

Resumo

O trabalho teve por objetivo, avaliar a variação dos seguintes parâmetros: rotação do conjunto motobomba, potência desenvolvida pelo motor elétrico e redução do consumo de energia no conjunto de bombeamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central, operando em dois níveis de programação de um inversor de frequência e em três posições de operação. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, sendo feitas três repetições em cada posição testada. Aplicou-se a análise de variância seguida do teste de Tukey. Foram testadas duas condições de operação: Ensaio 1 com pressão aproximadamente constante na saída do conjunto motobomba e Ensaio 2 com rotação variável de acordo com a necessidade de altura manométrica. Para cada condição de operação foram testadas três posições de linhas coletoras de água: aclive de 3,45%, nível e declive de 11,78%. Os resultados mostraram que, a posição da linha lateral influenciou significativamente na rotação do conjunto motobomba, conseqüentemente, na potência desenvolvida e consumo de energia pelo motor. Principalmente na condição do Ensaio 2, evidenciando o modo de operação do inversor de frequência.

Palavra chave: Rotação, consumo, potência, irrigação.

Operating performance Pumping in Central Pivot using Inverter Frequency

Abstract

The study aimed to evaluate the variation of the following parameters: rotation of the motor pump set, power developed by the electric motor and reduction of energy consumption in pumping set of the center pivot irrigation system, operating in two programming levels the frequency inverter and three positions of operation. The experimental design was completely randomized, being made three replications in each tested position. It was applied to analysis of variance Followed by Tukey 's test. Two operation conditions were tested: Test 1 with constant pressure in the output of motor pump set, and Test 2 with variable rotation in accordance with the need of pressure of system. For each condition of operation were tested three positions of lines of collecting: incline of 3.45%, level and slope with 11.78%. The results showed that the lateral line position significantly influenced the rotation of the motor pump set, consequently, the power developed by the engine and the power consumption. Mainly in the test 2 condition, showing the frequency inverter operating mode.

Key word : Rotation, consumption, power, irrigation.

Received at: 11/04/15

Accepted for publication at: 27/07/15

1 Engenheiro Agrícola, Dr. Professor - Departamento Agronomia. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Unicentro. Guarapuava-PR. Email: adenilsom@unix.com.br.

2 Engenheiro Agrônomo, Dr. Prof. Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista Unesp, Campus Ilha Solteira - SP. zocoler@agr.feis.unesp.br.

3 Engenheiro Agrônomo, Dr. Professor Departamento Agronomia. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Unicentro. Guarapuava-PR. sjadoski@unicentro.br

4 Engenheiro Agrícola, Dr. Professor. Prof. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. UNIOESTE. Cascavel-PR. marcio.maggi@unioeste.br

5 Aluno Programa Pós graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE. Cascavel-PR. Email: Email:regianeamarante@hotmail.com.

Rendimiento operacional de bombeo en pivote central utilizando inversor Frecuencia.

Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar la variación de los siguientes parámetros: rotación del conjunto de bombeo, la potencia desarrollada por el motor eléctrico y la reducción del consumo de energía en el conjunto de bombeo de un sistema de riego de pivote central, que opera en dos niveles de programación de un inversor de frecuencia y tres posiciones de operación. El diseño experimental fue completamente al azar, con tres repeticiones en cada posición de prueba. Se aplicó análisis de varianza seguido por el test de Tukey. Fueran analizadas dos condiciones de funcionamiento: Prueba 1 con una presión aproximadamente constante en la salida del conjunto de bombeo y la prueba 2 con velocidad variable según las necesidades de altura manométrica. Para cada condición de operación se ensayaron tres posiciones de las líneas recolectoras de agua: pendiente de 3,45%, nivel y pendiente de 11,78%. Los resultados mostraron que la posición de la línea lateral influye significativamente en la rotación del conjunto de bombeo, por consecuencia en la potencia desarrollada y consumo de energía por el motor. Sobre todo en las condiciones de ensayo 2, evidenciando el modo de operación del inversor de frecuencia.

Palabra clave: rotación, consumo, potencia, riego.

Introdução

Seja pelo uso sem dimensionamento ou critério técnico ou pelo simples aumento da demanda mundial, a disponibilidade de recursos hídricos e energéticos tem sido continuamente esgotada. Muitas aplicações baseadas em recursos hídricos, dependem de sistemas de bombeamento, principalmente os sistemas de irrigação. Assim, busca-se nos dispositivos utilizados nos sistemas de bombeamento, aprimoramentos que tonem o uso desses recursos cada vez mais eficientes (FERNANDES et al., 2015).

