



HydroExpert

**Manual do modelo de desvio de vazões
entre aproveitamentos**



HydroByte
Software

Novembro 2016

HydroByte Software

www.hydrobyte.com.br

Manual da representação matemática e computacional das estruturas de desvio de vazões entre aproveitamentos.

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

Versão 1.2 atualizada em 2016-11-21.

Impressão realizada em 2016-11-21.

Arquivo: Manual-HydroExpert-Desv.doc (1504 kB)



Índice

1	Introdução.....	4
2	Modelo de Desvio de Vazões.....	5
2.1	O Fluxo e sua Notação.....	6
2.2	Multiplicidade.....	7
2.3	Tipos.....	8
2.4	Regra de Desvio.....	8
2.5	Desvios como Variáveis Independentes.....	9
2.6	Vínculos de Variáveis.....	9
3	Estudos de Caso	12
3.1	Canal Pereira Barreto.....	12
3.2	Túnel Segredo-Jordão.....	13
3.3	Foz do Chapecó.....	14
3.4	Moxotó – Paulo Afonso 4.....	15
3.5	Belo Monte	16
3.6	Paraíba do Sul.....	17
3.7	Cadastro dos Exemplos.....	19
4	Interface dos Dados de Desvios.....	20
4.1	Cadastro HydroData XP.....	20
4.2	Cálculos no HydroExpert	22
5	Referências Bibliográficas	26
6	Histórico das Revisões.....	27



1 Introdução

Este manual tem como objetivo apresentar o modelo matemático e sua implementação computacional dos *desvios de vazões entre aproveitamentos* presente no Sistema HydroExpert a partir da sua versão 1.5.4.

O recurso de estruturas de desvio é importante para simular situações especiais de estrutura e topologia existentes no Sistema Interligado Nacional – SIN.

Algumas estruturas são físicas como, por exemplo, o Canal Pereira Barreto ligando os reservatórios das UHE Ilha Solteira (Rio Paraná) e Três Irmãos (Rio Tietê). Em outras situações, a variável de desvio é utilizada para representar situações especiais como, por exemplo, a vazão afluyente ao reservatório fictício da UHE Paulo Afonso 4 como uma derivação do reservatório da UHE Moxotó, ambas localizadas no Rio São Francisco.

A diferenciação dos tipos de estruturas e suas formas de representações são apresentadas neste manual, bem como alguns exemplos reais destacados ao final do documento.

Importante: o cadastro no HydroData XP de múltiplas estruturas de desvio por aproveitamento está disponível desde a versão 1.5.6. No HydroExpert, em especial no modelo HydroSim XP, a simulação de múltiplas estruturas está disponível a partir da versão 1.6.0.



2 Modelo de Desvio de Vazões

A principal equação do modelo de simulação HydroSim XP é a sua equação de balanço de massas, conforme apresentado na Equação 1.

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + \left(y_{i,t} + \sum_{k \in \Omega_i} f(u_{k,t-tr}) - (q_{i,t} + s_{i,t} + ev_{i,t} + mu_{i,t} + d_{i,t}) \right) \cdot f_u \quad (1)$$

sendo:

- i, t índices de aproveitamento e intervalo de tempo, respectivamente. Existem N aproveitamentos e T intervalos. As variáveis de armazenamento x são indexadas em instantes de tempo (inicial $t-1$ e final t). As variáveis de vazão, nível e altura representam valores médios durante um intervalo t qualquer.
- y vazão incremental para o aproveitamento (m^3/s). Aplica-se a UHE, reservatório ou ponto de controle.
- Ω_i conjunto de índices dos aproveitamentos diretamente à montante de i . O efeito de tempo de viagem e amortecimento das vazões de montante, efeito *routing*, é representado pelo atraso de tr intervalos na soma da defluência dos aproveitamentos de montante, ou seja, aplicação de uma função de *routing* f_r .
- s vazão vertida (m^3/s). Aplicam-se limites máximos em função da carga hidráulica acima da soleira.
- ev efeito de evaporação no reservatório durante o intervalo t , calculado como uma vazão de retirada em m^3/s . O cálculo da evaporação leva em consideração o volume médio $(x_t + x_{t-1})/2$ para o intervalo. Como o estado final do reservatório não é conhecido no cálculo do balanço, o cálculo da evaporação é um procedimento iterativo.
- mu representa os usos-múltiplos (ou consuntivo) do reservatórios que podem ser expressos como vazões (m^3/s). Citam-se como exemplos a vazões retirada do reservatório para irrigação e abastecimento.
- d representa vazões desviadas do reservatório por meio de canais, túneis, bombeamento ou outras estruturas (m^3/s). As derivações podem ser conectadas a outros reservatórios, rios ou corpos d'água externos ao estudo de simulação.
- f_u é um fator de conversão de unidades entre as grandezas de vazão e volume.

O fator de conversão de unidades f_u é um mecanismo conveniente para permitir ao modelo de simulação considerar vários tipos de duração para os intervalos do horizonte de estudo. Pode-se criar estudos de simulação com horizontes discretizados em intervalos mensais, diários, horários e de 30 minutos, além da possibilidade de criar horizontes com durações mistas ou variáveis. Considerando as unidades de vazão em m^3/s e de volume em hm^3 , o fator de conversão é:

$$f_u = \frac{\Delta t}{10^6} \quad (2)$$



Dá-se destaque à variável de desvio $d_{i,t}$, a qual aparece na equação de balanço de massas como uma entrada no nó da árvore de simulação hidráulica (aproveitamento i e no instante t). Uma ilustração da aplicação da variável de desvio é demonstrada na Figura 1 entre os aproveitamentos de índices 3 e 4.

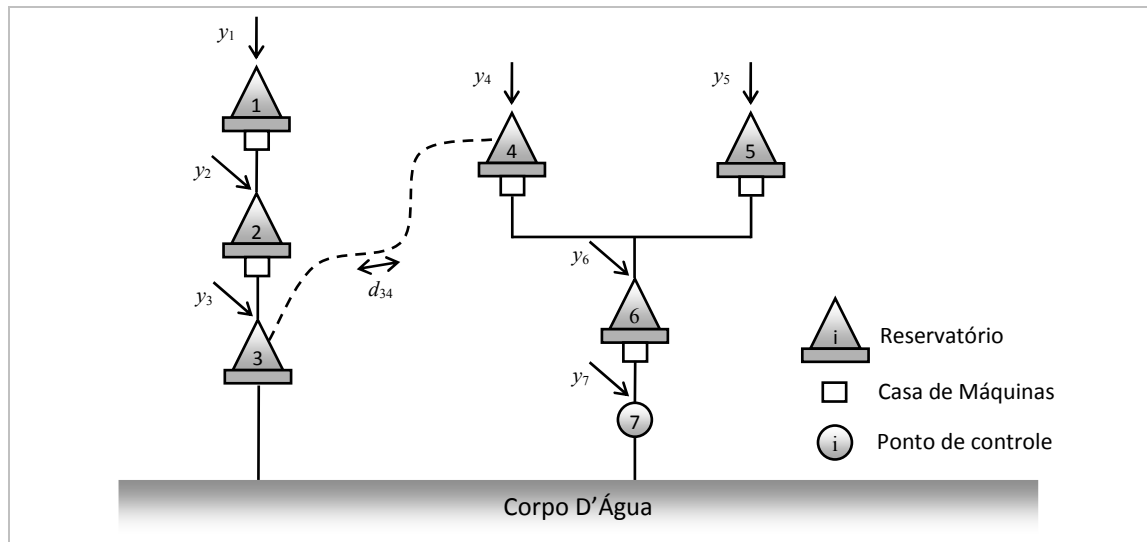


Figura 1. Representação geral da variável de desvio.

A partir da equação de balanço de massas, apresenta-se a seguir a notação e os tipos de estruturas para a variável de desvio.

2.1 O Fluxo e sua Notação

A vazão de desvio possui uma notação simples, a qual descreve a ligação entre um aproveitamento de origem e outro de destino, conforme ilustrado na Figura 2.

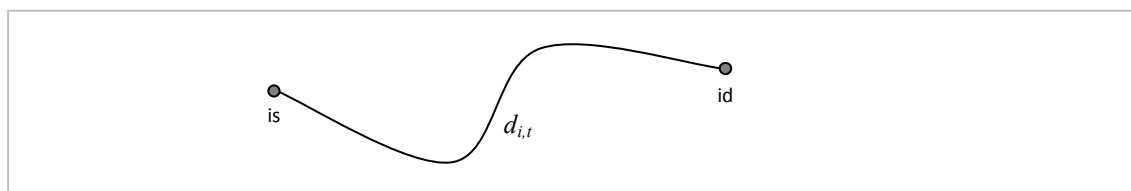


Figura 2. Ilustração da estrutura de índice para o fluxo de desvio.

