



VII/CE-C2-09

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA HYMOS PARA DETERMINAÇÃO DE CURVAS-CHAVE: Caso de calibragens unívocas

Auder Machado Vieira Lisboa & Claudio de Oliveira da Cruz

ITAIPU BINACIONAL

Brasil

RESUMEN

Determinar a vazão líquida de um curso d'água, da maneira mais precisa possível, é uma necessidade inerente a diversos estudos e projetos, e é de extrema importância notadamente nos períodos de escassez deste recurso. Uma curva-chave determinada com precisão é muito útil nestes casos, pois permite conhecer a vazão de um rio apenas com a leitura do seu nível instantâneo. Alguns softwares permitem ao hidrólogo determinar curvas-chave a partir de um conjunto de medições de vazão, e dentre eles está o HYMOS. Trata-se de um sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos, meteorologia, hidrologia superficial e subterrânea, qualidade de água e avaliação ambiental, desenvolvido pela WL Delft Hydraulics da Holanda. A Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos de Itaipu Binacional utiliza algumas funções deste sistema, tais como o cálculo e o armazenamento de medições de descarga líquida, bem como o posterior traçado das curvas de descarga, a partir destas medições. O objetivo deste trabalho é fazer uma breve apresentação do HYMOS, e analisar a sua função para determinação de curvas-chave, comentando a experiência da Divisão de Hidrologia de Itaipu com o uso desta função.

PALABRAS CLAVE

Hidrometria, Hidrologia, Curva-chave, HYMOS.

1 - INTRODUÇÃO

Determinar a vazão líquida de um curso d'água, da maneira mais precisa possível, é uma necessidade inerente a diversos estudos, planejamentos e projetos, e é de extrema importância notadamente nos períodos de escassez deste recurso. Dados de vazão de um rio são utilizados para planejar a produção de energia de uma usina hidrelétrica, para alimentar modelos hidrológicos dos mais variados tipos, para estabelecer curvas de permanência (permitindo, por exemplo, o dimensionamento de outorgas), para quantificar cargas de sedimentos, dentre outras finalidades. Diante do exposto, é perfeitamente compreensível a importância da correta medição quantitativa da água.

A determinação da vazão de um rio pode ser feita de maneira direta, medindo-se em campo, ou de maneira indireta através do emprego da curva-chave, ou curva de descarga. Esta curva, representada por uma ou mais equações, relaciona o nível d'água do rio com a correspondente vazão instantânea, em uma dada seção do curso d'água. Esta relação física entre estas duas características do escoamento é determinada a partir de um conjunto de medições de vazão, e dá ao hidrólogo uma melhor estimativa da vazão no rio do que qualquer medição individual.

Estabelecer uma curva-chave não é simplesmente encontrar uma curva que melhor se ajuste a uma nuvem de pontos plotados em um gráfico Cota-Vazão. É necessária uma análise acurada das características do escoamento no local da estação fluviométrica, bem como das características físicas da própria seção transversal do rio, em todo o intervalo de níveis alcançados durante enchente e vazante.

A curva-chave pode ser apresentada sob três formas: a representação gráfica, o equacionamento matemático, ou uma tabela de calibragem. Para sua determinação é de fundamental importância o conhecimento da seção de controle, que é o trecho do rio que determina as características do escoamento no ponto onde se está determinando a curva. Em alguns casos a estação fluviométrica pode possuir mais de uma seção de controle, em diferentes níveis d'água.

Obviamente a curva-chave deve contemplar todo o intervalo de níveis possíveis alcançados pelo rio, no entanto dificilmente se tem informações das vazões para os níveis muito baixos ou muito altos, por serem eventos mais raros (notadamente os altos) e portanto mais difíceis de se conseguir medir. Desta forma, é necessário extrapolar a curva de descarga na direção das cotas altas e das baixas, a fim de contemplar todo o intervalo de níveis atingidos pelo rio.

Atualmente existem sistemas informatizados que permitem ajustar e extrapolar as curvas de descarga, e dentre eles pode-se citar o HYMOS, ainda pouco utilizado no Brasil, e objeto do presente trabalho.

2 - OBJETIVO

O sistema HYMOS permite a determinação de diferentes tipos de calibragens de relações cota-vazão, e não somente de relações unívocas (onde, para um dado nível, corresponde um único valor de vazão). O objetivo do presente trabalho é inicialmente apresentar as características do sistema, e então analisar suas metodologias para ajuste e extrapolação de curvas-chave de estações cuja calibragem seja unívoca. Ressalta-se que, para facilitar o entendimento, em uma publicação seguinte serão analisadas as metodologias de determinação de curvas de descarga para os demais casos de calibragens.