AQUINO et al. (2008) comenta que a aplicação de técnicas de aumento da eficiência energética através da aplicação de inversores de frequência para o controle da vazão de fluidos, já vem sendo apontado há algum tempo como uma boa solução para o acionamento de motores elétricos de indução trifásicos. A aplicação destes equipamentos conversores permite o controle preciso da vazão, proporcionando o mesmo efeito de estratégias mecânicas como, por exemplo, o estrangulamento de válvulas (dampers), que fornece o controle da vazão, porém não contribui para a redução de consumo de energia pelo sistema de acionamento.

Atualmente o bombeamento de água se tornou uma importante parcela do custo de produção, forçando o irrigante a procurar alternativas que

possibilitem reduzir custos. Os motores elétricos são os equipamentos que consomem a maior parte da energia elétrica utilizada nos sistemas de irrigação, e o dimensionamento errado desses equipamentos poderá acarretar um maior consumo de energia elétrica. A utilização de inversores de frequência, que possibilitam a variação de rotação do conjunto motobomba, permite ajustar o consumo de energia elétrica às necessidades de carga.

Nos sistemas de irrigação, normalmente os motores elétricos utilizados para acionamento das bombas são dimensionados para atender a máxima demanda de vazão associada com a máxima altura manométrica. A utilização de inversores de frequência nesses sistemas pode resultar em substancial redução de consumo de energia elétrica. CARVALHO et al. (2000), utilizando um inversor de frequência de 25 cv na irrigação e considerando-se diferentes demandas de água como manejo, avaliaram os custos e benefícios, ambos anuais proporcionada pelo inversor de frequência em relação aos procedimentos usuais de controle da vazão. Observaram que o inversor de frequência pode ser viável, devendo-se avaliar a redução de potência advinda do seu uso e o tempo de funcionamento da irrigação, analisando-se a melhor forma de amortização.

MEDEIROS (2010), avaliando a otimização com o uso do inversor de frequência de dois sistemas de irrigação pivô central, um existente e outro novo,

obteve uma economia de energia de 9,23% e 10,6% respectivamente. Também avaliou o retorno do investimento considerando o uso do sistema com inversor de frequência, obtendo uma taxa de retorno do investimento de 6,52% a.a para o sistema existente e para o sistema novo de 9,48% a.a, evidenciando que há um grande potencial e retorno do capital investido.

CAMPANA et al. (2000), estudou a viabilidade técnico-econômica da utilização deste aparelho quando comparado com válvulas de estrangulamento e fluido recirculado para controle de vazão. Resultados obtidos mostram que, em média, a utilização de inversores de frequência resulta numa economia de energia três vezes superior aos demais métodos. Além do mais a utilização de inversores de frequência contribui, dentre outros, nos seguintes aspectos: (i) redução de desgaste mecânico e da manutenção associada; (ii) redução da demanda de energia; (iii) economia de energia; e (iv) melhoria do fator de potência.

Segundo CARVALHO (2003), variando a velocidade de rotação "n" da bomba, varia-se a curva característica da bomba. Cada ponto (H x Q) com rotação "n", por semelhança mecânica, corresponde a outro ponto (H' x Q') com rotação n'. Os pontos (H x Q) com mesmo rendimento são denominados pontos homólogos. As equações de Rateaux, 1, 2 e 3 se aplicam a esses pontos, ou seja, pontos de mesmo rendimento.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Em que:

Q = vazão recalçada, m³ s⁻¹;

H = altura manométrica, m;

Pot = potência necessária ao acionamento, cv;

n = rotação da bomba, rpm.

A variação de velocidade de rotação em motores de corrente contínua pode ser por meio de

um reostato, já em motores de corrente alternada, pode-se utilizar um variador mecânico intercalado entre motor e bomba, ou, utilizar um inversor de frequência. Em motores de combustão interna, variação da velocidade de rotação pode ser obtida diretamente da aceleração do motor. Uma outra forma utilizada para se obter diferentes velocidades de rotação é com uso de polias e correias.

Verificação das Relações de Rateaux

Um equipamento capaz de promover variações na rotação de acionamento de um motor elétrico com rapidez e eficiência, seguindo as relações de Rateaux, é o inversor de frequência. Este equipamento trabalha alterando a frequência da tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar sua rotação.

ALVES et al. (2002), buscou verificar a veracidade das relações de Rateaux e a redução no consumo da potência consumida no bombeamento, quando se emprega o inversor de frequência, o qual permite a variação de rotação do conjunto motobomba. Empregando-se o inversor de frequência, a redução média da potência consumida foi de 40,7 e 75,0% com a adoção da redução da rotação de 1800 para 1500 rotações min⁻¹ e de 1800 para 1100 rotações min⁻¹, respectivamente. Quando se avaliou a potência consumida usando-se essas mesmas relações, o erro médio na redução de potência foi de 1,33 e 2,00% para as rotações min⁻¹ de 1500 e 1100, respectivamente, o que permite o emprego das relações para se estimar as grandezas altura manométrica, vazão e potência, a partir da curva característica obtida experimentalmente.

