

Sistema de Irrigação Microcontrolado: Automação e Otimização do Consumo de Energia Elétrica e Água

J. W. L. Nerys, EEEEC/UFG, A. M. de Oliveira, EEEEC/UFG, E. G. Marra, EEEEC/UFG, L. F. C. de Oliveira, EA/UFG, A. J. Alves, CEFETGO, F. Cendes, EEEEC/UFG, A. M. M. Medeiros, EA/UFG, R. Nielson, CELG

Resumo - A possibilidade real de uma crise de abastecimento de água e energia elétrica no futuro aponta para ações urgentes no sentido de um melhor aproveitamento dos recursos existentes. Sendo um Estado predominantemente agrícola, Goiás tem um número significativo de grandes consumidores de água e energia elétrica voltados para irrigação. Em sua grande maioria, esses sistemas de irrigação utilizam motores de indução sem controle de velocidade, o que torna o controle de vazão dependente de ação humana no ajuste de válvulas e outros dispositivos para a obtenção do nível mais adequado de vazão para cada ponto de uma área irrigada. A falta do controle de velocidade para atender cada situação de carga de forma otimizada, resulta no desperdício de água e energia elétrica, além de uma irrigação sem um controle adequado de umidade do solo. Este trabalho apresenta a implementação de um sistema automático de controle de sistemas de pivô central que resulta em economia de energia elétrica e melhor distribuição de água e ainda uma metodologia de estimação do potencial de economia de sistemas já instalados, a partir das características topográficas e elétricas e um programa para determinação do retorno econômico advindo da adoção do sistema automático desenvolvido.

Palavras-chave — Controle Automático, Conversor de Frequência, Eficiência Energética, Pivô Central, Sistemas de Irrigação.

I. INTRODUÇÃO

Há no mercado tecnológico de sistemas de irrigação por aspersão mecanizada dois tipos usuais de equipamentos: o sistema de pivô central e o autopropelido, ambos para irrigação de áreas de pequeno, médio e grande porte com facilidade de implementação e manejo da irrigação [1].

O sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central, ilustrado na Figura 1, foi patenteado em 1952, por Frank Zybach, nos Estados Unidos. É formado por um conjunto de torres móveis que suportam uma tubulação aérea, onde se situ-

am os aspersores responsáveis pela irrigação, conectada a um ponto central fixo, a qual por meio do movimento das torres móveis realiza a irrigação de uma área circular delimitada pelo comprimento total da tubulação aérea, também denominada de linha lateral.

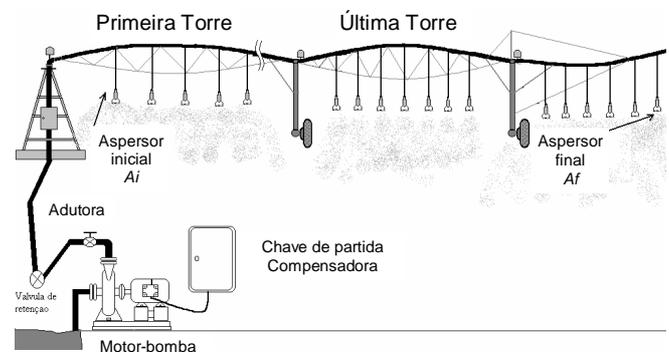


Figura 1. Sistema típico de irrigação por aspersão tipo pivô central.

A captação de água é feita através de bombas d'água, que retiram água de lagos naturais ou artificiais, ou ainda de rios. Na grande maioria são utilizados lagos artificiais como reservatório de água.

Levantamentos recentes [2] mostram um crescimento acentuado da quantidade de sistemas de irrigação do tipo pivô central no Estado de Goiás, o que vem resultando em problemas cada vez maiores de abastecimento de água em algumas regiões do Estado, no período seco, e em demandas crescentes de energia elétrica para irrigação.

Embora os sistemas de pivô central sejam considerados de alto grau tecnológico, o crescimento desordenado e o uso inadequado desses sistemas têm resultado em desperdício de energia elétrica e água. Em sua maioria, esses sistemas utilizam motores de indução sem controle de velocidade, o que torna o controle de vazão dependente da ação dos reguladores de pressão para a obtenção do nível mais adequado de vazão para cada ponto de uma área irrigada. A ausência de controle de rotação do conjunto motor-bomba para atender cada situação de carga de forma otimizada, resulta em desperdício de água e energia elétrica, além de uma irrigação sem um controle adequado de umidade do solo. Outros fatores de desperdício são: determinação inadequada do momento exato da irrigação e da velocidade de deslocamento da linha lateral e baixa eficiência dos equipamentos instalados. Via de regra, a eficiência dos equipamentos pode ser melho-

Este trabalho foi apoiado pela Companhia Energética de Goiás (CELG) através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do ciclo 2000/2001.

J. W. L. Nerys trabalha na Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (EEEC/UFG) (e-mail: jwilson@eee.ufg.br).

A. M. de Oliveira trabalha na EEEEC/UFG (e-mail: melo@eee.ufg.br).

E. G. Marra, trabalha na EEEEC/UFG (e-mail: enes@eee.ufg.br).

L. F. C. de Oliveira trabalha na Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Goiás (EA/UFG).

A. J. Alves trabalha no Centro Federal de Educação de Goiás.

A. M. M. Medeiros é doutorando na EA/UFG (e-mail: amarcosmedeiros@yahoo.com.br).

rada pela adequação da vazão e pressão, usinagem de rotores das bombas e redução das perdas por evaporação e derivação devido ao vento [3, 4].

A bibliografia básica no assunto [5]-[8] trata principalmente de resultados advindos de simulação computacional e de sistemas que simulam um sistema real. Além de ter como um dos objetivos a implementação em um sistema em escala real de pivô central, o trabalho contempla também uma ferramenta de monitoramento do sistema, com uma metodologia inédita de estimação do potencial de economia de energia elétrica em sistemas já implantados.