3 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA HYMOS

O HYMOS é um sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos, meteorologia, hidrologia superficial e subterrânea, qualidade de água e avaliação ambiental, que combina uma estrutura de banco de dados com ferramentas para entrada, análise, consistência, recuperação e apresentação de dados. Este sistema, desenvolvido pela WL Delft Hydraulics da Holanda, foi concebido para atender às necessidades de autoridades do setor de hidrologia, meteorologia e meio-ambiente, tais como os Serviços hidrometeorológicos e as Agências de água, responsáveis pelo monitoramento e operação de redes de postos e gestão de bancos de dados.

A ampla variedade de características para o processamento e análise de dados torna o HYMOS muito apropriado para os típicos projetos de estudo, investigação e consultoria relacionados à água, que costumam requerir o processamento de grandes quantidades de dados em um curto espaço de tempo.

Este sistema é atualmente utilizado em mais de trinta países por pesquisadores, consultores, institutos e universidades dedicados à água. Devido ao contínuo aperfeiçoamento em seus mais de vinte anos de existência, provido pelos próprios usuários em todo o mundo, o sistema encontra-se bastante flexível e multi-funcional. A interface com o usuário é gráfica, e baseada em mapas georeferenciados. Os campos de aplicação incluem a hidrologia de águas superficiais e subterrâneas, a meteorologia, qualidade de água, ecologia e a gestão dos recursos hídricos.

O HYMOS utiliza uma estrutura aberta de dados que permite a interação com outros sistemas, modelos e bancos de dados. Possui uma interface bastante simples de ser utilizada, baseada em um mapa, oferecendo ao usuário um ambiente de trabalho adequado como pode ser visto na figura 1.

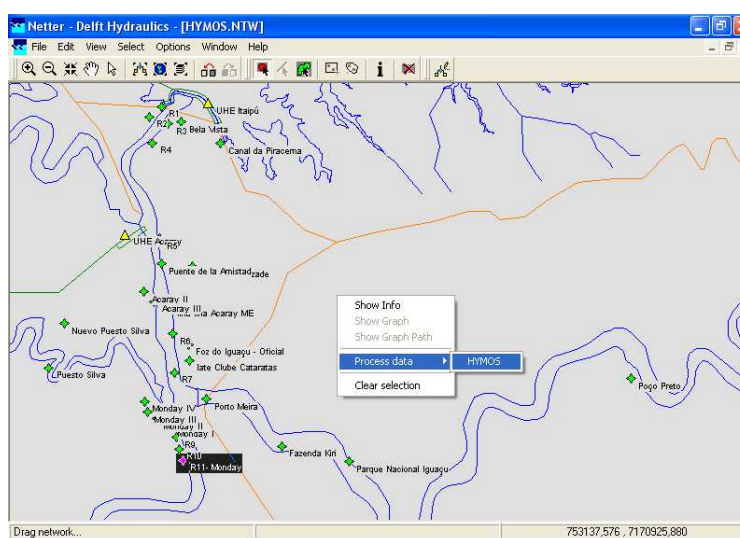


Figura 1 – Detalhe da interface do HYMOS

4 - METODOLOGIAS DO HYMOS PARA DETERMINAÇÃO DE CURVAS-CHAVE

Como colocado anteriormente, o sistema HYMOS permite a determinação de diferentes tipos de calibrações de relações cota-vazão, e não somente de relações unívocas. É possível determinar relações cota-vazão para estações sujeitas ao efeito de remanso, e determinar uma correção para curvas-chave de estações sujeitas à passagem de ondas de cheias pronunciadas (quando o escoamento torna-se não permanente). Também está disponível um procedimento para quando há variação na profundidade do leito ao longo do tempo, que quantifica esta diferença de níveis e corrige estes valores antes de sua transformação em vazão.

4.1 - O caso das calibrações unívocas

Calibrações unívocas são características de seções transversais estáveis, com um ou mais controles hidráulicos.

Em seções sujeitas a apenas um controle hidráulico, e cujo leito possua geometria regular, a curva-chave não apresentará singularidades (alterações bruscas de declividade) sendo estritamente monótonas; contudo, em leitos irregulares, ocorrerão singularidades na curva-chave em função das alterações bruscas da seção transversal, evidenciadas pela presença de singularidades nas curvas Cota-Área e Cota-Raio Hidráulico.

