

CONTROLE DO POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO POR MEIO DE LÓGICA FUZZY

Francisco Marconi Cavalcanti de Lima, Simplicio Arnaud da Silva, Hamilcar José Almeida Filgueira e Heber Pimentel Gomes

1 RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o estudo teórico e experimental, de um sistema de controle inteligente fuzzy, para definir o momento de irrigação. Este sistema de controle mantém o potencial matricial de água, no solo, em níveis compatíveis com os requisitos de irrigação da cultura, por meio de dotações hídricas variáveis de acordo com a velocidade de rotação de um conjunto motor-bomba. O controle de velocidade de rotação do motor de acionamento da bomba (motor elétrico de indução trifásico) é feito por meio de um inversor de frequência variável, comandado por um sinal elétrico de tensão contínua. Este sinal elétrico é fornecido por um computador, cujo valor depende das condições e características do solo. Com este sistema de controle é possível proporcionar maior produtividade às culturas, pois o solo estará sempre com a umidade ideal para o seu desenvolvimento vegetativo. A técnica utilizada é a do Controle e Modelagem Fuzzy fazendo uso do Método Mandani. Como o sistema de controle é baseado em regras lingüísticas, o mesmo pode ser adaptado com relativa facilidade a novas necessidades de manejo da água no solo, bastando, para isso, fazer ajustes somente em uma ou algumas de suas regras.

Palavras Chave: controle inteligente, tensiômetro, dotações hídricas, inversor de frequência.

SOIL WATER MATRIX POTENTIAL CONTROL THROUGH FUZZY LOGIC

2 ABSTRACT

This is a theoretical and experimental study in which Fuzzy Intelligent Control System is used to define the exact time of irrigation. This system keeps the soil water matrix potential at levels consistent with the irrigation requirements through water allocations, varying according to a motor-pump speed. The rotation speed control that drives the motor pump (three phase induction electric motor) is done through a variable frequency inverter, controlled by an electrical signal voltage provided by a computer, and it's value changes according to the soil characteristics and it's conditions. With this system it is possible to increase crop productivity as the ground is always with the ideal humidity for plant growth. The technique used was Control and Modeling Fuzzy utilizing the Mandani Method, since this system is based on linguistic rules, it can be easily adapted to new practical requirements by modifying some of its rules.

Key Words: intelligent control, tensiometer, irrigation schedule, frequency inverter.

3 INTRODUÇÃO

Em um sistema tradicional de agricultura irrigada é comum adotar um tratamento igual de distribuição de água para as plantas cultivadas, baseado na média de necessidade hídrica da cultura. No entanto, devido a diversos fatores, tais como, a variabilidade espacial da textura do solo e a capacidade de armazenamento e de condução de água no solo, há um diferencial da necessidade hídrica real das culturas para diferentes tipos de solo. Assim, fazer a irrigação baseado em valores médios de suprimento de água, significa dizer que em algum trecho da área a ser irrigada vai ser aplicada água em excesso ou água em falta. Tanto o excesso quanto a carência de água afetam os rendimentos das culturas. Racionalizar a aplicação de água ainda é um desafio para a agricultura irrigada. O ideal é que cada cultura submetida à irrigação tenha suficiente água disponível no solo para seu desenvolvimento, pois as diversas culturas têm necessidades hídricas variadas durante seus ciclos vegetativos (Gomes, 1994).

A automação de sistemas de irrigação tem sido amplamente estudada e desenvolvida com o intuito do uso racional da água no campo. Isso significa dizer que a água a ser disponibilizada para as culturas pode ser controlada de modo que uma maior produtividade seja alcançada. É importante que este controle seja realizado, aliado a um sistema de monitoramento do potencial matricial de água no solo, pois este potencial está diretamente relacionado à umidade do solo e a capacidade das plantas em retirar a quantidade de água necessária para seu desenvolvimento vegetativo.

Os equipamentos para controle, automação e operacionalização dos sistemas de irrigação disponíveis, apesar de apresentarem benefícios e certo grau de sofisticação tecnológica, os mesmos operam, normalmente, segundo a técnica de controle liga-desliga sob temporizações predeterminadas.

Oportunidades significantes existem para reduzir o consumo de energia de bombeamento por meio de sistemas inteligentes e práticas operacionais. Em particular, as muitas aplicações em bombeamentos que requerem velocidade variável, oferecem grande potencial para economia. As economias vão, frequentemente, bem além de energia e pode incluir desempenhos confiança melhorados e custos de ciclo de vida reduzidos.

