

MODELADO Y SIMULACIÓN DE CENTRALES HIDRÁULICAS

Juan Garrido, Ángel Zafra*, Francisco Vázquez
Dpto. de Informática y Análisis Numérico. Universidad de Córdoba
*Endesa Generación UPH Sur

Resumen

En este trabajo, llevado a cabo en colaboración con la empresa Endesa Generación, se presenta el desarrollo en EcosimPro de una librería de componentes con los que modelar centrales hidráulicas. Se crea un modelo de una central general, en el que se seleccionan el número de grupos hidroeléctricos y de compuertas de presa, de tal manera que dicho modelo sirva para simular el comportamiento de varias plantas generadoras de similares características de explotación. Con este modelo se pretenden obtener datos interesantes en simulación como pueden ser la evolución del nivel de embalse, los caudales de paso, las presiones en cualquier punto del sistema, las pérdidas en los elementos, etc. Además, para facilitar su utilización se ha creado mediante Visual Basic 6.0 una aplicación gráfica con la que configurar los parámetros de la central y simular su comportamiento ante diversas situaciones. Para validar el simulador se usa como ejemplo práctico la central hidroeléctrica de Villafranca en Córdoba.

Palabras clave: modelado orientado a objetos, centrales hidráulicas, simulador, EcosimPro.

1 INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que existen poderosas razones para el uso del modelado y la simulación: comprobar y optimizar el diseño de un sistema antes de su construcción, evitar errores de diseño, aumentar la calidad, reducir costes, evaluar el rendimiento, predecir comportamientos, entrenar operarios en condiciones habituales (o no), etc. Un caso en particular donde resultan muy buenas herramientas, es aquel en el que el coste de experimentación es muy alto, ya sea por el alto coste de los equipos o porque el sistema no puede detenerse, como ocurre en las plantas energéticas.

El modelado orientado a objetos (MOO) es un paradigma relativamente reciente, ya que su uso se ha generalizado en la década de los noventa. Proporciona al modelador las suficientes

características para aumentar la complejidad (*encapsulación*), le habilita para poder reutilizar los modelos (*herencia y agregación*), y le permite crear modelos independientes que sean fáciles de mantener.

El desarrollo modular permite a un sistema ser modelado desde abajo hacia arriba. Las librerías básicas de componentes se pueden combinar para crear componentes cada vez más complejos combinando dos métodos:

- Extensión por herencia a partir de componentes existentes.
- Instancia y conexión de componentes existentes.

Estas ideas se aplican para crear componentes que representen un sistema completo. Los componentes intermedios pueden ser también simulados, lo cual reduce ampliamente los tiempos de mantenimiento y desarrollo [5].

El presente trabajo surge como un convenio entre la Universidad de Córdoba y la empresa Endesa Generación, la cual propuso la elaboración de un software con el que simular el comportamiento del conjunto de centrales hidráulicas de tipo fluyente o de pasada que forman parte de la Unidad de Producción Hidráulica Sur (UPH Sur).

Estas centrales se encuentran en las inmediaciones de los ríos, y en ellas no existe una gran acumulación de agua "corriente arriba" de las turbinas. En las centrales de este tipo, las turbinas deben aceptar el caudal disponible del río "como viene" con sus variaciones, perdiendo el agua sobrante por rebosamiento. Para evitar esta pérdida, en la mayoría de las ocasiones se usa un embalse relativamente pequeño con varias compuertas de presa con las que mantener un nivel mínimo. La estrategia de control intenta que toda el agua procedente del río sea turbinada; pero si la avenida supera la capacidad máxima de caudal de los grupos y se rebasa cierta cota en el embalse, prima el control de nivel con la apertura y cierre de compuertas.

Debido a que el salto bruto en estas centrales es reducido, se utilizan turbinas tipo Francis y tipo Kaplan [4]. En la Figura 1 se muestra la planta y

corte de una central de esta clase, en donde se aprovecha un estrechamiento del río y la obra del edificio de la central (casa de máquinas), el cual puede formar parte de la misma presa.

