



HydroExpert

**Manual de polinômios de canal de fuga
com faixas operativas de vazão defluente.**



HydroByte
Software

Fevereiro 2020

HydroByte Software

www.hydrobyte.com.br

Manual da representação matemática e computacional dos polinômios de Canal de Fuga, relação cota do NA x vazão defluente, com faixas de operação para a vazão defluente.

Autor: Marcelo Augusto Cicogna (macicogna@uol.com.br)

Versão 1.1 atualizada em 2020-02-18.

Impressão realizada em 2020-02-18.

Arquivo: Manual-HydroExpert-PCF-Faixa-Oper.doc (1099 kB)



Índice

1	Introdução.....	4
1.1	Modelo Atual dos Polinômios de Canal de Fuga	4
1.2	Motivação	4
2	PCF com Faixas Operativas.....	6
2.1	Tipos de Representação.....	8
2.2	Regras do Modelo de Dados	9
3	Interface dos Dados de Canal de Fuga.....	10
3.1	Cadastro HydroData XP.....	10
3.2	Cálculos no HydroExpert	13
4	Referências Bibliográficas	14
5	Histórico das Revisões.....	15



1 Introdução

Este manual tem como objetivo apresentar o modelo matemático e sua implementação computacional dos *Polinômios de Canal de Fuga*, PCF, ou seja, das funções que determinam a relação da cota do nível d'água de jusante em função da vazão defluente, presente no Sistema HydroExpert a partir da sua versão 1.5.2.

1.1 Modelo Atual dos Polinômios de Canal de Fuga

De forma geral, dentro do modelo de dados usual para os aproveitamentos pertencentes ao Sistema Interligado Nacional – SIN, os dados sobre a relação da cota do nível 'água de jusante descrevem um polinômio de, até, quarto grau, conforme apresentado na Equação 1.

$$P_z(u) = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + a_4u^4 \quad (1)$$

Em algumas situações especiais, para a representação matemática do fenômeno de afogamento, o canal de fuga possui um conjunto de polinômios no qual, para cada item, há a indicação de uma referência de jusante. Um exemplo desta condição é a representação do canal de fuga da UHE São Simão, no qual existem quatro polinômios com referências iguais a 317, 322, 325 e 328 m do reservatório da UHE Ilha Solteira. Entre essas cotas, há interpolação linear sobre os coeficientes para se determinar o polinômio para o canal de fuga da UHE São Simão.

Como referência, citam-se os trabalhos do autor, Cicogna (1999), e os guias de demonstração do Sistema HydroExpert e de seu modelo de simulação, HydroSim XP (HYDROSIM XP, 2012).

1.2 Motivação

Um dos obstáculos com o modelo atual dos dados é que não se determina uma faixa de validade dos polinômios de (até) quarto grau. Em outras palavras, a falta de limites mínimos e máximos para a vazão defluente pode determinar valores incoerentes para a cota do nível d'água de jusante.

Alguns pesquisadores chamam este problema de “polinômios que envergam”, como ilustrado na Figura 1. A partir do Ponto A, o polinômio determina valores crescentes ou decrescentes para a cota de jusante. Este efeito pode chegar até valores negativos.

Alguns modelos adotam o último valor antes de se ter derivada negativa, criando um patamar a partir do Ponto A, até o ponto B, conforme ilustrado pela linha tracejada apresentada na Figura 1.