A utilização de sistemas de controle do tipo liga-desliga nos sistemas de irrigação deve-se ao fato de que é muito difícil a aplicação das técnicas da engenharia de controle convencional e mesmo de controle moderno, pois, segundo Ogata (2003), na aplicação destas técnicas se requer que os sistemas a serem controlados sejam lineares e invariantes no tempo, o que não é o caso em apreciação. São também necessários que os tempos de atraso dos sistemas sejam os menores possíveis; no caso de sistemas de irrigação, o tempo de atraso para que os sensores apresentem respostas confiáveis é muito grande e varia com a condutividade hidráulica do solo (Brandão et al., 2004). Desta forma, o tipo de controle apropriado para sistemas não-lineares, variantes no tempo e com grande tempo morto é o controle que utiliza lógica fuzzy. Um controlador fuzzy é um sistema baseado em regras que interagem para produzirem o comportamento desejado para o sistema. As regras são avaliadas simultaneamente, ou em paralelo e a saída do controlador é obtida interpolando-se as ações recomendadas por cada regra. Segundo Campos & Saito (2004), pode-se afirmar que em se tratando de um sistema de controle, a lógica fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar. Por meio da lógica fuzzy pode-se capturar o conhecimento humano, especialmente de operadores de plantas e processos industriais com fortes características de não-linearidades, as vezes com comportamento dinâmico pouco conhecido e implementar um controlador computacional com desempenho idêntico, ou melhor, que o do operador humano.

O controle fuzzy tem a capacidade de considerar vários critérios de desempenho simultaneamente, tanto na forma matemática como na forma lingüística. Segundo Campos & Saito (2004), os objetivos a serem alcançados, por um controlador fuzzy, são os seguintes: controlar e operar automaticamente processos complexos, não-lineares e multivariáveis, com desempenho pelo menos igual ao dos operadores; respeitar as especificações e restrições operacionais; ser simples, robusto e operar em tempo real. Ainda segundo Campos & Saito (2004), citando Bonissone et al. (1995), uma das grandes vantagens do controle fuzzy é que ele pode reduzir, consideravelmente, o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear para um sistema complexo, além das vantagens decorrentes do fato de ser uma tecnologia fácil de ser implementada em tempo real, de ser comprovadamente robusta em aplicações práticas e de ser capaz de controlar processos complexos. O controle fuzzy também oferece a vantagem de se adaptar a novas situações de controle com a mudança de apenas uma regra ou de várias.

O sistema de controle proposto neste trabalho mantém valores ótimos do potencial matricial de água no solo a ser utilizado para o plantio, tomando como base a condutividade hidráulica do mesmo.

Nesse sistema de controle também se faz uso da pressão utilizada nos dispositivos de irrigação de modo que a dotação hídrica do sistema de irrigação seja a mais seletiva possível, pois, têm-se níveis de dotações diferenciados dependendo da condutividade hidráulica, potencial matricial e da pressão de serviço dos dispositivos de irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Acionamentos e Controles Elétricos do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, João Pessoa-PB. Foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos: computador pessoal com os softwares LabView 7.0 e Matlab 5.3, interface de aquisição de dados marca Quatec, modelo DAQ 801; tensiômetro com vacuômetro, marca Solotest; vacuômetro/transdutor de pressão com indicador digital marca IOPE, modelo IP-2000 com faixa de medição de 0 a -1.000 mbar; motor de indução trifásico marca Eberle, 3 CV, 380 Vca, 5,3 A, 60 Hz; 1.710 rpm; inversor de frequência marca WEG, modelo CFW-07, 32A/600V; fonte de tensão de corrente contínua chaveada, marca Seventeam, tensões de alimentação de 115/220 Vca, 50-60 Hz e tensões e correntes de saída de +5V(22A), +12V(7A), -5V(0,5A) e -12V(0,5A) e amostra de solo franco-arenoso.

Na Figura 1 está representado o diagrama de blocos da montagem utilizada nos experimentos.

