

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CONJUNTO MOTOR BOMBA PARA SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO INTEGRADOS A UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

K. B. Sá¹, A. A. Rodrigues², D.R. Lino³, A. S. Teixeira⁴

RESUMO: Em meio às inovações, é necessário manter sempre a eficiência dos sistemas agrícolas, com isso este trabalho visa avaliar a combinação motor bomba e inversor de frequência e seu grande diferencial inovador, interferindo diretamente na irrigação para fornecer uma alternativa para a diminuição do consumo de energia refletindo diretamente no aumento da eficiência. O comportamento do conjunto motor bomba foi caracterizado em testes de laboratório sob alimentação direta da rede e com o inversor de frequência nas frequências de 60, 55, 50 e 45 Hz. Foi feita a caracterização do comportamento do conjunto motor bomba foi medido também o consumo energético em cada um dos pontos. Os dados gerados nesse processo deram condições para criação de modelos matemáticos que representam bem o comportamento das variáveis de interesse envolvidas no bombeamento (vazão, altura manométrica, consumo de energia elétrica, etc.), para assim estimar valores em pontos de funcionamento com modo de operação distintos, facilitando a escolha do modo de operação mais eficiente. O inversor de frequência gerou economia de energia elétrica na ordem de 72% para uma mesma vazão, e 77% para uma mesma altura manométrica.

PALAVRAS-CHAVE: Automação. Irrigação de Precisão. Transferência de Tecnologia.

ENERGY EFFICIENCY MOTOR PUMP SET FOR IRRIGATION SYSTEMS INTEGRATED TO A FREQUENCY INVERTER

SUMMARY: Under the global context increasingly intense of a sensible use of land for food production, with a rational agriculture and drinking water shortages, especially in Northeast Brazil, seeks to integrate the automation Agronomy. Amidst all these innovations, it is necessary to keep the system efficiency. The pump motor assembly behavior was characterized in laboratory tests under direct mains supply and the frequency inverter in the frequencies of

¹ Mestrando em Eng. Agrícola, Depto. Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza – Ceará, Email: klenio.bezerra@gmail.com.

² Doutorando em Eng. Agrícola, Depto. Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE.

³ Discente de Agronomia, Bolsista PIBIC/CNPq, Depto. Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE.

⁴ Ph.D., Docente, Depto. Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE.

60, 55, 50 and 45Hz. In each mode of operation were chosen to measure nine points with reference to the maximum speed of the water, which were measured with an ultrasonic flow meter and the speed of the water with a pressure sensor to the gauge height. After characterizing the pump motor assembly behavior was also measured energy consumption for each of the points. The data generated in this process gave conditions for creating mathematical models that represent well the behavior of the variables of interest involved in pumping (flow, total head, power consumption, etc.), so as to estimate values in similar operating points, but under different operating mode, facilitating the choice of the most efficient mode of operation. The frequency inverter generated electricity savings in the order of 72% for the same flow, and 77% for the same gauge height, which clearly shows the benefits of installing such equipment on the farm. The end result can confirm a real energy savings due to the frequency inverter installation.

KEYWORDS: Automation. Precision irrigation. Technology Transfer.

INTRODUÇÃO

O Brasil possui condições pedológicas, hídricas e topográficas para atingir índices de utilização da agricultura irrigada idênticos ou melhores do que muitos países que a usam intensivamente. Os benefícios obtidos da irrigação, por sua vez, extrapolam as questões de produtividade e valor agregado do produto, propiciando, sobretudo, impactos positivos nas condições socioeconômicas regionais. Segundo (Pereira et al., 2009), uma boa estratégia de manejo da irrigação é fundamental para economizar água sem, no entanto, pôr em risco o rendimento das culturas.

O uso racional da água e da energia na irrigação é um requisito indispensável para o desenvolvimento econômico de atividades agrícolas, não só pela necessidade de preservação do meio ambiente, mas também pela minimização dos custos operacionais mais elevados, uma vez que a escassez destes insumos os torna mais caros. A elevação destes custos dificulta a sobrevivência de pequeno e médio produtor (Teixeira et al., 2011).