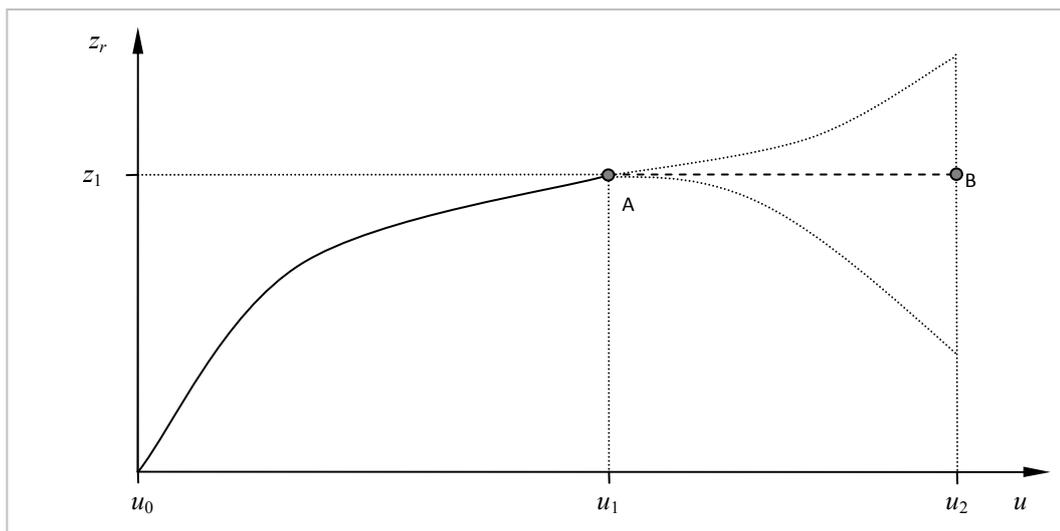


Figura 1. Ilustração do problema de falta de faixa operativa e as implicações indesejáveis no cálculo da cota do nível d'água de jusante.

Outro obstáculo pode ser encontrado quando se tenta fazer o ajuste de um polinômio único que compreenda a vazões defluentes na faixa de operação das turbinas e os valores altos de vazão associados à capacidade de vertimento do aproveitamento. Nestes casos, um polinômio pode deixar de representar a relação de cota e vazão na faixa de operação das turbinas e, até, ter pontos de inflexão que se distanciam do efeito físico real da hidráulica de canais abertos.

Com o objetivo de suplantar esses obstáculos, transformados em motivação, a HydroByte Software criou no Sistema HydroExpert o recurso de polinômios de canal de fuga com a determinação de faixas operativas, o qual será apresentado na seção a seguir.



2 PCF com Faixas Operativas

Um recurso interessante para o uso dos polinômios de canal de fuga existentes nos dados dos modelos de planejamento e operação do SIN seria o cadastro e aplicação de faixas operativas. Desta forma, um polinômio teria um valor mínimo e outro máximo de validade para a vazão defluente.

Matematicamente, o polinômio teria a seguinte descrição:

$$P_z(u) = \sum_{j=0}^J a_j u^j \quad \text{se } u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \quad (1)$$

sendo, portanto, a faixa operativa determinada entre os limites $(u^{\min}; u^{\max})$.

Neste sentido, a HydroByte Software propôs que os dados de um polinômio para o canal de fuga sejam descritos com as seguintes variáveis:

$$a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ \text{RefJus} \ \text{VazMin} \ \text{VazMax}$$

onde:

- a_j : coeficiente j do polinômio.
- *RefJus*: referência de jusante para o cálculo de afogamento do canal.
- *VazMin*: limite inferior da faixa de operação do polinômio.
- *VazMax*: limite superior da faixa de operação do polinômio.

O valor *default* para *RefJus*, *VazMin* e *VazMax* é zero, o que identifica também que este tipo de recurso está desabilitado quando o modelo de cálculo do HydroExpert fizer uso do polinômio. Isto será esclarecido a diante, na subseção que descreve os tipos de representação.

Com o objetivo de esclarecer a configuração de dados para representar as faixas operativas e, também, o efeito de afogamento de um canal de fuga, considere um aproveitamento com duas faixas operativas $(u_0; u_1)$ e $(u_1; u_2)$, conforme ilustração apresentada na Figura 2.

Dentro da primeira faixa $(u_0; u_1)$, o aproveitamento possui três polinômios com referências de jusante *ref1*, *ref2* e *ref3*. Na segunda faixa $(u_1; u_2)$, existe apenas um polinômio.

Neste exemplo, caso a vazão defluente estiver dentro da primeira faixa, $(u_0; u_1)$, o modelo de cálculo do HydroExpert determinará um polinômio consultando o valor atual da referência de jusante e interpolando entre *ref1*, *ref2* e *ref3*. Este é o comportamento padrão para um canal de fuga com efeito de afogamento, mesmo que não existisse a faixa de vazão $(u_0; u_1)$.



Por outro lado, caso a vazão defluente esteja dentro da segunda faixa de vazões, ($u_1; u_2$), a cota do nível d'água será calculada com o quarto polinômio, sem consulta a qualquer referência de jusante. O modelo de cálculo do HydroExpert está preparado para identificar essa situação automaticamente.