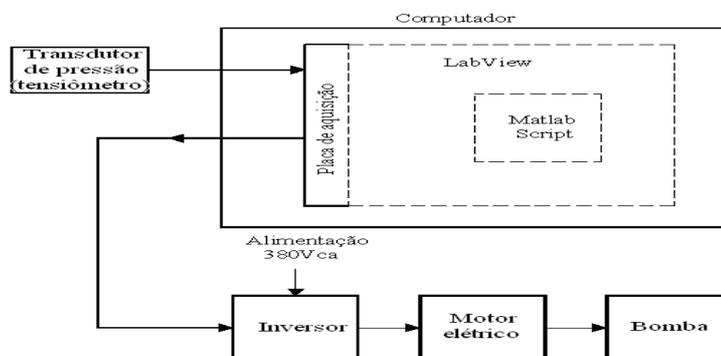


Figura. Diagrama de blocos da montagem experimental.

Os valores do potencial matricial de água no solo foram determinados com o uso do tensiômetro com vacuômetro. Os dados tensiométricos foram coletados por meio de um módulo computacional de aquisição de dados (Figura 2).



Figura 2. Equipamentos utilizados no experimento.

4 MODELAGEM DO CONTROLADOR

Na modelagem do sistema de controle foi utilizado o método Mandani disponível no Fuzzy Logic Toolbox do software Matlab (Mandani & Assilian, 1975), pelo fato de que nesse método, o sistema de inferência fuzzy é construído utilizando-se o conhecimento prévio do que se deseja do sistema a ser projetado e as regras de inferência fuzzy serem estritamente linguísticas. Foram utilizadas como entradas do sistema de controle, a condutividade hidráulica do solo (CH), o potencial matricial da água no solo (PM) e a pressão utilizada no conjunto moto-bomba do sistema de irrigação (PS), que são essenciais para o manejo da irrigação. O número de funções de pertinência das variáveis de entrada tem a ver com a seletividade do sistema e evitar um número exagerado de regras sem nenhuma vantagem adicional. Já o universo de discurso fuzzy de cada uma delas tem a ver com os valores práticos. Segundo Amaral (2005), em termos práticos a condutividade hidráulica pode ser classificada em: condutividade hidráulica muito lenta (menor que 0,4 cm/h), lenta (entre 0,4 e 2 cm/h), moderada (entre 2 e 8 cm/h), rápida (entre 8 e 12 cm/h) e muito rápida (maior que 12 cm/h). O universo de discurso fuzzy para PM de 0 a 10, refere-se em valores reais à faixa de medição do tensiômetro que é de 0 a -100 kPa (0 a -1000 mbar).

Foram utilizados cinco funções de pertinência para as variáveis CH e PM e três para a variável PS; os universos de discurso das variáveis de entrada foram os seguintes: CH entre 0 e 20; PM entre 0 e 10 e PS entre 0 e 100, referindo-se, na prática, as pressões de 0 a 100 m.c.a.

A saída do controlador foi a velocidade de rotação da bomba (VB) para a dotação hídrica do sistema de irrigação, para a qual utilizou-se seis vetores de pertinência distintos e um universo de discurso compreendido entre 0 e 10. Esta saída está diretamente relacionada com a condutividade hidráulica do solo a ser irrigado, com relação ao potencial matricial medido no referido solo e a pressão de serviço dos dispositivos utilizados na irrigação.

Na Figura 3 está representado o diagrama de blocos do sistema de controle fuzzy com suas entradas e saída.

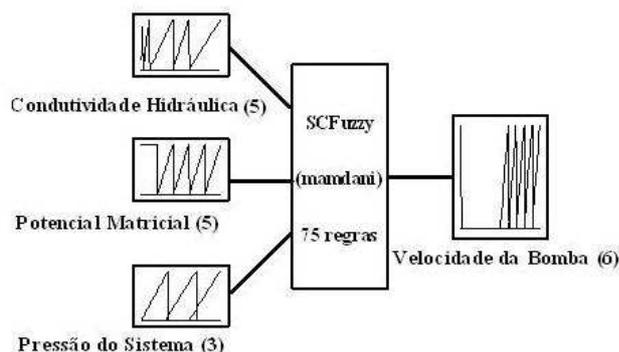


Figura 3. Variáveis linguísticas de entrada e saída do sistema de controle Fuzzy.

4.1 Variável Linguística – Condutividade Hidráulica (CH)

O universo de discurso da variável de entrada CH foi definido com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (Amaral, 2005). À variável CH foram associadas cinco funções de pertinência: MRP (muito rápida), RAP (rápida), MOD (moderada), LEN (lenta) e MLN (muito lenta). MRP, refere-se a uma condutividade hidráulica entre 12 e 20; RAP, entre 8 e 12; MOD, entre 2 e 8; LEN, entre 0,4 e 2; e MLN, entre 0 e 0,4.

