

Revisão do comportamento hidráulico do Rio Iguaçu na região de União da Vitória e seu impacto na operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo

Review of the hydraulic behavior of Iguaçu River in the region of União da Vitória and its impacts on operation of the Foz do Areia and Segredo reservoirs

Giancarlo Castanharo¹
Homero Buba²

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

giancarlo.castanharo@copel.com¹
homero@copel.com²

Abstract: The Foz do Areia reservoir, under certain combinations of events, may influence flood levels in the cities of União da Vitória and Porto União, located upstream. To avoid this phenomenon constitutes the main purpose of the hydraulic operation of the Foz do Areia and Segredo reservoirs, after dams safety. To satisfy these objectives, first have to correctly quantify these effects by means of studying the hydraulic behavior of the river reach between the cities and the Foz do Areia reservoir. A description of the recent version of these studies is shown, which demanded significant efforts in modeling and obtaining topographical and hydrological data. A more critical scenery has resulted as compared to former studies, emphasizing the importance of the methods and parameters for the hydraulic operation proposed in this paper.

Keywords: Reservoir Operation, floods in União da Vitória, Iguaçu River, Foz do Areia.

Resumo: O reservatório de Foz do Areia, sob certas combinações de eventos, pode influenciar os níveis de enchente nas cidades de União da Vitória e Porto União, situadas a montante. Evitar

este efeito é o objetivo mais importante da operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, após a preservação da segurança das próprias barragens. Para tanto é necessário quantificar corretamente esses efeitos através de estudos do comportamento hidráulico do trecho de rio envolvido. Apresenta-se a mais recente revisão desses estudos, a qual demandou grandes esforços na melhoria da modelagem e na obtenção de melhores informações de campo (topográficas e hidrológicas). Disso resultou um cenário mais crítico que o dos estudos anteriores, reforçando a importância dos métodos operativos e dos parâmetros utilizados, também descritos neste artigo.

Palavras-Chave: Operação Hidráulica, cheias em União da Vitória, rio Iguaçu, Foz do Areia.

1 Introdução

O aproveitamento hidrelétrico de Foz do Areia, atualmente denominado “Governador Bento Munhoz da Rocha Netto”, foi inicialmente previsto nos estudos de inventário do rio Iguaçu, realizados pela Canabira [1] entre 1966 e 1969, para operar no nível máximo operativo igual à cota 688 m, aproveitando uma queda bruta de 84 m. Em 1973, a Copel obteve a concessão federal para a exploração desse potencial hidrelétrico. Dois anos depois, em 1975, foi aprovada pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), órgão extinto, a viabilidade técnica-econômica da construção do aproveitamento hidrelétrico “Foz do Areia – barragem alta”, com nível operativo máximo normal na cota 744 m, aproveitando uma queda bruta máxima de 142,3 m. Essa concepção foi justificada pelo ganho na regularização do deflúvio do rio Iguaçu, mesmo considerando a desativação do aproveitamento hidrelétrico de Salto Grande do Iguaçu (15,6 MW), existente nesse trecho do rio, que aproveitava um desnível de aproximadamente quinze metros, existente entre as cotas 687 e 702 m [2].

Em julho de 1975 iniciaram-se os trabalhos para a construção do aproveitamento hidrelétrico de Foz do Areia. A primeira unidade geradora começou a operar em modo comercial, cinco anos depois, em outubro de 1980. Esse empreendimento dispõe de quatro unidades geradoras, com potência total efetiva de 1.676 MW. O reservatório formado, na cota 742 m, possui um volume útil de 3.804 hm³.

Desde o início do projeto desse aproveitamento, havia preocupação com os efeitos do nível máximo operativo, sobre os níveis de cheia nas cidades de União da Vitória, no estado do Paraná, e Porto União, no estado de Santa Catarina. Em 1976, a Milder-Kaiser Engenharia, empresa projetista do aproveitamento, realizou uma revisão dos estudos de remanso, tendo como base os dados observados num evento de cheia ocorrido

em outubro de 1975 [3]. Isso permitiu rever os coeficientes de rugosidade adotados no estudo de remanso realizado no início de 1975 [4]. Essa revisão concluiu que o efeito sobre os níveis de enchente nas cidades seria de 79 cm, ao invés dos 33 cm estimados inicialmente, para o evento de cheia decamilenar, caso o reservatório estivesse na cota 744 m no pico da cheia. Naquela época foi proposto um sistema de diques de terra como obra de proteção contra esses acréscimos de cheia nas cidades de União da Vitória e Porto União. Essa idéia foi posteriormente abandonada. O estudo de 1976 concluiu que a chance de ocorrer um acréscimo no nível das cheias nas cidades estaria condicionada à simultaneidade de alguns fatores de difícil ocorrência. Dada a baixíssima probabilidade desse evento, esse estudo manteve o nível máximo normal de operação na cota 744 m. A figura 1 apresenta a localização dos reservatórios e das cidades.

Na época desses estudos de remanso, citados no parágrafo anterior, dispunha-se de uma série histórica no posto fluviométrico de União da Vitória com dados do período de 1930 a 1975. Nesses 45 anos de observação a maior cheia observada atingiu a cota de 747,77 m, em 1935. Entretanto a maior vazão medida ocorreu na cota de 744,84 m, no ano de 1946. Por esse motivo, prevaleciam, na época dos estudos, incertezas na relação cota-descarga a partir da cota 744,80 m. As maiores dificuldades desses estudos foram: a calibração da rugosidade das planícies de inundação para cotas superiores a 744,80 m; e a determinação das condições de contorno de jusante do escoamento, na região de Porto Vitória.

Durante a fase de construção desse aproveitamento, a Copel realizou o levantamento de seções transversais adicionais na calha do rio Iguaçu, e instalou diversos postos hidrométricos no trecho de 26 km, entre União da Vitória e Porto Vitória. O estudo de remanso divulgado

anteriormente ao enchimento do reservatório [5], conduziu a uma extrapolação do ramo superior da curva de descarga diferente dos resultados da Milder-Kaiser em 1976. A Copel [5] concluiu que a calha do rio Iguaçu em União da Vitória possuía uma capacidade de descarga inferior a estimada pela projetista. Essa conclusão conduziu a diferenças significativas entre os estudos de remanso de ambas as entidades, de forma que foi adotado, para o reservatório de Foz do Areia, o nível máximo normal de operação igual à cota 742 m. O estudo da Copel concluiu que o reservatório só poderia operar na cota 744 m, se houvesse um sistema de previsão de vazões capaz de prever cheias, com suficiente antecedência, de forma que o reservatório pudesse ser rebaixado da cota 744 m antes da ocorrência do pico da cheia em União da Vitória.

Somente no evento de cheia de 1983 foram realizadas medições diretas de vazão, em cota superior a 744,84 m, no posto fluviométrico de União da Vitória. Nesse evento hidrológico o nível máximo atingido em União da Vitória foi de 10,42 m, equivalente à cota 750,03 m. As várias medições diretas de descarga, realizadas na faixa de cotas de 744,50 a 749,60 m, permitiram o conhecimento real do ramo superior da curva de descarga do posto fluviométrico de União da Vitória. Em 1985, a Copel realizou, de posse dos dados coletados na cheia de 1983, uma revisão e atualização do estudo de 1980 [6]. Nesse estudo foram atualizadas as curvas de descarga naturais dos postos fluviométricos desse trecho, e revisados os cálculos de remanso. O estudo de 1985 [6] manteve as mesmas conclusões do estudo de 1980, quanto à definição do nível máximo normal de operação, e reforçou / verificou a necessidade do rebaixamento antecipado do reservatório, quando da ocorrência de cheias nesse trecho do rio Iguaçu.

