

Resumo

Este trabalho teve o objetivo de avaliar a uniformidade de distribuição e lâmina de água aplicada por um equipamento de irrigação do tipo pivô central em função da variação da velocidade de rotação no conjunto motobomba com o uso de um inversor de frequência e o efeito da posição da linha lateral nesses parâmetros. Foram testadas três posições de linhas coletoras de água: aclive de 3,45%, nível e declive de 11,78%. 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. O valor médio do coeficiente de uniformidade de Heermann e Hein foi de 88,85%, qualificando a uniformidade de distribuição de água como boa. A lâmina média ponderada de irrigação aplicada foi 5,71 mm, variando dentro de cada ensaio significativamente (5%) entre as posições de declive versus aclive e nível. Concluiu-se que a posição da linha lateral influenciou significativamente na rotação do conjunto motobomba, lâmina de água aplicada e consumo de energia, porém não foram verificadas diferenças nos valores de uniformidade de distribuição de água.

Palavras-chave: aplicação de água; sistema de controle; rotação, pivô central.

Uso de inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água¹

*Adenilson dos Santos Lima², João Luís Zocoler³,
Marcio Furlan Maggi⁴, Herbet Krupinshi de
Lima⁵.*

Utilidad del inversor de frecuencia em el sistema de irrigación tipo pivó central y su efecto en la lámina de uniformidad de distribución del agua

Resúmen

Este estudio objetiva evaluar la uniformidad de la distribución y de la lámina de agua aplicada por un equipamiento de irrigación, con pivó central, en función de la variación de la velocidad de rotación con el conjunto motobomba utilizando un inversor de frecuencia y el efecto de la posición de la línea lateral en esos parámetros. Realizamos la prueba en tres posiciones de líneas colectoras de agua: en aclive de 3,45%, en declive de 11,78%. El delineamiento de la experiencia fue totalmente casual. Repetimos la experiencia tres veces con cada posición testada. Aplicamos el análisis de variedad seguido del test de Tukey. El valor medio del coeficiente de uniformidad de Hermann e Hein fue de 88,85% que calificó la uniformidad del agua como buena. La lámina media ponderada de irrigación aplicada fue de 5,71mm, variando significativamente en cada ensayo (5%) de acuerdo con las posiciones de declive versus aclive y nivel. Concluimos que la posición de la línea lateral influyó significativamente en la rotación del conjunto motobomba, lámina de agua aplicada y la consumación de energía. No verificamos diferencia alguna en los valores de uniformidad de distribución del agua.

Palabras llave: aplicación de l agua; sistema de control; rotación; pivó central.

Introdução

O principal objetivo de um sistema de irrigação é proporcionar condições para produzir economicamente, o que se consegue pelo aumento da produtividade e redução dos custos por unidade

produzida. Neste aspecto, os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação devem ser entendidos como componentes decisórios do processo de planejamento e operação dos sistemas de irrigação (FRIZZONE, 1992).

1 Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentado à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP.

2 Eng. Agrícola, Dr. em Irrigação e Drenagem, Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP. e-mail: adenilson@unix.com.br.

3 Prof. Livre-Docente – Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. e-mail: zocoler@agr.feis.unesp.br.

4 Eng. Agrícola, Dr. em Irrigação e Drenagem.

5 Acadêmico de Agronomia, Unicentro.

O conhecimento do desempenho do equipamento, principalmente em relação à uniformidade de distribuição de água e lâmina de água aplicada, é imprescindível para se tomar medidas que permitam economizar água e energia. Quando se aplica somente a lâmina de irrigação necessária numa área (sendo que esta lâmina corresponde à lâmina média), devido à falta de uniformidade, uma fração dessa área é irrigada com excesso, enquanto que em outra fração ocorre déficit de água. Na fração com excesso, uma parte fica armazenada na zona das raízes para uso das plantas e a outra parte é perdida por percolação profunda, transportando também parte dos nutrientes daquela camada. Na fração com déficit, toda água infiltrada é considerada armazenada na zona radicular, porém, em quantidade inferior às necessidades hídricas das plantas. Por outro lado, se a lâmina média de irrigação aplicada for maior que a necessária, pode-se até eliminar a fração com déficit de irrigação, porém o custo da irrigação sobe, podendo até se tornar inviável economicamente, além de agravar a lixiviação dos nutrientes. Portanto, a uniformidade de distribuição da água da irrigação deve ser analisada não apenas como uma simples informação de dispersão, mas sim como um importante parâmetro na avaliação econômica da irrigação (ZOCOLER et al., 2004).

