

Avaliação da Eficiência Energética em Poços Profundos Utilizados para Abastecimento Público

Julio Cesar Arantes Perroni

Geowater Assessoria Projetos e Comércio Ltda, Av. José Zilioli 712, 14806-025, Araraquara, SP, Brasil,

geowater@geowater.com.br

Edson Wendland

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; Departamento de Hidráulica e Saneamento;

Caixa Postal 359; 13560-970; São Carlos; SP; Brasil; cw@sc.usp.br

RESUMO

Diversos sistemas públicos de abastecimento de água de cidades brasileiras utilizam majoritariamente ou exclusivamente água subterrânea captada em poços tubulares profundos, sendo que a grande maioria desses poços necessita de equipamentos de bombeamento para efetuar a elevação da água até a superfície com custo operacional elevado devido às despesas com energia elétrica. No presente trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para análise de dados operacionais de poços e respectivos sistemas de bombeamento, incluindo a determinação do rendimento eletromecânico dos equipamentos utilizados. A aplicabilidade da metodologia proposta foi avaliada através de estudo de caso, realizado com 21 poços utilizados no abastecimento público da cidade de São Carlos - SP. Os resultados obtidos indicaram que, com a utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento, será possível reduzir 15% do consumo de energia elétrica, proporcionando uma redução de despesa que poderá cobrir, em 5 anos, mais de 50% dos valores dos investimentos necessários em novos equipamentos. Tendo como diretrizes gerais a otimização do rendimento de poços profundos, propostas para a modernização de sistemas de bombeamento de água são apresentadas, visando contribuir para a melhoria da qualidade dos serviços e economia de recursos.

Palavras chave: poço profundo, água subterrânea, bomba eixo prolongado, eficiência energética, bombeamento eficiente, abastecimento público.

INTRODUÇÃO

A extração da água na grande maioria dos poços utilizados no abastecimento público é feita com auxílio de conjuntos motor-bomba para elevação da água até a superfície, para efetuar adicionalmente a elevação até os reservatórios de distribuição ou para alcançar a pressão necessária para injeção direta na rede de distribuição. O consumo de energia pode ser elevado e o valor presente do custo operacional com energia elétrica, ao longo da vida útil, pode ultrapassar o próprio custo inicial de construção do poço. As ameaças de crise de abastecimento e a elevação das tarifas de energia, ocorridas nos últimos anos, representam fortes motivações para as empresas e órgãos de saneamento buscarem a redução desse que, em geral, é o seu segundo item na matriz de custos. Todavia, os estudos de otimização de sistemas de bombeamento dos poços ainda não são práticas usuais das empresas e órgãos de saneamento, principalmente por falta de conhecimento técnico específico sobre o assunto.

Os registros históricos de dados resultantes de programas de monitoramento e de gerenciamento operacional de poços, os quais constituem obrigação legal, são, em geral, encarados como atividade burocrática e,

devido à falta de pessoal para analisar tecnicamente os dados coletados, tão logo quanto possível, são transferidos definitivamente para o “arquivo morto”. Todavia, esses dados poderiam fornecer importantes informações sobre a performance do aquífero, dos poços e dos respectivos sistemas de bombeamento e fornecer diretrizes para redução de desperdícios de energia e melhoria da eficiência operacional.

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver e testar uma metodologia prática para avaliar o consumo de energia elétrica nos equipamentos de bombeamento de poços profundos utilizados em sistemas públicos de abastecimento de água, com base em séries históricas de dados operacionais e de monitoramento.

A cidade de São Carlos, onde cerca de 50% da água distribuída pelo órgão municipal de saneamento - o SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto - é proveniente de poços tubulares, foi escolhida para o presente estudo de caso. O trabalho se baseou na análise dos dados operacionais disponíveis dos poços tubulares utilizados pelo SAAE e seus respectivos equipamentos de bombeamento. Tendo em vista as possibilidades de economia de energia, propostas para a otimização do sistema são apresentadas.

REVISÃO DA LITERATURA

Normalmente, os desperdícios de energia elétrica em sistemas de bombeamento de água são encontrados nos procedimentos operacionais existentes, no dimensionamento dos sistemas, na idade dos equipamentos, nas tecnologias ineficientes utilizadas, na inexistência de manutenções, nas formas contratuais e no desperdício de água (BAHIA, 1998).

CLABORN e RAINWATER (1991) apresentam uma metodologia para otimização do custo de energia em baterias de poços, desde que a capacidade do sistema seja maior que a demanda, mediante um programa computacional que estima a melhor combinação de poços em operação para atender a demanda considerada, com base em dados do aquífero, dos poços, do reservatório e do consumo de energia do sistema.

RIBEIRO (2000), trabalhando com os dados dos poços que abastecem a cidade de Araraquara-SP, efetuou uma análise da composição do custo unitário de produção de água e analisou a influência no custo final de variáveis operacionais, tais como: vazões bombeadas, períodos de operação, demanda de água do sistema e volumes dos reservatórios. A autora testou a aplicação de modelo de simulação baseado na técnica denominada “algoritmos genéticos” e recomenda a aplicação dessa técnica como subsídio ao processo de decisão no planejamento da expansão do sistema de abastecimento de água.

REIS et al. (2000), utilizando a mesma técnica dos “algoritmos genéticos”, concluíram que, nos sistemas otimizados, os valores globais dos custos operacionais com energia elétrica dos poços estudados por RIBEIRO (op. cit.) são da mesma ordem de grandeza dos custos de investimentos. Essa conclusão é de grande importância, pois em geral não se faz o cômputo do custo operacional dos poços quando da sua construção e aponta para a necessidade da otimização energética do bombeamento dos poços.