Na proposta de controle apresentada, um conversor de frequência é usado para variar a velocidade do motor principal de um sistema de irrigação a pivô central, de um modo tal que o ponto de menor pressão da linha lateral seja sempre mantido em seu valor mínimo, ou seja, a pressão de projeto [13, 14]. Dessa forma, garante-se que a vazão nos aspersores permaneça dentro dos limites estabelecidos, sem qualquer pressão excedente, o que resulta em economia de energia elétrica. Pressão abaixo da nominal resultaria numa lâmina d'água menor que a prevista.

A estimação do potencial de economia com o uso da metodologia de controle implementada não leva em conta resultados de estudos que mostram que vários sistemas de pivô central em operação hoje no Estado de Goiás operam com sobrepessão, ou seja, os aspersores operam com pressão bem acima da pressão nominal, o que resulta em desperdício de energia elétrica. É evidenciado, no entanto, que mesmo os sistemas que foram bem dimensionados apresentam sobrepessão quando operando em terrenos inclinados, porque o projeto é feito para atender o ponto mais crítico, ou seja, o ponto de maior altura relativa entre a torre central e o aspersor mais externo. Assim, quando operando na região de menor altura manométrica, há uma sobrepessão na linha lateral, que pode ser aliviada com o sistema de controle proposto [3, 10-12].

II. METODOLOGIA

Os processos que utilizam bombas centrífugas possuem, em geral, uma demanda variável em função das condições topográficas e de exigências do manejo da cultura. Quando é necessário alterar a vazão em um sistema de irrigação no qual se utilizam técnicas convencionais, emprega-se válvula de gaveta, que provoca modificação da curva do sistema devido à introdução de perdas de carga adicionais na instalação [1, 13]. Este método de controle é também conhecido como método dissipativo.

Há outros métodos possíveis de controle da vazão, também conhecidos como métodos não dissipativos. Estes são baseados na modificação das curvas da bomba sem as mudanças na curva do sistema, isto é, modificando a geometria do rotor ou na velocidade do eixo da bomba por meio de acionadores de velocidade variável no motor elétrico podendo ser através de: (a) uso de máquinas centrífugas com geometria variável para obter diferentes curvas para rotação constante no eixo; (b) uso de acoplamento hidráulico ou eletromecânico para regular a rotação no eixo da bomba

para um motor elétrico de rotação constante e (c) uso de acionamentos elétricos de velocidade variável para regular a rotação do motor e então a rotação no eixo da bomba.

A. Comparação entre método dissipativo e método não dissipativo

As relações que permitem prever o desempenho de uma bomba trabalhando em rotações diferentes daquelas do ponto de projeto são conhecidas como relações de Rateaux [4]. Uma variação na rotação da bomba implica basicamente em três fatores importantes :

- A capacidade de vazão Q varia diretamente com a mudança da rotação n , de acordo com a expressão (1).

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n} \quad (1)$$

- A altura manométrica total H varia com o quadrado da rotação n , conforme expressão (2).

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad (2)$$

- A potência P varia com o cubo da rotação n , de acordo com a expressão (3).

$$\frac{P'}{P} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad (3)$$

Seja um dado sistema de bombeamento genérico, representado pela Figura 2, operando com vazão Q_1 e altura manométrica H_A (ponto A).

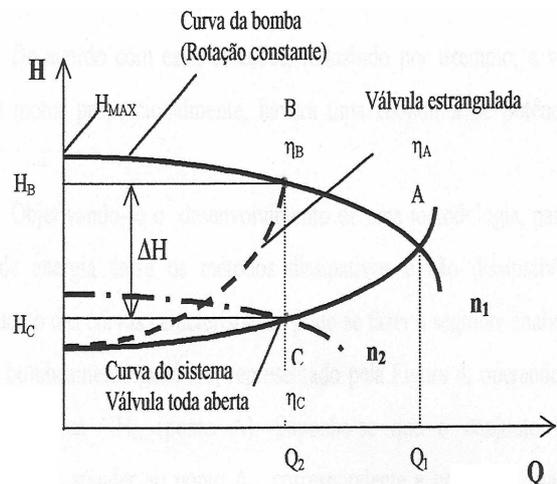


Figura 2. Curva de vazão do sistema motor-bomba: ação da válvula de estrangulamento e da variação da rotação da bomba.

Seja Q_2 a vazão desejada para a irrigação adequada da área, o sistema é especificado para produzir a vazão Q_2 na pior situação da topologia do terreno, ou seja, quando a maior altura manométrica da linha é H_B . Para isto, o conjunto motor-bomba é especificado de forma que o sistema opere no ponto A, correspondente à vazão Q_1 , no ponto de menor altura manométrica da linha, H_A , quando a válvula está totalmente aberta. Sendo Q_2 menor que Q_1 , a curva de vazão do sistema motor-bomba deve ser ajustada ao longo da linha de irrigação, a fim de manter a vazão do sistema no valor

desejado. Consideram-se duas possíveis estratégias para o ajuste da vazão: (a) o controle de vazão é realizado através de estrangulamento em uma válvula, o que resulta no novo ponto de operação em B, com vazão Q_2 e altura manométrica H_B ; e (b) o controle de vazão é feito através do controle de velocidade da bomba, o que resulta no ponto de operação C, com vazão Q_2 e altura manométrica H_C . Sendo H_B maior que H_C , verifica-se, através de (4), que, se for realizado o controle de rotação ao invés do estrangulamento na válvula, haverá economia de energia [14, 15]. A energia economizada é função da diferença $\Delta H = H_B - H_C$.

