

Simulación de cuencas hidráulicas mediante Programación Orientada a Objetos

Jesús M^a Latorre¹, Santiago Cerisola¹, Andrés Ramos¹, Alejandro Perea², Rafael Bellido²

¹ Instituto de Investigación Tecnológica
ICAI – Universidad Pontificia Comillas de Madrid
Santa Cruz de Marcenado 26, 28015 Madrid (España)
Tel: + 34 91 542 28 00, Fax: + 34 91 542 31 76, e-mail: Jesus.Latorre@iit.icaei.upco.es

² Iberdrola Generación
Tomás Redondo, 1, 28033 Madrid
Tel: + 34 91 577 65 00, Fax: +34 91 784 21 10

Resumen

Dentro de la operación de los sistemas eléctricos de potencia, la gestión de la energía hidráulica tiene gran importancia en cuanto a su participación en la reducción de los costes, capacidad de regulación y fiabilidad y seguridad de suministro. Por ello resulta de interés el disponer de una herramienta que permita analizar su funcionamiento con diferentes estrategias de gestión de las reservas hidráulicas. Debido a la complejidad de las estrategias que pueden ser consideradas, el enfoque más adecuado es el de la simulación. Se presenta un simulador discreto de salto diario cuyas entradas son series de aportaciones hidráulicas anuales y que proporciona la gestión de los elementos de la cuenca que, siguiendo las estrategias indicadas para cada uno, evita dentro de lo posible que se produzcan vertidos o no se suministren las necesidades de otros usuarios del agua. El objetivo de la simulación es analizar diferentes políticas y escenarios de incertidumbre para ayudar en la toma de decisiones de la gestión hidroeléctrica de forma que se maximice la producción (menores costes), se garantice el suministro eléctrico (seguridad del sistema) y se atienda a todas las servidumbres del agua (beneficio social). Este método se ha aplicado a casos reales del sistema eléctrico español y en este artículo se presentan algunos resultados de aplicación.

Palabras clave: cuencas hidráulicas, simulación discreta, gestión de las reservas, sistemas eléctricos de potencia.

1. Introducción

En los sistemas eléctricos la gestión de las cuencas hidráulicas es de gran importancia por varias razones:

- Suponen una fuente de energía que se obtiene con coste variable reducido. Los costes de producción asociados a los grupos hidráulicos son debidos a la operación y mantenimiento de los mismos, y en muchos de los modelos incluso éstos son despreciados frente a los costes de los grupos térmicos, que son mucho mayores. Por ello, esta tecnología, cuyos costes más importantes son los de amortización y financieros, es usada habitualmente como sustitución de otras con mayores costes evitables.

- Los grupos hidráulicos proporcionan una mayor capacidad de regulación que los grupos que emplean otras tecnologías, ya que pueden cambiar su producción más rápidamente. Como consecuencia, resultan de gran interés para garantizar la estabilidad del sistema frente a contingencias.
- La energía eléctrica es difícilmente almacenable, sobre todo en las escalas que se manejan en los sistemas eléctricos de potencia. Sin embargo, la gestión de las reservas hidráulicas y de los grupos de bombeo permite acumular la energía, en forma de su equivalente en volumen de agua, a costa de las pérdidas debidas al rendimiento de los grupos de bombeo. La adecuada gestión de las reservas contribuye a garantizar el suministro eléctrico a largo plazo

En el sistema eléctrico español, la producción hidráulica supone entre un 15% y un 20% de la producción total, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Por ello es muy importante disponer de una herramienta que permita investigar su funcionamiento. Si se quieren probar diferentes estrategias de gestión de las reservas de las cuencas hidráulicas, es de gran interés poder conocer el comportamiento de las cuencas con las diferentes alternativas. Además, permite prever el funcionamiento de los sistemas hidráulicos frente a indisponibilidades en algunas plantas, grandes avenidas en las aportaciones, etc.

Dado que el objetivo es poder analizar estrategias de gestión de los elementos de la cuenca que pueden llegar a ser muy complejas, la técnica adecuada para modelarlo es la simulación. En los modelos de simulación se pueden distinguir tres aspectos clave.

