

PERÍODO DE RECUPERAÇÃO DO INVESTIMENTO EM BOMBA HIDRÁULICA DE MELHOR RENDIMENTO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO NA TARIFA HOROSSAZONAL VERDE

JOÃO L. ZOCOLER¹, FERNANDO B. T. HERNANDEZ², JOÃO C. C. SAAD³,
RAIMUNDO L. CRUZ⁴

RESUMO: Neste trabalho, ajustou-se um modelo matemático para quantificar o efeito da variação do rendimento da bomba hidráulica na variação dos custos de um sistema de bombeamento, na estrutura tarifária horossazonal verde (subgrupo A4) e o tempo de recuperação do capital investido no equipamento de maior rendimento. Em seguida, o mesmo foi aplicado a um sistema de bombeamento para suprimento de um sistema de irrigação do tipo pivô central. As opções de rendimento da bomba hidráulica foram: 69,5% (bomba 1), 73% (bomba 2) e 78% (bomba 3), cujos custos de aquisição foram, respectivamente, R\$ 6.176,00, R\$ 8.479,00 e R\$ 15.509,00. Os resultados da aplicação do modelo mostraram que: i) a substituição da bomba 1 pela bomba 2 foi viável, sendo o período de recuperação de capital 3,4 anos; ii) a substituição da bomba 1 pela bomba 3 foi viável, sendo o período de recuperação de capital 9,2 anos; iii) a substituição da bomba 2 pela bomba 3 foi inviável, sendo o período de recuperação de capital 21,1 anos superior ao período de amortização do investimento na avaliação econômica, considerado 15 anos.

PALAVRAS-CHAVE: modelo matemático, energia e custos.

INVESTMENT RECOVERY PERIOD IN HYDRAULIC PUMP OF BETTER EFFICIENCY IN PUMPING SYSTEMS IN THE GREEN HOURLY SEASONAL TARIFF FOR IRRIGATION

ABSTRACT: In this study a mathematical model was adjusted to quantify the effect of the pump efficiency on cost variation of the pumping system in the green hourly seasonal tariff (subgroup A4 - irrigation) and the investment recovery period by a more efficient pumping station. Afterwards, the same model was applied in a pumping system supplying a center pivot irrigation machine. The hydraulics pump efficiency options were: 69.5% (pump 1), 73% (pump 2) and 78% (pump 3), with acquisition costs of R\$ 6,176.00, R\$ 8,479.00 and R\$ 15,509.00, respectively. The results of the model applied showed that: i) the substitution of pump 1 for 2 was feasible, being the investment recovery period of 3.4 years; ii) the substitution of bomb 1 for 3 was feasible, being the investment recovery period of 9.2 years; and iii) the substitution of bomb 2 for 3 was unfeasible, being the investment recovery period of 21.1 years, therefore superior to its useful life span, considered 15 years.

KEYWORDS: mathematical model, energy, costs.

¹ Prof. Adjunto, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira - SP, zocoler@agr.feis.unesp.br.

² Prof. Titular, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, Área de Hidráulica e Irrigação, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Ilha Solteira - SP, fbhtang@agr.feis.unesp.br.

³ Prof. Adjunto, Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Departamento de Engenharia Rural, Botucatu - SP, joaosaad@fca.unesp.br

⁴ Prof. Adjunto, Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Departamento de Engenharia Rural - Botucatu - SP, cruz@fca.unesp.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 16-9-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 16-2-2011

INTRODUÇÃO

O Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE, citado por LYRA (2005), estima que o desperdício de energia elétrica no Brasil daria para abastecer toda a região Nordeste. O setor industrial, que responde por 47% do consumo de eletricidade no País, é o maior responsável pelo desperdício. Ademais, cerca de 40% do consumo das companhias de saneamento (água e esgoto) são desperdiçados por causa do mau rendimento de suas máquinas e equipamentos. O desperdício de energia elétrica no Brasil é tão elevado que, para atender à demanda crescente, é preciso acrescentar à atual capacidade instalada, pelo menos, três mil MW por ano, exigindo investimento de cerca de US\$ 5,0 bilhões. Isto significa um custo médio de US\$ 1667,00 kW⁻¹. No caso de micro-centrais hidrelétricas de 5; 10 e 15 kW, BALARIM et al. (1998) estimaram custos de instalação variando de R\$ 1.970,00 a R\$ 5.500,00 por kW.

Segundo a Companhia Energética do Piauí - CEPISA (BRASIL, 2007), a energia que a cada ano os brasileiros perdem, equivale à produção de duas Usinas de Itaipu. Em 2006, o desperdício de energia elétrica no Brasil foi da ordem de R\$ 38 bilhões de kWh (10% do consumo do Brasil) o que representa R\$ 9,5 bilhões, considerando-se uma tarifa média de R\$ 0,25 kWh⁻¹. No Brasil, cada 1% de crescimento do PIB tem exigido um aumento de 1,5% na expansão do sistema elétrico nacional. A energia elétrica tem participação de quase 40% do total neste esforço de crescimento. Entre 2001 e 2006, já foram acrescidos ao sistema elétrico nacional mais 25,8 milhões de kW aos 71 milhões de kW já existentes em 2000, sendo 12,2 milhões de kW oriundos de usinas termelétricas (atualmente, capacidade instalada de geração no País é de 104.726,1 MW, ANEEL-BRASIL, 2009).

Os custos de um sistema de bombeamento dependem de muitas variáveis, entre as quais: a vazão requerida, o comprimento, diâmetro e material das tubulações, o desnível topográfico, a pressão no final da tubulação de recalque, o comprimento da rede elétrica de alta e baixa tensão, a potência e tipo dos equipamentos elétricos utilizados, a modalidade de tarifação da energia elétrica, o rendimento e tipo de bomba hidráulica, além de outros de menor relevância (ZOCOLER, 1998).

