

O USO DA ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

PAULO HENRIQUE C. PEREIRA¹, ALBERTO COLOMBO², GIOVANNI FRANCISCO RABELO².

1. *Departamento de Mecatrônica, CEFET/MG – Campus Varginha
Av. Imigrantes, 1.000 – Bairro da Vargem – Varginha/MG – CEP:37.022-560
E-mail: paulovga@varginha.cefetmg.br*

2. *Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras
Campus Universitário – Lavras/MG – CEP: 37.200-000
E-mails: acolombo@deg.ufla.br, rabelo@deg.ufla.br*

Abstract— This work describes the possibility of the use of Programmable Logic Controller (PLC) in set with Variable Drive Frequency (VDF), in systems of irrigation for central pivot, with the objective to increase the use of the efficiency of the electric energy, using nets Modbus-RTU, Zigbee and Compobus®, for communication between the equipment. The increase of the consumption of the electric energy in the agricultural way this directly associated with the technological development of agriculture is known that. Therefore the modern job techniques that optimize the rational use of the electric energy is basic in all the fields. The experiment was conducted on the campus of the Federal University of Lavras - UFLA within the Ph.D. program in Agricultural Engineering, resulting in a 19% reduction in power consumption of the system.

Keywords— Controlled Irrigation, Efficiency Power, Irrigation System, Intelligent Automation.

Resumo— Este trabalho descreve a possibilidade do uso de Controlador Lógico Programável (CLP) em conjunto com um inversor de frequência, em sistemas de irrigação por pivô central, com o objetivo de aumentar o uso da eficiência da energia elétrica, utilizando redes Modbus-RTU, ZigBee e CompoBus®, para comunicação entre os equipamentos. O aumento do consumo de energia elétrica no meio rural esta diretamente associada com o desenvolvimento tecnológico da agricultura. Portanto, as técnicas modernas de trabalho que otimizam o uso racional da energia elétrica é fundamental em todos os campos. O experimento foi conduzido no campus da Universidade Federal de Lavras - UFLA dentro do programa de doutorado em Engenharia Agrícola, resultando em uma redução de 19% no consumo de energia elétrica do sistema.

Palavras-chave— Irrigação Controlada, Eficiência Energética, Sistema de Irrigação, Automação Inteligente.

1 Introdução

O aumento do consumo da energia elétrica no meio rural esta diretamente associada com o desenvolvimento tecnológico da agricultura. Como a oferta de energia elétrica é limitada, torna-se necessário incentivar o uso mais eficiente da energia elétrica no meio rural.

No meio rural, os sistemas de irrigação do tipo pivô central são responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica. A energia consumida nestes sistemas é em sua quase exclusivamente dirigida para o acionamento do conjunto moto-bomba. Uma utilização mais racional da energia consumida pelos conjuntos moto bombas pode ser obtida através da adoção de práticas adequadas de projeto e manejo destes sistemas de irrigação.

A viabilidade econômica do uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central foi demonstrada em diversos estudos. No entanto, apesar da necessidade de aumentar a eficiência do uso da energia elétrica disponível e das vantagens comparativas de algumas áreas irrigadas do Brasil, o incremento esperado na utilização destes equipamentos em sistemas de irrigação do tipo pivô central não tem sido observado.

Nos sistemas de irrigação, por pivô central, o uso de inversores de frequência deve ser incentivado porque as unidades de bombeamento destes sistemas são geralmente dimensionadas para atender a máxima demanda de potência. Desta forma, estes sistemas apresentam condições potenciais para se obter uma redução substancial no consumo de energia elétrica através do uso de inversores de frequência.

No momento, três fatores contribuem para a continuidade deste quadro de estagnação no uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação: (i) as estratégias para controle dos inversores nos pivôs centrais ainda são um desafio para os profissionais da automação que atuam na área agrícola, (ii) existem discrepâncias entre valores esperados e valores realizados (observados) de redução no consumo de energia elétrica; e, (iii) são raras as oportunidades de se observar equipamentos de irrigação do tipo pivô central operando com inversores de frequência.