- Si el modelo no tiene en cuenta el tiempo, se habla de modelos estáticos. Sin embargo, si se considera la evolución del sistema en el tiempo, se trata de modelos dinámicos.
- Si en los datos de entrada del modelo no se incluye ninguna aleatoriedad, se trata de un modelo

determinista, y en caso contrario, se habla de un modelo estocástico.

- Si en el modelo las variaciones en el sistema se consideran de forma continua, entonces es un modelo continuo. Si los cambios en el sistema se producen en momentos de tiempo determinados, o se aproxima de esa forma, entonces el modelo se denomina discreto.

El principal objetivo del simulador de cuencas hidráulicas es analizar la evolución temporal de dichas cuencas, luego se trata de un modelo dinámico. Los datos de entrada son series de datos de aportaciones medidas históricamente en puntos concretos de las cuencas. Antes de comenzar la simulación se escogerá qué años se van a usar como entrada o se generarán series sintéticas con métodos de previsión. Como consecuencia, el modelo planteado es estocástico. Por último, únicamente se van a modelar eventos como si ocurriesen una vez al día, como son los cambios en las aportaciones que reciben los elementos, indisponibilidades programadas de los equipos, etc. En consecuencia, el modelo será discreto de incremento diario. Este incremento de tiempo se considera razonable ya que el alcance del modelo es de un año y no se necesita disponer de información horaria.

Este artículo se organiza como sigue: en el apartado 2 se lleva a cabo una revisión de los modelos relacionados que se han encontrado en la literatura; en el apartado 3 se comenta cómo se han representado los datos para adaptarlos a la Programación Orientada a Objetos; en el apartado 4 se detalla el método de simulación propuesto; en el apartado 5 se presentan resultados de la aplicación a un caso práctico, y finalmente en la sección 6 se recogen las conclusiones que se pueden extraer de este artículo.

2. Revisión bibliográfica

Para la simulación, el paradigma de Programación Orientada a Objetos resulta muy atractivo, ya que permite la simulación independiente de cada elemento que forme parte del sistema. Un ejemplo de esto se puede encontrar en [3], donde se efectúa la simulación en un entorno orientado a objetos aplicado a sistemas eléctricos de potencia y permite realizar estudios de control de frecuencia sobre dichos sistemas.

La simulación de sistemas hidrotérmicos se ha llevado a cabo con varios fines en el pasado. Uno de ellos es el análisis de fiabilidad de los sistemas eléctricos. Ejemplo de ello es [4], donde se simula un sistema hidrotérmico completo. En los embalses, el orden de mérito para su inclusión en el programa de producción se calcula en función del nivel de las reservas. Se consideran aportaciones simuladas, así como la red. El objetivo es medir la fiabilidad del servicio, tanto en sistemas térmicos e hidráulicos de forma separada, como en sistemas mixtos. En [5] y [6] se simulan sistemas eléctricos en los que no se considera la topología de la parte hidráulica. La simulación tiene detalle horario e incluye la red, en cuyos nudos la demanda se define en función de la proporción de usuarios de cada tipo que se esperan (industrial, residencial,...). Aplica técnicas de

reducción de varianza y como resultado calcula medidas de fiabilidad de servicio. En [5] además realiza la comparación con métodos no cronológicos, mediante el uso de la curva de duración-carga y llega a la conclusión de que también es una metodología válida para obtener resultados aproximados, que requiere menor carga computacional que la simulación.

En [7] se propone un esquema de simulación de sistemas de generación hidrotérmica, en los cuales se parte de unas consignas de medio y largo plazo obtenidas con métodos de optimización, como son los mantenimientos, la gestión anual del agua y la programación semanal. Luego simula el sistema con demandas y aportaciones simuladas, y en cada paso diario de simulación se optimiza el funcionamiento frente a las realizaciones de la incertidumbre, intentando seguir las decisiones tomadas anteriormente en la planificación a más largo plazo.

3. Representación de los datos

Como medio para representar la topología de una cuenca hidráulica surge de manera natural el uso de un grafo formado por nodos, cada uno de los cuales simboliza un elemento de la cuenca. Los nodos están conectados entre sí para representar las uniones físicas de la cuenca a través del río. Cada nodo se gestiona de forma independiente, aunque para ello pueda requerir información del estado de otros elementos de la cuenca. Como consecuencia de la elección de esta estructura de los datos, la aplicación de la Programación Orientada a Objetos parece la más indicada.

