



HydroExpert

Manual do assistente de regras simples



HydroByte
Software

Agosto 2020

HydroByte Software

www.hydrobyte.com.br

Manual do Assistente de cálculo de vazões a partir de regras simples.

Autor: Marcelo Augusto Cicogna.

Versão 1.0 atualizada em 2020-08-25.

Impressão realizada em 2020-08-25.

Arquivo: Manual-HydroExpert-Wizard-Simple-Rules.doc (698 kB)



Índice

1	Introdução.....	4
1.1	Nomenclatura de Variáveis.....	4
2	Regra Pimental – Belo Monte.....	5
2.1	Objetivo e Requisitos.....	5
2.2	Descrição do Cálculo.....	6
3	Regra Anta – Simplício	7
3.1	Objetivo e Requisitos.....	7
3.2	Descrição do Cálculo.....	8
4	Regra Moxotó – Paulo Afonso	9
4.1	Objetivo e Requisitos.....	9
4.2	Descrição do Cálculo.....	10
5	Estudos de Caso	11
5.1	Pimental – Belo Monte.....	11
5.2	Anta – Simplício	13
5.3	Moxotó – Paulo Afonso	14
6	Referências Bibliográficas	17
7	Histórico das Revisões.....	18



1 Introdução

Este manual tem como objetivo apresentar o modelo matemático e sua implementação computacional do *Assistente Regras Simples* disponível no Sistema HydroExpert a partir da sua versão 1.7.4, conforme ilustrado na Figura 1 a seguir.

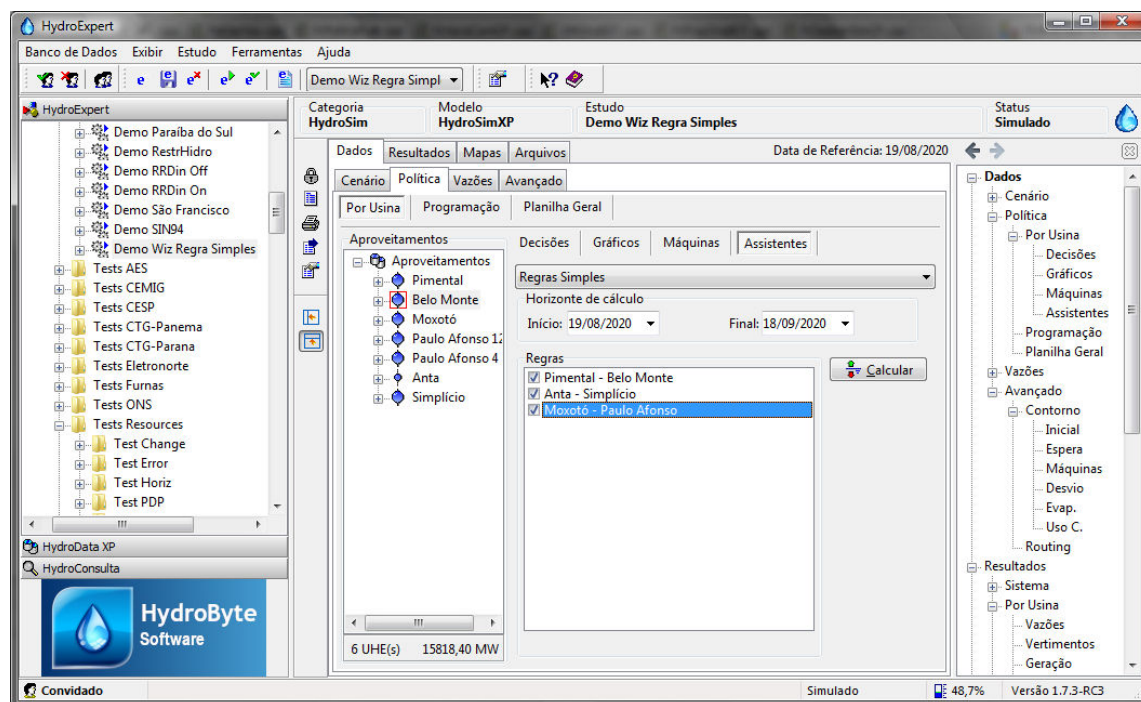


Figura 1. Assistente de Regras Simples.

Esse Assistente tem por objetivo aplicar regras simples de cálculos de vazões, normalmente de defluência e desvios, a partir de dados de afluência. Outras regras podem ser implementadas, desde que os cálculos entre os dados de entrada sejam de direta aplicação.

1.1 Nomenclatura de Variáveis

Considere-se a seguinte nomenclatura das variáveis utilizadas nas regras do assistente:

- a : vazão afluente em m^3/s .
- u : vazão defluente em m^3/s .
- s : vazão vertida em m^3/s .
- d : vazão de desvio em m^3/s .
- uc : vazão de uso consuntivo em m^3/s .
- ev : vazão por evaporação líquida em m^3/s .
- q_{Max} : vazão de engolimento máximo em m^3/s .
- q_{Ef} : vazão de engolimento efetivo da turbina em m^3/s .
- n_{Maq} : número de máquinas despachadas (em geração).



