

## 5 Centrales Hidráulicas

### 5.1 Centrales Hidráulicas con Embalse

En el caso de centrales con embalses, tendremos que agregar restricciones adicionales para imponer los límites de volumen del agua embalsada.

El volumen al final del paso de tiempo  $V_{fin,i}$  se calcula como el volumen al inicio  $V_{ini,i}$ , mas el volumen que ingresa al lago por el escurrimiento propio de su cuenca o por caudales liberados en centrales aguas arriba  $A_i$  menos los volúmenes turbinados en cada poste y menos el volumen que sea necesario verter sin turbinar  $Z_i$  y menos las pérdidas por evaporación y por filtración del embalse  $R_i$ .

La ecuación para calcular el volumen final (para la central i) sería:

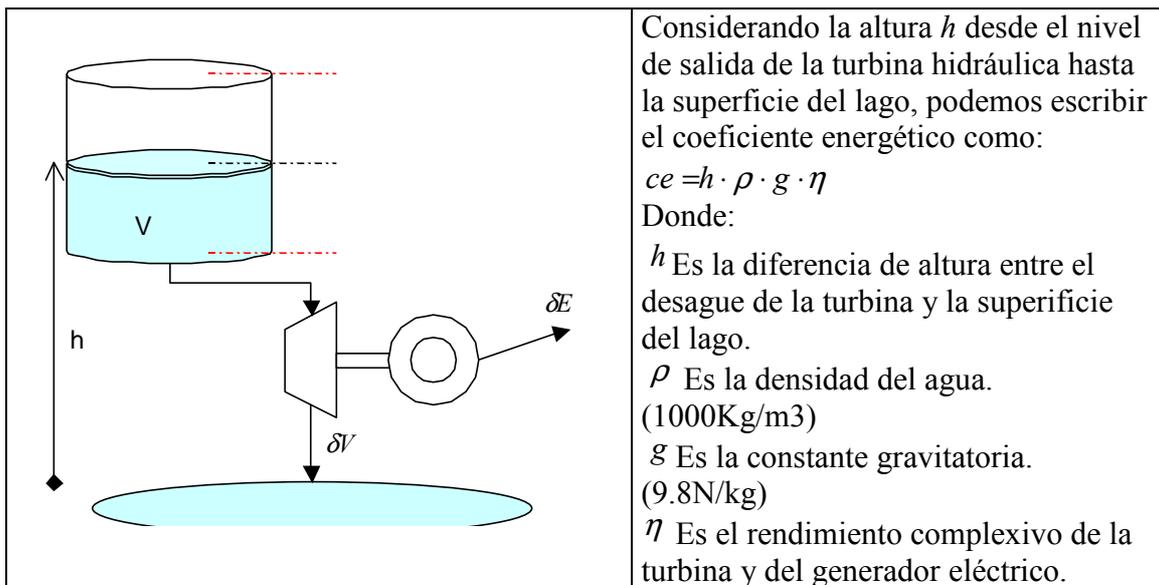
$$V_{fin,i} = V_{ini,i} + A_i - \sum_{j=1}^{j=NPostes} \frac{P_{i,j} \cdot durpos_j}{ce} - Z_i - R_i$$

Donde el volumen turbinado en el poste  $j$  es:  $\frac{P_{i,j} \cdot durpos_j}{ce}$ , siendo  $ce$  el coeficiente energético.

En  $A_i$  aglutinamos los aportes propios y los aportes correspondiente a erogaciones de centrales aguas arriba.

El coeficiente energético lo definimos talque:

$\delta E = ce \cdot \delta V$ , es decir como el factor que dado un volumen turbinado  $\delta V$  nos permite calcular la energía generada y entregada por la central a la red eléctrica.



Como se puede apreciar de lo anterior, la ecuación del volumen turbinado en función de la energía generada por la central es una aproximación dado que el coeficiente

energético va variando en la medida en que va cambiando el salto ( $h$ ) útil. El salto útil puede variar por la variación del nivel del lago o por la variación de la cota aguas abajo. La cota aguas abajo puede verse influenciada por el propio turbinado. El coeficiente energético también varía al variar el rendimiento de la turbina que no es constante para todo caudal. Para cada paso de tiempo habrá que decidir el valor del coeficiente energético que mejor aproxime a la relación Energía Generada / Volumen Turbinado y si fuese necesario habrá que iterar sobre el valor para mejorar el cálculo.