Analizando las configuraciones encontradas en las cuencas hidráulicas reales, se ha llegado a la conclusión de que cinco tipos de objetos son suficientes para representar adecuadamente toda la casuística. Estos tipos de objetos se describen en detalle en el apartado 3.A. Además, en el objeto que representa un embalse se pueden seguir distintas políticas de gestión de las reservas. En el apartado 3.B se comentan las estrategias consideradas en este artículo.

A. Tipos de objetos

En este apartado se van a presentar los tipos de nodos que se han identificado. Dichos nodos son los que representan los embalses, canales, centrales, aportaciones y uniones de río de la cuenca, que son descritos más detalladamente en los cinco apartados que siguen.

1) Embalses

Este tipo de objetos representa los embalses, que tienen uno o más caudales de agua como entrada y tienen un único caudal de salida. Pueden tener asociado un caudal mínimo que debe ser liberado al río, relacionado con los compromisos adquiridos con los regantes de la zona o por cuestiones medioambientales.

Además, pueden contar con curvas de volumen que sirven de guía en la gestión de los mismos. Un ejemplo es

la curva de garantía, que marca el volumen mínimo bajo el cual no se quiere dejar el volumen del embalse, o la curva de resguardo, que señala el volumen máximo al que debe mantenerse el embalse para evitar problemas en caso de que hubiera grandes avenidas de agua en las aportaciones.

En estos elementos es donde realmente se hace la gestión del agua, dejando que salga un caudal mayor o menor en función de la estrategia escogida (véase el apartado 3.B). Para llevar a cabo esta gestión se tienen como referencia las curvas de garantía y resguardo anteriormente citadas, los volúmenes máximo y mínimo del embalse, así como las tablas de gasto para el embalse. Estas tablas indican el gasto óptimo de un embalse en función de la semana del año considerada, la situación del propio embalse y de otros de referencia en la misma cuenca y las aportaciones recibidas en el embalse. Estas tablas son calculadas por otras herramientas de más largo plazo, que utilizan por ejemplo técnicas de optimización como programación dinámica estocástica.

2) Canales

Estos elementos conducen el agua entre otros elementos de la cuenca, de igual forma que ocurre con las conexiones directas entre elementos. No realizan ningún tipo de gestión del agua, solamente transportan el caudal de agua desde la conexión de entrada hasta la de salida. Lo que diferencia a estos elementos de una conexión es que imponen una limitación al caudal máximo que puede circular por ellos y por eso se hace necesaria su consideración.

3) Centrales

Las centrales son las encargadas de generar energía eléctrica a partir del caudal que las atraviesa. En los sistemas eléctricos de potencia son la pieza fundamental a considerar. Sin embargo, en el simulador hidráulico no llevan a cabo ningún tipo de gestión del agua, ya que ésta viene decidida por los embalses situados aguas arriba de las mismas. Desde ese punto de vista, su gestión es como la de un canal.

Como resultado de la simulación, en las centrales se calcula la producción eléctrica en función del caudal que pasa por ellas. La conversión de caudal en energía se realiza a través de un coeficiente energético, cuyo valor depende linealmente¹ del salto de agua que vea la turbina entre la cota de agua del elemento situado aguas arriba y la cota más alta entre su cota de desagüe y la del elemento aguas abajo. Asimismo, la producción diaria se reparte heurísticamente entre horas de punta y valle del día, intentando ubicar la mayor parte de la producción posible en las horas de punta, ya que en ese caso sustituirán a los grupos que usen tecnologías más caras.

¹ Esta dependencia es no lineal pero para intervalos cortos de tiempo en los que normalmente no se producen variaciones importantes de la cota, como es un día, se puede suponer lineal.

También se considera la posibilidad de que algunas centrales dispongan de grupos de bombeo y puedan recoger agua de los elementos aguas abajo y almacenarlas en los elementos aguas arriba (por lo general, ambos serán embalses). Sin embargo, es importante resaltar que el bombeo no se realiza con criterio económico sino para evitar los vertidos, como se verá más adelante (en el apartado 4.B).