B. Método dissipativo

Modificando a curva do sistema para rotação constante pela introdução de uma válvula estranguladora, o novo ponto de operação, considerando a presença da válvula, é então o ponto B ($Q_2; H_B; \eta_B$), para o qual a potência mecânica da bomba é dada por:

$$P_B = \frac{Q_B \cdot H_B \cdot \rho \cdot g}{\eta_B} \quad (4)$$

C. Método não dissipativo

Variando-se a rotação no eixo da bomba, e conseqüentemente a curva da bomba até o cruzamento com a curva do sistema no ponto de operação desejado C ($Q_2; H_C; \eta_C$), a potência mecânica no eixo da bomba passa a ser:

$$P_C = \frac{Q_C \cdot H_C \cdot \rho \cdot g}{\eta_C} \quad (5)$$

D. Energia economizada

O valor do rendimento da bomba nos pontos B e C pode ser calculado a partir das curvas fornecidas pelos fabricantes ou através de ensaios em laboratório [16, 17]. O uso do método adotado de regulação não dissipativa resulta em redução de potência e de energia proporcionais à diferença de pressão dos pontos B e C. Testes de campo indicam não haver variação significativa entre os rendimentos da bomba nos dois pontos considerados e, portanto, adota-se $\eta_B = \eta_C = \eta$. Considera-se ainda que a vazão é mantida constante, condição necessária para atender os requisitos básicos para a irrigação adequada. Assim, $Q_B = Q_C = Q_2$. A diferença em potência é dada por:

$$P_{ECON} = P_B - P_C = \frac{Q_2 \cdot (H_B - H_C) \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad (6)$$

E a energia economizada (em kWh) no tempo de operação t (em horas), com vazão Q_2 é dada por:

$$E_{ECON} = \frac{Q_2 \cdot (H_B - H_C) \cdot \rho \cdot g}{\eta} \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Pode-se observar da Figura 2 que para mesma vazão Q_2 , a potência necessária para operação no ponto C é menor que a

necessária no ponto B, o que resulta em economia de energia.

III. SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

O sistema de controle desenvolvido utiliza informação de pressão de dois transdutores de pressão, situados nas extremidades da linha lateral, por considerar que os piores casos de pressão estão nesses aspersores. O controle consiste em atuar na velocidade de rotação da bomba de modo que a pressão do aspersor de menor pressão momentânea seja mantida próxima da pressão do regulador, garantindo uma distribuição uniforme da lâmina d'água aplicada em toda área, resultando na economia de energia elétrica nos pontos de menor altura manométrica.

Desta maneira, o controlador deverá manter a pressão de saída da bomba no menor valor possível, capaz de assegurar a vazão desejada, Q_2 , no sistema de irrigação, evitando a desnecessária dissipação de pressão nas válvulas reguladoras de vazão da linha de irrigação do sistema.

O transdutor de pressão utilizado fica localizado na entrada do regulador de pressão e, dessa forma, registra a pressão de entrada, quando a pressão que se deseja controlar é a pressão de saída do regulador. Informações de fabricantes, e experimentos de laboratório ilustrados na Figura 3, indicam que a pressão na entrada do regulador deve ser superior a 1,5 vezes a pressão nominal de trabalho, para garantir uma vazão constante na saída. Portanto, a economia de energia do sistema implementado está em utilizar a característica de saturação da válvula reguladora, fazendo com que ela trabalhe na região inicial da saturação, próximo ao ponto de pressão de entrada mínima, que garante pressão de saída constante.

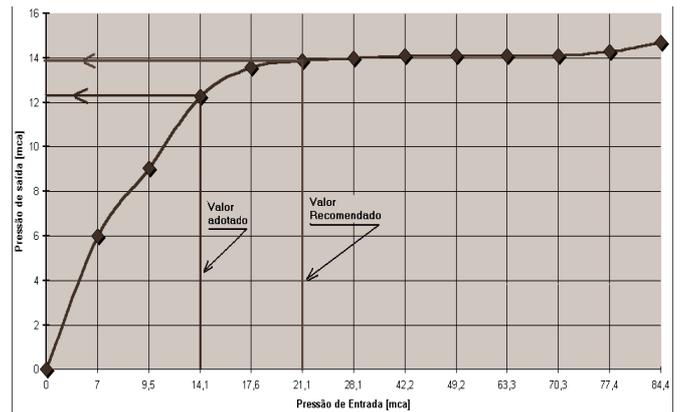


Figura 3. Comportamento de um regulador de 14 mca de pressão nominal para uma vazão constante de 2,3 m³/h.

As variáveis controladas são, portanto, a pressão A_i na extremidade interna da linha lateral e a pressão A_f na extremidade externa da linha lateral. A variável de controle é a rotação do conjunto motor-bomba, variada com o auxílio do conversor de frequência, através de sinal analógico (0-10 V ou 4-20 mA), determinado por um sistema de controle digi-

tal microprocessado baseado em microcontrolador da família 8051 da Intel.

Em sistemas de irrigação a pivô central, as variáveis controladas, em regime permanente, apresentam variações lentas de um ponto ao outro do terreno, mesmo quando considerada sua velocidade máxima. Um ciclo completo, dependendo do raio do pivô, pode durar mais de 24 horas. Desta forma, um sistema de controle do tipo proporcional ou controle proporcional integral atende satisfatoriamente os requisitos dinâmicos das variáveis controladas, mantendo o sistema estável.

A Figura 4 mostra o diagrama funcional do sistema de controle desenvolvido, que consiste basicamente em três blocos que se comunicam serialmente em modo simplex e com taxas de transmissão não convencionais de 37 bps, 1165 bps e 2330 bps. A transmissão dos sinais medidos é realizada através de transmissores e receptores operando na faixa de FM em 173,225 MHz e 433,92 MHz.

