

ECONOMIA DE ENERGIA COM USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA PERÍMETRO IRRIGADO

Ricardo de Oliveira Camargo Scarcelli¹, Delly Oliveira Filho², Marcos Caldeira Ribeiro³, Daniela de Carvalho Lopes⁴

RESUMO

O recente crescimento da economia brasileira e as perspectivas mostradas pelos principais indicadores econômicos de que esse crescimento deve se manter e, até se elevar pelos próximos anos levou o sistema de geração e abastecimento de energia elétrica brasileiro a promover e estimular o uso racional e mais eficiente da energia elétrica no país. Como forma de tentar eficientizar e racionalizar o uso da energia elétrica, pode-se citar a tarifa de incentivo para irrigação noturna, com descontos no preço da energia utilizada no período noturno pré-estabelecido e a taxa devida ao uso de energia elétrica com fator de potência abaixo de um limite estabelecido por cada empresa fornecedora de energia. Por meio do uso do inversor de frequência, pôde-se simular um sistema de abastecimento de água a fim de se racionalizar o uso de energia elétrica. A fim de se realizar uma economia de energia elétrica por meio da eficientização do seu uso com controle de fator de potência e aumentando o rendimento do motor elétrico de acionamento da carga, no caso bomba centrífuga.

Palavras-chave: controle de motores elétricos, gerenciamento do lado da demanda, uso racional de energia, variador de velocidade.

ABSTRACT

ELECTRIC POWER ECONOMY WITH USE OF FREQUENCY INVERTOR IN SYSTEMS OF ELEVATION OF WATER FOR IRRIGATED PERIMETER.

The recent growth of the Brazilian economy and the perspectives shown by the main economical indicators that growth owes if to maintain and, until rising for next years it took the generation system and Brazilian electric power provisioning to promote and to stimulate the rational and more efficient use of the electric power in the country. As form of trying to win efficiency and to rationalize the use of the electric power the incentive tariff can be mentioned for nocturnal irrigation, with discounts in the price of the energy used in the pre-established night period and the due tax to the electric power use with potency factor below an established limit for each supplying company of energy. Through the use of the frequency inverter system of water supply could be simulated in order to if it rationalizes the electric power use. In order to take place an electric power economy through the best efficiency with control of potency factor and increasing the income of the electric motor of drive of the load, in the case centrifugal pump.

Keywords: Control of electric motors, controller of speed, Demand side management, rational use of energy.

Recebido para publicação em 15/06/2009. Aprovado em 16/09/2009.

1 Graduando em Engenharia Elétrica, UFV, e-mail: rocenceslau@yahoo.com.br

2 Professor do Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: delly@ufv.br

3 Doutorando em Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: mcaldeira@vicosa.ufv.br

4 Pós-doutorando em Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: danicopes@gmail.com

INTRODUÇÃO

A produção agrícola nacional tem real possibilidade de aumentar e suprir, de forma ainda melhor, o mercado interno e ser de grande potencial competitivo no setor externo. Como fator fundamental desta expansão pode ser citada a utilização racional da energia elétrica.

A divisão percentual de propriedades eletrificadas por região do Brasil ocorre da seguinte forma: cerca de 61,6% de propriedades eletrificadas na Região Sul, 46,3% na Região Sudeste, 28,2% na Região Centro-Oeste, 11,1% na Região Nordeste e apenas 1,8% na Região Norte (ALCANTARA, 1999).

Segundo o último censo agropecuário realizado pelo IBGE (1995/96), as terras utilizadas para a agricultura estavam 53,0% em pequenas propriedades (até 200 ha), 34,5% em médias propriedades (de 200 a 2000 ha) e apenas 12,5% nas grandes (acima de 2000 ha).

A mão-de-obra agrícola é, predominantemente, utilizada nas pequenas propriedades. Segundo o censo agropecuário IBGE (1995/96), 87,0% dos empregos rurais são gerados nas pequenas propriedades, 10,5% nas médias propriedades e apenas 2,5% nas grandes propriedades.

O Brasil possui a segunda maior área de terras agricultáveis do mundo, no entanto é claro e evidente que estas terras devem ser bem aproveitadas de maneira a promover uma eficiência otimizada, dos recursos físicos e de pessoal.

Uma das formas de otimizar esse rendimento é ter um maior conhecimento do cenário atual e da realidade do campo, bem como das tecnologias disponíveis para se ter um horizonte factível a ser alcançado. Baseando-se nos dados a respeito da distribuição de empregos na área rural, pode-se inferir que uma das possíveis soluções para aperfeiçoar o uso de terras agricultáveis é por meio de pequenas propriedades, que em uma pequena área física conseguem concentrar um grande número de trabalhadores empregados.

Para conseguir aumentar o número de pequenas propriedades, deve-se estimular a fixação dos pequenos produtores no campo e ainda induzir a migração para o campo.