4) Aportaciones

Estos objetos son los encargados de introducir el agua en el sistema. Representan los puntos de aforo del río en los que se mide el agua que llega proveniente de la lluvia o de afluentes o tramos de río que no estén considerados. Estos elementos no tienen otros elementos conectados aguas arriba. El caudal de salida que dan es la aportación correspondiente al día que se esté simulando en la serie de datos que se está considerando. Esta serie de datos puede provenir de aportaciones medidas históricamente o ser una serie sintética obtenida a partir de modelos de previsión, que pueden usar métodos de series temporales, por ejemplo.

5) Unión de ríos

Este tipo de objetos agrupa a otros elementos de la cuenca en la que varios ríos se unen. Por causa de esa unión se tiene una limitación máxima al caudal conjunto que pueden dejar pasar todos los elementos que forman la unión. Un ejemplo claro de esta situación se encuentra en dos embalses que desagüen en los grupos de la misma central. Como ambos embalses comparten las tuberías de entrada a las turbinas de la central, debe realizarse una gestión conjunta de este elemento.

La manera de gestionar las uniones se organiza en dos fases: en primer lugar se calculan las gestiones por omisión de todos los elementos, y si con ellas se incumple la condición de caudal conjunto máximo, se procede a rebajar los caudales de salida de los elementos, siguiendo un orden de prioridad que maximice la producción hidroeléctrica, por ejemplo.

B. Tipos de gestión de embalses

Éste es el punto principal de decisión del simulador, ya que el resto del proceso, como se verá en el próximo apartado, es automático. Con las diferentes estrategias se han intentado recoger todas las posibles alternativas que se pueden presentar en la realidad, para gestionar embalses de características hidráulicas diferentes. En los siguientes apartados se comentan las políticas de gestión posibles.

1) Mediante tabla de gasto

Este tipo de gestión se utiliza en aquellos embalses de gran tamaño que controlan el funcionamiento general de la cuenca, que típicamente están situados en su cabecera. La tabla de gasto, que ya se ha mencionado más arriba, proporciona el gasto óptimo que debe realizar el embalse a partir de los valores de entrada, que son:

- La semana a la que pertenece el día que se está simulando.
- Un índice de la situación hidrológica de la cuenca. Este índice puede ser la aportación en un punto significativo de la cuenca o las aportaciones totales. Esto sirve para marcar si está en un año seco o húmedo dependiendo de la serie histórica o sintética que se esté simulando.
- El volumen del propio embalse. Como es lógico, cuanto mayor sea, mayor puede ser el gasto a realizar, y viceversa.
- El volumen de otro embalse de la cuenca, en caso de que haya otro embalse significativo en ella. Este dato proporciona información adicional sobre la situación de la cuenca y permite gestionar acompasadamente los embalses principales de la cuenca.

Con estos cuatro datos, o tres si no se considera otro embalse, se obtiene el gasto prescrito para el embalse por interpolación en la tabla.

2) Gasto del caudal de entrada

Esta estrategia es la indicada para los embalses pequeños. Al no tener mucha capacidad de gestión, deben comportarse prácticamente como grupos de hidráulica fluyente y turbinar el caudal que les llega.

3) Curva de garantía

En este caso, el objetivo es realizar tanto gasto de agua como sea posible. Si el volumen del embalse está situado por debajo de la curva de garantía, no se puede turbinar. Pero todo volumen que esté por encima de la curva está disponible para producir electricidad. Esta política de gestión puede ser la apropiada para embalses de tamaño medio en épocas de falta de energía.

4) Curva de resguardo

Con esta estrategia se lleva el volumen a la curva de resguardo. Esta curva está calculada para evitar riadas o desbordamientos de los embalses. A pesar de ello, dejar el embalse en la curva de resguardo puede ser peligroso si se produce una gran avenida en las aportaciones. De esta manera, se está haciendo reserva de agua, con lo que es la opción que debe usarse en embalses de tamaño medio en años húmedos.