Uma vez recebidos os sinais e verificados os erros na transmissão, a CPU seleciona o valor de menor pressão e compara com o valor de referência, gerando o erro e_{k+1} e fornecendo o sinal de controle u_{k+1} , formando um controlador proporcional. A taxa de amostragem não é constante, pois ela é gerada pela própria varredura do programa fonte do controlador e pelo sincronismo na transmissão dos dados, entre os módulos transmissores e receptores, portanto o valor do período de amostragem pode variar entre 0,32 a 2,00 segundos, que é satisfatório para o comportamento dinâmico do sistema.

A. Sistema de Controle Digital

O diagrama de blocos do sistema de controle digital proposto que é constituído por:

a) Transmissor-1 – Este módulo (TX-1) é responsável pela leitura da pressão na extremidade externa (A_f). O valor da pressão em A_f é medido através do transdutor de pressão que envia um sinal proporcional de corrente (4-20mA) para um conversor A/D, que, por sua vez, digitaliza o sinal para que o microcontrolador responsável possa codificá-lo e enviá-lo via serial ao transmissor TX-2.

b) Receptor-1/Transmissor-2 (TX-2) - Este módulo é responsável pela leitura da pressão na extremidade interna (A_i). O valor da pressão em A_i é medido através do transdutor de pressão que envia um sinal proporcional de corrente (4-20mA) para um conversor A/D, e esse, por sua vez, entrega o sinal digitalizado para o microcontrolador que aguarda o envio do valor A_f , compara e verifica possíveis erros na transmissão, abortando ou montando nova codificação, juntamente com o valor de A_i . Em seguida, os sinais A_i e A_f , codificados e digitalizados, são enviados serialmente para a Unidade de Recepção, Armazenamento e Controle.

c) Unidade de Recepção, Armazenamento e Controle – Este módulo recebe, compara e verifica possíveis erros na transmissão, abortando ou não a recepção dos dados. Caso haja erro nos dados recebidos, a CPU aguarda os próximos dados, sem alterar o valor da variável de saída, caso contrário a CPU executa na rotina de controle, determinando a variável de saída, que é o valor de referência enviado ao

conversor de frequência, a fim de determinar a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba.

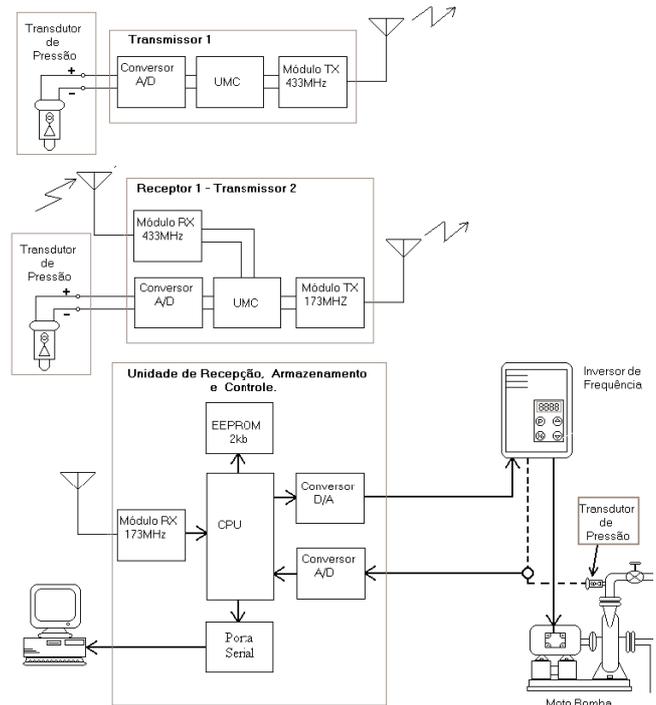


Figura 4. Diagrama funcional do sistema de monitoração, controle e automação de um sistema de irrigação com pivô central.

Na seqüência a CPU lê a entrada analógica (conversor A/D), que, juntamente com os dados A_i e A_f , são armazenados na memória. Os dados armazenados são colocados em seqüência na EEPROM do sistema, permitindo um total de 500 valores para cada variável. O período de amostragem para o armazenamento de dados poderá ser ajustado entre 1,40 segundos a 5,00 minutos aproximadamente. O sistema permite capturar os dados da memória e transferi-los para um banco de dados através da saída serial da CPU. Os módulos de controle indicados no diagrama de blocos, são microcontrolados e baseadas na arquitetura 8051 Intel. As UMC's (unidades microcontroladas) utilizam o microcontrolador AT89C2051 da Atmel operando em 3.58MHz e a CPU utiliza o microcontrolador 80C31 com 4kbytes de memória de programa e 2kbytes de memória de dados.

B. Protocolo de Comunicação Digital

Os dados são enviados pelo os transmissores com taxas de transmissão serial fora dos padrões, via simplex não sincronizada, com a finalidade de diminuir ao máximo os problemas na transmissão, devido à interferência de outros sistemas. Antes de ser enviado o dado, é formado um "pacote" constituído por 4 bytes, no caso do Transmissor TX-1 e por 6 bytes para o Transmissor TX-2 (Figura 5).

No protocolo adotado tem-se:

- O primeiro byte representa o código do transmissor, sendo 13h para o transmissor TX-1 e 17h para o Transmissor TX-2.

b) $\overline{\text{DADO}}$ é o complemento do DADO que será convertido e comparado.

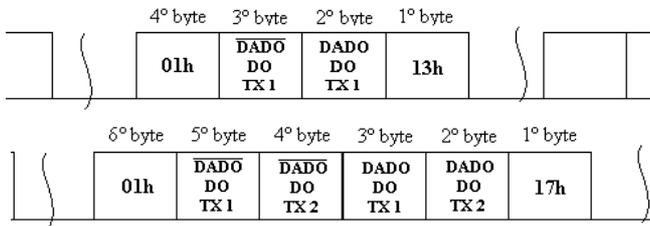


Figura 5. Protocolo de transmissão de dados do sistema.