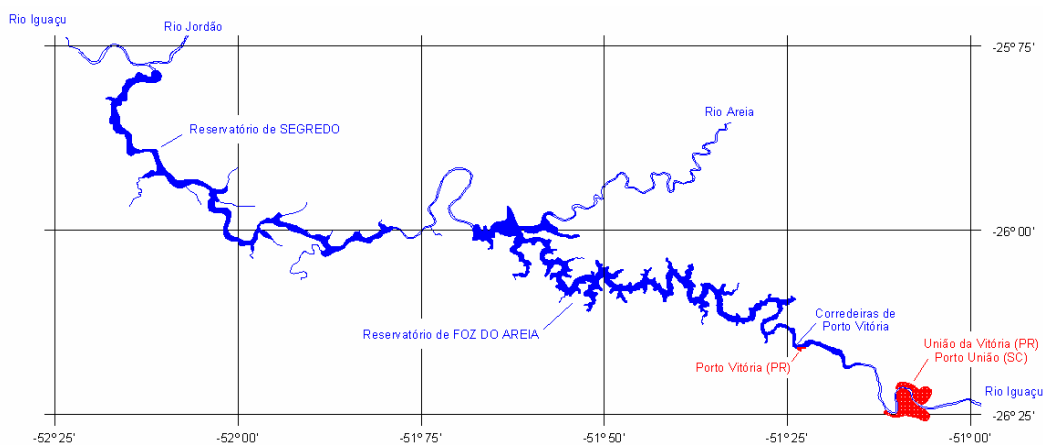


Figura 1: Localização dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo; e das cidades de União da Vitória / Porto União.

Em 1996, a Copel foi uma das entidades pioneiras no Brasil, na utilização de sonares para medição de vazão do tipo ADCP (“Acoustic Doppler Current Profiler”). Esse tipo de aparelho resultou num grande avanço na precisão das medições de descarga líquida, diminuindo consideravelmente a dispersão dos resultados desse tipo de levantamento. Por esse motivo, após um período de medições sistemáticas no posto fluviométrico de União da Vitória, notou-se que as medições de vazões tendiam, com pouca dispersão, para uma região sob a curva de descarga ajustada em 1985, fato que demonstrava claramente um ganho na capacidade de descarga do rio Iguaçu, naquele local, entre a metade da década de 80, e o final da década de 90. Essa modificação foi atribuída à intensa extração de areia, em regime comercial, da calha principal do rio, nessa região. A constatação dessas alterações no comportamento hidráulico do rio Iguaçu, nas proximidades de União da Vitória, motivou a realização de uma reavaliação das características do escoamento do Iguaçu nesse trecho.

2 O Projeto HG-175 – “Revisão do Comportamento Hidráulico do Rio Iguaçu entre União da Vitória e Foz do Areia”

Em meados do ano de 2001, a Copel contratou o LACTEC – CEHPAR para realização de novos estudos de escoamento no rio Iguaçu, entre União da Vitória e Foz do Areia. Esse estudo, denominado HG-175 [7], foi realizado ao longo do ano de 2002. Neste trabalho foram realizadas: uma extensa revisão bibliográfica de todos os estudos de escoamento realizados nesse trecho do rio Iguaçu; uma análise entre as vantagens e desvantagens das modelagens de escoamento em regime permanente e não-permanente; novos levantamentos de seções transversais e novos levantamentos altimétricos dos “zeros” das estações fluviométricas desse trecho; verificação das curvas de descarga naturais das estações fluviométricas; além da modelagem numérica do escoamento.

2.1 A escolha do tipo de modelagem do escoamento

Ao longo das décadas de 1980 e 1990 diversos estudos de escoamento foram realizados nesse trecho do rio Iguaçu. Esses estudos seguiram as duas linhas possíveis de modelagem, representando o escoamento em regime permanente ou em regime não-permanente. As diferenças conceituais, que estão embutidas no equacionamento matemático dos modelos, geraram uma grande polêmica a respeito da precisão das modelagens. Os autores dos estudos realizados em regime não-permanente, afirmam que a desconsideração dos transientes hidráulicos, hipótese existente nas modelagens

em regime permanente, pode distorcer os níveis obtidos ao longo de um dado evento de cheia. Os estudos realizados em regime permanente partem do princípio de que a desconsideração de tais transientes não tem efeito sensível sobre a avaliação de níveis do escoamento no trecho. Além disso, a modelagem hidrodinâmica (regime não-permanente) apresenta, em alguns casos, distorções nos períodos de ascensão da cheia, devido à não representatividade do real armazenamento existente na calha principal e nas planícies de inundação.

Nos modelos de regime permanente a superfície livre do escoamento é modelada através de uma equação diferencial ordinária, deduzida a partir do equilíbrio das forças que agem num trecho infinitesimal, de um dado canal [8]. Na equação (1) estão considerados os efeitos da gravidade, inércia e a resistência ao escoamento exercida pelo leito do canal.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_R^2} \quad (1)$$

onde:

y = profundidade do escoamento;
 x = distância ao longo do canal;
 S_o = declividade do fundo do canal;
 S_f = declividade da linha de energia;
 F_R = número de Froude.

A modelagem em regime não-permanente é realizada através de modelos hidrodinâmicos, que se baseiam num sistema de equações diferenciais parciais, deduzido a partir da consideração de um balanço de massa num dado trecho de canal, e do equilíbrio de forças (2ª lei de Newton) nesse mesmo trecho. Este sistema de equações é conhecido como “Equações de Saint-Venant” para o escoamento não-permanente unidimensional, composto das equações (2) e (3). A primeira delas é chamada de equação da continuidade, e a segunda é conhecida como equação da quantidade de movimento [9]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (3)$$

onde:

x = distância ao longo do canal;
 t = tempo;
 Q = vazão do escoamento;
 A = área da seção transversal;
 S_o = declividade do fundo do canal;
 S_f = declividade da linha de energia;
 y = profundidade do escoamento;
 q = contribuição lateral ao canal;
 g = aceleração da gravidade.

Para a representação física dos níveis de escoamento, fazendo-se uso de uma modelagem em regime permanente, é necessário que os

termos característicos do escoamento não-permanente sejam desprezíveis ao longo dos eventos de cheia. Simplificando as equações de "Saint-Venant" é possível deduzir a equação diferencial ordinária do regime permanente gradualmente variado (1). Para isso é necessário desprezar os termos de derivadas temporais das equações de "Saint-Venant".

