

CONVERSOR DE FREQUÊNCIA APLICADO NA EFICIENTIZAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL

José Wilson L. Nerys¹, Enes G. Marra¹, Antônio Melo de Oliveira¹, Antônio Marcos de M. Medeiros², Flávio Cendes¹, Lourenço Matias¹, Aylton J. Alves³, Luiz Fernando C. de Oliveira²

Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento de Energia e Qualidade

¹ Escola de Eng. Elétrica e de Computação

² Escola de Agronomia e Engenharia de

³ Centro Federal de Educação

UFG, CEP 74001-970, C.P. 131

Alimentos - UFG

Tecnológica de Goiás – CEFET-GO,

Goiânia – GO, Brasil

Goiânia – GO, Brasil

Goiânia – GO, Brasil

e-mail: jwilson@eee.ufg.br, enes@eee.ufg.br, melo@eee.ufg.br, amarcosmedeiros@yahoo.com.br

Resumo - O presente trabalho tem por objetivos apresentar uma metodologia para controle automático de sistemas de irrigação do tipo pivô central que resulta em economia de energia elétrica e uma metodologia de estimação do potencial desta economia nesses sistemas, a partir das características topográficas e elétricas, e com a aplicação do sistema de controle automático desenvolvido. O sistema automático de controle usa informações de pressão nas extremidades da linha lateral para controlar, através de conversores de frequência, a velocidade de rotação da bomba de recalque responsável pela captação de água.

Palavras-Chave – Controle Automático, Conversor de Frequência, Eficiência Energética, Pivô Central, Sistemas de Irrigação.

FREQUENCY CONVERTER APPLIED FOR EFFICIENT USE OF CENTRAL PIVOT IRRIGATION SYSTEMS

Abstract – The aims of this work are to present a methodology for automatically controlling central pivot irrigation systems, which results in electrical energy saving and a methodology for estimating the electrical saving potential of these systems, from their physical and electrical characteristics, supposing the use of the implemented automatic control. The automatic control system makes use of information about the water pressure at the lateral line for controlling, through frequency converters, the rotation speed of the water pump.

Keywords – Automatic Control, Frequency Converter, Central-Pivot Irrigation System.

NOMENCLATURA

Q	Vazão (m^3/s).
η	Rendimento da bomba.
P	Potência da bomba (W).

Artigo submetido em 26/05/2006. Revisado em 14/08/2006.
Aceito por recomendação dos editores da Seção Especial
José Antenor Pomilio e Andrés Ortiz Salazar.

g	Aceleração da gravidade, $9,81 m/s^2$.
ρ	Massa específica da água, $1000 kg/m^3$.
P_{ECON}	Potência economizada (W).
E_{ECON}	Energia economizada (kWh).
H	Altura manométrica (mca)

I. INTRODUÇÃO

O conversor de frequência é um equipamento já consolidado no mercado e que tem sido largamente utilizado em aplicações que necessitam de variação de velocidade de motores de indução. O presente trabalho apresenta uma aplicação para esse equipamento que resulta em economia de energia em sistemas de irrigação do tipo pivô central.

O sistema de irrigação do tipo pivô central é um dos dois principais sistemas empregados na irrigação por aspersão mecanizada; o segundo tipo é o autopropelido. Ambos são empregados para irrigação de áreas de pequeno, médio e grande porte com facilidade de implementação e manejo da irrigação [1].

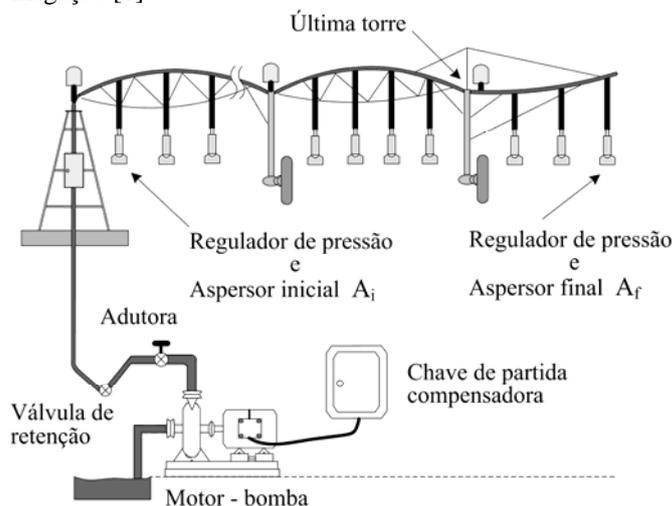


Fig. 1. Sistema típico de irrigação por aspersão tipo pivô central.

