

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ÁGUAS PARA COMPLEXOS INDUSTRIAIS

POR

I. Lippi Rodrigues¹ e B.P.F. Braga, Jr²

RESUMO -- O presente trabalho é dirigido ao problema de operação conjunta de estruturas hidráulicas através do gerenciamento de águas que inclui a operação de reservatórios e de poços de água subterrânea, controle da demanda, e manuseio de um grande volume de dados hidráulicos e de consumo industrial.

O modelo computacional apresentado foi desenvolvido com o objetivo de otimizar os recursos de água para um complexo industrial, e é constituído de um conjunto de programas de computador em forma modular, que permite um acompanhamento em tempo-real do estado hidráulico do sistema.

Esse sistema é constituído de 4 módulos, DEMANDA, OFERTA, DECISÃO e DATA, achando-se implantado no complexo industrial da ALUMAR em São Luís do Maranhão onde a água é utilizada na produção de alumina e em outros setores da Fábrica.

INTRODUÇÃO

Certos processos industriais requerem grandes quantidades de água na produção do produto manufaturado. O processo de produção da alumina é entre outros um dos que mais necessita de água (2 m³/t). Enquanto a demanda de água é bastante grande, a oferta nem sempre é suficiente na região onde a indústria está instalada. Através da construção de reservatórios de superfície e da utilização de aquíferos subterrâneos é possível proporcionar maior confiabilidade no atendimento da demanda. Uma vez construídas estas obras hidráulicas devem ser convenientemente operadas com vistas à máxima eficiência econômica e à redução dos riscos de não atendimento da demanda de água industrial.

O presente trabalho está voltado à análise do problema da operação conjunta das diversas estruturas hidráulicas. Generalizando, um pouco mais pode-se dizer que o trabalho trata do problema do gerenciamento de água o que inclui além da oferta de água (operação de reservatórios e poços de água subterrânea) o controle da demanda de água industrial. Como o volume de dados (hidrológicos e de produção industrial) gerado no tratamento do problema é extenso, será analisado também o procedimento de armazenamento e recuperação destes dados.

Apresenta-se a seguir um modelo computacional que se presta ao gerenciamento otimizado dos recursos de água em uma planta industrial. Este modelo é constituído por um conjunto de programas de computador em forma modular que permite um acompanhamento em tempo-real do estado hidráulico do sistema. Baseado na análise em tempo-real, o gerente da indústria pode selecionar a fonte de água (superficial ou subterrânea) a ser utilizada no

1 Engenheiro Chefe Civil - ALUMAR, São Luís, Ma.

2 Professor Assistente Doutor - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

suprimento da demanda. O modelo computacional é do tipo interativo onde através de terminais de computador, pode-se testar diferentes alternativas de operação do sistema.

CONCEITUAÇÃO DO SISTEMA

O Sistema de Gerenciamento de Águas (SGA) é um sistema flexível e dinâmico constituído de 4 módulos, cada um deles com operações básicas relacionadas ao acompanhamento e controle. O primeiro dos módulos "DEMANDA" determina as necessidades de água da indústria em função da previsão de produção para diferentes intervalos de tempo à frente. Incluído neste módulo está um programa que simula o fluxo de água entre as diversas partes da indústria. O segundo módulo "OFERTA" mostra as diversas maneiras de suprimento da demanda. Neste módulo participam programas que fazem previsão de chuva e evaporação para vários intervalos de tempo à frente além de programas que modelam o escoamento superficial e subterrâneo. O terceiro módulo "DECISÃO" usa os dados gerados a partir dos dois primeiros módulos para fazer uma análise de sensibilidade de diferentes políticas de operação do sistema. Os custos de cada alternativa são computados para que a alternativa de custo mínimo seja selecionada. Finalmente, o quarto módulo "DATA" é um conjunto de programas que cria e opera um banco de dados hidrológicos, operacionais e de qualidade das águas no total da indústria.

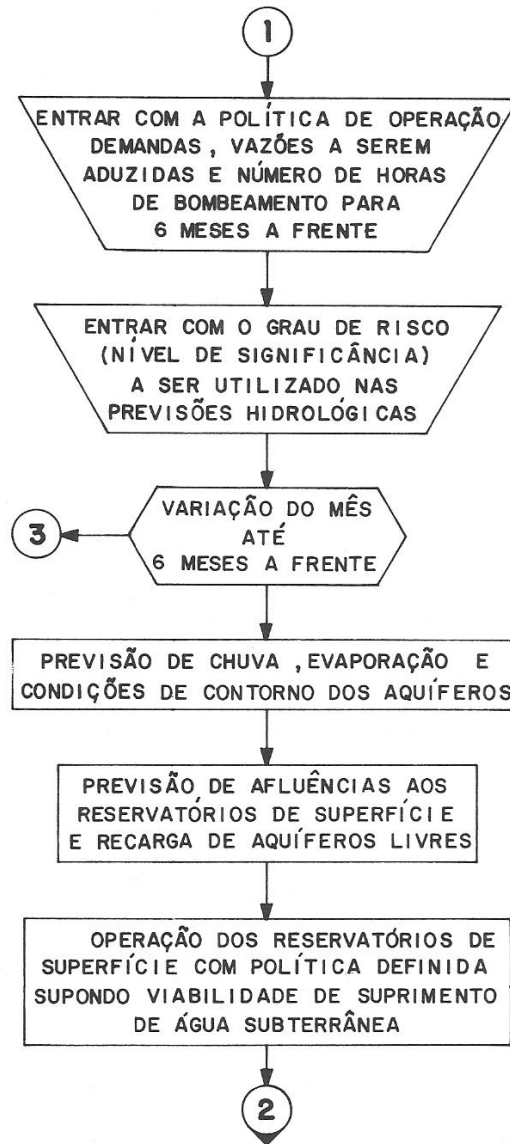
A Figura 1 mostra o fluxograma lógico do sistema. Pode-se notar que o intervalo de tempo para previsão é de seis meses à frente. Este intervalo é um compromisso entre a utilidade do sistema e o grau de incerteza na previsão. Previsões de totais mensais de chuva para valores além de seis meses, tem uma variância associada que produz intervalos de confiança muito amplos tornando o uso daquelas previsões desinteressante sob o ponto de vista prático. O SGA é operado semanalmente quando é feita a atualização do sistema hidrológico e industrial. Apesar deste intervalo de tempo para operação do SGA os dados são coletados diariamente para serem então semanalmente consistidos e arquivados no banco de dados do módulo "DATA".