TSUTUYA (2001) faz uma análise abrangente das alternativas existentes para redução do custo de energia elétrica, com destaque para sistemas de bombeamento em estações elevatórias de água bruta.

OUGUI (2003), apresenta o resultado do estudo da operação otimizada de um dos poços utilizados pelo SAAE – São Carlos (subsistema Cruzeiro do Sul), simulando estratégias de funcionamento das bombas do poço e bombas de recalque em superfície e o importe de água de outro setor. Segundo o autor, a adoção da estratégia ótima de operação das bombas daquele subsistema, determinada por simulação computacional, poderia gerar uma redução do consumo de energia de 40% na ponta e 29% fora da ponta, em relação aos valores realizados no mês de março de 2000.

No presente trabalho, será analisada e quantificada a possibilidade de reduzir o consumo de eletricidade pela **melhoria do rendimento** dos sistemas de bombeamento dos poços. O termo equivalente na língua inglesa para definir a capacidade do equipamento de transformar energia em trabalho é *energy efficiency*.

METODOLOGIA

Segundo a metodologia proposta, a avaliação do rendimento dos sistemas de bombeamento será feita com base em dados disponíveis de medidas de vazão, pressão e consumo de energia.

No estudo de caso foram utilizados 2 grupos de registros de dados mensais, relativos ao ano de 2003:

1. dados de monitoramento dos poços, que incluem medidas de nível da água, vazão instantânea, corrente e tensão elétrica; e
2. dados operacionais de água produzida por cada poço e o respectivo consumo de energia medido pela concessionária de energia elétrica.

O rendimento do sistema de bombeamento a partir da potência consumida foi estimado com base na **Equação 1**.

$$\eta = \frac{9,8 \times Q \times AMT}{P_c \times 3600} \dots\dots\dots(1)$$

onde:

- η = rendimento do sistema de bombeamento;
- P_c = potência consumida (kW);
- Q = vazão (m³/h);
- AMT = altura manométrica total (m).

O valor de rendimento calculado dessa forma equivale ao rendimento hidráulico-eleto-mecânico, real e global, que seria resultante do produto dos rendimentos da bomba, do motor, da transmissão mecânica, da transmissão elétrica (cabos de alimentação) e do sistema de acionamento. O cálculo do rendimento do sistema de bombeamento foi efetuado por dois métodos, denominados aqui de η_1 e η_2 .

No presente trabalho, buscou-se uniformizar as condições de análise dos rendimentos das bombas submersas e das de eixo prolongado. As perdas de carga adicionais, por atrito em mancais e eixos nas bombas de eixo prolongado, são computadas como parte do rendimento eletromecânico do equipamento.

Cálculo do rendimento η_1

O rendimento η_1 foi calculado segundo a **Equação 1**, empregando o valor da potência consumida, calculado com base nos valores médios de tensão entre as 3 fases (RS, RT, e ST) e da corrente das fases (R, S e T). Para o fator de potência dos motores ($\cos\phi$), adotou-se um valor único de 0,87.

O cálculo da potência consumida a partir das medidas de tensão e corrente foi efetuado pela **Equação 2**.

$$P_c = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos\phi \dots\dots\dots(2)$$

onde:

- P_c = potência consumida (kW)
- I = corrente elétrica (A)
- V = tensão elétrica (V)

$\cos\phi$ = fator de potência

Para a vazão (Q), foi utilizado o valor médio medido mensalmente durante o ano de 2003. O valor da altura manométrica total (AMT) representa a soma das alturas manométricas abaixo e acima da superfície. O valor da altura manométrica abaixo da superfície foi calculado com base no valor médio da profundidade do nível dinâmico medido mensalmente durante o ano de 2003, somado às perdas de carga por atrito na tubulação edutora. O valor da altura manométrica acima da superfície pode ser obtido de duas maneiras:

1. medido como pressão no interior da tubulação de descarga através de manômetro instalado logo na “cabeça” do poço; ou
2. calculado pela soma do desnível geométrico do ponto de descarga acima da superfície com as perdas de carga na tubulação que interliga o poço ao reservatório de descarga.

Cálculo do rendimento η_2

No cálculo do rendimento η_2 foi empregado o valor da potência consumida, calculado a partir do consumo de energia elétrica registrado nas contas mensais, utilizando-se o valor médio do ano de 2003. Tendo em vista que, em alguns subsistemas, um único medidor de consumo de energia é utilizado em conjunto pelo equipamento de bombeamento do poço e pela(s) bomba(s) de recalque em superfície, foram estimadas as parcelas do consumo total que seriam devidas somente às bombas dos poços, com base na proporcionalidade das potências nominais e nas estimativas de tempo de funcionamento das bombas de recalque, resultando em porcentagens de consumo.

Na aplicação da **Equação 1** para o cálculo do rendimento η_2 utilizou-se o valor médio mensal do ano de 2003 do volume bombeado de água, constante dos relatórios gerenciais de produção de água. O valor da altura manométrica total (AMT) foi o mesmo utilizado no cálculo de η_1 .

A defasagem existente entre os períodos de medição do consumo de energia elétrica e de medição do volume de água bombeada pode influir negativamente na qualidade dos resultados dos cálculos dos valores de rendimento η_2 . No entanto, adotando-se a média dos valores mensais, procura-se minimizar o efeito da defasagem dos períodos de medição.