Na equação da continuidade (2), a simplificação da derivada da área em relação ao tempo (4) resulta que a variação longitudinal de vazões é necessariamente igual à contribuição lateral (5):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4) \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (5)$$

Na equação da quantidade de movimento (3) o primeiro termo deve ser considerado nulo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Com essa consideração e expandindo o segundo termo da equação da quantidade de movimento (3), esta pode ser escrita da seguinte forma:

$$2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (7)$$

Substituindo-se (5) no primeiro termo da equação (7) tem-se como resultado a equação (8).

$$2 \frac{Qq}{A} - \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (8)$$

Considerando-se que $\partial A = B(y) \partial y$, o segundo termo da equação (8) pode ser escrito em termos da derivada da profundidade em relação à variável independente "x", resultando na equação (9).

$$2 \frac{Qq}{A} - \frac{Q^2}{A^2} B \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (9)$$

Dividindo todos os termos da equação (9) pelo produto "gA", resulta:

$$\frac{2}{gA} \frac{Qq}{A} - \frac{1}{g \cdot A} \frac{Q^2}{A^2} B \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (10)$$

$$2 \frac{Qq}{gA^2} - \frac{BQ^2}{gA^3} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f \quad (11)$$

Sendo: $F_R^2 = \frac{B \cdot Q^2}{g \cdot A^3} \quad (12)$

Considerando a equação (12), e substituindo-a no segundo termo da equação (11) pode-se escrever:

$$2 \frac{Qq}{gA^2} + \frac{\partial y}{\partial x} (1 - F_R^2) = S_o - S_f \quad (13)$$

Organizando-se os termos de (13):

$$\frac{\partial y}{\partial x} (1 - F_R^2) = S_o - S_f - \frac{2Qq}{gA^2} \quad (14)$$

A contribuição lateral a um dado trecho de canal pode ser desprezada (15). Esse incremento de vazão pode ser modelado através da consideração de vazões diferentes a jusante e a montante desse trecho finito. Dessa forma:

$$q = 0 \quad (15) \quad \Rightarrow \quad \frac{2 \cdot Q \cdot q}{g \cdot A^2} \rightarrow 0 \quad (16)$$

Considerando-se a hipótese (15), e desprezando definitivamente as derivadas temporais de (4) e (6), a derivada parcial da equação (14) pode ser escrita como derivada ordinária, resultando na equação diferencial ordinária de primeira ordem que rege o perfil da superfície livre de escoamentos em regime permanente gradualmente variado (17), idêntica à equação (1).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - F_R^2} \quad (17)$$

A validade da hipótese de desconsideração das derivadas temporais das equações de "Saint-Venant" foi verificada no projeto HG-175, para o trecho do rio Iguaçu em questão, através de resultados numéricos de uma modelagem hidrodinâmica, cuja metodologia, resultados e descrições podem ser encontrados em [10]. Com os dados dessa modelagem foram calculados os valores numéricos de todos os termos das equações citadas, ao longo do evento de cheia de 1983. A análise demonstrou que para o caso do rio Iguaçu, as derivadas temporais, relações (4) e (6), têm valores desprezíveis ao longo do período do evento de cheia, com exceção de certos instantes de tempo, que equivalem aos trechos de ascensão dos hidrogramas, nos quais os valores se mostram diferentes de zero, porém pouco significativos.

Além dessa análise, foi realizada a determinação da velocidade de propagação de ondas dinâmicas no trecho em estudo, com o objetivo de obter noções do tempo necessário para percorrer esse trecho. Foram consideradas ondas positivas de montante e jusante em várias situações de escoamento. No caso do trecho em estudo as ondas dinâmicas podem se originar devido a

manobras de comportas na barragem de Foz do Areia, ou devido a variações nas vazões turbinadas. A formulação matemática da velocidade dessas perturbações [8] é fornecida pela equação (18).

$$c = \sqrt{\frac{g L}{2\pi} \tanh \frac{2\pi y}{L}} \quad (18)$$

onde:

c = celeridade da onda;
 g = aceleração da gravidade;
 L = comprimento de onda;
 y = profundidade do escoamento.

A celeridade da onda " c " é definida como a velocidade relativa de propagação em relação ao meio líquido, enquanto que a celeridade absoluta da onda " V_w " é a velocidade medida em relação às margens do canal. A relação entre essas duas velocidades, no escoamento unidimensional, é dada pela equação (19).

$$V_w = V \pm c \quad (19)$$

onde:

V_w = velocidade em relação ao canal;
 V = velocidade do meio líquido;
 c = celeridade da onda.

No caso de águas rasas, onde o comprimento da onda é muito maior que a profundidade do escoamento, a tangente hiperbólica da equação (18) tende para o valor do argumento, conforme a aproximação da relação (20):

$$\tanh \frac{2\pi y}{L} \approx \frac{2\pi y}{L} \quad (20)$$

Substituindo-se (20) em (18) a celeridade da onda para águas rasas resulta:

$$c = \sqrt{g y} \quad (21)$$

A formulação (21) foi aplicada ao trecho entre União da Vitória e Foz do Areia, tendo como base as seções transversais do canal e os perfis de superfície livre calculados para vazões na faixa de 100 a 5.000 m³/s. Com esses subsídios realizou-se uma integração numérica, tendo como base a equação (21), determinando-se o tempo total de propagação de uma perturbação no trecho analisado. Concluiu-se que para o trecho entre Foz do Areia e as corredeiras de Porto Vitória (79 km), o tempo de propagação apresenta um valor médio entre 69 e 70 minutos, podendo este valor ser representativo para as ondas dinâmicas de jusante. Para o segundo trecho, entre as corredeiras e União da Vitória (26 km), a variação do tempo de propagação de uma onda de jusante é maior, oscilando entre 72 e 95 minutos, com valor médio de 84 minutos. Numa hipótese de influência do reservatório nos níveis do

escoamento a montante das corredeiras, o tempo de propagação de uma perturbação causada por um rebaixamento, ou um aumento imediato de vazões defluentes no reservatório, é de aproximadamente 2,5 horas entre a barragem de Foz do Areia e o posto fluviométrico de União da Vitória. Dessa forma os erros de níveis obtidos pela desconsideração dos transientes hidráulicos têm influência num curto intervalo de tempo, da mesma ordem de grandeza do tempo de propagação das perturbações.

A análise dos cenários de escoamento, entre o reservatório e as cidades, considerando a modelagem em regime permanente, pode atingir a precisão da modelagem não-permanente se consideradas as peculiaridades de cada modelo. A calibração de um modelo em regime permanente não exige tantos dados como no caso de um modelo em regime não-permanente. Além disso, a complexidade de tais modelagens é diferente. Em regime permanente a modelagem de níveis pode atingir grande precisão nesse trecho. As modelagens hidrodinâmicas são dificultadas pela existência do regime supercrítico em Porto Vitória, e pela existência de grandes planícies laterais e longos vales de afluentes com suas planícies de inundação. Essas características topográficas causam uma subestimativa entre o volume real de armazenamento e o volume considerado pelas seções transversais fornecidas a um modelo hidrodinâmico. Por essa razão, as modelagens hidrodinâmicas realizadas nesse trecho, tendem a adiantar a ascensão das cheias em algumas horas, tornando a precisão do método da mesma ordem da precisão das modelagens em regime permanente.

Por essas razões, as modelagens de escoamento realizadas no projeto HG-175 foram realizadas em regime permanente, através do uso do modelo HEC-RAS [11]. Além das questões levantadas no parágrafo anterior, a modelagem em regime permanente tem a vantagem de fornecer resultados de mais simples interpretação, quando comparados aos resultados de uma modelagem hidrodinâmica. Esse aspecto é um fato extremamente positivo considerando que os resultados deste estudo tinham como objetivo estabelecer uma linguagem de informação / comunicação entre a Copel, e as populações das regiões de União da Vitória (PR) e Porto União (SC), a ser utilizada em tempo real.