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, denominada linha lateral, onde se situam os aspersores responsáveis pela irrigação. A tubulação aérea é conectada a um ponto central fixo, de um modo tal que permita a sua rotação, resultando numa área irrigada circular.

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 de reguladores de pressão para a obtenção do nível mais adequado de vazão para cada ponto de uma área irrigada. Reguladores de pressão são dispositivos conectados nos pontos de saída de água, em cada um dos aspersores (Figura 1), e são responsáveis por manter uma pressão de saída constante, e conseqüentemente uma vazão constante, numa larga faixa de pressão interna da tubulação.

O princípio de operação do regulador de pressão consiste em limitá-la na saída em um valor nominal (saturação da pressão de saída), sempre que seu valor de entrada for superior ao nominal de operação. Portanto, esta é uma técnica que dissipa energia, uma vez que perda de pressão resulta em perda de potência. A mesma redução de pressão para o valor nominal de trabalho do regulador pode ser alcançada com a redução da rotação da bomba adutora, sem prejuízo da vazão desejada.

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 melhorada pela adequação da vazão e pressão, usinagem de rotores das bombas e redução das perdas por evaporação e derivação devido ao vento [3, 4]. Um outro ponto relevante é o sobre-dimensionamento do motor causado por folgas de projeto e pelo fato das potências calculadas não serem normalmente encontradas no mercado, forçando a escolha de um motor maior que o dimensionado.

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, 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 da bomba de recalque 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 instalados hoje no Estado de Goiás operam com sobrepressão. Desta forma, os aspersores operam com pressão bem acima da pressão nominal, o que resulta em desperdício de energia elétrica por dimensionamento inadequado. É evidenciado, no entanto, que mesmo os sistemas que foram bem dimensionados apresentam sobrepressão 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 a linha lateral move-se para uma nova posição, um aspersor que anteriormente operava no ponto mais alto (maior altura manométrica) passa a operar em uma região de menor altura manométrica. Ocorre assim uma sobrepressão na linha lateral, que precisa ser compensada de modo dissipativo ou não dissipativo [3, 10-12].

II. METODOLOGIA

Nos processos de irrigação a pivô central, a distribuição de pressão ao longo da linha lateral varia de acordo com as condições topográficas e as exigências do manejo da cultura. Quando é necessário alterar a vazão em um sistema de irrigação no qual se utilizam técnicas convencionais, a prática usual é a utilização de válvula de gaveta e reguladores de pressão, que provocam modificação da curva do sistema devido à introdução de perdas adicionais de carga 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 da curva da bomba sem as mudanças na curva do sistema. Isso pode ser feito através de: (a) uso de máquinas centrífugas com diferentes geometrias de rotor, 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 acionadores 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).

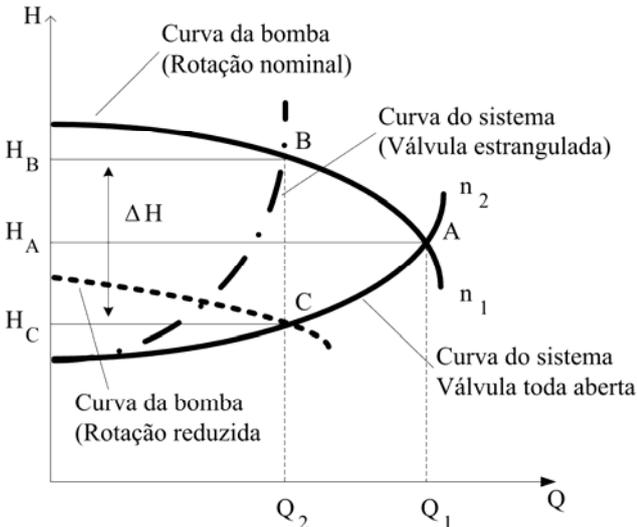


Fig. 2. Curva de vazão do sistema motor-bomba: ação da válvula de estrangulamento e da variação da rotação da bomba.

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

• 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).

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

Considere um dado sistema de bombeamento genérico, representado pela Figura 2, operando com vazão Q_1 e altura manométrica H_A (ponto A) e seja Q_2 a vazão desejada para a irrigação de uma determinada área. Considere ainda que H_B representa o ponto de maior altura manométrica do terreno.