Em relação à energia elétrica, até 1981, havia um único sistema de tarifação, denominado convencional, que não diferenciava preços durante as horas do dia e períodos do ano. No horário das 17 às 22 horas, ocorre intensificação do uso de eletricidade e, conseqüentemente, as redes de distribuição atingem maior carga. Diante da necessidade de estimular o deslocamento de parte da carga para os horários que o sistema elétrico estiver menos carregado, e para os períodos do ano de maior disponibilidade hídrica, foram criadas as tarifas horossazonais (verde e azul), que são tarifas de energia elétrica com custos diferenciados de acordo com sua utilização durante as horas do dia e durante os períodos do ano. Esta diferenciação de custos visa a reduzir os custos de fornecimento da energia decorrente da otimização do sistema elétrico nacional. Também permite ao consumidor reduzir suas despesas com energia elétrica desde que programe o seu uso, ou seja, evitar o horário de ponta, cuja tarifa é significativamente maior, e/ou deslocar o consumo para o período úmido, cuja tarifa é menor relata o Comitê de Distribuição de Energia Elétrica - CODI (CODI, 1988). O horário de ponta corresponde a três horas consecutivas definidas pela concessionária (normalmente entre as 17 e 21 h), de segunda a sexta-feira, enquanto o horário fora de ponta são as horas complementares às de ponta, acrescidas à totalidade das horas dos sábados, domingos e feriados, definidos por lei federal. O período seco é constituído de sete meses consecutivos de maio a novembro, enquanto o período úmido é constituído de cinco meses consecutivos, de dezembro a abril. As tarifas horossazonais são aplicadas aos consumidores atendidos em tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV (Grupo A) ou ligados em baixa tensão, em sistema de distribuição subterrâneo, mas considerados para efeito de faturamento como de alta tensão. Mais detalhes da tarifa horossazonal verde estão descritos no item “Metodologia”.

Também são concedidos descontos especiais para os consumidores rurais que exercem atividade de irrigação e aquicultura, conforme a Resolução Normativa 207, de 9 de janeiro de 2006, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (BRASIL, 2006), que revogou a Portaria 105, de 3 de abril de 1992, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE (BRASIL,

1992) e as Resoluções 277, de 19 de julho de 2000, e 540, de 1º de outubro de 2002 (BRASIL, 2000a e 2002) da ANEEL. Porém, tais descontos incidem somente sobre o consumo de energia elétrica entre as 21h30 e 6h00 do dia posterior, sendo necessária exclusividade para irrigação, ou seja, a rede elétrica para o sistema de irrigação deve ser independente das demais da propriedade, além de os equipamentos de medição e controle da energia fornecida ficarem a cargo do consumidor.

No caso de estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água de pequenos e médios portes, TSUTIYA (1989) apresenta uma série de alternativas que contribuem com a redução do custo da energia elétrica, entre as quais: i) Enquadramento na estrutura tarifária mais adequada, bem como o equilíbrio entre as demandas contratada e registrada, a fim de se evitar o pagamento de uma demanda não utilizada, ou, ainda, no caso de tarifação horossazonal, da demanda de ultrapassagem; ii) Evitar a utilização do conjunto motobomba no horário de ponta; iii) Correção do fator de potência por banco de capacitores; modificação do padrão de entrada de energia elétrica de baixa para alta tensão, pois o consumo com tarifa em alta tensão geralmente é mais econômico; e elevação do fator de carga através da adequação do conjunto motobomba; iv) Utilização de variadores de rotação no conjunto motobomba para controle da vazão em sistemas onde o bombeamento de água é dirigido diretamente ao consumidor. Em relação ao item (iv), MELLO et al. (1999) estudaram a viabilidade do inversor de frequência controlando uma motobomba trifásica de 29,4 kW (40 cv) sob quatro necessidades de altura manométrica de uma linha de irrigação. Verificaram que, para um período de pagamento de 15 anos, sob taxa de juros de 6% ao ano, o sistema deve operar pelo menos 500 h/ano, o que permitiu uma redução de potência de 12,5 kW.

Em relação ao rendimento do conjunto motobomba hidráulica, OLIVEIRA FILHO et al. (2004) realizaram um trabalho de racionalização da energia elétrica no Perímetro Irrigado de Mirorós, município de Ibipêba (BA). Uma parte do trabalho foi a adequação de uma bomba hidráulica, cuja vazão de projeto de 300 m³/h e pressão total de 980 kPa utilizava um modelo de bomba com rendimento de 70,5%, acionada por um motor elétrico padrão de potência 184 kW (250 cv) e rendimento de 92,19%, que, sendo substituída pela de outro modelo com rendimento de 81,5% e acionada por um motor elétrico do tipo alto rendimento, com potência de 110,4 kW (150 cv) e rendimento de 94,8%, proporcionaria uma economia nos gastos com energia elétrica de até 31,6%.

Diante do exposto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo matemático para avaliar o efeito da variação do rendimento da bomba hidráulica na variação dos custos de um sistema de bombeamento na estrutura tarifária horossazonal verde (subgrupo A4 - para o irrigante e para o não irrigante), e o tempo de recuperação do capital investido no equipamento de maior rendimento. Em seguida, o mesmo foi aplicado a um sistema de bombeamento em três opções de rendimento da bomba hidráulica. Finalmente, efetuou-se uma análise de sensibilidade do modelo em relação à variação do rendimento das bombas e ao tempo de operação anual do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

O custo anual total de um sistema elevatório pode ser obtido pela eq.(1):

$$C_{at} = C_{af} + C_{av} \quad (1)$$

em que,

C_{af} - custo anual fixo do sistema, \$, e

C_{av} - custo anual variável do sistema, \$.

O custo anual fixo do sistema pode ser obtido pela eq.(2):

$$C_{af} = A_a + R_a \quad (2)$$

em que,

A_a - amortização anual do capital investido, \$, e
 R_a - remuneração anual do capital investido, \$.