2.2 Levantamento de dados no rio Iguaçu

As medições de descarga líquida realizadas a partir do ano de 1996 no posto fluviométrico de União da Vitória, com o uso do sonar ADCP, demonstraram uma mudança na capacidade de escoamento desse trecho do rio Iguaçu. Esse fato motivou a realização de novos levantamentos de

seções transversais no trecho de 26 km entre União da Vitória e as corredeiras de Porto Vitória, com o objetivo de subsidiar os estudos de escoamento realizados no projeto HG-175.

O levantamento de seções transversais foi executado com o uso do sonar ADCP, e realizado somente nos segmentos da calha principal do rio, considerando a hipótese de que não houve modificações nas planícies de inundação. Dessa maneira, foram realizados sistematicamente 21 levantamentos na calha principal do rio Iguçu, entre União da Vitória e as corredeiras de Porto Vitória. O trabalho consistiu na realização de varreduras no local da seção transversal, das quais resultavam “nuvens” de pontos no espaço tridimensional. Estes dados foram processados por meio de um software do tipo CAD, no qual foram determinadas as curvas de nível do fundo do rio, nos locais das seções. De posse dessa representação foram determinadas as seções transversais médias desses locais da calha principal.

Paralelamente ao levantamento de seções transversais foi realizado um nivelamento geométrico de segunda ordem (melhor precisão), com o objetivo de verificar a cota do “zero” das estações fluviométricas existentes nesse trecho do rio Iguçu. Essas informações serviram de base para a calibração da rugosidade da calha principal e das planícies de inundação no modelo de escoamento HEC-RAS. Essas cotas foram levantadas anteriormente em duas datas distintas: em 1980, e em 1994. Entretanto, existiam diferenças significativas entre os dados desses levantamentos. O caminhamento topográfico de 37 km, realizado em maio de 2002, entre as estações fluviométricas de União da Vitória e “R6 – Barra do Jangada”, serviu para verificação dos dados dos dois levantamentos anteriores, que apresentavam diferenças de até 16 centímetros.

2.3 Calibração da rugosidade do leito principal e das planícies de inundação do rio Iguçu

O modelo de escoamento utilizado faz uso do coeficiente de rugosidade de Manning para modelar as perdas de energia ao longo do canal. A equação da resistência considerada pelo HEC-RAS é apresentada na equação (22). Essa relação, no caso específico do trecho do rio Iguçu a montante das corredeiras de Porto Vitória, é aplicada distintamente nas planícies de inundação do rio, e em sua calha principal. Isso exige a calibração de rugosidades diferentes ao longo de uma mesma seção transversal.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (22)$$

onde:

V = velocidade média na sub-seção;

n = coeficiente de rugosidade de Manning;
 R_h = raio hidráulico da sub-seção transversal;
 S_f = declividade da linha de energia.

A calibração do modelo de escoamento foi realizada entre Foz do Areia e as corredeiras de Porto Vitória (79 km), e entre as estações de Porto Vitória e União da Vitória (26 km), por duas finalidades: permitir a extrapolação do ramo superior da curva de descarga de União da Vitória para vazões superiores a 2.400 m³/s e possibilitar o cálculo da superfície-chave de descarga para as estações de Porto Vitória e União da Vitória.

Essa calibração foi baseada em perfis longitudinais de regime natural entre a barragem de Foz do Areia e as estações linimétricas existentes no trecho até a cidade de União da Vitória. O comportamento da rugosidade da calha principal e das planícies de inundação, em função da vazão, são inversos. A rugosidade na calha principal obedece uma curva de variação na qual para pequenas vazões a rugosidade é alta, decrescendo com o aumento da vazão até atingir um patamar de valor constante. Esse comportamento se deve ao fato do raio hidráulico do escoamento crescer com o aumento da vazão. Conseqüentemente a rugosidade relativa da calha principal diminui com o aumento da vazão, caracterizando a curva de rugosidade apresentada na Figura 2. Nas planícies de inundação a rugosidade cresce com o aumento da vazão, desde o último valor obtido na calha principal até valores da ordem de 0,3. O aumento da rugosidade, com o aumento da vazão, deve-se as características da rugosidade nas planícies. Com a elevação da cota do escoamento nas planícies, o raio hidráulico não aumenta consideravelmente como no caso da calha principal, devido ao crescimento da área de escoamento não superar o crescimento do perímetro molhado nas planícies de inundação. Além disso, com a elevação do nível d'água a resistência é aumentada, no caso das planícies em regiões urbanizadas, pela existência de obstáculos artificiais, como construções, e pela densidade da vegetação encontrada nas planícies de regiões rurais.

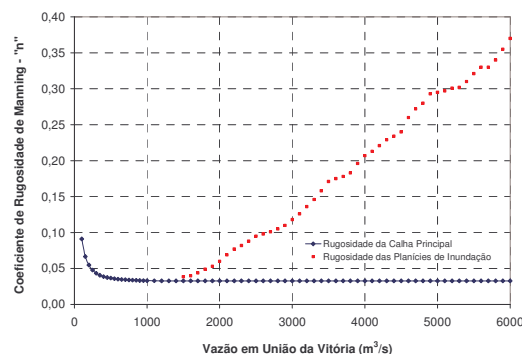


Figura 2: Curvas de rugosidade obtidas no trecho a montante das corredeiras.

2.4 Determinação das superfícies-chave de descarga para os postos fluviométricos de União da Vitória e Porto Vitória

A avaliação do remanso do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de escoamento na região de União da Vitória tem como fator complicador, a existência das corredeiras de Porto Vitória, que em condições naturais ocasionam uma mudança de regime de escoamento nesse local. Essa condição causa grandes transtornos nas modelagens de escoamento, pois a representação dos níveis e da perda de carga existente no ressalto hidráulico, formado em condições naturais, é extremamente complexa nas modelagens matemáticas.



Figura 3: Corredeiras de Porto Vitória.

A representação da perda de carga do trecho das corredeiras de Porto Vitória é agravada pela característica bidimensional do fluxo na região. A ocorrência da profundidade crítica se faz aproximadamente um quilômetro a jusante da estação de Porto Vitória. A jusante desse ponto o escoamento em regime natural é predominantemente supercrítico. Nesse trecho o fluxo escoava através de canais existentes entre blocos de rocha que afloram na superfície livre do escoamento, com direção longitudinal aleatória. Esses canais são interrompidos por pequenos "degraus". Essa configuração se desenvolve por aproximadamente 500 m ao longo da corredeira, até atingir uma região com uma queda da ordem de 1 m, onde o fluxo é redirecionado para uma região de grande turbulência próxima à margem direita. Para pequenas vazões ocorre uma sucessão de regimes ao longo da corredeira. Cada um desses "degraus" controla um pequeno trecho em regime fluvial a montante, seguido de uma pequena soleira natural, e de um ressalto hidráulico. Em seguida inicia-se uma nova configuração desse tipo. Para grandes vazões, a altura desses "degraus" se torna pequena perante a lâmina da água escoada, e o que se observa é um fluxo torrencial contínuo ao longo da corredeira (figura 3).