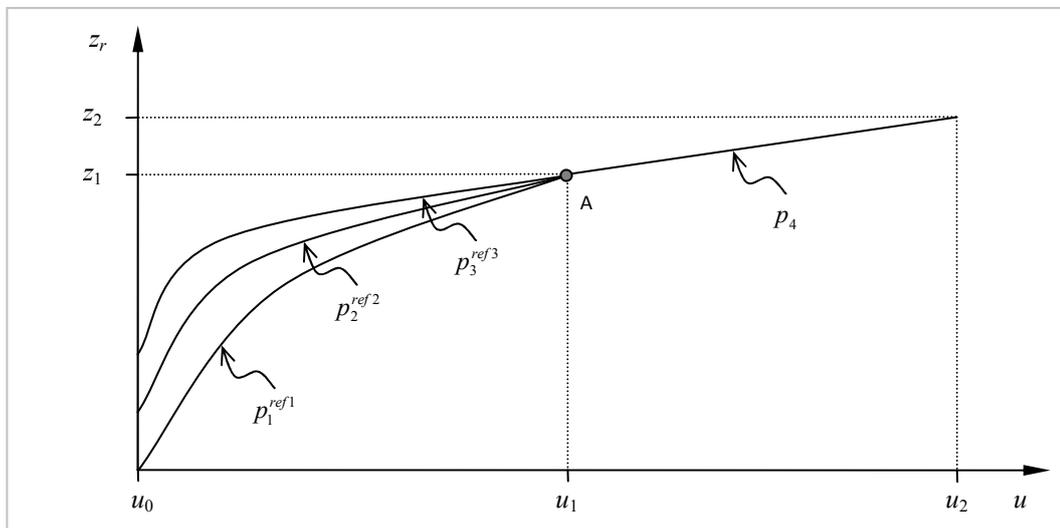


Figura 2. Ilustração de combinação de polinômios com faixas operativas e com referência de jusante para cálculo de canal de fuga com afogamento.

A partir do modelo de dados proposto pela HydroByte Software, o exemplo de polinômios, afogamento e faixas apresentado na Figura 2 poderiam ser cadastrados da seguinte forma:

$$\begin{array}{llllll}
 p_1: & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & ref_1 & u_0 & u_1 \\
 p_2: & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & ref_2 & u_0 & u_1 \\
 p_3: & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & ref_3 & u_0 & u_1 \\
 p_4: & a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & 0.00 & u_1 & u_2
 \end{array}$$

Lembrando apenas que os coeficientes são diferentes para cada um dos polinômios.

O modelo por faixas de operação pode permitir também que polinômios de uma mesma família possuam faixas de operação distintas, conforme ilustração apresentada na Figura 3 a seguir. Note-se que neste exemplo os polinômios associados à referência *ref 2* possuem faixas de operação distintas.

De forma semelhante, o polinômio p_2 possui configuração de referência de jusante, embora nenhum outro polinômio esteja presente em sua faixa de operação. Neste caso, a configuração de um valor de referência de jusante é opcional e não interfere nos cálculos.

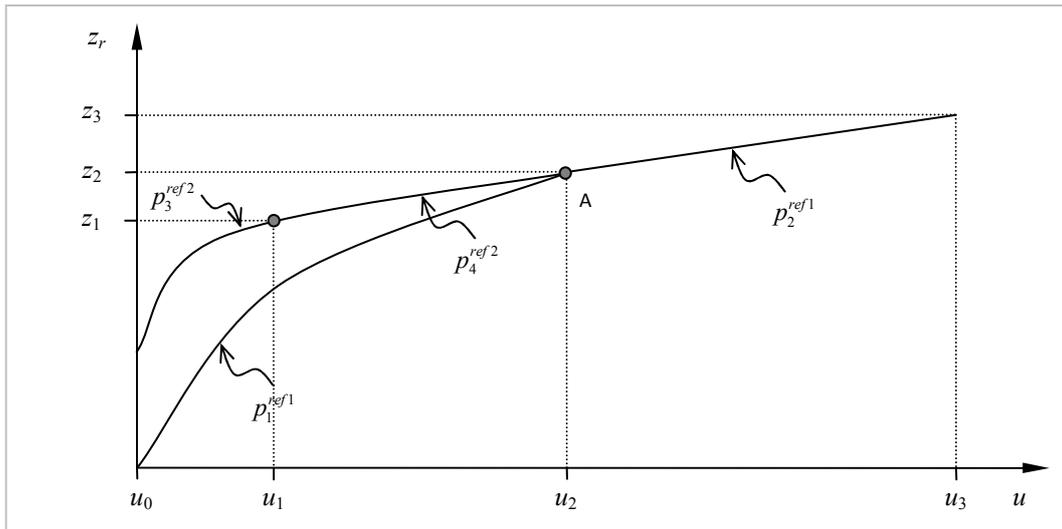


Figura 3. Ilustração de combinação de polinômios com faixas operativas distintas e com referência de jusante para cálculo de canal de fuga com afogamento.