Para a identificação do desvio, dentro do modelo de simulação, os aproveitamentos possuem uma indexação para referência de variáveis. Logo, a partir do sistema de índices do conjunto de aproveitamentos pertencentes a um estudo, a variável de desvio possui três identificações, considerando os índices de origem, destino e de propriedade entre dois aproveitamentos:

- is : índice do aproveitamento de origem (*source*).
- id : índice do aproveitamento de destino (*destiny*).
- io : índice do aproveitamento proprietário do cadastro (*owner*).



Logo, para a variável $d_{i,t}$ assumir valores diferentes de zero, há necessidade do simulador identificar na topologia de aproveitamentos aqueles que possuem o cadastro de desvio, utilizando os índices is e id como referência de consulta. O valor da vazão de desvio será determinado pelo tipo, conforme será apresentado na próxima subseção.

O índice de propriedade, sempre igual a is ou id , merece uma observação. Como uma estrutura de desvio liga dois aproveitamentos identificados como origem e destino do fluxo, um terceiro índice é necessário para identificar qual dos dois possui a propriedade de cadastro do desvio. Assim, pode-se estabelecer que o cálculo da variável de desvio, durante o processamento da topologia dos aproveitamentos pelos modelos do HydroExpert, começa pelo aproveitamento de índice io , mesmo que este não seja o de origem do desvio (is).

Convenção de Sinais

A variável de desvio é definida como $d_{i,t}$ e terá a seguinte convenção se sinais:

- $d_{i,t} > 0$: o desvio representa uma retirada do aproveitamento i .
- $d_{i,t} < 0$: o desvio representa uma entrada no aproveitamento i .

O fluxo ainda pode ser classificado como unidirecional, no sentido da origem para o destino, fixando os sinais das vazões conforme a notação apresentada na Equação 3.

$$\begin{aligned} d_{is,t} &\geq 0 \\ d_{id,t} &\leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

No caso de fluxo bidirecional, o sentido é determinado pelo sinal da vazão em desvio, ou seja, pode-se criar um fluxo com sentido do destino para a origem, invertendo-se os sinais da Equação 3.

2.2 Multiplicidade

O modelo permite que um aproveitamento possua uma ou mais estruturas de desvio com outros aproveitamentos. Desta forma, a variável $d_{i,t}$ representa o cálculo resultante das componentes de cada estrutura de desvio.

O cálculo da vazão de desvio resultante para aproveitamentos com uma ou mais ligações com outros aproveitamentos pode ser determinado pela Equação 4 a seguir.

$$d_{i,t} = \sum_{k \in \Lambda_i} d_{k,t} - \sum_{k \in \Gamma_i} d_{k,t} \quad (4)$$

sendo:

Λ_i conjunto de índices das estruturas de desvio com destino no aproveitamento i .



Γ_i conjunto de índices das estruturas de desvio com origem no aproveitamento i .

A multiplicidade de desvios é importante para situações de bombeamento, nas quais um aproveitamento recebe uma vazão bombeada de outro reservatório e também bombeia vazão para um terceiro reservatório. Este é o caso, por exemplo, do RES Santana localizado no Rio Pirai, o qual recebe uma vazão bombeada da UEL Santa Cecília (Rio Paraíba do Sul) e também tem uma vazão bombeada para o RES Vigário (Ribeirão das Lajes).

2.3 Tipos

O modelo permite representar quatro tipos de desvios entre reservatórios, sendo que o último deles, o tipo Vínculo, abre um conjunto maior de possibilidades, conforme descrição a seguir.

1. **Canal:** a vazão de desvio entre dois reservatórios governado por uma regra hidráulica que determina a vazão e o sentido do fluxo em função da carga hidráulica e da maior conta do nível d'água. Um exemplo disponível no SIN é o Canal Pereira Barreto, entre a UHE Ilha Solteira e a UHE Três irmãos.
2. **Túnel:** a vazão de desvio entre dois reservatórios governado por uma regra hidráulica que determina a vazão em função apenas da carga hidráulica, seguindo o princípio físico de *vasos comunicantes*. Um exemplo disponível no SIN é o túnel entre a UHE Segredo (Rio Iguaçu) e o RES Jordão (Rio Jordão).
3. **Bombeamento:** a vazão de desvio entre dois reservatórios, a qual é determinada como um dado de entrada, fornecido pelo usuário do modelo. Neste caso pode-se cadastrar um limite máximo para o fluxo, não existindo uma regra hidráulica para o mesmo.
4. **Vínculo:** a vazão de desvio assume o valor de outra variável de operação, na origem ou no destino. Por exemplo, pode-se desviar a vazão vertida do reservatório para outro aproveitamento, fazendo um vínculo do desvio com o vertimento na origem. Da mesma forma, pode-se vincular o desvio à vazão afluyente no destino para situações nas quais um aproveitamento seja uma segunda casa de máquinas de um reservatório.

Na próxima subseção será apresentado o modelo de cálculo de vazão para os tipos Canal e Túnel, os quais envolvem o emprego de uma regra hidráulica.

2.4 Regra de Desvio

A vazão de desvio pode seguir uma regra de cálculo ou de formação, normalmente relacionada à hidráulica de canais ou de túneis. De forma geral, a regra hidráulica para a vazão de desvio será representada pelas equações (5) a (7):

$$|d_{i,t}| = D_i(h_{i,t}, z_{i,t}^m) \quad (5)$$

Sendo a carga hidráulica $h_{i,t}$ é uma função das cotas dos níveis d'água dos reservatórios de origem e destino da estrutura de desvio:

$$h_{i,t} = |z_{is,t} - z_{id,t}| \quad (6)$$



A maior cota entre a origem e o destino é opcional, normalmente necessária para o cálculo da vazão em canais.

$$z_{i,t}^m = \max\{z_{is,t}, z_{id,t}\} \quad (7)$$

Mesmo que não estiver presente na função, o maior valor entre as cotas também determina o sentido do fluxo, caso não seja configurado como unidirecional, conforme a Equação 8.

$$\begin{aligned} z_{is,t} > z_{id,t} &\rightarrow d_{is,t} > 0 \\ z_{is,t} < z_{id,t} &\rightarrow d_{is,t} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

A função D_i será determinada de forma discreta pela matriz F_i com os seguintes limites para as linhas e colunas, sendo N_h e N_z o número de linhas e colunas, respectivamente:

$$D_i(h, z) = F_i = [f_{r,c}] \quad (9)$$

$$h^{\min} \leq h_r \leq h^{\max} \quad 0 \leq r \leq N_h - 1 \quad (10)$$

$$z^{\min} \leq z_c \leq z^{\max} \quad 0 \leq c \leq N_z - 1 \quad (11)$$

Alguns exemplos para a matriz serão apresentados na subseção de Estudos de Caso.

2.5 Desvios como Variáveis Independentes

Quando não houver regra de cálculo para a vazão, ou seja, quando a vazão de desvio for caracterizada como uma decisão ou dado de entrada do modelo de simulação, a vazão em desvio será determinada por valores fornecidos como entrada de dados:

$$d_{i,t} = b_{i,t} \quad (12)$$

No HydroExpert, a entrada de dados estará disponível na aba “Dados > Avançado > Contorno > Desvio”, respeitando o tamanho e discretização do horizonte do estudo.

2.6 Vínculos de Variáveis

A opção de vínculo de variáveis à variável de desvio permite a construção de alguns casos especiais nos quais a vazão em desvio está associada a alguma particularidade do arranjo espacial dos aproveitamentos. De forma geral, quando o desvio é cadastrado como vínculo de variáveis, no aproveitamento de origem ou de destino, pode-se escolher uma variável de operação para que a mesma determine o valor da vazão de desvio. Uma ilustração com um arranjo geral destas possibilidades está apresentada na Figura 3.

Algumas regras são implícitas ao tipo de desvio por vínculo:

1. O fluxo é unidirecional, da origem (*is*) para o destino (*id*).



2. Não é permitido um vínculo na origem e no destino ao mesmo tempo.
3. Na origem, a variável de vínculo tem seu valor anulado depois de copiado para a variável de desvio.