Devido aos problemas originados por essas corredeiras, os estudos de remanso foram originalmente desenvolvidos em trechos: entre a Barragem de Foz do Areia e Porto Vitória; e entre Porto Vitória e União da Vitória. Essa configuração foi aplicada originalmente nos estudos da Copel, na década de 1980 [5] e [6], e mantidos no projeto HG-175 [7].

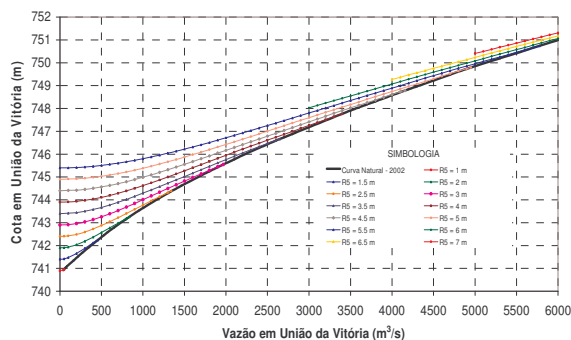


Figura 4: Superfície-chave do posto fluviométrico de União da Vitória.

A avaliação do remanso em cada um desses trechos é realizada pela determinação da superfície-chave de descarga, nos postos fluviométricos existentes a montante de cada um dos trechos. As superfícies-chave são uma representação dos níveis de escoamento em dado local, para várias hipóteses de restrição de nível de jusante. Isso forma um gráfico de descarga, no qual se encontra a curva de descarga natural, e acima dela, diversas curvas parametrizadas em função do nível considerado como condição de contorno de jusante do trecho analisado. A figura 4 apresenta a superfície-chave determinada para o posto fluviométrico de União da Vitória.

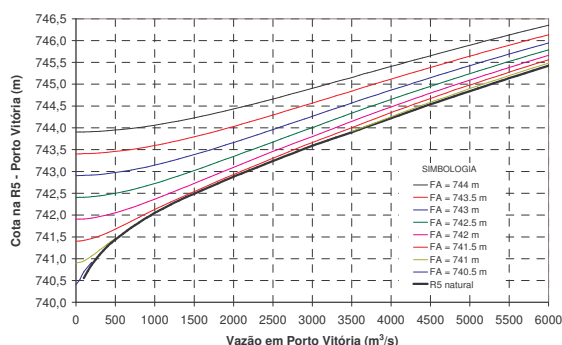


Figura 5: Superfície-Chave do posto fluviométrico de Porto Vitória.

A figura 5 apresenta a superfície-chave do posto fluviométrico de Porto Vitória, localizado a montante das corredeiras de mesmo nome. No gráfico nota-se uma característica diferente da figura 4. Nota-se que para Porto Vitória, as curvas paramétricas são interceptadas pela curva de descarga natural desse posto, numa dada vazão.

Entretanto, em altas vazões, as curvas novamente aparecem na parte superior direita do gráfico, demonstrando um remanso nesse posto para grandes vazões. Esse fato se deve ao comportamento do canal existente logo a jusante das corredeiras, que para grandes vazões, volta a afogar o regime natural das corredeiras, devido à grande perda de energia " S_f " nesse trecho.

De modo a resumir os resultados dos estudos de remanso, na questão de influência do reservatório nos níveis de escoamento nas cidades de União da Vitória (PR) e Porto União (SC), foi idealizada a figura 6, com base nos resultados das figuras 4 e 5. O gráfico apresenta uma curva, que equivale ao nível máximo possível no reservatório de Foz do Areia, em função da vazão no trecho de União da Vitória, para que não ocorram acréscimos artificiais de nível no escoamento nesse trecho. As regiões acima dessa função representam situações de escoamento nas quais o reservatório estaria aumentando os níveis de cheia nas cidades de União da Vitória (PR) e Porto União (SC). No canto superior esquerdo do gráfico apresenta-se uma região de influência do reservatório, porém dentro da área desapropriada pela Copel. A região inferior do gráfico, delimitada abaixo da função, representa situações naturais de escoamento, nas quais o reservatório não tem influência sobre os níveis de escoamento.

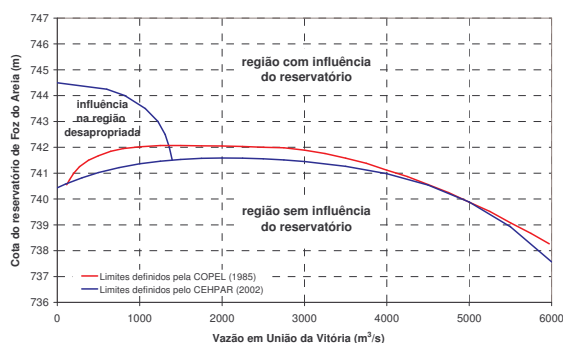


Figura 6: Limites de influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de escoamento em União da Vitória.

As duas funções apresentadas na figura 6 equivalem aos limites de influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de escoamento em União da Vitória que resultaram dos estudos da Copel em 1985 [6] e do CEHPAR em 2002 [7]. Nota-se que os resultados mais recentes representam uma função mais restritiva para a operação do reservatório de Foz do Areia, pois para uma dada vazão, é necessário que o nível do reservatório esteja mais baixo do que o previsto no estudo de 1985. A diferença se deve a alteração na curva de descarga do rio Iguaçu em União da Vitória, que ocorreu devido à extensa atividade de extração de areia existente no leito do rio no período de tempo entre os estudos. A alteração no

comportamento hidráulico do rio Iguaçu demonstra a alta sensibilidade da operação do reservatório de Foz do Areia, em função de mudanças no comportamento do Iguaçu nas proximidades de União da Vitória, e ressalta a importância da precisão dos estudos de remanso.

3 A operação hidráulica integrada dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo – “Software FASG”

Na operação hidráulica de um reservatório isolado, ou sistema de reservatórios, a segurança das barragens é fundamental. Secundariamente a esse princípio básico, procura-se não agravar os efeitos das cheias em relação às condições naturais, isto é, aquelas que prevaleciam antes da construção dos reservatórios.

Para atender a essas condições a operação hidráulica dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo é realizada de forma integrada através da aplicação do software “FASG”, que sintetiza as regras operativas determinadas através de estudos de simulação com cheias do passado, e com a “cheia de projeto”, através de um algoritmo computacional. Esse programa, desenvolvido na Copel, área de hidrologia (antiga CNHO), no início da década de 1990 [12], fornece as decisões de manobras de comportas para ambos os reservatórios, quando alimentado com dados hidrológicos e energéticos desses dois aproveitamentos hidrelétricos. O software é utilizado continuamente, em tempo real, no centro de operação da empresa.

A operação hidráulica integrada dos dois reservatórios tem por objetivos secundários: maximizar o rebaixamento do reservatório de Foz do Areia, de forma a minimizar o risco de acréscimos nos níveis de cheia nas cidades a montante, em relação às condições naturais; reduzir possíveis efeitos adversos sobre as restrições de jusante (inundação da casa de força da UHE Salto Santiago / inundações na confluência com o rio Paraná). O principal algoritmo do “FASG” executa a tarefa de rebaixamento do reservatório de Foz do Areia, quando as previsões de vazão afluente em União da Vitória, ou em Foz do Areia, atinjam valores que permitam a posterior recuperação do reservatório, considerando as metas pré-estabelecidas de produção de energia. Esse modo de operação reduz drasticamente a probabilidade de que esse reservatório venha a influenciar os níveis de cheia a montante.