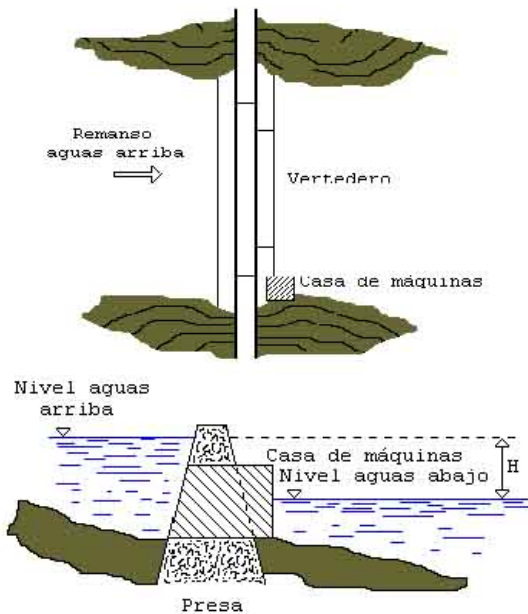


Figura 1: Planta y corte de una central fluyente

Esta comunicación tiene como objetivo mostrar el modelado orientado a objetos llevada a cabo con EcosimPro de los distintos componentes de una central hidroeléctrica y su conexionado para conformar un sistema más complejo, como es una central general de tipo fluyente. Además, se desarrolla en Visual Basic un interfaz gráfico para simular dicho modelo y servir de entrenador al personal de planta.

2 MODELADO

Para el modelado de los diferentes componentes se ha utilizado el entorno EcosimPro 3.4, así como su herramienta de diseño EcoDiagram para el diseño de sus símbolos gráficos y su conexionado. Este entorno permite modelar los diversos elementos de una central, de forma que sean reutilizables, reconfigurables, y que pueden ser validados de forma aislada. Asimismo dispone de determinadas herramientas de interpolación en curvas, necesarias para el modelado de determinadas características del sistema, cuyos resultados son obtenidos de forma dinámica durante la simulación [2]. Al diseñar esta librería, llamada "Centrales", se han aprovechado las ventajas que ofrece el modelado orientado a objetos, tales como la herencia, la jerarquización y la encapsulación en componentes.

A continuación se describen los aspectos principales del modelado de los componentes más significativos.

2.1 EMBALSE

Para describir su comportamiento nos basamos en el principio de conservación de la masa. Tomando la densidad del agua constante y conocidos los caudales de entrada y salida del embalse, a través de (1) podemos calcular el volumen en cada instante por integración. A partir de una tabla cota-volumen característica del embalse, se determina por interpolación su cota, gracias a las posibilidades que EcosimPro brinda para tales cálculos. En la tabla 1 aparecen los datos suministrados por Endesa para el embalse de Villafranca.

$$\dot{V} = \sum q_{entrada} - \sum q_{salida} \quad (1)$$

Tabla 1: Volumen (Hm³) frente a cota (m)

Cota (m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
115.00	-	-	-	-	0.00	0.02	0.05	0.09	0.12	0.15
116.00	0.18	0.21	0.24	0.27	0.31	0.34	0.37	0.41	0.45	0.49
117.00	0.53	0.57	0.62	0.66	0.71	0.76	0.81	0.87	0.93	0.99
118.00	1.05	1.12	1.19	1.26	1.34	1.42	1.50	1.59	-	-

Conocida la cota del nivel de agua y la de la toma del embalse, la presión a la salida es determinada con la ecuación (2), donde ρ es la densidad del agua y h el nivel de agua en metros sobre la toma del embalse.

$$p_{salida} = \rho * g * h + p_{atmosférica} \quad (2)$$

El icono realizado para la librería gráfica se muestra en la figura 2.

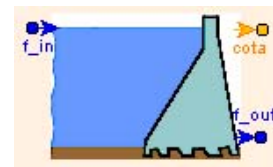


Figura 2: Símbolo del embalse

2.2 COMPUERTAS

Las compuertas son los dispositivos encargados de dar paso, detener o regular el caudal de agua en el embalse. En las presas fluyentes se utilizan para regular la cota aguas arriba cuando ello no es posible únicamente con los grupos hidroeléctricos. Para su modelado se parte de un componente abstracto llamado "Conducción". Éste engloba las características comunes de cualquier componente de tipo hidráulico, como son los puertos de entrada y salida del flujo de agua y el hecho de que la suma de los caudales de entrada es igual a la suma de los caudales de salida (ecuación 3).

A partir de él, se crea otro llamada "Compuerta", también abstracto, que reúne las características comunes de cualquier compuerta de presa, de tal manera, que las compuertas concretas hereden el

comportamiento genérico de esta clase y en ellas sólo se definan sus aspectos específicos.

$$\sum q_{entrada} = \sum q_{salida} \quad (3)$$

Cada compuerta tiene un puerto de entrada de mando para órdenes de apertura, cierre o parada y un puerto de salida para indicar su apertura. Como parámetros configurables encontramos su ancho, su máxima apertura, su cota y su velocidad de movimiento. En cuanto a su comportamiento dinámico, el salto de agua sobre la compuerta se calcula en función de las presiones de entrada y salida. La apertura actual es obtenida por integración a partir de la velocidad de apertura de la compuerta, que depende de la señal de mando.