Uma vez que o SGA será usado interativamente em tempo-real através de terminais remotos de computador, os programas de previsão hidrológica foram desenvolvidos para ocuparem o mínimo de espaço na memória principal do computador. Este fato implicou no desenvolvimento de módulos compactos ("lumped") onde são agrupados conjuntos de funções em um único parâmetro. No caso da transformação chuva x vazão, por exemplo, tendo em vista a previsão de chuva mensal, o tratamento matemático dado ao cálculo do escoamento superficial foi bastante simplificado. A Tabela 1 mostra sumariamente o conjunto de 11 programas, dentro dos 4 módulos principais, que juntos formam o SGA. A seguir descrevem-se mais detalhadamente as funções e os fundamentos conceituais de cada módulo e seus programas associados.

Módulo DEMANDA

Os dois programas constituintes deste módulo (FLUXO e PREVI) devem ser desenvolvidos particularmente para cada indústria. Principalmente o programa FLUXO é totalmente dependente do processo produtivo considerado. Na aplicação descrita ao final do artigo,

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ÁGUAS (SGA)



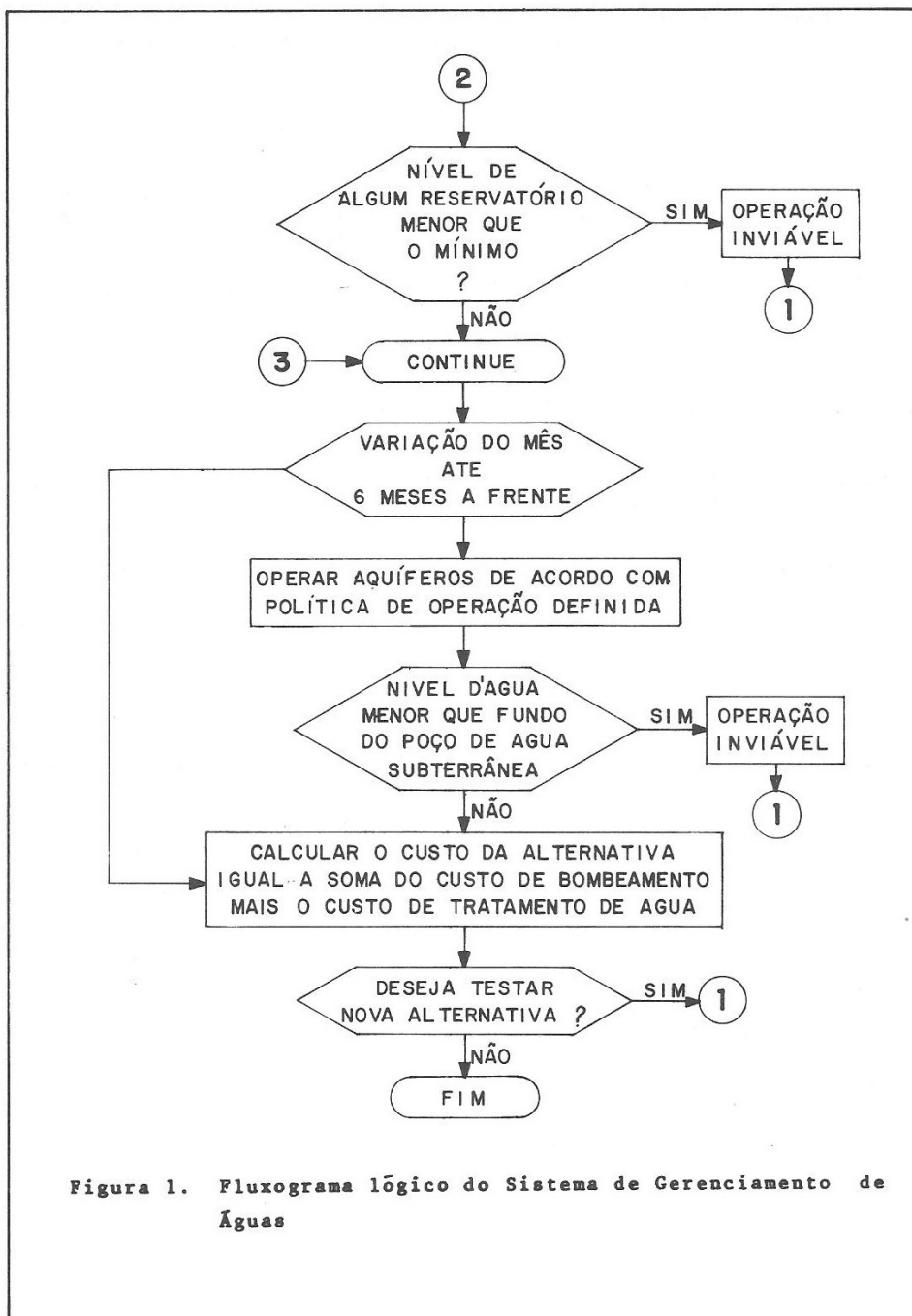


Figura 1. Fluxograma lógico do Sistema de Gerenciamento de Águas

Tabela 1 - Descrição Sumária dos Programas Constituintes do Sistema de Gerenciamento de Águas (SGA)

DEMANDA

- FLUXO - Descrição detalhada de todas as conexões no sistema de produção da indústria (variável de acordo com o tipo de indústria considerada).
- PREVI - Previsão de demandas mensais de água industrial.