Sendo Q_2 a vazão desejada, então o sistema é especificado para produzi-la na pior situação da topologia do terreno, ou seja, para a altura manométrica H_B . Ao se atender a condição do ponto de maior altura manométrica, força-se os outros pontos do sistema, de menor altura, a operarem com sobrepessão, necessitando da atuação dos reguladores de pressão, de forma a garantir uma vazão de saída Q_2 em todos os aspersores. Assim, para atender à condição de vazão Q_2 , o ponto de operação deve ser deslocado de A, com vazão Q_1 e altura manométrica H_A , para o ponto B ou ponto C, ambos com vazão Q_2 . O deslocamento para o ponto B ocorre quando o controle de vazão é realizado através de estrangulamento em uma válvula, o que resulta em vazão Q_2 com altura manométrica H_B ; nesse caso foi alterada a curva do sistema. Quando o controle de vazão é feito através do controle de velocidade da bomba, resulta no ponto de operação C, com vazão Q_2 e altura manométrica H_C . Nesse caso houve alteração da curva da bomba.

Sendo H_C menor que H_B , verifica-se, através de (4) e (5), que, se for realizado o controle de rotação ao invés do estrangulamento na válvula, a potência necessária para operação no ponto C será menor que a necessária no ponto B,

resultando em 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 da bomba, 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:

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

III. SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

O sistema de controle desenvolvido utiliza informação de pressão de dois transdutores, 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 nominal do regulador, garantindo uma distribuição uniforme da lâmina d'água aplicada em toda a área irrigada e 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.

Um ponto a ser observado é a pressão no extremo da tubulação na parte de maior desnível, pois esta deverá estar acima do valor mínimo da pressão em que deve ser aplicado para o bom funcionamento do regulador de pressão, indicado pelo fabricante e respeitando a norma ISO 10522-1993 [18]. Neste momento, conforme demonstra a Figura 3, vale ressaltar que a pressão na entrada do regulador deve ser superior a 1,5 vezes a pressão nominal de trabalho, para garantir uma vazão constante. Destaca-se, ainda, na Figura 3, que a economia de energia está em utilizar a característica de saturação da válvula reguladora, fazendo com que ela trabalhe na região inicial da saturação (ponto de joelho), próximo ao ponto de pressão de entrada mínima que garante pressão de saída constante.

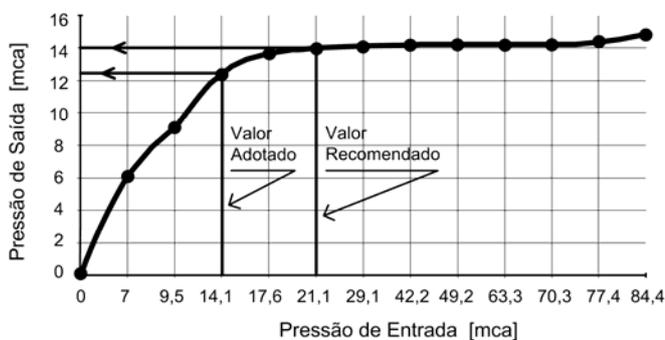


Fig. 3. Comportamento de um regulador de 14 mca de pressão nominal para uma vazão constante de 2,3 m³/h.

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 digital 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 433,92MHz.

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. Desta forma, o valor do período de amostragem pode variar entre 0,32 a 2,00 segundos, que é satisfatório para o comportamento dinâmico do sistema.

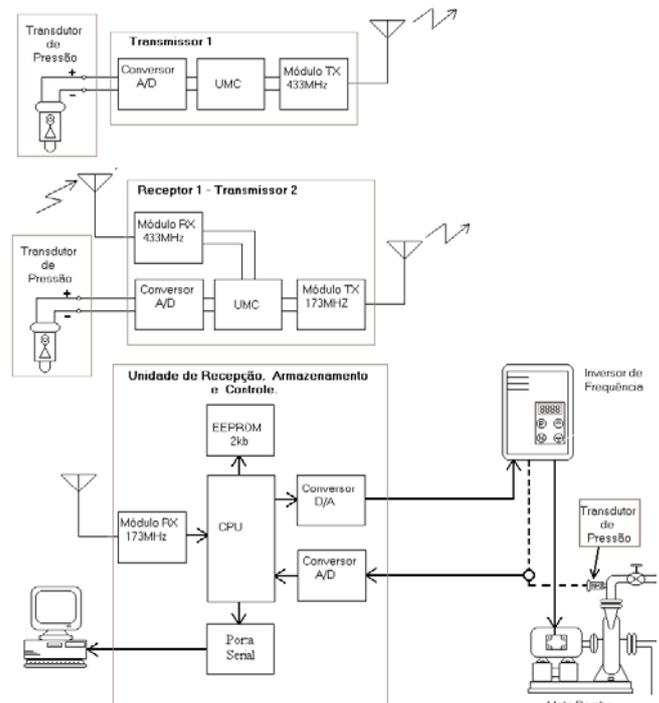


Fig. 4. Diagrama funcional do sistema de monitoração, controle e automação de um sistema de irrigação com pivô central.