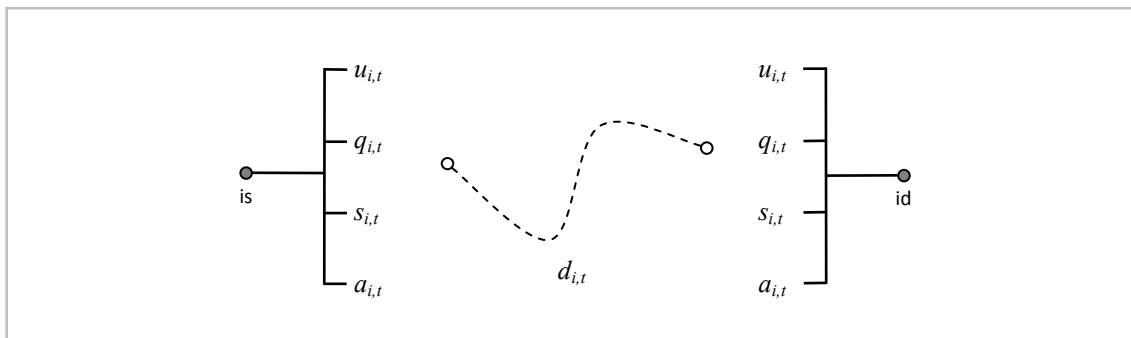


Figura 3. Ilustração das opções de vínculos de variáveis para o fluxo de desvio.

As variáveis passíveis de vínculo com a variável de desvio são:

- Vazão defluente.
- Vazão turbinada.
- Vazão vertida.
- Vazão afluenta.

Associação de valores

Quando se cadastra um vínculo, a variável escolhida $x_{i,t}$ tem seu valor copiado para a variável de desvio $d_{i,t}$. Quando o vínculo ocorre na origem, a variável escolhida também tem seu valor anulado para o correto cálculo do balanço de massas no aproveitamento de origem. Este comportamento é resumido na Equação 13, a seguir.

$$\begin{cases} d_{i,t} = x_{i,t} \\ x_{i,t} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Quando o vínculo ocorre no destino, a variável escolhida tem seu valor preservado e então copiado para a variável de desvio.

Variáveis e Topologia

Os modelos do HydroExpert possuem estruturas de dados que representam a topologia dos aproveitamentos selecionados do estudo. A topologia determina a ordem de processamento dos aproveitamentos, mesmo que dentro de um processo iterativo.

O cálculo do vínculo só será efetivo caso a variável utilizada para fornecer valores para o desvio esteja calculada no momento da associação.



Logo, existem situações nas quais o cálculo do vínculo pode exigir uma antecipação do cálculo de balanço no aproveitamento de origem ou destino. As duas situações especiais de antecipação podem ser descritas pelas seguintes regras:

1. **SE** (Vínculo = Origem) **E** ($is > id$) **ENTÃO** CalcularBalanço(is).

2. **SE** (Vínculo = Destino) **E** ($is < id$) **ENTÃO** CalcularBalanço(id).

Considerando a topologia dos aproveitamentos no estudo, note na Regra 1 o teste ($is > id$) representa a situação na qual o aproveitamento de índice is terá seu cálculo de balanço realizado depois do aproveitamento de índice id . A Regra 2 seria a situação inversa.

Como exemplo de aplicação das regras, há o caso do Complexo Belo Monte, o qual será apresentado na próxima seção. Neste, o reservatório de Belo Monte Pimental ($io = is = 1$) tem seu cálculo de balanço de massas realizado antes do reservatório de Belo Monte ($id = 2$), mas a variável de desvio tem como vínculo de destino a vazão turbinada na casa de máquinas de Belo Monte. Logo, para o correto balanço de massas em Belo Monte Pimental, é necessário aplicar a Regra 2, antecipando o balanço do reservatório Belo Monte.

Vale lembrar que essas regras criam um automatismo no cálculo das variáveis de desvio, evitando situações nas quais o usuário teria que fornecer como entrada de dados as trajetórias de vazões de desvio.

Na seção de Estudos de Caso serão apresentados mais exemplos demonstrando o uso de vínculos para a variável de desvio.



3 Estudos de Caso

Com a formulação matemática apresentada anteriormente, descrevem-se alguns estudos de caso com cadastro no HydroData XP e disponíveis para simulação no HydroExpert.

3.1 Canal Pereira Barreto

No Canal Pereira Barreto, a vazão de desvio entre as UHE Ilha Solteira (Rio Paraná) e Três irmãos (Rio Tietê) segue uma regra hidráulica, de fluxo bidirecional, conforme determinado nas equações (5) a (7). Uma ilustração da configuração espacial e da topologia de simulação dos aproveitamentos está disponível na Figura 4.

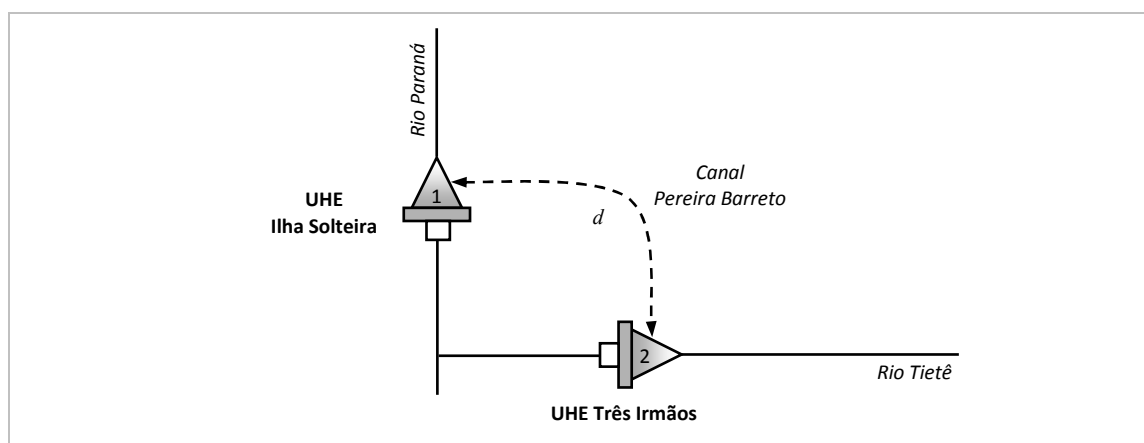


Figura 4. Esquema da topologia do Canal Pereira Barreto.

Para ilustração da descrição da função de transferência no Canal Pereira Barreto, apresenta-se na Figura 5 o arquivo “62020080-62900080.txt” disponível na pasta “<ProgramData>\HydroByte Software\Database\Desv” do sistema HydroExpert.

```
// VAZÕES TRANSFERIDAS NO CANAL PEREIRA BARRETO.
// Vazão [m³/s] dada como função do desnível [m]
// entre os reservatórios de Ilha Solteira e Três Irmãos,
// e do cota [m] do reservatório com maior nível d'água.
// Cada terno (desnível, nível, vazão) possui uma classificação
// da vazão em função de restrições operativas e de navegação.
// [0/0] = operação normal,
// [0/1] = nível fora da faixa operativa normal,
// [0/2] = velocidade excessiva para a navegação (Acima de 2.0 m/s).
[TVAZ]
0.00 323.00 323.50 324.00 324.50 325.00 325.50 326.00 326.50 327.00
0.01 0/1 0/0 0/0 0/0 0/0 0/0 0/0 0/0 0/0
0.02 52/1 58/0 64/0 70/0 77/0 83/0 90/0 97/0 104/0
0.03 73/1 82/0 90/0 99/0 108/0 118/0 127/0 137/0 147/0
0.04 89/1 99/0 110/0 121/0 132/0 144/0 156/0 168/0 181/0
0.05 115/1 128/0 142/0 156/0 170/0 185/0 201/0 217/0 234/0
0.07 136/1 151/0 167/0 184/0 201/0 219/0 237/0 256/0 277/0
0.10 161/1 180/0 199/0 219/0 240/0 261/0 283/0 305/0 329/0
0.15 196/1 219/0 243/0 267/0 292/0 318/0 344/0 372/0 403/0
0.20 225/1 251/0 278/0 306/0 335/0 365/0 396/0 427/0 461/0
0.25 250/1 279/0 309/0 341/0 373/0 406/0 440/0 475/0 513/0
0.30 272/1 304/0 337/0 371/0 406/0 442/0 480/0 518/0 559/0
0.35 292/1 326/0 361/0 398/0 436/0 475/0 515/0 557/0 601/0
0.40 310/1 346/0 384/0 423/0 464/0 505/0 548/0 592/0 639/0
0.45 326/1 365/0 405/0 446/0 489/0 533/0 579/0 625/0 674/0
0.50 341/1 382/0 424/0 468/0 513/0 559/0 607/0 656/0 706/0
0.60 369/1 413/0 459/0 506/0 555/0 606/0 658/0 711/0 766/0
0.70 393/1 440/0 489/0 540/0 593/0 647/0 703/0 761/0 821/0
0.80 414/1 464/0 517/0 571/0 627/0 685/0 744/0 805/0 868/0
```

Figura 5. Arquivo que descreve a função de vazão transferida no Canal Pereira Barreto.