SCHMIDLIN JR., et al (2006), realizaram ensaios em bancada de bombeamento do Laboratório de Eficiência Energética e Sistemas Motrizes Industriais (LAMOTRIZ) dois métodos para de controle de vazão: Utilização do inversor de frequência no controle de bombeamento variando a rotação do conjunto motobomba através das relações de Rateaux e controle de vazão por válvula de estrangulamento. Os resultados mostraram que a opção pelo método de redução de vazão por meio da variação da velocidade de rotação do conjunto motobomba, alcançada por meio do uso do inversor de frequência, em detrimento do que usa válvula de estrangulamento acarreta uma significativa redução de potência ativa requerida pelo elemento acionador da bomba centrífuga.

Utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação

$$\omega = \frac{2 \cdot f}{P} (1 - \sigma)$$

A rotação de motores assíncronos trifásicos pode ser calculada pela seguinte expressão 4: em que:

- ω = rotação do motor (Hz);
- f = frequência da rede de alimentação (Hz);
- σ = escorregamento ($0 \leq \sigma \leq 1$);
- P = número de pólos do motor.

Observando-se a equação 4, pode-se deduzir que a velocidade de rotação do motor é proporcional à frequência de alimentação da rede elétrica. O controle da frequência de alimentação da rede e, conseqüentemente, da rotação do motor, pode ser feito por meio de inversores de frequência (WEG, 2002).

Os circuitos internos de um inversor de frequência são divididos em três etapas. Na primeira etapa, o circuito é formado por uma ponte retificadora (onda completa) trifásica e dois capacitores de filtro, formando um pequeno gerador de tensão "DC" simétrico (pois há um ponto de terra como referência) com uma tensão contínua $+ V/2$ (positiva) e uma $- V/2$ (negativa) em relação à terra, formando o chamado "barramento DC". Este barramento DC alimenta uma segunda etapa que é constituída por seis transistores IGBT's e em uma terceira etapa, por meio de uma lógica de controle, liga e desliga os transistores, alternando o sentido da corrente que circula pelo motor.

CAPELLI (2002) comenta que os inversores de frequência operam, aproximadamente, com faixa de variação entre 5 e 300 Hz. Esses equipamentos não têm somente a função de controlar a velocidade de rotação do motor, como também, de manter o torque (conjugado) constante, de modo a não provocar alterações na rotação quando o motor estiver com carga. Para manter o torque constante, o inversor de frequência deve manter a razão V/F constante, ou seja, caso haja mudança na frequência da rede (F), a tensão (V) deve mudar na mesma proporção para que a razão se mantenha na mesma proporção.

Segundo WEG (2006), existem alguns tipos de controle de operação de inversores de frequência, cabe aqui citar quatro tipos:

1. O Controle V/F ou escalar que é recomendado para os seguintes casos:

- Acionamento de vários motores com o mesmo inversor;
- Corrente nominal do motor é menor que 1/3 da corrente nominal do inversor;
- O inversor, para propósito de testes, é ligado sem motor.

O controle escalar também pode ser utilizado em aplicações que não exijam resposta dinâmica rápida, precisão na regulação de velocidade ou alto torque de partida (o erro de velocidade será função do escorregamento do motor; caso se programe o inversor com escorregamento nominal pode-se então conseguir precisão de 1% na velocidade com controle escalar e com variação de carga).

2. Para a maioria das aplicações recomenda-se o controle vetorial "sensorless", o qual permite operação em uma faixa de variação de velocidade 1:100, precisão no controle da velocidade de 0,5%, alto torque de partida e resposta dinâmica rápida. Outra vantagem deste tipo de controle é a maior robustez contra variações súbitas da tensão da rede de alimentação e da carga, evitando desligamentos desnecessários por sobrecorrente. Os ajustes necessários para o bom funcionamento do controle "sensorless" são feitos automaticamente. Para isto deve-se ter o motor a ser usado conectado ao CFW-09 (modelo de inversor).

3. O controle vetorial com encoder no motor apresenta as mesmas vantagens do controle "sensorless" previamente descrito, com os seguintes benefícios adicionais:

- Controle de torque e velocidade até velocidade zero (rpm);
- Precisão de 0,01% no controle da velocidade.