IV. ESTIMAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA

O procedimento adotado para a obtenção do potencial de economia de energia elétrica na irrigação com pivô central tem como princípio a comparação entre um sistema automático onde a velocidade da bomba é controlada para atender as condições mínimas de pressão do projeto e um sistema onde o conjunto motor-bomba opera na velocidade nominal ao longo de todo o período de irrigação. Supõe-se ainda que o sistema de pivô central original foi projetado para operar no limite do pior caso, ou seja, não há sobrepressão na linha lateral quando a extremidade externa da linha lateral estiver no seu ponto mais alto.

O resultado da análise implementada é uma previsão conservadora da menor economia possível, pois não leva em conta que os sistemas atualmente em operação apresentam normalmente situação de sobrepressão ao longo de todo o período irrigado.

Um banco de dados foi criado, onde constam as fichas técnicas de 178 sistemas de pivôs centrais, de um total estimado de cerca de 2000 pivôs no Estado de Goiás. A partir do banco de dados, os pivôs podem ser classificados, dentre outras características, pela área irrigada (Figura 6) e pela inclinação do terreno (Figura 7). A inclinação do terreno é um fator particularmente importante porque foi verificado no início do presente trabalho de pesquisa que, para um mesmo conjunto de equipamentos, a economia de energia é maior quanto maior a inclinação do terreno. Isso se justifica pelo maior desnível entre o ponto central e o ponto mais externo, que será compensado pelo uso de acionamento de velocidade variável. Assim, a análise é feita para sistemas de pivôs centrais com diferentes graus de inclinação do terreno.

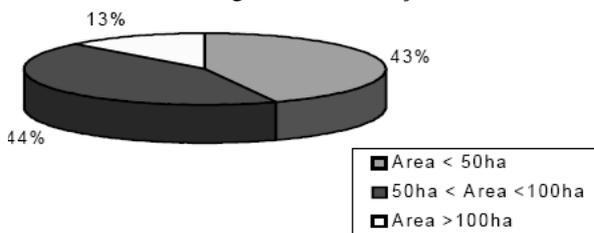


Figura 6. Distribuição de pivôs centrais pela área irrigada.

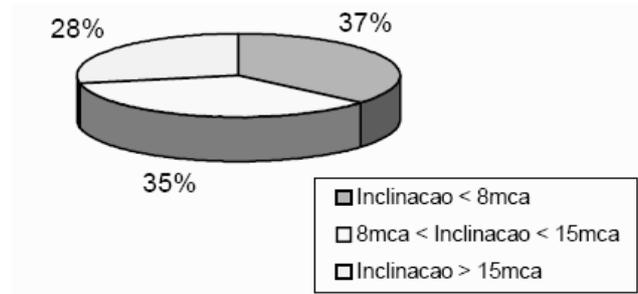


Figura 7. Distribuição de pivôs pela área de inclinação do terreno.

A Figura 6 mostra que 57% dos pivôs do Estado de Goiás irrigam áreas superiores a 50 ha. Esses pivôs são considerados, no presente trabalho, como pivôs de médio e grande porte. A Figura 7 mostra que 63% dos pivôs estão instalados em terrenos com inclinação superior a 8 mca, o que representa potencial de economia de energia elétrica, com a adoção do sistema de controle desenvolvido.

A análise dos dados e estimativa do potencial foi efetivada com a criação de um programa que usa os dados cadastrados para traçar as curvas do sistema e da bomba para a operação em condições nominais e para a operação em condições de velocidade reduzida, atendendo às condições mínimas de projeto, quanto à vazão e à pressão nos aspersores. Assim, um novo ponto de operação é determinado para cada posição do pivô ao longo da linha lateral. A mudança do ponto de operação seguindo os princípios da regulação não dissipativa implica na economia de energia esperada.

A Figura 8 ilustra o procedimento de determinação do potencial de economia.

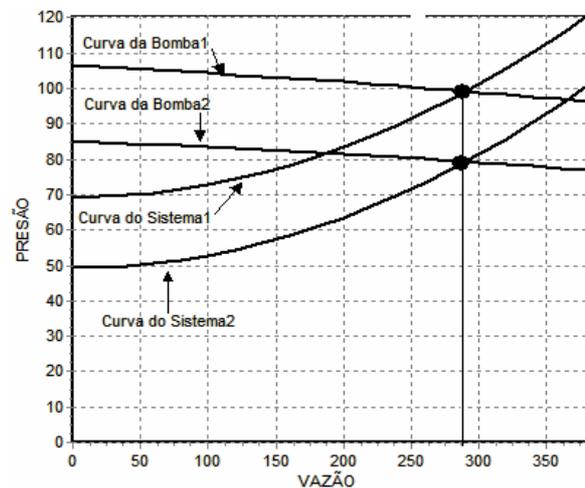


Figura 8. Curvas do sistema e do conjunto de bomba.

Na Figura 8 as curvas com sub-índice 1 representam as curvas em condições nominais, e aquelas com sub-índice 2 são para o sistema operando nas condições de alívio previstas para as regiões mais baixas do terreno. A curva da bomba é obtida a partir de dados dos fabricantes de cada bomba, sendo montado um polinômio para cada bomba. A curva do sistema, dada em (8), é obtida a partir dos dados cadastrados.

$$H_{\text{sistema}} = kQ^2 + H_G + H_{\text{pcpa}} \quad (8)$$

V. ANÁLISE DO RETORNO FINANCEIRO

A análise financeira realizada utiliza a teoria de custos para a avaliação de retornos econômicos do capital investido em serviços e equipamentos, supondo a implementação do sistema de controle descrito anteriormente.