Se han modelado distintos tipos de compuertas, como las compuertas tipo stoney, partidas y de clapeta, que se diferencian básicamente en las expresiones de su coeficiente de desagüe y su caudal de salida. Para el tipo stoney el caudal viene dado por (4), en donde el coeficiente de desagüe es igual a 0.64. Su símbolo se muestra en la figura 3.

$$q_{salida} = C \cdot long \cdot apertura \cdot \sqrt{g \cdot (salto - apertura)} \quad (4)$$

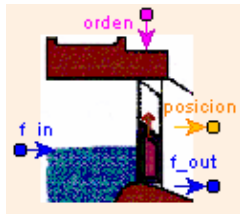


Figura 3: Símbolo de la compuerta tipo Stoney

2.3 TURBINA

La turbina hidráulica es una máquina rotativa movida por el agua, de forma que convierte la energía hidráulica, de una corriente o salto de agua, en energía mecánica. Para modelarla, primero se crea una clase general turbina (que a su vez proviene de "Conducción") con las propiedades comunes de cualquier turbina (potencia nominal, velocidad nominal, caudal máximo, cota y secciones de entrada y salida, etc.). La potencia de entrada viene dada por (5). En dicha expresión es necesario conocer el salto bruto sobre la turbina, el cual se calcula según (6).

$$P_{entrada} = \rho_{agua} \cdot g \cdot salto_{bruto} \cdot q_{entrada} \quad (5)$$

$$salto_{bruto} = \frac{P_{ent} - P_{sal}}{g \cdot \rho_{agua}} + z_{ent} - z_{sal} + \frac{(q/a)_{ent}^2 - (q/a)_{sal}^2}{2g} \quad (6)$$

Por herencia de este componente, se define otro, llamado "Kaplan", que reúne las características específicas de una turbina tipo Kaplan, aunque puede

configurarse para que funcione como una turbina tipo Francis anulando la acción del rodete.

$$salto_{bruto} = \frac{P_{ent} - P_{sal}}{g \cdot \rho_{agua}} + z_{ent} - z_{sal} + \frac{(q/a)_{ent}^2 - (q/a)_{sal}^2}{2g} \quad (6)$$

El comportamiento dinámico de una turbina es bastante complejo. Para definirlo nos valemos de tres tablas de datos experimentales, a partir de las cuales, por interpolación, se calculan parámetros como el rendimiento en función del salto y el caudal turbinado, el coeficiente de desagüe de la turbina según la posición del distribuidor, o la posición de referencia del rodete mediante la curva de correlación distribuidor-rodete. Estas tablas deben obtenerse para cada modelo de turbina que se desee simular.

Conocido el factor de desagüe, el caudal turbinado se aproxima con la expresión (7). Con todo ello se puede calcular la potencia eléctrica producida por el grupo $P_{salida} = \eta \cdot P_{entrada}$.

$$q = \text{factorde} \text{desagüe}(\text{distribuidor}) \cdot \sqrt{\text{salto}} \quad (7)$$

Este elemento también consta de dos puertos de mando para abrir, cerrar o parar el distribuidor o el rodete, y dos puertos de salida para sus señales de posición. En la figura 4 aparece su símbolo.

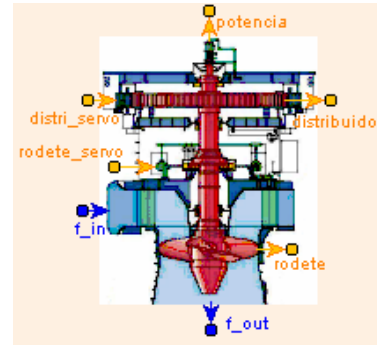


Figura 4: Símbolo de la turbina Kaplan/Francis

2.4 TUBOS

Se ha definido un componente abstracto llamado "Tubo" (derivado del tipo "Conducción") que reúne las características comunes de cualquier componente con un flujo cerrado y que se asemeje a un tubo, y del que se derivan otros, tales como las tuberías, los codos, los estrechamientos o los ensanchamientos. Su comportamiento dinámico se centra en el cálculo de las presiones de entrada y salida, para lo cual es necesario estimar las pérdidas de carga Hr (8) [1].

$$Hr = 0.0827 \cdot f \cdot long \cdot \frac{q^2}{d_{menor}^5} + \frac{Kr}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{4 \cdot q}{d_{menor}^2 \pi} \right)^2 \quad (8)$$

Éstas son la suma de las pérdidas por fricción (f es el conocido coeficiente de fricción en tuberías) y las pérdidas por accidente (propias para un codo, un estrechamiento, etc.). Para su cálculo se determina si el régimen es laminar o turbulento en función del número de Reynolds. Conocidas las pérdidas de carga, la presión de salida viene determinada por (9).

