

CONTROLE E MODELAGEM FUZZY APLICADOS AOS NÍVEIS DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO COM A FINALIDADE DE OTIMIZAR PROCESSOS DE IRRIGAÇÃO

Francisco Marconi Cavalcanti de Lima

Universidade Federal da Paraíba – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Cidade Universitária; João Pessoa – PB.
marconilima18@yahoo.com.br

Simplicio Arnaud da Silva

Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de
Tecnologia, Cidade Universitária – João Pessoa-PB.
arnaud@dtm.ct.ufpb.br

James Sidney Freitas de Carvalho

Universidade Federal da Paraíba – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Cidade Universitária; João Pessoa – PB.
jamessidney10@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um controlador fuzzy para aplicação em sistemas de irrigação, visando a otimização da água disponível no solo para as plantas. A modelagem computacional é realizada através da Fuzzy Logic Toolbox do Matlab utilizando-se o Método Mandani. Na modelagem do sistema de controle fuzzy tem-se duas entradas e uma saída; as entradas são o tipo de solo e a porcentagem de água disponível para as plantas no solo, a saída é a dotação hídrica necessária para manter a porcentagem de água disponível desejada. Na entrada tipo de solo aplica-se valores que são baseados na análise laboratorial de acordo com o triângulo textural dos solos; na entrada porcentagem de água disponível aplica-se os valores obtidos do gráfico fornecido do fabricante dos sensores resistivos em bloco de absorção de gesso. A variável de controle (dotação hídrica) é aplicada em um inversor de frequência, o qual aciona uma eletrobomba cuja vazão varia, segundo as regras linguísticas do sistema de inferência fuzzy. As funções de pertinência utilizadas para as variáveis linguísticas são baseadas no conhecimento dos parâmetros do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: controle e modelagem fuzzy; fuzzy logic toolbox; água disponível; potencial matricial; irrigação automatizada; dotação hídrica.

1. INTRODUÇÃO

As culturas de um modo geral têm ciclo vegetativo bem definido, germinação, floração, frutificação, maturação e colheita (GOMES, 1994). Em cada etapa deste ciclo, as plantas têm necessidades hídricas distintas, portanto é evidente que se houver um sistema de controle que mantenha a umidade do solo em nível ótimo para cada etapa do ciclo vegetativo, tem-se uma melhor produtividade, maior racionalização no uso da água, menores custos operacionais, menor possibilidade de salinização, empoçamento e erosão do solo. Portanto, é de extrema importância a utilização de um sistema de controle que mantenha a umidade do solo em nível ótimo em cada etapa do ciclo vegetativo.

Atualmente a automação dos sistemas de irrigação modernos baseia-se em informações de parâmetros diversos tais como evapotranspiração, radiação solar, velocidade do vento, temperatura, etc. Uma estação agrometeorológica é necessária para coletar os dados e informar a um sistema que calcula a lâmina de água a ser aplicada e a sua frequência.

A aplicação da lâmina de irrigação se dá através de sistemas de controle liga/desliga por meio de temporizadores. O fato é que todo esse aparato para a automação da irrigação, não garante os níveis de umidade ideais para o desenvolvimento adequado das culturas pois não garante o nível de umidade necessário na zona radicular das plantas.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é propor um sistema de controle e modelagem fuzzy que mantém a água disponível no solo para as plantas em níveis que proporcionem as vantagens referidas anteriormente.

O sistema utiliza-se de duas entradas e uma saída; uma entrada é o tipo de solo e a outra é a água disponível no solo. A saída é a dotação hídrica, esta atua diretamente aplicando a água de irrigação, que interage com sensores de água disponível (LIMA, 1997) enterrados no solo que por sua vez interagem com a própria dotação hídrica, fazendo com que a mesma vá diminuindo quando o nível de água disponível estiver aumentando até que não seja mais necessária a dotação.

2. PARÂMETROS DO SISTEMA

Os parâmetros do sistema são o tipo de solo (TS), a água disponível (AD) e a dotação hídrica (DH).

2.1 Tipo de solo

Na prática determina-se o tipo de solo em laboratório de classificação de solos. Os solos são classificados como arenoso, médio, siltoso, argiloso e muito argiloso. Esta determinação é baseada no triângulo textural dos solos. A variável tipo de solo que é uma das entradas do sistema, tem suas funções de pertinência adequadas de acordo com a modelagem necessária. Na Figura 1 apresenta-se o triângulo textural dos solos.

2.2 Água disponível

A variável água disponível que também é uma das entradas, é determinada através da curva de resistência do sensor versus água disponível disponibilizada pelos fabricantes dos sensores resistivos em bloco de absorção de gesso e tem suas funções de pertinência elaboradas conforme a finalidade do sistema.

Na Figura 2 apresentam-se blocos de absorção de gesso e na Figura 3 apresenta-se a curva de um tipo de sensor resistivo.

2.3 Dotação hídrica

A dotação hídrica que é a saída no sistema de controle e modelagem fuzzy, será tanto a variável controlada como também será variável de controle; variável controlada porque é saída do sistema é dependente das entradas, isto é, varia conforme os valores do tipo de solo e da água disponível; é variável de controle porque é quem proporciona a aplicação de água no solo proporcionando níveis adequados para a água disponível.