A avaliação consiste da comparação entre os benefícios e os custos, ambos anuais. Os benefícios são calculados a partir da redução das despesas com energia elétrica resultantes do uso do sistema automático ao longo do ano. Este cálculo consiste da determinação da redução de potência produzida pelo sistema automático e da economia de energia resultante ao longo do período de funcionamento durante o ano, e ainda considerando a tarifa de energia.

Na avaliação é considerada uma taxa de juros de 16% ao ano, taxa SELIC. A vida útil considerada para os equipamentos usados, conforme fabricante, é de 15 anos. Para a análise de viabilidade econômica, objetivando a aquisição e implementação de técnica de controle eletrônico, para os sistemas considerados, utiliza-se de duas condições de implementação: (a) substituição do sistema de acionamento convencional, neste caso não se considera a recuperação de capital com a possível venda dos materiais e equipamentos substituídos e (b) implementação de projeto novo, neste caso o gasto com equipamento e mão de obra do dispositivo eletrônico, subtrai-se do gasto que se teria com a técnica de acionamento convencional.

A metodologia utilizada na determinação do retorno financeiro segue orientação do manual para elaboração do programa anual de combate ao desperdício de energia elétrica (ANEEL, 2005). Assim, a expressão (9) é usada para o cálculo da relação custo benefício (RCB).

$$RCB = \frac{\text{Custos Anualizados}}{\text{Benefícios Anualizados}} \quad (9)$$

Deve-se ressaltar que o enfoque do retorno financeiro no presente trabalho é para o usuário final do sistema de irrigação. Assim, não são considerados os custos evitados dos sistemas de transmissão e distribuição da energia elétrica.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO

A. Resultados do Sistema de Monitoramento e Controle

Foram realizados testes no sistema de irrigação com pivô central na fazenda experimental da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos (EA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), com a finalidade de avaliar o desempenho do sistema de controle implementado.

Inicialmente, os testes foram realizados na ausência do controle automático de pressão da bomba adutora. A velocidade de rotação do conjunto motor-bomba foi ajustada em aproximadamente 1750 rpm (frequência de acionamento ajustada em 60 Hz). Registraram-se os valores das pressões nos aspersores interno (A_i) e externo (A_f), possibilitando o levantamento das curvas referentes às pressões analisadas.

Durante o teste, o consumo de energia do Pivô Central foi registrado através de um analisador de energia.

A Figura 9 apresenta as pressões registradas na extremidade interna (A_i) e na externa (A_f) da linha lateral de irrigação do pivô. A linha constante indica o valor de referência da pressão, o qual corresponde ao valor nominal da pressão de trabalho da válvula reguladora de vazão do sistema. Idealmente, as pressões A_i e A_f devem estar sempre acima do valor nominal de trabalho da válvula reguladora de vazão.

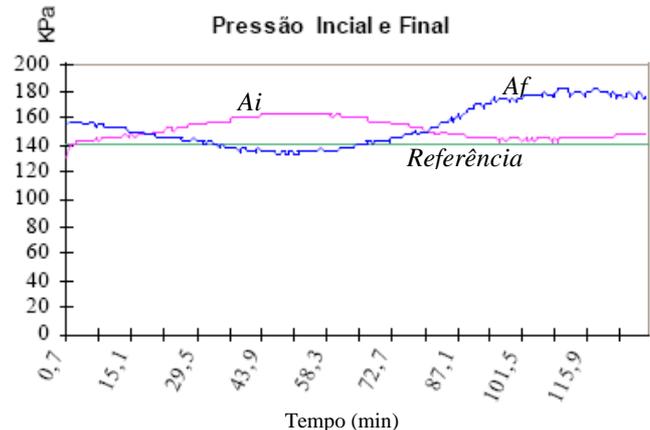


Figura 9. Pressões A_i e A_f sem controle de pressão.

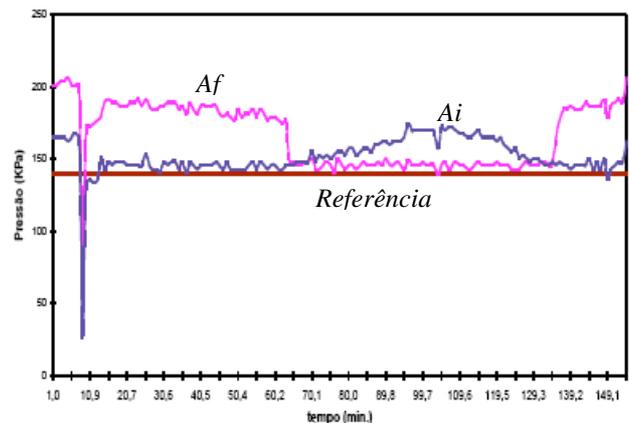


Figura 10. Pressões A_i e A_f com controle de pressão.

Posteriormente, foram realizados testes com o controle automático de pressão da bomba adutora. A velocidade de rotação do conjunto motor-bomba foi ajustada automaticamente, por meio do conversor de frequência, de modo a manter o menor valor de pressão, entre A_i e A_f , no valor mínimo de referência. Registraram-se os valores das pressões A_i e A_f nos aspersores, possibilitando o levantamento das curvas e a avaliação do desempenho do controle. Como no caso anterior, o consumo de energia do Pivô Central durante o teste foi registrado através de um analisador de energia. O resultado é mostrado na Figura 10.

A comparação das curvas apresentadas nas Figuras 9 e 10 demonstra um significativo potencial de economia de energia no caso estudado. Verificou-se, no ponto onde se mediu a maior pressão na linha lateral de irrigação do pivô, um valor de pressão superior ao valor de referência, o qual seria o valor suficiente para a operação adequada do regulador de vazão.

O consumo de energia elétrica registrado durante uma volta completa com duração de 2,5 horas, na ausência do controle de pressão, foi de 40,7 kWh.