Este trabalho teve como objetivo promover, através da instalação de um inversor de frequência e um controlador lógico programável (CLP), no pivô central existente no Campus da UFLA, ações que contribuam para eliminação destes três fatores restritivos, através da comunicação entre o inversor de frequência, o CLP e os sensores de umidade de solo,

com a utilização de uma rede de comunicação industrial do tipo Modbus, RS485 e Zigbee.

Para tal, foram utilizados os cabos já existentes para controle de energização do conjunto moto-bomba, utilizado pelo pressostato do pivô central.

Todos os parâmetros do inversor de frequência serão fornecidos pelo CLP ao longo da topografia do terreno onde o pivô central está instalado, entre outros.

2 Metodologia

Para execução deste trabalho, primeiramente, foi necessário realizar um mapeamento da área irrigada quanto à umidade e declividade, o que demandou a instalação de sensores e transdutores de umidade em toda a área. Um dos fatores limitantes da relação inversor de frequência e sensores é o limite de sensores a serem utilizados, por isso resolveu-se adotar a utilização de um Controlador Lógico Programável (CLP), marca Omron, modelo CPH-X40DT1-D, como sendo a unidade central de processamento de dados, ou seja, os sinais dos sensores são direcionados e analisados pelo controlador lógico programável e este envia um sinal para o inversor de frequência, da marca Omron, modelo 3G3RX-A2150, para ajustar a rotação do motor da bomba d'água, tudo em função da declividade e da umidade do solo.

No trabalho, os sensores de umidade relativa do solo foram acoplados a microcontroladores com tecnologia Zigbee, Digi XBee-PRO ZB (S2B), que enviam as informações a uma central, o controlador lógico programável, que analisava os dados, iniciando ou não o processo de irrigação por pivô central, conforme a análise dos dados.

Para determinação de posicionamento da linha lateral do pivô central foi instalado um encoder absoluto, da marca Omron, modelo E6C3-AG5B, no ponto do pivô (torre central), onde o sinal também era enviado para mesma central de processamento de dados dos sensores de umidade (o controlador lógico programável). Ao longo da linha lateral móvel, instalou-se 4 sensores de pressão, da marca HBM, modelo P15RVA1/10B, porém utilizando uma comunicação por fios no padrão CompoBus®, da Omron, utilizando-se somente 3 fios, tanto para alimentação elétrica como sinais de comunicação, interligados a unidades remotas de comunicação, da Omron, modelo SRT2-AD04, para geração de pontos de endereços distintos para cada um dos sensores de pressão.

Os sensores de pressão, instalados ao longo da linha lateral do pivô central, eram os responsáveis pelo monitoramento da pressão de água, que também enviavam os sinais para a central, a fim de se garantir a pressão mínima do sistema, de forma a não se afetar a lâmina de água aplicada a cultura irrigada.

Portanto, o sistema de irrigação foi dotado de um controlador lógico programável, um encoder absoluto, um conjunto de sensores de umidade, um outro de

sensores de pressão, unidades remotas de comunicação e um inversor de frequência, todos instalados no pivô central existente no Campus da UFLA (Figura. 1), modelo Valley 4071-8000-VSN/2-94, visando implantar a estrutura mínima necessária para execução de trabalhos de pesquisa voltados ao desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos, que contribuíssem para a disseminação do uso de sistemas automáticos de irrigação, com o objetivo de redução do consumo de energia elétrica (Figura. 2 e 3).



Figura 1. Visão aérea do Pivô Central existente no Campus da UFLA, 2010.