Ainda segundo Teixeira et al. (2011) os sistemas de irrigação são estratégicos no que diz respeito ao uso de água e energia elétrica e, portanto, merecedores de atenção especial no sentido de incremento da eficiência no uso dos recursos no processo produtivo.

Segundo Lima et al. (2009) nos últimos anos, em virtude, principalmente, da repercussão do custo energético envolvido na operação dos sistemas de irrigação e do impacto deste no custo de produção.

É importante caracterizar a conservação de energia como a utilização da energia elétrica da forma mais eficiente possível, ou seja, buscar o funcionamento de máquinas sob o mínimo consumo de energia. Vale salientar que esse ponto de vista procura a diminuição de custos operacionais sem que se perca a qualidade dos processos envolvidos com o uso da energia elétrica. No caso deste trabalho, o processo envolvido é a transformação de energia elétrica em energia mecânica, através do motor indutivo trifásico, o qual é acoplado a uma bomba centrífuga que, por sua vez, transferirá essa energia ao fluido.

A utilização da eletrônica pode propiciar ganhos na conservação de energia. Um equipamento que vem sendo utilizado é o inversor de frequência o qual, dentre outras atribuições, permite o controle de aceleração e desaceleração no funcionamento do motor. Possui, portanto, papel crucial no controle de vazão em bombas centrífugas, aumentando as possibilidades de pontos de operação do conjunto, ou seja, associações de vazão e altura manométrica com o mínimo gasto energético.

Segundo Moraes et al.,(2011), o emprego de inversores de frequência tem sido justificado no controle de tensão e de frequência (V/f), o que gera: (i) economia de energia; (ii) controle do processo em regime transiente, controle de corrente de partida e controle de tempo de partida; (iii) controle de fator de potência e controle de velocidade em regime permanente, durante a operação normal do processo; (iv) maximização do uso da potência de transformadores e (v) controle da qualidade de energia pelo controle de nível do desequilíbrio de tensão. Diminuindo o consumo de energia com este dispositivo são obtidos benefícios para a conservação dos recursos naturais e reflete diretamente no retorno do capital investido para a compra do equipamento.

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a variação da eficiência energética com a utilização de um inversor de frequência em um sistema motor bomba frente ao método tradicional de controle de vazão.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sensor utilizado neste projeto foi o sensor diferencial de pressão MPX5500DP da Freescale®. Esse tipo de sensor faz um uso de tecnologia piezoresistiva de diafragma siliconado para aferição de pressão. A resposta enviada pelo dispositivo passa por um circuito integrado que visa converter a tensão resposta em pressão, este mecanismo de conversão e saída de dados foi desenvolvido pelo LEMA (Laboratório de Eletrônica e Mecânica. Agrícola).

O desenvolvimento prático do trabalho consiste basicamente em três etapas. A primeira é a caracterização do funcionamento do conjunto motor bomba com o sistema de acionamento convencional e com o inversor de frequência instalado. Nessa etapa, foram levantados os dados para a confecção da curva de funcionamento da bomba, altura manométrica x vazão ($H \times Q$), em função do modo de alimentação e a frequência de operação do motor, no sistema convencional de alimentação a frequência foi fixada em 60 Hz, e com o inversor de frequência instalado as frequências avaliadas foram 60Hz, 55Hz, 50Hz, 45 Hz.

Instalaram-se duas tomadas de pressão, uma na entrada e outra na saída da bomba, para inserção do sensor de pressão e determinação da altura manométrica da bomba. Para determinação da vazão utilizou-se um sensor ultrassônico instalado na tubulação, em um trecho vertical para garantia do preenchimento da tubulação por água e uniformidade nas medições. Considerando-se que o sensor ultrassônico mede a velocidade do fluxo da água na tubulação, a vazão foi calculada com base nesta velocidade.