A amortização anual do capital investido corresponde a um fundo que deve ser anualmente depositado (corrigido pela taxa vigente) para recompor o capital investido em cada equipamento após sua vida útil. Pode ser calculado pela equação (adaptada de COELHO, 1979):

$$A_a = \sum_{i=1}^I \left[\frac{V_i (1 + M_i) (1 - R_i) r}{(1 + r)^{Pa_i} - 1} \right] \quad (3)$$

em que,

V_i - valor inicial (novo) do i -ésimo equipamento, \$;
 M_i - fração do valor inicial do i -ésimo equipamento gasto em sua montagem no sistema, \$;
 R_i - fração do valor inicial do i -ésimo equipamento após o período de amortização;
 R - taxa anual de juros, e
 Pa_i - período de amortização ou vida útil do i -ésimo equipamento, anos.

A remuneração anual do capital investido, que significa quanto o empresário receberia pela aplicação financeira do mesmo em outra alternativa, pode ser calculada pela eq.(4):

$$R_a = \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{V_i (1 + M_i) [(1 + r)^{Pa_i} - 1]}{\left[\sum_{n=1}^{Pa_i} (1 + r)^n \right] + 1} \right\} \quad (4)$$

em que,

n - expoente polinomial.

O custo anual variável do sistema pode ser obtido por:

$$C_{av} = C_{amr} + C_{abo} \quad (5)$$

em que,

C_{amr} - custo anual de manutenção e reparos, \$, e
 C_{abo} - custo anual de bombeamento, \$.

Segundo HOFFMANN et al. (1987), os reparos e a manutenção correspondem ao custo anual necessário para manter o bem de capital em condições de uso. Na prática, costuma-se calcular os custos de manutenção anual como uma fração percentual média do valor de compra do equipamento considerado, ou seja:

$$C_{amr} = f_i V_i \quad (6)$$

em que,

f_i - fração do valor inicial do i -ésimo equipamento gasto anualmente na manutenção e reparos.

O Programa Nacional de Irrigação - PRONI (BRASIL, 1987), considera para as bombas hidráulicas uma fração anual de 2,5% para um tempo de operação de 2.000 horas.

O custo anual de bombeamento é obtido pela equação adaptada do CODI (CODI, 1988), atualizada pelas Resoluções 456, de 29 de novembro de 2000 (BRASIL, 2000b), e 90, de 27 de março de 2001 (BRASIL, 2001):

$$C_{abo} = F_d + F_c + A_j \quad (7)$$

em que,

F_d - faturamento anual da demanda, \$;

F_c - faturamento anual do consumo, \$, e

A_j - ajuste anual referente ao fator de potência, \$.

Se for prevista a aquisição de banco de capacitores para correção do fator de potência ao valor mínimo exigido pela concessionária de distribuição de energia elétrica, para isenção desta tarifa, a eq.(7) será composta somente do faturamento da demanda e do consumo.

O custo anual de bombeamento do sistema depende da estrutura tarifária em que o mesmo se enquadra diante da concessionária de energia elétrica, ou seja, da tarifa convencional ou das horossazonais (verde e azul). A equação adaptada do F_d e F_c , desenvolvida com base na eq.(7) na estrutura tarifária horossazonal verde, é apresentada a seguir. Nela, considera-se que o motor e os equipamentos elétricos são exclusivos para acionamento da bomba hidráulica.

Tarifa verde

É aplicada compulsoriamente a tarifa horossazonal (azul ou verde, se houver opção do consumidor) às unidades consumidoras do Grupo A atendidas em tensão inferior a 69 kV e com demanda de potência igual ou superior a 300 kW. Também é aplicada opcionalmente às unidades consumidoras do Grupo A atendidas em tensão inferior a 69 kV e com demanda para demanda de potência entre 30 e 300 kW. A estrutura tarifária é a seguinte: 1) Demanda (kW): um preço único; 2) consumo (kWh): 2a) Um preço para o horário de ponta em período úmido; 2b) Um preço para o horário fora de ponta em período úmido; 2c) Um preço para o horário de ponta em período seco; 2d) Um preço para o horário fora de ponta em período seco.

Considerando que a demanda contratada com a Concessionária de energia elétrica seja não inferior a 10% da demanda medida (Subgrupo A4), o que confere ao usuário a não cobrança pela ultrapassagem de demanda, então o faturamento anual da demanda é obtido pela eq.(8):

$$F_d = 12 D_c T_{dv} \quad (8)$$

em que,

D_c - demanda contratada com a Concessionária de energia elétrica, kW, e

T_{dv} - tarifa de demanda verde, \$ kW⁻¹.

O faturamento anual da demanda para a Classe IV (rural) é obtido pela eq.(9):

$$F_d = \sum_{m=1}^{12} D_{m_z} T_{dv} + 0,10 d D_c T_{dv} \quad (9)$$

em que,

D_{m_z} - demanda medida no z-ésimo ciclo¹ de medição do ano, e

D - número de ciclos completos por ano que o sistema elevatório fica desligado e, com isso, ocorre faturamento de demanda correspondente a 10% da demanda contratada.

OBS: A cada 12 meses, a partir da data da assinatura do contrato de fornecimento, deverá ser verificada, por segmento horário, demanda medida não inferior à contratada em, pelo menos, três ciclos completos de faturamento, ou, caso contrário, a concessionária poderá cobrar, complementarmente, na fatura referente ao 12^o ciclo, as diferenças positivas entre as três maiores demandas contratadas e as respectivas demandas medidas (BRASIL, 2006). Sendo assim: $0 \leq d \leq 9$.