3. SENSOR DE ÁGUA DISPONÍVEL (BLOCO RESISTIVO DE GESSO)

Quando estes blocos são enterrados no solo, tendem a entrar em equilíbrio (água do solo com água do bloco). Desta forma, a resistência elétrica entre os eletrodos variará de acordo com a umidade do solo. Quanto maior o teor de umidade do solo, menor será a resistência e vice-versa.

Os blocos de absorção mais utilizados são de dois tipos:

- a-) Blocos de Fibra de Vidro (COLEMAN, 1946)
- b-) Blocos de Gesso (BOUYOUCOS, 1940), (BOUYOUCOS, 1946) e (CARLSON, 1987).

Na Figura 2 são mostrados sensores resistivos em bloco de absorção de gesso e o medidor utilizado; na Figura 3 mostra-se a curva que relaciona as medidas de resistência elétrica apresentadas pelo medidor versus porcentagem de água disponível, onde cada valor de resistência é relacionado com a tensão de umidade do solo (potencial matricial em bars). Neste caso a medida apresentada pelo medidor é em porcentagem de água disponível no solo. No eixo x (leitura do medidor) do gráfico tem-se a faixa de 0 % a 100 % enquanto no eixo y (resistência do bloco em ohms) a faixa é de 50 Ω a 100 K Ω . Isto significa que quando o bloco de gesso está completamente saturado, apresenta uma resistência de 50 Ω e no Ponto de Murcha Permanente (-15 bar) a resistência é 37 k Ω . Para o potencial matricial do solo em -1,0 bar a resistência do sensor é de aproximadamente 1750 Ω .

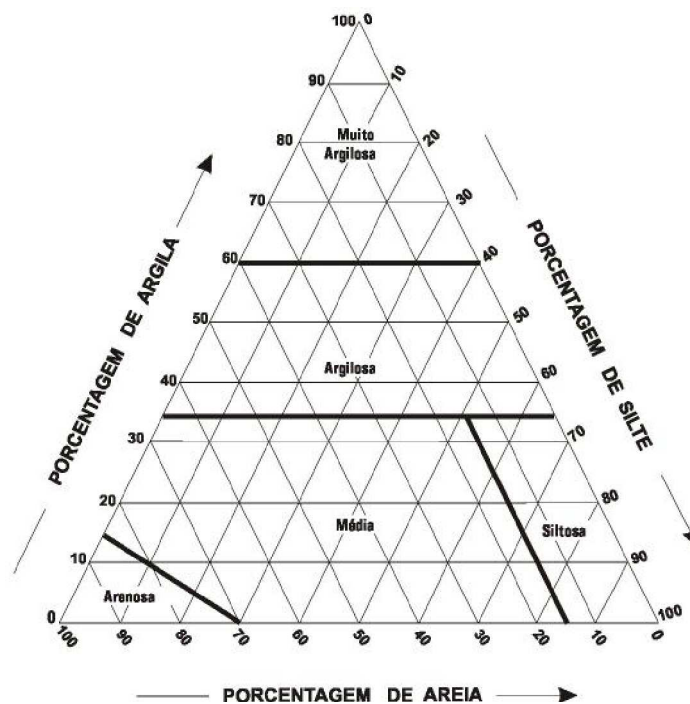


Figura 1 – Triângulo de classificação textural



Figura 2 – Sensores resistivos em blocos de absorção de gesso, e medidor/indicador