OFERTA

- PREMET - Modelo estocástico para previsão de totais mensais de chuva e evaporação.
- SMAP - Modelo conceitual de transformação de totais mensais de chuva e evaporação em vazão e recarga dos aquíferos subterrâneos.
- INTERCEPT - Modelo para operação de reservatórios superficiais.
- AQUIFER - Modelo de células para níveis de água subterrânea em regime permanente.

DECISÃO

- CUSTO - Determina os custos de bombeamento de água superficial e subterrânea.
- SCAN - Determina a política ótima de operação em função das previsões de oferta e do grau de risco assumido pelo gerente da indústria.

DATA

- QUANT - Banco de dados hidrológicos de quantidade de água.
- QUAL - Banco de dados hidrológicos de qualidade de água.
- STAT - Análise estatística dos dados armazenados em QUANT e QUAL.

em uma indústria de alumínio, o número de ligações entre a Refinaria, Redução e Área Administrativa é extremamente grande e complexa requerendo habilidades de programação consideráveis na confecção do programa.

O programa PREVI apesar de dependente do tipo de processo industrial considerado, pode ser mais facilmente generalizado uma vez que a previsão de demanda será função das condições de mercado e da capacidade de armazenamento de produtos manufaturados no local da indústria. Uma previsão de demanda é determinada pela diferença entre a demanda do produto em função do mercado e a disponibilidade de armazenamento. Em algumas indústrias, quando a incerteza de mercado é pequena, este programa pode ser substituído por um conjunto de dados de entrada pré-fixados.

Módulo OFERTA

Programa PREMET -- Este programa possui duas formas de operação: "off-line" e "on-line". A última forma é a que efetivamente é utilizada no SGA e pressupõe um modelo já definido com seus parâmetros estimados a partir de dados de totais de chuva e evaporação observados. A primeira forma é aquela onde se define o modelo de previsão estocástico ARMA.

Um modelo auto regressivo e de médias móveis ARMA (Box e Jenkins, 1976) é dado por:

$$\phi(B) X_t = a_0 + \theta(B) u_t \quad (1)$$

onde, X_t é o processo estocástico sendo modelado (chuva ou evaporação mensal), $\phi(B)$ e $\theta(B)$ são polinômios em B de ordem p e q respectivamente. B é o operador retroativo dado por $BX_t = X_{t-1}$. a_0 é uma constante e u_t é um processo estocástico independente e identicamente distribuído com média zero e variância σ_u^2 .

A Equação 1 acima é válida para qualquer processo estocástico estacionário. Entretanto, reconhecidamente os totais mensais de chuva e evaporação apresentam notória não-estacionariedade na forma de componentes periódicos na média e variância do processo. Portanto, para utilização de (1) a série original de totais mensais de chuva ou evaporação (Z_t) deve ser convenientemente transformada para uma série estacionária. Isto pode ser conseguido através de (Yevjevich, 1972):

$$X_{t,\tau} = \frac{Z_{t,\tau} - \mu_\tau}{\sigma_\tau} \quad (2)$$

onde, t indica o ano e τ o mês considerado, $X_{t,\tau}$ o processo estocástico estacionário na média e variância, $Z_{t,\tau}$ o processo original não estacionário, μ_τ e σ_τ^2 a média e variância de $Z_{t,\tau}$ para o mês τ , respectivamente.

Um modelo ARMA (p,q) bastante utilizado em hidrologia é aquele em que $p=q=1$ (O'Connell, 1977; Braga, 1983). Este modelo é utilizado para a previsão de totais de chuva e evaporação e é dado por:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + a_0 + u_t - \theta_1 u_{t-1} \quad (3)$$

onde, ϕ_1 é o parâmetro autorregressivo e θ_1 o parâmetro de médias móveis que podem ser estimados a partir da função de autocorrelação amostral dada por:

$$\hat{\rho}_1 = \frac{(1 - \phi_1 \theta_1) (\phi_1 - \theta_1)}{1 + \theta_1^2 - 2 \phi_1 \theta_1} \quad (4)$$

$$\hat{\rho}_j = \phi_1 \hat{\rho}_{j-1} \quad j = 2, 3, \dots$$

A forma de operação "on-line" utiliza o modelo ARMA (1,1) com parâmetros ϕ_1 e θ_1 estimados acima. O previsor de mínimo erro quadrático médio será o valor esperado da expressão dada em (3):

$$\hat{X}_t(\ell) = \phi_1 E [X_{t+\ell-1}] + a_0 - \theta_1 E [u_{t+\ell-1}] \quad (5)$$

onde, E denota o operador valor esperado e $\hat{X}_t(\ell)$ é o previsor de X_t para ℓ intervalos de tempo à frente. Para obter a previsão de chuva ou evaporação inverte-se a Equação (2) que resulta em:

$$Z_{t,\tau} = \mu_\tau + \sigma_\tau X_{t,\tau} \quad (6)$$

Os intervalos de confiança para as previsões são obtidos a partir da variancia das previsões dada por:

$$\sigma_e(\ell) = \sigma_u^2 (1 + \psi_1^2 + \dots + \psi_{\ell-1}^2) \quad (7)$$

onde, σ_u é o erro padrão dos resíduos e os pesos ψ_i são calculadas por:

$$\begin{aligned} \psi_0 &= 1 \\ \psi_1 &= \phi_1 - \theta_1 \\ \psi_j &= \phi_1 \cdot \psi_{j-1} \quad j = 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

Sob a hipótese de normalidade dos resíduos, pode-se escrever os intervalos de confiança das previsões:

$$\hat{X}_t(\ell) \pm Z^\alpha \sigma_e(\ell) \quad (9)$$

onde, Z^α é a variável normal reduzida para o nível de significância α .