No exemplo anterior, o efeito de afogamento e faixas apresentado na Figura 3 poderiam ser cadastrados da seguinte forma:

$$\begin{array}{l} p_1: \quad a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \quad ref_1 \quad u_0 \quad u_2 \\ p_2: \quad a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \quad ref_1 \quad u_2 \quad u_3 \\ p_3: \quad a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \quad ref_2 \quad u_0 \quad u_1 \\ p_4: \quad a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \quad ref_2 \quad u_1 \quad u_2 \end{array}$$

2.1 Tipos de Representação

Em função do modelo apresentado, pode-se ter os seguintes tipos de representação do canal de fuga por polinômios, partindo-se da descrição do nível mais simples até o mais complexo.

1. **Sem faixa e sem afogamento:** este seria o caso mais comum de representação de polinômios e que está em sintonia com os dados existentes no arquivo Hidr.dat do deck de dados dos modelos Decomp e Newave.
2. **Sem faixa e com afogamento:** este caso também está presente no arquivo Hidr.dat como, por exemplo, para a UHE São Simão.
3. **Com faixa única e sem afogamento:** este seria o caso ideal de evolução do tipo 1, ou seja, que fosse possível determinar a faixa de vazão no qual o polinômio é válido na determinação da cota do nível d'água de jusante.
4. **Com múltiplas faixas e sem afogamento:** neste caso, pode-se ter um conjunto de polinômios, cada um com sua faixa de vazões defluentes.
5. **Com múltiplas faixas e com afogamento:** este seria o caso mais complexo de representação da relação de cota e vazão de um canal de fuga, semelhante ao que foi ilustrado nas Figuras 2 e 3.



Para cada um dos tipos de representação, faz-se no Quadro 1, a seguir, um exemplo de configuração dos dados dos polinômios.

Quadro 1. Exemplos de configuração dos dados de polinômios de canal de fuga.

Tipo	Modelo							
Sem faixa e sem afogamento	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	θ	θ
Sem faixa e com afogamento	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_1	θ	θ
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_2	θ	θ
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_3	θ	θ
Com uma faixa e sem afogamento	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	u_θ	u_1
Com múltiplas faixas e sem afogamento	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	u_θ	u_1
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	u_1	u_2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	u_2	u_3
Com múltiplas faixas e com afogamento (faixas iguais)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_1	u_θ	u_1
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_2	u_θ	u_1
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_3	u_θ	u_1
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\theta.000$	u_1	u_2
Com múltiplas faixas e com afogamento (faixas distintas)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_1	u_θ	u_2
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_1	u_2	u_3
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_2	u_θ	u_1
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	ref_2	u_1	u_2

2.2 Regras do Modelo de Dados

Algumas regras são necessárias para a correta configuração e cadastramento dos dados no banco de dados HydroData XP do Sistema HydroExpert, a saber:

1. Não pode existir sobreposição de faixas, ou seja, os segmentos de vazão defluente devem ser contíguos.
2. Os polinômios devem ser cadastrados em ordem crescente do campo *VazMin*.
3. Dentro de uma faixa operativa, caso exista o efeito de afogamento, os polinômios devem ser cadastrados em ordem crescente do campo *RefJus*.



3 Interface dos Dados de Canal de Fuga

No Sistema HydroExpert, o modelo de representação dos dados de canal de fuga, de acordo com o modelo apresentado na seção anterior, está presente no banco de dados HydroData XP para armazenamento, inserção e edição de polinômios e no HydroSim XP, modelo de simulação do HydroExpert, para o cálculo da cota do nível d'água de jusante na simulação das condições de operação dos aproveitamentos.

3.1 Cadastro HydroData XP

No HydroData XP, os dados de canal de fuga estão disponíveis na aba que tem o mesmo nome, como pode ser verificado na Figura 4.