¹ Ciclo de medição corresponde a um período entre duas leituras consecutivas, em intervalos de aproximadamente 30 dias, observados o mínimo de 27 e o máximo de 33 dias, sendo ao todo 12 ciclos num ano de contrato com a Concessionária de Energia Elétrica.

A demanda medida no z-ésimo ciclo do ano (kW) é obtida pela eq.(10):

$$Dm_z = \sum_{y=1}^Y \frac{Q_y H_y \gamma}{1000 \eta_{BH_y} \eta_{ME_y}} \quad (10)$$

em que,

Q_y - vazão da y-ésima bomba hidráulica no z-ésimo ciclo do ano, $m^3 s^{-1}$;

H_y - altura manométrica da y-ésima bomba no z-ésimo ciclo do ano, m;

γ - peso específico da água, sendo considerado $9.800 N m^{-3}$;

η_{BH_y} - rendimento da y-ésima bomba no z-ésimo ciclo do ano, e

η_{ME_y} - rendimento do y-ésimo motor elétrico no z-ésimo ciclo do ano.

O faturamento anual do consumo é obtido pela eq.(11):

$$F_c = Cm_{up} Tcv_{up} + Cm_{ufp} Tcv_{ufp} + Cm_{sp} Tcv_{sp} + Cm_{sfp} Tcv_{sfp} \quad (11)$$

em que,

Cm_{up} - consumo anual medido (kWh) no período úmido, no horário de ponta;

Tcv_{up} - tarifa de consumo verde no período úmido e no horário de ponta, $\$ kWh^{-1}$;

Cm_{ufp} - consumo anual medido (kWh) no período úmido, no horário fora de ponta;

Tcv_{ufp} - tarifa de consumo verde no período úmido, no horário fora de ponta, $\$ kWh^{-1}$;

Cm_{sp} - consumo anual medido (kWh) no período seco, no horário de ponta;

Tcv_{sp} - tarifa de consumo verde no período seco, no horário de ponta, $\$ kWh^{-1}$;

Cm_{sfp} - consumo anual medido (kWh) no período seco, no horário fora de ponta, e

Tcv_{sfp} - tarifa de consumo verde no período seco, no horário fora de ponta, $\$ kWh^{-1}$.

O consumo anual medido no período úmido, no horário de ponta, é obtido por:

$$Cm_{up} = Dm t_{up} \quad (12)$$

em que,

t_{up} - tempo de funcionamento do sistema elevatório no período úmido, no horário de ponta, h.

O consumo anual medido no período úmido, no horário fora de ponta, é obtido por:

$$Cm_{ufp} = Dm t_{ufp} \quad (13)$$

em que,

t_{ufp} - tempo de funcionamento do sistema elevatório no período úmido, no horário fora de ponta, h.

O consumo anual medido no período seco e no horário de ponta é obtido por:

$$Cm_{sp} = Dm t_{sp} \quad (14)$$

em que,

t_{sp} - tempo de funcionamento do sistema elevatório no período seco, no horário de ponta, h.

O consumo anual medido no período seco, no horário fora de ponta, é obtido por:

$$Cm_{sfp} = Dm t_{sfp} \quad (15)$$

em que,

t_{sfp} - tempo de funcionamento do sistema elevatório no período seco, no horário fora de ponta, h.

O faturamento anual do consumo para a Classe IV (rural - irrigante) é obtido pela eq.(16):

$$F_c = C_{m_{up}} T_{cv_{up}} + C_{m_{ufp}} T_{cv_{ufp}} + C_{m_{uhe}} (1 - f_{dtv}) T_{cv_{ufp}} + C_{m_{sp}} T_{cv_{sp}} + C_{m_{sfp}} T_{cv_{sfp}} + C_{m_{she}} (1 - f_{dtv}) T_{cv_{sfp}} \quad (16)$$

em que,

f_{dtv} - fator de desconto sobre a tarifa verde no horário fora da ponta (Resolução 207, de 9 de janeiro de 2006, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (BRASIL, 2006);

$C_{m_{uhe}}$ - consumo anual medido (kWh) no período úmido, no horário especial para irrigantes, e

$C_{m_{she}}$ - consumo anual medido (kWh) no período seco, no horário especial para irrigantes (das 21h30 às 6h00 do dia posterior).

Uma vez que a modalidade de tarifação da energia elétrica é a horossazonal verde, o usuário não deve operar o sistema de bombeamento nos horários de ponta, seja no período seco, seja no úmido, pois toda vantagem no faturamento em relação à modalidade convencional pode ser perdida ou até mesmo piorar. Considerando esta afirmativa, as eqs.(11) e (16) podem ser simplificadas:

$$F_c = C_{m_{ufp}} T_{cv_{ufp}} + C_{m_{sfp}} T_{cv_{sfp}} \quad (17)$$

$$F_c = C_{m_{ufp}} T_{cv_{ufp}} + C_{m_{uhe}} (1 - f_{dtv}) T_{cv_{ufp}} + C_{m_{sfp}} T_{cv_{sfp}} + C_{m_{she}} (1 - f_{dtv}) T_{cv_{sfp}} \quad (18)$$

Ao se selecionar uma bomba hidráulica, procura-se um modelo que faça o bombeamento adequadamente e a um menor custo. Neste sentido, o rendimento da bomba é um requisito fundamental nesta seleção, pois se o mesmo for pequeno, maior será a exigência de potência do motor e demais equipamentos para acioná-la, proporcionando maiores custos de aquisição e maior custo operacional do sistema. Na prática busca-se um modelo de bomba na condição de máximo rendimento ou muito próximo a isto. Sendo assim, as opções entre os modelos disponíveis no mercado são relativamente restritas. Também, uma pequena variação no rendimento não é suficiente, na maioria das vezes, para se exigir um motor comercial de maior potência, uma vez que o mesmo já é selecionado com certa reserva de potência em relação à bomba hidráulica. Mesmo assim, e devido à longevidade e intensidade de uso do sistema de bombeamento, é importante fazer a avaliação para verificar em quanto tempo a diferença no custo de aquisição será compensada pela redução dos custos operacionais do modelo da bomba de maior rendimento hidráulico.