A qualidade de vida dos produtores rurais é o grande entrave nesta questão e um dos grandes vilões para a má qualidade de vida na zona rural está relacionado com a energia elétrica. Em alguns casos, pela sua falta e em outros, seu uso é feito de maneira incorreta.

O uso racional da energia elétrica deve ser abrangente, pois incorpora diversos fatores. Como exemplo, necessidade de conscientização dos usuários, e melhoria tecnológica de equipamentos. Também processos devem ser eficientizados o que significa, em geral, usar materiais e técnicas para minimizar as perdas, melhores arranjos de equipamentos, o que gera uma maior racionalização do uso da energia elétrica no sistema como um todo.

Na racionalização do uso da energia elétrica, o controle de velocidade de motores elétricos é desejado. Entre os métodos de controle de velocidade de motores elétricos, citam-se: variação do número de pólos, a variação do escorregamento e, em especial, a variação da frequência de alimentação. O controle da variação da frequência, além a de variar a velocidade, gera também, se bem implementado, o uso eficiente da energia (PROCEL ELETROBRÁS 2002).

Inversores de frequência são equipamentos que custam de 4 a 12 vezes o preço dos motores que controlam. Contudo, o emprego de inversores de frequência tem se tornado viável economicamente, mesmo para motores de menores potências. O seu emprego 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) em regime permanente - durante a operação normal do processo: controle de fator de potência e controle de velocidade e (iv) controle da qualidade de energia, controle de nível de tensão e de desequilíbrio de tensão.

No controle de velocidade de conjunto moto-bombas, os inversores ajustam a frequência de alimentação dos motores elétricos de corrente alternada (AC), modificando também a rotação dos mesmos. Com a alteração da rotação, mantendo-se, por meio das leis de semelhança física de máquinas hidráulicas rotativas (equações 1 a 3), as curvas de funcionamento da bomba (altura manométrica versus vazão, entre outras.) são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema (Figura 1).

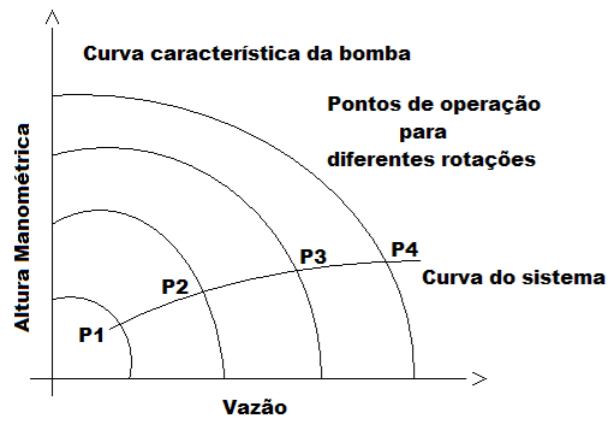


Figura 1. Curva característica de bomba centrífuga para diferentes rotações em diferentes pressões e vazões. Fonte: RODRIGUES (2003).

A influência do emprego de inversores de frequência em sistemas de acionamento de moto-bombas vai além de se controlar a velocidade de motores elétricos de corrente alternada. Como motores elétricos fornecem ou tentam fornecer a demanda que as cargas lhes solicitam, a mudança de velocidade imposta pelos inversores muda o ponto de estado do sistema. Assim, a fim de atender a carga nesta nova condição de velocidade, os motores irão mudar o torque fornecido a carga. A idéia aqui é de que esta nova condição de operação ocorra para aumentar o rendimento em comparação à condição inicial.

O uso do inversor deve seguir alguns requisitos básicos como uso de sensores e controle de tensão e de frequência. Estas medições podem ser feitas por meio de uma unidade lógica programável (computador ou PLC). O sistema deve decidir o ponto de operação a fim de que o controle atenda aos requisitos técnicos e de uso racional de energia.

A alteração da frequência de alimentação, quando aplicada em um sistema de bombeamento de água para irrigação, tem influência direta sobre a pressão e vazão de bombeamento, como indicadas a seguir pelas equações de Rateaux, Equações de 1 a 3.

Relação entre rotação (n) e vazão (Q):

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^1 = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (1)$$

Relação entre rotação (n), pressão (H) e torque (T):

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

Relação entre rotação (n) e potência (P):

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

Nas lavouras irrigadas, o consumo de energia elétrica pode representar uma parcela significativa dos custos de produção, podendo chegar a até 30%. A redução de custos relativos à energia elétrica utilizada na irrigação é de fundamental importância e o uso do inversor de frequência aliado a uma boa logística de adequação pode ajudar a reduzir o custo de produção das lavouras irrigadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa em Viçosa, MG.

Inicialmente, foi determinada a disposição física de um perímetro hipotético e dos lotes constituintes. O critério para a determinação das características de simulação do perímetro irrigado foi o de ser o mais genérico possível, com isso os efeitos de comparação ficariam mais simples e esta comparação também ficaria mais clara.