Pressões abaixo do valor de referência foram registradas na ausência do controle automático de pressão. Após investigação no local, concluiu-se que as sub-pressões registradas, foram causadas pela manutenção deficiente do sistema de irrigação. Na inspeção do sistema, identificou-se desgaste no rotor da bomba adutora, desgaste nos reguladores de vazão, pequenos vazamentos na parte aérea e na tubulação adutora, e o estrangulamento de um trecho da tubulação adutora, provocada pelo trânsito de veículos agrícolas.

A análise do sistema operando sob controle em malha fechada indica a viabilidade na aplicação da metodologia proposta, pois os resultados obtidos em teste demonstram a correção na perda de pressão apresentada no ponto de maior altura manométrica [10]. Após o período transitório inicial, o controlador manteve, ao longo da área irrigada, a pressão próxima ao valor de ajuste (140 kPa). Durante a volta do pivô, a frequência do conversor de frequência variou na faixa de 47 Hz a 54 Hz. Destaca-se que em nenhum momento o conversor operou com frequência de 60 Hz, o que indica o sobre-dimensionamento da bomba adutora. Neste caso, haveria condições adequadas para obtenção de economia de energia, mesmo com terreno plano.

Observou-se que na faixa de 36 a 66 minutos ocorre um aumento da frequência de acionamento do conjunto motor-bomba, compensando a queda de pressão observada na Figura 9. Observou-se também que o controle não precisou acionar a bomba adutora com frequência de 60 Hz, para recuperar a perda de pressão produzida pela manutenção deficiente do sistema. Constata-se que, mesmo não estando em condições ideais, o sistema estudado apresentava potencial para economia de energia, a partir do controle da velocidade de rotação da bomba adutora.

A potência média consumida registrada durante uma volta completa foi 36,1kWh, representando uma economia de energia elétrica de 11,3%. Este resultado comprova a viabilidade de aplicação do controle proposto. Testes foram realizados após manutenção corretiva do sistema de irrigação e a economia registrada foi de 22%.

B. Resultados da Estimação do Potencial de Economia

O uso do programa de estimação desenvolvido, juntamente com os dados técnicos dos pivôs centrais foi utilizado na estimação do potencial de 14 sistemas de pivôs centrais. Foram escolhidos sistemas numa faixa ampla de inclinação de terreno, de forma que a influência da inclinação na economia de energia pudesse ser evidenciada. As curvas das bombas desses sistemas foram levantadas a partir de informações de fabricantes. A Tabela I mostra o resultado da análise desenvolvida.

A linha 14 da Tabela I representa a simulação para um pivô instalado no município de Santa Izabel de Goiás, onde foi medido o consumo de energia elétrica para uma volta completa do círculo irrigado. O consumo medido foi de 2829,37 kWh para operação nominal e de 2501,28 kWh para operação com rotação reduzida, o que representou uma economia

de 328,09 kWh, ou seja, 11,60 %. O valor estimado para esse mesmo caso, a partir dos dados de projeto, foi de 11,98%, o que representa uma diferença de 3,20% do valor estimado para o valor efetivamente medido.

TABELA I

Percentual de Economia Estimada			
Pivô	H (mca)	Potência/área (cv/ha)	Economia (%)
1	9,46	1,39	14,77
2	12,18	1,87	12,05
3	7,00	2,76	5,45
4	0,50	1,98	0,54
5	2,00	1,45	2,98
6	19,91	2,51	20,05
7	6,92	4,37	6,68
8	6,00	1,57	10,91
9	15,20	2,20	14,83
10	12,94	3,45	10,21
11	17,00	1,60	10,82
12	16,77	2,09	16,86
13	3,63	10,29	6,52
14	16,00	2,04	11,98

A menor economia estimada foi de 0,54 % para um pivô cuja diferença de altura manométrica era 0,5 mca, entre o ponto central do pivô até a extremidade externa. A maior economia estimada foi de 20,05% para uma diferença de 19,91 mca.

C. Resultados do Retorno Financeiro

Foram realizados orçamentos do preço de mercado do conversor de frequência e dos quadros de acionamento convencionais e mão de obra. Foram estimados os custos da mão de obra e dos acessórios para viabilidade do controle eletrônico. O resultado das simulações implementadas é mostrado na Tabela II para os 14 pivôs escolhidos.

TABELA II

Retorno Financeiro da Implantação do Sistema					
Pivô	Potência do motor (cv)	Potência do Conversor de frequência (cv)	Preço de mercado do conversor (R\$)	Retorno financeiro	
				Meses	Anos
1	40	40	6.600,00	10,8	2
2	50	50	8.210,00	11,8	3
3	200	200	27.116,00	14,5	3
4	250	250	33.540,00	128,7	8
5	150	150	21.030,00	29,2	4
6	175	175	23.678,00	3,9	2
7	125	125	18.265,00	14,1	3
8	60	75	12.502,00	13,8	3
9	125	125	16.265,00	6,2	2
10	250	250	33.540,00	7,3	2
11	350	350	39.821,00	5,6	2
12	125	125	18.265,00	5,5	2
13	25	25	5.090,00	7,5	2
14	175	175	23.678,00	7	2

A Tabela II mostra que, para a maior parte dos sistemas analisados, o tempo de retorno financeiro é de 2 ou 3 anos, o que pode justificar o investimento. A Figura 11 mostra a tela de resultado do programa desenvolvido para a análise do retorno financeiro. O cruzamento da curva de retorno financeiro (RCB) com a unidade indica a quantidade de horas de operação a partir do qual começa a haver retorno do investimento. Esse tempo é mostrado também em meses e em anos.