Feitas tais considerações, e considerando um sistema de bombeamento com somente um conjunto motobomba, a variação do custo anual total do sistema de bombeamento para consumidores do Subgrupo A4 diante de duas opções de rendimento e de custo de aquisição da bomba hidráulica pode ser calculada pela eq.(19):

$$\Delta C_{at} = \frac{V_{b_2} (1 + M_{b_2})(1 - R_{b_2})r}{(1 + r)^{P_{ab_2}} - 1} - \frac{V_{b_1} (1 + M_{b_1})(1 - R_{b_1})r}{(1 + r)^{P_{ab_1}} - 1} + \frac{V_{b_2} (1 + M_{b_2}) \left[(1 + r)^{P_{ab_2}} - 1 \right]}{\left[\sum_n^{P_{ab_2}} (1 + r)^n \right] + 1} - \frac{V_{b_1} (1 + M_{b_1}) \left[(1 + r)^{P_{ab_1}} - 1 \right]}{\left[\sum_n^{P_{ab_1}} (1 + r)^n \right] + 1} + f_{b_2} V_{b_2} - f_{b_1} V_{b_1} + \left(\frac{1}{\eta_{b_2}} - \frac{1}{\eta_{b_1}} \right) \frac{QH\gamma}{1000 \eta_m} \left[12 T_{dv} + t_{ufp} T_{cv_{ufp}} + t_{sfp} T_{cv_{sfp}} \right] \quad (19)$$

Sendo para a bomba hidráulica 1 e 2, respectivamente:

V_{b1} e V_{b2} - valor inicial da bomba, \$;
 M_{b1} e M_{b2} - fração do valor inicial da bomba gasto em sua montagem no sistema, \$;
 R_{b1} e R_{b2} - fração do valor inicial da bomba após o período de amortização;
 Pa_{b1} e Pa_{b2} - período de amortização da bomba, anos;
 f_{b1} e f_{b2} - fração do valor inicial da bomba gasto anualmente na manutenção e reparos, e
 η_{b1} e η_{b2} - rendimento da bomba.

Conforme se verifica na eq.(19), os quatro primeiros termos permitem calcular a diferença do custo anual fixo entre as bombas. O quinto e sexto termos permitem calcular a diferença do custo anual de manutenção e reparos das mesmas; e o sétimo termo permite calcular a diferença do custo anual de bombeamento que elas provocam devido aos níveis de rendimento. É esperado que, sendo $\eta_{b1} < \eta_{b2}$ e $V_{b1} < V_{b2}$, o efeito do sétimo termo seja superior à soma dos demais; e sendo este de sinal negativo, a ΔC_{at} será negativa. Se isto não ocorrer, significa que o ganho de rendimento da bomba 2 é insuficiente para compensar seu acréscimo nos custos fixos e de manutenção e reparos. Estas considerações, feitas em relação à eq.(19), também são válidas para a eq.(20), abordada a seguir.

Ressalta-se, novamente, que a diferença de rendimento entre as bombas aqui tratadas não é suficiente para alterar a potência nominal do motor e demais equipamentos elétricos do sistema (comando de partida, transformador, banco de capacitores e outros), não afetando, conseqüentemente, os seus custos fixos e de manutenção e reparos na equação. Caso contrário, dever-se-iam incorporar os custos fixos e de manutenção e reparos nas equações.

No caso do Subgrupo A4 - rural irrigante, a variação do custo anual total do sistema pode ser calculada pela equação:

$$\begin{aligned}
 \Delta C_{at} = & \frac{V_{b2} (1 + M_{b2})(1 - R_{b2})r}{(1 + r)^{Pa_{b2}} - 1} - \frac{V_{b1} (1 + M_{b1})(1 - R_{b1})r}{(1 + r)^{Pa_{b1}} - 1} + \\
 & \frac{V_{b2} (1 + M_{b2})[(1 + r)^{Pa_{b2}} - 1]}{\left[\sum_n^{Pa_{b2}} (1 + r)^n \right] + 1} - \frac{V_{b1} (1 + M_{b1})[(1 + r)^{Pa_{b1}} - 1]}{\left[\sum_n^{Pa_{b1}} (1 + r)^n \right] + 1} + \\
 & f_{b2} V_{b2} - f_{b1} V_{b1} + \left(\frac{1}{\eta_{b2}} - \frac{1}{\eta_{b1}} \right) \frac{QH\gamma}{1000 \eta_m} \cdot \left[\begin{array}{l} Tdv(12 - 0,9d) + \\ Tcv_{ufp} [t_{ufp} + t_{uhe} (1 - fdtv)] + \\ Tcv_{sfp} [t_{sfp} + t_{uhe} (1 - fdtv)] \end{array} \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

Finalmente, o período de recuperação (P_r - em anos) do capital investido na aquisição de um modelo de bomba de melhor rendimento ($\eta_{b1} < \eta_{b2}$ e $V_{b1} < V_{b2}$) pode ser calculado pela equação, que somente é válida se ΔC_{at} for negativa, conforme já exposto anteriormente:

$$P_r = \frac{V_{b2} - V_{b1}}{|\Delta C_{at}|} \quad (21)$$

A utilização do modelo de modo manual, embora plenamente possível, é morosa devido ao grande número de dados que são necessários. Sendo assim, e com o propósito de agilizar os cálculos, desenvolveu-se uma planilha eletrônica, que pode ser acessada pelo link http://www.agr.feis.unesp.br/ftp/bomba_versus_rendimento.xls, na qual as eqs.(19), (20) e (21) foram inseridas, permitindo também se proceder à análise de sensibilidade do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático foi aplicado para avaliar a variação do custo anual total do sistema de bombeamento e o período de recuperação do capital investido em uma bomba de melhor rendimento, em duas situações distintas: i) Suprimento de um sistema público de água, cuja estrutura tarifária da conta de energia elétrica considera como consumidor do Grupo A, Subgrupo A4, Classe VII (serviço público), Subclasse b - água, esgoto e saneamento (Resolução 456, de 29 de novembro de 2000 - ANEEL); ii) Suprimento de um equipamento de irrigação do tipo pivô central, cuja estrutura tarifária da conta de energia elétrica considera como consumidor do 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).