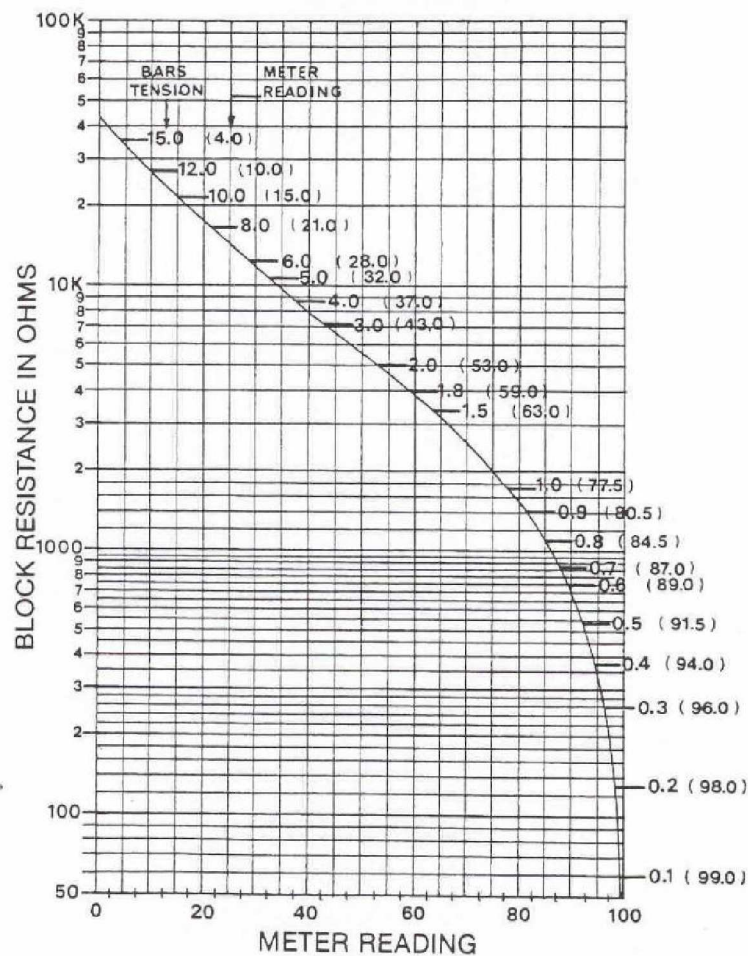


Figura 3 – Curva Resistência Elétrica versus porcentagem de água disponível

(Curva característica do sensor resistivo em bloco de absorção de gesso produzido pela Delmhorst Instrument Co., obtida com o medidor/indicador modelo KS-D1 também de sua fabricação)

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE E MODELAGEM FUZZY

Um controlador lógico fuzzy é composto de quatro etapas (Shaw, 2004), fuzificação, base de regras, inferência fuzzy e defuzificação, como se vê na Figura 4.

4.1 Entradas do Controlador (Tipo de Solo e Água Disponível no Solo)

As variáveis linguísticas fuzzy de entrada do controlador são: tipo de solo e água disponível no solo. Tanto para a variável “tipo de solo”, quanto para a variável “água disponível”, utilizou-se cinco vetores de pertinência como é apresentado no processo de fuzificação para a composição das funções de pertinência, cujo espaço ou

universo de discurso dos conjuntos de entrada está compreendido entre 0 e 10 (variável tipo de solo) e entre 0 e 1150 (variável água disponível).

4.2 Saída do Controlador (Dotação Hídrica)

A saída do controlador é a dotação hídrica que deve ser aplicada pelo sistema de irrigação. Esta saída está diretamente relacionada com o tipo de solo a ser irrigado e ao nível de água disponível medida no referido solo. Para a dotação hídrica foram utilizados oito vetores de pertinência distintos como pode ser visto na descrição das funções de pertinência. O universo de discurso da vazão também está compreendido entre 0 e 10, pois na prática, utiliza-se inversores de frequência para variar a velocidade dos motores elétricos de indução a qual está relacionada com a vazão das dotações hídricas nos sistemas de bombeamento; o sinal de comando dos inversores normalmente é de 0 a 10Vcc.

Na Figura 5 apresentam-se as variáveis lingüísticas de entrada e saída do sistema, o projeto de controle e modelagem encontra-se no arquivo ControleDH.fis da Fuzzy Logic Toolbox do Matlab 7.0.

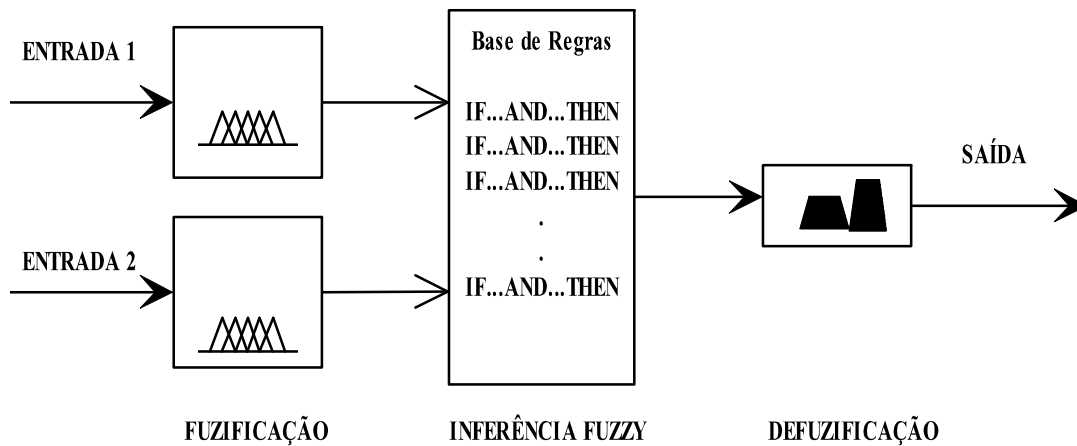


Figura 4- Etapas do controlador lógico fuzzy

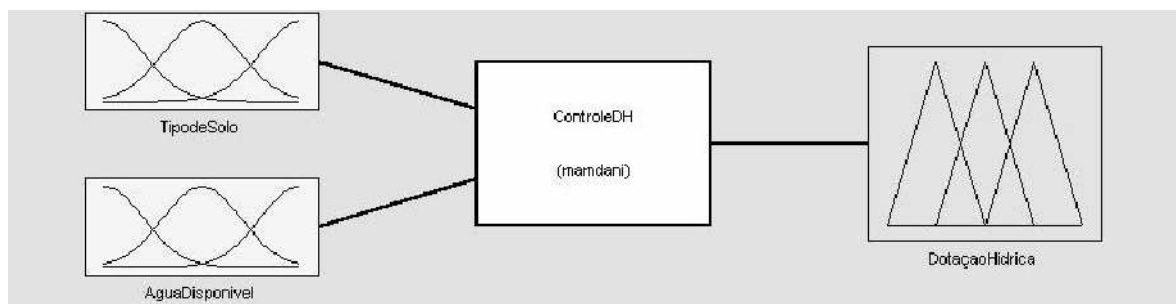


Figura 5- Variáveis lingüísticas de entrada e de saída do sistema de controle fuzzy