Seções com mais de um controle hidráulico também apresentarão singularidades na curva-chave, contudo estas não necessariamente aparecerão nas curvas Cota-Área e Cota-Raio Hidráulico: ocorrerão em função das mudanças de controle, conforme a variação do nível d'água do rio.

Para as calibrações unívocas no sistema HYMOS a curva-chave pode ser ajustada por dois tipos de equações: parabólica (parabolic type) e potencial (power type):

Equação parabólica:

$$Q = a_1 + b_1 h + c_1 h^2 \quad \text{para } h_i \leq h \leq h_{i+1} \quad (1)$$

Equação potencial:

$$Q = c_2 (h + a_2)^{b_2} \quad \text{para } h_i \leq h \leq h_{i+1} \quad (2)$$

onde:

Q : vazão;

a_i, b_i, c_i : coeficientes das equações;

h_i, h_{i+1} : nível d'água mínimo e máximo para o qual se aplica a equação (trecho).

Os coeficientes a_1, b_1 e c_1 para o tipo parábola são determinados através do método dos mínimos quadrados. Para o tipo potencial, o valor de a_2 (nível correspondente à vazão nula) pode ser fixado pelo usuário ou determinado pelo sistema via método aritmético de *Johnson*: é estimado um valor inicial para a_2 , e então b_2 e c_2 são calculados pelo método dos mínimos quadrados aplicado ao logaritmo de Q e $(h + a_2)$, sendo realizadas estimativas sucessivas de a_2 até que se tenha um conjunto de coeficientes para o qual o erro médio dos quadrados é mínimo.

Cada curva-chave pode consistir em até cinco trechos, ou seja, cinco conjuntos de coeficientes necessariamente de um mesmo tipo de equação. Nestes casos onde a curva-chave possui mais de uma equação é utilizado pelo HYMOS o método de Newton-Raphson para determinar o ponto exato da interseção de cada trecho com o seu subsequente, não sendo obedecida portanto a divisão dos níveis d'água para cada trecho exatamente como definida pelo usuário.

Na figura 2 a seguir pode-se ver a janela da função Fitting of Rating Curves, de ajuste de curvas de descarga.

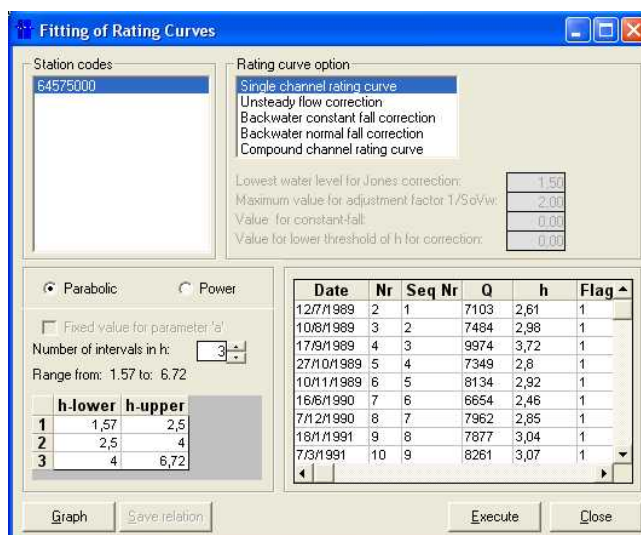


Figura 2 – Janela da função de ajuste de curvas

Para efetuar o ajuste basta selecionar o tipo de curva, o tipo de equação, a quantidade de trechos, especificar o intervalo de níveis de cada um destes, e selecionar as medições que serão utilizadas através do flag (colocar o valor 0 para as medições a serem descartadas).

Após a execução da função (Execute), pode-se visualizar o gráfico contendo a curva determinada e as medições de descarga utilizadas (Graph), conforme mostrado na figura 3.