O sistema elevatório considerado apresenta vazão (Q) igual a $0,0556 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($200,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) e altura manométrica (H) igual a 79 m. Também apresenta as seguintes características operacionais: i) 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); ii) Número de dias de funcionamento no período seco do ano (maio a novembro): 100; iii) Número de dias de funcionamento no período úmido do ano (dezembro a abril): 20; iv) Tempo total 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): 8h30 horas (máximo possível); v) Número de meses sem operar o sistema no ano: 4.

As tarifas de energia elétrica utilizadas são (preços de tarifas de energia elétrica praticadas na CPFL – Paulista para o subgrupo A4, segundo a Resolução 445/ANEEL - DOU de 03-04-2007): i) Tarifa de demanda: R\$ $7,68 \text{ kW}^{-1}$ (abastecimento público) e R\$ $7,33 \text{ kW}^{-1}$ (irrigação); ii) Tarifa de consumo no período seco, no horário fora da ponta: R\$ $0,18503 \text{ kWh}^{-1}$ (abastecimento público) e R\$ $0,17647 \text{ kWh}^{-1}$ (irrigação); iii) Tarifa de consumo no período úmido, no horário fora da ponta: R\$ $0,16772 \text{ kWh}^{-1}$ (abastecimento público) e R\$ $0,15995 \text{ kWh}^{-1}$ (irrigação); iv) Fator de desconto sobre a tarifa de consumo verde no horário fora da ponta para a irrigação: 70% (Região Sudeste); v) Impostos Federais (PIS/PASEP e COFINS), que em média perfazem 4%, não foram incluídos nas tarifas.

As variáveis financeiras utilizadas são: i) Taxa anual de juros: 8,75%; ii) Período de amortização da bomba hidráulica (equivalente à vida útil): 15 anos; iii) Fração do valor inicial da bomba após o período de amortização: 10%; iv) Fração do valor inicial da bomba gasto em sua montagem no sistema: 2%; v) Fração do valor inicial da bomba gasto anualmente com a manutenção e reparos: 2,5%. Os modelos de bombas hidráulicas passíveis de serem selecionadas para o sistema de bombeamento e que foram utilizadas na aplicação, estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos, características operacionais e custo de aquisição das bombas hidráulicas utilizadas na aplicação do modelo matemático. **Pump model, operational characteristics and acquisition cost for the hydraulic pumps tested in the mathematical model.**

| | Bomba 1 | Bomba 2 | Bomba 3 |
|--------------------------|----------------------|------------------|---------------|
| Marca/Modelo | KSB Meganorm 125-400 | KSB ETA 125-50/2 | KSB WKL 125/2 |
| Rotação (rpm) | 1.750 | 1.750 | 1.750 |
| Rendimento (%) | 69,5 | 73,0 | 78,0 |
| Diâmetro do rotor (mm) | 399 | 282 (2) | 292 (2) |
| NPSH requerido (m) | 2,2 | 2,2 | 4,1 |
| Potência requerida (cv) | 84 | 80 | 76 |
| Preço de aquisição (R\$) | 6.176,00 | 8.479,00 | 15.509,00 |

Os resultados da aplicação estão nas Tabelas 2 e 3. Na Tabela 2, apresentam-se os resultados das opções de bombas para o sistema público de abastecimento. Verifica-se que a bomba 2, cujo custo de aquisição é 37,3% superior à bomba 1 (R\$ 2.303,00 a mais para um rendimento 3,5% superior), teve um período de recuperação do capital de apenas 1,7 ano, ou seja, em 11% do tempo esperado de vida útil do equipamento (período de amortização máxima assumido na avaliação econômica), considerado 15 anos.

No caso da substituição da bomba 1 pela bomba 3, observa-se que a bomba 3, cujo custo de aquisição é 151% superior à bomba 1 (R\$ 9.333,00 a mais para um rendimento 8,5% superior), teve um período de recuperação do capital de 3,5 anos, ou seja, em 23% do tempo esperado de vida útil do equipamento. Finalmente, no caso da substituição da bomba 2 pela bomba 3, observa-se que a bomba 3, cujo custo de aquisição é 83% superior à bomba 1 (R\$ 7.030,00 a mais para um rendimento 5% superior), teve um período de recuperação do capital de 5,7 anos, ou seja, em 38% do tempo esperado de vida útil do equipamento.

TABELA 2. Custos fixos e variáveis do sistema de bombeamento influenciados pela utilização dos modelos de bomba 1; 2 e 3 na modalidade de tarifação horossazonal verde, no abastecimento público. **Fix and variable costs of the pumping system influenced by the utilization of pumps models 1, 2 or 3 in the green hourly seasonal tariff for general water supply.**

| Variáveis Dependentes | Bombas Hidráulicas | | |
|---|--------------------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Custo anual de amortização (R\$) | 153,30 | 210,47 | 384,97 |
| Custo anual de remuneração do capital (R\$) | 494,99 | 679,57 | 1.243,01 |
| Custo anual de manutenção e reparos (R\$) | 154,40 | 211,98 | 387,73 |
| Custo anual da demanda de energia elétrica (R\$) | 6.145,97 | 5.851,30 | 5.476,22 |
| Custo anual do consumo de energia elétrica no período seco (R\$) | 24.678,57 | 23.495,35 | 21.989,24 |
| Custo anual de consumo de energia elétrica no período úmido (R\$) | 4.473,97 | 4.259,46 | 3.986,42 |
| Custo anual da energia elétrica (R\$) | 35.298,51 | 33.606,11 | 31.451,88 |
| Custo anual total (R\$) | 36.102,20 | 34.710,13 | 33.469,58 |
| Período de recuperação do capital (anos) 1 versus 2 | | 1,7 | |
| Período de recuperação do capital (anos) 2 versus 3 | | 3,5 | |
| Período de recuperação do capital (anos) 1 versus 3 | | 5,7 | |