4. O modo de controle VVW (Voltage Vector Weg), segue o mesmo princípio do controle escalar V/F. A utilização do controle VVW permite uma sensível melhora no desempenho do acionamento em regime permanente, no que se refere à regulação de velocidade e a capacidade de torque em baixas rotações (frequência inferior a 5Hz). Como resultado, aumenta-se a faixa de variação de frequência (velocidade) do sistema em relação ao modo de controle Escalar V/F. O controle VVW utiliza a medição da corrente estatórica, o valor da resistência estatórica (que pode ser obtida via uma rotina de auto-ajuste do inversor) e dados de placa do motor de indução, para fazer automaticamente a estimação do torque, a compensação da tensão de saída e, conseqüentemente, a compensação do escorregamento.

Segundo CAMPANA (2000), sistemas

convencionais de bombeamento, com rotação constante e uso de válvula de controle, em grande parte do tempo, operam fora do ponto de trabalho projetado, ou seja, são superdimensionados, gerando, com isso, desperdício de energia elétrica no sistema. Os motores elétricos utilizados em instalações de bombeamento para irrigação que não apresentam controladores de velocidades de rotação trabalham sempre com uma rotação constante e, em muitos desses casos, esses equipamentos estão superdimensionados para uma situação de extrema altura manométrica total. Uma vez que os motores elétricos são os equipamentos que consomem a maior parte da energia elétrica utilizada na irrigação, o mau dimensionamento desses equipamentos acarretará num maior consumo de energia elétrica.

ARAÚJO (2003), concluiu que o sistema com rotação variável reduziu o consumo de energia elétrica no sistema na ordem de 58%, avaliando o comportamento elétrico e hidráulico de um conjunto motobomba em um sistema de irrigação por aspersão em condições de acionamento convencional com rotação constante e rotação variável por meio do uso de um inversor de frequência e um transdutor de pressão. O inversor de frequência e o transdutor de pressão atuam variando a rotação do conjunto motobomba adequando a pressão à vazão requerida pelo sistema (número de linhas em operação). Nos sistemas de irrigação utilizando pivô central a vazão não deve ser alterada durante seu ciclo, porém a altura manométrica pode variar dependendo da topografia do terreno.

Desta forma o trabalho teve por objetivo, avaliar a variação dos seguintes parâmetros: rotação do conjunto motobomba, potência desenvolvida pelo motor elétrico e redução do consumo de energia no conjunto de bombeamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central, operando em dois níveis de programação de um inversor de frequência e em três posições de operação.

Materiais e Métodos

Os ensaios foram realizados na Fazenda Nossa Senhora Aparecida no município de Coronel Macedo, Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas são: latitude de 23°41' sul, longitude 49°11' oeste e 630 m de altitude. Na fazenda estão instalados três equipamentos de irrigação do tipo pivô central da marca Valley denominados de PC-07, PC-08 e PC-

09. Esses equipamentos estão interligados por uma única adutora e trabalham de maneira intercalada com o mesmo conjunto de bombeamento, sendo este comandado por uma chave de partida do tipo Inversor de Frequência. Os ensaios foram realizados no pivô denominado PC-09 (Figura 01).

As principais características do equipamento de irrigação avaliado são: área circular irrigada: 43,94 ha; período (relê 100%): 6,87 h; vazão total: 338,59 m³ h⁻¹; comprimento da linha lateral: 347,55 m; raio total irrigado: 374,0 m; desnível entre a bomba e o centro do pivô: 51,0 m. Foram testadas três posições para o ensaio: aclave de 3,45%, nível e declive de 11,78%.

O sistema de bombeamento instalado é constituído por dois conjuntos motobomba associados em série. As bombas são da marca IMBIL, modelo INI 150-400, rotores com 390 mm de diâmetro, rotação nominal de 1750 rpm. A partida do sistema de bombeamento e aplicação de variação de velocidade nos dois motores de corrente alternada é comandada simultaneamente por um Inversor de Frequência da marca WEG, série CFW-09.