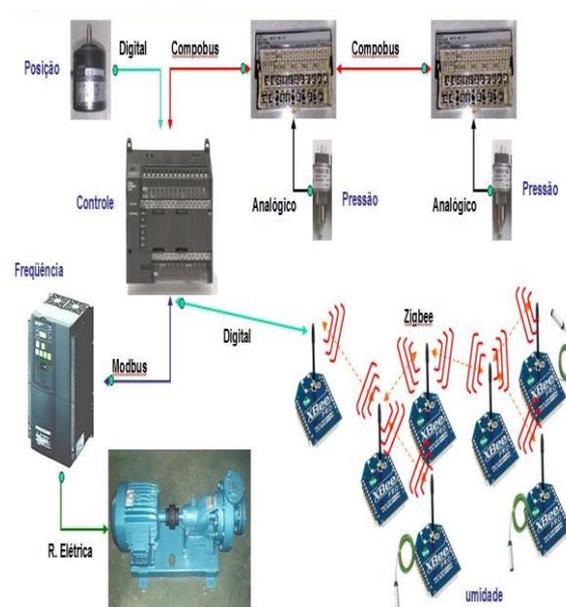


Figura 2. Esboço do sistema de controle (posição x pressão x frequência), com seus componentes e tipos de redes de comunicação envolvidas.

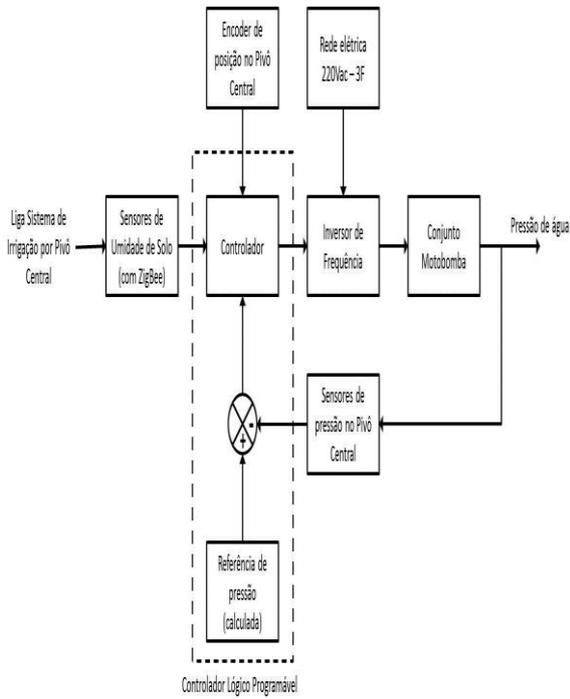


Figura 3. Visão geral do sistema de controle automatizado adotado que permitiu o controle da frequência do conjunto moto-bomba

2.1 Fundamentação Teórica para o Cálculo

Em sistema de irrigação do tipo pivô central, a movimentação da lateral provoca variação na elevação topográfica da mesma, resultando em diferentes requisitos de altura manométrica. A ausência de variação na demanda do valor de vazão requerida é obtida através do uso de válvulas reguladoras de pressão em cada emissor. Estas válvulas evitam que as variações na elevação topográfica da linha lateral afetem a uniformidade de aplicação de água.

Segundo Campana (2000), a demanda de potência para acionamento da unidade de bombeamento será menor quando o pivô estiver irrigando a faixa de menor requisito de altura manométrica e a demanda de potência será máxima quando o pivô estiver irrigando a posição correspondente à maior altura manométrica.

Alcântara (1998), aconselha que as modificações nas curvas características das bombas centrífugas (vazão versus altura manométrica e vazão versus rendimento) resultantes de alterações nos valores de diâmetro e/ou de velocidade de rotação do rotor sejam modeladas através da adimensionalização dos valores de vazão e altura manométrica:

$$\lambda Q = \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \quad (1)$$

$$\lambda H = \frac{g \cdot HMT}{\varphi^2 \cdot \omega^2} \quad (2)$$

onde:

λQ = vazão bombeada adimensional;

Q = vazão bombeada (m³/s);

φ = diâmetro do rotor (m);

ω = velocidade angular do rotor (rad/s);

λH = altura manométrica adimensional;

HMT = altura manométrica total (m).