4. Método de simulación

La simulación de la cuenca hidráulica debe permitir observar la evolución de la misma frente a diferentes escenarios de aportaciones. Al decidir la operación de los grupos hidroeléctricos, el principal objetivo es seguir las consignas de gestión de los embalses. Estas consignas vienen dadas por la estrategia de gestión escogida para cada embalse, de entre las que se han definido en el apartado 3.B, y marcan las direcciones generales de operación del sistema. Sin embargo, hay otros factores a considerar que pueden introducir modificaciones en las decisiones anteriores. Estos factores son:

- Se debe evitar que se produzcan vertidos. Si un embalse se ve obligado a deshacerse de agua porque éste ha alcanzado la cota fijada como máxima, se está perdiendo la oportunidad de producir con ella en otro momento en el que será necesario recurrir a un grupo más costoso. Esto supone que se está incurriendo en costes que quizá podrían haberse evitado con una mejor gestión del embalse.
- Se deben asegurar unos caudales mínimos circulando por algunos tramos del cauce del río, exigidos para proporcionar los riegos y los caudales ecológicos mencionados anteriormente.

Para responder a estas necesidades, en este artículo se propone un método de simulación que consiste en tres pasadas que se describen en los siguientes apartados. De manera muy general, la tarea que se lleva a cabo en cada pasada es:

1. Decide una gestión inicial de los embalses.
2. Modifica la gestión anterior para evitar en todo lo posible que se produzcan vertidos y que no se den los riegos o los caudales ecológicos.
3. Calcula las producciones de los grupos con los caudales ya decididos.

Con los resultados obtenidos de la simulación de varias series de aportaciones anuales, se presentan los resultados detallados para cada serie y las curvas obtenidas por medio de cálculos estadísticos. Más concretamente, se dan valores medios y de percentiles, que permiten apreciar la distribución de los resultados.

A. Primera pasada

En la primera pasada se lleva a cabo una simulación de los elementos de la cuenca que proporciona la gestión inicial de los embalses. Para poder simular un elemento es necesario saber de cuánto agua dispone, por lo que esta pasada se realiza desde los elementos de aportaciones en sentido aguas abajo.

Cada elemento se puede gestionar de manera independiente, razón por la que se ha escogido el enfoque de Programación Orientada a Objetos. En este paso, para cada elemento cuyo caudal de entrada es conocido, es decir, cuyos elementos aguas arriba ya han sido simulados, se decide cuál es la cantidad de agua que sale del elemento en función, en el caso de los embalses, del volumen del embalse v , del caudal de entrada c y de la estrategia escogida para él. Si se considera cada tipo de elemento individualmente:

- Los embalses deciden en función del tipo de gestión elegida (véase el apartado 3.B). En concreto, se puede obtener el gasto prescrito g para el embalse de una de las siguientes maneras
 - Mediante tabla de gasto
 - Gastando el caudal de entrada, como si fuera un canal

$$g = c \quad (1.1)$$

- Para llevar el volumen del embalse a la curva de garantía v^{gar}

$$g = c + \frac{v - v^{gar}}{0.0864} \quad (1.2)$$

- Para llevar el volumen del embalse a un porcentaje k^{resg} de la curva de resguardo v^{resg}

$$g = c + \frac{v - k^{resg} \cdot v^{resg}}{0.0864} \quad (1.3)$$

- Canales: como se ha mencionado anteriormente, los canales sólo conducen el agua y ponen a la salida el caudal de entrada

$$g = c \quad (1.4)$$

- Centrales: de manera similar a los canales, en esta pasada las centrales únicamente llevan a la salida el caudal de entrada

$$g = c \quad (1.5)$$

- Aportaciones: las aportaciones ponen como salida del elemento el dato de la serie que corresponda al día simulado.
- Uniones de río: las uniones de río son grupos de elementos en los cuales se tiene una restricción de caudal conjunto máximo. En primer lugar, se lleva a cabo la gestión de los elementos de forma individual, sin tener en cuenta que forman parte de la unión. Una vez que se ha obtenido la gestión individual se comprueba si verifican la restricción de caudal máximo. Si la violan es necesario reducir el gasto de los elementos aguas arriba con algún criterio hasta cumplirla.