O controle da variação de velocidade do sistema se dá através um Controlador Lógico Programável - CLP, que recebe sinal de um dispositivo eletro-mecânico chamado Transdutor de Pressão, dispositivo esse capaz de converter uma forma de energia em uma corrente ou voltagem elétrica proporcional, sendo instalado logo após o flange de recalque da segunda bomba. Com o uso de uma programação preestabelecida denominada Pressão Máxima (P_{máxima}) e Pressão Mínima (P_{mínima}), o CLP após receber os sinais do transdutor de pressão faz com que tenha uma maior ou menor rotação nos motores, dependendo da posição de operação em que o pivô se encontra, garantindo a pressão mínima de projeto na extremidade do equipamento. Neste trabalho, quando o pivô está operando na posição mais alta onde a altura manométrica é máxima, o CLP trabalha com a programação de P_{máxima} (150 mca) na saída do conjunto motobomba; quando o pivô está trabalhando na posição mais baixa trabalha com a programação de P_{mínima} (100 mca)

Os ensaios foram divididos em duas etapas sendo denominados e executados da seguinte forma: Ensaio⁻¹: realizado em função de uma programação existente no inversor de frequência da propriedade. Essa programação mantém a pressão na saída do conjunto motobomba praticamente constante independente da posição da linha lateral e, conseqüentemente, da exigência de altura

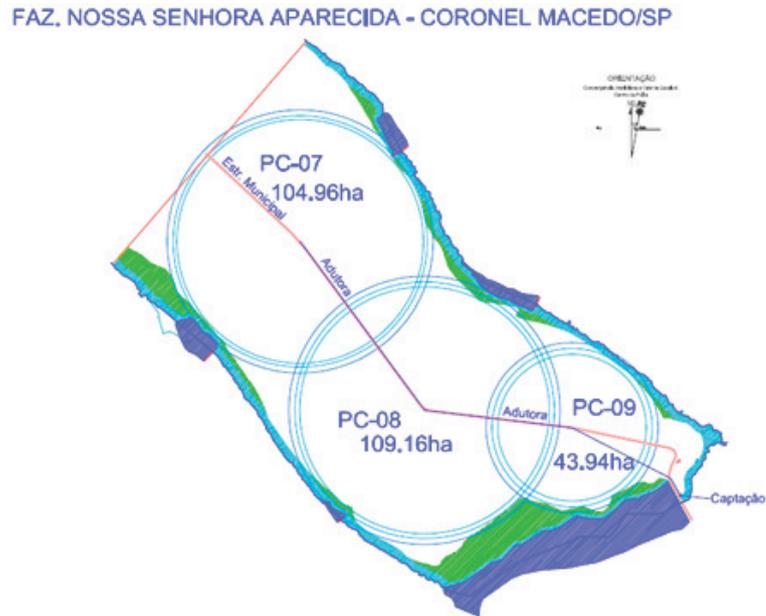


Figura 1. Croqui da área da fazenda com a localização dos equipamentos. (fonte: LIMA, 2015)

manométrica total. Dessa maneira foram feitos os ensaios nas posições de aclave, nível e declive; Ensaio-2: para verificar a atuação do inversor no controle de velocidade de rotação do conjunto motobomba e, conseqüentemente, seus efeitos nos parâmetros de eficiência de aplicação de água e consumo de energia, buscou-se variar a rotação de acordo com a demanda na altura manométrica, ou seja, quando o pivô estava irrigando a posição correspondente ao ponto mais alto (aclive) aplicava-se maior rotação, quando estava na posição mais baixa (declive) diminuía-se a rotação aproveitando o desnível do terreno, sempre atendendo a pressão mínima de serviço prevista em projeto.

As pressões no conjunto de bombeamento foram verificadas com o uso de um manômetro tipo Bourdon com leitura de 0 a 21,00 kgf cm⁻² e precisão de $\pm 1\%$. No ponto pivô (no tubo de subida) e na extremidade do equipamento (antes do regulador de pressão) também foram medidas as pressões com manômetro tipo Bourdon em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para averiguação de desvios em relação ao projeto técnico.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, sendo feitas três repetições em cada posição testada. Efetuou-se análise de normalidade

dos dados e aplicou-se a análise de variância seguida do teste de Tukey.

Resultados e Discussão

Rotação do conjunto motobomba nos ensaios 1 e 2.

Nas Tabelas 1 e 2 são mostradas as rotações do conjunto motobomba nos ensaios 1 e 2, respectivamente, em função da posição relativa da linha lateral.

Verifica-se na Tabela 1, que os valores de rotação não foram significativos entre as posições de aclive e nível, porém, essas em relação ao declive foram significativas. No primeiro caso a explicação mais provável é que a pequena diferença de cota entre as posições, aproximadamente 11 m, não foi suficiente para que o inversor aumentasse significativamente a rotação do conjunto motobomba para manter a pressão de 125 mca na saída da bomba, que era a programação existente inicialmente no inversor.