Azevedo (2003) utilizou polinômios de terceiro grau e a adimensionalização recomendada por Alcântara (1998) para representar as curvas de altura manométrica total e rendimento através das seguintes expressões:

$$HMT_{\alpha} = \frac{Nr \cdot \varphi^2 \cdot \omega^2}{g} \left[a_H + b_H \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} + c_H \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^2 + d_H \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^3 \right] \quad (3)$$

onde:

Nr = número de rotores da bomba considerada;

a_H, b_H, c_H, d_H = coeficientes de ajuste da curva característica da bomba.

$$\eta_b = a_{\eta} + b_{\eta} \cdot \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} + c_{\eta} \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^2 + d_{\eta} \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^3 \quad (4)$$

onde:

η_b = rendimento hidráulico da bomba ($0 \leq \eta_b \leq 1$);

$a_{\eta}, b_{\eta}, c_{\eta}, d_{\eta}$ = coeficientes de ajuste da equação de rendimento da bomba.

Segundo Carvalho & Oliveira (2008), a potência requerida no eixo de acionamento de uma bomba é calculada com base na seguinte expressão:

$$Pot_{eixo} = \frac{Q \cdot HMT_{\alpha} \cdot \gamma}{\eta_b} \quad (5)$$

onde:

Pot_{eixo} = potência no eixo da bomba (Watt);

γ = peso específico da água (N/m³).

O torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba é calculado com base na potência e na velocidade angular do eixo:

$$\tau = \frac{Pot_{eixo}}{\omega} \quad (6)$$

onde:

τ = torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba (N.m).

A relação entre a velocidade de rotação do eixo de um motor e a sua velocidade angular é dada por:

$$\omega = \frac{n}{60} \cdot 2\pi \quad (7)$$

onde:

ω = velocidade angular do rotor (rad/s);

n = velocidade de rotação do motor (rpm).

Quando os valores nominais de frequência e tensão da rede elétrica de alimentação de um motor assíncrono são atendidos, a linearização da curva conjugado versus rotação do motor permite estimar com precisão o conjugado em função do valor da velocidade de rotação do motor [15]. Esta linearização pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{\tau_n \cdot (n_s - n)}{n_s - n_n} \quad (8)$$

onde:

τ = conjugado no eixo do motor operando com rotação n (N.m);

τ_n = conjugado nominal do motor (N.m);

n_s = velocidade síncrona de rotação do motor (rpm);

n_n = velocidade nominal de rotação do motor (rpm).

A velocidade síncrona de um motor elétrico é dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (9)$$

onde:

f = frequência de alimentação do motor (Hz);

p = número de pólos do motor.

Nos motores assíncronos, a diferença entre a velocidade de trabalho e a velocidade síncrona é chamada de escorregamento, sendo normalmente expressa em porcentagem:

$$S_{(\%)} = 100 \cdot \frac{n_s - n}{n_s} \quad (10)$$

onde:

$S_{(\%)}$ = escorregamento (%).

O comportamento da curva “conjugado versus rotação” de um motor elétrico assíncrono que possui sua alimentação através de um inversor de frequência apresenta algumas diferenças em relação ao comportamento de um motor com alimentação direta da rede.

Nas diferentes frequências fornecidas pelo inversor, a diferença, em RPM, entre a rotação com torque nominal e a rotação com torque nulo (rotação síncrona) é sempre igual, a Figura 4 ilustra este princípio.