2 Regra Pimental – Belo Monte

Para a descrição da regra *Pimental – Belo Monte*, faz-se necessário apresentar o diagrama simplificado de topologia e variáveis da Figura 2.

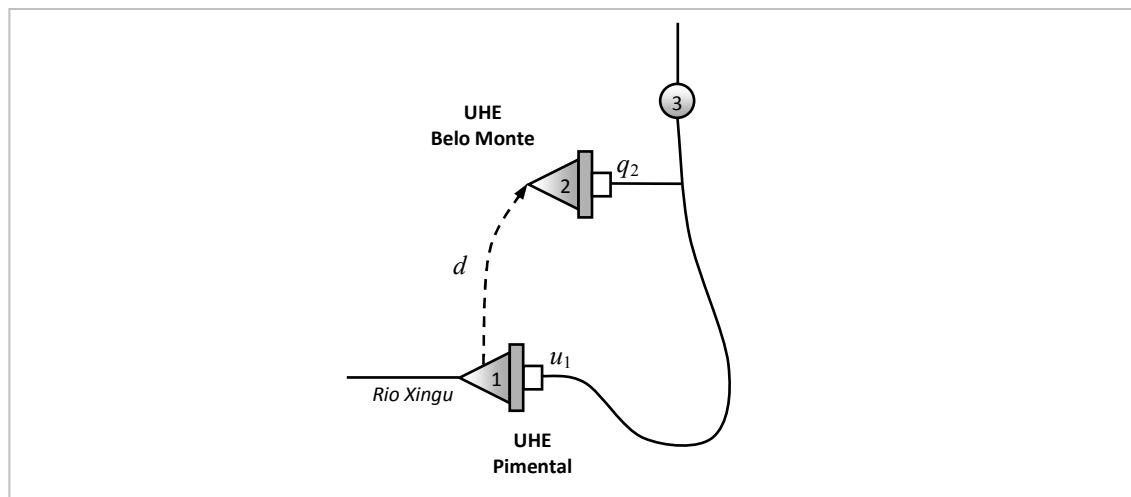


Figura 2. Ilustração da configuração espacial e de desvio para as UHE Pimental e Belo Monte.

2.1 Objetivo e Requisitos

O objetivo da regra é o cálculo da vazão de desvio entre os reservatórios das UHE Pimental e Belo Monte, em função da vazão afluente e respeitando uma restrição de defluência mínima sazonal na UHE Pimental. De forma simplificada, o cálculo irá determinar:

1. Vazão defluente da UHE Pimental (u_1).
2. Vazão de desvio da UHE Pimental para a UHE Belo Monte (d).

Para isso, os seguintes dados de entrada são necessários:

- Vazão afluente na UHE Pimental (a_1).
- Vazão de restrição de defluência mínima na UHE Pimental (u_r).

Pelos requisitos de dados de entrada, nota-se que a aplicação da regra não exige que o estudo tenha o *status* de “Simulado”, ou seja, a aplicação da regra não exige que o estudo possua resultados.

A vazão de restrição de defluência mínima na UHE Pimental depende de dois hidrogramas mensais, um para anos pares (A) e outro para ímpares (B).

Tabela 1. Hidrogramas da restrição de defluência mínima da UHE Pimental.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A	1100	1600	2500	4000	1800	1200	1000	900	750	700	800	900
B	1100	1600	4000	8000	4000	2000	1200	900	750	700	800	900



Para a UHE Belo Monte, o engolimento máximo efetivo do conjunto de turbinas totaliza 13.900 m³/s. Para a UHE Pimental, caso a afluência seja superior à restrição u_r , mas não mais do que 300 m³/s, há a decisão de deplecionamento do reservatório da UHE Pimental.

2.2 Descrição do Cálculo

Em função das variáveis de entrada, a regra possui o seguinte algoritmo de cálculo.

```
// Cálculo da defluência da UHE Pimental e do desvio.  
if      ( $a_1 \leq u_r$ )           { $u_1 = a_1$ ;       $d = 0$ ;      }  
else if ( $u_r < a_1 \leq u_r + 300$ ) { $u_1 = a_1$ ;       $d = 300$ ;    }  
else if ( $u_r + 300 < a_1 \leq u_r + 13900$ ) { $u_1 = u_r$ ;       $d = a_1 - u_r$ ; }  
else if ( $a_1 > u_r + 13900$ )      { $u_1 = a_1 - 13900$ ;  $d = 13900$ ; }
```

Algoritmo 1. Descrição do cálculo da regra Pimental – Belo Monte.



3 Regra Anta – Simplício

Para a descrição da regra *Anta – Simplício*, faz-se necessário apresentar o diagrama simplificado de topologia e variáveis da Figura 3.