Foram realizados testes e simulações a fim de comparar os gastos com energia elétrica em um sistema de perímetro irrigado. A primeira etapa do projeto se concentrou em simular o sistema de irrigação, a fim de se avaliar pressões e vazões do sistema em função do número de irrigantes em operação.

No perímetro irrigado genérico simulado, as suas disposições de lotes, bomba de água, motor, entre outras estão de acordo com as técnicas que garantem um melhor rendimento do sistema. O perímetro simulado é mostrado na Figura 2.

Determinados os dados relativos à disposição dos lotes e das culturas a serem irrigadas, elaborou-se um programa computacional que simula os efeitos da variação da pressão e da vazão de trabalho em cada lote no sistema todo. O programa computacional chamado GALATEIA, foi construído em linguagem C++, e com lógica de interface gráfica abrangente para que seus dados de saída pudessem ser bem visualizados, de acordo com variações nas entradas. O

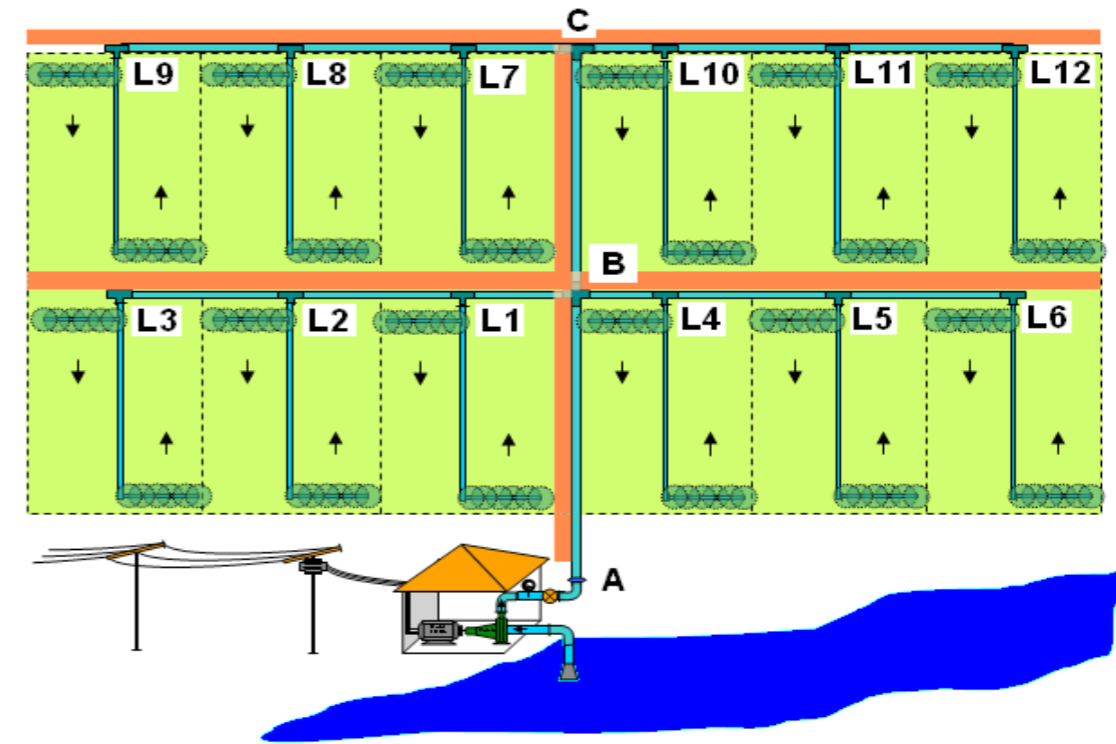


Figura 2 . Sistema de distribuição de lotes para o perímetro irrigado simulado. Fonte: Ribeiro (2007).



Figura 3. Fluxograma referente ao programa computacional de simulação hidráulica para perímetro irrigado GALATEIA.

fluxograma referente ao funcionamento do software GALATEIA é mostrado na Figura 3.

Este programa computacional contém 3 telas sendo uma principal (Figura 4) com os dados de entrada e saída e duas telas secundárias com dados gerais do perímetro e com dados gerais da tubulação utilizada.

Na tela principal do programa computacional GALATEIA aparecem os dados de entradas e saídas referentes a cada lote e a cada tubulação entre lotes. Nesta tela o projetista pode inserir os valores de vazão referentes a cada lote. Estes valores podem ser nulos, caso a irrigação seja cancelada naquele momento no lote, entretanto, a vazão não pode exceder um valor máximo predeterminado pelo programa.

Devem ser inseridos os valores das pressões de serviço em cada lote, sendo estes variáveis, com um valor mínimo para a pressão de trabalho do lote e uma pressão máxima correspondendo ao sistema de irrigação.