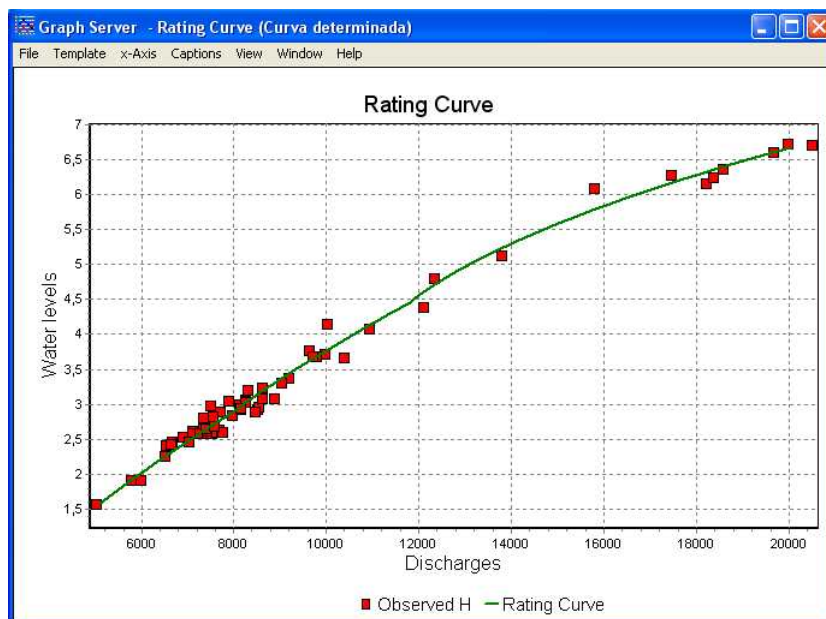


Figura 3 – Gráfico para visualização da curva determinada

Neste momento pode-se descartar o ajuste efetuado caso não tenha sido satisfatório, bastando executar novamente a função alterando os dados de entrada. Nesta etapa é de fundamental importância a experiência e a sensibilidade do hidrólogo, que deve levar alguns fatores em consideração como os controles hidráulicos existentes e as características da seção transversal, de onde pode-se concluir a melhor divisão de trechos para a curva-chave.

Além do gráfico, o HYMOS apresenta um relatório completo do ajuste efetuado contendo os intervalos de níveis definidos, o tipo de equação adotado, as medições de descarga (com os valores máximos e mínimos de níveis e vazões), os conjuntos de coeficientes encontrados para as equações, as diferenças entre os valores de vazão medidos e os calculados (absoluta e percentual), e os valores dos Standard error (estatística adotada pelo sistema para definir a qualidade do ajuste) global e para cada trecho.

As diferenças percentuais entre as vazões medidas e as calculadas são obtidos pela expressão:

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i - Q_c}{Q_c} \times 100\% \quad (3)$$

onde:

ΔQ_i : desvio percentual;

Q_i : vazão medida;

Q_c : vazão calculada.

Os valores dos *standard error* são calculados pela seguinte expressão:

$$S_e^2 = \sum \frac{(\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2}{N - 2} \quad (4)$$

onde:

N: número de medições de vazão.

Sendo diagnosticado um bom ajuste da curva-chave, os conjuntos de coeficientes das equações determinadas são então salvos no banco de dados para uso posterior, na transformação das séries de níveis em série de vazões.

5 - METODOLOGIAS DO HYMOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA DE DESCARGA

O sistema HYMOS dispõe de algumas ferramentas gráficas e numéricas para auxiliar na determinação das vazões extrapoladas.

5.1 - Cálculo dos elementos geométricos da seção

Elementos geométricos da seção transversal como Largura (L), Perímetro molhado (P), Área (A) e Raio hidráulico (Rh), bem como o produto $A \times Rh^{2/3}$, podem ser calculados ao longo de toda a seção a intervalos equidistantes de níveis definido pelo usuário, como pode ser visto na figura 4.