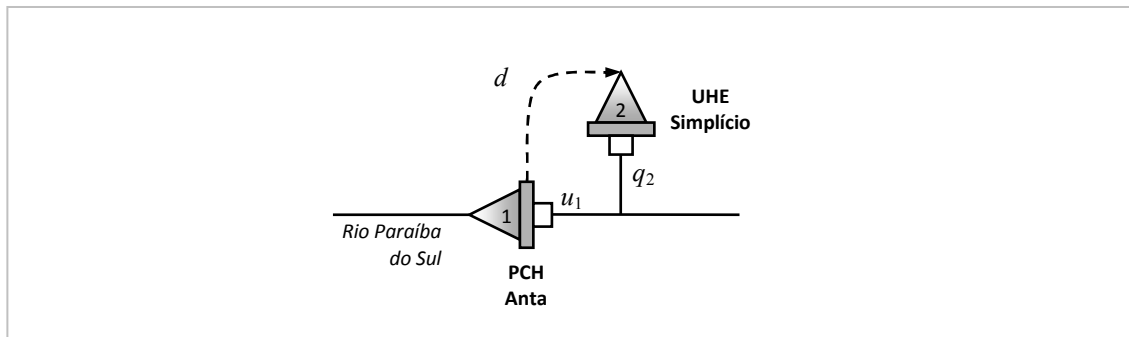


Figura 3. Ilustração da configuração espacial e de desvio para a PCH Anta e UHE Simplício.

3.1 Objetivo e Requisitos

O objetivo da regra é o cálculo da vazão de desvio entre os reservatórios da PCH Anta e a UHE Simplício, em função da vazão afluyente e respeitando duas restrições: uma de defluência mínima na PCH Anta e outra de turbinagem máxima na UHE Simplício. De forma simplificada, o cálculo irá determinar:

1. Vazão defluente da PCH Anta (u_1).
2. Vazão de desvio entre a PCH Anta e a UHE Simplício (d).

Para isso, os seguintes dados de entrada são necessários:

- Vazão afluyente na PCH Anta (a_1).
- Vazão turbinada máxima da PCH Anta ($qMax_1$).
- Vazão turbinada máxima da UHE Simplício ($qMax_2$).

Pelos requisitos de dados de entrada, nota-se que a aplicação da regra exige que o estudo tenha o *status* de “Simulado”, ou seja, a aplicação da regra exige que o estudo possua resultados.

A vazão turbinada na UHE Simplício (q_2) será igual ao valor da variável de desvio entre os reservatórios.

Após descontada a vazão de desvio, a vazão vertida na PCH Anta (s_1) será programada se a vazão defluente (u_1) for superior ao engolimento máximo ($qMax_1$), sendo esse último função do número de máquinas despachadas ($nMaq_1$).



3.2 Descrição do Cálculo

Em função das variáveis de entrada, a regra possui o seguinte algoritmo de cálculo.

```
// Cálculo da defluência da PCH Anta e do desvio.  
qMax2 = nMaq2 * qEf2; // qEf Simplício = 100 m3/s.  
if (0 < a1 ≤ 90) {u1 = a1; d = 0; }  
else if (90 < a1 ≤ 90+qMax2) {u1 = 90; d = a1 - 90; }  
else if (a1 > 90+qMax2) {u1 = a1 - qMax2; d = qMax2; }  
// Adequação turbinagem da PCH Anta.  
qMax1 = nMaq1 * qEf1; // qEf Anta = 90 m3/s.  
if (0 < u1 ≤ qMax1) {q1 = u1; s1 = 0; }  
else if (u1 > qMax1) {u1 = qMax1; s1 = u1 - qMax1; }
```

Algoritmo 2. Descrição do cálculo da regra Anta – Simplício.



4 Regra Moxotó – Paulo Afonso

Para a descrição da regra *Moxotó – Paulo Afonso*, faz-se necessário apresentar o diagrama simplificado de topologia e variáveis da Figura 3.

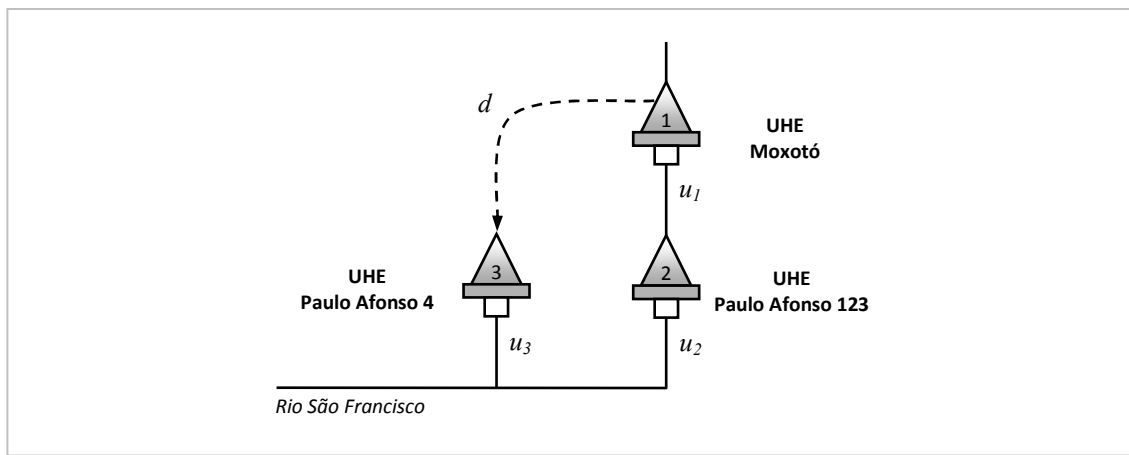


Figura 4. Ilustração da configuração espacial e de desvio entre as UHE Moxotó e Paulo Afonso 4.