Depois de inseridos os dados referentes as vazões e pressões de serviço devem ser inseridos os outros dados nas telas tipo de perímetro e tubulação.

Os valores da vazão por lote (em $m^3 s^{-1}$ e $L s^{-1}$), perda acumulada até o lote, altura manométrica e pressão em cada nó são calculados de acordo com os dados especificados nas outras telas do programa. Depois destes valores serem recalculados são reimpressos, nas colunas das tabelas de dados da tela principal.

Na penúltima coluna constam os valores da altura manométrica, que é o valor utilizado para se fazer os cálculos de potências hidráulica, mecânica e elétrica de trabalho do perímetro irrigado.

O maior valor encontrado nesta coluna é utilizado para se calcular a pressão hidráulica. Deve ser utilizado o maior valor porque este é o valor que garante que a pressão mínima de trabalho nos aspersores e válvulas em todos os lotes será atingida.

A tela secundária tipo do perímetro, mostrada na Figura 5, é a tela referente aos dados inseridos pelo projetista que fazem referência aos dados físicos gerais do perímetro. Dentre eles, pode-se citar o material utilizado nas tubulações, a velocidade de referência e a altura de sucção.

| NÓS E LOTES | VAZÃO POR LOTE (M ³ /H) | PRESSÃO DE SERVIÇO (M) | COTA DE TOMADA D'ÁGUA (MM) | VAZÃO POR LOTE (M ³ /S) | VAZÃO POR LOTE (L/S) | PERDA ACUMULADA ATÉ O LOTE (L/S) | ALTURA MANOMÉTRICA ATÉ O LOTE (L/S) | PRESSÃO EM CADA NÓ (L/S) |
|-------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| SUCÇÃO | 240 | 42,00 | 3,00 | 0,06666666 | 66,6666666 | 0 | 0 | 42 |
| A -- B | 240 | 42,00 | 8,51 | 0,06666666 | 66,6666666 | 0,04472609 | 54,5347260 | 63,7875764 |
| B -- C | 120 | 42,00 | 9,49 | 0,03333333 | 33,3333333 | 1,91439694 | 64,9143969 | 61,9179455 |
| B -- L1 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,01666666 | 16,6666666 | 1,25265182 | 55,7426518 | 62,5796507 |
| L1 -- L2 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,01111111 | 11,1111111 | 9,23768455 | 63,7276845 | 54,5946179 |
| L2 -- L3 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,00555555 | 5,55555555 | 11,4526716 | 65,9426716 | 52,3796308 |
| B -- L4 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,01666666 | 16,6666666 | 1,21813965 | 55,7081396 | 62,6141628 |
| L4 -- L5 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,01111111 | 11,1111111 | 9,20317239 | 63,6931723 | 54,6291301 |
| L5 -- L6 | 20,00 | 42,00 | 11,51 | 0,00555555 | 5,55555555 | 11,4181595 | 65,9081595 | 52,4141430 |
| C -- L7 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,01666666 | 16,6666666 | 3,12228267 | 66,1222826 | 52,2000198 |
| L7 -- L8 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,01111111 | 11,1111111 | 11,1073154 | 74,1073154 | 44,2149871 |
| L8 -- L9 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,00555555 | 5,55555555 | 13,3223025 | 76,3223025 | 42 |
| C -- L10 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,01666666 | 16,6666666 | 3,08777050 | 66,0877705 | 52,2345320 |
| L10 -- L11 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,01111111 | 11,1111111 | 11,0728032 | 74,0728032 | 44,2494993 |
| L11 -- L12 | 20,00 | 42,00 | 21,00 | 0,00555555 | 5,55555555 | 13,2877903 | 34,2877903 | 42,0345121 |

Figura 4. Tela principal do software de simulação hidráulica para perímetro irrigado GALATEIA.

| PERDA DE CARGA NA TUBULAÇÃO (H) | VELOCIDADE DE REFERÊNCIA (M/S) |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Ferro Fundido, novo | 1,5 |
| | 3 |
| | 0,05 |
| | 0,02 |
| | 3 |
| | 9,49 |
| | 8,51 |

Figura 5. Tela secundária tipo de perímetro do programa computacional de simulação hidráulica para perímetro irrigado GALATEIA.

Os valores finais das pressões necessárias em cada lote são influenciados pelos dados inseridos pelo projetista, o que garante importância para as escolhas feitas nesta parte do programa.

A relação entre a altura manométrica pelos dados do tipo de material utilizado e da velocidade de referência é direta. Portanto, qualquer alteração nestes dados é percebida por todo o sistema. A altura manométrica é calculada utilizando-se Equação 4:

$$H_{man} = HS + HL + HT + Hg + PS \quad (4)$$

em que

H_{man} = altura manométrica, m;

HS = altura de sucção, m;

HL = perda de carga localizada, m;

HT = perda de carga na tubulação, m;

Hg = altura geométrica, m;

Ps = pressão de serviço, m.