Estimativa do potencial de redução do consumo de energia

A partir do cálculo dos rendimentos globais reais dos sistemas de bombeamento foi estimado o potencial de redução do consumo de energia mediante a otimização do sistema com a instalação de equipamentos de alto

rendimento e sistema de acionamento com inversores de frequência.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O mapa geológico simplificado da área da cidade de São Carlos-SP, baseado em Aguiar (1989), é apresentado na **Figura 1**. Em função do contexto geológico, são identificados os aquíferos descritos a seguir, (com indicação, entre parênteses, do respectivo símbolo utilizado na **Tabela 1**):

Aquífero Bauru (B) – representado por rochas sedimentares clásticas (arenitos mal selecionados, castanho claro, médio a grosseiros, imaturos, com níveis conglomeráticos basais, ocorrendo nas partes mais altas do terreno e com espessura máxima de poucas dezenas de metros) de idade cretácica superior, correlacionável à Formação Marília. A delimitação aqui apresentada em mapa engloba sedimentos da Fm. Itaqueri e a cobertura da Serra de São Carlos e Santana. O aquífero é intergranular, livre e semi-confinado, com área de ocorrência, espessura e capacidade restritas e potencial de aproveitamento em poços rasos e de baixa produção. O contato inferior dos sedimentos com as rochas basálticas propicia a ocorrência de diversas nascentes, na área urbana de São Carlos, as quais são alimentadas por esse aquífero.

Aquífero Serra Geral (bas) – representado por rochas efusivas do tipo basaltos, com ocorrência nas cotas intermediárias e nos fundos de vale, apresenta espessura de até 250 m, podendo apresentar camadas de arenito interderrame, similar ao da formação subjacente (Botucatu). O aquífero é eminentemente fissural, livre e semi-confinado, com forte anisotropia, decorrente da grande variação dos parâmetros hidráulicos da rocha basáltica que, segundo Aguiar (1989), pode apresentar condutividade hidráulica de 1 a 100 m/d, nas áreas onde se encontra intensamente fraturado e 0,01 m/d, quando compacto. Esse aquífero tem sido bastante explorado na área, em geral de forma conjunta com o aquífero subjacente (Guarani), em poços parcialmente revestidos, de baixa produção, com grande vulnerabilidade às contaminações bacteriológicas, causadas por fossas sépticas e vazamentos da rede coletora de esgotos. Alguns poços do SAAE, principalmente os mais antigos, atravessam as rochas basálticas e atingem o Aquífero Guarani e captam os dois aquíferos simultaneamente (bas/G).

Sistema Aquífero Guarani (G) – aquífero majoritariamente intergranular e eventualmente fissural constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, na área pode se apresentar como livre (G) e semi-confinado (Gc).

A Formação Botucatu é composta por arenitos finos a muito finos, muito bem selecionados, constituídos de grãos arredondados de quartzo fosco, com ocorrência nas porções mais baixas da área e espessura máxima de 200 m; apresenta uma grande área de afloramento com cerca de 53 km², ao redor da cidade de São Carlos-SP, dominando o setor sul e uma faixa do extremo noroeste. A área de afloramento é predominantemente plana, porém ocorre

também em escarpas abruptas e morros testemunho. Em alguns locais apresenta forte silicificação e recristalização, constituindo quartzitos maciços, explorados nos arredores da cidade de São Carlos-SP, para construção civil e pavimentação de passeios públicos. Nas áreas de afloramento, segundo PORTILLO (1988) em AGUIAR (1989), os arenitos apresentam silicificação dos espaços intersticiais, o que provoca variações da porosidade de 12% até 1%.

A Formação Pirambóia ocorre em subsuperfície, sem afloramentos na área, mas com grandes áreas de exposição a alguns quilômetros a leste de São Carlos-SP,

sendo representada por arenitos finos a grosseiros e até mesmo conglomeráticos, constituídos de grãos sub-arredondados, hialinos e esbranquiçados, com matriz argilosa. Apresenta em alguns locais, com maior incidência junto ao contato basal, a presença de rochas básicas intrusivas, formando diques e *sills* de diabásio.

Conforme dados dos ensaios de bombeamento realizados logo após a construção dos poços, os valores da condutividade hidráulica variam de 0,6 a 1,4 m/d com média de 0,9 m/d. O valor médio da vazão específica dos poços existentes é de 5,1 m³/h/m.



Figura 1: Mapa geológico simplificado da área da cidade de São Carlos-SP (adaptado de Aguiar, 1989)

Os poços utilizados no presente estudo, cujos dados são apresentados na **Tabela 1**, pertencem à autarquia municipal SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) e representam cerca de 47% da água do sistema de abastecimento público de São Carlos-SP. Além dos poços do SAAE, estima-se que existam na cidade mais de

300 poços, porém constam dos registros de dados do DAAE – Departamento de Água e Energia Elétrica (autarquia estadual), com concessão de outorga de direito de uso, apenas 34 poços do Aquífero Bauru, 15 do Aquífero Serra Geral e 57 do Sistema Aquífero Guarani.