4.1 Objetivo e Requisitos

O objetivo da regra é o cálculo de:

1. Vazão defluente da UHE Moxotó (u_1).
2. Vazão de desvio entre as UHE Moxotó e Paulo Afonso 4 (d).
3. Vazão defluente da UHE Paulo Afonso 4 (u_3).

Para isso, os seguintes dados de entrada são necessários:

- Vazão afluente na UHE Moxotó (a_1).
- Vazão de uso consuntivo na UHE Moxotó (uc_1).
- Vazão de efeito de evaporação líquida na UHE Moxotó (ev_1).
- Vazão defluente na UHE Paulo Afonso 123 (u_2).
- Vazão de uso consuntivo na UHE Paulo Afonso 123 (uc_2).
- Vazão de efeito de evaporação líquida na UHE Paulo Afonso 123 (ev_2).
- Vazão incremental entre as UHE Moxotó e Paulo Afonso 123 (y_{1-2}).

Pelos requisitos de dados de entrada, nota-se que a aplicação da regra exige que o estudo tenha o *status* de “Simulado”, ou seja, a aplicação da regra exige que o estudo possua resultados.

A regra tenta atender o balanço da UHE Paulo Afonso 123 por meio de cálculo da vazão defluente na UHE Moxotó. A vazão de desvio é calculada como o excedente até a afluência na



UHE Moxotó, por meio de balanço desse reservatório, tentando-se manter o armazenamento inalterado.

4.2 Descrição do Cálculo

Em função das variáveis de entrada, a regra possui o seguinte algoritmo de cálculo.

```
// Cálculo do desvio.  
d =  $a_1 - (uc_1 + ev_1) - (u_2 + uc_2 + ev_2) + y_{1-2}$ ;  
// ... Limites do desvio.  
d = max(d, 0); // não negativo.  
d = min(d, qMax3); // não superior ao eng. máximo em PA-4.  
// Cálculo das defluências.  
u1 =  $(u_2 + uc_2 + ev_2) - y_{1-2}$ ; // Moxotó.  
u3 = d; // PA-4.  
// ... Limites de defluência.  
u1 = max(u1, 0); // não negativo Moxotó.  
u3 = max(u3, 0); // não negativo PA-4.
```

Algoritmo 3. Descrição do cálculo da regra Moxotó – Paulo Afonso.



5 Estudos de Caso

Os estudos de caso apresentados aqui estão disponíveis no estudo “Demo Wiz Regra Simples” pertencente ao conjunto de estudos de demonstração distribuído com o HydroExpert.

5.1 Pimental – Belo Monte

Neste estudo de caso, não há efeito de evaporação ou de uso consuntivo e a UHE Pimental possui a seguinte trajetória de vazões afluentes, conforme Figura 5 (a).

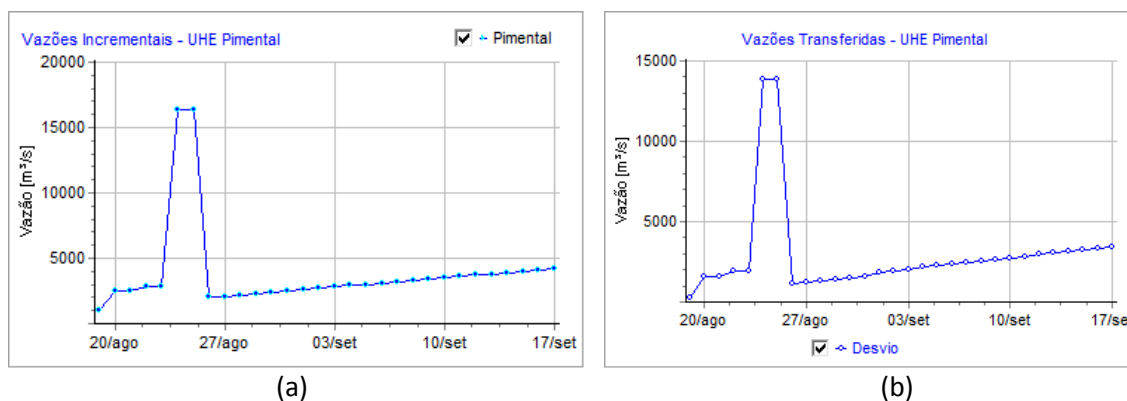


Figura 5. Trajetória de vazões afluentes e de desvio para a UHE Pimental.