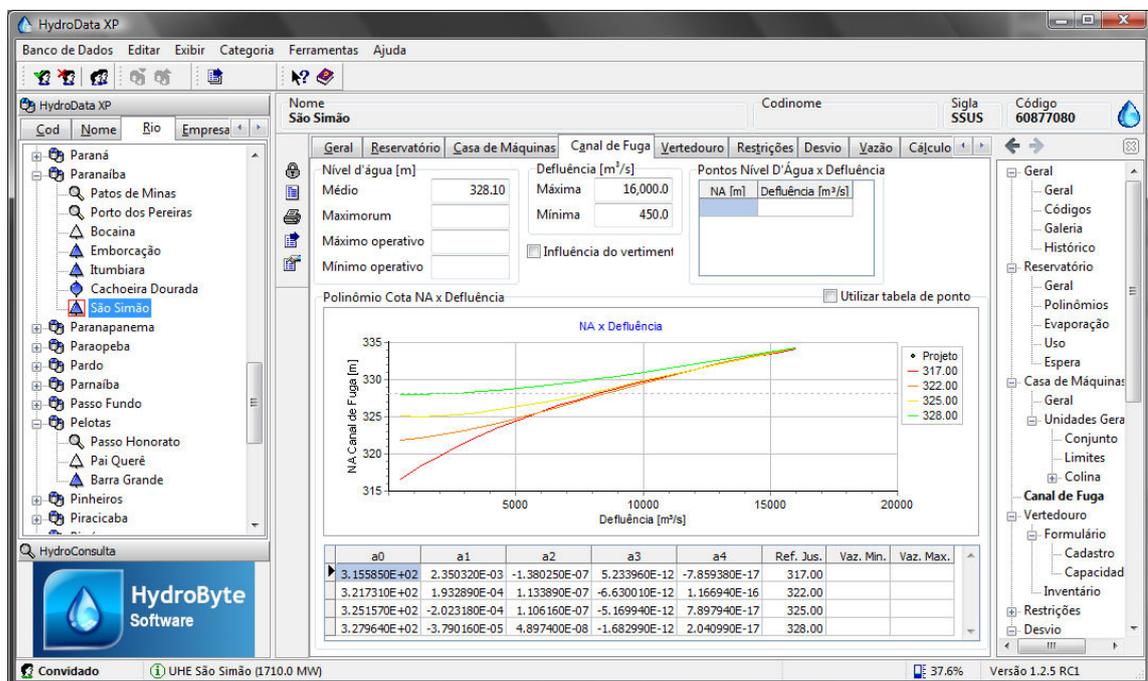


Figura 4. Interface de cadastro e edição de dados de canal de fuga no banco de dados HydroData XP. Exemplo de canal de fuga com efeito de afogamento.

Na Figura 4, nota-se a presença dos polinômios da UHE São Simão com os dados de referência de jusante, fazendo menção ao efeito de afogamento deste canal por um aproveitamento ou confluência imediatamente a jusante. Com estes dados, determina-se a cota do nível d'água da UHE São Simão em função de sua vazão defluente e, também, da cota do reservatório da UHE Ilha Solteira. Este é um exemplo do Tipo 2 de representação, "Sem faixa e com afogamento".

Para exemplificar a criação de polinômios com faixas de vazão defluente, apresentam-se os dados da UHE Barra Grande, os quais foram ajustados para duas faixas de operação por objetivos de testes dos novos recursos. Na Figura 5, apresentam-se duas faixas de operação,



conforme pode ser verificado na legenda do gráfico e na planilha de polinômios. Note-se, também, que os valores de referência de jusante são iguais a zero, o que indica ao modelo que não há efeito de afogamento. Este é um exemplo do Tipo 4 de representação, “Com múltiplas faixas e sem afogamento”.