3.1 O rebaixamento do reservatório de Foz do Areia

A determinação dos hidrogramas afluentes previstos para União da Vitória e Foz do Areia

permite que se estimem os volumes afluentes mínimos que podem ser considerados na futura recuperação do reservatório. Essa metodologia considera os hidrogramas previstos nestes dois locais, devido à diversidade hidrológica das cheias ao longo da bacia do Iguazu. A baixa declividade a montante de União da Vitória, combinada com a maior área de drenagem, determina cheias de grande duração, com ascensões e recessões lentas. Em oposição, a bacia incremental entre Porto Vitória e Foz do Areia, com alta declividade, faz com que as cheias geradas na região tenham rápidas ascensões e recessões. Em alguns eventos históricos, a contribuição dessa bacia incremental, de aproximadamente 5.000 km² de área de drenagem, foi superior ao valor da contribuição de toda a área de montante, que tem área de drenagem da ordem de 24.000 km².

O hidrograma previsto pelo "FASG" em União da Vitória é composto de dois horizontes. No primeiro horizonte (48 horas) são utilizadas previsões de vazão de curto prazo. A partir desse ponto é considerada uma "recessão crítica" nos hidrogramas. Essa hipótese garante que os volumes afluentes previstos são os mínimos volumes futuros, garantindo assim a recuperação do volume vazio do reservatório na fase de recessão da cheia.

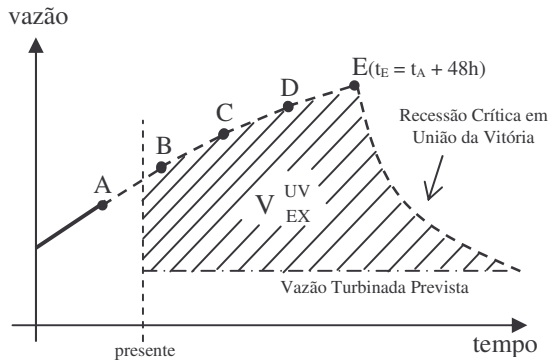


Figura 7: Hidrograma previsto em União da Vitória.

A figura 7 ilustra a sistemática de previsão de vazões em União da Vitória. Os pontos B, C, D e E são previsões para horizontes de 12, 24, 36 e 48 horas, feitas a partir do último horário no qual se observou a vazão (ponto A) no posto fluviométrico de União da Vitória. As previsões são realizadas através de um modelo estocástico do tipo ARIMA (Auto-Regressivo Integrado de Médias Móveis), desenvolvido no CEHPAR – Projeto HG-51 [13], em 1986. As vazões são previstas pelas equações recursivas (23) a (26):

$$\begin{aligned}\hat{Q}_{UV}(+12h) &= 1,42Q_{UV} - 0,25Q_{UV}(-12h) - 0,17Q_{UV}(-24h) \\ \hat{Q}_{UV}(+24h) &= 1,76Q_{UV} - 0,53Q_{UV}(-12h) - 0,24Q_{UV}(-24h) \\ \hat{Q}_{UV}(+36h) &= 1,97Q_{UV} - 0,68Q_{UV}(-12h) - 0,29Q_{UV}(-24h) \\ \hat{Q}_{UV}(+48h) &= 2,12Q_{UV} - 0,79Q_{UV}(-12h) - 0,32Q_{UV}(-24h)\end{aligned}$$

onde:

$$\begin{aligned}\hat{Q}_{UV}(t) &= \text{vazão prevista em União da Vitória} \\ &\text{no instante "t";} \\ Q_{UV}(t) &= \text{vazão observada em União da} \\ &\text{Vitória no instante "t".}\end{aligned}$$

A partir do ponto E, da figura 7, aumentam as incertezas das previsões do modelo estocástico ARIMA. Por esse motivo, as vazões após esse ponto são consideradas em regime de recessão, com a consideração de uma "curva de recessão crítica". Tal função representa a "envoltória inferior" das recessões dos hidrogramas de cheias históricas observadas em União da Vitória, sendo definida pelo CEHPAR, no projeto HG-51 – "Avaliação do Armazenamento Natural na Bacia do Rio Iguazu" [14].

A definição do máximo rebaixamento a ser realizado no reservatório de Foz do Areia é realizada através da integração do volume excedente das vazões previstas futuras, volume representado pela área hachurada da figura 7. O volume excedente V_{EX}^{UV} é o volume disponível no futuro, descontadas as vazões necessárias para produção de energia, que são consideradas constantes, e no máximo igual à vazão de máximo engolimento das turbinas. Comumente essa vazão é considerada inferior ao valor máximo, igual ao valor médio de turbinamento, pois considera possíveis indisponibilidades de unidades geradoras.

A mesma integração do volume excedente, no hidrograma previsto de União da Vitória (figura 7), é realizada de forma análoga para o hidrograma afluente previsto na seção da barragem de Foz do Areia. A única diferença consiste na previsão de vazões futuras nesse local, que devido à rápida resposta da bacia incremental, é de difícil previsibilidade. Por esse motivo a última vazão afluente observada é considerada como previsão futura por um período de tempo igual ao intervalo de decisão do modelo. A partir desse instante é considerada a curva de recessão crítica de vazões para a seção da barragem de Foz do Areia. O volume excedente do hidrograma V_{EX}^{FA} é calculado considerando a mesma previsão de vazões turbinadas. Dessa forma a defluência ao reservatório de Foz do Areia é definida como a máxima defluência obtida pelo cálculo do volume excedente pelos hidrogramas previstos em União da Vitória e Foz do Areia. Essa hipótese, representada pela equação (27), considera a escolha pela maior disponibilidade hídrica entre a bacia hidrográfica a montante de União da Vitória e a bacia como um todo até Foz do Areia.

$$D_{FA}' = \text{máx} \left(D_{FA}^{UV}, D_{FA}^{FA} \right) \quad (27)$$

onde:

$$D_{FA}' = \text{defluência a ser implementada em Foz do Areia para rebaixamento ou recuperação do reservatório;}$$

D_{FA}^{UV} = defluência em Foz do Areia considerando o volume excedente calculado no hidrograma de União da Vitória;

D_{FA}^{FA} = defluência em Foz do Areia considerando o volume excedente calculado no hidrograma de Foz do Areia.

A operação do reservatório de Foz do Areia consiste em tentar igualar o volume vazio do reservatório "Vv", abaixo da cota 742 m, ao volume excedente dos hidrogramas de União da Vitória e Foz de Areia. Essa operação deve ser realizada dentro de um intervalo de tempo de rebaixamento " Δt_{REB} ", contado a partir do instante presente, cuja duração é função da cota do reservatório, sendo mais curto quando o reservatório encontra-se em cotas mais próximas ao nível máximo normal. A vazão a ser defluída, conforme a decisão formulada pela equação (27), provém das fórmulas (28) e (29):

$$D_{FA}^{UV} = \frac{V_{EX}^{UV} - V_V}{\Delta t_{REB}} + \hat{Q}_{FA} \quad (28)$$

$$D_{FA}^{FA} = \frac{V_{EX}^{FA} - V_V}{\Delta t_{REB}} + \hat{Q}_{FA} \quad (29)$$

onde:

\hat{Q}_{FA} = vazão prevista em Foz do Areia;

V_{EX}^{UV} = volume excedente determinado no hidrograma previsto em União da Vitória;

V_{EX}^{FA} = volume excedente determinado no hidrograma previsto em Foz do Areia;

V_V = volume vazio no reservatório de Foz do Areia;

Δt_{REB} = intervalo de tempo para o rebaixamento do reservatório.