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados das opções de bombas para o sistema de irrigação. Verifica-se, no caso da substituição da bomba 1 pela bomba 2, que o período de recuperação do capital foi 3,4 anos, ou seja, em 23% do tempo esperado de vida útil do equipamento. No caso da substituição da bomba 1 pela bomba 3, o período de recuperação do capital foi 9,2 anos, ou seja, em 61% do tempo esperado de vida útil do equipamento.

Finalmente, no caso da substituição da bomba 2 pela bomba 3, o período de recuperação do capital foi 21,1 anos, ou seja, em 141% do tempo esperado de vida útil do equipamento, o que significa que não é viável esta substituição, pois supera o tempo considerado na análise.

Este aumento no período de recuperação do capital entre as duas situações (sistema de abastecimento público versus irrigação) deve-se à menor variação do custo anual da energia elétrica, pois pagando menos pela demanda e consumo, é de se esperar maior tempo para recuperar os custos de amortização, remuneração do capital e manutenção e reparos.

TABELA 3. Custos fixos e variáveis do sistema de bombeamento influenciados pela utilização dos modelos de bomba 1; 2 e 3 na modalidade de tarifação horossazonal verde, na irrigação. **Fix and variable costs of the pumping system influenced by the utilization of pumps models 1, 2 or 3 in the green hourly seasonal tariff for irrigation.**

| Variáveis Dependentes | Bombas Hidráulicas | | |
|---|--------------------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Custo anual de amortização (R\$) | 153,30 | 210,47 | 384,97 |
| Custo anual de remuneração do capital (R\$) | 494,99 | 679,57 | 1.243,01 |
| Custo anual de manutenção e reparos (R\$) | 154,40 | 211,98 | 387,73 |
| Custo anual de demanda de energia elétrica (R\$) | 4.106,12 | 3.909,25 | 3.658,65 |
| Custo anual de consumo de energia elétrica no período seco (R\$) | 13.703,76 | 13.046,73 | 12.210,40 |
| Custo anual de consumo de energia elétrica no período úmido (R\$) | 2.623,41 | 2.497,63 | 2.337,52 |
| Custo anual da energia elétrica (R\$) | 20.433,28 | 19.453,60 | 18.206,58 |
| Custo anual total (R\$) | 21.236,97 | 20.557,62 | 20.224,28 |
| Período de recuperação do capital (anos) 1 versus 2 | | 3,4 | |
| Período de recuperação do capital (anos) 1 versus 3 | | 9,2 | |
| Período de recuperação do capital (anos) 2 versus 3 | | 21,1 | |

Sensibilidade do modelo em relação à variação do rendimento da bomba

Para se fazer esta análise, primeiro foram aplicadas as eqs.(19) e (20) para o sistema público de abastecimento e para o sistema de irrigação, respectivamente, considerando-se níveis crescentes de variação dos rendimentos das bombas. Por exemplo, se a bomba 2 apresentasse rendimento superior à bomba 1 em níveis que variassem de 1 a 8,5%, mantidas as demais condições de uso e custo de aquisição, quanto seria o custo anual total do sistema com esta bomba, em cada nível de rendimento considerado? Obtido esse valor, aplicou-se a eq.(21) para calcular o período de recuperação do capital em anos, no nível de rendimento considerado, lembrando que o custo anual do sistema com a bomba 1 se mantém inalterado devido ao rendimento da bomba 1 permanecer inalterado. Este raciocínio foi aplicado de modo semelhante aos casos da bomba 3 em relação à bomba 1 e da bomba 3 em relação à bomba 2. Novamente, o uso da planilha eletrônica agilizou o procedimento.

Na Figura 1, mostram-se os resultados desta análise. Conforme pode ser visto para o caso do serviço público, seria viável substituir a bomba 1 pela bomba 3, desde que esta apresentasse incremento no rendimento acima de 3,8% (valor no eixo das abscissas quando a linha dos 15 anos corta a curva b1 x b3 - linha vermelha). Também seria viável substituir a bomba 2 pela bomba 3, desde que esta apresentasse incremento no rendimento acima de 3,1% (valor no eixo das abscissas quando a linha dos 15 anos corta a curva b2 x b3 - linha azul).

Finalmente, seria viável substituir a bomba 1 pela bomba 2, desde que esta apresentasse incremento no rendimento acima de 0,9% (valor no eixo das abscissas quando a linha dos 15 anos corta a curva b1 x b2 - linha verde). No caso da irrigação e de modo análogo, seria viável a substituição da bomba 1 pela 3 para incremento acima de 6,9%; da bomba 2 pela 3 para incremento acima de 5,6%; e da bomba 1 pela 2 para incremento acima de 1,6%. Esta diferença no período de recuperação do capital entre o serviço público e a irrigação também é explicado pelo menor custo energético no caso da irrigação, o que implica maior tempo para recuperar os custos de amortização, remuneração do capital e manutenção e reparos.