A tela secundária tubulação, apresentada na Figura 6, é a tela referente aos dados inseridos pelo projetista que fazem referência aos dados físicos gerais da tubulação. Esses dados são as distâncias entre tomadas da água dos lotes e conseqüentemente as distâncias necessárias para se calcular os valores do projeto de perímetro irrigado.

| NÓS E LOTES | EXTENSÃO DO SETOR (M) | DIÂMETRO CALCULADO (M) | DIÂMETRO COMERCIAL (M) | VELOCIDADE CORRIGIDA (M/S) | PERDA LOCALIZADA POR TRECHO |
|-------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| SUCÇÃO | 6 | 0,23788293 | 0,25 | 1,35811900 | 0,04472609 |
| A -- B | 340 | 0,23788293 | 0,25 | 1,35811900 | 2,53447885 |
| B -- C | 305 | 0,16820863 | 0,2 | 1,06103047 | 1,86963084 |
| B -- L1 | 175 | 0,11894146 | 0,15 | 0,94313819 | 1,20792572 |
| L1 -- L2 | 340 | 0,09711530 | 0,1 | 1,41470729 | 7,98503273 |
| L2 -- L3 | 340 | 0,06867088 | 0,1 | 0,70735364 | 2,21498713 |
| B -- L4 | 170 | 0,11894146 | 0,15 | 0,94313819 | 1,17341356 |
| L4 -- L5 | 340 | 0,09711530 | 0,1 | 1,41470729 | 7,98503273 |
| L5 -- L6 | 340 | 0,06867088 | 0,1 | 0,70735364 | 2,21498713 |
| C -- L7 | 175 | 0,11894146 | 0,15 | 0,94313819 | 1,20792572 |
| L7 -- L8 | 340 | 0,09711530 | 0,1 | 1,41470729 | 7,98503273 |
| L8 -- L9 | 340 | 0,06867088 | 0,1 | 0,70735364 | 2,21498713 |
| C -- L10 | 170 | 0,11894146 | 0,15 | 0,94313819 | 1,17341356 |
| L10 -- L11 | 340 | 0,09711530 | 0,1 | 1,41470729 | 7,98503273 |
| L11 -- L12 | 340 | 0,06867088 | 0,1 | 0,70735364 | 2,21498713 |

Figura 6. Tela secundária tubulação do programa computacional de simulação hidráulica para perímetro irrigado GALATEIA.

Na segunda parte deste artigo, objetivou-se definir os tipos de plantas cultivadas nos lotes e as suas jornadas diárias de uso da água para irrigação. Para isso simulação foram escolhidas algumas culturas cultivadas nos perímetros da região Nordeste do Brasil, que é a região onde se concentra um grande número de perímetros irrigados.

Foram escolhidas as culturas de banana, goiaba, mamão maracujá e manga. Os dados referentes às lâminas de irrigação durante o ano, para cada

cultura, são mostrados no Quadro 1, foram obtidos utilizando-se: Evapotranspiração de referência (ET_o): que é a taxa de evapotranspiração que ocorre de uma superfície de referência; Evapotranspiração do cultivo (ET_c): que é a evapotranspiração de um cultivo sadio que alcança o seu potencial máximo de condições de produtividade em solos de fertilidade e umidades favoráveis; e Coeficiente de cultura (kc): que é a relação entre a ET_c e a ET_o observadas num período de tempo.

Quadro 1. Quantidade de água necessária para culturas durante o ciclo ou ano

| Cultura | ETo (máximo (mm/mês)) | Kc (máx) | ETc (mm/mês) | Ocupação do Solo (%) | Eficiência da irrigação | Lâmina Líquida (mm) | Lâmina Bruta (mm) | UC (mm/dia) | Vazão unitária (L/s/há) |
|----------|-----------------------|----------|--------------|----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|-------------|-------------------------|
| Abacaxi | 193,93 | 0,85 | 164,84 | 100% | 90% | 164,84 | 183,16 | 5,32 | 0,82 |
| Banana | 193,93 | 1,05 | 203,63 | 75% | 90% | 152,72 | 169,69 | 6,57 | 0,76 |
| Feijão | 193,93 | 1,15 | 223,02 | 100% | 80% | 223,02 | 278,77 | 7,19 | 1,25 |
| Goiaba | 193,93 | 0,75 | 145,45 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Limão | 193,93 | 0,75 | 145,45 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Mamão | 193,93 | 0,75 | 145,45 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Manga | 193,93 | 0,75 | 145,45 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Maracujá | 193,93 | 0,75 | 145,45 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Melão | 193,93 | 0,95 | 184,23 | 90% | 95% | 165,81 | 174,54 | 5,94 | 0,78 |
| Pinha | 193,93 | 0,75 | 145,44 | 75% | 95% | 109,09 | 114,83 | 4,69 | 0,51 |
| Uva | 192,92 | 0,80 | 155,14 | 75% | 95% | 116,36 | 122,48 | 5,00 | 0,55 |

Fonte: Ribeiro (2007).