As funções matemáticas utilizadas foram funções triangulares crescentes sempre iniciando no valor mínimo em cada intervalo do universo de discurso e terminando no valor máximo pelo fato do universo de discurso está bem definido em intervalos regulares e cada função individualmente ser crescente. Na Figura 4 apresenta-se as funções de pertinência da variável linguística condutividade hidráulica.

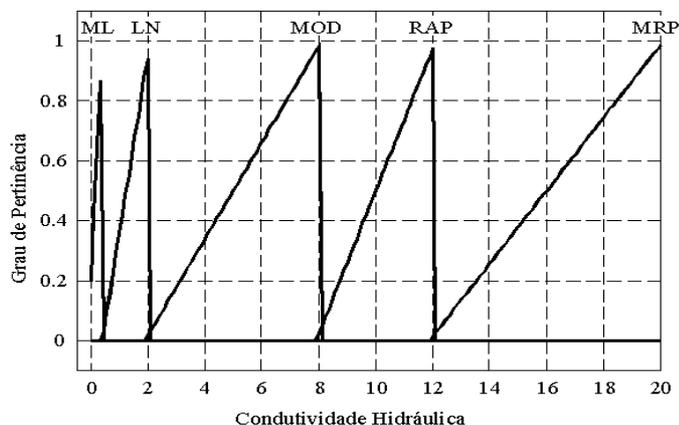


Figura 4. Funções de pertinência da variável linguística condutividade hidráulica.

4.2 Variável Linguística – Potencial Matricial (PM)

À variável de entrada PM foram associadas cinco funções de pertinência, as funções BAI (baixo), MEB (medianamente baixo), MED (médio), MEA (medianamente alto) e ALT (alto). A função BAI significa potencial matricial baixo e é definida entre zero e dois; MEB é

definida entre dois e quatro; MED está compreendida entre quatro e seis; MEA está na faixa de seis a oito e ALT de oito a dez. A função BAI foi definida como uma função trapezoidal, pois valores do potencial matricial no UD iguais ou abaixo de dois devem ter grau de pertinência igual a 1, isto significa que valores do potencial matricial dentro desta faixa, a saída do sistema deve ser zero, isto é, a bomba não deve funcionar.

As considerações feitas com relação as funções matemáticas serem triangulares crescentes, feitas para as funções de pertinência de CH, são válidas aqui também.

Na Figura 5 são apresentadas as funções de pertinência da variável potencial matricial do solo.

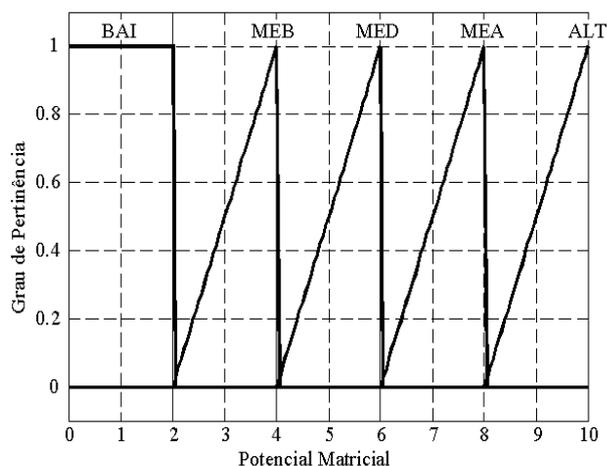


Figura 5. Funções de pertinência da variável linguística potencial matricial do solo.

4.3 Variável Linguística – Pressão do Sistema (PS)

Na Figura 6 mostra-se as funções de pertinência da variável PS.

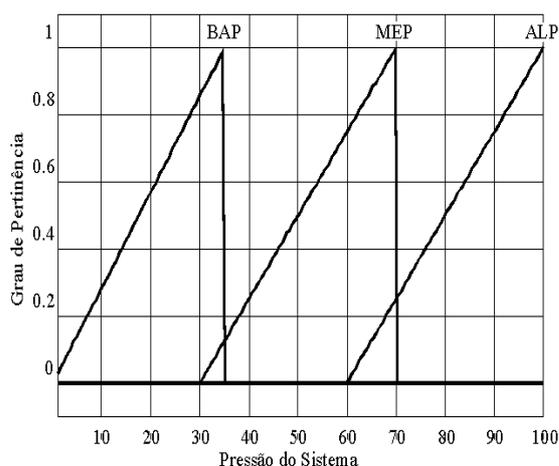


Figura 6. Funções de pertinência da variável linguística pressão do sistema.