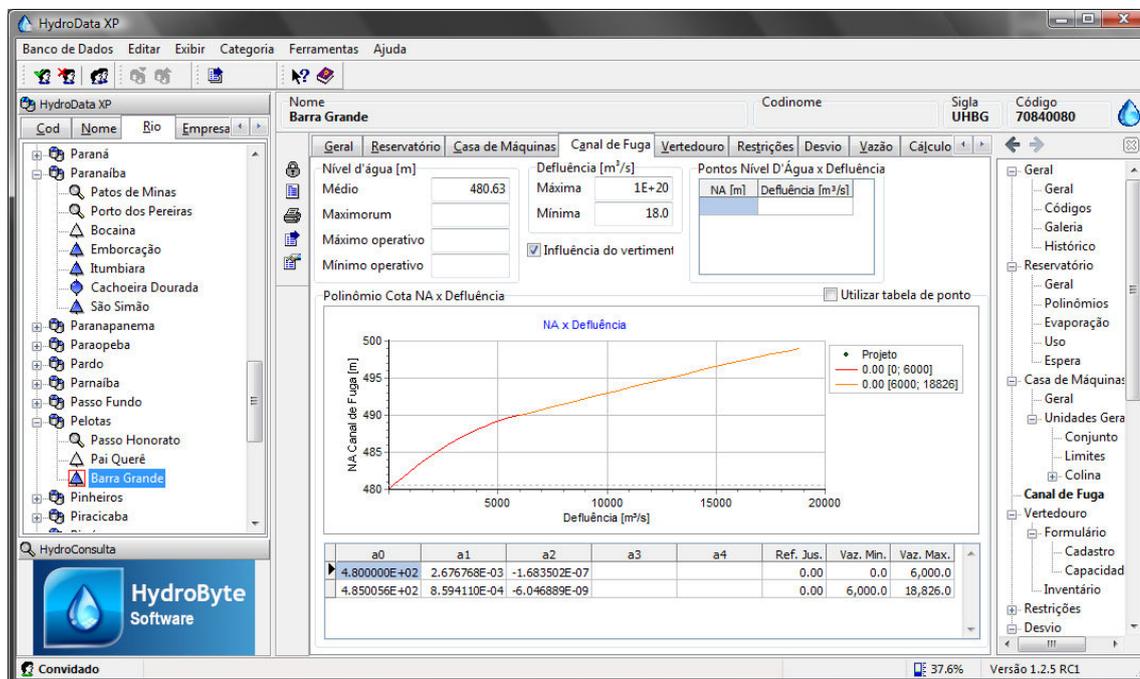


Figura 5. Interface de cadastro e edição de dados de canal de fuga no banco de dados HydroData XP. Exemplo de canal de fuga com polinômios com faixa de vazão.

Um recurso interessante para teste do funcionamento do cálculo da cota do nível d'água de jusante, em função da vazão defluente, pode ser obtido por meio da aba “Cálculo” do HydroData XP. Nesta aba, pode-se simular o cálculo considerando o efeito de afogamento ou faixas de operação de vazão defluente.

Por exemplo, na Figura 6, pode-se verificar o cálculo de cota de jusante da UHE São Simão estipulando-se uma vazão defluente de 2000 m³/s e considerando que o reservatório da UHE Ilha solteira esteja na cota 322,00 m.

De maneira semelhante, pode-se testar as faixas de vazão defluente da UHE Barra Grande. Na , nota-se que a segunda faixa determina a cota de jusante, pois a vazão defluente está estabelecida no valor de 7000 m³/s.