4.3 Funções de pertinência do sistema de controle fuzzy

4.3.1 Variável lingüística tipo de solo (TS)

À variável tipo de solo foram associadas cinco funções de pertinência ARE, MED, SIL, ARG e MAG. Onde ARE refere-se a um solo arenoso, MED a um solo médio, SIL solo siltoso, ARG solo argiloso e MAG solo muito argiloso. Na Figura 6 apresentam-se as funções de pertinência associadas à variável lingüística tipo de solo.

4.3.2 Variável lingüística água disponível (AD)

A faixa de potencial matricial do solo efetivamente usada para o monitoramento e posterior intervenção no processo de irrigação está compreendida entre 0,2 e 0,8 bar (faixa de funcionamento do tensiômetro de campo). Observando-se a Figura 3 constata-se que a faixa de resistências do sensor inicia em 50 Ω (0 mbar) e vai até 1200 Ω (0,85 bar). Desta forma, um universo de discurso de 0 a 1150 é bastante adequado para as funções de pertinência que são associadas à variável água disponível; zero significa resistência de 50 Ω ou 0 bar (solo saturado) e 1150 significa tensão de sucção de 0,85 bar (necessidade de irrigação mesmo em solos muito argilosos). Na Figura 7 apresentam-se as funções de pertinência associadas à variável lingüística “água disponível”. As funções de pertinência ALT, MEA, MED, MEB e BAI significam respectivamente alta, medianamente alta, média, medianamente baixa e baixa.

4.3.3 Variável lingüística dotação hídrica (DH)

Atualmente o controle de vazão mais moderno se faz com a utilização de inversores de frequência para acionamento dos motores elétricos; o sinal de controle aplicado ao inversor varia entre 0 e 10V, isto é, o motor varia sua velocidade de zero até sua velocidade máxima através deste sinal. Deste modo, baseado no seu funcionamento, foi escolhido a faixa de 0 a 10 como universo de discurso para as funções de pertinência associadas à variável “dotação hídrica”. Quando não houver nenhuma vazão, o valor de saída estará em nível zero, o que ocorre para solos saturados ou de acordo com o tipo de solo e o nível de água disponível no mesmo, de acordo com as regras fuzzy, que determinam qual vazão deverá ocorrer para o sistema de dotação hídrica da irrigação. Na Figura 8 apresentam-se as funções de pertinência associadas à variável lingüística dotação hídrica. As funções de pertinência ZER, MIN, BAI, MEB, MED, MEA, ALT e MAX representam dotação hídrica zero, mínima, baixa, medianamente baixa, média, medianamente alta, alta e máxima, respectivamente.

