

POR

C. Tatizana¹, e J.P. dos Santos²

Resumo--No presente trabalho, os autores definem uma metodologia para se determinar a "vazão ótima de exploração" de um poço, considerando a viabilidade de se obter água de outra fonte alternativa. O método é uma extensão daquele já proposto por HELWEG, introduzindo-se algumas condições restritivas do ponto de vista hidráulico. Através da maximização da função "valor atual da receita líquida", a procura da vazão ótima é feita pelo método das aproximações sucessivas. Para facilitar os cálculos foi escrito um programa em linguagem BASIC e apresentados três exemplos ilustrativos.

INTRODUÇÃO

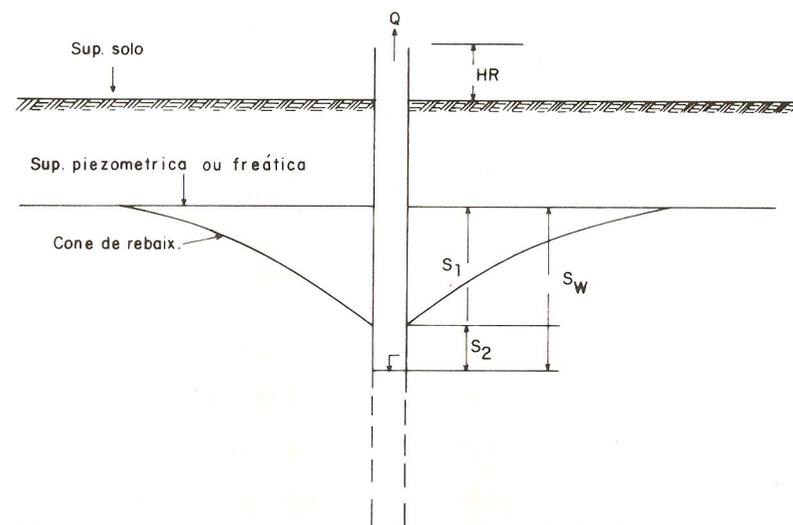
A tomada de decisão para a exploração de água subterrânea envolve diversos aspectos, dentro os quais se pode destacar sua viabilidade técnico-econômica frente a água superficial alternativa. Se não se pode obter esta última, o problema se simplifica, porém, na hipótese de sua ocorrência, a captação de água subterrânea deverá passar por um processo de análise, comparando-se as diferentes alternativas propostas, para selecionar aquela que melhor se ajuste às características técnicas e econômicas do projeto.

Embora a água subterrânea apresente uma série de vantagens, comparativamente a água superficial, tais como menor vulnerabilidade à poluição e temperatura e características químicas praticamente constantes, um dos fatores mais restritivos à sua captação é o bombeamento que, como salientado por HELWEG (2), pode alcançar 60-80 % do total do custo para a sua obtenção.

Preocupado com esse aspecto, aquele autor, numa tentativa de avaliar economicamente o desempenho de um poço, utilizou o critério do "valor atual", combinando a função benefício-custo com a equação do poço, para estabelecer a vazão ótima de exploração, quando se dispõe do custo de água superficial alternativa. No presente trabalho, os autores, seguindo a mesma metodologia proposta por HELWEG (2), introduzem novas condicionantes e formulam um programa em linguagem BASIC, acessível a qualquer microcomputador.

¹Geólogo²Geólogo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Est.deS.Paulo

Ao se bombear um poço, a superfície freática ou piezométrica sofre um rebaixamento, cuja forma é apresentada na Figura 1 a seguir.



onde:

- ND = profundidade do nível dinâmico
 NE = profundidade do nível estático (m)
 s₁ = perda de carga no aquífero
 s₂ = perda de carga devida ao poço
 s_w = perda de carga total no poço ou rebaixamento no poço (m)
 Q = vazão bombeada (m³/h)
 HR = altura de recalque

Note-se que o rebaixamento no poço (s_w), é a soma de s₁ e s₂, expressos pela seguinte relação:

$$s_1 = BQ \quad (1)$$

$$s_2 = CQ^n \quad (2)$$

$$s_w = BQ + CQ^n \quad (3)$$

onde:

$$Q = \text{vazão de bombeamento do poço (m}^3/\text{h)}$$

B = parâmetro que caracteriza a perda de carga do aquífero
 C = parâmetro que caracteriza a perda de carga no poço
 n = expoente que caracteriza a turbulência de água ao entrar no poço