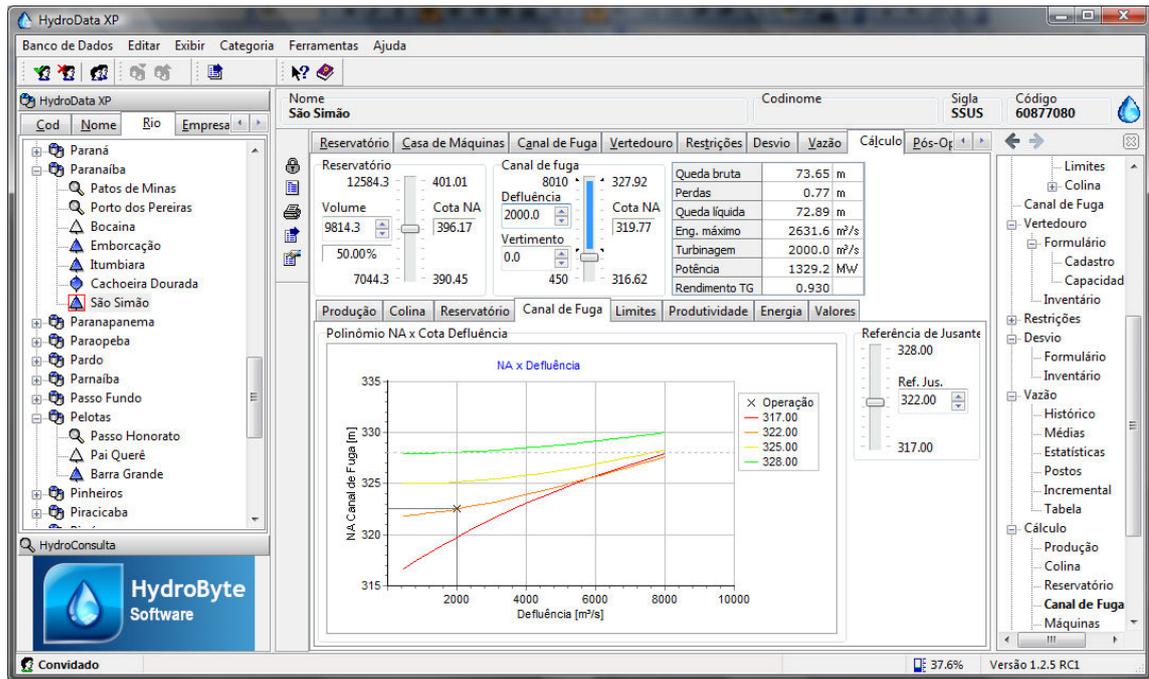


Figura 6. Interface de cálculo do HydroData XP demonstrando o cálculo de cota do canal de fuga sob efeito de afogamento por reservatório a jusante.

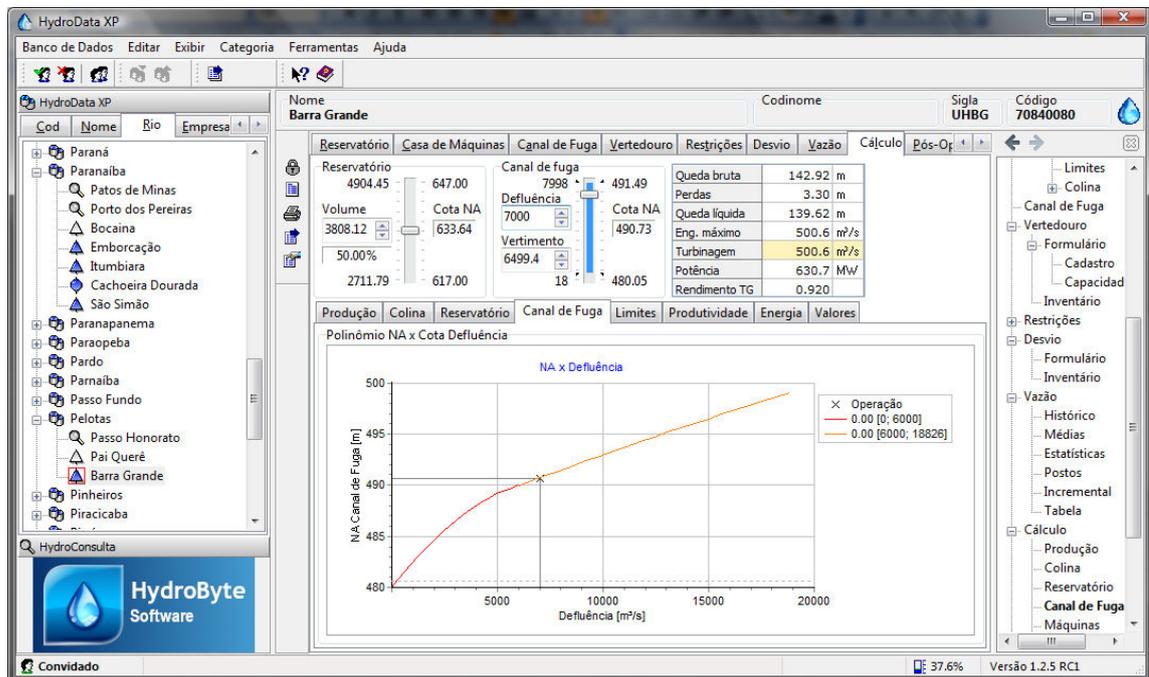


Figura 7. Interface de cálculo do HydroData XP demonstrando o cálculo de cota do canal de fuga com polinômios com duas faixas de vazão defluente.



3.2 Cálculos no HydroExpert

No Sistema HydroExpert o cálculo da cota do nível d'água de jusante dos aproveitamentos está embutido dentro do modelo de operação de aproveitamentos hidrelétricos, do qual o HydroSim XP é derivado.