En el planteo del problema de despacho, el lago nos impone las restricciones de máximo y mínimo del volumen embalsado si es que optamos por incluir el cálculo del volumen embalsado dentro del problema de optimización.

$$V_{fin,i} - V_{min,i} = V_{ini,i} + A_i - \sum_{j=1}^{j=NPostes} \frac{P_{i,j} \cdot durpos_j}{ce} - Z_i - R_i - V_{min,i} \geq 0$$

$$V_{máx,i} - V_{fin,i} = V_{máx,i} - \left( V_{ini,i} + A_i - \sum_{j=1}^{j=NPostes} \frac{P_{i,j} \cdot durpos_j}{ce} - Z_i - R_i \right) \geq 0$$

### **5.1.1 Vertimiento máximo.**

En el modelo de las hidro con embalse permitimos especificar una curva de vertimiento máximo en función de la cota. Este límite debe reflejar las curvas del vertedero de la central y además puede usarse para representar límites de operación de los embalses impuestos por condiciones de regulación de crecidas por ejemplo.

Esta restricción puede llevar a un problema de factibilidad del sistema. Por ejemplo, por más que pongamos como condición de operación un determinado vertimiento máximo, si llueve mucho, el lago se llena y si sigue lloviendo mucho, al final hay que dejar pasar todo lo que llega al embalse pues el agua le pasa por arriba. En estas condiciones no hay posibilidad de imponer nada sobre el vertimiento. Para prever estas situaciones el modelo inscribe la restricción de vertimiento, pero la anota como “restricción violable” asociada a la restricción de volumen máximo del embalse. Si durante la resolución del despacho del paso de tiempo, el Simplex no encuentra solución intenta ver si violando esa restricción lo logra.

## **5.2 Centrales Hidráulicas “a pelo de agua” (Sin embalse)**

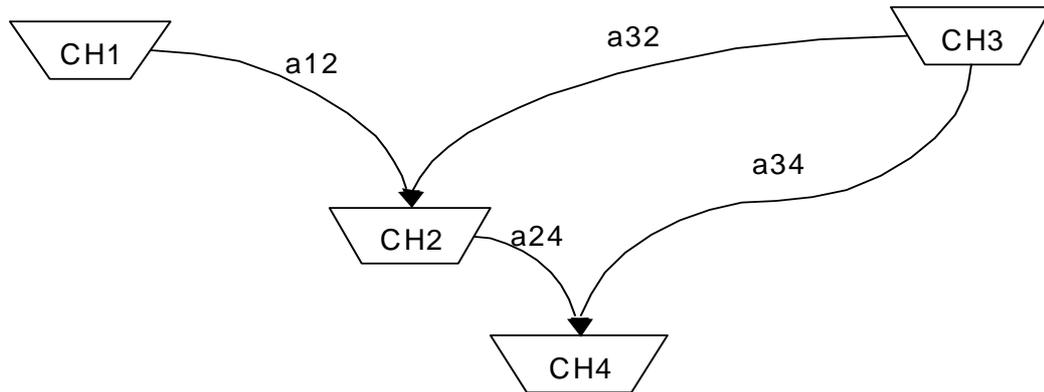
En estas centrales todo lo que llega tiene que ser o turbinado o vertido.

Al no tener embalse, no necesitamos agregar una variable de estado para este tipo de centrales y directamente fijamos su “valor del agua” en cero para lograr el máximo valor posible de generación.

## **5.3 Encadenamiento de centrales.**

El agua erogada (turbinado + vertido) de un embalse puede ser parte de los aportes que recibe un embalse que esté aguas abajo.

En la descripción del sistema a simular tenemos que indicar esta situación de alguna manera. Para ello, a la central que recibe el aporte le indicaremos la lista de centrales de las que recibe aportes (en forma directa) y lo aremos indicando un coeficiente a utilizar para considerar posibles pérdidas entre lo erogado por la central de aguas arriba y el aporte efectivo que recibe la central. En la siguiente figura vemos un ejemplo, en donde el caudal erogado por la central CH1 es considerado como aporte (entre otros aportes que tenga) a la central CH2.



**Figura 1 Centrales encadenadas.**

Continuando con el ejemplo de la Figura 1 en la descripción del sistema, indicaríamos algo así como:

CH1 : sin centrales aguas arriba.

CH2 : (CH1, a12); (CH3,a32) – dos centrales aguas arriba

CH4 : (CH2, a24); (CH3,a34) – dos centrales aguas arriba.