No entanto em relação à posição em declive, a diferença de cota de aproximadamente 38 m (nível para declive) foi suficiente para que o CLP comandasse o inversor ajustando a rotação para manter a pressão na saída em 125 mca. Esta

programação inicial existente na propriedade é equivocada, pois o inversor de frequência executa uma função contrária a que se propõe, ou seja, ao invés de reduzir a rotação e o consumo de energia quando a linha vai da posição de aclave para declive, há um aumento da rotação e consumo em relação ao mesmo sistema se tivesse chave de partida normal (sem dispositivo de variação de rotação), cuja variação de rotação entre as posições é mínima. Esta programação faria sentido se houvesse aumento de demanda de vazão no sistema, como no caso de aumento de linhas laterais operando simultaneamente em sistemas de aspersão convencional, semelhantemente ao trabalho de ARAÚJO (2003). Contudo, há de se destacar que a variação de rotação entre as posições extremas é de apenas 1,49%.

Em relação ao ensaio 2 (Tabela 2), verifica-se que os valores de rotação foram significativos entre as três posições. Neste ensaio, a programação do inversor estabelecia pressão variável na saída da bomba conforme a posição da linha lateral na área, ou seja, 132,5, 122,5 e 82,5 mca para as posições de aclave, nível e declive, respectivamente.

Sendo assim, para que tais pressões ocorressem, a rotação teria que ser reduzida quando a linha lateral caminhasse do aclave para o declive, conforme as relações de Rateaux. Esta programação é correta para este dispositivo de partida e operação, pois à medida que a linha vai do aclave para o declive, a altura manométrica cai, porém a parte referente à variação de nível é transformada em pressão que atua, sobretudo, nos aspersores submetidos a esta

variação de nível e, com isso, se pode reduzir a rotação da bomba sem reduzir a pressão de operação dos aspersores, havendo redução do consumo e demanda de energia no sistema.

Potência desenvolvida pelo motor elétrico.

Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros relacionados ao consumo de energia do conjunto motobomba no ensaio 1. Verifica-se que, assim como nos testes com rotação (Tabela 1), não houve diferença significância entre os valores de potência desenvolvida pelos motores (kW) entre as posições de ensaio em aclave e nível, porém em relação ao declive esses valores foram significativos (nível de 1%). Essa comparação é feita porque rotação e consumo têm uma relação direta, pois, para manter o torque constante, o inversor de frequência deve manter a razão V/F constante, ou seja, caso haja mudança na frequência da rede (Hz), a tensão (V) deve mudar na mesma proporção para que a razão se mantenha na mesma proporção. Nesse caso, como a pressão de saída do conjunto motobomba estava pré-determinada e houve a necessidade de aumentar a rotação para manter a pressão constante, houve também um acréscimo no consumo.

Na Tabela 4 verificam-se os parâmetros relacionados ao consumo de energia do conjunto motobomba no ensaio 2. Verificou-se pelos resultados que houve diferença significativa de consumo nas três condições de ensaio (aclive, nível e declive), da mesma forma como nos resultados de rotação e

Tabela 1. Efeito da posição relativa da linha lateral na rotação do conjunto motobomba no ensaio 1.

Posições	Repetições	Pressão Cj. MB		Rotação da Bomba	
		(mca)	(rpm)	Média	Tukey
Aclave	1	124,5	1610		
	2	123,0	1608	1610	B
	3	123,0	1611		
Nível	1	125,0	1616		
	2	125,0	1607	1613	B
	3	125,0	1615		
Declive	1	125,0	1637		
	2	125,0	1632	1634	A
	3	125,0	1634		

Letras iguais não diferem entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey. Cj. = Conjunto

Tabela 2. Efeito da posição relativa da linha lateral na rotação do conjunto motobomba no ensaio 2.

Posições	Repetições	Pressão Cj. MB	Rotação da Bomba		
		(mca)	(rpm)	Média	Tukey
Active	1	132,5	1681	1682	C
	2	132,5	1683		
	3	132,5	1682		
Nível	1	122,5	1619	1622	B
	2	122,5	1626		
	3	122,5	1620		
Declive	1	82,5	1367	1375	A
	2	82,5	1380		
	3	82,5	1378		

Letras iguais não diferem entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey. Cj. = Conjunto

Tabela 3. Valores de potência do conjunto motobomba no ensaio 1.

Posições	Repetições	Rotação da bomba (rpm)	Pressão de recalque (mca) (kW)	Frequência do motor (Hz) Média	Tensão do motor (V) Tukey	Potência do motor		
						(kW)	Média	Tukey
Active	1	1610	124,50	54,1	342,0	162,0	165,56	B
	2	1608	123,00	54,1	342,0	168,3		
	3	1611	123,00	54,1	342,0	166,4		
Nível	1	1616	125,00	54,5	343,0	169,4	167,50	B
	2	1607	125,00	54,1	340,0	166,6		
	3	1615	125,00	54,3	343,0	166,5		
Declive	1	1637	125,00	55,1	348,0	186,5	182,16	A
	2	1632	125,00	55,0	347,0	180,8		
	3	1634	125,00	55,0	347,0	179,2		

*Letras iguais não diferem entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

pressão de recalque. Assim como no ensaio 1, porém de modo inverso, com a redução da frequência, o inversor também reduziu a tensão do motor na mesma proporção, mantendo assim a razão V/F constante.