A. Sistema de Controle Digital

O diagrama de blocos do sistema de controle digital proposto 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 (4-20 mA) para um conversor A/D, que, por sua vez, digitaliza o sinal para que o microcontrolador responsável possa codificá-lo e enviá-lo serialmente 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 estado da 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.

Na seqüência a CPU lê a pressão de saída da bomba de recalque (entrada analógica obtida via 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 baseados na arquitetura 8051 Intel. As UMCs (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).

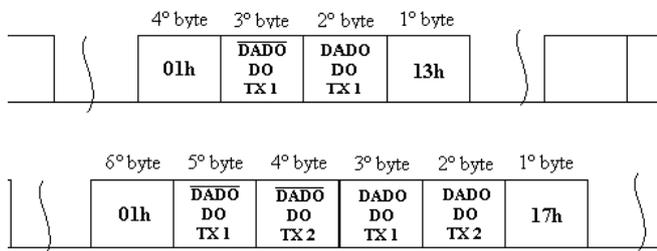


Fig. 5. Protocolo de transmissão de dados do sistema.

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

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.

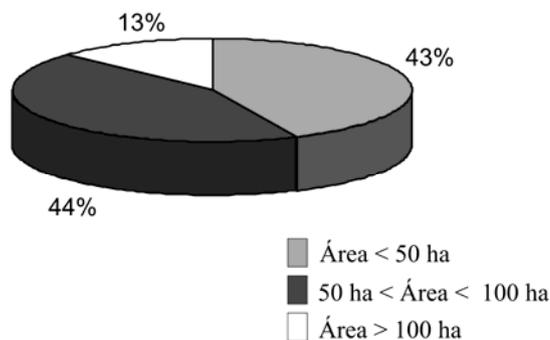


Fig. 6. Distribuição de pivôs centrais pela área irrigada.

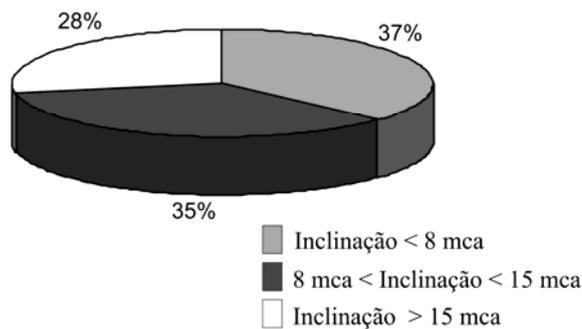


Fig. 7. Distribuição de pivôs pela área inclinação do terreno.

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 estimação 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. Na figura, 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.

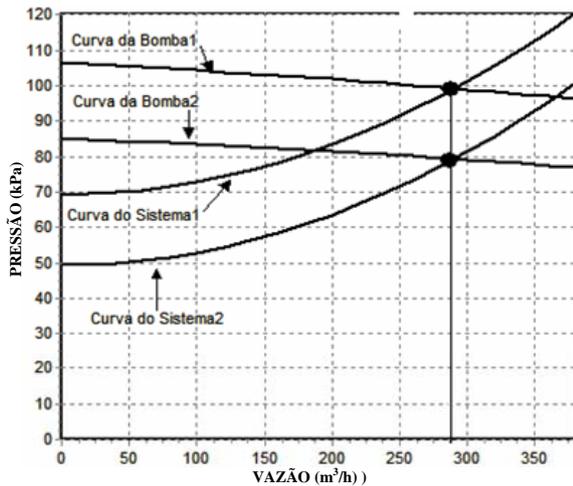


Fig. 8. Curvas do sistema e do conjunto de bombas.

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 $H_{sistema}$ é obtida a partir dos dados cadastrados e obedece à expressão (8):

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

Onde H_{pcpa} é a altura manométrica do centro do pivô ao ponto mais alto, H_G é a altura manométrica correspondente às perdas de carga no sistema e k uma constante que depende dos parâmetros da tubulação de recalque do sistema.