A equação (3), denominada "equação do poço" proposta por RO RABOUGH (5), é geralmente utilizada para definir a "vazão de exploração". No entanto, vale salientar que a vazão de um poço está limitada por condicionantes geométricas e hidráulicas. O rebaixamento da superfície piezométrica, em aumentando o gradiente natural do aquífero, aumenta também a velocidade de fluxo em direção ao poço e, conseqüentemente a "força de percolação", podendo arrastar o material mais fino contido na formação geológica. Estudos realizados por diversos autores (4), mostram que a "velocidade de percolação crítica" - a partir da qual ocorre o deslocamento do material aquífero - é expressa como $V_c = 0,2 (K)^{1/4}$. A partir daí foram realizados estudos teóricos e práticos para definir a "velocidade limite", que corresponde ao limite superior da velocidade de percolação, abaixo da qual não há mais arraste de material fino.

As expressões mais conhecidas são as seguintes:

- a) $V_{lim} = 6,6 \times 10^{-2} (K)^{1/2}$ (SHICHARDT, 1928, apud KOVACS)
 b) $V_{lim} = 3,2 \times 10^{-2} (K)^{1/3}$ (ABRAMOV, 1952, apud KOVACS)
 c) $V_{lim} = 5 \times 10^{-2} (K)^{1/4}$ (SCHMIEDER, 1966, apud KOVACS)

onde "K" é a condutividade hidráulica do aquífero expressa em m/s.

No presente trabalho é adotada a expressão de SCHARDT por ser mais conservadora e oferecer maior coeficiente de segurança. Desse modo, considerando o exposto acima, a "vazão limite" de um poço vem dada pela seguinte expressão:

$$Q_{lim} = 2 r_w h_1 \times V_{lim} \times 3\ 600 \quad (4)$$

onde:

Q_{lim} = vazão limite, do poço (m³/h)
 r_w = raio do poço (m)
 h_1 = altura da coluna d'água na face do poço (m)
 V_{lim} = velocidade limite (m/s)

Por outro lado, levando-se em conta que, para fins práticos, o limite superior do número de Reynolds (RE) para fluxo laminar é de 2 000, a vazão máxima admitida nos filtros será dada por:

$$Q_{max(f)} = 2 r_f \times L \times A_o \times V_{lim(f)} \times 3\ 600 \quad (5)$$

$$V_{lim(f)} = 3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

r_f = raio dos filtros (m)

L = comprimento dos filtros (m)

A_o = porcentagem da área aberta (fração)
 A_o = fator de diminuição da área aberta dos filtros (0,40 - 0,60)

Enquanto a equação (3) permite calcular o rebaixamento no poço para uma vazão qualquer, a expressão (4) limita esta última, considerando-se as condições de estabilidade da formação aquífera, para se evitar o arraste das partículas mais finas e a conseqüente produção de areia.

Conhecendo-se pois as características hidráulicas do poço, e as condições limites para a sua exploração e da fonte de água superficial alternativa, o problema resume-se em comparar os custos resultantes de cada uma das opções. Isso pode ser feito, como já proposto por HELWEG (2), através da análise pelo método do "valor atual da receita líquida", maximizando a função. Na análise da função, estão incluídos como custo, os gastos referentes ao consumo de energia para bombear um determinado volume de água subterrânea e, como benefício, os gastos com a água superficial alternativa para se obter igual volume aduzido. A função "valor atual", é expressa por:

$$V_A = \sum_{j=0}^N (a_j) (1+i)^{-j} - A_o \quad (6)$$

onde:

V_A = valor atual da receita líquida
 a_j = benefício (BE) - custos (CO)
 i = taxa de juros
 j = ano ou mês considerado
 N = número de meses ou anos considerados
 A_o = investimento inicial

Esta equação pode ainda ser modificada em admitindo-se as seguintes simplificações:

a) os custos e as receitas ocorrem simultaneamente no mesmo período;

b) o custo de bombeamento é invariável com o tempo, o que implica em dizer que não há variação dos custos de manutenção do equipamento.