Además de calcular el gasto que va a hacer cada elemento, se calculan otras magnitudes que se usan en la segunda pasada para corregir vertidos y la falta de caudales mínimos exigidos. Estas magnitudes son el volumen adicional que puede proporcionar el elemento v^a , el volumen adicional que puede retener el elemento v^r , el volumen adicional que necesita el elemento de los elementos aguas arriba pv^a y el volumen que necesita el elemento que retengan aguas arriba pv^r . Estas cantidades sólo toman valor distinto de cero en los embalses, en los cuales se realiza el cálculo de las mismas en función del gasto decidido para el embalse g , el caudal máximo que puede dejar salir g^{max} , el caudal mínimo que se le exige g^{min} y los vertidos $vert$ que esté teniendo. Además se tiene el volumen que pueden retener v_{ac}^r y el que pueden proporcionar adicionalmente v_{ac}^a los elementos situados aguas arriba. Entonces se realizan las siguientes comprobaciones:

- Si se están produciendo vertidos, en primer lugar aumenta el caudal de salida para evitar que se produzcan. Si haciendo el gasto máximo del embalse sigue habiendo vertidos $vert'$, entonces se pide a los elementos situados aguas arriba que retengan el agua necesaria

$$pv^r = \min(v_{ac}^r, 0.0864 \cdot vert') \quad (1.6)$$

- Si en el elemento se está dejando de dar el caudal mínimo exigido, se aumenta en todo lo posible el gasto del embalse para conseguir darlo. Si aun así con el gasto máximo que se puede hacer \bar{g} no es posible cubrir el caudal mínimo, se pide a los elementos situados aguas arriba que dejen salir más caudal

$$pv^a = \min(v_{ac}^a, 0.0864 \cdot (g^{min} - \bar{g})) \quad (1.7)$$

- Si no se está en ninguno de los dos casos anteriores, el embalse puede contribuir al sistema reteniendo agua o dejando salir más, para evitar problemas en los elementos situados aguas abajo. En este caso no se hacen peticiones

$$\begin{aligned} pv^a &= 0 \\ pv^r &= 0 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Si el volumen final del embalse v^f se encuentra por debajo de un valor \bar{v} calculado para asegurar que en el futuro no se van a producir vertidos, se guardan los siguientes valores para el elemento

$$\begin{aligned} v^a &= v^f \\ v^r &= \bar{v} - v^f \end{aligned} \quad (1.9)$$

En los elementos de tipo unión de ríos se hace este cálculo individualmente para cada uno de los elementos que lo forman, y en el resto de elementos estas magnitudes toman valor 0

$$\begin{aligned} v^a &= 0 & pv^a &= 0 \\ v^r &= 0 & pv^r &= 0 \end{aligned} \quad (1.10)$$

En todos los elementos se va actualizando el valor de volumen que se puede proporcionar adicionalmente o que se puede retener en el propio elemento y en los situados aguas arriba de él, como sigue

$$\begin{aligned} v_{ac}^a &= v_{ac}^a + v^a - pv^a \\ v_{ac}^r &= v_{ac}^r + v^r - pv^r \end{aligned} \quad (1.11)$$

Con estas variables se está almacenando información para que en la siguiente pasada se puedan modificar las gestiones iniciales con el fin de evitar los vertidos (usando los volúmenes que se pueden retener) y los caudales mínimos exigidos (usando los volúmenes adicionales). Esto se discute en mayor detalle en el siguiente apartado.

B. Segunda pasada

Esta pasada se realiza desde los elementos en la desembocadura del río en dirección aguas arriba. En ella se van repartiendo las peticiones de agua adicional o agua a retener entre los elementos situados aguas arriba del elemento que realiza la petición. Este reparto se hace de forma proporcional a la capacidad de cada elemento para dar más agua o retenerla, datos que cada elemento ha ido almacenando en la primera pasada en forma de su capacidad (v^a y v^r) y la capacidad acumulada desde los elementos aguas arriba (v_{ac}^a y v_{ac}^r).