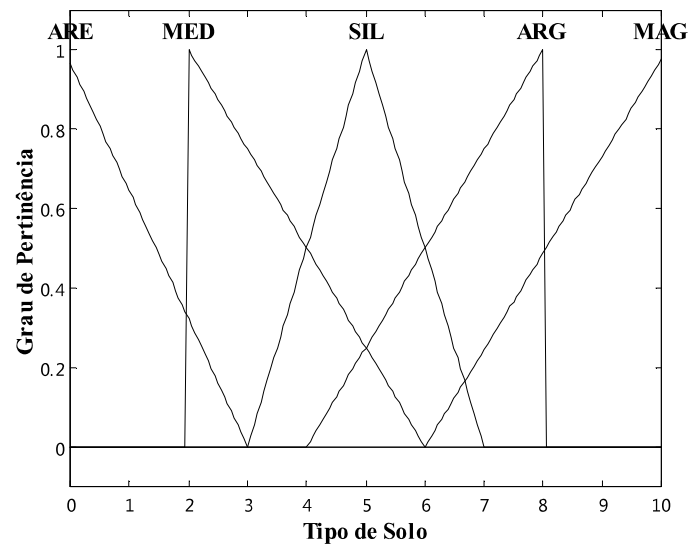


Figura 6 – Funções de Pertinência da variável linguística Tipo de Solo

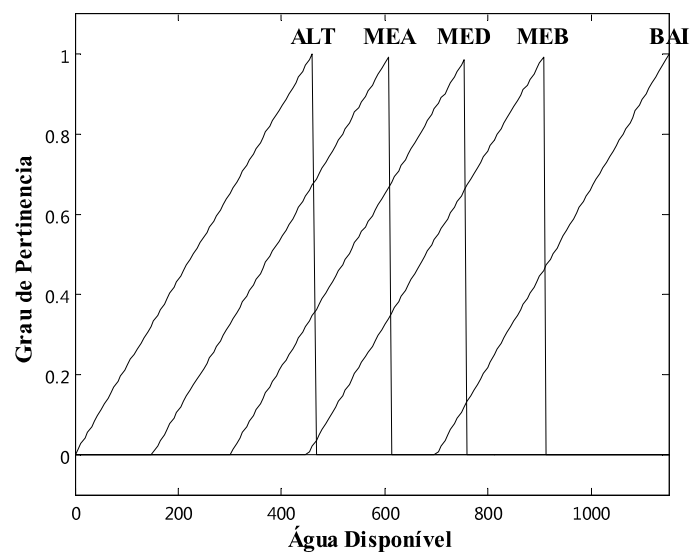


Figura 7 – Funções de Pertinência da variável linguística Água Disponível

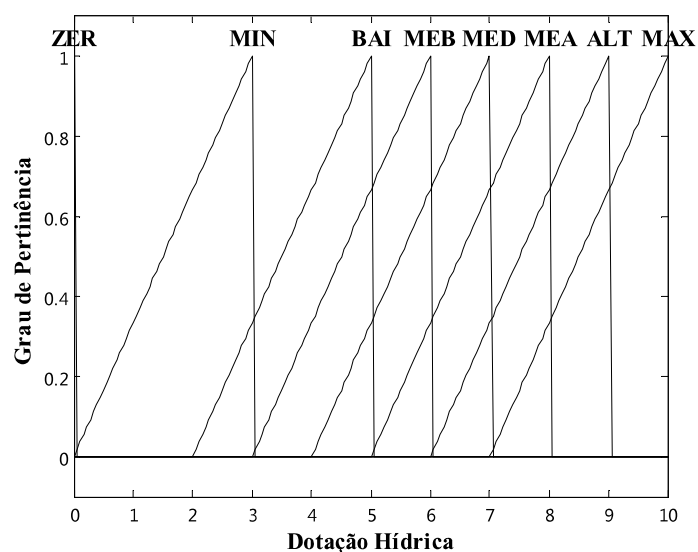


Figura 8 – Funções de Pertinência da variável linguística Dotação Hídrica

4.4 Base de Regras

No total vinte e cinco regras de inferência foram estabelecidas de acordo com o conhecimento do sistema a ser controlado e dos requisitos de controle a serem aplicados. O sistema de inferência leva em conta os cinco tipos de solo relacionando-os com os cinco níveis de água disponível. Na Tabela (I) são apresentadas as regras estabelecidas para o controlador fuzzy e na Tabela (II) apresenta-se a “matriz associativa fuzzy” para o sistema de controle fuzzy da dotação hídrica.

Tabela I. Base de regras do sistema de inferência fuzzy

01. Se o solo é arenoso e a água disponível é alta então a dotação hídrica é zero.
02. Se o solo é arenoso e a água disponível é medianamente alta então a dotação hídrica é baixa
03. Se o solo é arenoso e a água disponível é média então a dotação hídrica é média.
04. Se o solo é arenoso e o água disponível é medianamente baixa então a dotação hídrica é alta.
05. Se o solo é arenoso e a água disponível é baixa então a dotação hídrica é máxima.
06. Se o solo é médio e a água disponível é alta então a dotação hídrica é zero.
07. Se o solo é médio e a água disponível é medianamente alta então a dotação hídrica é mínima
08. Se o solo é médio e a água disponível é média então a dotação hídrica é baixa.
09. Se o solo é médio e a água disponível é medianamente baixa então a dotação hídrica é média.
10. Se o solo é médio e a água disponível é baixa então a dotação hídrica é medianamente alta.
11. Se o solo é siltoso e a água disponível é alta então a dotação hídrica é zero.
12. Se o solo é siltoso e a água disponível é medianamente alta então a dotação hídrica é zero.
13. Se o solo é siltoso e a água disponível é média então a dotação hídrica é mínima.

14. Se o solo é siltoso e a água disponível é medianamente baixa então a dotação hídrica é medianamente baixa.
15. Se o solo é siltoso e a água disponível é baixa então a dotação hídrica é média.
16. Se o solo é argiloso e a água disponível é alta então a dotação hídrica é zero.
17. Se o solo é argiloso e a água disponível é medianamente alta então a dotação hídrica é zero.
18. Se o solo é argiloso e a água disponível é média então a dotação hídrica é zero.
19. Se o solo é argiloso e a água disponível é medianamente baixa então a dotação hídrica é baixa.
20. Se o solo é argiloso e a água disponível é baixa então a dotação hídrica é medianamente baixa.
21. Se o solo é muito argiloso e a água disponível é alta então a dotação hídrica é zero.
22. Se o solo é muito argiloso e a água disponível é medianamente alta então a dotação hídrica é zero.
23. Se o solo é muito argiloso e a água disponível é média então a dotação hídrica é zero.
24. Se o solo é muito argiloso e a água disponível é medianamente baixa então a dotação hídrica é mínima.
25. Se o solo é muito argiloso e a água disponível é baixa então a dotação hídrica é baixa.