Programa SMAP -- Da mesma forma que o programa PREMETS este programa opera nas fases "on-line" e "off-line". Esta última consiste na determinação dos parâmetros do modelo a partir de dados observados de chuva, evaporação e vazão. O programa está baseado na metodologia dada por Lopes, Braga e Conejo (1982). A precipitação mensal que chega ao solo separa-se em escoamento superficial e infiltração de acordo com:

$$ES = P \cdot TU^{E_2} \quad (10)$$

onde, ES é o escoamento superficial em mm, P é o total mensal de precipitação em mm, e TU é a umidade do solo dada em termos de fração da capacidade de saturação do solo. E_2 é um parâmetro que controla a divisão entre escoamento superficial e infiltração.

A recarga para os aquíferos de água subterrânea é computada através de:

$$REC = RSOLO \cdot TU^4 \cdot CREC \quad (11)$$

onde, REC é recarga de água subterrânea em mm, RSOLO é a umidade do solo em mm, TU é a umidade do solo como fração da capacidade de saturação e CREC é o coeficiente de recarga (obtido através de tentativa e erro no processo de calibração do modelo). A água disponível no reservatório de água subterrânea se transforma em escoamento através do uso de uma constante de escoamento subterrâneo:

$$EB = RSUB \cdot (1 - K) \quad (12)$$

onde, RSUB é o volume disponível no reservatório de água subterrânea em mm, K é a constante de depleção mensal do escoamento e EB é a vazão básica em mm.

A vazão total no curso d'água será dada pela soma das contribuições superficial e subterrânea como abaixo:

$$Q = (ES + EB) \cdot AREA/2592 \quad (13)$$

onde, Q é a vazão média mensal em m³/s, ES e EB as vazões superficiais e de base em mm e AREA é a área da bacia de drenagem em km².

A perda de água da precipitação por evaporação é feita a nível potencial (EP). A água é perdida do solo a uma taxa menor que depende do teor de umidade do solo (TU). A evapotranspiração real (ER) é computada por:

$$ER = EP \cdot TU^{E_1} \quad (14)$$

onde, E₁ é um coeficiente que controla a taxa de perda por evapotranspiração real e é determinado por tentativa e erro a partir dos dados observados de chuva, evaporação potencial e vazão. A Figura 2 ilustra os conceitos expostos acima.

Através do processo de calibração escolhe-se o conjunto de parâmetros (E₂, CREC, SAT) que melhor ajuste produzem entre os hidrogramas simulados e observados para um dado período de tempo (4 a 5 anos). Com os parâmetros determinados, o programa produz uma previsão de recarga (REC) e uma previsão de afluências aos reservatórios superficiais (Q) a partir das previsões de chuva e evaporação potencial obtidas através do programa PREMETS.

Programa INTERCEPT -- O amortecimento das ondas de cheia afluentes aos reservatórios de superfície está baseado na aplicação da equação da continuidade juntamente com uma relação funcional entre o volume armazenado e a vazão pelo vertedouro e outros órgãos de descarga. Na Figura 3 estão mostradas as variáveis relevantes à operação dos reservatórios de superfície. I é a vazão afluente ao reservatório computada pelo modelo SMAP, I_{ADD} é vazão adicional bombeada para o reservatório, E é a evaporação do lago, P é a precipitação sobre a superfície do lago, L são as perdas por infiltração no lago, O é vazão de saída por vertedor de superfície sem controle, O_R é a vazão de saída regulada (vazões bombeadas ou derivações), h a cota da superfície do lago e h* a cota do vertedor.

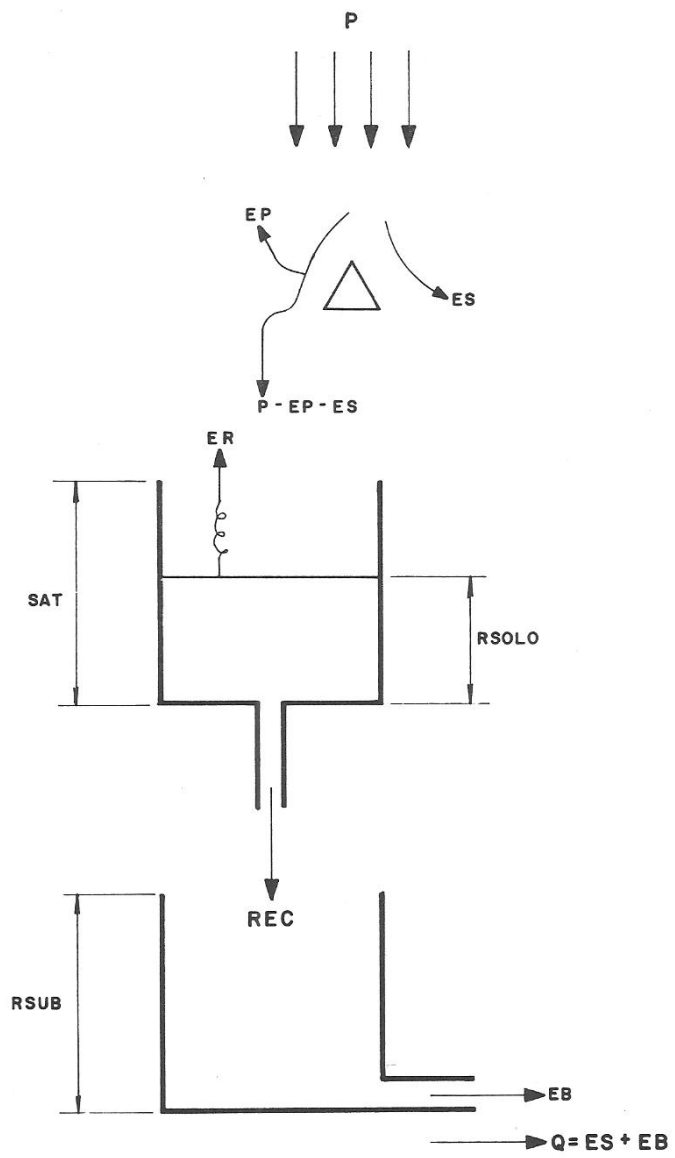
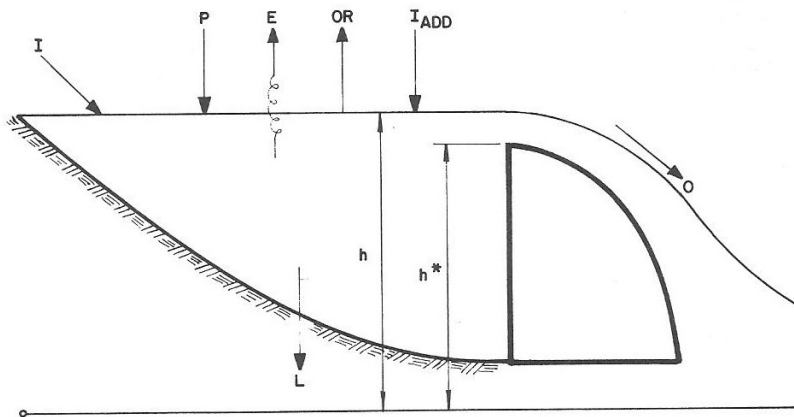