Como a condição estabelecida no ensaio 2 determinava a variação da rotação em função da demanda em altura manométrica, sendo esse um dos principais, se não o principal fator responsável pela implantação de um inversor de frequência em sistemas de irrigação, por meio dos resultados pôde-se verificar a atuação desse equipamento em função da redução de consumo entre os extremos do terreno que para esse caso foi de 40,13% em média. Deste modo, os resultados corroboram com JIMÉNEZ-BELLO et al. (2011) que descrevem que o monitoramento da estação de bombeamento, considerando a demanda de água e energia e o uso

de ferramentas que avaliam o desempenho, são estratégias imprescindíveis para administrar com eficiência o consumo de energia em irrigação.

Redução do consumo de energia devido ao uso da chave inversora

Devido às condições locais, em que um único sistema de bombeamento abastecia três sistemas de irrigação do tipo pivô central, não seria possível utilizar outro comando de partida senão a chave inversora, pois a rotação da motobomba deve variar conforme o pivô central em operação e a posição da linha lateral do mesmo. Sendo assim, para o equipamento PC-09 calculou-se a redução média do consumo de energia elétrica no bombeamento devido à redução da rotação.

Tabela 4. Valores de potência do conjunto motobomba no ensaio 2.

Posições	Repetições	Rotação da bomba (rpm)	Pressão de recalque (mca) (kW)	Frequência do motor (Hz) Média	Tensão do motor (V) Tukey	Potência do motor		
						(kW)	Média	Tukey
Active	1	1681	132,50	56,4	356,0	182,6	185,36	A
	2	1683	132,50	56,7	357,0	188,4		
	3	1682	132,50	56,4	356,0	185,1		
Nível	1	1619	122,50	54,3	343,0	166,0	171,06	B
	2	1626	122,50	54,7	344,0	176,0		
	3	1620	122,50	54,3	343,0	171,2		
Declive	1	1367	82,50	45,9	289,0	108,1	110,96	C
	2	1380	82,50	46,3	292,0	114,0		
	3	1378	82,50	46,3	293,0	110,8		

*Letras iguais não diferem entre si a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Considerando que o consumidor está enquadrado na tarifação horo-sazonal verde com direito ao desconto na tarifa de consumo entre as 21:30 e 6:00 horas do dia posterior, seguem-se as condições de aplicação dos cálculos:

- Consumidor: Grupo A, Subgrupo A4, Classe IV (Rural), Subclasse a – agropecuário item 2 – serviço de bombeamento de água destinada à atividade de irrigação (Resolução Normativa 156, de 3 de maio de 2005 da ANELL que alterou a Resolução 456, de 29 de novembro de 2000 da ANEEL);

- Potência média de operação: 148,16 kW (máxima referente à posição mais alta 185,36 kW; e mínima referente à posição mais baixa 110,96 kW);

- Tempo de funcionamento diário: 20 h (ligado meia hora após o término do horário de ponta e desligado meia hora antes do início do horário de ponta);

- Número de dias de funcionamento no período seco do ano (maio a novembro): 70;

- Tempo diário de funcionamento no horário especial para irrigantes (no caso do benefício da Resolução 207, de 9 de janeiro de 2006, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL): 8,5 horas (máximo possível);

- Tarifa de consumo de energia elétrica no horário fora da ponta utilizada (CPFL – Paulista para o subgrupo A4, segundo a Resolução 445/ANEEL - DOU de 03/04/2007): R\$ 0,17647 kw h⁻¹;

- Fator de desconto sobre a tarifa de consumo verde no horário fora da ponta para a irrigação: 70% (Região Sudeste);

- Impostos Federais (PIS/PASEP e COFINS), que em média perfazem 4%, não foram incluídos nas tarifas.