Tabela 1: Dados construtivos dos poços do SAAE – São Carlos-SP

n°	nome local	ano	prof. total (m)	(1) aquífero	câmara bombeamento			diâmetro filtros (pol)	(2) poço inativo
					prof. (m)	diâmetro (pol)	filtros intercalados		
1	Água Vermelha I	1962	68	G					3
2	A.Fischer Santos	1969	130	bas/G		8		8	
3	Novo Horizonte	1979		bas/G		6		6	2
4	Parque Delta	1979	151	bas		6			1
5	Distrito Industrial MA	1980	165	bas/G		8		8	2
6	Santa Marta I	1981	172	bas		6			3
7	Santa Marta II	1981	150	bas		6			2
8	Samambaia	1983	167	G		8		8	
9	Maria Stela Fagá	1986	387	Gc	256	10		6	
10	Água Vermelha II	1987	84	bas		6		6	1
11	Azuville II	1987	290	Gc	156	12		6	
12	São Carlos III	1988	457	Gc	235	12	x	8	
13	Jockey Club I	1990	235	Gc		8		8	1
14	Parque Faber	1991	213	bas/G		6		6	
15	Santa Felícia	1992	465	Gc	270	13		8	
16	Boa Vista	1992	345	Gc	225	10		8	
17	Cidade Aracy	1994	393	Gc	240	14	x	8	
18	Santa Eudoxia	1994	208	G		8		8	
19	Tramer	1995	300	Gc	201	10		8	
20	Vila Nery	1996	484	Gc	327	12	x	8	
21	Cruzeiro do Sul	1998	293	G	180	13	x	8	
22	Parque Fehr	1998	270	Gc	192	8		4	
23	Jockey Club II	1999	356	Gc	243	13	x	8	
24	Nova Estância	2000	479	Gc	270	13		8	4
25	Douradinho	2002		G					
26	Habitacional WLS	2002	277	G	223	10	x	6	
27	Água Vermelha III	2003	255	G		6		6	
28	Vila Alpes	2003	292	G		14		14	4
FONTE: Relatórios das empresas perfuradoras		LEGENDA							
		(1) aquífero	bas	basalto	(2) poço inativo	1	inativo com bomba		
			bas/G	basalto e Guarani		2	inativo sem bomba		
			G	Guarani		3	abandonado		
Gc	Guarani confinado		4	não operado					

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **Tabela 2** são relacionados os equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE, que se encontravam instalados em Abril/2004.

Na **Tabela 3** são apresentados os resultados do cálculo dos rendimentos eletromecânicos η_1 e η_2 , utilizando-se a **Equação 1**.

Tabela 2: Equipamentos de bombeamento dos poços do SAAE – São Carlos-SP

fabricante	potência nominal (cv)		quantidade
	de	até	
Leão	0	10	1
Leão			6
Ebara	10	50	1
Pleuger			1
Ebara	50	100	3
Pleuger			1
Ebara	100	200	3
Pleuger			2
Esco			3
Ebara	200	500	1
Pleuger			1
total			23

Obs: Existiam 19 poços em operação e os demais encontravam-se desativados porém ainda tinham as bombas instaladas

Os valores calculados de rendimento eletromecânico (**Tabela 3**) indicam que, de maneira geral, os resultados dos dois métodos de cálculo do rendimento eletromecânico são semelhantes, com exceção apenas dos poços nº 2 e 8, onde os valores foram discrepantes, devido provavelmente à inadequação dos dados utilizados no cálculo de rendimento η_2 .

Tabela 3: Valores de rendimento eletromecânico

nº do poço	rendimento	rendimento	média
	(η_1)	(η_2)	
2	51%	33%	
5	47%	52%	49%
8	50%	67%	
9	55%	50%	52%
11	58%	51%	55%
12	45%	46%	45%
14	40%	33%	36%
15	51%	46%	49%
16	43%	40%	42%
17	40%	45%	42%
18	51%	50%	50%
19	40%	41%	41%
20	45%	47%	46%
21	40%	49%	44%
22	49%	51%	50%
23	38%	40%	39%

Obs: 3 poços haviam sido construídos há pouco tempo e não possuíam séries históricas de dados operacionais, restando 16 poços com dados adequados para análise.

Na maioria dos poços em que foi possível efetuar o cálculo do rendimento eletromecânico global dos sistemas de bombeamento, os valores obtidos situaram-se entre 40 e 50%. Os valores obtidos do rendimento podem ser

considerados baixos e provavelmente são decorrentes de: desgaste excessivo (idade da bomba), mau dimensionamento ou alteração da condição operacional, manutenção insuficiente ou ineficiente, tecnologia de fabricação ultrapassada e funcionamento fora do “ponto ótimo de operação”.

Na **Tabela 4** são apresentadas as condições operacionais dos poços em termos de médias, relativas ao ano de 2003.

Tabela 4: Dados operacionais dos poços do SAAE – São Carlos-SP

nº	nome local	nível estático (m)	nível dinâmico (m)	vazão bombeada (m³/h)	custo unitário (R\$/m³)
2	A.Fischer Santos	57,8	77,1	48,5	0,148
5	Distrito Industrial MA	89,1	92,3	39,6	0,180
8	Samambaia	70,3	80,3	18,0	0,095
9	Maria Stela Fagá	145,8	168,3	93,1	0,162
11	Azuville II	65,6	108,0	95,0	0,118
12	São Carlos III	156,1	176,2	130,7	0,237
14	Parque Faber	100,3	125,2	17,6	0,426
15	Santa Felícia	171,6	235,6	281,3	0,172
16	Boa Vista	121,3	158,9	156,5	0,175
17	Cidade Aracy	96,7	98,0	171,6	0,111
18	Santa Eudoxia	87,5	97,4	28,9	0,191
19	Tramer	111,4	116,7	22,2	0,324
20	Vila Nery	167,7	196,9	286,7	0,156
21	Cruzeiro do Sul	112,6	147,3	125,0	0,133
22	Parque Fehr	140,9	157,2	66,3	0,424
23	Jockey Club II	135,5	149,9	143,8	0,237
24	Nova Estância	154,1	199,6	285,0	
25	Douradinho	137,8	155,2	49,2	0,213
26	Habitacional WLS	75,1	94,8	130,7	
27	Água Vermelha III	207,2	210,4	21,6	0,354
28	Vila Alpes	87,0	128,7	182,2	0,108

Obs: Os dados operacionais acima referem-se às condições médias observadas no ano de 2003, conforme dados fornecidos pelo SAAE.