3.2 Túnel Segredo-Jordão

Um túnel permite o desvio de vazões entre a UHE Segredo (Rio Iguaçu) e o RES Jordão (Rio Jordão), seguindo uma regra hidráulica, de fluxo bidirecional, conforme determinado nas equações (5) a (7). Uma ilustração da configuração espacial e da topologia de simulação desses reservatórios está disponível na Figura 6.

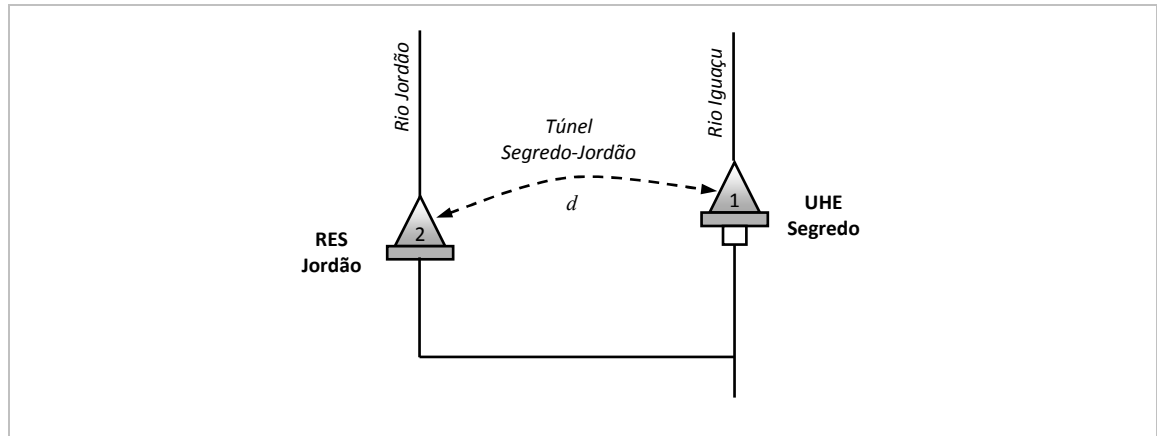


Figura 6. Esquema da topologia do Túnel Segredo-Jordão.

Para ilustração da descrição da função de transferência no Túnel, apresenta-se na o arquivo “65825580-65826600.txt” disponível na pasta “<ProgramData>\HydroByte Software\Database\Desv” do sistema HydroExpert.

```

65805010-65826600.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
// TÚNEL DE DERIVAÇÃO DO RESERVATÓRIO JORDÃO.
// Vazão [m³/s] dada como função do desnível (h) [m]
// entre o reservatório Jordão e o reservatório da
// UHE Segredo (UHE Gov. Ney Aminthas de Barros).
// A tabela a seguir apresenta a relação h [m] e Q [m³/s].
[TVAZ]
0
0.00 0.00
0.05 17.50
0.10 24.50
0.15 29.50
0.20 34.00
0.30 41.50
0.40 47.50
0.50 52.50
0.60 57.00
0.70 61.00
0.80 64.50
0.90 68.00
1.00 71.00
1.20 77.50
1.40 83.00
1.60 88.00
1.80 93.00
2.00 98.00
2.25 103.50
2.50 109.50
2.75 114.50
3.00 119.50

```

Figura 7. Arquivo que descreve a função de vazão transferida no Túnel Segredo-Jordão.

Vale observar que a vazão de desvio é função apenas da carga hidráulica h , dada em metros. Ou seja, o parâmetro associado à maior cota do nível d’água entre o aproveitamento de origem e destino é considerada nula no cálculo da vazão no Túnel.

$$z_{i,t}^m = 0 \quad (14)$$



No entanto, vale lembrar que a maior cota será utilizada para definir o sentido do fluxo, conforme já demonstrado na Equação 8.

3.3 Foz do Chapecó

A UHE Foz do Chapecó possui uma operação que exige o cadastro de uma estrutura de desvio por vínculo para a correta simulação de sua operação. Conforme ilustração apresentada na Figura 8, a configuração do reservatório e da casa de máquinas faz o uso racional da configuração espacial do Rio Uruguai, próximo a sua confluência com o Rio Chapecó. Nota-se que o reservatório faz o barramento do Rio Uruguai de forma a separar a casa de máquinas das vazões descarregadas imediatamente à jusante da barragem, as quais são possíveis via vertimento s_1 . Logo após a confluência com o Rio Chapecó, existe um Ponto de Controle com uma restrição de vazão mínima, a qual é computada pela soma do vertimento s_1 na UHE Foz do Chapecó, caso exista, e da vazão defluente u_2 da UHE Quebra-Queixo no Rio Chapecó.

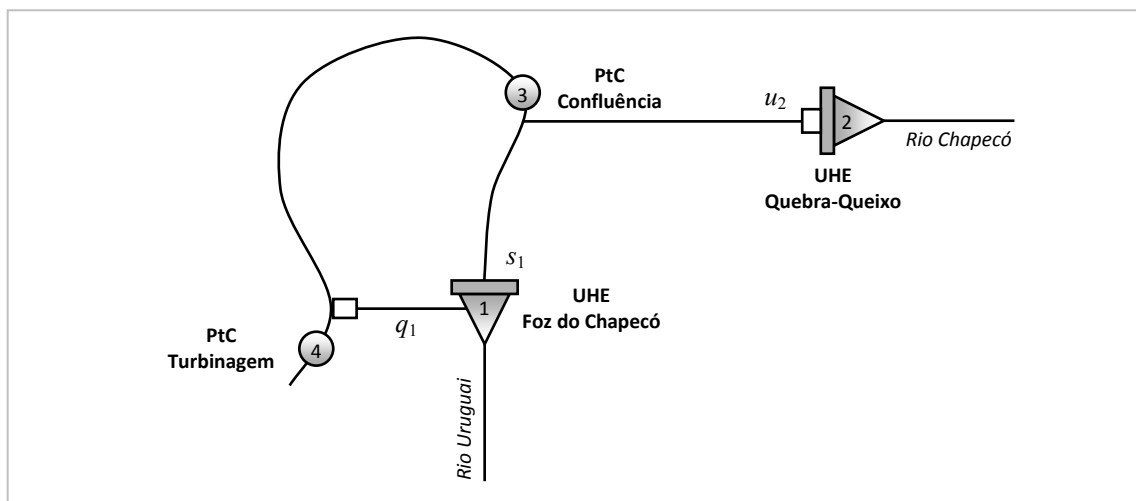


Figura 8. Ilustração da configuração espacial e de desvio para a UHE Chapecó.

Uma forma de cadastrar esta configuração é por meio de um desvio unidirecional com vínculo na origem para a variável de vertimento e destino no Ponto de Controle 3. Além disso, o Ponto de Controle 3, imediatamente a jusante da confluência do Rio Chapecó com o Rio Uruguai, deve ser posicionado na topologia como um elemento que antecede a vazão turbinada nesta usina. Um diagrama dessa topologia é apresentado na Figura 9.

Note-se que o Ponto de Controle 3, embora realmente localizado no Rio Uruguai, aparece na ilustração da Figura 9 como um elemento localizado no Rio Chapecó, sem prejuízos à representação real dos aproveitamentos.

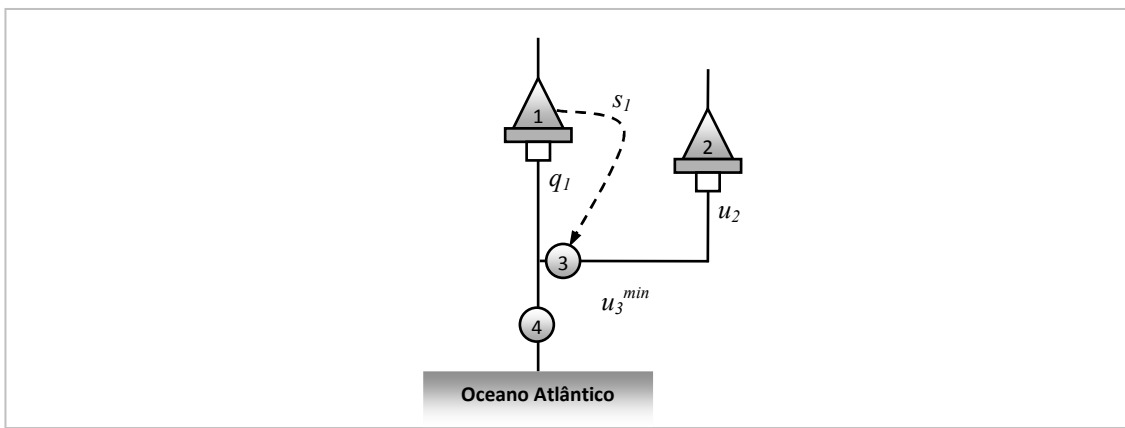


Figura 9. Ilustração das opções de topologia para a UHE Chapecó.