A caracterização se iniciou com vazão máxima do sistema e diminuição progressiva desta até que se encontrasse o valor desejado, foi realizada a determinação da altura manométrica correspondente ao primeiro ponto da curva característica

Para diminuir o erro de medição dos valores de pressão e vazão, principalmente devido à turbulência decorrente do estrangulamento do fluxo na tubulação pela válvula, foram registradas cinco repetições das medições e obtidas as médias como valor representativo de cada ponto da curva.

A obtenção dos valores de pressão e vazão para a curva característica foi realizada primeiramente para o conjunto sem a instalação do inversor de frequência e posteriormente após a instalação. Visando a avaliação de situações próximas da realidade, as frequências de operação escolhidas foram 60, 55, 50 e 45 Hz. O processo de obtenção de dados seguiu o mesmo método utilizado com motor em partida direta.

Com os valores obtidos em medição, foi possível estimar resultados de várias situações, uma vez que os dados caracterizam o funcionamento do sistema. Essa etapa do trabalho permitiu que pontos de operação semelhantes sejam comparados, gerando um ponto de vista realista da instalação do inversor de frequência.

A bomba utilizada foi a C2000N, KSB[®]*, acoplada a um motor de 2 cv. O desnível entre o nível do reservatório e o centro do eixo da sucção (altura geométrica de sucção) bem como a altura de recalque foram de 1,2 mantidos constantes pelo direcionamento do recalque da bomba ao reservatório, mantendo-se a uniformidade do nível dinâmico no reservatório e evitando-se o desperdício de água, já que o sistema é cíclico.

Após a etapa de caracterização da bomba, iniciaram-se os procedimentos para a avaliação do consumo de energia elétrica pelo conjunto motor bomba o qual foi medido com o Energy Logger Fluke®.

O consumo de energia elétrica foi medido por uma hora em cada ponto amostrado, gerando dados para a caracterização do conjunto referente ao consumo de energia elétrica. Durante a medição foi medida a velocidade da água (m/s), com o sensor ultrassônico de vazão Portalok®7s, previamente instalado.

Obtiveram-se os valores de consumo de energia elétrica com o motor integrado ao inversor de frequência e com o motor não integrado ao inversor de frequência (partida direta). Como o motor em partida direta tem frequência fixa de 60 Hz, as variáveis dependente e independente, nesse caso com comprovada correlação, são a altura manométrica e a vazão, respectivamente. Na situação com inversor de frequência integrado ao motor, além de altura manométrica e vazão, varia-se também a frequência de alimentação necessária ao objetivo desta pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao fim das medições do conjunto em partida direta os dados foram submetidos ao teste de regressão, relacionando os dados medidos gerando uma equação que defina sua correlação e ser possível estimar pontos não medidos. O teste estatístico foi realizado a um nível de 95% de confiança.

A curva de melhor ajuste dos dados foi obtida pelo modelo quadrático, que já é conhecido em representações de catálogos técnicos, com os índices estatísticos (R múltiplo, R^2 ajustado e desvio padrão) demonstra-se uma alta adequação dos modelos obtidos para caracterizar o funcionamento do conjunto motor bomba analisado e sua resposta à mudança de frequência de alimentação.

Tabela 1. Índices de correlação entre dados de altura manométrica e vazão com inversor de frequência instalado.

Frequências (Hz)	R múltiplo	R^2 ajustado	Desvio padrão
Partida Direta	0,990	0,9793	1,1775
60	0,996	0,9912	0,7813
55	0,998	0,9978	0,3375
50	0,999	0,9989	0,1988
45	0,998	0,9978	0,2205

Fonte: Autor

As equações de regressão para cada uma das frequências do inversor estão apresentadas a seguir:

$$Hm_{PD} = 35,073 - 0,07Q^2 - 0,921Q \quad (1) \quad PD$$

$$Hm_{60} = 36,436 - 0,076Q^2 - 1,023Q \quad (2) \quad 60Hz$$

$$Hm_{55} = 30,448 - 0,095Q^2 - 0,744Q \quad (3) \quad 55Hz$$

$$Hm_{50} = 25,303 - 0,082Q^2 - 0,67Q \quad (4) \quad 50Hz$$

$$Hm_{45} = 20,076 - 0,080Q^2 - 0,651Q \quad (5) \quad 45Hz$$

Onde:

Hm é a altura manométrica em MCA

Q é a vazão em M³/H

O modelo que estima o consumo de energia elétrica para o sistema em partida direta e com inversor de frequência é diferente, uma vez que estes dispõem de variáveis específicas a seu modo de operação os valores foram submetidos ao teste de regressão a fim de determinar o nível de correlação entre os mesmos, os índices são mostrados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Índices de correlação entre dados de consumo de energia com altura manométrica e vazão.