En cada elemento que tenga peticiones desde aguas abajo, se puede dar uno de los dos casos siguientes:

- Que tenga peticiones de caudal adicional desde los elementos aguas abajo pv_{ac}^a . Entonces, se aumentará el gasto que realiza el elemento como sigue

$$g = g + \min\left(v^a, pv_{ac}^a \frac{v^a}{v_{ac}^a}\right) / 0.0864 \quad (1.12)$$

- Que desde aguas abajo se le pida retener agua pv_{ac}^r , para evitar vertidos. En este caso el elemento reducirá el caudal de salida en función de sus posibilidades

$$g = g - \min\left(v^r, pv_{ac}^r \frac{v^r}{v_{ac}^r}\right) / 0.0864 \quad (1.13)$$

Aunque en casos teóricos podría ocurrir que un mismo elemento tuviera que retener aguas para unos elementos aguas abajo y proporcionar mayor caudal para otros, estos son casos patológicos que no suelen presentarse en la realidad. Un ejemplo podría ser el de una situación hidrológica muy seca en la que no se pudieran dar los caudales mínimos, pero en un punto de la cuenca hubiera una avenida muy grande en las aportaciones que obligase a verter en el embalse que estuviese recibéndola. Sin embargo, ésta no es una situación que tenga mucha probabilidad de ocurrir en la realidad.

C. Tercera pasada

En esta tercera pasada se empieza con los caudales que circulan por la cuenca ya fijados en las dos anteriores pasadas. En este momento se calcula cuál es la producción de los grupos.

Como se ha dicho antes, el factor de conversión de caudal en energía que rige el funcionamiento de las turbinas de las centrales depende de forma lineal del salto de agua que ve la turbina. Ese salto es la diferencia de cota entre el elemento situado aguas arriba de la central y el elemento situado aguas debajo de la central o su cota de desagüe.

Para realizar el cálculo se toma como cota de los embalses la cota promedio de la cota al principio del incremento de la simulación y la cota después del incremento de la simulación. Es decir, se está tomando una situación media, para que la producción refleje la producción media del día, ya que al no considerar detalle horario no se tiene otro medio más preciso de calcularla. Una vez obtenidas las cotas aguas arriba c^u y aguas abajo c^d el coeficiente energético ce se calcula

$$ce = k^{ce0} + k^{ce1}(c^u - c^d) \quad (1.14)$$

donde k^{ce0} y k^{ce1} son coeficientes que dependen de las características de cada central.

Además en este paso se reparte la producción entre horas de punta y de valle del día (respectivamente h^p y h^v). El objetivo es colocar toda la producción posible en las horas de punta, cuando es necesario utilizar más grupos y sustituirá por tanto a tecnologías más caras. Si el gasto de

agua g que va a hacer una central es el máximo que permite la central, entonces el gasto en horas de punta g^p y el gasto en horas de valle g^v se ponen al máximo

$$\begin{aligned} g^p &= g \\ g^v &= g \end{aligned} \quad (1.15)$$

Si el gasto diario es menor que el máximo, entonces se intenta ubicarlo en las horas de punta

$$\begin{aligned} g^p &= \min\left(g^{\max}, g \frac{h^p + h^v}{h^p}\right) \\ g^v &= \max\left(0, g \frac{h^p + h^v}{h^v} - g^p \frac{h^p}{h^v}\right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

En este punto, a partir de los gastos y los coeficientes energéticos es posible calcular la producción total p y la de las horas de punta p^p y valle p^v

$$\begin{aligned} p &= 0.0864 \cdot ce \cdot g \\ p^p &= 0.0036 \cdot ce \cdot g^p \cdot h^p \\ p^v &= 0.0036 \cdot ce \cdot g^v \cdot h^v \end{aligned} \quad (1.17)$$

donde el coeficiente 0.0864 convierte de m^3/s a $hm^3/día$, y el coeficiente 0.0036 convierte de m^3/s a $hm^3/hora$.

5. Resultados

En esta sección se van a presentar resultados de simulación de un caso real del sistema hidroeléctrico español.

Se ha realizado la simulación con datos de 27 años diferentes, cuyos resultados se presentan de forma gráfica en Fig. 1 y Fig. 2. En la figura 1 se pueden ver las curvas de volumen para un embalse de gran tamaño, en el que se ha usado la tabla de gasto para decidir la salida del mismo. El embalse tiene definida una curva de garantía y otra de resguardo, que a propósito se han acercado para poder apreciar cómo se ajustan las trayectorias de volumen de cada simulación al espacio dejado por estas dos curvas. En la simulación se indicó que el máximo fuese el 95% de la curva de resguardo.