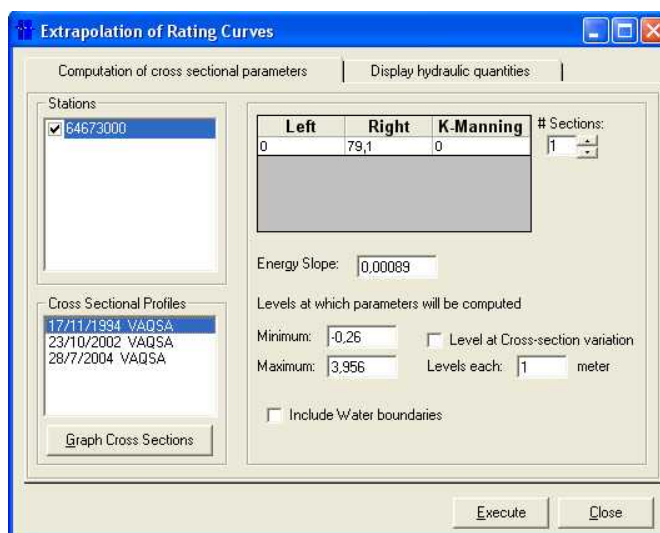


Figura 4 – Janela da função de extrapolação

5.2 - Visualização dos parâmetros hidráulicos da faixa medida

A partir dos valores das medições de descarga líquida, o sistema apresenta graficamente em função do nível ou da vazão as quantidades Largura, Perímetro molhado, Área, Raio hidráulico, produto $A \times Rh^{2/3}$, Vazão (Q), Velocidade média (Q/A), e o produto $K \times S^{1/2}$, sendo este produto obtido a partir da equação de Manning:

$$Q = KAR_h^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

onde:

K : inverso do coeficiente de rugosidade n de Manning;

S : declividade da linha de energia.

Também é possível, para o caso da vazão, utilizar os valores oriundos da curva-chave previamente ajustada ao invés dos valores das medições de descarga.

5.3 - Cálculo dos parâmetros hidráulicos da faixa extrapolada

Para fins de extrapolação, é considerado que o produto $K \times S^{1/2}$ na seção permanece constante para os níveis mais altos. Assumindo ainda que o valor da declividade S seja constante para toda a faixa de níveis, a única variável desconhecida é o coeficiente de rugosidade K .

Para o cálculo dos valores extrapolados o *HYMOS* requer um valor para a declividade S e os valores de K para as diferentes partes da seção (leito, margem limpa, margem suja, margem com árvores, etc). Com isto, a vazão extrapolada será calculada pela equação de *Manning* (5).

Esta opção apresenta como resultado as mesmas quantidades apresentadas para a faixa medida: Largura, Perímetro molhado, Área, Raio hidráulico, $AxR_h^{2/3}$, Vazão, Velocidade média, e o produto $KxS^{1/2}$ (Figura 5).

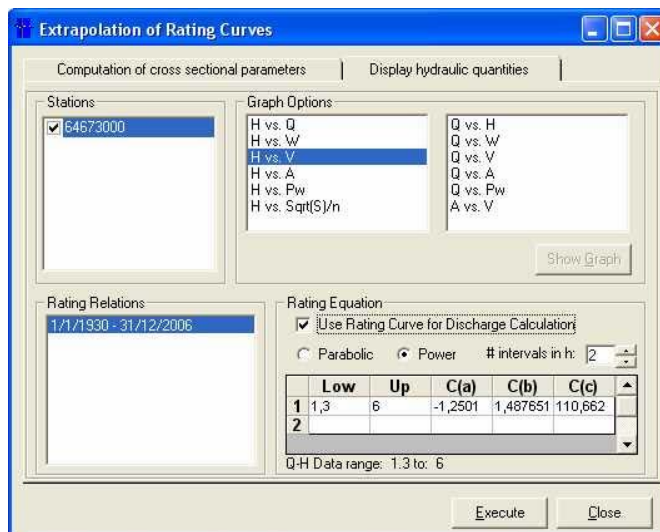


Figura 5 – Janela de cálculo dos parâmetros hidráulicos

Após a determinação dos valores extrapolados de vazão estes devem ser inseridos manualmente no banco de dados cota-vazão, como se fossem o resultado de uma medição de descarga em níveis mais altos ou mais baixos, permitindo assim o ajuste de uma curva-chave com os valores medidos mais os valores extrapolados.

6 - METODOLOGIAS MAIS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DE CURVAS

A Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos de Itaipu Binacional utiliza o método dos mínimos quadrados para ajustar uma curva às medições de vazão, e para obter os valores extrapolados utiliza três das metodologias mais utilizadas (Santos *et al.*, 2001): método logarítmico, método de Stevens, e método da Área molhada x Velocidade média. No caso das extrapolações, para cada estação fluviométrica é analisada a metodologia que melhor se aplique, dependendo das características físicas e de escoamento de cada posto.