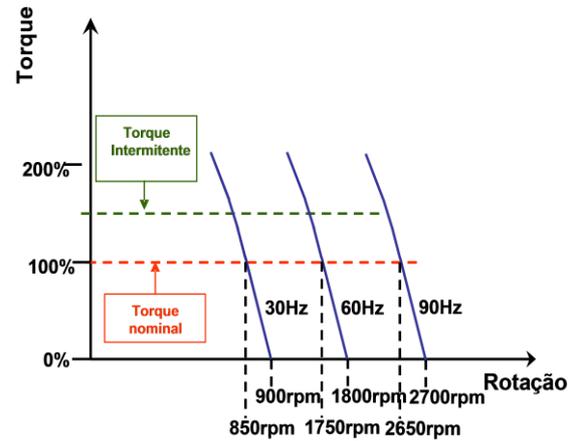


Figura 4. Curvas do conjugado versus rotação de um motor elétrico operando com diferentes frequências da rede elétrica (30, 60, e 90 Hz), mostrando uma diferença constante de 50 rpm entre a rotação com torque nulo e a rotação com torque nominal (adaptado de WEG, 2009).

Em decorrência da diferença constante entre a rotação síncrona e a rotação sob torque nominal, que ocorre nos motores assíncronos controlados por inversores de frequência, pode-se estabelecer, para as diferentes frequências de alimentação, a seguinte relação entre torque nominal e torque de trabalho:

$$\frac{\tau_n}{(n_s)_{fn} - (n_n)_{fn}} = \frac{\tau}{(n_s)_f - (n)_f} \quad (11)$$

onde:

τ_n = torque, ou conjugado nominal do motor (N.m);

$(n_s)_{fn}$ = Rotação síncrona com a frequência nominal de alimentação (rpm);

$(n_n)_{fn}$ = Rotação nominal com a frequência nominal de alimentação (rpm);

$(n_s)_f$ = Rotação síncrona com a frequência f de alimentação (rpm);

$(n)_f$ = Rotação sob o conjugado τ com a frequência f de alimentação (rpm)

2.2 Procedimento para o Cálculo da Frequência

Para a determinação teórica das frequências de alimentação do conjunto moto-bomba para cada posição da lateral móvel do pivô, sendo a vazão constante ($Q_o = 21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), calcula-se o comprimento equivalente da lateral (L_{eq}). Determina-se a taxa da perda de carga na distância r do ponto do pivô. Determina-se a distância do ponto do pivô até o ponto de menor carga de pressão (r_α).

A partir de r_α , determina-se a altura manométrica total para cada posição da lateral, assim é possível

determinar a altura manométrica no ponto do pivô ($H_{pp\ \alpha}$) e em seguida determinar a altura manométrica total ($HMT\ \alpha$).

Com os valores de vazão e altura manométrica já adimensionalizados, determina-se através da equação 3, a rotação angular (ω) da bomba para cada posição da lateral. Com a equação 4, determina-se o rendimento da bomba (η_b) para cada posição da lateral, para a determinação da potência no eixo da bomba (Pot_{eixo}), utiliza-se a equação 5 e conseqüentemente com a equação 6, determina-se o conjugado no eixo do motor (τ).

A transformação da rotação angular (ω) em rotações por minuto (rpm), é obtida pela equação 7, após a transformação, a rotação passa por uma linearização que é realizada pela equação 11 e finalmente calcula-se a frequência de alimentação do conjunto moto-bomba através da equação 9.

Tabela 1. Frequências calculadas em função da posição da linha lateral do pivô central.

α	HMT	n	Rend	Pot _{eixo}	τ	n _s	f $_{\alpha}$
graus	m	rpm	%	Watt	N.m	rpm	Hz
0	82,0	3334	61,9	7219	20,6	3365	56,09
20	83,4	3358	61,8	7356	20,9	3389	56,49
40	84,4	3375	61,7	7454	21,0	3406	56,78
60	85,2	3390	61,6	7540	21,2	3421	57,03
80	84,2	3372	61,7	7438	21,0	3403	56,73
100	83,3	3357	61,8	7348	20,9	3388	56,47
120	81,7	3328	62,0	7186	20,6	3359	55,99
140	79,7	3294	62,1	6994	20,2	3324	55,42
160	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
180	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
200	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
220	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
240	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
260	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
280	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
300	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
320	77,6	3257	62,3	6787	19,9	3287	54,79
340	80,2	3303	62,1	7041	20,3	3333	55,56
360	82,0	3334	61,9	7219	20,6	3365	56,09

3 Resultados

A programação Ladder do CLP mostrou-se extremamente fácil com este tipo de controlador, uma vez que já existem áreas de memória destinadas para transferência de dados para os protocolos de rede Modbus-RTU.