À variável de entrada PS foram associadas três funções de pertinência, as funções BAP (baixa pressão), MEP (média pressão) e ALP (alta pressão). A função BAP é definida entre zero e trinta e cinco; MEP é definida entre trinta e setenta e ALT de sessenta a cem.

4.4 Variável Linguística – Velocidade de Rotação da Bomba (VB)

À variável de saída VB foram associadas seis funções de pertinência: ZER (zero); BAI (baixa), definida de cinco a seis; MEB (medianamente baixa), de seis a sete; MED (média), de sete a oito; MEA (medianamente alta), de oito a nove; e ALT (alta), de nove a dez. As funções de pertinência foram modeladas de acordo com o funcionamento mais apropriado do motor, isto é, assegurar que o mesmo não funcione em velocidades de rotações muito baixas para evitar superaquecimento, devido a deficiência no sistema de refrigeração, no caso de motores autoventilados. Desta forma, o motor só deverá funcionar em rotações acima de 50% da rotação nominal.

Na Figura 7 mostra-se as funções de pertinência da variável VB.

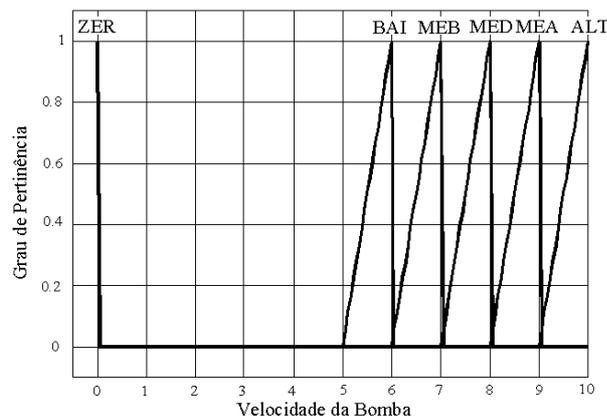


Figura 7. Funções de pertinência da variável linguística velocidade de rotação da bomba.

4.5 Sistema de Inferência Fuzzy – Base de regras

Foram estabelecidas 75 regras de inferência relacionando as cinco funções de pertinência da CH, com as cinco do PM e as três da PS. Por exemplo, o sistema de inferência leva em conta que, em solos com condutividade hidráulica maiores, a água infiltra-se mais rapidamente solicitando uma maior vazão da bomba. A medida que o potencial matricial diminui, a bomba diminui a velocidade, fazendo com que a vazão bombeada seja reduzida. Das 75 regras utilizadas, no sistema de inferência fuzzy, para o sistema de controle, alguns exemplos são apresentados a seguir:

Exemplos de regras linguísticas

1. Se a CH é MRP e o PM é BAI e a PS é BAP então VB é ZER
2. Se a CH é MRP e o PM é MEA e a PS é BAP então VB é MED
3. Se a CH é RAP e o PM é MEB e a PS é BAP então VB é BAI
4. Se a CH é RAP e o PM é ALT e a PS é MEP então VB é MEA
5. Se a CH é MOD e o PM é MED e a PS é MEP então VB é BAI

6. Se a CH é LEN e o PM é ALT e a PS é BAP então VB é MEB

Exemplos de regras lingüísticas na forma de expressões matemáticas fuzzy

1. $\mu_R^1(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_1 [\mu_{\text{CH}}(\text{MRP}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{BAI}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{BAP}), \mu_{\text{VB}}(\text{ZER})]$
2. $\mu_R^2(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_{21} [\mu_{\text{CH}}(\text{RAP}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{MEB}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{ALP}), \mu_{\text{VB}}(\text{MEB})]$
3. $\mu_R^3(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_{32} [\mu_{\text{CH}}(\text{MOD}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{BAI}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{MEP}), \mu_{\text{VB}}(\text{ZER})]$
4. $\mu_R^4(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_{43} [\mu_{\text{CH}}(\text{MOD}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{ALT}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{BAP}), \mu_{\text{VB}}(\text{MEB})]$
5. $\mu_R^5(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_{55} [\mu_{\text{CH}}(\text{LEN}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{MEA}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{BAP}), \mu_{\text{VB}}(\text{BAI})]$
6. $\mu_R^6(\text{CH}, \text{PM}, \text{PS}, \text{VB}) = f_{70} [\mu_{\text{CH}}(\text{MLN}) \wedge \mu_{\text{PM}}(\text{MEA}) \wedge \mu_{\text{PS}}(\text{BAP}), \mu_{\text{VB}}(\text{BAI})]$