No ano de 2003, os poços do SAAE produziram em conjunto 9,5 milhões de m³ de água, consumindo cerca de 10 mil MWh, o que representou uma despesa de R\$ 1,6 milhões, resultando em um custo unitário médio da água subterrânea produzida em 2003 de R\$ 0,17/m³.

Alguns poços apresentaram custo operacional bem acima da média, sendo que em quatro poços (nº 14, 19, 22 e 27), o custo unitário da água ultrapassou R\$ 0,30/m³. Os dados evidenciam uma relação inversamente proporcional do custo operacional unitário com o rendimento eletromecânico, conforme ilustrado na **Figura 2**.

Os poços com custo operacional elevado são em geral de baixa produção e podem apresentar consumo excessivo de energia pelo baixo rendimento do sistema de bombeamento, decorrente de alteração da condição de operação, que altera a carga de trabalho da bomba, reduz a vazão bombeada e desloca o ponto ótimo de trabalho da bomba para outro de menor eficiência. As seqüências históricas de dados dos poços indicam que o principal fator causador de alteração da condição operacional é o rebaixamento progressivo do nível potenciométrico do

aquífero, submetido a um regime de exploração não-sustentável.

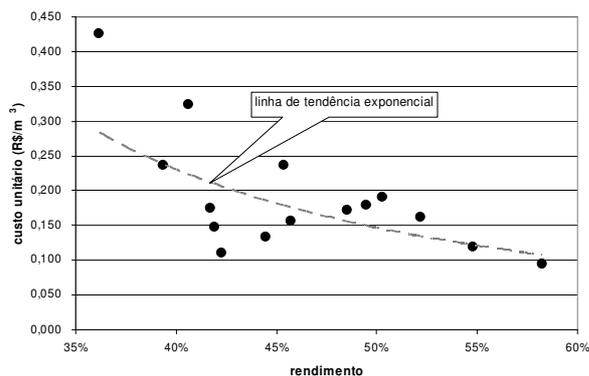


Figura 2 Gráfico do Custo unitário x rendimento eletromecânico

Propostas para melhoria do sistema

Os estudos realizados indicaram que os sistemas de bombeamento apresentam atualmente baixos valores de rendimento eletromecânico e, portanto, uma das medidas possíveis para otimização do consumo de energia elétrica nos poços do SAAE de São Carlos seria a substituição dos conjuntos motor-bomba atuais por equipamentos de alto rendimento.

Rendimento do conjunto

Segundo catálogos e curvas de performance dos fabricantes de bombas submersas de alto rendimento, produzidas e comercializadas no país, o valor do rendimento eletromecânico dos conjuntos motor-bomba é da ordem de 80%. Portanto, seria seguro considerar um valor de rendimento teórico de 76% para os conjuntos de motor-bomba de alto desempenho. Para os demais componentes do sistema (unidade de alimentação elétrica, queda de tensão de 4% nos cabos elétricos, etc.) foi estimado um valor seguro de rendimento de 85%, o que resulta numa expectativa de rendimento global do sistema de, no mínimo, 65%. Segundo PERRONI e RODRIGUES (2004), esse valor foi obtido em condição real e pode ser considerado viável de ser alcançado com equipamentos disponíveis no mercado. No entanto, os equipamentos de alto rendimento também deverão apresentar queda de rendimento por desgaste ao longo de sua vida útil, o que não está sendo aqui considerado.

A Tabela 5 apresenta a quantificação da redução do consumo de energia dos sistemas considerando 65% de rendimento global dos equipamentos de bombeamento. Nos cálculos efetuados foi mantido o regime operacional registrado durante o ano de 2003, ou seja mantendo-se os períodos de funcionamento e a produção individual média dos poços.

Os resultados obtidos indicam que a utilização de equipamentos de bombeamento de alto desempenho poderia gerar uma redução média de 15% de consumo total

de energia elétrica, em relação aos valores registrados em 19 poços no ano de 2003. O valor total da redução de demanda seria de 279 kW, do consumo fora da ponta, 146.045 kWh e do consumo na ponta, de 8.451 kWh (Tabela 5).

Tabela 5: Projeção da redução do consumo de energia elétrica considerando 65% de rendimento em todos os sistemas de bombeamento dos poços

item	unidade	medido em 2003	teórico com 65% rendimento	redução
demanda	kW	2055	1.776	279 14%
consumo fora da ponta	kWh	976.821	830.775	146.045 15%
consumo na ponta	kWh	25.839	17.388	8.451 33%

Os resultados obtidos permitiram quantificar a redução das despesas de energia elétrica, conforme dados da Tabela 6, utilizando-se os valores atuais das tarifas do plano tarifário horo-sazonal verde. Os valores de redução do consumo e da demanda resultam numa economia global anual de R\$ 270 mil. Para o cálculo do período de amortização, foi adotado o período de 5 anos e a taxa de juros de 15% ao ano, resultando no valor presente da economia de energia elétrica de R\$ 900 mil.