Tabela II. Matriz Associativa Fuzzy

		Água Disponível				
		ALT	MEA	MED	MEB	BAI
Tipo de Solo	ARE	ZER	BAI	MED	ALT	MAX
	MED	ZER	MIN	BAI	MED	MEA
	SIL	ZER	ZER	MIN	MEB	MED
	ARG	ZER	ZER	ZER	BAI	MEB
	MAG	ZER	ZER	ZER	MIN	BAI

5. SIMULAÇÃO

A simulação foi realizada através da Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB e as etapas do sistema de controle foram implementadas conforme já referido anteriormente. Foram colhidas cinco amostras de dados (água disponível e dotação hídrica) para os cinco tipos de solos diferentes. Na Tabela (III) tem-se os dados, as curvas foram traçadas com o MATLAB as quais apresentam-se através das Fig. 9, 10, 11, 12 e 13.

Tabela III. Dados da simulação do sistema

AD	DH p/TS=0.5	DH p/TS=3	DH p/TS=5	DH p/TS=7	DH p/TS=9
0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0
160	2,31	1,01	1,01	0	0

200	3,17	1,41	1,41	0	0
240	3,34	1,52	1,52	0	0
280	3,44	1,60	1,56	0	0
320	3,72	1,85	1,81	0	0
360	4,03	2,15	2,18	0	0
400	4,25	2,35	2,44	0	0
440	4,41	2,50	2,45	0	0
480	4,89	2,89	2,73	2,11	1,15
520	5,16	3,17	2,96	2,39	1,4
560	5,38	3,39	3,15	2,53	1,52
600	5,55	3,56	3,25	2,72	1,61
640	6,73	4,73	3,42	2,87	1,69
680	6,82	4,82	3,49	2,98	1,75
720	6,94	4,94	3,61	3,13	1,94
760	7,07	5,08	3,77	3,3	2,19
800	8,19	6,19	5,18	3,55	2,46
840	8,27	6,26	5,26	3,63	2,60
880	8,33	6,32	5,32	3,70	2,72
920	8,85	6,85	5,81	4,50	3,85
960	8,90	6,90	5,85	4,57	3,90
1120	9,00	6,98	5,95	4,67	3,97