Para os meses de agosto e setembro de 2020, utiliza-se o Hidrograma A (anos pares), tendo-se os limites de defluência mínima iguais a 900 e 750 m³/s, respectivamente.

Após a execução do Assistente de Regras Simples, para a regra “Pimental – Belo Monte”, obtém-se a trajetória de vazões de desvio entre os reservatórios apresentada na Figura 5 (b). Lembrando que o valor positivo de desvio significa vazão retirada do reservatório. Neste caso, os valores máximos de vazão desviada nos dias 24 e 25 de agosto atingem o limite de 13.900 m³/s.

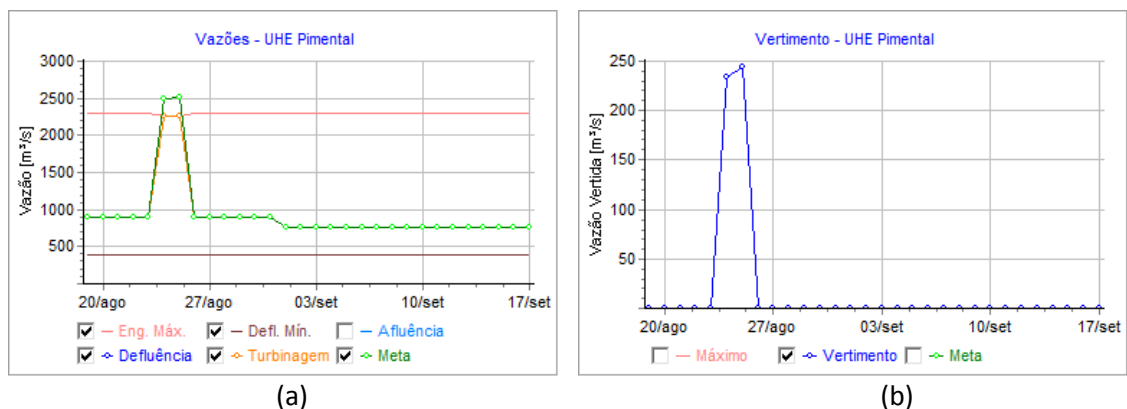


Figura 6. Trajetória de vazões defluentes da UHE Pimental.



O restante da vazão afluente é programada como defluência da UHE Pimental, conforme apresentado na Figura 6 (a). Nesta figura, notam-se os patamares de 900 e 750 m³/s determinados como defluência mínima nos meses de agosto e setembro, respectivamente. Como observação final, nota-se que a defluência não pode ser totalmente atendida pelo engolimento máximo das turbinas da UHE Pimental, sendo necessário o vertimento apresentado na Figura 6 (b).

Para a UHE Belo Monte, a meta de vazão defluente, numericamente igual à vazão turbinada por não existir vertedouro, tem sua trajetória igual à vazão de desvio, conforme estabelecido pela regra de cálculo e demonstrado na Figura 7. No entanto, nos dias 24 e 25 de agosto, picos de vazões no desvio, o engolimento máximo é limitado pela altura de queda na casa de máquinas, não sendo possível atender aos 13.900 m³/s de turbinagem programada.

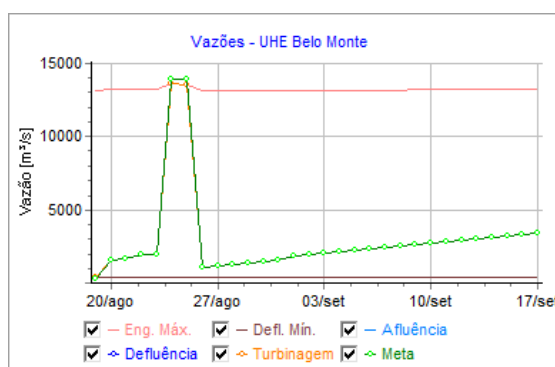


Figura 7. Trajetória de vazões defluentes da UHE Belo Monte.

A resposta em termos de armazenamento está apresentada nas trajetórias da Figura 8 a seguir. Embora a regra tentasse igualar a vazão turbinada na UHE Belo Monte ao valor da vazão de desvio, a limitação do engolimento máximo pela altura de queda produziu um aumento de armazenamento a partir do dia 24/agosto.