Tabela 6: Estimativa da redução das despesas com energia elétrica em 5 anos, com taxa anual de juros de 15%

item	unidade	redução de consumo	tarifa (R\$)	economia (1.000 R\$)	
				mensal	anual
demanda	kW	279	7,973	2	27
consumo fora da ponta	kWh	146.045	0,098	14	171
consumo na ponta	kWh	8.451	0,717	6	73
total				23	271
valor presente, com taxa de 15% ao longo de 5 anos				908	

Segundo informações de fabricantes, o preço de bombas submersas de alto rendimento pode ser avaliado de forma aproximada em função da potência e equivale a R\$ 800,00 por kW. Desta forma, uma estimativa aproximada dos custos para substituição das bombas, pode ser feita da seguinte forma:

- Somatória das potências de 19 bombas de alto rendimento (P): 1.776 kW;
- Custo unitário das bombas de alto rendimento (C): R\$ 800,00 / kW;
- Valor total do investimento (P x C): R\$ 1.420 mil

Portanto, o valor estimado da economia de energia elétrica poderia cobrir parte significativa do valor do investimento em cinco anos.

Dimensionamento do conjunto

A metodologia usualmente aplicada para dimensionamento de sistemas de bombeamento utiliza projeções de rebaixamento do nível da água para um ciclo de bombeamento de 24 h e não considera as respostas do aquífero para longos períodos de exploração e os efeitos de interferência com outros poços. Como resultado, os equipamentos de bombeamento que são dimensionados dessa forma irão operar a maior parte da sua vida útil fora do seu ponto de melhor rendimento. Por outro lado, se no dimensionamento for adotada uma projeção do nível dinâmico para o final da vida útil da bomba, tem-se o superdimensionamento para o período inicial de operação e, conseqüentemente, desperdício de energia em válvulas estranguladoras do fluxo.

A quantificação das projeções futuras dos rebaixamentos em cada poço a serem consideradas no dimensionamento dos equipamentos de bombeamento exigiria a implantação de um modelo matemático dos aquíferos, que possibilitaria também definir diretrizes para assegurar a sustentabilidade do aproveitamento da água subterrânea na área. Na falta de um modelo matemático do aquífero, poderiam ser utilizadas projeções baseadas na tendência de evolução do nível da água estabelecidas com base em séries históricas de dados de monitoramento dos poços.

Numa etapa posterior, seria feita a seleção da bomba, assegurando que o seu ponto de funcionamento (cruzamento da curva de performance da bomba, com a curva manométrica do poço) corresponda ao melhor rendimento do equipamento que será utilizado, conforme indicado na **Figura 3**.

Outro fator referente ao dimensionamento dos sistemas de bombeamento é o do recalque adicional da água em superfície, desde a boca do poço, até o reservatório de distribuição, que pode ser feito de duas formas:

1. a própria bomba do poço pode ser dimensionada para vencer a altura do reservatório e as perdas de carga da sub-adutora; e
2. a bomba do poço é dimensionada para elevar a água até um reservatório intermediário e o recalque até o reservatório de distribuição é feito com bombas centrífugas de eixo horizontal.

No primeiro caso, a bomba super-dimensionada do poço exigirá que o diâmetro do poço também seja super-dimensionado para poder comportá-la em seu interior, o que pode implicar numa elevação excessiva do custo construtivo do poço.

No segundo caso, faz-se necessário construir um reservatório intermediário, que, dependendo da vazão do poço, poderá ter um custo elevado e resultar em um sistema com controle operacional delicado para compatibilizar a vazão da bomba de recalque com a do poço.

As variações simultâneas de altura manométrica (nível dinâmico) e vazão representam os principais fatores

complicadores para o correto dimensionamento dos equipamentos de bombeamento para poços. Devido a essa característica intrínseca de carga variável, a condição ótima de operação dos poços é obtida com sistemas que permitem a variação da rotação da bomba. Atualmente, a solução técnica para esse problema é a utilização de sistemas de acionamento dos motores elétricos com inversores de freqüência.

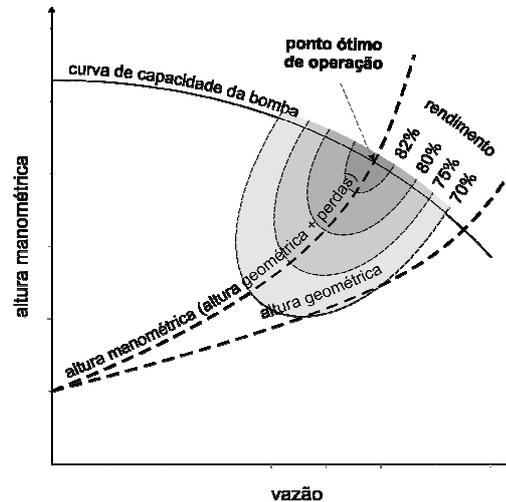


Figura 3: Gráfico esquemático das curvas de demanda do sistema (poço) e curvas de performance da bomba (adaptado de LÜDECKE & BOLDT, 2004).

PERRONI e RODRIGUES (2004) apresentam uma solução prática e econômica para o problema da complementação do recalque com a aplicação de inversores de freqüência intercomunicáveis para acionamento da bomba auxiliar (*booster*) tipo turbina, em linha, acionada pela pressão gerada pelo funcionamento da própria bomba do poço (**Figura 4**). No sistema proposto, o acionamento da bomba submersa instalada no interior do poço é comandado pela central de motores em função do nível da água no reservatório. A bomba do poço efetua a elevação da água até a superfície gerando uma pressão adicional equivalente a uma coluna de água de 10 m. Essa pressão é detectada por um pressostato instalado em superfície e gera o sinal para o acionamento automático da bomba auxiliar (*booster* em linha). A rotação da bomba auxiliar é regulada automaticamente por inversor de freqüência de forma a equilibrar a vazão recalçada com a produção da bomba do poço. O rebaixamento do nível da água no interior do poço é monitorado por sensor de pressão instalado juntamente com a bomba submersa e pode gerar dois tipos de comando: o primeiro seria o aumento gradual da rotação da bomba do poço (por meio de inversor de freqüência) para manter a vazão constante ao longo dos anos, o segundo pode ser o desligamento automático da bomba, caso o nível da água no interior do poço atinja o valor mínimo de segurança necessário para o seu correto funcionamento.