O método logarítmico é bastante eficiente e simples de ser aplicado. Consiste basicamente em admitir que a curva-chave é do tipo exponencial, e determinar as constantes a , n , e h_0 da equação:

$$Q = a(h - h_0)^n \quad (6)$$

O procedimento consiste em plotar as medições em um gráfico de escalas logarítmicas e verificar se há o alinhamento dos pontos em um ou mais trechos de retas, situação que ocorre quando o valor de h_0 (cota para a vazão nula) for igual a zero. Caso não seja verdadeira esta hipótese, procura-se por tentativas sucessivas um valor de h_0 que permita o alinhamento dos pontos. Definida a reta, basta escolher dois pontos quaisquer no gráfico para determinar os coeficientes a e n .

O método de Stevens é oriundo da fórmula de *Chezy* para escoamento permanente e uniforme de superfícies livres, rearranjada para a forma:

$$\frac{Q}{A\sqrt{R_h}} = C\sqrt{S} \quad (7)$$

onde:

C: coeficiente variável em função da natureza do leito e do raio hidráulico

O fator $A\sqrt{R_h}$ é denominado fator geométrico, e $C\sqrt{S}$ fator de declividade. O método de Stevens se baseia no fato de considerar o fator de declividade sendo constante para as cotas altas, e a relação Q x $A\sqrt{R_h}$ sendo linear. O método é basicamente gráfico: é calculado o fator geométrico $A\sqrt{R_h}$ para a cota desejada, e a vazão correspondente é obtida ao se entrar com este valor no prolongamento da reta Q x $A\sqrt{R_h}$.

O método da Área molhada x Velocidade média se resume à extrapolação da curva das velocidades em função das cotas. As curvas de velocidades e áreas em função das cotas são traçadas em um mesmo gráfico, com uma apropriada escolha das escalas das abcissas. A partir daí extrapola-se a curva $V(h)$ observando-se a tendência das últimas medições. O produto dos valores de área e velocidade, obtidos nas curvas, permite conhecer as descargas nas cotas não medidas.

7 - EXPERIÊNCIA DE ITAIPU NA DETERMINAÇÃO DE CURVAS COM O USO DO HYMOS

Ao iniciar a utilização da função de determinação de curvas-chave com o sistema *HYMOS*, a Divisão de Estudos Hidrológicos de Itaipu deparou-se inicialmente com dois questionamentos, que foram:

- como adicionar no sistema *HYMOS* as curvas-chave já existentes (determinadas antes da aquisição deste), e
- como determinar curvas-chave com o *HYMOS* utilizando as consagradas metodologias de ajuste e extrapolação descritas anteriormente.

7.1 - Utilizando curvas já existentes

Para utilizar no *HYMOS* curvas-chave já existentes está disponibilizada pelo sistema uma opção de edição de curvas, *Editing of Rating Curves*, onde o usuário pode inserir manualmente o conjunto de coeficientes das equações da curva-chave. Contudo, esbarra-se no problema de que, apesar de cada curva poder consistir em até cinco equações, estas necessariamente devem ser de um mesmo tipo (parabólica ou potencial) como pode ser visto na figura 6.

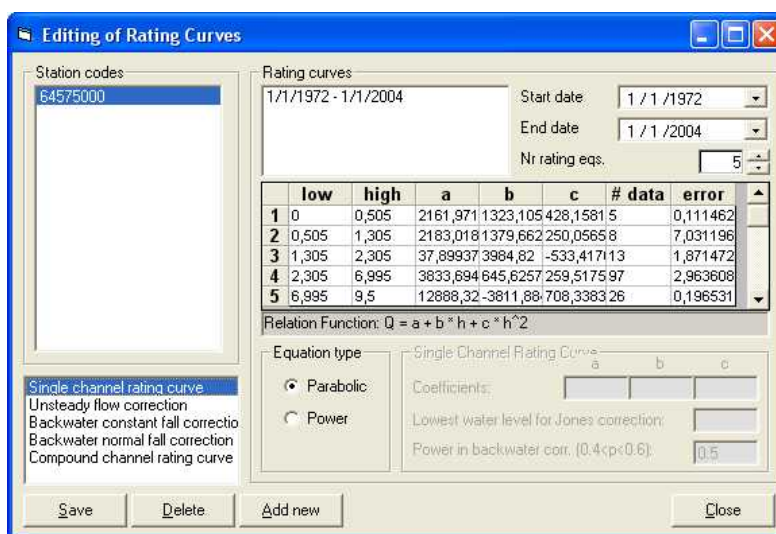


Figura 6 – Janela para edição direta de curvas-chave

A melhor maneira de resolver esta questão foi utilizar a ferramenta de análise de regressão disponível no próprio *HYMOS* (Figura 7), onde pode-se ajustar por mínimos quadrados qualquer tipo de equação a um conjunto de medições de vazão. Para isto deve-se criar uma dupla de séries distintas, de níveis lidos e de vazões medidas (tantas duplas quanto forem o número de trechos da curva existente) e escolher, para cada trecho, o tipo de equação que foi utilizado quando da determinação da curva.