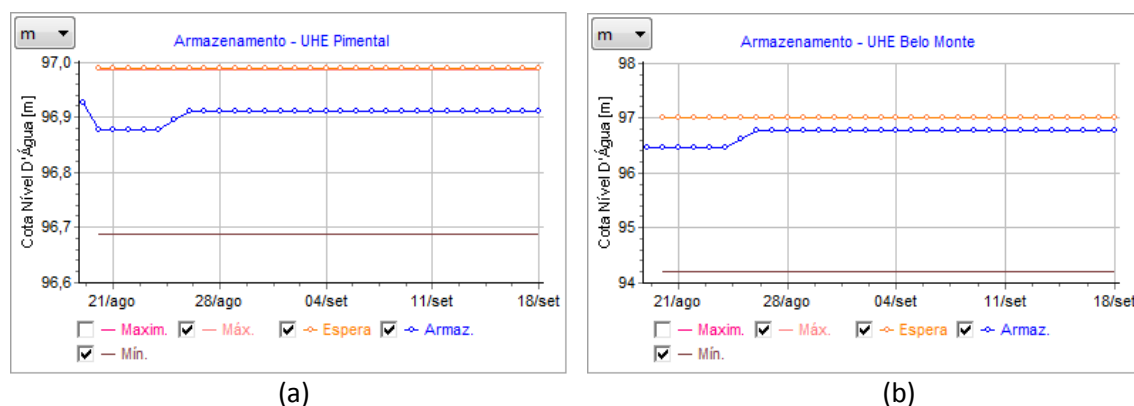


Figura 8. Trajetória de armazenamento das UHE Pimental e Belo Monte.



5.2 Anta – Simplício

Neste estudo de caso, não há efeito de evaporação ou de uso consuntivo e a PCH Anta possui a seguinte trajetória de vazões afluentes, conforme Figura 9 (a). Os valores dos patamares são os seguintes; 50, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 m³/s.

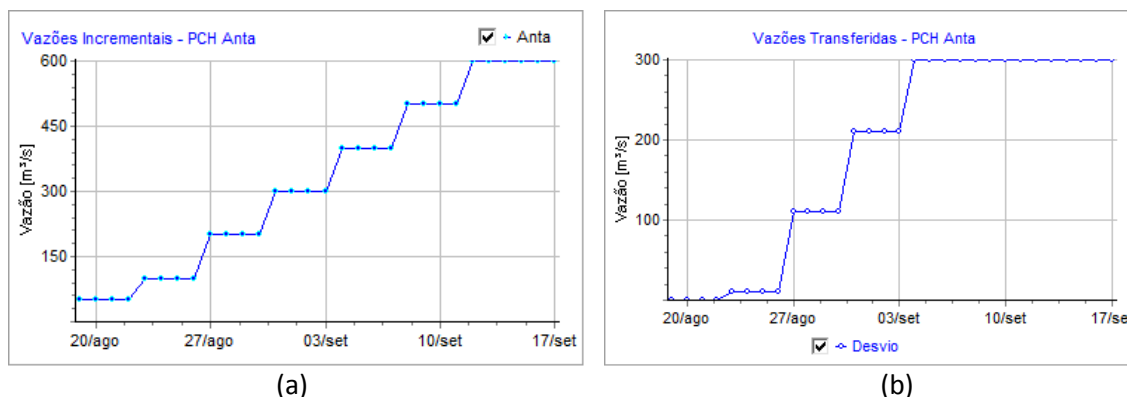


Figura 9. Trajetória de vazões afluentes e de desvio para a PCH Anta.

Após a execução do Assistente de Regras Simples, para a regra “Anta – Simplício”, obtém-se a trajetória de vazões de desvio entre os reservatórios apresentada na Figura 9 (b). Lembrando que o valor positivo de desvio significa vazão retirada do reservatório.

Nota-se que para a afluência abaixo de 90 m³/s, não há vazão de desvio, conforme estabelece a regra. Da mesma forma, até o limite de 3 máquinas despachadas na UHE Simplício, que equivale a 300 m³/s, a vazão de desvio é igual a afluência da PCH Anta, subtraída de 90 m³/s, construindo os patamares de 10, 110 e 210 m³/s.

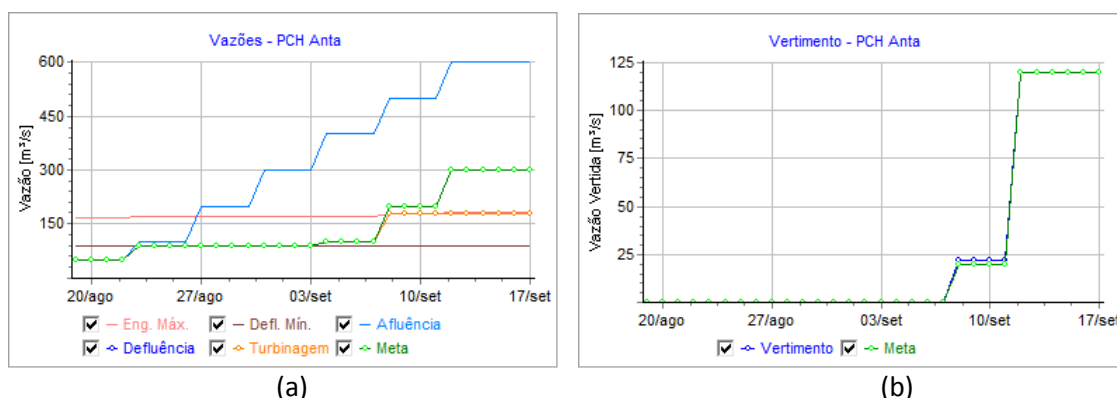


Figura 10. Trajetória de vazões defluentes da PCH Anta.