Portanto, o valor (R\$) do consumo de energia elétrica poupado durante o período de utilização do equipamento é calculado como se segue:

Sabendo-se que o preço de aquisição da chave inversora é R\$ 65.200,00 (Segundo representante WEG) e que se ao invés desta, fossem adquiridas duas chaves tipo “soft starter” (mesmo com a limitação do caso), cujo preço de aquisição é R\$ 10.850,00 cada (referencia na data: cotação do dólar comercial 2,327 reais), o tempo de recuperação do capital investido entre estas duas opções, devido somente à economia de energia, seria de 6,74 anos, o que evidencia um investimento muito interessante, bem como o fato da chave inversora dispensar o uso de banco de capacitores para correção do fator de potência do sistema. Além disso, considerou-se neste cálculo apenas o uso do pivô número 9 e somente durante 1/3 (um terço) do período seco do ano (maio a novembro), uma vez que nos outros 2/3 deste período a chave inversora estaria conectada aos outros dois pivôs (PC-07 e PC-08), que estão posicionados em áreas mais elevadas.

Conforme condições desenvolvidas, pode-se inferir que em função da programação existente, as condições de operação do equipamento para o Ensaio 1 influenciaram os valores de rotação, potência e consumo de energia. Embora o aumento de rotação na posição em declive tenha demonstrado uma parametrização equivocada do inversor de

frequência, pois com o aumento de rotação houve aumento no consumo de energia em uma condição de operação em que deveria ocorrer o inverso; Para o Ensaio 2 verificou-se que os valores de rotação, pressão e potência operaram de acordo com as relações de Rateaux. Neste ensaio a posição de operação do equipamento determinou a altura manométrica, otimizando assim, o uso do conjunto motobomba por meio do controle de velocidade de rotação pelo inversor de frequência.

Os resultados estão em conformidade com os apresentados por MORAES et al. (2014), que verificaram que a avaliação de um protótipo de pivô central mostrou ser capaz de simular condição real, e com linha lateral inclinada em 0; 10; 20 e 30%, verificou-se que o uso do inversor de frequência proporcionou uma economia de energia elétrica de aproximadamente 48; 37; 26 e 16 %, respectivamente.

Segundo os autores, a automação do pivô central usando o inversor de frequência mostrou-se viável, eficaz e capaz realizar a variação da rotação conforme a pressão estabelecida como necessário nos pontos considerados críticos.

Conclusões

Conclui-se que a utilização do inversor de frequência resulta em melhoria do desempenho operacional do conjunto motobomba do pivô central, ajustando a rotação da motobomba em função das condições topográficas do local e, conseqüentemente reduzindo o consumo de energia, pelo aproveitamento da altura manométrica resultante da diferença de nível em declive.

Referências

- ALVES, J.A., et al.: Verificações das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.523-525, 2002 Campina Grande, PB
- AQUINO, R.R.R., et al. Eficientização energética em métodos de controle de vazão. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas, 2008.
- ARAÚJO, J.A.B. Aplicação de inversor de frequência para economia de energia elétrica, em sistema de irrigação por aspersão. Botucatu, 2003. 62p. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP, 2003.
- CAMPANA, S. Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação tipos pivô central e aspersão convencional. 2000. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa
- CAMPANA, S., OLIVEIRA FILHO, D., SOARES, A.A., et al. Inversores de frequência: uma alternativa para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação pivô central.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.Proceedings online... Available from: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200029&lng=en&nrm=abn>. Access in: 07 Apr. 2016.
- CAPELLI, A. Inversores de frequência. Revista Mecatrônica Atual, São Paulo, n. 2, p. 7-15, fev. 2002
- CARVALHO, J.A. Hidráulica básica. In: MIRANDA, J.H. de; PIRE, R.C. de M. Irrigação. Piracicaba: FUNEP, 2003. cap. 15, v.2, p. 1-106.
- CARVALHO, J.A., et al. Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.1, p.51-56, 2000. Campina Grande, PB.
- FERNANDES, R.F., et al. Sistema de Acionamento Elétrico para Motor de Indução Trifásico (MIT) Aplicado no Bombeamento de Água. In: Anais do VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - Universidade Federal do Pampa. v.7, n. 2 (2015).
- JIMÉNEZ-BELLO, M. Á., ALZAMORA, F. M., CASTEL, J. R., INTRIGLIOLO, D. S. Validation of a methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption. Agricultural Water Management, n.102, p.46-53,2011.

MEDEIROS, A. M. de M. Otimização de sistema de irrigação por aspersão pivô central. 2010. 131 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010

MORAES, M. J., Oliveira Filho, D., Mantovani, E. C., Monteiro, P. M. B., Mendes, A. L. C., Damião, J. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. Engenharia Agrícola, v. 34, n.6, p. 1075-1088, 2014.

SCHMIDLIN Jr., C. R. Operação do conjunto bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica. Fortaleza, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2006.

WEG. Guia de aplicação de energia. Jaraguá do Sul: WEG, 2002. 238p.

WEG. Manual do inversor de frequência CFW-09. Jaraguá do Sul: WEG, 2006. 361p.