No Quadro 1 a seguir, apresentam-se as configurações do desvio do tipo vínculo para a UHE Foz do Chapecó.

Quadro 1. Configuração de desvio por vínculo para a UHE Foz do Chapecó.

io	is	id	Tipo	Vínculo		Unidir.	Limite
				Origem	Destino		
3	1	3	4 {Vínculo}	Vert.	-	1	-

Note-se que o índice de propriedade, sendo igual ao de destino, combinado com o vínculo na origem, não exige a antecipação do cálculo do balanço no destino, conforme apresentado na subseção 2.6 Vínculos de Variáveis.

3.4 Moxotó – Paulo Afonso 4

A UHE Paulo Afonso 4 (Rio São Francisco) possui uma configuração operativa interessante, pois em termos práticos esta usina pode ser considerada uma segunda casa de máquinas do reservatório da UHE Moxotó. Uma ilustração da configuração espacial e da topologia das UHE Moxotó, Paulo Afonso 123 e 4 é apresentada na Figura 10.

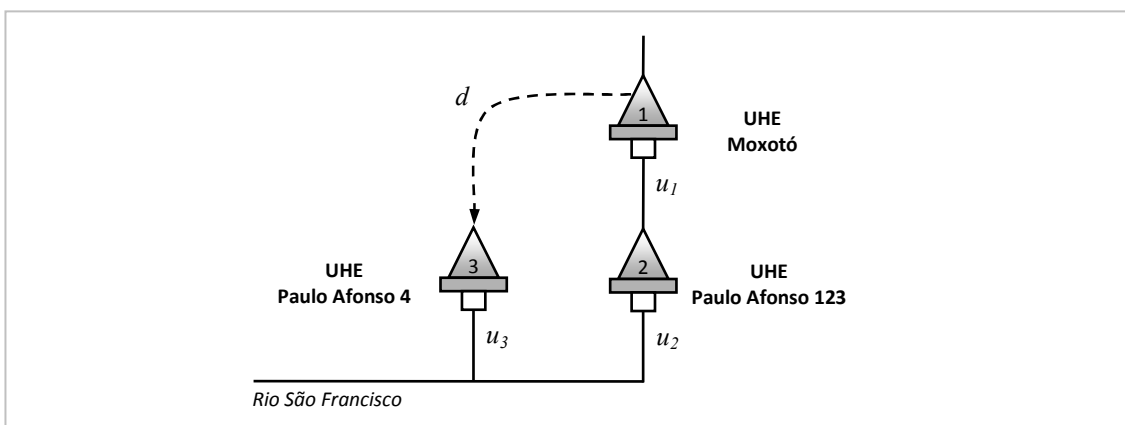


Figura 10. Ilustração da topologia das UHE Moxotó e Paulo Afonso 123 e 4.



A capacidade de regularização do pequeno reservatório da UHE Paulo Afonso 4 pode ser considerada nula em termos operativos, mesmo para horizontes de discretização horária. Por este motivo, a vazão defluente neste aproveitamento deve ser suprida pelo reservatório da UHE Moxotó, o que pode ser modelado como uma vazão desvio.

No Quadro 2 a seguir, apresentam-se as configurações do desvio do tipo vínculo para as UHE Moxotó e Paulo Afonso 4.

Quadro 2. Configuração de desvio por vínculo para as UHE Moxotó e Paulo Afonso 4.

io	is	id	Tipo	Vínculo		Unidir.	Limite
				Origem	Destino		
1	1	3	4 {Vínculo}	-	Deflu.	1	-

Note-se que o índice de propriedade, sendo igual ao de origem, combinado com o vínculo no destino, implica na antecipação do cálculo do balanço no destino, seguindo a Regra 2 apresentada na subseção 2.6 Vínculos de Variáveis.

3.5 Belo Monte

O complexo Belo Monte é formado por dois reservatórios. O primeiro é o reservatório formado pela calha natural do Rio Xingu, denominado aqui de Sítio Pimental, possui uma casa de máquinas com 6 turbinas Bulbo e um vertedouro. O segundo é um reservatório artificial denominado aqui de Belo Monte, no qual encontram-se a casa de máquinas principal com 18 turbinas Francis. O reservatório artificial, também chamado de interno, é alimentado por um canal de 20 km a partir do reservatório do Sítio Pimental, conforme ilustrado na Figura 11.

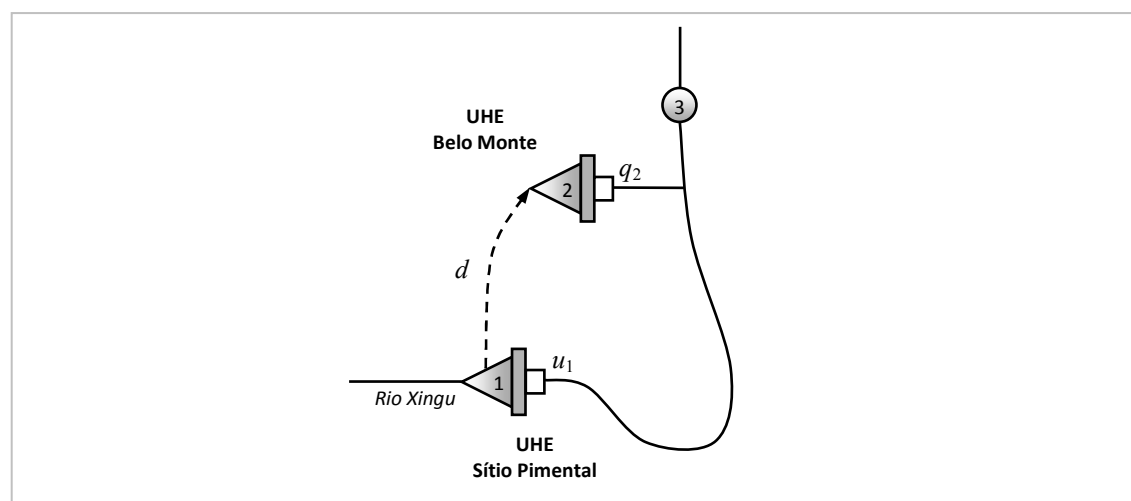


Figura 11. Ilustração da configuração espacial e de desvio para a UHE Belo Monte.



Uma forma de modelar o problema é por meio de um desvio entre os reservatórios, tendo como vínculo da vazão turbinada na UHE Belo Monte, uma vez seu reservatório artificial não possui vertedouro.

No Quadro 3 a seguir, apresentam-se as configurações do desvio do tipo vínculo para a UHE Belo Monte.

Quadro 3. Configuração de desvio por vínculo para a UHE Belo Monte.

io	is	id	Tipo	Vínculo		Unidir.	Limite
				Origem	Destino		
1	1	2	4 {Vínculo}	-	Turb.	1	-

Note-se que o índice de propriedade, sendo igual ao de origem, combinado com o vínculo no destino, implica na antecipação do cálculo do balanço no destino, seguindo a Regra 2 apresentada na subseção 2.6 Vínculos de Variáveis.

3.6 Paraíba do Sul

Em se tratando do SIN, o sistema de aproveitamentos do Paraíba do Sul, englobando os rios Paraíba do Sul, Pirai e Ribeirão das Lajes, é um desafio para qualquer sistema de simulação da operação hidráulica de usinas e reservatórios.

Desvios

Os desvios existentes no sistema são os seguintes:

1. Bombeamento: UEL Santa Cecília → RES Santana.
2. Túnel: RES Tocos → UHE Fontes-Lajes (Fictícia).
3. Bombeamento: RES Vigário → UHE Fontes-Vigário (Fictícia).
4. Bombeamento: RES Santana → RES Vigário.
5. Desvio: PCH Anta → UHE Simplício.

Em versões futuras deste manual deve-se ilustrar o estudo de demonstração dos aproveitamentos da bacia do Rio Paraíba do Sul com dados reais de operação.