Para aumentar a produtividade, é necessário que o empreendedor aplique toda a tecnologia possível e, na agricultura, é essencial a aplicação correta de águas às culturas, pois o seu desenvolvimento esta atrelado a esta condição. A irrigação destaca-se como uma das principais técnicas a serem implantadas, porém grande parte das áreas irrigadas do país trabalha com energia elétrica proveniente dos sistema interligado de geração e transmissão, ou com pequenas gerações locais, de origem hidráulica (ARRUDA, 1988).

Com os constantes aumentos da tarifa energética, o bombeamento da água tornou-se 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 mau dimensionamento desses equipamentos acarretará num maior consumo de energia elétrica

Azevedo (2003). 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.

Conzett e Robeck (1983) citam que umas das formas de se manejar adequadamente um sistema de bombeamento visando reduzir vazão, é alterar a rotação da bomba até a obtenção da vazão necessária, de acordo com as leis de rateaux; isto não implica em introdução de perda de carga e o tempo de funcionamento não é alterado. Tiago Filho (1996) cita que um equipamento capaz de produzir este efeito com rapidez e eficiência é o inversor de frequência, que trabalha alterando a frequência da tensão aplicada ao motor, possibilitando controlar a sua rotação; ainda segundo este mesmo autor, o uso do inversor de frequência na indústria em sistemas de bombeamento com este objetivo é uma pratica bastante comum, pois sua aplicabilidade economica é justificável pela redução do consumo energético, em comparação com outros procedimentos, especialmente de fechamento de válvula.

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. Henson et al. (1996), citado por Carvalho et al. (2000), aplicaram o inversor de frequência em alguns sistemas de irrigação com este objetivo, nos EUA, obtendo resultados satisfatórios, uma vez que a redução da potência consumida, provocada pelo uso do equipamento, gerou substancial economia de energia.

Neste contexto foi objetivo deste trabalho avaliar em um equipamento de irrigação tipo pivô central a uniformidade de distribuição e lâmina de água aplicada em função da variação de velocidade de rotação do conjunto motobomba com o uso de um inversor de frequência e o efeito da posição da linha lateral nesses parâmetros.

Material e métodos

Os ensaios foram realizados no segundo semestre de 2008 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, que é o equipamento que está mais próximo do ponto de captação.

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: aclive de 3,45%, nível e declive de 11,78%. Os ensaios foram executados de acordo com o projeto de norma número 04:015.08-008 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT de 1998, instalando-se duas linhas radiais de coletores, em espaçamento regular e constante de três metros entre coletores, do centro do pivô ao extremo da área irrigada, perpendicularmente ao caminhamento da linha lateral do equipamento, com três graus de ângulo de abertura entre as linhas. Para a realização dos testes o relê percentual do equipamento foi ajustado a 100% .

Os dados climáticos coletados durante o ensaio foram: velocidade do vento e a evaporação. Para verificar a velocidade do vento e a temperatura durante os ensaios, foi utilizado um Termo-Anemômetro digital portátil da marca Instrutherm, modelo TAD-500, com leitura de velocidade de 0,3 a 45,0 m s⁻¹ e precisão de ± 3 %. A evaporação durante o período de cada ensaio foi medida utilizando coletores de controle instalados nas adjacências da base do pivô, sendo que os valores obtidos foram somados às lâminas de água coletadas, conforme determina a Norma da ABNT para esse tipo de ensaio, perfazendo assim a lâmina líquida total aplicada pelo equipamento.

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 ± 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 ABNT para averiguação de desvios em relação ao projeto técnico.

Para calcular o tempo de recuperação do capital investido na aquisição do inversor de frequência devido a redução no consumo de energia elétrica, foi simulado o valor de consumo (*Vc*) de energia elétrica poupado durante o período de utilização do equipamento. Para tal, considerou-se a economia de energia pela utilização apenas do pivô número 9 trabalhando vinte horas por dia 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.

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.

Resultados e discussão

Os dados climáticos registrados no campo, velocidade do vento e evaporação dos pluviômetros (coletores), são mostrados na tabela 1. Em relação à velocidade do vento durante os ensaios, verificou-se que os valores medidos não ultrapassaram o permitido no projeto de norma, no qual velocidade do vento acima de 3,0 m s⁻¹ invalidam os testes. Os valores observados durante os ensaios não ultrapassaram 2,6 m s⁻¹.