Nestes módulos de cálculo, a existência ou não de faixas de vazão, bem como o efeito de afogamento, são identificados e gerenciados automaticamente.

Para ilustração, a HydroByte Software criou um estudo de testes com os exemplos apresentados neste manual, para o qual apresenta-se o arquivo de dados que armazena os dados dos polinômios de acordo com o modelo de dados apresentado anteriormente. Na Figura 8, verificam-se os polinômios e seus valores de referência de jusante e de faixas de vazão.

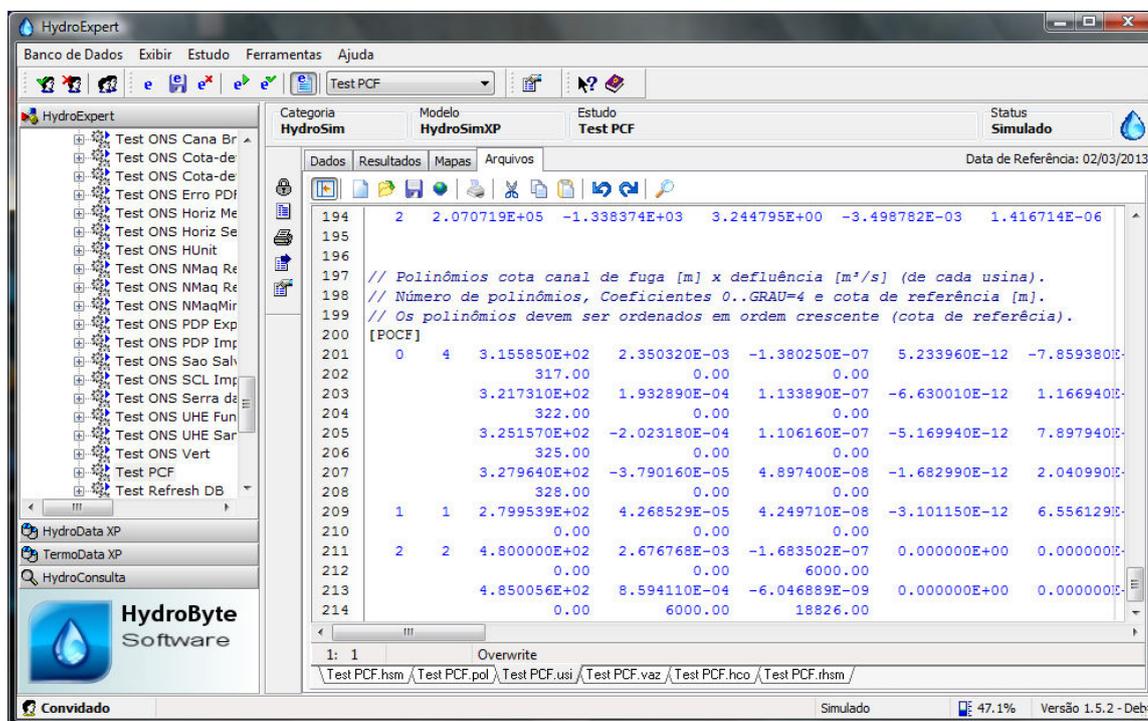


Figura 8. Interface do HydroExpert demonstrando os dados de polinômios das UHE São Simão (id = 0) e UHE Barra Grande (id = 2) respeitando o modelo de dados para efeito de afogamento e de faixas de vazão defluente, respectivamente.



4 Referências Bibliográficas

CICOGNA, Marcelo Augusto. **Modelo de planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos a usinas individualizadas orientado por objetos**. 1999. 217 p. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

HYDROBYTE SOFTWARE. **HydroSim XP**: Manual do Usuário. [S.l.: s.n.]. 2011. 26 p. Disponível em: <www.hydrobyte.com.br>. Acesso em: 11 jun. 2012.

HYDROBYTE SOFTWARE. **HydroSim XP**: Manual de Metodologia. [S.l.: s.n.]. 2011. 19 p. Disponível em: <www.hydrobyte.com.br>. Acesso em: 11 jun. 2012.



5 Histórico das Revisões

Controle de conteúdo das revisões deste documento.

Quadro 2. Controle de versões.

Versão	Data	Anotação
1.1	18/02/2020	Aprimoramento do modelo para permitir faixas operativas distintas dentro de uma mesma família.
1.0	31/10/2013	Versão de lançamento do documento.