Onde:

- μ_R é a função de pertinência resultante da regra e é função das variáveis de entrada CH, PM e PS e da saída VB; é o resultado de cada regra em particular;
- \wedge é o operador de conjunção;
- f_n é um operador que descreve a conjunção das funções de pertinência relacionadas com as entradas CH, PM e PS implicando na saída VB; como são 75 regras o índice n varia de 1 a 75;
- μ_{CH} é a função de pertinência referente a entrada CH e depende dos valores das funções MRP, RAP, MOD, LEN e MLN;
- μ_{PM} é função de pertinência relacionada a entrada PM e depende dos valores das funções BAI, MEB, MED, MEA e ALT;
- μ_{PS} é função de pertinência relacionada a entrada PS e depende dos valores das funções BAP, MEP e ALP;
- μ_{VB} é a função de pertinência a qual refere-se a saída VB e é dependente dos valores das funções ZE, BAI, MEB, MED, MEA e ALT.

No experimento foi utilizado um programa especialmente desenvolvido para a modelagem do sistema de controle e incorporado ao programa desenvolvido no ambiente computacional LabView para este fim. O tensiômetro foi instalado em uma amostra de solo, com potencial matricial inicial de -86,3 kPa (-863 mbar). Posteriormente, a amostra de solo foi sendo umedecida e ao final do experimento o potencial matricial estava em -10 kPa (-100 mbar) quando a aquisição de dados foi encerrada. O valor fuzzy utilizado na condutividade hidráulica foi igual a 16 cm h^{-1} , e a pressão do sistema moto-bomba foi de 80 m.c.a.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de controle opera em malha fechada, controlando a vazão da água, de acordo com as necessidades hídricas da cultura irrigada. Dependendo do valor do potencial matricial de água no solo, da condutividade hidráulica do solo e da pressão a ser utilizada nos dispositivos de irrigação, o sistema de controle fuzzy decide qual o valor da variável de controle que deverá ser aplicado na entrada do inversor de frequência, para ajustar a velocidade de rotação do motor elétrico de acionamento da bomba. A medida que o potencial matricial de água no solo, se aproxima do valor desejado, a velocidade de rotação do motor elétrico diminui, reduzindo a vazão da bomba. Se a umidade está com o valor desejado, a bomba permanece parada, só voltando a funcionar quando houver diferença entre o valor desejado e o valor medido.

Nas Figuras 8, 9 e 10 mostra-se as superfícies de controle obtidas a partir da modelagem do sistema de controle fuzzy para valores fuzzy fixos da pressão do sistema equivalentes a 20, 50 e 80, respectivamente.

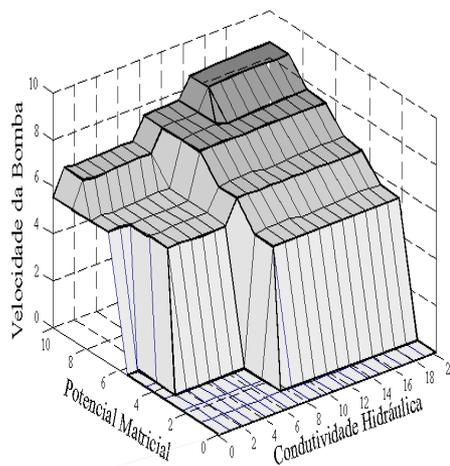


Figura 8. Superfície de controle para condutividade hidráulica e potencial matricial de água no solo com pressão de serviço do conjunto moto-bomba de 20 (valor fuzzy).

Analisando as Figuras 8, 9 e 10, constata-se que a velocidade de rotação do moto-bomba depende tanto do potencial matricial de água no solo (umidade do solo), quanto da condutividade hidráulica do mesmo (fluidez da água no solo). Por exemplo: na Figura 8, quando o potencial matricial do solo é 10 (solo totalmente seco) e a condutividade hidráulica é também 10, a velocidade de rotação da bomba é alta para elevar o potencial matricial de água no solo para um valor adequado para a cultura o mais rápido possível. A medida que o potencial matricial da água, no solo, diminui, a velocidade de rotação da bomba decresce visto que a umidade do solo se aproxima do valor desejado.