En la Fig. 2 se presentan los resultados para un embalse de tamaño pequeño. En él se ha escogido la gestión que lleva el volumen a la curva de garantía. Se encuentra en un punto de la cuenca en la que recibe muchas aportaciones, y por eso se puede observar que hay un porcentaje de curvas que no llegan a dejar el volumen al mínimo pedido. Además, existe otro porcentaje de simulaciones en las que se tiene el volumen por debajo de la curva de garantía. Este es el riesgo que existe al llevar el volumen a ese mínimo: en el día concreto simulado se deja el volumen al mínimo, pero si en los días sucesivos no llegan aportaciones y aguas abajo del elemento se tienen que satisfacer riegos, el embalse se ve obligado a bajar por debajo de la curva de garantía. Este tipo de comportamientos se producen porque el algoritmo de simulación sólo considera un día, y no tiene en cuenta lo que pueda pasar en los siguientes.

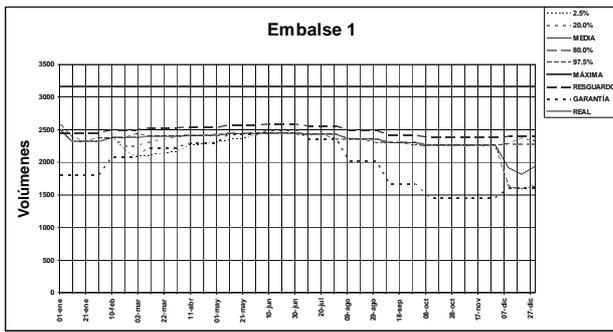


Fig. 1. Volúmenes para un embalse de gran tamaño

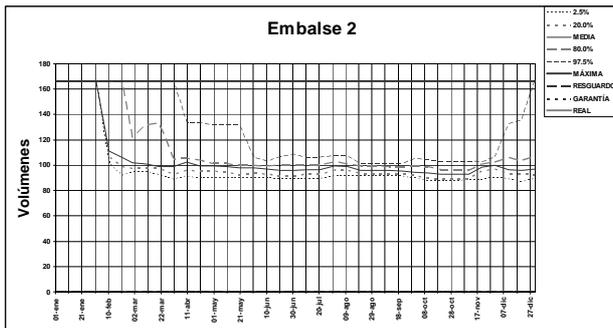


Fig. 2. Volúmenes para un embalse de pequeño tamaño

6. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un método de simulación de cuencas hidráulicas, basado en un esquema de simulación discreta de incremento fijo, basado en Programación Orientada a Objetos. Se ha dividido en tres pasadas que permiten obtener una gestión válida de la

cuenca hidráulica. Además se ha preparado una herramienta con la que se puede poner en práctica la simulación propuesta. Con dicha herramienta se han obtenido resultados que permiten comprobar que la gestión simulada es correcta. En el artículo se presenta un caso de aplicación real del sistema eléctrico español.

Bibliografía

- [1] Wood, A.J. and Wollenberg, B.F., *Power generation, operation, and control*, 2nd edition John Wiley & Sons (1996)
- [2] Law, A.M. and Kelton, W.D., *Simulation modelling and analysis*, 3rd edition, McGraw-Hill (2000)
- [3] Allen, E. et al., "Interactive Object-Oriented Simulation of Interconnected Power Systems Using SIMULINK", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 44, No. 1, pp. 87-95, February 2001
- [4] Román, J., *Reliability Assessment of composite power systems containing mixed hydro thermal generation*, Ph.D. Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, UMIST (1991)
- [5] Sankarakrishnan, A. and Billinton, R., "Sequential Monte Carlo simulation for composite power system reliability analysis with time varying loads", 1995 *IEEE/PES Winter Meeting*
- [6] Van Hecke, J. et al., "Sequential probabilistic methods for power system operation and planning", CIGRE TF38.03.13, *Elektra* No. 179 August 1998.
- [7] De Cuadra, G., *Modelos de explotación para la optimización y simulación estocástica de sistemas de energía eléctrica*, Tesis doctoral, Universidad Pontificia Comillas de Madrid (1998)