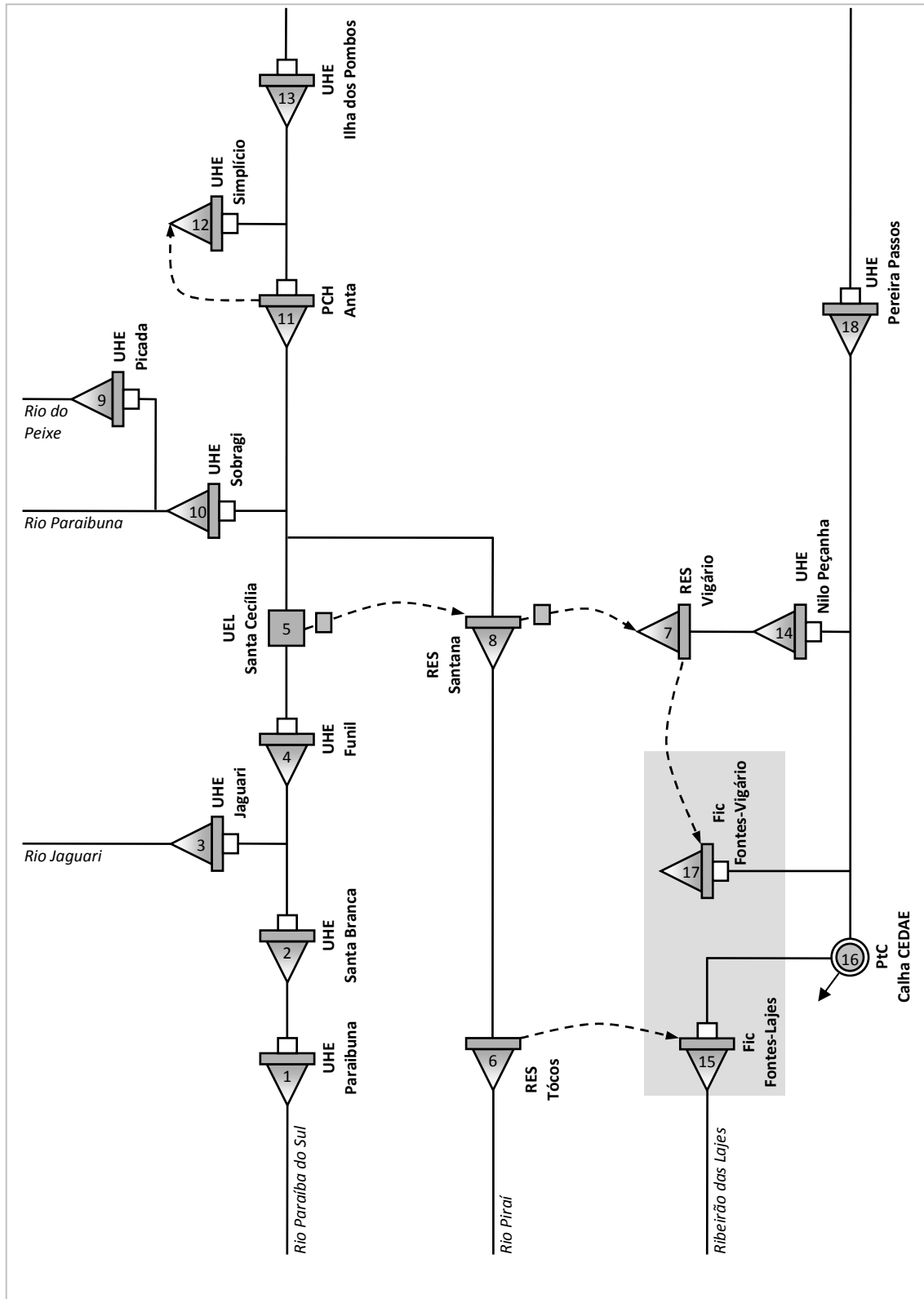


Figura 12. Diagrama de topologia dos aproveitamentos do sistema Rio Paraíba do Sul.



3.7 Cadastro dos Exemplos

Apresentam-se no Quadro 4 a seguir as configurações básicas das estruturas de desvio contidas nos exemplos apresentados anteriormente nesta seção.

Quadro 4. Demonstração de cadastro das estruturas de desvio apresentadas como exemplos.

Desvios	io	is	id	Tipo	Vínculo		Unidir.	Limite
					Origem	Destino		
3.1	1	1	2	1 {Canal}	-	-	0	1803
3.2	2	2	1	2 {Túnel}	-	-	0	250
3.3	3	1	3	4 {Vínculo}	Vert.	-	1	-
3.4	1	1	3	4 {Vínculo}	-	Deflu.	1	-
3.5	1	1	2	4 {Vínculo}	-	Turb.	1	-
3.6	5	5	8	3 {Bomb.}	-	-	1	160
	6	6	15	2 {Túnel}	-	-	1	25
	7	7	17	3 {Bomb.}	-	-	1	34
	8	8	7	3 {Bomb.}	-	-	1	198
	11	11	12	4 {Vínculo}	-	Deflu.	1	-



4 Interface dos Dados de Desvios

No Sistema HydroExpert, o modelo de representação das estruturas de desvio de vazões entre reservatórios, de acordo com o modelo apresentado na seção anterior, está presente no banco de dados HydroData XP para cadastro, inserção e edição dos desvios e no HydroSim XP, modelo de simulação do HydroExpert, para o cálculo da vazão de desvio entre aproveitamentos.

4.1 Cadastro HydroData XP

No HydroData XP, o cadastro de estruturas de desvio está disponível na aba que tem o mesmo nome, como pode ser verificado na Figura 13.

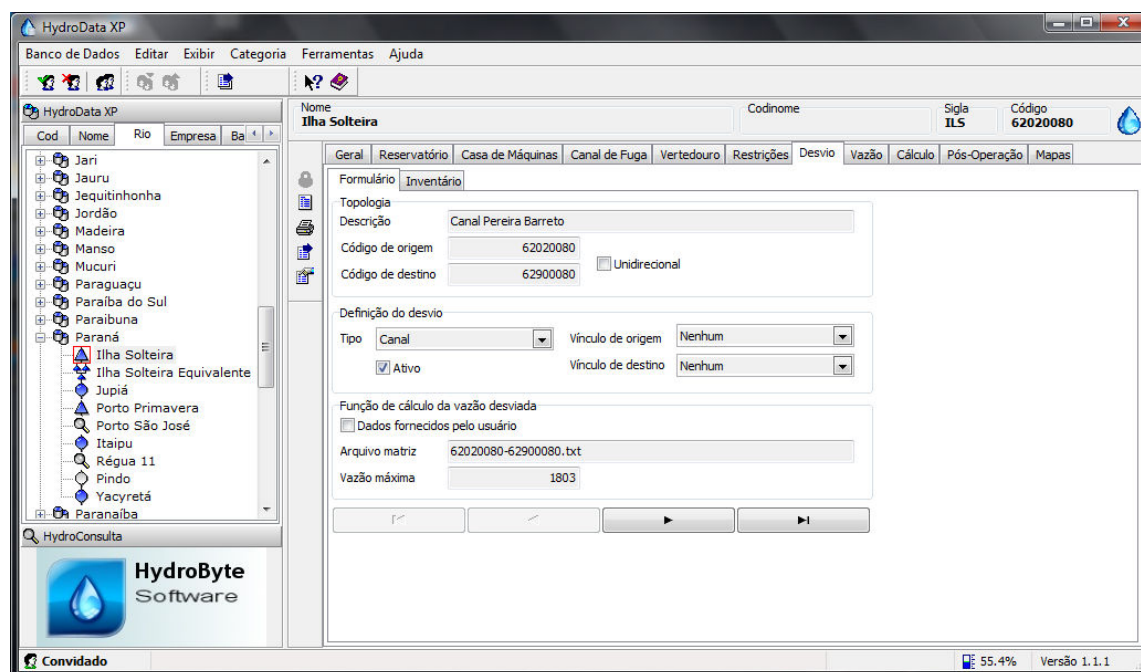


Figura 13. Interface de cadastro e edição de dados de desvio no HydroData XP. Exemplo do cadastro do Canal Pereira Barreto, entre as UHE Ilha Solteira e Três Irmãos.

Na Figura 13, nota-se na aba “Formulário” os dados de cadastro das estruturas de desvio, para as quais possuem a seguinte descrição.

Quadro “Topologia”

- **Descrição:** caixa de edição para informar um texto descritivo da estrutura de desvio. Este texto será utilizado na identificação da estrutura nos modelos do HydroExpert.
- **Código de origem:** código do aproveitamento associado à origem do desvio.
- **Código de destino:** código do aproveitamento associado ao destino do desvio.
- **Unidirecional:** caixa de seleção para informar se o fluxo entre a origem e destino é, ou não, unidirecional.



Quadro “Definição do Desvio”

- **Tipo:** tipo da estrutura de desvio: Canal, Túnel, Bombeamento ou Vínculo.
- **Ativo:** caixa de seleção para informar se a estrutura possui fluxo ativo, ou não, para a vazão de desvio. Esta propriedade será importante nos modelos do HydroExpert para determinar se o cálculo da vazão de desvio da estrutura está ou não ativo.
- **Vínculo de origem:** tipo do vínculo associado ao aproveitamento de origem: Nenhum, Defluência, Turbinagem, Vertimento e Afluência. Para mais detalhes, veja a subseção 2.6, Vínculos de Variáveis.
- **Vínculo de destino:** tipo do vínculo associado ao aproveitamento de destino do desvio.