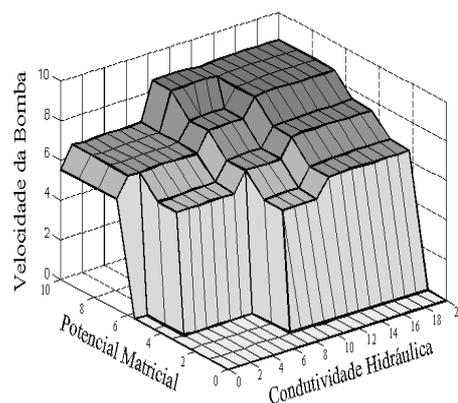


Figura 9. Superfície de controle para condutividade hidráulica e potencial matricial de água no solo com pressão de serviço do conjunto moto-bomba de 50 (valor fuzzy).

Tendo em vista as dificuldades de se realizar os ensaios em um sistema, real, no campo, utilizou-se um recipiente com uma amostra de material de solo seco, com características conhecidas.

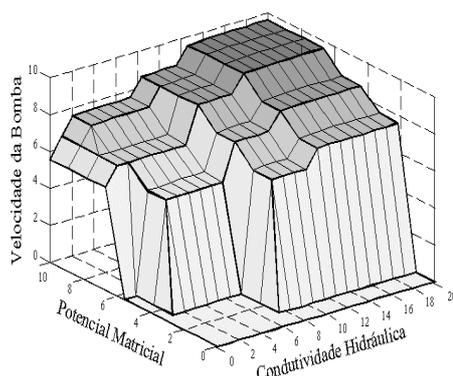


Figura 10. Superfície de controle para condutividade hidráulica e potencial matricial de água no solo com pressão de serviço do conjunto moto-bomba de 80 (valor fuzzy).

Na Figura 11 é mostrada a curva do potencial matricial de água no solo, captado pelo transdutor, durante o experimento. Observa-se que a medida que o solo é umedecido, o potencial matricial de água no solo diminui até atingir o valor mínimo que foi de $-10,0$ kPa (-100 mbar) que corresponde ao valor fuzzy 1, para um tempo de ensaio de, aproximadamente, duas horas e trinta minutos.

O elevado tempo de resposta se deve às características do solo e do próprio transdutor. Mas, em sistemas de irrigação, depois que a umidade do solo atinge o valor desejado, a dotação hídrica é feita em quantidades reduzidas de água, para suprir, apenas, as necessidades da cultura.

Na Figura 12 mostra-se a curva de velocidade de rotação da bomba, onde constata-se que no início do ensaio, quando o solo está seco, esta é alta e diminui à medida que o solo vai sendo umedecido. Após 1 hora e 53 minutos a velocidade de rotação da boma cai para zero, significando que a umidade do solo atingiu o valor desejado.

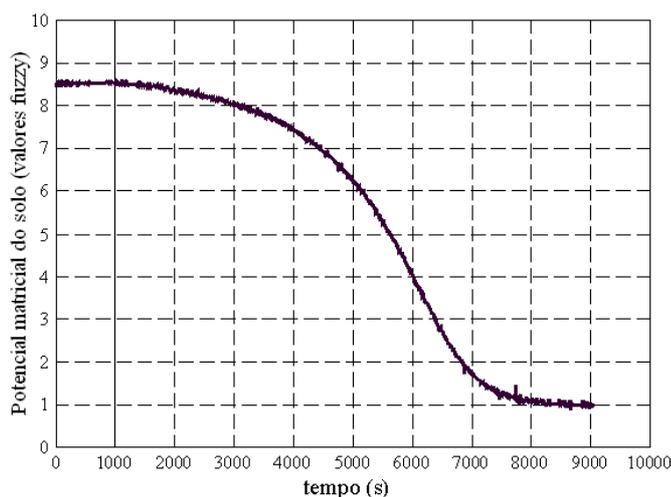


Figura 11. Potencial matricial versus tempo para condutividade hidráulica de 16 (valor fuzzy) e pressão de serviço do conjunto motobomba de 80 (valor fuzzy).