R múltiplo	R ² ajustado	Desvio padrão
0,996	0,9901	0,033

Fonte: Autor

Analisada a confiabilidade do modelo pelos índices de correlação temos a equação do consumo de energia para partida direta da seguinte maneira sendo possível estimar consumo de energia a fim de comparar o comportamento dessa variável.

$$Energia Consumida (kWh) = 1,8852 + 0,03676Q - 0,025Hm \quad (6)$$

Com o inversor instalado junto à bomba, foi possível coletar os dados de consumo de energia e realizar os testes de regressão uma vez que este foram medidos em mesmo modo de operação, ou seja com o inversor instalado.

Na Tabela 3, pode-se observar o valor dos índices de correlação entre a variável dependente e a variável independente, nesse caso o consumo de energia elétrica do conjunto com i inversor de frequência instalado.

Tabela 3. Índices de correlação entre dados de consumo de energia com altura manométrica, vazão e frequência.

R múltiplo	R ² ajustado	Desvio padrão
0,9981	0,9953	0,0247

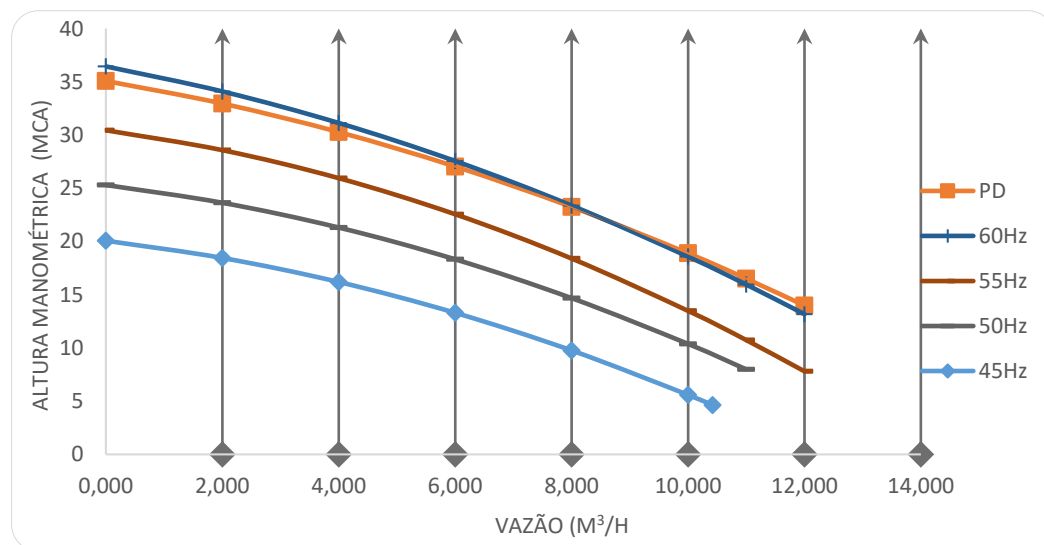
Fonte: Autor

Dados os índices nota-se alta correlação entre as variáveis e percebeu-se inclusive interação entre elas no comportamento da variável resposta apresentando uma equação da seguinte forma:

$$\text{Energia Consumida (kWh)} = -1,2727 - 0,0909Q + 0,0626Hz - 0,112Hm + 0,00853QHm + 0,0013HzHm - 0,0001135QHzHm \quad (7)$$

ANÁLISE DO CONJUNTO

Os resultados do estudo feito, deram a condição para a análise comparativa que é representada na figura 1.