Verifica-se na tabela 2, que os valores de rotação foram significativos entre as três posições. Nestes ensaios, 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 aclive, nível e declive, respectivamente. Sendo assim, para que tais pressões ocorressem, a rotação teria que ser reduzida quando a linha lateral caminhasse do aclive 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 aclive para o declive,

Tabela 1. Valores de velocidade do vento e da evaporação durante os ensaios.

Posições	Repetição	Evaporação dos coletores (mm)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)
Aclive	2	0,20	1,00
Nível	2	0,23	0,00
Declive	2	1,00	1,60

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.

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.

Na tabela 3 são mostrados os resultados da uniformidade de distribuição, onde se variou a rotação do conjunto motobomba buscando atender a demanda de altura manométrica conforme a posição da linha lateral na área (aclive, nível ou declive). Apesar de haver diferença significativa na rotação entre as posições de ensaio (Tabela 2), não houve significância entre os valores de uniformidade de distribuição, demonstrando que independente da posição de operação, seja em aclive ou declive, ou da pressão de operação, o conjunto de reguladores de pressão atuou de forma satisfatória, classificando a uniformidade como boa nas três posições de ensaio, conforme a ABNT.

Zocoler, Cesar e Vanzela (2004), avaliando um equipamento de irrigação do tipo pivô central em três posições de operação (aclive, nível e declive), verificaram que a posição da linha lateral não influenciou a uniformidade de distribuição de água do referido equipamento.

Na tabela 4 são mostrados os resultados de lâmina de água coletada. Verifica-se que, diferentemente da rotação, em que houve diferença significativa nas três posições (Tabela 2), somente houve diferença de lâminas coletadas entre as posições de declive versus nível e declive versus aclive. Considerando que o inversor fora programado para atender as necessidades de pressão adequadas para cada posição, esperava-se que as lâminas não diferissem estatisticamente. Porém, o que ocorreu é que mesmo com a pressão de saída ajustada para 82,5 mca na posição de declive, ainda assim este valor foi suficiente para que a vazão fosse maior em relação às posições anteriores e, assim, promovesse a elevação da lâmina aplicada.

Zocoler et al. (2004), avaliando o efeito da posição da linha lateral de um equipamento de irrigação do tipo pivô central na lâmina de irrigação aplicada, concluiu que apesar de a extremidade do pivô central variar 24,37 m, verticalmente, entre as posições de aclive e declive, não houve efeito significativo das posições nessa variável.

Na figura 1 podem ser visualizados os pontos de operação com base na pressão observada na saída do conjunto motobomba, vazão calculada através da

Tabela 2. Efeito da posição relativa da linha lateral na rotação do conjunto motobomba.

Posições	Pressão conjunto Motobomba		Rotação da Bomba	
	(mca)	(rpm)	Média	Tukey
Aclive	132,5	1683	1682	C
Nível	122,5	1626	1622	B
v	82,5	1380	1375	A

Análise de variância não significativa a 1% de probabilidade.

Tabela 3. Coeficiente de uniformidade de distribuição.

Posições	Rotação da Bomba		Uniformidade de distribuição		
	(rpm)	média	CUH(%)	Média	ANOVA
Aclive	1683	1682	88,26	89,37	ns*
Nível	1626	1622	85,94	87,50	ns*
Declive	1380	1375	89,47	89,69	ns*

*Análise de variância não significativa a 5% de probabilidade

lâmina média ponderada e a movimentação desse ponto das posições em aclive e nível para declive.