Com estes dados, pode-se estabelecer os tempos de irrigações diárias para cada lote. Estabeleceu-se que os sistemas de irrigação dos lotes seriam ligados a partir de 0:00 h., todos juntos, e, conforme fossem concluídos seus objetivos de irrigação diários, cessariam suas irrigações. Foram então feitas, deste modo, comparações entre sistemas que utilizaram ou não o inversor de frequência.

Os lotes do perímetro irrigado genérico escolhido têm 10 hectares cada um. Foram escolhidas quatro combinações de culturas cultivadas nos lotes:

1ª Combinação - Banana (8 lotes), goiaba (1 lote), mamão (1 lote), manga (1 lote) e maracujá (1 lote);

2ª Combinação - Abacaxi (8 lotes), limão (1 lote), mamão (1 lote), manga (1 lote) e goiaba (1 lote);

3ª Combinação - Uva (8 lotes), limão (1 lote), mamão (1 lote), manga (1 lote) e maracujá (1 lote);

4ª Combinação - Melão (8 lotes), pinha (1 lote), mamão (1 lote), manga (1 lote) e limão (1 lote).

A potência elétrica demandada pelo sistema de irrigação pode ser expressa pelas Equações 5a e 5b.

$$P_{kW} = \frac{0,736 * 9,81 \gamma Q H_{man}}{9,8 * 75 \eta_b \eta_m} \quad (5a)$$

$$P_{cv} = \frac{9,81 \gamma Q H_{man}}{9,8 * 75 \eta_b \eta_m} \quad (5b)$$

em que

Pkw = potência elétrica necessária ao sistema, kw;

Pcv = potência elétrica ao sistema, cv;

g = densidade da água, kg m⁻³;

Q = vazão bombeada, m³, s⁻¹;

H man = Altura manométrica, mca;

ηb = Rendimento ou eficiência da Bomba, decimal;

ηm = Rendimento ou eficiência do motor, decimal;

9.81 = Aceleração da gravidade, m;

9.8 = Fator de conversão, N kgf⁻¹

0.736 = Fator de conversão; kW cv⁻¹; e

75 = Fator de conversão; (kgf . ms⁻¹) cv⁻¹;

1000 = Peso específico da água, 1000 N m⁻³.

Para se utilizar estas fórmulas se fazem necessárias algumas considerações. O valor da vazão deve sempre ser observado no campo da vazão do setor A – B da Figura 2.

Esta é a vazão que a moto-bomba deve fornecer ao perímetro irrigado.

O valor da altura manométrica utilizado deve ser o maior valor observado na penúltima coluna da tela principal do programa GALATEIA.

O conjunto moto-bomba utilizado deve ser o de potência igual ou um pouco superior à necessária pelo perímetro irrigado quando este estiver com todos irrigantes acionados.

Os seus rendimentos devem atender as exigências mínimas de acordo com a ANA (Agência Nacional de Águas) e ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

São Apresentados os quadros de valores de referência dos rendimentos de bombas dá água (Quadro 2) e de motores (Quadro 3).

Quadro 2. Rendimento médio de bombas centrífugas (ηb) em função da vazão de recalque (Q).

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q (m ³ h ⁻¹) | 18 | 27 | 36 | 54 | 72 | 90 | 108 | 144 | 180 | 360 | 720 |
| Q (L s ⁻¹) | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 100 | 200 |
| ηb | 0,52 | 0,61 | 0,66 | 0,68 | 0,71 | 0,75 | 0,80 | 0,84 | 0,85 | 0,87 | 0,88 |

Fonte: Azevedo Netto (2006).

Quadro 3 . Rendimentos nominais mínimos, para motores elétricos convencionais e de alto rendimento para eficiência energética para 2 e 4 pólos.

| Potência Nominal | Motores Convencionais | Motores de Alto Rendimento | |
|------------------|-----------------------|----------------------------|------|
| | | 2 | 4 |
| cv | kW | Número de pólos | |
| | | 2 | 4 |
| 1 | 0,75 | 77,0 | 78,0 |
| 1,5 | 1,1 | 78,5 | 79,0 |
| 2 | 1,5 | 81,0 | 81,5 |
| 3 | 2,2 | 81,5 | 83,0 |
| 4 | 3,0 | 82,5 | 83,0 |
| 5 | 3,7 | 84,5 | 85,0 |
| 6 | 4,5 | 85,0 | 85,5 |
| 7,5 | 5,5 | 86,0 | 87,0 |
| 10 | 7,5 | 87,5 | 87,5 |
| 12,5 | 9,2 | 87,5 | 87,5 |
| 15 | 11 | 87,5 | 88,5 |
| 20 | 15 | 88,5 | 89,5 |
| 25 | 18,5 | 89,5 | 90,5 |
| 30 | 22 | 89,5 | 91,0 |
| 40 | 30 | 90,2 | 91,7 |
| 50 | 37 | 91,5 | 92,4 |
| 60 | 45 | 91,7 | 93,0 |
| 75 | 55 | 92,4 | 93,0 |
| 100 | 75 | 93,0 | 93,2 |
| 125 | 90 | 93,0 | 93,2 |
| 150 | 110 | 93,0 | 93,5 |
| 175 | 132 | 93,5 | 94,1 |
| 200 | 150 | 94,1 | 94,5 |
| 250 | 185 | 94,1 | 94,5 |

Fonte: ABNT (1996).