Figura 2. O ciclo hidrológico segundo o modelo SMAP



"Figura 3 - Seção Longitudinal de um Reservatório"

Usando a notação acima descrita a equação de continuidade para o reservatório pode ser descrita como:

$$I + P - E - L - O - O_R + I_{ADD} = \frac{ds}{dt} \quad (15)$$

onde, ds é a variação de armazenamento do lago no intervalo de tempo dt . Para se fazer uma previsão dos níveis dos reservatórios para os próximos seis meses escreve-se abaixo a relação das variáveis de (15) com a cota do reservatório:

$$\begin{aligned} s &= \alpha h^\beta \\ P &= \alpha \beta h^{\beta-1} \cdot p \\ E &= \alpha \beta h^{\beta-1} \cdot e \\ O &= a (h-h^*)^b \\ L &= rh + sh^2 \end{aligned} \quad (16)$$

onde, α e β são coeficientes da curva cota x volume; p e e são a precipitação e evaporação em $mm/\Delta t$; a e b são os coeficientes da curva de descarga do vertedor e r e s são coeficientes da equação de infiltração.

Substituindo-se (16) em (15) segue que:

$$I_{ADD} + I + \alpha \beta h^{\beta-1} (p-e) - a(h-h^*)^b - rh - sh^2 - O_R = \alpha \frac{dh}{dt} \quad (17)$$

Escrevendo-se (17) acima em forma de diferenças finitas:

$$\begin{aligned} I_{ADD} + \frac{I_1 + I_2}{2} + \frac{\alpha \beta}{2} [h_1^{\beta-1} (p_1 - e_1) + h_2^{\beta-1} (p_2 - e_2)] - \frac{r}{2} (h_1 + h_2) - \\ - \frac{a}{2} [(h_2 - h^*)^b + (h_1 - h^*)^b] - \frac{s}{2} (h_1^2 + h_2^2) - O_R = \frac{\alpha}{\Delta t} (h_2^\beta - h_1^\beta) \end{aligned} \quad (18)$$

onde, os índices 1 e 2 indicam os valores das variáveis no início e final do intervalo de tempo Δt , respectivamente.

A Equação 18 não é linear e portanto não possui uma solução explícita em h . O método utilizado para solução numérica foi o de Newton-Raphson (Burrington, 1973). A solução de (18) produz portanto, para os valores previstos com seis meses de antecedência para as afluências (SMAP), para as evaporações e chuvas (PREMET), para as demandas (PREVI) que definirão a partir do programa FLUXO os valores de O_R , os valores previstos para os níveis dos reservatórios de superfície para seis meses a frente.

Programa AQUIFER -- Este programa permite a análise da variação dos níveis de água subterrânea em um aquífero, para uma dada condição de contorno, em função do bombeamento em poços de água subterrânea. A vazão bombeada e o número de horas de bombeamento são dados de entrada e o programa produz como saída os níveis previstos.

O modelo matemático da resposta de um aquífero sob hipótese de regime permanente é dado por uma equação diferencial produto da aplicação conjunta da equação da continuidade e da Lei de Darcy. Esta equação diferencial (Poisson) é dada abaixo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{w}{T} \quad (19)$$

onde, x e y são os eixos coordenados, h é o nível de água subterrânea, w é a recarga (bombeamento) de água subterrânea e T é a transmissividade do aquífero.

A solução analítica de (19) se depara com complicações com respeito das condições de contorno irregulares e à variabilidade de w e T ao longo do domínio da solução. Ao invés de discretizar a Equação 19 em forma de diferenças finitas, que seria a solução mais comum, o modelo matemático é derivado diretamente para possibilitar a variabilidade local dos parâmetros e levar em conta os contornos irregulares.

De acordo com Remson, Appel e Webster (1965), toma-se um nó dentre aqueles em que o domínio da solução foi discretizado (Figura 4). O nó 0 está circundado pelos nós N, S, E e W.

A distância entre os nós é chamada de L . Portanto, NL é a distância entre o nó N e o nó 0. SL é a distância entre S e 0 e assim por diante. A vazão entre os nós é chamada de Q . Portanto, Q_S é vazão entre 0 e S. Aplicando-se a equação da continuidade para o nó 0 segue:

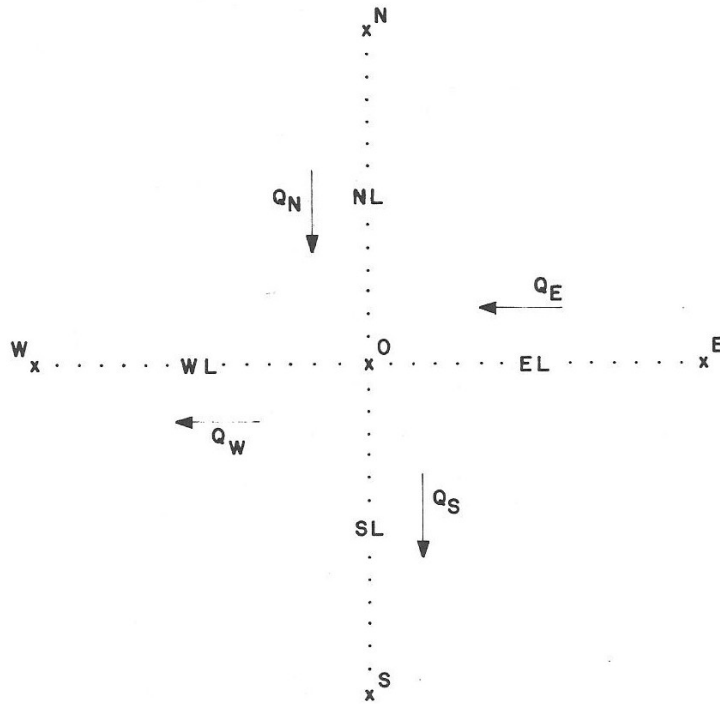
$$Q_N + Q_E = Q_W + Q_S + w \quad (20)$$

onde, w é o valor líquido recarga menos bombeamento no nó. Através da Lei de Darcy:

$$Q_N = K_{N-0} I_{N-0} A_{N-0} \quad (21)$$

onde

$$K_{N-0} = \frac{K_N + K_0}{2} \quad (22)$$



"Figura 4 - Esquema de discretização" (Remson, Appell e Webster, 1965)

é a permeabilidade média entre N e O e

$$I_{N-O} = \frac{h_N - h_O}{NL} \quad (23)$$

é o gradiente de água subterrânea entre os nós N e O e h_N e h_O os níveis de água subterrânea nos nós N e O respectivamente. A_{N-O} é a seção transversal de escoamento entre N e O e dada por:

$$A_{N-O} = \frac{M}{2} (WL + EL) \quad (24)$$

onde, M é a profundidade do aquífero entre o ponto médio de W até O e de O até E. Substituindo-se (22), (23) e (24) em (21) e lembrando que $T = KM$ resulta:

$$Q_N = \frac{(T_N + T_0)}{2} \frac{(h_N - h_0)}{NL} \frac{(WL + EL)}{2} \quad (25)$$

Aplicando-se o mesmo raciocínio para os nós W, E e S e substituindo as equações resultantes em (20) segue:

$$h_0 = \frac{SWE (T_N+T_0) (W+E)h_N + NSW (T_E+T_0) (N+S)h_E +}{SWE (T_N+T_0) (W+E) + NSW (T_E+T_0) (N+S) +} \quad (26)$$

$$\frac{+ NSE (T_W+T_0) (N+S) h_W + NwE (T_S+T_0) (W+E)h_S - 4QNSwE}{+ NSE (T_W+T_0) (N+S) + NWE (T_S+T_0) (w+E)}$$

onde, N, S, E e W substituem NL, SL, e WL para facilitar a notação e h_0 é o nível de regime permanente para as condições operacionais fixadas. A equação (26) acima é aplicada para cada nó da malha de discretização do domínio de solução de (19). A partir de valores arbitrários de níveis iniciais o modelo itera para a solução de equilíbrio que é atingida quando a variação entre valores sucessivos em todos os nós é suficientemente pequena. No caso de aquífero livre a transmissividade muda com o nível de água subterrânea. No programa supõe-se que as hipóteses de Dupuit sejam válidas para aquífero livre (Bear, 1979).

Módulo DECISÃO

Programa SCAN -- Este é o programa principal do SGA. SCAN age como um supervisor que gera as alternativas de operação chamando os diversos outros programas para verificar a viabilidade daquelas alternativas e seus custos associados. O programa é interativo e do tipo "user friendly" ou seja, não há necessidade do operador entender de computador para processamento do programa. A estrutura do SCAN é a de um modelo de simulação da operação da indústria. A política de operação (vazões bombeadas e número de horas de bombeamento) é dada como entrada pelo gerente da indústria que após algumas tentativas seleciona a alternativa de custo mínimo dentro do grau de risco informado.

Dado que as previsões meteorológicas e por consequência as previsões de afluições aos reservatórios e recarga de aquíferos para períodos de tempo longos (seis meses) tem um alto grau de incerteza associado, o gerente da indústria deve definir o nível de significância a ser usado naquelas previsões. Este nível de significância é passado para o programa SMAP que por sua vez faz a previsão para o limite inferior uma vez que é o abastecimento de água que preocupa o gerente.

Programa CUSTO -- Este programa é extremamente simples e se presta a calcular o custo de cada alternativa selecionada pelo gerente através do programa SCAN. O custo da alternativa será dado pela soma dos gastos com energia, devido ao bombeamento, e com tratamento de água.

Destá forma pode-se escrever que o custo total CT é dado por:

$$CT = C_1 + C_2 \quad (27)$$

$$\text{onde, } C_1 = \frac{0,345 \times 10^5 \times C_b \times n \times Q (H_2 - H_1 + \Delta H)}{\eta} \quad (28)$$

onde, C_b é o custo do Kwh, h é o número de horas de bombeamento, η é o rendimento da bomba, Q é a vazão bombeada em m^3/s , H_1 é o nível de sucção (m), H_2 é o nível mais alto no trecho (m) H perda de carga total no trecho (m). O custo de tratamento C_2 é dado por:

$$C_2 = C_Q \times Q \quad (29)$$

onde, C_2 é o custo unitário de tratamento (CR\$/ m^3).

Módulo DATA

Três programas participam do módulo DATA para gerenciamento do grande número de dados hidrológicos (nível diário) gerados no local da indústria. Estes dados incluem quantidades de água (vazões aduzidas, níveis de água, etc.) que são objeto do banco de dados QUANT e qualidade de água (pH, dureza, sólidos totais, etc) que são tratados pelo banco de dados QUAL. Para produção de sumários que facilitam a avaliação do desempenho do sistema o programa STAT usa os dados de QUANT e QUAL para cálculos estatísticos como, média e desvio-padrão para um dado período ou correlação entre parâmetros diversos armazenados.