Posto isso, a equação (6) pode ser reescrita como:

$$V_A = a_j - A_o \quad (7)$$

No presente caso, os benefícios seriam aqueles que se obtêm a partir do uso de água superficial alternativa bombeada a uma vazão "Q". Assim, os benefícios podem ser expressos como:

$$BE = K_1 \times Q \times t \quad (8)$$

na qual:

BE = benefícios

K_1 = custo do m^3 de água superficial
 Q = vazão aduzida em m^3/h
 t = tempo de bombeamento

Por sua vez, os custos (CO), são aqueles correspondentes ao gasto de energia para bombear a água do poço a uma vazão "Q" e a uma altura manométrica total "HT", ou seja:

$$CO = \frac{Q \times HT \times 0,746 \times K_2 \times t}{273,46 \times e} \quad (9)$$

onde:

Q = vazão de bombeamento (m^3/h)
 HT = $s + NE + HR$
 s = rebaixamento (m) no poço
 NE = profundidade do nível estático (m)
 HR = altura de recalque acima da boca do poço (m)
 e = eficiência do conjunto motor-bomba (fração)
 K_2 = custo do Kw/h
 t = tempo de bombeamento

Substituindo-se (8) e (9) em (7), tem-se:

$$V_A = K_1 Q t - \frac{K_2 Q (NE + s + HR) 0,746 t}{273,26 e} - A_o \quad (10)$$

ou ainda:

$$V_A = K_1 Q t - Q (NE + s + HR) K_2 \frac{2,728}{e} t - A_o \quad (11)$$

Substituindo-se o valor de (s) dado por (3) em (11) vem:

$$V_A = K_1 Q t - BQ^2 + CQ^{n+1} + Q(NE + HR) \cdot K_2 \cdot \frac{2,728 \cdot 10^{-3}}{e} t - A_o \quad (12)$$

O máximo da função $V_A = f(Q)$ é obtido igualando-se a zero a derivada primeira de (12), ou seja $d(V_A)/dQ = 0$. Então:

$$K_1 t - 2BQ + (n+1)CQ^n + NE + HR \cdot K_2 \cdot \frac{2,728 \times 10^{-3}}{e} t = 0 \quad (13)$$

Para a solução de (13), utilizou-se o método das "aproximações sucessivas". Na procura da "vazão ótima", deve ficar claro que a mesma não pode ultrapassar a "vazão limite". Esta última é entendida como a máxima vazão de bombeamento do poço, sem comprometer a estabilidade da formação geológica e a eficiência da exploração. No programa proposto a vazão limite é tomada como o menor valor entre a vazão limite do aquífero e a vazão permitível no filtro.

PROGRAMA DE PROCURA DA VAZÃO ÓTIMA

O programa foi desenvolvido em linguagem BASIC para microcomputador, da linha APPLE, com capacidade de memória superior a 6 Kbytes.

O algoritmo procura o valor da vazão que maximiza a função VALOR ATUAL através da resolução da equação (13), utilizando o método das "aproximações sucessivas". A pesquisa da vazão mais lucrativa limitar-se-á ao intervalo da vazão zero até a vazão máxima de bombeamento, considerando o tempo de 1 h para se obter o valor atual máximo/h. O resultado será refinado por meio de uma interpolação linear e a precisão portanto, será maior que a precisão exigida pelo usuário. Na Figura 2, se apresenta o Diagrama de blocos simplificado do programa.

EXEMPLOS

A seguir são apresentados dois exemplos de definição da vazão ótima de um poço, com base na metodologia proposta.

Primeiro exemplo

Vazão permitível nos filtros = 177,19 m^3/h
 Vazão permitível no aquífero = 104,02 m^3/h
 Vazão máxima de bombeamento = 104,02 m^3/h

Dados de entrada

Equação do poço: $S_w = 0,37Q + 8,6 \cdot 10^{-5} Q^{3,3}$
 $K = 1,3 \cdot 10^{-4} m/s$; $HR = 10 m$; $h = 40 m$; $NE = 25 m$
 $r_w = 0,15 m$; $r = 0,076 m$; $L = 25 m$; $A_o = 27,5 \%$
 $= 50 \%$; $e = 70 \%$; $K_2 = 5 \cdot 10^{-3} OTN/KW.H$
 $K_1 = 5 \cdot 10^{-3} OTN/m^3$; investimento inicial = 1 200 OTN

Dados de saída

$Q_{ot} = 52,96 m^3/h$; s (rebaixamento) = 62,02 m
 $ND = 87,02 m - Q_{crit} = 104,02 m^3/h$
 Custo = $8,849 \cdot 10^{-4} OTN/m^3$; valor atual da receita líquida = 0,1646 OTN/H
 Tempo de amortização do investimento inicial = 303,58 dias.