Para se utilizar estes quadros devem ser determinadas as potências do motor e da bomba de água utilizados. Quando o sistema está sob plena carga toda a potência do sistema é requerida pelo sistema, portanto o motor e a bomba de água utilizados sem inversor de frequência e com inversor de frequência devem ter a mesma potência em ambos os casos.

A potência demandada pela bomba pode ser calculada utilizando-se a Equação 6.

$$P_a = \frac{9,81 \gamma Q H_{man}}{9,8 * 75 \eta_b} \quad (6)$$

em que

Pa = Potência absorvida pela bomba, cv.

A potência do motor deve ser determinada utilizando-se a Equação 6, pois a potência fornecida no eixo motor deve ser a mesma que a potência demandada pela bomba de água. Com isso, a potência do motor deve ser o primeiro valor comercial acima do valor calculado. É conveniente que os motores para acionamento de bombas tenham um fator de serviço acima de 1.

Para se fazer a estimativa dos custos anuais de energia elétrica, foram considerados os valores da tarifa de energia elétrica de R\$ 0,11545/kWh para a

tarifa no período úmido do ano e R\$ 0,12700/kWh para a tarifa no período seco do ano. O cálculo de custos foi feito de acordo com os valores calculados utilizando-se a Equação 7. O número de horas de funcionamento anual foi calculado com o auxílio do Quadro 1, onde são mostradas as necessidades hídricas de cada cultura.

$$C_a = \frac{0,736 H_f C_e P_n I_c}{\eta_m} \quad (7)$$

em que

Ca = Custo anual de energia elétrica, R\$.ano-1;
 Hf = Período de funcionamento, h.ano-1;
 Ce = Tarifa de energia elétrica, R\$.kWh-1;
 Pn = Potência nominal do motor elétrico, cv;
 Ic = Índice de carregamento do motor elétrico, %;
 η_m = Rendimento do motor elétrico, %;

0,736 = Fator de conversão da potência em cv para kW;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram feitas as simulações para o sistema, a fim de se determinar as necessidades do perímetro irrigado. Foram então simuladas as pressões para todos os irrigantes e para cada instante em que a irrigação era cessada em alguns lotes. De posse destes dados referentes ao estado do sistema no instante de tempo utilizado, puderam ser feitas as comparações.

Pode-se, então, elaborar o quadro comparativo de potência requerida pelo sistema com e sem a utilização do inversor quando o sistema atua sob plena carga, e com as variações de carga de acordo com o cessar da irrigação mostrada no Quadro 4.

Quadro 4 . Potência do motor e da bomba de água utilizados com e sem o uso de inversor de frequência

| | Potência do Motor (cv) | Rendimento do Motor (%) | Frequência de alimentação (Hz) | Potência da Bomba (cv) | Rendimento da Bomba (%) |
|--|------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Com todos irrigantes acionados para primeira combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 29,05 | 71,00 |
| Com IF* | 29,05 | 92,40 | 58,10 | 29,05 | 71,00 |
| Com os irrigantes de manga, maracujá, goiaba e mamão desacionados na primeira combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 29,05 | 71,00 |
| Com IF* | 16,45 | 92,40 | 36,02 | 16,45 | 67,00 |
| Com todos irrigantes acionados para segunda combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 28,14 | 72,00 |
| Com IF* | 28,14 | 92,40 | 56,28 | 28,14 | 72,00 |
| Com os irrigantes de manga, limão, goiaba e mamão desacionados na segunda combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 28,14 | 72,00 |
| Com IF* | 17,48 | 92,40 | 37,27 | 17,48 | 70,00 |
| Com todos irrigantes acionados para terceira combinação | | | | | |
| Sem IF* | 25,00 | 92,40 | 60,00 | 22,21 | 69,00 |
| Com IF* | 22,21 | 92,40 | 53,30 | 22,21 | 69,00 |
| Com os irrigantes de manga, uva, limão e mamão desacionados na terceira combinação | | | | | |
| Sem IF* | 25,00 | 92,40 | 60,00 | 22,21 | 69,00 |
| Com IF* | 12,63 | 92,40 | 30,31 | 12,63 | 66,00 |
| Com todos irrigantes acionados para quarta combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 27,08 | 72,00 |
| Com IF* | 27,08 | 92,40 | 54,16 | 27,08 | 72,00 |
| Com os irrigantes de manga, pinha, limão e mamão desacionados na quarta combinação | | | | | |
| Sem IF* | 30,00 | 92,40 | 60,00 | 27,08 | 72,00 |
| Com IF* | 17,43 | 92,40 | 38,63 | 17,43 | 68,50 |

IF* = Inversor de Frequência.