V. 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 sem controle de rotação da bomba. 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.

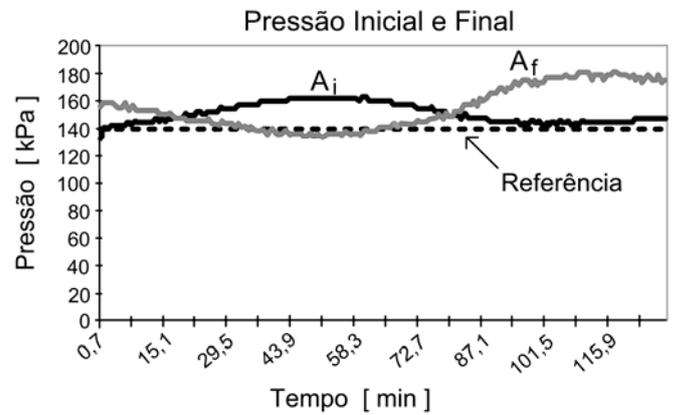


Fig. 9. Pressões A_i e A_f sem controle de pressão.

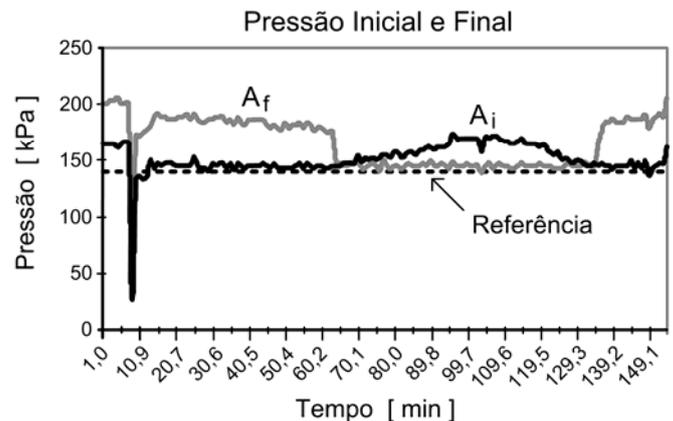


Fig. 10. Pressões A_i e A_f com controle de pressão.

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 em A_i ou em 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.

O sistema inicia sua operação sem o controle de rotação da bomba. Em 11 minutos, o controle de rotação é iniciado, produzindo uma redução transitória na pressão. Durante sua operação, o controlador manteve a pressão próxima ao valor de ajuste (140 kPa) ao longo da linha lateral. 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.

Observa-se ainda na Figura 10 que, no intervalo de 10 a 65 minutos, a pressão na extremidade interna A_i é a variável controlada, mantida em seu valor nominal, o que indica que a linha lateral encontra-se na região mais baixa da área irrigada, fazendo com que a pressão na extremidade externa A_f assuma valores acima do nominal. No intervalo de 65 a 130 minutos verifica-se que a pressão A_f passa a ser a variável controlada, mantida no valor nominal. Neste ponto de operação, a linha lateral encontra-se na região mais alta da área irrigada. O controle de pressão sempre atende aos requisitos do aspersor localizado no ponto de maior altura manométrica para o recalque (seja A_f ou A_i). Tratando-se de uma única tubulação e uma única bomba adutora, a pressão deve ser controlada em apenas um dos aspersores.

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]. A energia consumida registrada durante uma volta completa foi 36,1 kWh, representando uma economia de energia elétrica de 11,3%. Este resultado comprova a viabilidade de aplicação do controle proposto. Após manutenção corretiva do sistema de irrigação foram realizados novos testes que indicaram economia de energia de 22%.

B. Resultados da Estimação do Potencial de Economia

Um programa de estimação de economia foi desenvolvido e utilizado na estimação do potencial para 14 sistemas de pivôs centrais com base nos seus dados técnicos. 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.

VI. 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 com o emprego de conversores de frequência no acionamento do motor da bomba adutora. 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 e eliminando também o desperdício causado pelo sobre-dimensionamento do motor. O sistema foi implementado e testado na fazenda experimental da UFG e em uma fazenda no município de Santa Izabel de Goiás. Os

resultados obtidos atestam a validade da metodologia proposta.