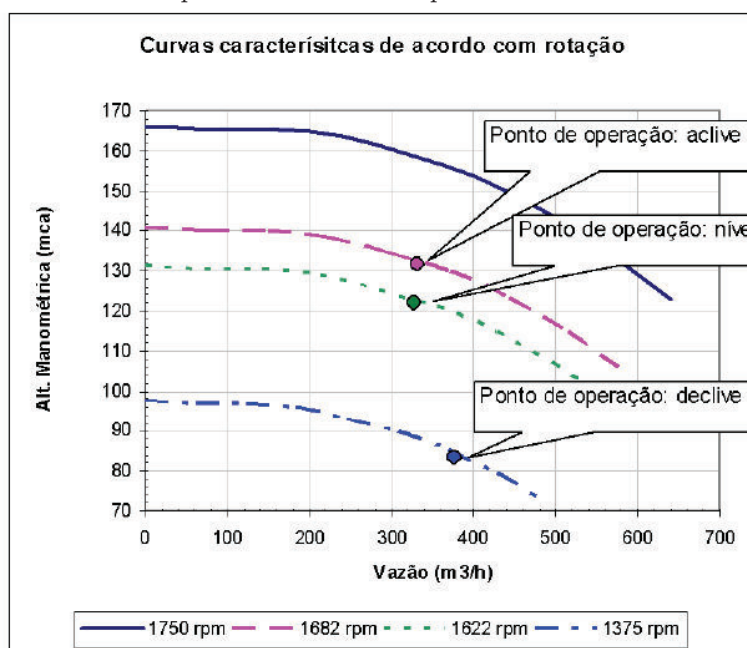
Como a condição de operação determinava a variação da rotação em função da demanda em altura manométrica, sendo esse um dos principais fatores responsável pela implantação de um inversor de frequência em sistemas de irrigação. Na tabela 5 verificam-se os parâmetros relacionados ao consumo

de energia do conjunto motobomba. 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 pressão de recalque. Por meio dos resultados pôde-se verificar que a redução média de consumo de energia entre os extremos do terreno foi de 40,13%.

Tabela 4. Valores de rotação e lâmina de irrigação.

Posições	Rotação da Bomba		Lâmina irrigada coletada		
	(rpm)	Média	mm	Média	Tukey
Aclive	1683	1682	5,39	5,54	B
Nível	1626	1622	5,54	5,39	B
Declive	1380	1375	6,13	6,19	A

Análise de variância não significativa a 5% de probabilidade.

Figura 1. Pontos de operação H_{man} (mca) x Vazão ($m^3 \cdot h^{-1}$), de acordo com pressões medidas no conjunto motobomba e vazões calculadas a partir da lâmina média ponderada.

Mello et al (1999), comparando a diferença de potência consumida por um inversor de frequência em instalação de bombeamento visando ao controle de pressão em linhas de irrigação, por meio de redução da rotação de motobombas, obteve redução de potência da ordem de 35,87% e 28,02% em relação aos procedimentos usuais de manejo: introdução de perda de carga na linha e redução de tempo de irrigação respectivamente.

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.

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 ANEEL 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:

$$V_c = \frac{(185,36 - 110,96)}{2} \cdot 11,5 \cdot 70 \cdot 0,17647 + \frac{(185,36 - 110,96)}{2} \cdot 8,5 \cdot 70 \cdot 0,17647 \cdot 0,30 = 6456,37$$

Sabendo-se que o preço de aquisição da chave inversora é R\$ 65.200,00 (Segundo representante WEG em 24/10/2008) e que 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, o tempo de recuperação do capital investido entre estas duas opções, devido

Tabela 5. Valores de potência do conjunto motobomba.

Posições	Repetição	Rotação da bomba (rpm)	Pressão de recalque (mca)	Frequência do motor (Hz)	Tensão do motor (V)	Potência do motor		
						(kW)	Média	Tukey
Aclive	2	1683	132,50	56,7	357,0	188,4	185,36	A
Nível	2	1626	122,50	54,7	344,0	176,0	171,06	B
Declive	2	1380	82,50	46,3	292,0	114,0	110,96	C

Análise de variância não significativa a 1% de probabilidade.

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.

Conclusões

Conforme condições desenvolvidas, pode-se concluir que:

Verificou-se que os valores de rotação, pressão e potência operaram de acordo com as relações de Râteaux. 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;

A posição do equipamento influenciou nos valores de rotação e na lâmina de água aplicada, porém não na uniformidade de distribuição de água que foi classificada como boa, evidenciando que mesmo com rotação menor a uniformidade de distribuição foi mantida;

Os valores de lâmina de água aplicada para os ensaios ficaram acima dos valores especificados na ficha técnica fornecida pelo fabricante do equipamento, demonstrando a necessidade de se avaliar os equipamentos de irrigação após a instalação. Dessa forma, consegue-se melhorar o desempenho dos mesmos não só na questão de aplicação de água como em consumo de energia elétrica.

Referências

Apresentadas no final da versão em inglês.