Os bancos de dados tem estrutura simples e procuram reduzir o espaço de piso utilizado através de um sistema de apontadores que permitem armazenar os dados mais eficientemente. Semanalmente, os bancos são atualizados com dados diários da semana anterior.

APLICAÇÃO DO SGA A PLANTA DA ALUMAR - SÃO LUIS, MA.

O SGA acha-se implantado para o gerenciamento de águas da planta industrial do Consórcio ALUMAR de produção de alumina a partir da bauxita onde o controle do uso da água é de fundamental importância. Na Figura 5 está mostrada a planta da localização do complexo industrial com a malha de discretização para o programa AQUIFER.

Dentre as vantagens do sistema talvez a de maior utilidade para o gerente de engenharia civil deste complexo industrial tenha sido a previsão de totais mensais de precipitação. Através dos dados históricos observados no posto do INEMET em São Luis do Maranhão para o período de 1912 a 1983 foi possível identificar o modelo ARMA (1,1) dado abaixo:

$$X_t = 0,798 X_{t-1} - 0,511 a_{t-1} + a_t \quad (30)$$

onde, X_t e X_{t-1} são totais de chuva padronizadas nos tempos t e $t-1$, a_t e a_{t-1} são os ruídos aleatórios do processo para os tempos t e $t-1$.

Utilizando-se o modelo dado por (30) foi possível a previsão de totais de chuva com diferentes probabilidades de ocorrência de valores maiores ou iguais aos previstos. Assim na Tabela 1 abaixo são mostrados os totais observados e os limites inferiores do intervalo de confiança da previsão de valor esperado do modelo Equação 5 para diferentes níveis de significância.

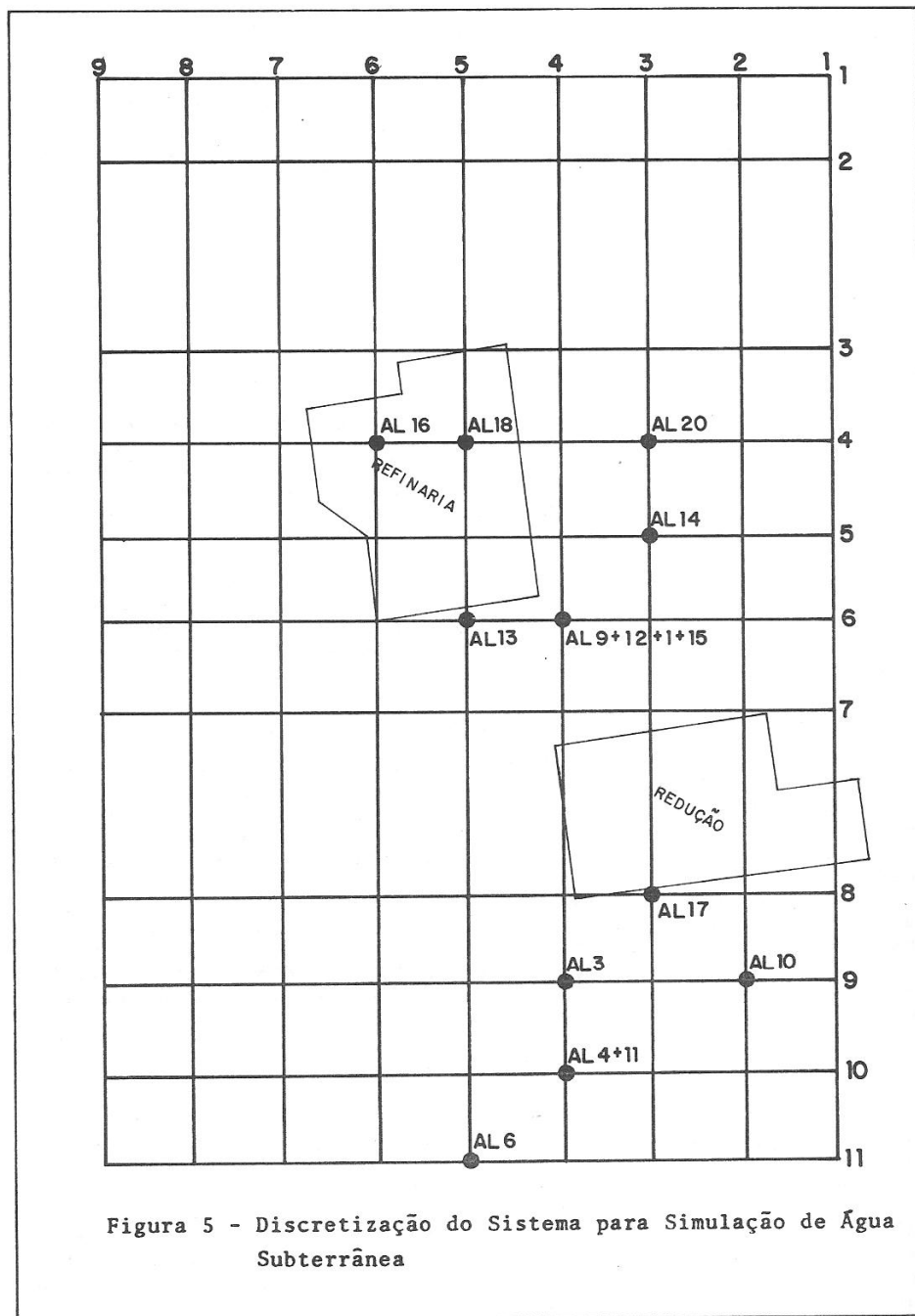


Figura 5 - Discretização do Sistema para Simulação de Água Subterrânea

Tabela 2 - Previsões de Totais Mensais de Precipitação em São Luis, MA. através do modelo ARMA (1,1):

$$X_t = 0,798 X_{t-1} - 0,511 a_{t-1} + a_t$$

Precipitação (mm)						
	Out/83	Nov/83	Dez/83	Jan/84	Fev/84	Mar/84
Valor Obs.	2,40	1,20	155,9	205,9	324,3	534,20
Previsão 50% (média)	1,36	11,7	42,5	162,2	291,9	424,81
Previsão 10%	0,0	0,0	0,0	21,5	102,7	190,2
Previsão 1%	0,0	0,0	0,0	0,0	49,1	123,6

Como era de se esperar a medida em que o erro de previsão diminui o modelo torna-se cada vez mais conservativo, o que pode ser apreciado na Tabela 2 para níveis de significância de 1 por cento.

