16h30.

MIRANDA, F.R.; SANTANA, M.G.S.; SOUZA, C.C. M.; OLIVEIRA, C.H.C. Calibração do sensor dielétrico ECH₂O em dois tipos de solo. **Revista de Ciências Agrônômicas**. v. 38, n. 3, p. 317-321, Jul.-Set., Fortaleza, Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Ceará, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice-Hall, 2011.

OLIVEIRA, C.A.S. **Determinação da Tensão de Água em Solo Agrícola usando um Sensor de Dissipação de Calor**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, 1999. v. 34, n. 8, p. 1417-1425.

OLIVEIRA, F.A.; CAMPOS, T.G.S.; OLIVEIRA, B.C. **Efeito de Tensões de Água no Solo sobre o Rendimento do Algodoeiro Herbáceo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, 1999. v. 34, n. 10, p. 1905-1911.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M. **Manual do Irrigâmetro**. Viçosa-MG, 2008. Disponível em: <<http://www.irrigacerto.com.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

OPPENHEIM, A.V.; WILLISKY, A.S. **Sinais e Sistemas**. 2. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice-Hall, 2010.

OTTONI FILHO, T.B. Uma classificação físico-hídrica dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 2003. v. 27, n. 2, p. 211-222.

PEREIRA, A.B.; SHOCK, C.C.; FEIBERT, E.B.; FLOCK, R.J.; LIMA, L.; FERNANDES, N. **Monitoramento da Irrigação por Meio da Tensão da Água do Solo – Guia Prático**. Boletim Técnico. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2006.

PEREIRA, G.M.; MELLO, C.R. **Hidrometria – Aula Prática**. Notas de Aula – Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras (UFLA). Disponível em http://www.deg.ufla.br/site/adm/upload/file/6_Aula%20pratica%206.pdf. Acesso em: 10 dez. 2011.

PIRES, R.C.M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F.B.; FUJIWARA, M.; CALHEIROS, R.O. **Métodos e Manejo da Irrigação**. Centro de Ecofisiologia e Biofísica – Instituto Agrônomo. Contrato FUNDAG-FEHIDRO, 1999.

RÊGO SEGUNDO, A.K. **Desenvolvimento de Sensor de Teor de Água do Solo e de Sistema de Controle e Automação em Malha Fechada para Uso em Irrigação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa-MG, 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera – Conceitos, Processos e Aplicações**. Editora Manole: São Paulo-SP, 2004.

RESENDE, N.M.; SANTANA, D.P. **Pedologia e Fertilidade do Solo: Interações e Aplicações**. 1. ed. Brasília-DF: MEC/ESAL/POTAFOS, 1988.

SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica Nebulosa. In: **V ESCOLA DE REDES NEURAIAS**. Conselho Nacional de Redes Neurais. Minicurso. Julho, 1999. ITA, São José dos Campos-SP. p. c073-c090.

SAWADOGO, S.; FAYE, R.M.; BENHAMMOU, A.; AKOUZ, K. Decentralized Adaptive Predictive Control of Multi-reach Irrigation Canal. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS. **Proceedings**. 2000, v. 5, p. 3437-3442.

SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1. ed. São Paulo-SP: Editora Edgard Blücher, FAPESP, 1999.

SHOCK, C.C.; FLOCK, R.; FEIBERT, E.; SHOCK, C.A.; PEREIRA, A.; JENSEN, L. **Irrigation Monitoring Using Soil Water Tension**. Sustainable Agriculture Techniques.Extension Service. Oregon State University, 2005

SHOREY, R.; ANANDA, A.; CHAN, M.C.; OOI, W.T. **Mobile, Wireless, and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions**. IEEE Press, Editora John Wiley & Sons, 2006.

SILVA, H.; CHRISTOFIDIS, D.; MAROUELLI, W.A. **Situação da Irrigação no Brasil**. Ministério da Integração Nacional, 2005. Disponível em: http://www.irrigacao.org.br/artigos/Christofidis_Situacao%20da%20Irrigacao%20no%20Brasil%20Henoque%20Demetrios.pdf. Acesso em: 15 set. 2010.

SILVA, T.G. F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J.S.; JÚNIOR, W.G.F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, 2012. v. 16, n. 1, p. 64-71.

SQUIBA, L.M.; MONTE SERRAT, B.; LIMA, M.R. **Aprenda como coletar adequadamente amostras de solos para análises**. Disponível em <http://www.soloplan.agrarias.ufpr.br/coletadesolo.htm>. Acesso em: 31 out. 2011, 15h40.