Os protocolos de comunicação (Modbus-RTU e Compubus®) utilizados e seus meios de transmissão

não sofreram nenhuma degradação do sinal ou interferências devido a utilização de cabos comuns, mesmo nos locais mais próximos ao inversor de frequência.

O controle dos parâmetros do inversor de frequência através do controlador lógico programável (CLP), mostrou-se eficaz e mantendo a frequência de rotação do conjunto moto-bomba estável e conforme a necessidade de pressão ao longo da linha lateral em função da declividade do terreno, no qual o pivô central estava instalado.

A frequência mínima necessária para se manter a pressão da linha lateral do pivô central, para este tipo de topografia do terreno, programada, foi de 54,45Hz, já a frequência máxima utilizada no sistema, CLP vs. Inversor, foi de 57,05Hz. Ressalta-se que com estes valores de frequência não houve problema de variação da vazão (lâmina de água aplicada constante), uma vez que a pressão da linha lateral móvel ficou sempre acima da pressão das válvulas reguladoras (configuradas em 20mca).

Sem o sistema de controle realizado pelo CLP, a frequência era constante e igual a 60Hz, utilizando-se a potência máxima que poderia ser fornecida pelo conjunto moto-bomba.

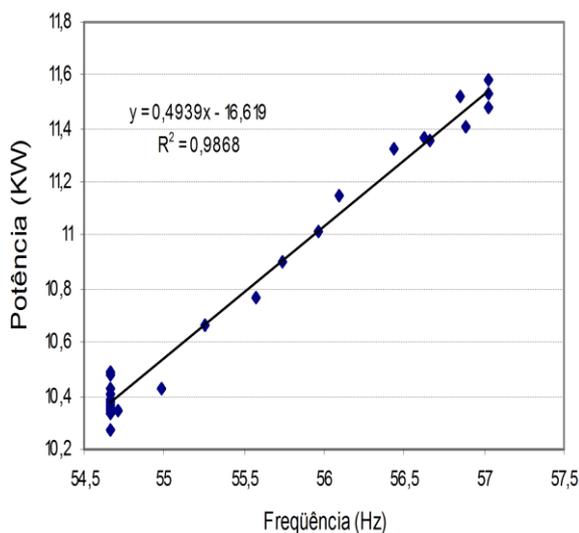


Figura 5. Gráfico da potência consumida (kW) pelo conjunto moto-bomba em função da frequência do inversor (Hz).

Na figura 6, são apresentados valores de potência ativa medidos ao longo de um giro completo da linha lateral móvel do pivô. Nesta figura, são também apresentados valores de potência mecânica no eixo de acionamento do motor. Estas séries de dados foram tomadas sob duas condições operacionais distintas: (i) com a unidade de bombeamento sendo controlada pelo inversor de frequência (P.Ativa COM e P.Eixo COM) e (ii) com a unidade de bombeamento sem o controle do inversor (P.Ativa SEM e P.Eixo SEM).