3.2 Reservatório equivalente em Segredo

A operação de rebaixamento do reservatório de Foz do Areia é realizada coordenadamente com a operação do reservatório de Segredo, tarefa que traz benefícios para operação da cascata de reservatórios da bacia do Iguaçu. Nas decisões de operação do software "FASG" é adotado um "diagrama de operação normal" [15] considerando um "reservatório equivalente" em Segredo, de modo a adiantar as operações de aumento de defluência nesse reservatório. O emprego desse diagrama aumenta a chance de que o volume vazio do reservatório de Segredo seja utilizado para o abatimento do pico da cheia.

Para a determinação da vazão defluente em Segredo considera-se o volume vazio existente nos dois reservatórios (Foz do Areia e Segredo), a vazão afluente natural em Segredo, e a curva de recessão crítica das vazões naturais em Segredo. De modo análogo ao realizado em Foz do Areia,

avalia-se o mínimo volume que pode afluir no futuro, e define-se a vazão defluente em Segredo, de forma que o volume mínimo futuro seja igualado ao volume ainda vazio no reservatório "equivalente". Essa vazão " D'_{SG} " pode ser interpretada como a máxima defluência, que implementada no reservatório de Segredo, ainda garante a ocupação total dos volumes vazios a montante, para todas as recessões históricas. Mesmo defluindo tal vazão, com os reservatórios abaixo dos níveis máximos normais, o "reservatório equivalente" pode ser dito "virtualmente cheio".

3.3 Determinação das defluências em Foz do Areia e Segredo

As defluências dos dois reservatórios são decididas em conjunto, satisfazendo as exigências da conservação de massa, e as restrições impostas pela máxima vazão defluente a jusante do sistema "Foz do Areia-Segredo". Essa última condição tem por finalidade evitar que a operação de rebaixamento de Foz do Areia induza vertimentos em Segredo que superem os valores de afluições, que seriam observadas em condições naturais neste último reservatório. Esta última condição é uma das premissas básicas que regem as regras de operação de reservatórios.

Conforme descrição do item 3.1 a vazão defluente do reservatório de Foz do Areia, devido à necessidade de rebaixamento do reservatório, é determinada pela equação (27), conjuntamente com os resultados das equações (28) e (29). Além da condição de rebaixamento, duas outras hipóteses influem na decisão de defluência em Foz do Areia. A primeira delas refere-se à limitação dessa defluência, devido à restrição imposta à defluência de Segredo, que não deve ultrapassar o valor máximo previsto para condições naturais. Esta condição é modelada pela equação (30):

$$D_{FA}'' = \max \hat{Q}_{SG} + \frac{V_{SG}^* - V_{SG}}{\Delta t} - \hat{Q}_{FA/SG} \quad (30)$$

onde:

D_{FA}'' = defluência máxima em Foz do Areia considerando a limitação de defluência em Segredo;

$\max \hat{Q}_{SG}$ = máxima vazão prevista em Segredo;

V_{SG}^* = volume correspondente ao nível máximo normal em Segredo;

V_{SG} = volume armazenado no reservatório de Segredo;

Δt = intervalo de decisão;

$\hat{Q}_{FA/SG}$ = previsão de vazões na bacia incremental entre Foz do Areia e Segredo.

A vazão defluente em Foz do Areia, para controle do nível máximo, é definida pela equação (31):

$$D_{FA}''' = \hat{Q}_{FA} + \frac{V_{FA} - V_{FA}^*}{\Delta t} \quad (31)$$

onde:

$$D_{FA}''' = \text{defluência em Foz do Areia para controle de nível;}$$

$$\hat{Q}_{FA} = \text{vazão prevista em Foz do Areia;}$$

$$V_{FA}^* = \text{volume correspondente ao nível máximo normal em Foz do Areia;}$$

$$V_{FA} = \text{volume no reservatório de Foz do Areia no instante de decisão;}$$

$$\Delta t = \text{intervalo de decisão.}$$

A decisão final de defluência em Foz do Areia é dada pela relação (32), que considera as variáveis calculadas nas equações (27), (30) e (31):

$$D_{FA} = \min \{ \max(D_{FA}', D_{FA}'''), D_{FA}'' \} \quad (32)$$

Na primeira decisão da relação (32) escolhe-se o maior valor de defluência entre a necessária para rebaixamento/recuperação do reservatório e aquela para correção dos desvios de nível. Na decisão final limita-se a defluência ao valor que é compatível com a defluência máxima a jusante do sistema Foz do Areia / Segredo. Essas defluências ainda são limitadas, em cada intervalo de decisão, pelas máximas taxas de variação horária de defluências.

A defluência em Segredo é determinada levando em consideração a vazão defluente em Foz do Areia, determinada na equação (32), a previsão de vazões na bacia incremental entre tais aproveitamentos, o controle de nível do reservatório, o “diagrama de reservatório equivalente em Segredo”, e a vazão afluente máxima prevista, considerada como limite.

$$D_{SG}'' = D_{FA} + \hat{Q}_{FA/SG} + \frac{V_{SG} - V_{SG}^*}{\Delta t} \quad (33)$$

onde:

$$D_{FA} + \hat{Q}_{FA/SG} = \text{vazão afluente prevista em segredo.}$$

A decisão de defluência em Segredo é dada pela relação (34):

$$D_{SG} = \min \{ \max(D_{SG}', D_{SG}'''), \max(\hat{Q}_{SG}) \} \quad (34)$$

onde:

$$\hat{Q}_{SG} = \text{vazão prevista em Segredo;}$$

$$D_{SG}' = \text{defluência determinada pela consideração de um reservatório equivalente em Segredo, item 3.1;}$$

$$D_{SG}'' = \text{defluência para controle de nível em Segredo.}$$

A metodologia apresentada nos itens 3.1, 3.2 e 3.3, que rege o algoritmo principal do software “FASG”, foi exaustivamente testada considerando: as principais cheias históricas observadas na

bacia do Iguaçu; e as cheias de projeto dos aproveitamentos hidrelétricos [16]. Essa tarefa foi realizada com o uso do software denominado “SIMFASG”, que submete o algoritmo do “FASG” ao longo de todo o período do evento de cheia. As simulações aplicam o algoritmo para cada intervalo de decisão, reproduzindo a aplicação em tempo real. A figura 8 ilustra os resultados da simulação da operação de Foz do Areia, considerando o mais severo evento hidrológico observado na bacia do Iguaçu no século XX: a cheia de 1983. Nesse gráfico apresenta-se a “trajetória” de rebaixamento / recuperação do reservatório, realizada com objetivo de manter os níveis do reservatório abaixo do limite de influência, definidos pelos estudos de 1985 e 2002, apresentados ao final do item 2.4 na figura 8. Essa figura comprova a versatilidade do algoritmo de operação hidráulica, que afasta o risco de acréscimo dos níveis de cheia nas cidades, através do rebaixamento do reservatório; e permite, ao final do evento de cheia, a recuperação do nível máximo operativo.