A experiência prática dos autores indica que uma das causas importantes de desperdício de energia em sistemas de bombeamento é a variação de carga na saída das bombas provocadas pelo acionamento de válvulas estranguladoras do fluxo, durante períodos de baixa demanda.

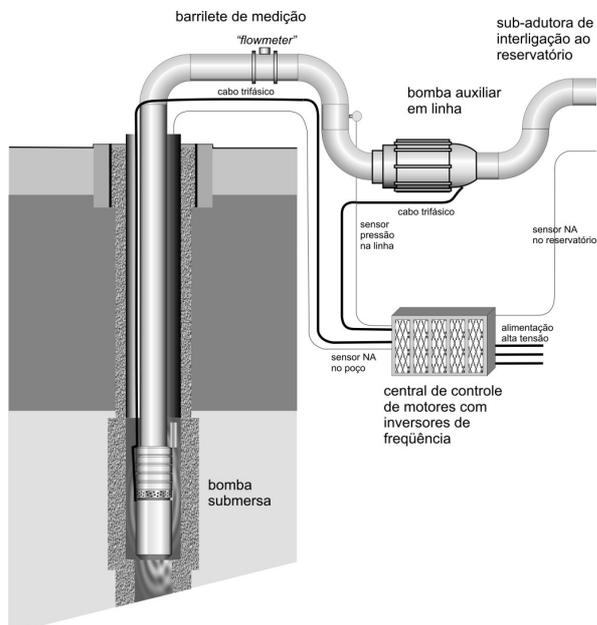


Figura 4: Desenho esquemático de sistema de recalque com bomba em linha, em superfície, e bomba submersa com central de controle de motores e acionamento com inversores de frequência.

No caso de equipamentos de bombeamento de poços tubulares, além da variação de carga na saída do poço, causada pelo mesmo fator mencionado, ocorre a variação de carga na entrada da bomba devido às variações do nível da água que fazem com que as bombas dos poços operem fora das condições previstas em seu dimensionamento, tais como: variações de nível da água a cada ciclo de funcionamento da bomba (desde o estático até o dinâmico), variações do nível da água provocadas por alterações da vazão bombeada, rebaixamento progressivo do nível potenciométrico do aquífero, interferência entre poços próximos e com funcionamento simultâneo, redução de performance do poço etc.

Desta forma, além da utilização de equipamentos com alto rendimento eletromecânico e adotando-se as projeções de queda de nível da água no dimensionamento das bombas, sugere-se a utilização de inversores de frequência para o acionamento dos novos equipamentos de bombeamento dos poços, como forma de proporcionar economia adicional de energia elétrica e preservação da vida útil dos equipamentos.

A aplicação de inversores de frequência para acionamento das bombas dos poços deverá proporcionar

economia de energia ainda maior, quando a rotação da bomba for comandada automaticamente por sensor de nível da água no interior do poço e sensor de pressão na saída do poço devido aos seguintes fatores:

- a capacidade da bomba do poço pode ser superdimensionada inicialmente, sem que isso represente um acréscimo de consumo de energia pois as variações de nível da água serão compensadas com a mudança da rotação da bomba;
- nos primeiros anos de operação, a bomba irá funcionar com baixa rotação e poderá ser acelerada progressivamente de forma a manter constante a vazão, mesmo que o poço venha a apresentar futuramente queda do nível dinâmico; e
- durante cada partida da bomba haverá menor consumo de energia, pois a rotação da bomba será baixa devido ao nível dinâmico alto.

Medidas complementares para reduzir o custo de energia elétrica

Além dos fatores técnicos que correspondem ao objetivo central do presente trabalho e que objetivam a redução da potência dos equipamentos de bombeamento, existem algumas ações administrativas e estruturais que podem contribuir concomitantemente para a redução dos custos operacionais com energia elétrica em poços profundos.

Embora grande parte dessas ações já tenha sido implementada, ao menos parcialmente, ainda existem alguns aspectos que poderiam ser melhorados referentes a: adequação tarifária; alteração da tensão de alimentação; desativação das instalações não utilizadas; correção do fator de potência e melhoria do fator de carga, que pode ser obtida através de alterações do sistema operacional, buscando a minimização do funcionamento em horários de ponta e a otimização da operação com base em custos.

Uma ação que deveria ter caráter emergencial é a adequação das instalações dos poços de forma a viabilizar o monitoramento integral da operação, com medidas precisas de vazão, nível da água no poço (estático e dinâmico) e pressão na saída.

Algumas ações complementares envolvem investimentos adicionais, entre as quais destacam-se: aumento da disponibilidade de reserva para eliminar a necessidade do funcionamento de bombas nos horários de ponta; interligação de setores do sistema de abastecimento; eliminação de recalques diretos com a bomba do poço aos reservatórios de distribuição; redução das perdas de carga em tubulações no interior dos poços e nas interligações aos reservatórios (por exemplo, substituição de tubulações antigas e minimização das perdas localizadas em válvulas e conexões); ampliação do nível de automação da operação.