Segundo exemplo

Nesse segundo exemplo os dados de entrada foram os mesmos do exemplo acima, com exceção apenas para a equação do poço cuja expressão é a seguinte:

$$S_w = 0,37Q + 8,6 \cdot 10^{-4} Q^{3,3}$$

Dados de saída

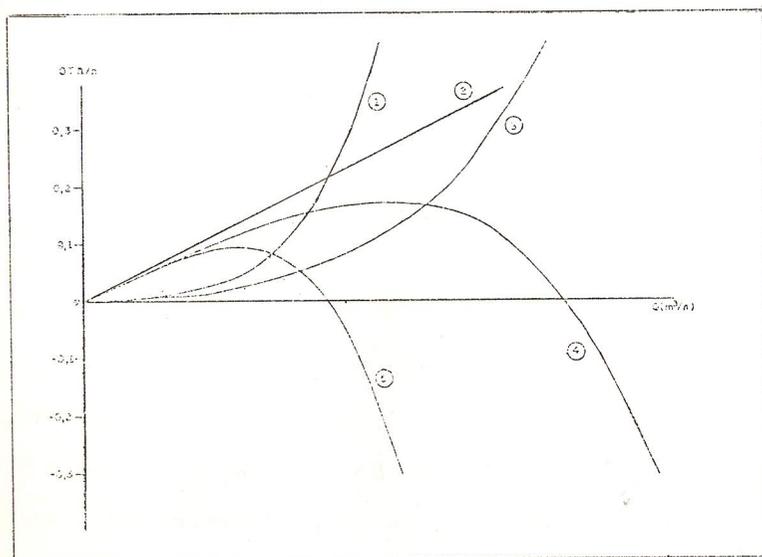
$Q_{ot} = 27,16 m^3/h$; s (rebaixamento) = 56,89 m

ND = 81,89 m; $Q_{crit} = 104,02 \text{ m}^3/\text{h}$

Custo = $4,52 \cdot 10^{-4} \text{ OTN}/\text{m}^3$; valor atual da receita líquida = 0,0871 OTN/H

Tempo de amortização do investimento inicial = 573,51 dias.

Esses resultados estão expressos, graficamente, na Figura 2, a seguir.



"Figura 2. Curvas de custo e da receita líquida dos exemplos 1 e 2 em função da vazão bombeada".

- (1) = função custo (exemplo 1)
- (5) = função valor atual (exemplo 1)
- (2) = função custo (exemplo 2)
- (4) = função valor atual (exemplo 2)
- (3) = receita líquida

CONCLUSÕES

A fixação de condicionantes hidráulicas, como a "vazão limite do aquífero" e a "vazão permissível em filtros", associadas à equação do poço e função "valor atual da receita líquida", permite que se determine a "vazão ótima" de um poço, em considerando-se, simultaneamente, fatores técnicos e econômicos. Desse modo, com o método proposto procura-se definir as condições econômicas

para as quais se deve extrair uma determinada vazão, assegurando-se ao mesmo tempo a estabilidade da formação aquífera e a vida útil do poço. O método utilizado para a procura da "vazão ótima", se baseia em maximizar a função resultante da combinação da equação do poço com a função "valor atual da receita líquida", e resolvendo-o através do método das aproximações sucessivas.

Por outro lado, pode-se verificar a partir da função maximizada que a "vazão ótima" é sensivelmente influenciada pelos coeficientes "B", "C" e "N", da equação do poço. Assim, observa-se, por exemplo, que no caso "2", um aumento do coeficiente "C", resultou numa diminuição da "vazão ótima" da ordem de 49 % em relação aquela do caso "1". Isso mostra o quão é importante a determinação desses coeficientes, através de ensaios escalonados.

Para facilitar os cálculos, foi escrito um programa em linguagem BASIC, disponível no Agrupamento de Hidrogeologia, a quem os interessados poderão solicitar cópia.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seus agradecimentos aos economistas Decio Zylbersztajn e Juvenal Antonio Schalch Neto, da DEES/IPT, pela valiosa colaboração, seja revisando o texto ou dando sugestões.

REFERÊNCIAS

- DE FARO, C. Engenharia econômica de elementos. Rio de Janeiro, Ed. APEC, 1972.
- HELWEG, O.J. Determinação optimal well discharge. Journal of the Irrig. and Drainage Div., 1(IR-3), Sept., 1975.
- HELWEG, O.J. Step drawdown test analysis by computer. G. Water. 13(5), Sept/Oct., 1975.
- KOVACS, G. & ASSOCIATES. Subterranean hydrology water resources publication littleton. Colorado, 1981.
- RORABOUGH, M.F. Graphical and theoretical analysis of step drawdown test of artesian wells. Trans. Am. Soc. Civil. Engrs. (79), 1953.

"Figura 2. Diagrama de blocos simplificado - Programa Vazão Ótima".