Fonte: Autor.

Figura 1. Pontos de análise de consumo de energia consumo de energia x vazão.

Essa comparação foi feita com o intuito de analisar a economia de energia ocasionada pela instalação de um inversor de frequência no conjunto motor bomba. O consumo de energia do motor com inversor de frequência foi comparado com o consumo na condição de partida direta. Os valores abordados levam em consideração a diminuição da mesma uma vez que a diminuição da frequência implica na diminuição da rotação do motor, por conseguinte de vazão e altura manométrica, conforme vemos a seguir na Tabela 4.

Tabela 4. Economia relativa de energia em função da instalação de um inversor de frequência para uma mesma vazão.

Modo de operação	Vazão (m ³ /h)	Hm (mca)	Consumo (kWh)	Valor (R\$)	Economia Relativa (%)
Partida direta	2	32,80836	1,138511	0,408976	-
60Hz	2	34,00762	0,991327	0,356104	12,93
55Hz	2	28,56323	0,734803	0,263956	35,46
50Hz	2	23,62476	0,51178	0,183842	55,05
45Hz	2	18,42881	0,355811	0,127814	68,75
Partida direta	4	30,2274	1,276555	0,458564	-
60Hz	4	31,09415	1,028517	0,369464	19,43
55Hz	4	25,94431	0,786429	0,282501	38,39
50Hz	4	21,30436	0,565708	0,203214	55,68
45Hz	4	16,19106	0,406853	0,14615	68,13
Partida direta	6	27,05505	1,429384	0,513463	-
60Hz	6	27,55427	1,065483	0,382743	25,46
55Hz	6	22,55943	0,840698	0,301996	41,18
50Hz	6	18,32441	0,618088	0,222029	56,76
45Hz	6	13,30619	0,453744	0,162994	68,26
Partida direta	8	23,29132	1,596997	0,573673	-
60Hz	8	23,38797	1,095759	0,393619	31,39
55Hz	8	18,40859	0,887097	0,318663	44,45
50Hz	8	14,6849	0,657621	0,236231	58,82
45Hz	8	9,774186	0,483196	0,173574	69,74
Partida direta	10	18,9362	1,779395	0,639194	-
60Hz	10	18,59526	1,112881	0,399769	37,46
55Hz	10	13,49178	0,915113	0,328727	48,57
50Hz	10	10,38583	0,67301	0,241759	62,18
45Hz	10	5,595057	0,481919	0,173115	72,92
Partida direta	11	16,53686	1,876138	0,673946	-
60Hz	11	15,96399	1,11449	0,400347	40,60
55Hz	11	10,74614	0,918942	0,330102	51,02
50Hz	11	7,988968	0,66812	0,240002	64,39
45Hz	-	-	-	-	-
Partida direta	12	13,98969	1,976578	0,710026	-
60Hz	12	13,17612	1,110385	0,398873	43,82
55Hz	12	7,809016	0,914233	0,328411	53,75
50Hz	-	-	-	-	-
45Hz	-	-	-	-	-

Fonte: Autor.

Observa-se uma economia considerável de energia com a instalação do inversor de frequência. Nota-se que, mesmo o motor operando com 60Hz, a mesma de quando o motor é alimentado diretamente da rede, ainda assim ocorre economia de energia, a economia foi de, no mínimo, 12,93% podendo chegar em maiores vazões a 72,92%. O irrigante pode necessitar vencer algum desnível topográfico em sua propriedade, sendo assim, é preciso mostrar o comportamento do consumo de energia elétrica em função da altura manométrica utilizada.

Vê-se a seguir esta comparação para alturas manométricas usuais, lembrando que o efeito avaliado é a instalação do inversor, portanto a economia ou prejuízo mostrado são sempre relativos ao sistema operando em partida direta. será mostrada essa análise de consumo de energia na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Economia relativa de energia em função da instalação de um inversor de frequência para uma mesma altura manométrica.