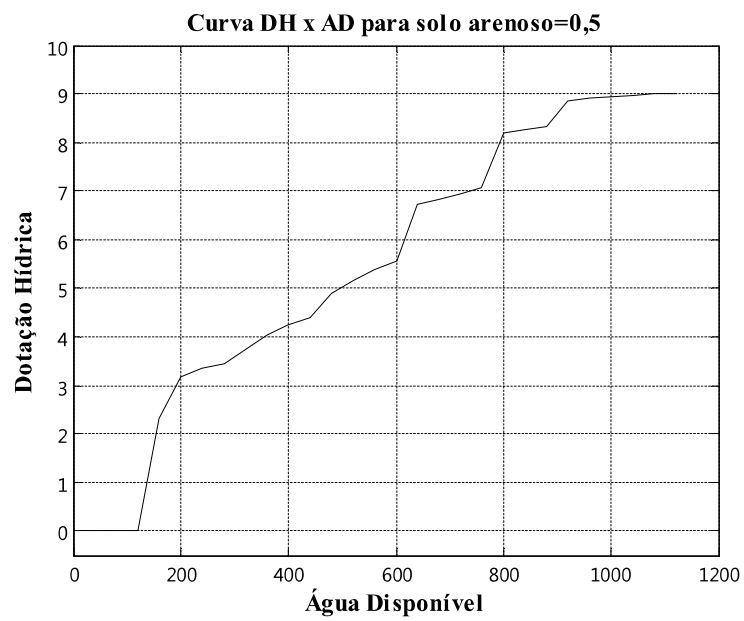


Figura 9. Dotação Hídrica versus Água Disponível para solo arenoso

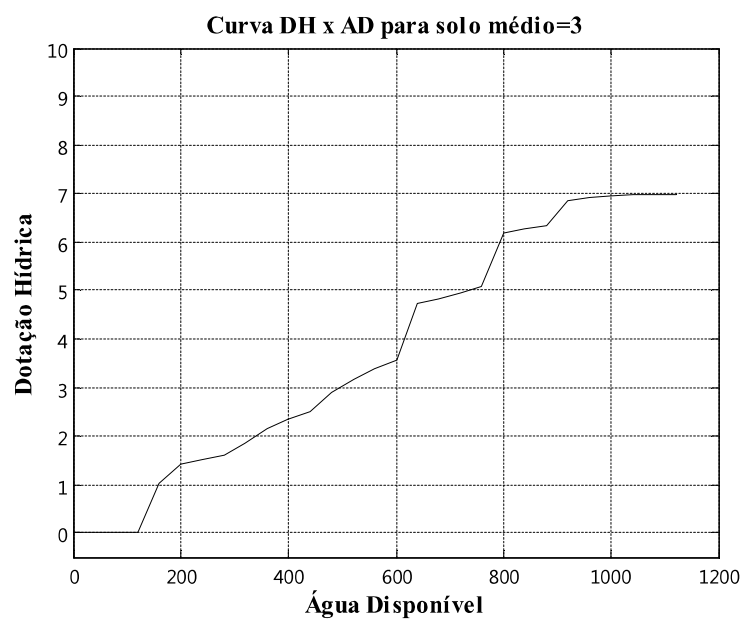


Figura 10. Dotação Hídrica versus Água Disponível para solo médio

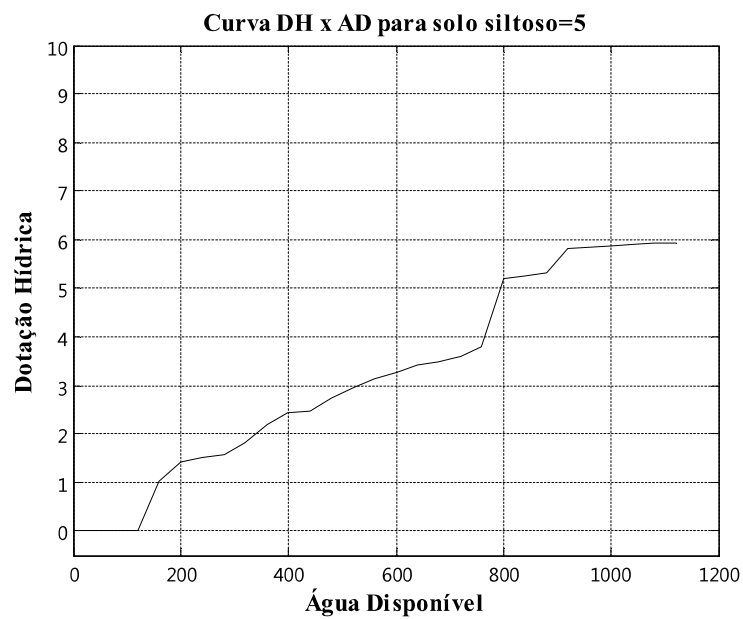


Figura 11. Dotação Hídrica versus Água Disponível para solo siltoso

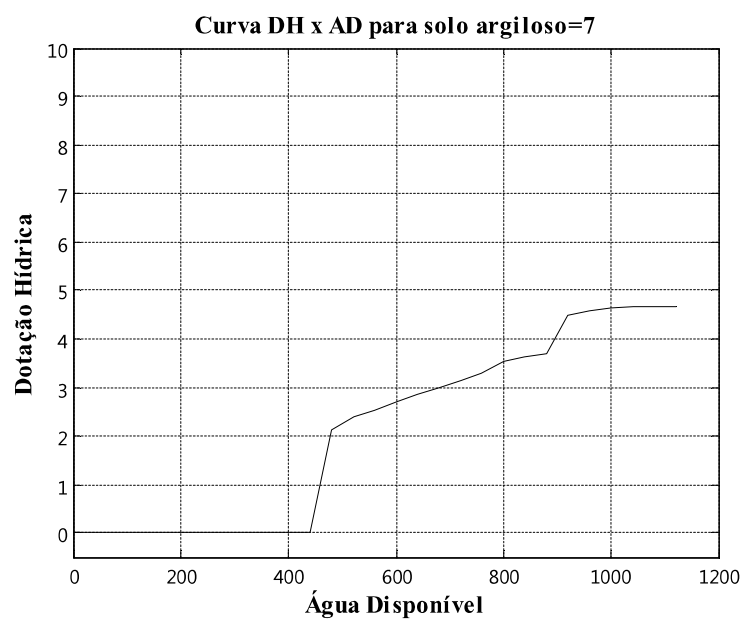


Figura 12. Dotação Hídrica versus Água Disponível para solo argiloso

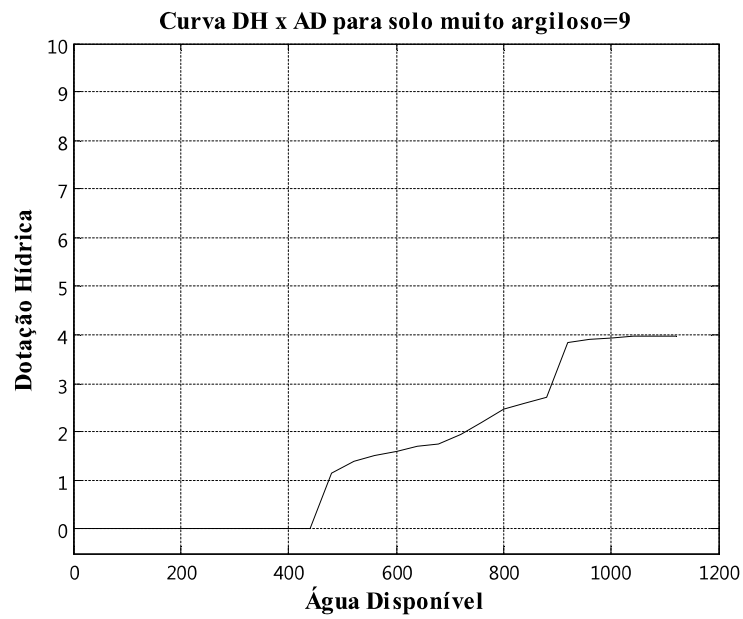


Figura 13. Dotação Hídrica versus Água Disponível para solo muito argiloso

A Fuzzy Logic Toolbox do Matlab proporciona um gráfico denominado superfície de controle onde pode-se visualizar em três dimensões o comportamento do sistema de inferência fuzzy. Na Figura 14 apresenta-se a superfície de controle, onde observa-se que quanto mais arenoso for o solo (próximo de zero) e com menos água disponível (próximo de 1150) a dotação hídrica será maior inicialmente, e quanto mais argiloso, a dotação será menor.