O restante da vazão afluente é programada como defluência da PCH Anta, conforme apresentado na Figura 10 (a). Nesta figura, nota-se o aumento da vazão turbinada programada, até que a mesma ultrapasse o limite de engolimento, ocasionando a programação de vertimentos verificada na Figura 10 (b).



Para a UHE Simplício, a meta de vazão defluente, numericamente igual à vazão, tem sua trajetória igual à vazão de desvio, conforme estabelecido pela regra de cálculo e demonstrado na Figura 11. Nota-se o aumento da vazão turbinada até o limite de 300 m³/s, o qual representa o valor da regra para as três máquinas com geração no máximo.

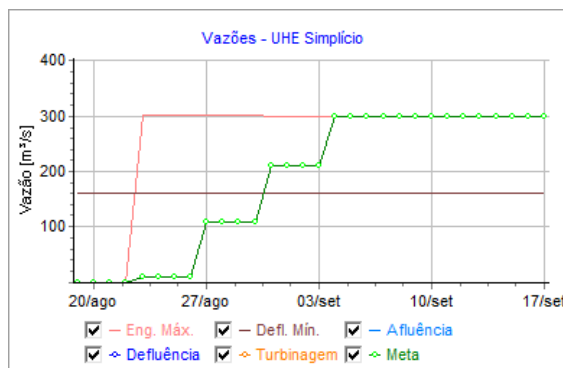


Figura 11. Trajetória de vazões defluentes da UHE Simplício.

5.3 Moxotó – Paulo Afonso

Neste estudo de caso, são considerados os efeitos de evaporação ou de uso consuntivo nas UHE Moxotó e Paulo Afonso 123. A UHE Moxotó possui a seguinte trajetória de vazões afluentes, conforme Figura 12 (a).

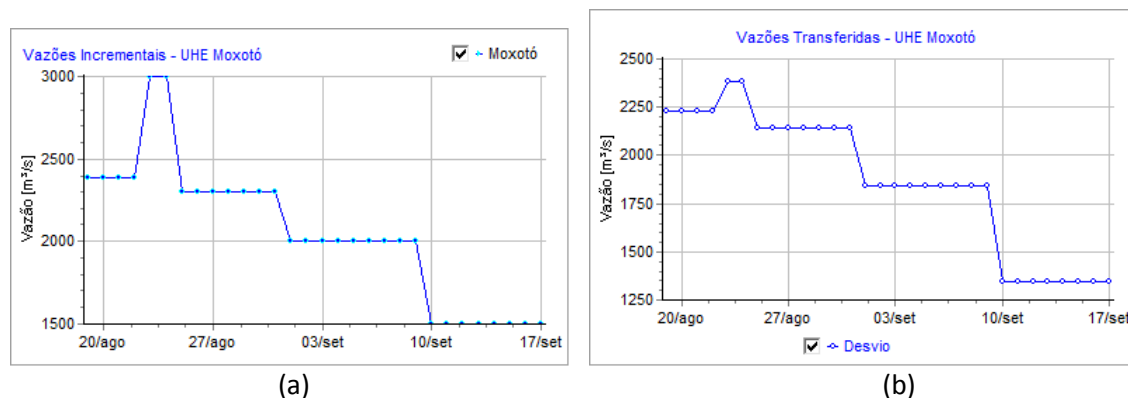


Figura 12. Trajetória de vazões afluentes e de desvio para a UHE Moxotó.

Após a execução do Assistente de Regras Simples, para a regra “Moxotó – Paulo Afonso”, obtém-se a trajetória de vazões de desvio entre os reservatórios apresentada na Figura 12 (b). Lembrando que o valor positivo de desvio significa vazão retirada do reservatório. Os patamares de vazão desviada seguem os patamares de vazão afluente, uma vez que o seu cálculo considera também o atendimento de usos consuntivos e vazões por evaporação nas UHE Moxotó e Paulo Afonso 123.



Após descontado os efeitos de evaporação e uso consuntivo da UHE Moxotó ($5.1+50 = 55.1 \text{ m}^3/\text{s}$), o restante da vazão afluyente é programada como defluência, conforme apresentado na Figura 13. Nesta figura, nota-se o patamar de $100.3 \text{ m}^3/\text{s}$ que compreende o total das vazões pelo efeito de evaporação e de uso consuntivo da UHE Paulo Afonso 123 ($0.3+100 = 100.3 \text{ m}^3/\text{s}$).