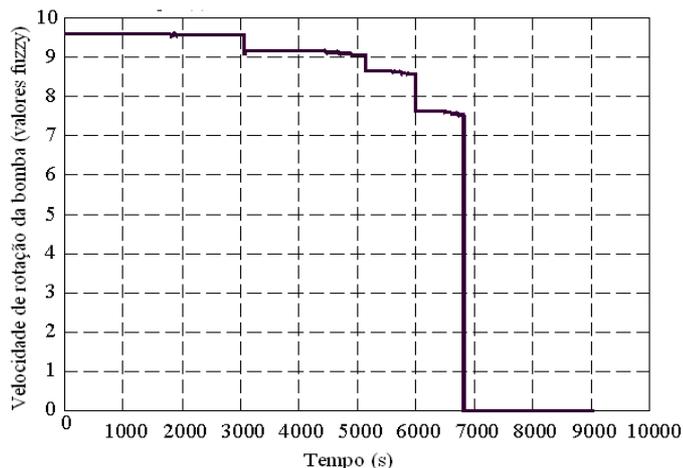


Figura 12. Velocidade de rotação da bomba versus tempo para condutividade hidráulica de 16 (valor fuzzy) e pressão de serviço do conjunto motobomba de 80 (valor fuzzy).

Na Figura 13 observa-se que a velocidade de rotação da bomba é alta quando o potencial matricial do solo é alto (solo seco) e cai à medida que este diminui (solo úmido).

Os resultados obtidos, na realização experimental, foram bem expressivos pois comportaram-se de acordo com a modelagem do sistema de controle fuzzy, onde concluiu-se que tanto o sinal referente ao potencial matricial captado do transdutor de pressão como o sinal para controle de velocidade de rotação da bomba, por intermédio do inversor de frequência, substituíram plenamente os sinais de simulação de acordo com as regras implementadas.

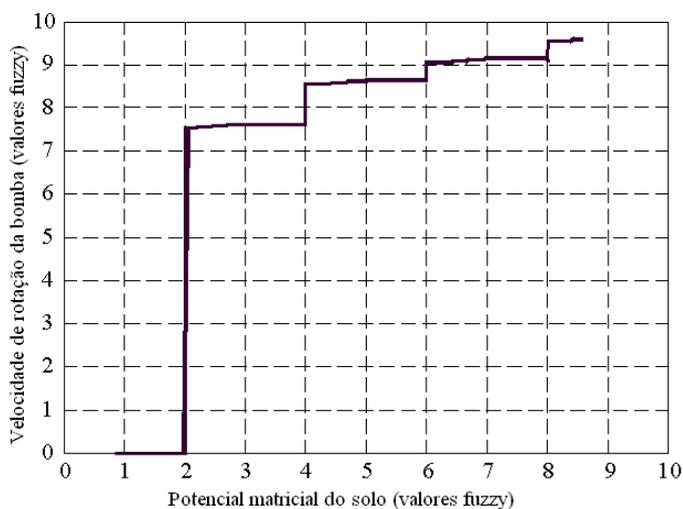


Figura 13. Velocidade de rotação da bomba versus potencial matricial para condutividade hidráulica de 16 (valor fuzzy) e pressão de serviço do conjunto motobomba de 80 (valor fuzzy).

Pode-se observar, na curva apresentada na Figura 13, que a velocidade de rotação da bomba varia segundo o potencial matricial. Como o potencial matricial depende de dotações hídricas, e essas dotações são proporcionadas pela bomba do sistema de irrigação, tem-se o potencial matricial controlado indiretamente pela variável velocidade de rotação da bomba.

6 CONCLUSÕES

O sistema de controle proporciona a obtenção de maior produtividade das culturas, pois o solo fica sempre com umidade adequada para o desenvolvimento vegetativo das mesmas;

O sistema de controle condiciona somente o fornecimento de dotações hídricas realmente necessárias para as culturas, promovendo a racionalização da água a ser utilizada para a irrigação;

O consumo de energia é minimizado já que o sistema de bombeamento funciona com velocidades de rotação de acordo com a condutividade hidráulica do solo, com o potencial matricial de água no solo e com a pressão do sistema e não a velocidade de rotação plena como é o caso comum;

Maior economia com gastos operacionais, pois o sistema é automático;

Como o sistema de controle é baseado em regras lingüísticas o mesmo pode ser adaptado com relativa facilidade a novas necessidades práticas, bastando para isso modificar somente uma ou algumas de suas regras.

7 REFERÊNCIAS

AMARAL, F. C. S. **Sistema brasileiro de classificação de terras para irrigação: enfoque na região semi-árida**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 218 p.

BONISSONE, P. P. Industrial application of fuzzy logic at General Electric. **Proceedings of IEEE**, New York v. 83, n. 3, p. 450-465, 1995.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKY, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa; MG: Editora UFV, 2004. 120 p.

CAMPOS, M. M.; SAITO, K. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004. 235 p.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação**. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 1994. 412 p.

MANDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, University of Essex, Colchester: UK v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 788 p.