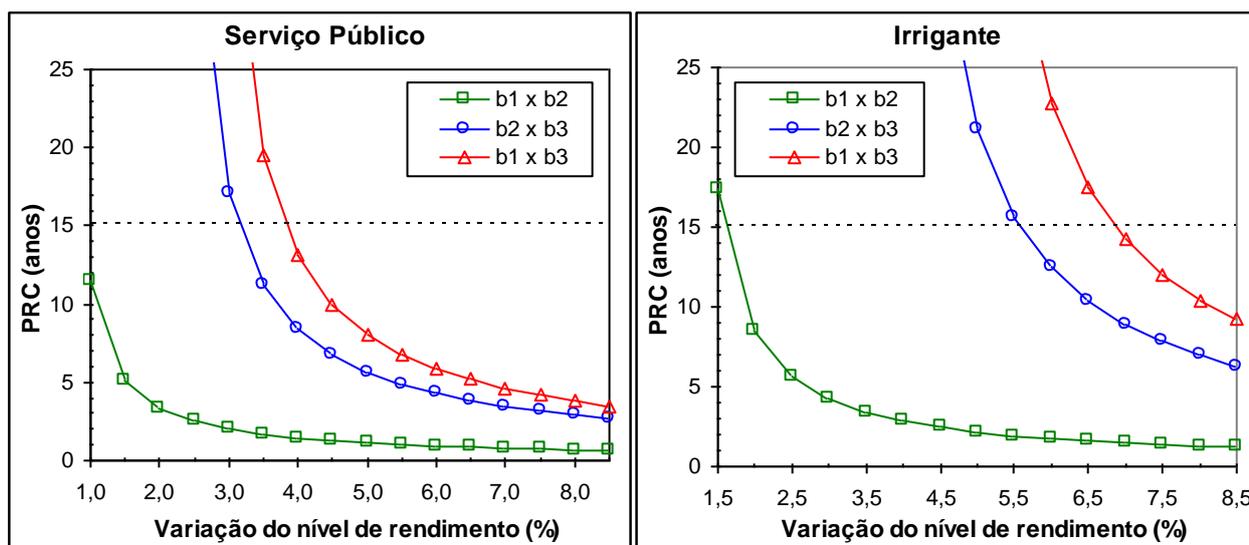


FIGURA 1. Período de recuperação do capital em função da variação do nível de rendimento das bombas hidráulicas permutáveis para o sistema de serviço público e para a irrigação.
Capital recovery period as a function of the income level of interchangeable hydraulic pumps for general water supply and irrigation use.

CONCLUSÕES

O modelo matemático ajustado permitiu quantificar o efeito da variação do rendimento da bomba hidráulica na variação dos custos de um sistema de bombeamento e o tempo de recuperação do capital investido no equipamento de maior rendimento.

O período de recuperação do capital investido em bombas de maior rendimento (bomba 2 com rendimento 3,5% a mais que a bomba 1 e custo de aquisição 37,3% superior; e bomba 3 com rendimento 8,5% a mais que a bomba 1 e custo de aquisição 151% superior) foi 3,4 e 9,2 anos no caso da bomba 1 pela 2, e 1 pela 3, respectivamente, quando o sistema de bombeamento foi destinado à irrigação.

A substituição da bomba 2 pela 3 (bomba 3 com rendimento 5% a mais que a bomba 2 e custo de aquisição 83% superior) não foi viável no caso da irrigação.

REFERÊNCIAS

- BALARIM, C.R.; LARocca JÚNIOR, J.; TARGA, L.A. Microcentrais hidrelétricas com potências de 5, 10 e 15 kW. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.17, n.3, p.9-19, mar. 1998.
- BRASIL. Ministério da Irrigação. Programa Nacional de Irrigação - PRONI. *Tempo de irrigar: manual do irrigante*. São Paulo: Mater, 1987. 160 p.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Secretaria Nacional de Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Portaria n. 105, de 3 de abril de 1992. *Diário Oficial*, 6 fev. 1993.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução n. 277*, de 19 de julho de 2000.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução n. 456*, de 29 de novembro de 2000.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução n. 90*, de 27 de março de 2001.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução n. 540*, de 1º de outubro de

2002.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução Normativa n. 207*, de 9 de janeiro de 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Resolução Homologatória, n. 445*, de 3 de abril de 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *Boletim Energia*, v.7, n.339. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_boletim/?fuseaction=boletim.detalharNoticia&idNoticia=420>. Acesso em: 07 set. 2009.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Companhia Energética do Piauí - CEPIAS. *Todos pagam pelas perdas elétricas*. Notícias, 10 abr. 2004, Teresina (PI). Disponível em: <<http://www.cepisa.com.br/cepisa/materia.php?id=90>>. Acesso em: 21 fev. 2008.

COELHO, S.T. *Matemática financeira e análise de investimentos*. São Paulo: EDUSP, 1979. 279 p.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Tarifas horossazonais: manual de orientação ao consumidor*. Rio de Janeiro, 1988. 28 p.

LYRA, J. O “nó” do setor elétrico. *O Jornal*, Maceió, 16 jan. 2005. Disponível em: <<http://www.ojornal-al.com.br/16012005/opina04.htm>>. Acesso em: 21 fev. 2008.

HOFFMANN, R.; ENGLER, J.J.C.; SERRANO, O.; THAME, A.C.M.; NEVES, E.M. *Administração da empresa agrícola*. 5.ed. São Paulo: Pioneira, 1987. 325 p.

MELLO, C.R.; CARVALHO, J.A.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; REINATO, C.H.; SANTANA, M.J. Economia de energia e instalação de bombeamento para irrigação com uso de inversor de frequência. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.18, n.4, p.78-88, 1999.

OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C.A.; RIBEIRO, M.C. Racionalização energética de uma estação de pressurização de um perímetro irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.135-143, 2004.

TSUTIYA, M.T. *Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água de pequeno e médio portes*. 1989. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1989.

ZOCOLER, J.L. *Modelo para dimensionamento econômico de sistemas de recalque em projetos hidroagrícolas*. 1998. 107 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1998.