Modo de operação	Vazão (m ³ /h)	Hm (mca)	Consumo (kWh)	Valor (R\$)	Economia Relativa (%)
Partida direta	4	30	1,289005	0,463036	
60Hz	5	30	1,04059	0,373801	19,27
55Hz					
50Hz					
45Hz					
Partida direta	7	25	1,521576	0,546581	
60Hz	7	25	1,08606	0,390134	28,62
55Hz	5	25	0,802995	0,288452	47,23
50Hz					
45Hz					
Partida direta	10	20	1,734974	0,623237	
60Hz	9	20	1,110222	0,398814	36,01
55Hz	7	20	0,871939	0,313218	49,74
50Hz	5	20	0,590937	0,212276	65,94
45Hz			1,5443	0,554743	10,99
Partida direta	12	15	1,936749	0,695719	
60Hz	11	15	1,11394	0,400149	42,48
55Hz	9	15	0,909556	0,326731	53,04
50Hz	8	15	0,655249	0,235378	66,17
45Hz	5	15	0,428787	0,154029	77,86

Fonte: Autor

Nesse caso obtemos economia relativa na ordem de, no mínimo, 19,27% podendo chegar a 77,86%. Podemos ver claramente, uma diminuição considerável na economia de energia à medida que a vazão é diminuída.

Esse comportamento está dentro do esperado uma vez que o motor continua operando nas condições máximas quando controlado pela válvula. O processo, naturalmente, desperdiça energia, pois o líquido é inicialmente levado em uma pressão maior que a necessária para, depois, ter uma perda de carga causada pelo estrangulamento da tubulação na válvula. Enquanto que, no controle por inversor, o motor opera em uma condição diferente de rotação sem perda de carga notória logo na saída da bomba.

CONCLUSÃO

Os dados obtidos durante o teste foram suficientes para gerar um modelo que caracteriza o comportamento do conjunto motor bomba em função da instalação do inversor de frequência.

A instalação do inversor de frequência junto ao conjunto motor bomba gerou economia de energia elétrica em relação à operação em partida direta para uma mesma vazão.

O inversor de frequência também gerou economia de energia para mesma altura manométrica no conjunto motor bomba.

Essa economia gerada pelo inversor de frequência resultou em aumento no rendimento do conjunto motor bomba, uma vez que em pontos de operação de grandezas semelhantes necessitou-se de menos energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. A. B. **Aplicação de Inversor de Frequência para Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação por Aspersão**. pág. 142. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2003.

FLEXIM. Disponível em: <<http://www.flexim.com/pt-br>>. Acesso em: 27/09/2014.

Fluke® manual do usuário energy logger 1730 trifásico, 2013. Disponível em: <<http://register.fluke.com>>. Acesso em: 29/09/2014.

FREESCALE. Disponível em: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/mpx5500.pdf>. Acesso em: 29/09/2014.

HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; SANTOS A. H. M. S. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 2. ed. Itajubá: Efei, 2001. 597p.

KSB. Disponível em: <<http://www.rowteki.com.br/pdf/bombas/Bombas%20Hydrobloc%20CN.pdf>>. Acesso em: 28/09/2014.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; FERREIRA, Raquel Scalia Alves; CHRISTOFIDIS, Demétrios. **Estudo do uso da água e energia elétrica para irrigação no Brasil**. Disponível em <<http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc>>. Acesso em: 29/09/2014.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. P. C. **Seleção e Aplicação de Motores Elétricos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 511 p. MARQUES, Patrícia Angélica Alves;

MARQUES, Tadeu Alcides; FRIZZONE, José Antônio. **Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP**. Revista Irriga, v. 11, n. 1, p. 55-65, Botucatu, SP, 2006.

Pereira, L. S.; Paredes, P.; Eholpankulov, E. D.; Inchenkova, O. P.; Teodoro, P. R.; Horst, M. G. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management*, v.96, p.723-735, 2009.

TEIXEIRA, Marconi Batista et al. Consumo hídrico e energético da irrigação de café no triângulo mineiro e oeste da bahia. *Rbai*, [s.l.], v. 5, n. 2, p.134-140, 30 jun. 2011. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v5n200046>.