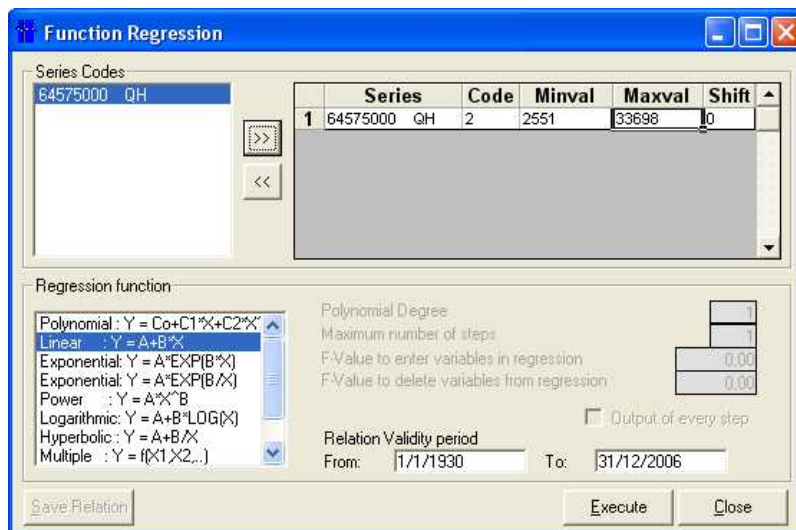


Figura 7 – Janela da ferramenta análise de regressão

7.2 - Determinando novas curvas

Analisando o item onde foi explicado o processo de determinação de curvas de descarga com o sistema *HYMOS*, pode-se verificar que é perfeitamente possível utilizar neste as mesmas metodologias empregadas usualmente pela Itaipu para determinação de suas curvas. A qualidade do ajuste no sistema *HYMOS* também irá depender bastante da sensibilidade e experiência do hidrólogo, em virtude da necessidade de se utilizar o mesmo tipo de equação para todos os trechos da curva. Este fato certamente é amenizado pela possibilidade que o sistema dispõe de utilizar até cinco trechos distintos, mas alguns aspectos devem ser levados em consideração quando da determinação dos intervalos de níveis: alterações ao longo da geometria da seção transversal, alteração da seção de controle conforme a variação do nível, e identificação de ponto de mudança de inclinação da reta de relação cota-vazão em escalas logarítmicas, são alguns deles.

7.3 - Extrapolação pelo método logarítmico

O sistema permite determinar o valor de a_o através de tentativas sucessivas, com o uso da ferramenta de plotagem de medições (figura 8). Após esta determinação, deve-se utilizar a ferramenta *Fitting of rating curves* escolhendo o tipo de equação potencial, e fixando o valor a_o . O equacionamento encontrado será utilizado para cálculo das vazões extrapoladas.

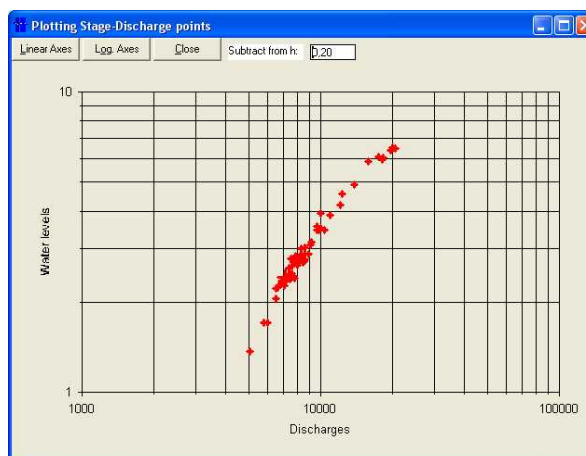


Figura 8 – Janela para determinação de α_0

7.4 - Extrapolação pelo método de Stevens

O *HYMOS* não permite a utilização do método de Stevens diretamente, mas sim uma variante derivada da equação de *Strickler*, ao invés da de *Chezy*. Deste modo deve-se dispor necessariamente de um valor da declividade superficial S para as cotas altas, ao invés da utilização associada de $A\sqrt{R_h}$.