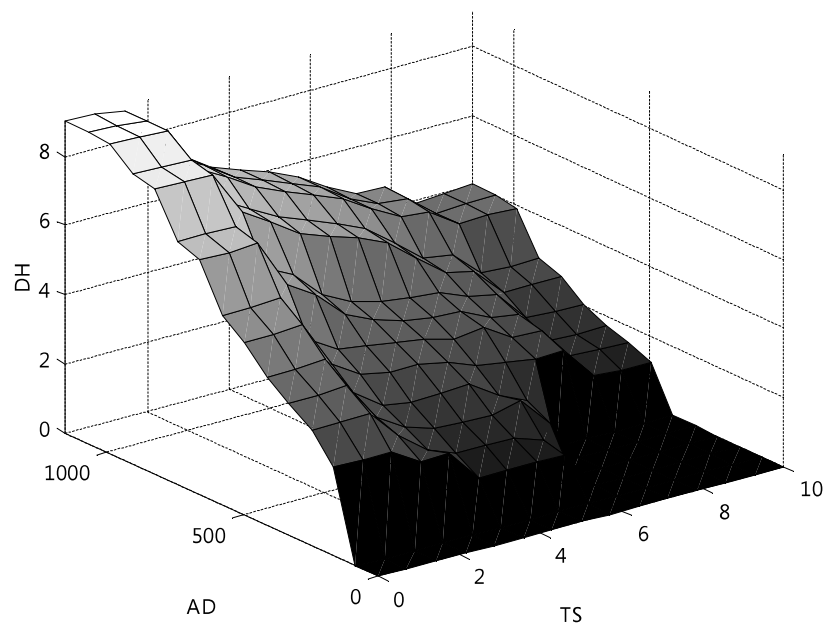


Figura 14. Superfície de Controle do sistema de controle e modelagem fuzzy

6. RESULTADOS

Os resultados obtidos analisando-se os dados colhidos e as curvas mostradas nas Figuras (9, 10, 11,12 e 13), em que todos os tipos de solos foram utilizados, nota-se que a dotação hídrica varia de acordo com a variação da água disponível no solo. Observa-se através das curvas que quanto mais arenoso for o solo (Tipo de Solo =0,5), maior será a dotação hídrica ($DH=9,0$), para água disponível igual a 1120. Já para um solo muito argiloso (Tipo de Solo=9,0) a dotação hídrica será ($DH=3,97$), para a mesma água disponível. Este exemplo mostra claramente que com um nível de água disponível de 1120 o solo arenoso seria irrigado com uma dotação hídrica de 9,0 enquanto o solo muito argiloso seria irrigado com dotação hídrica igual a 3,97. Isto se deve ao fato que os coeficientes de infiltração hidráulica de cada um dos solos são diferentes de modo que o solo arenoso absorve água mais rapidamente que um solo argiloso e deste modo pode-se minimizar problemas como empoçamento, perdas por escoamento superficial, salinização,etc.

7. COMENTÁRIOS

Os resultados obtidos são relevantes, pois além da importância de um sistema de controle deste tipo, que mantém o nível da água disponível no solo em condições ideais para o desenvolvimento das culturas, com a dotação hídrica diferenciada para cada tipo de solo, melhorias significativas na área ambiental são atingidas (menos salinização dos solos, menos perdas de nutrientes da camada superficial do solo e menor consumo de água), e na área econômica (menores gastos com energia e custos operacionais).

8. CONCLUSÃO

Conclui-se então que é possível controlar a água disponível no solo para as plantas e a vazão de aplicação das dotações hídricas através de um sistema de controle inteligente (controle fuzzy) visto que, com técnicas convencionais e modernas de controle sérios problemas devem ser equacionados e resolvidos, tais como, elevado tempo morto do sistema e as não-linearidades inerentes ao mesmo.

9. AGRADECIMENTOS

Ao Cefet-AL pelo apoio, à Fapeal - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas pela ajuda financeira e ao PPGEM – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUYOUCOS, G.J., MICK, A.H., **An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions.** Tech.Bull.Michigan.Agric.Exp.Stn, 1(172): 18, 1940.

BOUYOUCOS, G.J., MICK, A.H., **Improvements in the plaster of Paris absorption blocks electrical resistance method for measuring soil moisture under field conditions.** Tech.Bull.Michigan.Agric.Exp.Stn, 1:455-465, 1946.

COLEMAN, E.A., HENDRIX, T.M., **Fiberglass electrical soil moisture instrument.** Soil Science”, 1(67):425-438, 1949.

GOMES, H.P., **Engenharia de Irrigação**, volume 1. Editora Universitária UFPB, João Pessoa, 1994.

LIMA, F.M.C., **Caracterização de um sensor para determinação da água disponível nos solos**, Dissertação de Mestrado, UFPB - Campus II, Campina Grande, Paraíba, 1997.

SHAW, I.S., SIMÕES, M.G., **Controle e Modelagem Fuzzy**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo-SP, 2004.