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 verificase que o potencial médio de economia nos 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 das instalações hidráulicas 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Energética São Patrício (CHESP) e à Companhia Energética de Goiás (CELG) pelo financiamento da pesquisa. Agradecem ainda à Fundação de Apoio à Pesquisa da UFG (FUNAPE) pelo apoio administrativo ao projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Bernardo, *Manual de irrigação*, 5 ed. Viçosa-MG, UFV, 596p., 1989.
- [2] EMATER-GO/CELG, “Estado de Goiás: Diagnóstico da Situação dos Equipamentos Tipo Pivô Central”, Relatório, Goiânia, 1996.
- [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 Râteaux 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 Vazão”, *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, 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.

DADOS BIOGRÁFICOS

José Wilson Lima Nerys, nascido em 1961 em Conceição do Araguaia, PA, é licenciado em Física (1983), pela Universidade Católica de Goiás, engenheiro electricista (1985), pela Universidade Federal de Goiás (UFG), mestre em Engenharia Elétrica (1993), pela Universidade Federal de Uberlândia e doutor em Engenharia Elétrica (1999) pela

Universidade de Leeds, Inglaterra. É professor na UFG desde 1986. Suas áreas de interesse são: acionamentos elétricos, qualidade do processamento da energia elétrica, sistemas de controle eletrônicos e fontes renováveis de energia. É membro do PEQ/UFG (Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento da Energia e Qualidade) e da SOBRAEP.

Enes Gonçalves Marra, nascido no Brasil em 1966, graduou-se engenheiro eletricitista (1988) e mestre em Engenharia Elétrica (1993) pela Universidade Federal de Uberlândia, e doutor em Engenharia Elétrica (1999) pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). É professor na Escola de Engenharia Elétrica e de Computação (EEEC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia (GO), desde 1993. Suas áreas de interesse estão relacionadas com a aplicação de Eletrônica de Potência em acionamento elétrico e em fontes renováveis de energia. É membro do PEQ/UFG (Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento da Energia e Qualidade), da SOBRAEP e da SBA.

Antonio Melo de Oliveira, nascido em 1955, obteve os títulos de Bacharel, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica, respectivamente pela Universidade Federal de Pernambuco (1980), Universidade Estadual de Campinas (1985) e Universidade de São Paulo (1993). Trabalhou como Engenheiro Sênior na Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN/S de dezembro/83 a maio/94, onde participou do desenvolvimento do acionamento elétrico das ultracentrífugas para enriquecimento de urânio. Desde 1994 atua como professor da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, onde foi diretor de abril de 2002 a abril de 2006. É membro do Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento da Energia Elétrica e Qualidade (PEQ).

Antônio Marcos de Melo Medeiros, natural de Ceres, Goiás, obteve o título de engenheiro eletricitista (2001) e mestre em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Federal de Goiás. É doutorando em Engenharia Agrícola, área de concentração em Água e Solos pela Universidade

Federal de Goiás. Área de interesse: acionamentos elétricos e aplicações de microcontroladores.

Flávio Cendes obteve os títulos de engenheiro eletricitista (1992) e Mestre em Engenharia Elétrica (2004), pela Universidade de Mogi das Cruzes e pela Universidade Federal de Goiás, respectivamente. Entre 1992 e 1994, atuou na área de instalação e manutenção de sistemas de irrigação com pivô central. Desde 1994 é Professor do SENAI-DR em Goiás, tendo atuado como coordenador de área, coordenador de curso, auditor de qualidade e instrutor em diversos cursos. Suas áreas de atuação profissional estão relacionadas com a automação de processos industriais.

Lourenço Matias, nascido em 1963, graduou-se engenheiro eletricitista (1990) pela UNESP – Ilha Solteira, Mestre em Engenharia Elétrica (1994) pela Universidade Federal de Uberlândia e Doutor em Engenharia Elétrica (2004) pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). É professor na Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da UFG desde 2004. Suas áreas de interesse são: aplicações de eletrônica de potência e acionamentos elétricos. É membro do PEQ/UFG e da SOBRAEP.

Aylton José Alves obteve os títulos de engenheiro eletricitista e Mestre em Engenharia Elétrica (2001), pela Universidade Federal de Goiás. É professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás – CEFET-GO. Área de interesse: acionamento elétrico e aplicações de microcontroladores.

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, natural de Pouso Alegre, MG, é graduado em Engenharia Agrícola (1986) e Mestre em Engenharia Agrícola área de concentração em Irrigação e Drenagem (1992) pela Universidade Federal de Lavras e Doutor em Engenharia Agrícola área de concentração em Irrigação e Drenagem pela Universidade Federal de Viçosa (1994). É professor da Universidade Federal de Goiás desde 1997. Já ocupou os cargos de coordenador do programa de pós-graduação em Agronomia da UFG.