Utilizando-se a Equação 7, pode-se calcular os valores dos custos de energia elétrica no perímetro irrigado com e sem o uso do inversor de frequência. Os valores calculados para as quatro combinações estudadas são mostrados nos Quadros 5, 6, 7 e 8:

Quadro 5. Custos de energia elétrica no perímetro irrigado para a primeira combinação com e sem inversor de frequência

| Tarifa | Custo anual de energia elétrica (R\$) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Período úmido | |
| Sem Inversor de Frequência | 11.963,00 |
| Com Inversor de Frequência | 9.979,13 |
| Período seco | |
| Sem Inversor de Frequência | 13.159,82 |
| Com Inversor de Frequência | 10.977,48 |

Quadro 6. Custos de energia elétrica no perímetro irrigado para a segunda combinação com e sem inversor de frequência

| Tarifa | Custo anual de energia elétrica (R\$) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Período úmido | |
| Sem Inversor de Frequência | 11.963,00 |
| Com Inversor de Frequência | 9.863,38 |
| Período seco | |
| Sem Inversor de Frequência | 13.159,82 |
| Com Inversor de Frequência | 10.850,15 |

Quadro 7. Custos de energia elétrica no perímetro irrigado para a terceira combinação com e sem inversor de frequência

| Tarifa | Custo anual de energia elétrica (R\$) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Período úmido | |
| Sem Inversor de Frequência | 11.963,00 |
| Com Inversor de Frequência | 7.636,27 |
| Período seco | |
| Sem Inversor de Frequência | 13.159,82 |
| Com Inversor de Frequência | 8400,23 |

Quadro 8. Custos de energia elétrica no perímetro irrigado para a quarta combinação com e sem inversor de frequência

| Tarifa úmida e seca | Custo anual de energia elétrica (R\$) |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Período úmido | |
| Sem Inversor de Frequência | 11.963,00 |
| Com Inversor de Frequência | 9.569,35 |
| Período seco | |
| Sem Inversor de Frequência | 13.159,82 |
| Com Inversor de Frequência | 10.526,70 |

Uma primeira análise mostraria que os percentuais de economia, tanto para a tarifa do período úmido do ano quanto para a tarifa do período seco do ano, são de aproximadamente 16%, 18%, 36% e 20% para cada respectiva combinação.

No entanto, uma análise mais detalhada é necessária. As bombas centrífugas funcionam muito bem quando acopladas a motores que utilizam inversores de frequência. Por outro lado esta mudança na rotação não deve ser menor do que 60% da rotação original para evitar problemas de cavitação e, portanto, a simulação 3 se mostrou irreal quando sua rotação chegou a 50%.

Conclui-se, então, que a simulação mais vantajosa economicamente foi a quarta, com uma economia de aproximadamente 20%.

CONCLUSÃO

- O uso do inversor de frequência no sistema de fornecimento de água para irrigação no perímetro estudado garantiu economia de energia elétrica.

- Houve redução nos custos de energia elétrica no perímetro irrigado estudado, considerando-se as tarifas para os períodos úmido e seco do ano de aproximadamente, 16%, 18% e 20% para a primeira, a segunda e a quarta simulação, respectivamente.

- O programa computacional para simulação hidráulica de perímetro irrigado GALATEIA se mostrou bastante robusto e eficiente para simular diversas combinações uso de energia elétrica na irrigação de culturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao apoio financeiro da FAPEMIG

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Manual para dimensionamentos de bombas centrífugas**. Brasília. ed. Brasília, 2001. 126p.

ANEEL. **Manual para elaboração do programa anual de desperdício de energia elétrica**, 1. ed. Brasília, julho de 2001. 38-46p.

BERNARDO, S.. **Manual de irrigação**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p.

ELETROBRÁS. **Manual de racionalização de energia**. Brasília. Disponível em: www.eletronbras.com/procel. Acesso em: 25 abr. 2006

IBGE. **Censo Demográfico 2000 - Resultados do universo**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2007.

RIBEIRO, M. C.. **Avaliação do funcionamento de uma moto-bomba**. Viçosa: Editora UFV, 2007. 114p.

RODRIGUES, W. ; LUVIZOTTO JUNIOR, E. . Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento. In: *Exposição de Experiências Municipais em Saneamento*, 7., 2003, Santo André, SP. **Anais...** São Paulo: ASSEMAE, 2003.