Quadro “Função de cálculo da vazão desviada”

- **Dados fornecidos pelo usuário:** caixa de seleção para informar se a estrutura de desvio possuirá dados fornecidos pelo usuário na interface dos modelos do HydroExpert. Se estiver desmarcada, deve-se fornecer dados da função de cálculo, conforme os campos a seguir.
- **Arquivo matriz:** nome do arquivo contendo os dados da matriz de cálculo da vazão de desvio. A pasta de armazenamento deve ser a contida em “<ProgramData>\HydroByte Software\Database\Desv”. Para mais detalhes, veja a subseção 2.4, Regra de Desvio.
- **Vazão máxima:** caixa de texto para se informar um limite máximo, caso exista, para a vazão de desvio.

A aba “Inventário” é útil para se analisar aproveitamentos associados a mais de uma estrutura de desvio como, por exemplo, o RES Santana localizado no Rio Piraí. Este exemplo está apresentado na Figura 14, a seguir.

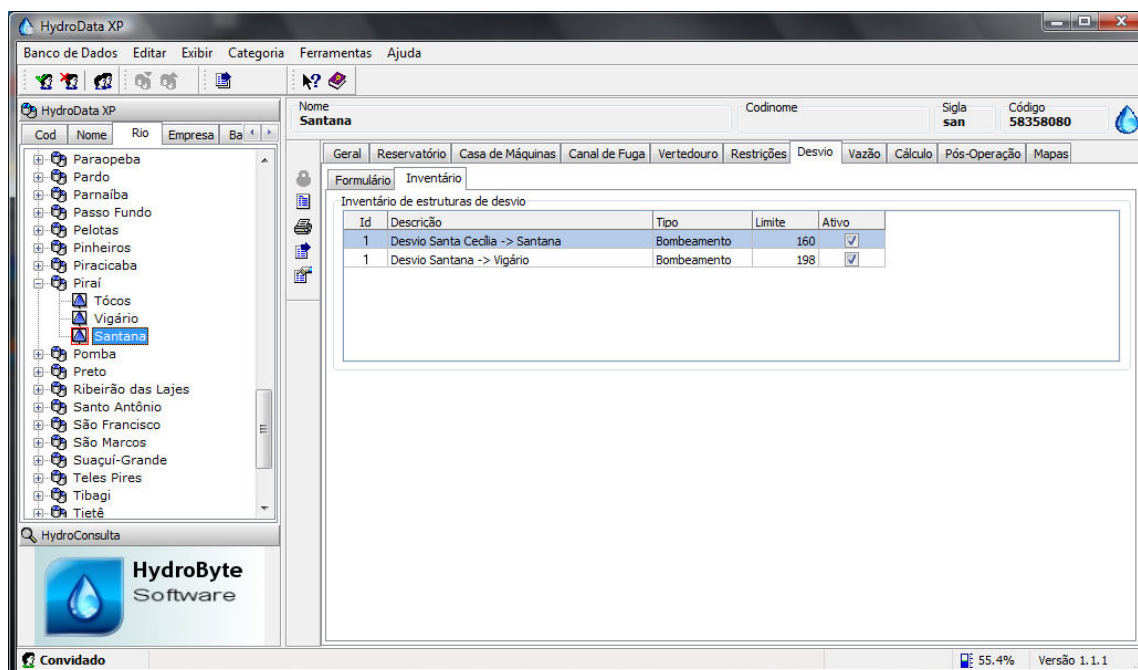


Figura 14. Exemplo da interface de cadastro e edição de dados de desvio no banco de dados HydroData XP para aproveitamentos relacionados a mais de uma estrutura de desvio. Exemplo para o RES Santana, Rio Piraí.



4.2 Cálculos no HydroExpert

No Sistema HydroExpert o cálculo da vazão de desvio dos aproveitamentos está embutido dentro do modelo de operação de aproveitamentos hidrelétricos, do qual o HydroSim XP é derivado.

Para ilustração dos recursos de simulação de vazões de desvio entre aproveitamentos, pode-se utilizar os estudos de demonstração que a HydroByte Software disponibiliza nas distribuições *freeware* do HydroExpert.

No estudo “Demo CESP”, pode-se verificar o cálculo da vazão de desvio no Canal Pereira Barreto entre as UHE Ilha Solteira (Rio Paraná) e Três Irmãos (Rio Tietê), sendo que a regra de cálculo dessa vazão foi apresentada na subseção 3.1. Neste estudo podemos verificar a vazão de desvio na aba “Resultados > Por usina > Desvio”, conforme demonstrado na Figura 15.

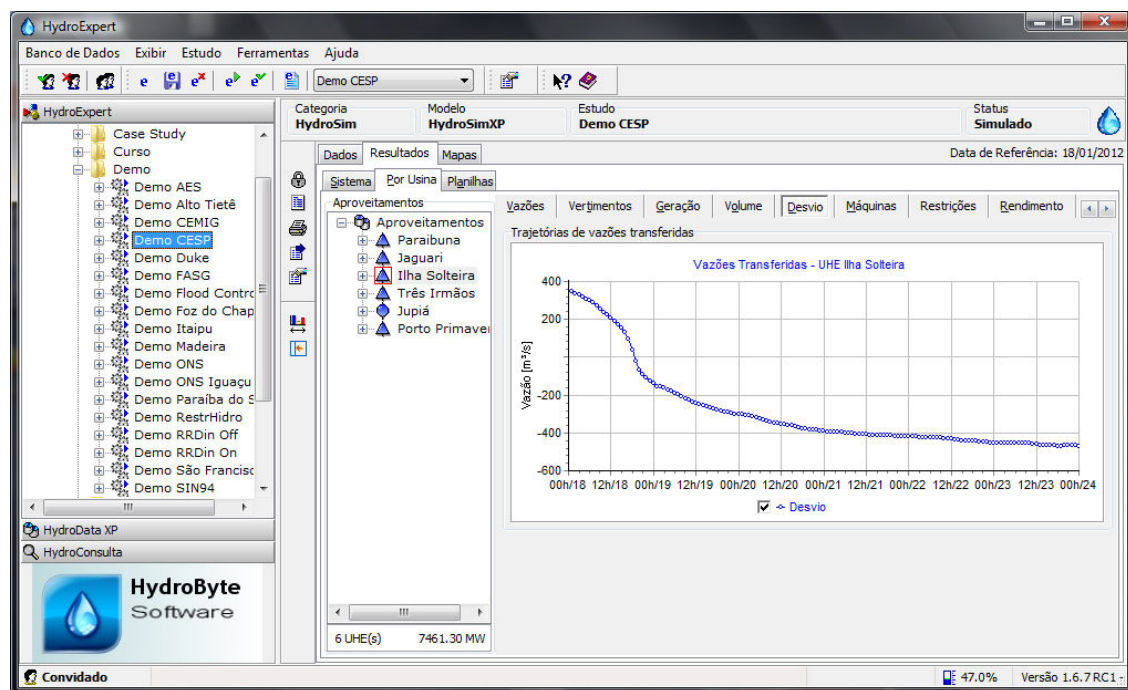


Figura 15. Interface do HydroExpert demonstrando os resultados da vazão calculada de desvio pelo Canal Pereira Barreto entre as UHE Ilha Solteira e Três Irmãos.

No exemplo das vazões de desvio no Canal Pereira Barreto, a estrutura de desvio possui uma regra de cálculo da vazão, conforme apresentado no modelo da subseção 2.4, Regra de Desvio, e exemplo apresentado na subseção 3.1. Esta regra é função da cota do nível d’água dos reservatórios e o HydroExpert permite traçar essas trajetórias, o que facilita o entendimento do sinal das vazões de desvio. Na Figura 16 são apresentadas as trajetórias de cota do nível d’água (NA) associada ao armazenamento dos reservatórios. Nota-se que nos primeiros



intervalos, o NA de Ilha Solteira está acima do de Três irmãos, confirmando o sinal negativo da vazão de desvio de Ilha Solteira (origem) nos primeiros intervalos apresentados na Figura 15.

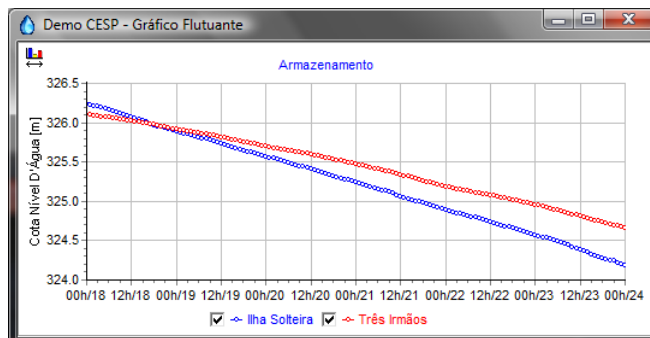


Figura 16. Trajetórias de cota do nível d'água associadas ao armazenamento das UHE Ilha Solteira e Três Irmãos.