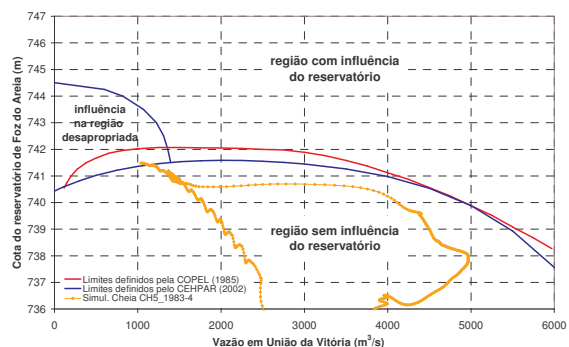


Figura 8: Resultado da simulação da operação de Foz do Areia com o software “FASG” para a cheia de 1983.

4 Conclusões

As conclusões do projeto HG-175 demonstraram o complexo e sensível comportamento que envolve os níveis de operação do reservatório de Foz do Areia, e os níveis de escoamento na região de União da Vitória. Seu principal mérito foi a verificação do aumento de restrições para a operação desse reservatório.

A metodologia de operação dos reservatórios de Foz do Areia e Segredo, realizada pelo software FASG, desenvolvido no início da década de 1990, mostrou-se válida e consistente mesmo após o aumento de restrição, constatado em 2002, pelo projeto HG-175. Isso foi comprovado com novas simulações realizadas para os eventos históricos e de projeto dos aproveitamentos. Apesar disso, essa situação necessita de acompanhamento permanente. Essa tarefa é executada continuamente na Copel, pelo Centro de Operação da Geração, que tem como base uma extensa

rede hidrológica, que é composta de 24 estações telemétricas distribuídas ao longo da bacia do Iguaçu, as quais são operadas em tempo real pelo Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar).

Os resultados da operação do reservatório de Foz do Areia são disponibilizados em tempo real para as comunidades das cidades de União da Vitória (PR) e Porto União (SC) através de um gráfico apresentado no site da Copel (<http://www.copel.com/ger/iguacu/operacao.jsp>). Esse gráfico é uma adaptação da relação apresentada na figura 6, que permite aos moradores dessas cidades acompanhar a operação do reservatório, através da plotagem simultânea dos níveis do reservatório de Foz do Areia em função das leituras de níveis da estação fluviométrica de União da Vitória. A figura disponibiliza a trajetória horária das situações de escoamento verificadas na última semana. A figura 9 ilustra um exemplo desse gráfico, para a operação de rebaixamento do reservatório de Foz do Areia realizada durante a cheia de maio de 2007. O gráfico, apresentado em tempo real no site da Copel, equivale a um resumo de todos os resultados do estudo de escoamento do HG-175, e demonstra o caráter de transparência da operação desses reservatórios adotado pela Copel.

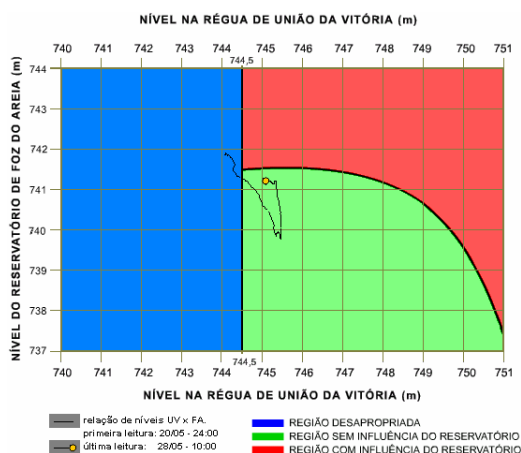


Figura 9: Gráfico demonstrativo da operação de Foz do Areia.

Fonte: www.copel.com/ger/iguacu/operacao.jsp

Referências Bibliográficas

- [1] Canambra Engineering Consultants Limited – **Power Study of South Brazil** – Apêndice VIII – Outubro, 1968.
- [2] Canambra Engineering Consultants Limited – **Power Study of South Brazil** – Apêndice II – Fevereiro, 1969.
- [3] Milder-Kaiser Engenharia – **Influência do reservatório de Foz do Areia sobre as cheias de União da Vitória: projeto Foz do Areia, Rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. Curitiba: Suplemento ao Memorando de Projeto nº 10, 1976.
- [4] Milder-Kaiser Engenharia – **Influência do reservatório de Foz do Areia sobre as cheias de União da Vitória: projeto Foz do Areia, Rio Iguaçu, Paraná, Brasil**. Curitiba: Memorando de Projeto nº 10, 1975.
- [5] Fill, H. D. ; Sugai, M. R. v B.; Zchoerper, D. – **Influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de enchente em União da Vitória**. Curitiba: Copel, relatório técnico, 53 p. 1980.
- [6] Sugai, M. R. v B.; Massuci, L. A.; Busseti, D. C.; Santos, A. F. – **Influência do reservatório de Foz do Areia sobre os níveis de enchente em União da Vitória: revisão**. Curitiba: Copel, relatório técnico. 1985.
- [7] Castanharo, G.; Müller, I.I. **HG-175 – Estudo de Revisão do Comportamento Hidráulico do Rio Iguaçu no Trecho entre União da Vitória e Foz do Areia**. Curitiba: CEHPAR, relatório técnico, 157 p. 2002.
- [8] Henderson, F. M. **Open Channel Flow**. New York: Ed. Macmillan, 521 p. 1966.
- [9] Yevjevich, V. Introduction. In: Mahmood, K., Yevjevich, V. **Unsteady Flow in Open Channels**. Fort Collins: Water Resources Publications, 1975. p 1-28.
- [10] Castanharo, G; Mine, M. R. M.; Kaviski, E. Aplicação dos modelos hidrodinâmicos CHANNEL-3 e IPH-IV na bacia hidrográfica do rio Iguaçu: artigo técnico. Curitiba: **Revista Engenharia & Construção**, nº 44, maio/2000.
- [11] Hydrologic Engineering Center (HEC) – HEC-RAS (River Analysis System) / **Hydraulic Reference Manual – Versão 3.0**. Washington: US Corps of Engineers, 262 p. 2001.
- [12] Buba, H.; Cunha, L.M.; Camargo, A. S. G.; Gonçalves, L. F. A. **Operação Hidráulica Integrada dos Reservatórios de Foz do Areia e Segredo**. Curitiba: Copel, relatório técnico, 1994.
- [13] Mine, M. R. M. **HG-51 – Análise Hidrológica e Matemática de Operação de Reservatórios – Previsão de Vazões de Cheias em União da Vitória**. Curitiba: CEHPAR, relatório técnico nº 2, 50 p. 1986.
- [14] Mine, M. R. M. **HG-51 – Análise Hidrológica e Matemática de Operação de Reservatórios – Avaliação do Armazenamento Natural na Bacia do Rio Iguaçu**. Curitiba: CEHPAR, relatório técnico nº 5, 4 p. 1988.
- [15] U.S. Army – Corps of Engineers. **Reservoir Regulation**. Washington: U.S. Army, EM 1110-2-3600, 59 p. Maio, 1959.
- [16] Castanharo, G. **Simulações de Operação Hidráulica dos Reservatórios de GBM, GNB, GJR, GPS e Vossoroca**. Curitiba: Copel, relatório técnico, 206 p. 2007.