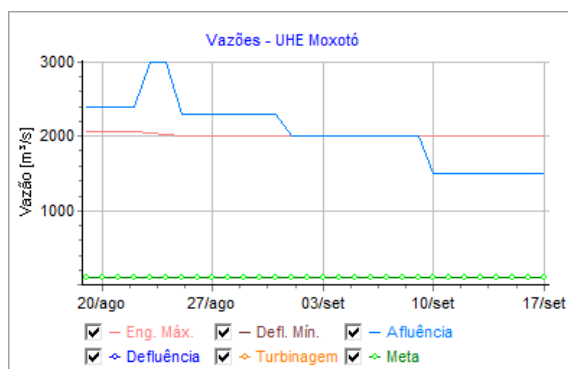


Figura 13. Trajetória de vazões defluentes da UHE Moxotó.

Para a UHE Paulo Afonso 4, a meta de vazão defluente é numericamente igual à trajetória de vazão de desvio, conforme estabelecido pela regra de cálculo e demonstrado na Figura 14. Os valores máximos de vazão desviada nos dias 23 e 24 de agosto atingem o limite de $2.384 \text{ m}^3/\text{s}$, que é numericamente igual ao engolimento máximo da UHE Paulo Afonso 4, em função da altura de queda. Vale lembrar que o engolimento efetivo total da UHE Paulo Afonso 4 é de $6 \times 398 = 2.388 \text{ m}^3/\text{s}$.

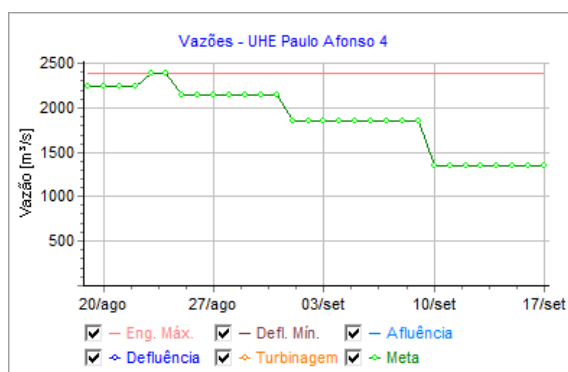


Figura 14. Trajetória de vazões defluentes da UHE Paulo Afonso 4.

A resposta em termos de armazenamento está apresentada nas trajetórias da Figura 15 a seguir. Nota-se que os dois intervalos com aflluência mais favorável provocaram um aumento do armazenamento na UHE Moxotó após descontados os valores de desvio e de defluência para as UHE Paulo Afonso 4 e 123, respectivamente.

Como esperado, o armazenamento da UHE Paulo Afonso 4 permanece inalterado, uma vez que a vazão turbinada é numericamente igual ao desvio. No entanto, esse é um erro de



aproximação, uma vez que o reservatório da UHE Paulo Afonso 4 é também o de Moxotó. Portanto, a geração calculada na UHE Paulo Afonso 4 teria um erro de aproximação em função da diferença da cota de montante em relação a trajetória real determinada pelo balanço de massas do reservatório da UHE Moxotó.

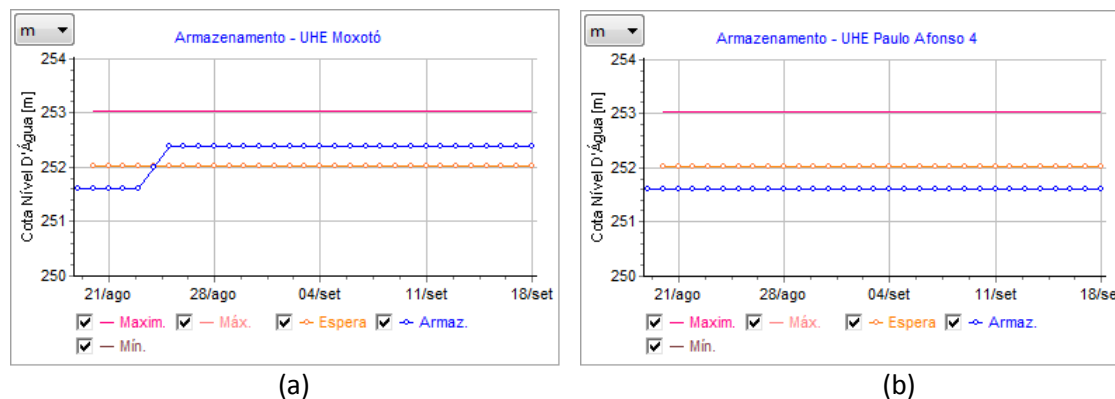


Figura 15. Trajetória de armazenamento das UHE Moxotó e Paulo Afonso 4.

Este exemplo de vazão afluente favorável, até excedente, para a UHE Moxotó, indica um aprimoramento para uma versão futura seria aumentar a vazão defluente para a UHE Paulo Afonso 123, mantendo-se o armazenamento inalterado em Moxotó. Esse aprimoramento tende a diminuir também o erro de aproximação da cota de montante da UHE Paulo Afonso 4, conforme demonstrado anteriormente.



6 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.



7 Histórico das Revisões

Controle de conteúdo das revisões deste documento.

Quadro 1. Controle de versões.

Versão	Data	Anotação
1.0	25/08/2020	Versão de lançamento do documento.