Igualmente útil o sistema tem sido no sentido de definir a política de operação dos poços de água subterrânea. Através da discretização da área da indústria por uma malha quadrada (Figura 5) o modelo de gerenciamento de água subterrânea (AQUIFER) descrito anteriormente foi utilizado com parâmetros de transmissividade estimados a partir de testes de bombeamento efetuados em diversos poços existentes na área (Figura 5). Para a presente aplicação foi utilizado um valor médio constante da transmissividade para toda a área igual a 150 m²/dia. O aquífero é livre em toda a sua extensão.

Os resultados das previsões para o período de outubro de 1983 e Março de 1984 estão mostrados na Tabela 3 para os nós onde se encontram instalados poços de bombeamento e em suas imediações. Os níveis previstos referem-se a um nível de significância de 1 por cento o que implica em recarga mínima (vide Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados do modelo de água subterrânea - AQUIFER para nível de significância de 1 por cento

NÓ	VAZÃO DE BOMBEAMENTO (m ³ /dia)	NÍVEIS PREVISTOS (m)					
		Out/83	Nov/83	Dez/83	Jan/84	Fev/84	Mar/84
3,3	-	17,00	16,80	16,62	16,42	16,21	16,00
3,4	1200	15,88	8,71	8,50	8,09	7,64	7,21
3,5	1000	16,00	11,50	11,48	11,40	11,32	11,26
2,5	-	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
4,5	-	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
4,6	800	16,33	12,98	12,98	12,95	12,92	12,89
4,7	-	16,91	14,83	14,83	14,82	14,79	14,77
3,6	-	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
5,5	-	17,00	16,54	16,50	16,39	16,27	16,16
5,6	600	16,36	11,94	11,92	11,79	11,64	11,51
5,7	-	16,90	13,43	13,43	13,35	13,24	13,15
6,6	-	16,93	15,01	14,96	14,80	14,62	14,46

CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho o Sistema de Gerenciamento de Águas (SGA) para complexos industriais. Este modelo computacional constituído de 4 módulos de programas: DEMANDA, OFERTA, DECISÃO e DATA permite o armazenamento e recuperação de dados hidrológicos e hidrogeológicos e de operação a nível diário de forma eficiente. Utilizando o sistema semanalmente, o gerente da indústria tem a possibilidade de, em tempo-real, avaliar a situação hidrológica-operacional do local da planta. Além disso usando as características de previsão do SGA o gerente pode tomar decisões mais consistentes. Tendo em vista que o modelo de previsão meteorológica é estocástico o SGA permite que sejam explicitamente considerados os aspectos de risco no processo de tomada de decisão.

A viabilidade operacional e a grande utilização do sistema ficou demonstrada na aplicação do SGA para a planta da ALUMAR em São Luis do Maranhão. Existem, entretanto, algumas melhorias que podem ser pesquisadas no sistema. Uma delas de especial significado é a introdução no módulo DECISÃO de um modelo de otimização para determinar a política ótima de operação que atualmente é obtida por interações sucessivas Homem x Máquina.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Engenheiro J.L. McKinstry, Gerente da Engenharia e Manutenção da ALUMAR, pelo incentivo dado à preparação deste trabalho e ao Diretor Luis Antonio Monteiro de Oliveira, pela autorização concedida à publicação do mesmo.

REFERÊNCIAS

- Bear, J., Hydraulics of Groundwater, McGraw Hill, N.York, 1979.
- Box, G.E.P. e G.M. Jenkins, Time Series Analysis: Forecasting and Control, Holden Day, San Francisco, 1976.
- Braga, B.P.F., "Geração e Previsão de Vazões Através de Modelos ARMA e ARIMA", in Curso de Engenharia Hidrológica, ABRH/EPUSP/DAEE, São Paulo, 1983.
- Burrington, R.S., Handbook of Mathematical Tables and Formulas, McGraw Hill, N.York, 1973.
- Lopes, J.E.G.; Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., "SMAP - A Simplified Hydrologic Model", in Applied Modeling in Catdment Hydrology, Water Resources Publication, Colorado, 1982.
- Remson, I.; C.A. Appel and R.A. Webster, "Groundwater Models Solved by Digital Computes", Journal of the American Society of Civil Engineers, HY3, Maio 1965, pp. 133-147.
- O'Connel, P.E., "ARIMA Models in Synthetic Hydrology", in Mathematical Models for Surface Hydrology (ed. Ciriani, Maione and Wallis), John Wiley, N.York, 1977.
- Yevjevich, V., Stochastic Processes in Hydrology, Water Resources Publications, Colorado, 1972.

WATER MANAGEMENT SYSTEM FOR INDUSTRIAL USES

BY

I. Lippi Rodrigues¹ e B.P.F. Braga, Jr²

ABSTRACT -- This paper is addressed to the problem of simultaneous operation of several hydraulic structures through a water management process which includes the operation of surface water reservoirs, underground water wells, water demand control and handling a great number of hydraulic and industrial consumption data. The computational model presented herein was developed with the scope of optimizing the water resources for an industry and it is composed of a set of computer programs developed in a modular form which will allow real-time monitoring of the hydraulic state of the system.

The system is composed of 4 modules, DEMANDA, OFERTA, DECISÃO and DATA and it is implemented at ALUMAR Plant in São Luis, Maranhão, where the water is used to produce alumina and in other areas of the Plant.