SUGENO, M.; KANG, G. Structure Identification of Fuzzy Model. **Fuzzy Sets and Systems**. 1988, v. 28, p.15-33.

SUN MICROSYSTEMS. **SunTM SPOT Programmer's Manual**. Release v. 6.0 (Yellow). 2010.

_____. **SunTM SPOT Theory of Operation**. Red Release 5.0. 2009.

TARDIF, R. **Field Calibration of the ECH₂O Soil Moisture Probes at the Brookhaven National Laboratory/NCAR Meteorological Tower Site**. National Center for Atmospheric Research/Research Applications Program. 2003.

TANAKA, K.; SANO, M. Design of Fuzzy Controllers Based on Frequency and Transient Characteristics. In: 2nd IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS. **Proceedings**. 1993, v. 1, p.111-116.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. 1985, v. 15, p. 116-132.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P.U.B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. São Paulo-SP: Editora Érica, 2007.

TORRE-NETO, A. Sistema para Irrigação de Precisão em Citricultura. **Comunicado Técnico**, n. 45, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos-SP, Outubro, 2001.

_____. Sistema para Controle Espacialmente Variável de Irrigação por Microaspersão: Uma Unidade de Demonstração. **Comunicado Técnico**, n. 50, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos-SP, Novembro, 2002.

_____. Rede de Sensores Sem Fio e Computação Ubíqua na Agropecuária. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 31, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos-SP, Novembro, 2009.

TORRE-NETO, A.; FAUSTIN, Y.D.; LIMA, T.P.F.S.; LOPES, W.C. Sistema Automatizado para Monitoramento de Parâmetros Abióticos em Tempo Real e Aplicações na Agricultura de Precisão. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 5, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos-SP, Novembro, 2003.

TORRE-NETO, A.; RABELLO, L. M.; VAZ, C. M. P. Plataforma Tecnológica para Irrigação de Precisão em Citricultura. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 21, Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos-SP, Dezembro, 2007.

TRACOM. **Watermark – Manual de instalação e medição do potencial de água no solo (umidade)**. Disponível em <http://tracom.com.br/novo/folhetos/44.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2011.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A Real-Time Wireless Smart Sensor Array for Scheduling Irrigation. **Computer and Electronics in Agriculture**. v. 61, Issue 1, p. 44-50, April, 2008.

WEYER, Erik. Control of Irrigation Channels. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. Vol. 16, No. 4, p. 664-675, July, 2008.

XIAOHONG, P.; MO, Z.; XIAO, L.; LIU, G. A Water-saving Irrigation System Based on Fuzzy Control Technology and Wireless Sensor Network. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING. **Proceedings**. Beijing, China, 2009.

YUSOFF, M.; MUTALIB, S.; RAHMAN, S. A.; MOHAMED, A. Intelligent Water Dispersal Controller: Comparison between Mamdani and Sugeno Approaches. In: 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE AND APPLICATIONS. **Proceedings**. IEEE Computer Society. 2007, p. 86-93.

ZADEH, L.A. *Fuzzy Sets*. **Information and Control**. 1965, v. 8, Issue 3, p. 338-353.

ZAZUETA, F.S.; XIN, J. **Soil Moisture Sensors**. Bulletin 292. Florida Cooperative Extension Service. University of Florida. 1994.

ZHANG, Q.; WU, C.; TILT, K. Application of Fuzzy Logic in an Irrigation Control System. In: THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY. **Proceedings**. 1996, p. 593-597.

ZHANG, Q.; YANG, X.; ZHOU, Y.; WANG, L.; GUO, X. A Wireless Solution for Greenhouse Monitoring and Control System based on ZigBee Technology. **Journal of Zhejiang University**. 2007, v. 8, p. 1584-1587.

ZHAO, Y.; BAI, C.; ZHAO, B. An Automatic Control System of Precision Irrigation for City Greenbelt. In: 2007 SECOND IEEE CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS. **Proceedings**. 2007, p. 2013-2016.

ZHOU, Y.; YANG, X.; WANG, L.; YING, Y. A Wireless Design of Low-cost Irrigation System using ZigBee Technology. In: 2009 INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKS SECURITY, WIRELESS COMMUNICATIONS AND TRUSTED COMPUTING. **Proceedings**. IEEE Computer Society. 2009, v. 1, p. 572-575.

ZIEGLER, J.G.; NICHOLS, N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. **Transactions of the ASME**. 1942, v. 64, p. 759-768.