7.5 - Extrapolação pelo método da Área molhada x Velocidade média

Este método é aplicado utilizando-se a ferramenta *Display hydraulic quantities*, mostrada anteriormente, disponível na função *Extrapolation of rating curves*. Basta calcular os valores de Área e Velocidade média para as cotas que se deseja extrapolar, e efetuar o produto dos mesmos.

8 - CONCLUSÕES

Os recursos gerais do *HYMOS* apresentados na parte inicial do presente trabalho deixam claro que este consiste em um poderoso sistema de processamento e gerenciamento de informações hidrológicas, contudo foram encontradas algumas deficiências que serão aqui comentadas.

Dentre as vantagens do uso do *HYMOS*, para o caso específico de armazenamento e processamento de dados relativos à estações fluviométricas, destaca-se a abrangência do mesmo pois possibilita desde o armazenamento de informações físicas da estação (a chamada “Ficha descritiva” do posto) até a análise de suas séries temporais de níveis, vazões, precipitações, dentre outras. Destaca-se também a abrangência para o caso particular da hidrometria, contemplada desde o cálculo da medição de vazão com equipamento convencional.

Outra grande vantagem demonstrada pelo sistema é permitir ao hidrólogo analisar possíveis alterações na geometria da seção transversal da estação a partir da visualização sobreposta de todas as seções levantadas ao longo do tempo. Este aspecto é importantíssimo se pensarmos que estamos tratando aqui de curvas de descarga, que devem ser revisadas após alterações naturais na seção transversal.

Para o traçado de curvas de descarga o *HYMOS* mostra-se completo, pois contempla diversos tipos de calibragens, desde curvas-chave biunívocas sem singularidade até curvas em situação de remanso e escoamento não-permanente.

Com relação às curvas de descarga unívocas, caso específico deste trabalho, o sistema apresenta vantagens e desvantagens com relação à outros softwares mais simples. Tem a vantagem de ser abrangente, pois permite começar pela análise criteriosa das medições de descarga disponíveis e eliminação dos *outliers*.

A principal desvantagem do sistema talvez seja exigir que seja utilizado um mesmo tipo de equação para todos os trechos da curva-chave, apesar da flexibilidade do uso de até cinco trechos. Uma outra desvantagem do *HYMOS* é quanto a inserir no sistema uma curva-chave já existente, caso esta não consista de equações do tipo que o sistema exige. Neste caso deve-se, como mostrado, inserir a relação cota-vazão utilizando a ferramenta de análise de regressão, mas como este não é um processo direto acaba gerando perda de tempo ao hidrólogo.

Obter as vazões extrapoladas da curva-chave também não é processo muito prático, uma vez que os métodos Logarítmico e Área x Velocidade, embora possam ser empregados, também não o são de forma direta. Neste caso o hidrólogo deve alternar entre diversas funções do sistema para obter os valores desejados. Apenas um método de extrapolação, o variante do método de Stevens (Equação de *Manning*), é processado de forma direta. Mas em contrapartida exige que se conheça o valor da declividade da linha de energia (ou declividade superficial), valor este que raramente é medido durante as medições de descarga, notadamente nas cheias, devendo então ser feita uma estimativa deste valor.

9 - RECOMENDAÇÕES

As deficiências apresentadas neste trabalho de forma alguma inviabilizam o uso do sistema *HYMOS* pela Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos de Itaipu Binacional, pois para isso seria necessária uma ampla análise do sistema e não somente das funções de traçado de curvas de descarga.

Recomenda-se, contudo, que as curvas de descarga devam ser traçadas com o uso do *HYMOS* apenas por hidrólogos com a experiência e a sensibilidade suficiente para diagnosticar, principalmente, o tipo de ajuste adequado e a melhor divisão dos trechos da curva, bem como analisar a viabilidade do traçado de uma nova curva ao invés de optar pela trabalhosa opção de inserir no sistema uma curva-chave já existente.

10 - BIBLIOGRAFIA

- [1] JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989). *Curva-Chave: análise e traçado*. DNAEE Brasília-DF, 273 p.
- [2] SANTOS, I. *et al.* (2001). *Hidrometria aplicada*. LACTEC Curitiba-PR, 372 p.
- [3] WL DELFT HYDRAULICS. (1999). *HYMOS manual version 4.1*. Holanda, 590 p.