Vale destacar que para o caso de estruturas de desvio com regras para o cálculo da vazão, o HydroExpert, automaticamente, não apresentará a aba “Dados > Avançado > Contorno > Desvio”, uma vez que o cálculo da vazão segue uma regra que é função das cotas dos níveis d'água dos reservatórios adjacentes a estrutura. Para o estudo “Demo CESP”, este comportamento da interface é ilustrado na Figura 17.

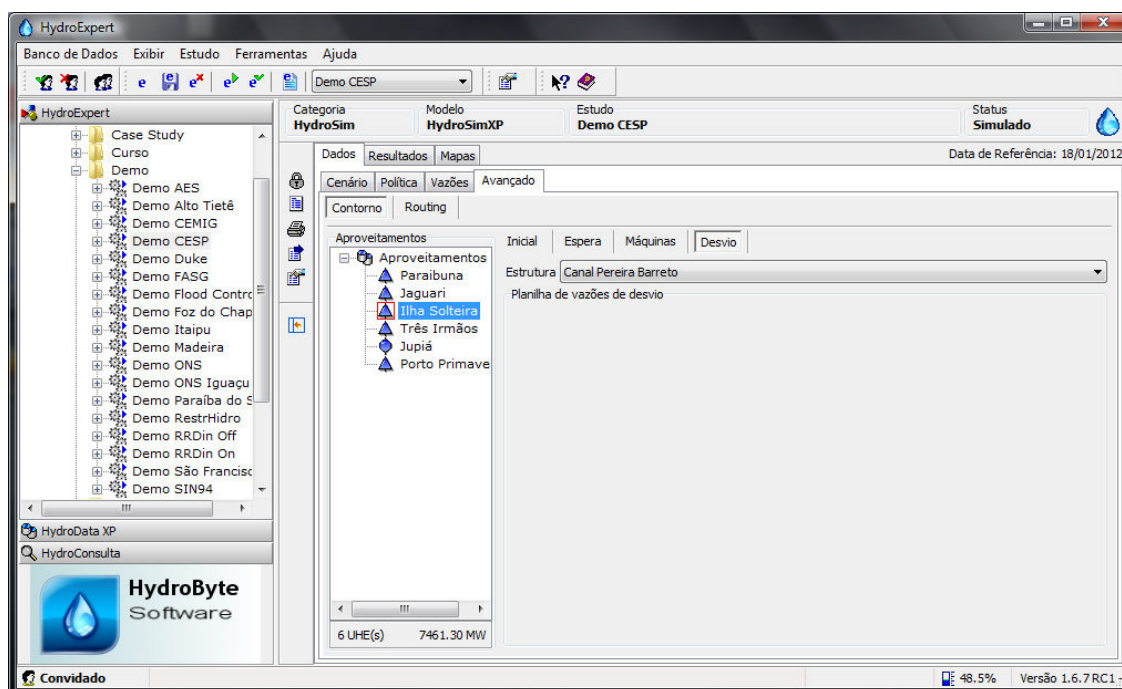


Figura 17. Interface do HydroExpert que suprime a entrada de dados para aproveitamentos com estruturas de desvio que possuam regras de cálculo da vazão.

Para ilustrar as estruturas de desvio que necessitam de dados fornecidos pelo usuário, a HydroByte criou um estudo para os aproveitamentos pertencentes à bacia do Rio Paraíba do Sul, reconhecido pela dificuldade de modelagem e implementação em termos de desvio de



vazões por bombeamento e de túneis. Na Figura 18, verifica-se a interface de entrada de dados para a vazão de desvio por bombeamento entre os reservatórios Santana e Vigário (origem e destino, respectivamente). Os valores negativos demonstram a retirada de vazões na origem, sendo esta o RES Santana.

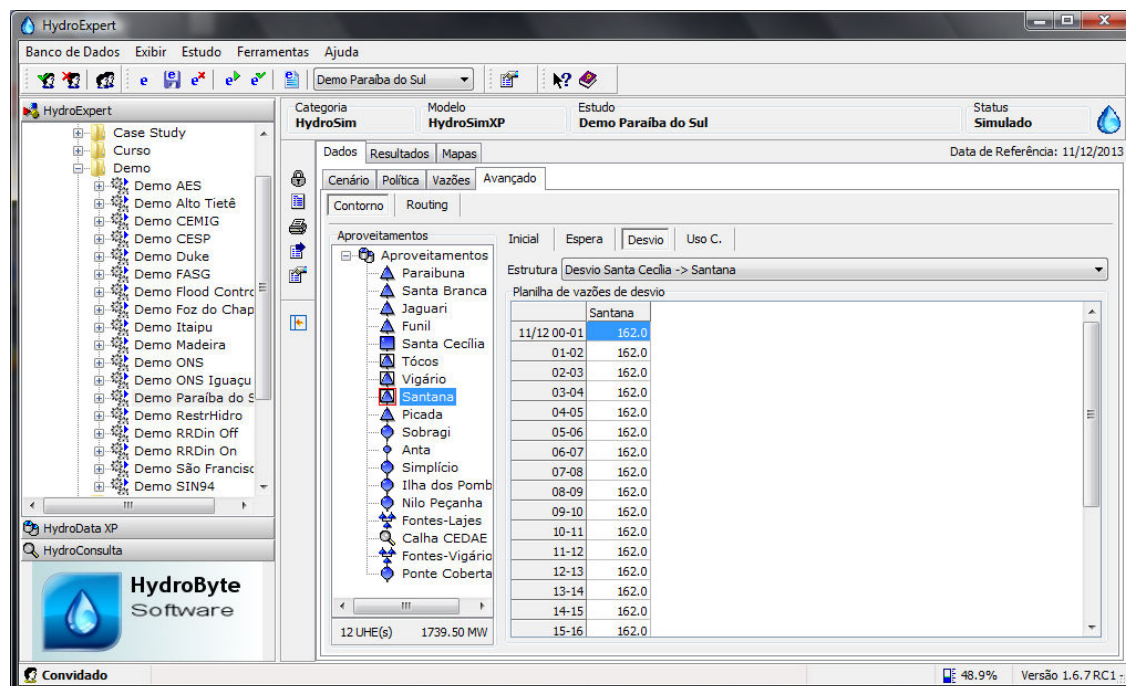


Figura 18. Interface do HydroExpert demonstrando a entrada de dados de vazão de desvio por bombeamento entre os RES Santana e Vigário, origem e destino do desvio, respectivamente.

Vale ressaltar que as vazões associadas ao uso múltiplo ou consuntivo dos reservatórios não precisam ser cadastradas e simuladas como estruturas de desvio. Por exemplo, ainda no estudo de demonstração da simulação dos aproveitamentos do Rio Paraíba do Sul, ilustra-se na Figura 19 a entrada de dados de uso consuntivo para o ponto de controle Calha CEDAE, representando a retirada de água da bacia para abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.



The screenshot shows the HydroExpert software interface. The main window displays the 'Vazões' (Flows) tab for the 'Calha CEDAE' structure. The interface includes a menu bar (Banco de Dados, Exibir, Estudo, Ferramentas, Ajuda), a toolbar, and a status bar. The left sidebar shows a project tree with 'HydroSimXP' selected. The main area is divided into 'Dados', 'Resultados', and 'Mapas' tabs. The 'Dados' tab is active, showing a tree view of 'Aproveitamentos' (Reservoirs) and a table of 'Planilha de vazões associadas ao uso consuntivo' (Consumptive use associated flow sheet).

Inicial/Limite	Uso C.
11/12 00-01	5,5
01-02	5,5
02-03	5,5
03-04	5,5
04-05	5,5
05-06	5,5
06-07	5,5
07-08	5,5
08-09	5,5
09-10	5,5
10-11	5,5
11-12	5,5
12-13	5,5
13-14	5,5
14-15	5,5
15-16	5,5

Figura 19. Interface do HydroExpert de entrada de dados para vazões de uso consuntivo.



5 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.



6 Histórico das Revisões

Controle de conteúdo das revisões deste documento.

Quadro 5. Controle de versões.

Versão	Data	Anotação
1.2	21/11/2016	Aprimoramento do tipo de desvio por vínculo de variáveis de operação. Disponível na versão do HydroExpert 1.6.9 RC1.
1.1	07/01/2016	Alteração da convenção de sinais para a variável de desvio: positiva implica em retirada e negativa implica em adição. Disponível na versão do HydroExpert 1.6.7 RC1.
1.0	24/08/2015	Versão de lançamento do documento.