Como forma de possibilitar a análise da performance dos poços e respectivos equipamentos de bombeamento, recomenda-se que sejam mantidos registros de dados operacionais mensais e leituras simultâneas dos instrumentos de medição, englobando:

1. Nível da água “estático” no interior do poço imediatamente antes do acionamento da bomba e durante períodos prolongados de parada para manutenção da bomba ou do poço;
2. Nível dinâmico após períodos fixos de funcionamento da bomba;
3. No caso de medidas de vazão, recomenda-se que sejam utilizados pelo menos 2 sistemas alternativos de medição;
4. Devem ser efetuadas as medidas de pressão na saída do poço, registro de horas de funcionamento das bombas, volume total acumulado, consumo de energia e potência consumida de cada bomba (em separado: a bomba do poço e a(s) bomba(s) de recalque em superfície), pH, condutividade elétrica, potencial redox, oxigênio dissolvido, gás carbônico dissolvido;
5. Nos relatórios mensais de monitoramento devem ser registradas justificativas detalhadas para ausências de medidas.

Os dados assim coletados permitem a verificação dos valores reais do rendimento eletromecânico dos sistemas de bombeamento instalados nos poços e o monitoramento da performance da bomba de forma sistemática, através do lançamento na curva teórica de um ponto real medido a cada seis meses.

CONCLUSÕES

Os cálculos dos rendimentos eletromecânicos dos sistemas de bombeamento dos poços apresentaram resultados com valor entre 40 e 50%, considerado baixo, pois o padrão tecnológico atual do mercado permite a obtenção de valores superiores a 65%.

Entre as principais causas do baixo rendimento eletromecânico dos equipamentos de bombeamento é apontada a alteração das condições operacionais causadas pelo rebaixamento do nível da água no aquífero, que pode ser agravada por desgaste de alguns equipamentos, tecnologia de fabricação ultrapassada, insuficiência ou ineficiência de manutenção.

Nos 19 poços analisados verificou-se que através da utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento será possível reduzir 15% do consumo de energia elétrica e que a redução equivalente de despesas com energia elétrica em cinco anos seria de R\$ 900 mil (valor presente), representando mais da metade dos investimentos necessários para a modernização dos sistemas de bombeamento com a aquisição de bombas submersas de alto rendimento.

O método simplificado de cálculo do rendimento eletromecânico, com base em registros de dados existentes, apresentado neste artigo, mostrou-se adequado para efetivar avaliações preliminares da eficiência energética de sistemas de bombeamento instalados em poços tubulares.

Nos casos de poços profundos de alta produção e com grande variação de carga, a aplicação de sistemas de

acionamento elétrico com inversor de frequência, que permite variar a rotação da bomba, poderá gerar economia adicional significativa de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, R.L. (1989). Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP: contribuição ao planejamento. 2v. 127p + 14 mapas. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.
- BAHIA, S.R. (1998). *Eficiência energética nos sistemas de saneamento*. IBAM, PROCEL/ELETROBRÁS. Rio de Janeiro. 76 pg.
- CLABORN, B.J. & RAINWATER, K.A. (1991). *Well-Field Management for Energy Efficiency*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 10, October 1991, pp. 1290-1303
- LÜDECKE, A. & BOLDT, H. (2004). Cut costs by water well monitoring. World Pumps 2004. Feature submersible pumps. Elsevier Ltd. Disponível on line em: <http://www.ksb.com.br>, acesso em 01/11/2004.
- OUGUI, J.Y. (2003). *Estudo da operação otimizada de sistema de bombeamento de água*. 145p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.
- PERRONI, J.C.A. (2003). Otimização dos sistemas de bombeamento dos poços tubulares profundos. Geowater. Araraquara. 2003
- PERRONI, J.C.A. (2005). *Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água – O caso do abastecimento público da cidade de São Carlos – SP*. 145p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PERRONI, J.C.A. e RODRIGUES, J.M. (2004) Otimização de custos de bombeamento em poços profundos de Araraquara – SP. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Cuiabá – MT. 2004.
- REIS, L.F.R., RIBEIRO, G.P. e CHAUDHRY, F.H. (2000). Cost allocation in reservoir-groundwater well subsystems under optimized operation. In: International Symposium CWS 2000: Water Network Modeling for Optimal Design and Management. Proceedings. Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, UK, p.181-191. Edited by Godfrey Walters and Dragan Savic, ISBN 0-9539140-0-3.
- RIBEIRO, G.P., (2000). *Custos de produção de águas subterrâneas com operação otimizada via algoritmos genéticos para o abastecimento urbano de Araraquara – SP*. Dissertação de Mestrado, Depto de Hidráulica e Saneamento EESC – USP, (220 pg). 2000.
- TSUTIYA, M.T. (2001). Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. 185p. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e

Ambiental, ABES Seção São Paulo, São Paulo, 1ª. Edição. 2001.

Assessment of energy efficiency and proposals for improvement of groundwater pumping systems.

ABSTRACT

Several public water supply systems of Brazilian cities distribute mainly or exclusively water from wells. The majority needs pumping equipments to raise the groundwater to the surface, producing high operating costs due to electricity consumption. This paper describes a methodology to estimate energy efficiency of wells and their respective pumping equipment based on operational data. The applicability of the proposed methodology is evaluated in a case study of 21 water wells, which are used for public water supply of São Carlos – SP. The results indicated that the use of high-efficiency equipment should reduce 15% of the present electric power consumption. Costs saving in a 5 years period could support more than 50% of the necessary investments in new pumping equipment. Taking the optimization of the energy efficiency of water wells and the sustainability of groundwater as general constraint, the application of the proposed methodology may contribute to the improvement of the quality of public water supply facilities and generate considerable savings.

Keywords: water well, drive shaft pump, energy efficiency, pumping efficiency, public water supply.