Alguien podría decir que CH1 está aguas arriba de CH4, pero a los efectos de representar el sistema, el caudal de CH1 que llegue a CH4 tendrá que pasar por CH2 y está representado adecuadamente.

#### **5.4 Valor del agua para centrales encadenadas.**

Como resultado del proceso de optimización disponemos de las derivadas de la función de costo futuro respecto de las variables de estado. Como se eligió usar los volúmenes de los embalses como variables de estado, tendremos la derivada del costo futuro frente a variaciones del volumen embalsado. Esas derivadas con signo cambiado son lo que llamamos el valor del agua, dado que gastar un litro de agua significará una variación del costo igual a menos la derivada del costo futuro respecto a la variable de estado correspondiente al embalse en cuestión.

Si tenemos una central que no tiene otras centrales aguas abajo, el gasto de un volumen no tiene otras consecuencias que lo que pueda generar en la propia central y entonces podemos expresar el valor del agua en USD/MWh dividiendo el producto del valor del agua, por el caudal turbinado por las horas del paso de tiempo entre la energía generada en ese paso de tiempo. Este valor así obtenido, es útil como consigna de despacho, dado que el resultado del despacho será el equivalente al tratar a la central como si fuese una térmica con costo variable igual al del agua expresado en USD/MWh.

En el caso en que el agua turbinada por la central tiene otros usos aguas abajo, la interpretación del valor del agua como consigna de despacho se complica un poco. Si la central aguas abajo tiene embalse, podríamos pensar que el agua es comprada por la central aguas abajo a su valor del agua y por lo tanto la energía generada en la primer central nos costó el volumen turbinado valorizado al valor del agua de la primer central

menos la proporción de dicho volumen que ingresa al embalse de la segunda central valorizado al valor del agua de dicha central.

Si la central aguas abajo no tiene embalse, todo caudal que llegue debe ser turbinado y generará energía por lo que dicha energía a los efectos de hacer la cuenta para calcular un valor útil para el despacho debe ser considerado como parte de la energía generada con el volumen erogado por la primer central. A su vez, si la segunda central descarga en una central con embalse debemos restar del costo asignado al gasto del volumen del primer embalse el volumen que alcanza el embalse de la tercera central valorizado al valor del agua del embalse de ésta última.

Esto parece un poco complicado, pero es el caso del sistema uruguayo. Las centrales del Rio Negro son tres. La primera es Bonete, la segunda es Baygorria y la tercera Palmar. Si consideramos un paso de tiempo diario tiene sentido considerar los embalses de Bonete y Palmar, pero no así el de Baygorria (está en el medio).

En la práctica no es necesario hacer estas cuentas, pues el orden de despacho lo determina directamente el programa. Este análisis es sólo para poder interpretar los resultados de la simulación.

### **5.5 Pérdida de salto efectivo por caudal erogado.**

El caudal erogado  $Q_{\text{Erogado}}$  [m<sup>3</sup>/s] es calculado al final de cada paso de simulación como la suma del caudal vertido más el caudal turbinado.

Dicho caudal puede afectar el nivel de aguas abajo reduciendo el salto efectivo en la central. Para tener en cuenta este efecto se usan los parámetros:  $ca_{QE}$  y  $cb_{QE}$  calculados para modelar la pérdida de salto de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$dh(QE) = ca_{QE} * QE + cb_{QE} * QE^2$$

Esta pérdida de salto efectivo afecta el cálculo del coeficiente energético ( $C_e$ ) de las centrales. El valor del caudal efectivamente erogado es resultado del despacho en un paso de tiempo. Para el planteo del despacho necesitamos el  $C_e$ , por lo tanto tenemos un problema para realizar el cálculo. En la implementación de SimSEE lo que hacemos es estimar la pérdida de altura al inicio de un paso de tiempo en base al caudal erogado en el paso anterior. Esto es una aproximación.

Durante la optimización dinámica estocástica, consideramos como caudal erogado el erogado en el mismo estado del sistema en la etapa de optimización anterior (paso de tiempo siguiente en el tiempo, dado que la optimización se hace en etapas desde el futuro al presente).

Para poder considerar el caudal erogado medio en la optimización de la etapa anterior, es necesario crear una variable auxiliar al estado de forma de guardar para cada estado el valor y poder recuperarlo cuando se esté en el mismo estado en la optimización de la nueva etapa.