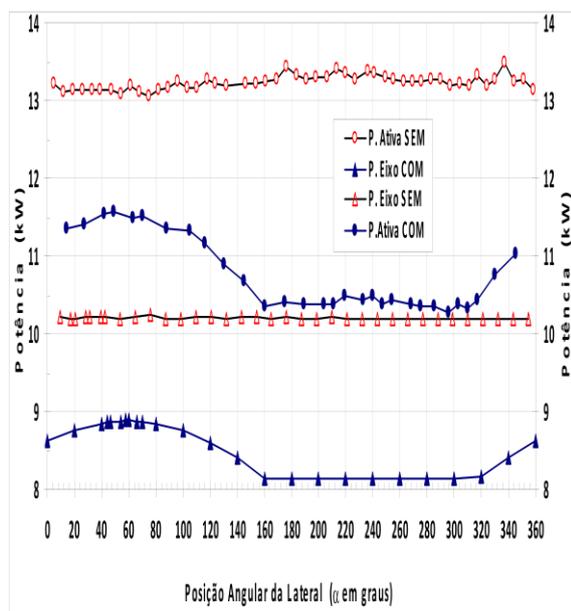


Figura 6. Gráfico da potência consumida (kW) pelo conjunto moto-bomba em função da frequência do inversor (Hz).

Os valores médios de potência ativa por giro completo (13,23kW sem o inversor e 10,75kW com o inversor) indicam uma redução de consumo de energia da ordem de 19% ($(13,23-10,75)/13,23$) quando o inversor é utilizado. A razão potência no eixo/potência ativa ($8,53/10,75=0,79$) determinada enquanto o a unidade de bombeamento operava sob controle do inversor foi pouco superior ao valor determinado sem o controle do inversor ($10,20/13,23=0,77$), indicando que o inversor promoveu uma pequena melhora no rendimento do motor.

Além da redução do consumo de energia e da uma pequena melhora no rendimento do motor, foi também observada uma melhora no fator de potência, que passou de 0,84 para 0,88.

5 Conclusão

O sistema de controle e os protocolos de redes de comunicação utilizados entre o inversor de frequência e o controlador lógico programável (CLP), bem como entre os sensores de pressão, ao longo da linha lateral móvel do pivô central e o CLP mostrou-se efetivo e estável, para o tipo de aplicação de irrigação por pivô central (tempo de resposta não necessariamente curto).

Foi perfeitamente viável a implantação das frequências calculadas para o correto funcionamento do sistema de irrigação por pivô central já que não houve falta de pressão ao longo da linha lateral durante todo o ciclo de 3 giros.

A vazão de água e conseqüentemente a lâmina de água aplicada a cultura irrigada, no caso específico, o café, não sofreu nenhum tipo de alteração, já que a pressão ao longo da linha lateral móvel foi

sempre superior a 20mca (pressão de trabalho das válvulas reguladoras).

Conforme já destacado anteriormente, em termos de valores médios, houve uma redução da ordem de 19%, na potência ativa, consumida pelo conjunto moto-bomba, após a utilização do inversor de frequência, bem como um melhora no fator de potência.

Agradecimentos

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e à Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo apoio a realização das pesquisas e publicação de mais este trabalho.

Referências Bibliográficas

- Alcântara, W. (1998). Estações de bombeamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8a., Florianópolis. Anais... Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p. 107-208.
- Azevedo, E. B. (2003). Viabilidade do uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central. 77p. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Carvalho, J. A. de; Oliveira, L. F. C. de. (2008). Instalações de bombeamento para irrigação. Lavras: UFLA. 354p.
- Campana, S., Oliveira Filho, D., Soares, A. A. et. al. (2000). Adequação de força motriz em sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3., Campinas.
- Masiero L.A.M., Oliveira Filho, D., Oliveira, R.A. (1999). Utilização de inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação por pivô central. Engenharia na Agricultura, Viçosa; v.7.; p.35-45.
- Pereira, Paulo Henrique Cruz. Sistema automatizado de irrigação por pivô central : uma proposta para melhoria da eficiência energética através do uso de controladores lógicos programáveis em conjunto com inversor de frequência e rede sem fio ZigBee. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras. 2011. 132p.
- WEG. Catálogo eletrônico de produtos. Jaraguá do Sul, 2006. Disponível em: <http://www.weg.com.br>. Acesso em: 22 out. 2009.