Figura 11. Tela de saída do programa de retorno financeiro

VII. CONCLUSÕES

A prática de projeto e instalação de sistemas de irrigação com pivô central é dimensionar o sistema para o ponto de operação menos favorável. Ou seja, a bomba adutora é dimensionada para atender o maior desnível do terreno. Nos pontos de menor desnível, cabe à válvula reguladora dissipar a pressão excedente, com o objetivo de evitar o excesso de vazão, que seria prejudicial à cultura. Embora largamente empregada, e funcional, esta prática gera significativo desperdício de energia elétrica. Existe um relevante potencial de economia de energia elétrica a ser obtido com a automatização do controle de pressão em sistemas de irrigação com pivô central. Este potencial de economia de energia é favorecido pela topografia irregular da área irrigada, ou seja, quanto maior a variação das cotas ao longo do perímetro irrigado, maior será o potencial de economia de energia.

O trabalho apresentou uma metodologia para automatização de sistemas de irrigação com pivô central, baseada no acionamento do conjunto motor-bomba por conversor de frequência, que é um equipamento tradicionalmente encontrado no mercado de conversores eletrônicos de potência.

O sistema apresentado efetivamente resulta em economia de energia elétrica, mantendo o bom desempenho nos sistemas de irrigação. O sistema foi implementado e testado no sistema de irrigação da fazenda experimental da UFG, tendo apresentado resultados que comprovam a sua validade.

O trabalho apresentou também uma metodologia para determinação do potencial de economia de energia elétrica dos sistemas de pivô central a partir das características do sistema e da bomba adutora. A partir das simulações verifica-se

que o potencial médio economia dos pivôs analisados é de 10,81% para uma altura manométrica média de 10,49 mca.

O sistema de controle em malha fechada é viável em diversos tipos de terreno, e estados de conservação do sistema de irrigação, no entanto o ganho em energia elétrica é proporcional ao desnível entre o ponto de maior e menor elevação, e ao bom estado de conservação do sistema.

A análise da topografia do terreno e a avaliação das condições de funcionamento do sistema hidráulico do equipamento são etapas necessárias para estabelecer o potencial de economia de energia elétrica através da automatização de sistemas de irrigação com pivô central.

O sistema implementado, ao melhorar o desempenho do sistema de irrigação, mostrou também ser capaz de propiciar economia de água e melhorar o aproveitamento dos recursos hídricos. Este assunto merece melhor estudo, inclusive considerando parâmetros agrícolas na sua avaliação.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa da UFG (FUNAPE) pelo apoio administrativo do projeto e as contribuições de R. A. Borges e H. M. Ayres.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Bernardo, *Manual de irrigação*, 5 ed. Viçosa-MG, UFV, 596p., 1989.
- [2] Relatório da AGÊNCIA RURAL/CELG.
- [3] A. J. Alves, *Inversor de Frequência – Uma ferramenta para o acionamento e racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central*, Dissertação de Mestrado, Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação Universidade Federal de Goiás, 2001.
- [4] A. J. Alves, L. F. C. de Oliveira, A. M. de Oliveira, *Verificação das relações de Rateaux pelo Emprego de um Inversor de Frequência*, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 3, p. 523-525, 2002.
- [5] L. A. M. Masiero et alli, *Utilização de Inversores de Frequência para Racionalização do uso da Energia Elétrica em Sistema de Irrigação do Tipo Pivô Central*, Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 7, n.1, Jan/Mar., 1999, pp. 35-45.
- [6] S. Campana et alli, *Inversores de Frequência - Uma alternativa para Racionalização do uso da Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação Pivô Central*, AGRENER 2000, 3o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, São Paulo, 12-15, Setembro 2000.
- [7] D. Oliveira Filho et alli, *Estudo do Comportamento de Parâmetros Elétricos e Hidráulicos em Sistema de Irrigação tipo Pivô Central Utilizando Inversores de Frequência para Racionalização do uso da Energia Elétrica*, AGRENER 2000, 3o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, São Paulo, 12-15 Setembro 2000.
- [8] J. A. Carvalho et alli, *Utilização do Inversor de Frequência em Sistemas de Irrigação para Controle de Va-*

- ção, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n.1, pp. 51-56, 2000.
- [9] F. Cendes, *Proposta de Automação de Sistemas de Irrigação com Pivô Central Baseados em Microprocessadores*, Dissertação de Mestrado, Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, 2004.
- [10] F. Cendes, J. W. L. Nerys, A. M. Oliveira e E. G. Marra, *Automação de Sistemas de Irrigação com Pivô Central Baseados em Microprocessadores*, 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin América, São Paulo – Brazil, November, 2004.
- [11] A. M. M. Medeiros, *Potencial de Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação a Pivô Central com Uso de Inversor de Frequência no Estado de Goiás*, Dissertação de Mestrado, Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, 2005.
- [12] A. M. M. Medeiros, J. W. L. Nerys, A. M. Oliveira, E. G. Marra e L. F. C. Oliveira, *Potencial de Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação Tipo Pivô Central*, XV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2004, Gramado, RS, 2004.
- [13] A. F. L. Olitta, *Os métodos de irrigação*, Nobel, São Paulo, 1ed., p.267, 1989.
- [14] B. Hanson, C. Weigand e S. Orloff, *Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives*, Journal of irrigation and drainage engineering, New York, V.122, n.3, p.179-182, 1996.
- [15] F. G. L. Tiago, *Uso de bombas com rotação variável*, Mimeografado, Itajubá, EFEI, p.19, 1996.
- [16] H. G. Arens e R. M. Porto, *Para o desempenho de bombas*, Revista DAE, São Paulo, V.49, n11-14, 1989.
- [17] T. Yanagi Jr, E. Ferreira, A. Colombo e C. R. Mello, *Método matemático para a estimativa analítica das curvas de desempenho de bombas centrífugas*. Revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras, V.21, n.4, p.484-490, 1997.
- [18] ISO 10522: Agricultural irrigation equipment - Direct-acting pressure-regulating valves. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 12 p., 1993.