$$p_{sal} = p_{ent} + (z_{in} - z_{sal}) \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot \left((q_{ent} / a_{ent})^2 - (q_{sal} / a_{sal})^2 \right) / 2 - Hr \cdot g \cdot \rho \quad (9)$$

2.5 CONTROLADORES

Estos componentes engloban a los controladores proporcionales, PI y PID, con los que se intenta hacer que una variable siga a una referencia basándose en el error de realimentación. Primero se ha creado un componente abstracto llamado “Controlador” en el que se definen los aspectos más básicos de un regulador. A partir de éste, por herencia se define el controlador proporcional, del cual deriva el controlador PI, y de éste a su vez el PID. El término derivativo del control PID amplifica las señales de alta frecuencia, por lo que se le suele aplicar un filtro paso bajo. Además, para mejorar la respuesta ante perturbaciones y cambios en la referencia se hace que solo dependa de la salida a controlar realimentada y filtrada y_f . Es lo que se conoce como estructura PI-D. Su ecuación viene expresada en (10).

$$u = P + I + D$$

$$u = K_p \cdot e + \frac{K_p}{T_i} \int e \cdot dt - T_d \cdot \frac{dy_f}{dt} \quad (10)$$

Estos controladores actúan sobre el distribuidor y rodete para regular su posición y para controlar la velocidad de la turbina en el arranque y parada del grupo. En la figura 5 aparece el símbolo gráfico con el que se identifica el componente PID.

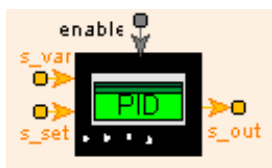


Figura 5: Símbolo del controlador PID

2.6 AUTÓMATA DE LAS COMPUERTAS

En este componente se modela el autómata que se encarga de la apertura y cierre de las compuertas. Por su diseño, es capaz de controlar un máximo de ocho compuertas tanto en manual como en automático. En el modo automático lo que se pretende es mantener la cota entre dos valores de referencia, uno inferior y otro superior. Cuando la cota supera la referencia superior, las compuertas comienzan a abrir unos 25

cm una detrás de otra hasta que el nivel desciende por debajo del límite superior. Cuando la cota está por debajo de la referencia inferior, se cierran las compuertas unos 25 cm en el orden inverso hasta alcanzar el límite de consigna inferior.

Este programa se implementa en la sección “discrete” del componente. Se ejecuta cada periodo de muestreo si el autómata funciona en modo automático. Si está en modo manual, las órdenes de apertura, parada o cierre debe darlas el usuario durante la simulación. En la figura 6 se muestra su símbolo gráfico.

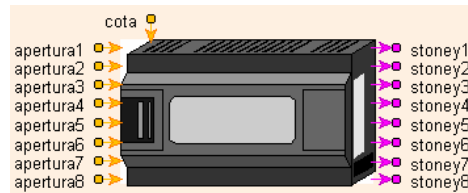


Figura 6: Símbolo del autómata de las compuertas

Hay que decir que aunque el número máximo de compuertas que se pueden controlar es ocho, hay un parámetro de entrada “N” con el que se puede especificar un número inferior.

2.7 AUTÓMATA DE UN GRUPO

Este elemento regula el funcionamiento de cada uno de los grupos hidroeléctricos de manera independiente, por lo que debe haber uno por cada grupo. Es el encargado de controlar su arranque, parada y acoplamiento a la red. Además, mientras el grupo está acoplado funciona como regulador de la cota del embalse a una consigna prefijada, actuando sobre el servomotor del distribuidor de la turbina. Este control de nivel se basa en mandar pulsos de apertura o cierre con una frecuencia inversamente proporcional al error. Al igual que en el otro autómata, toda el programa se implementa en la sección “discrete” del componente y se ejecuta cada periodo de muestreo (que es otro parámetro configurable). Se puede ajustar la carga máxima y mínima del grupo, la cota de control, la cota de parada y otros aspectos del regulador de nivel. En la figura 7 aparece su símbolo gráfico.

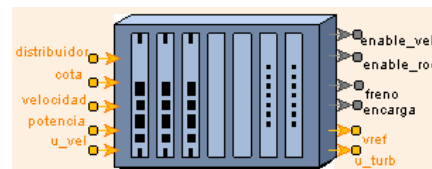


Figura 7: Símbolo del autómata de un grupo

2.8 GENERADOR SÍNCRONO

Este componente se utiliza para modelar el generador eléctrico unido al eje de la turbina que transforma la energía mecánica de giro en energía eléctrica. Su

comportamiento varía según esté o no acoplado a la red. La ecuación que define la dinámica del rotor viene dada por la expresión 11, donde w es la velocidad angular en rad/s. En esta ecuación, “Pr” es la potencia del par resistente, la cual depende del estado del generador. Si está en vacío y sin freno, es proporcional al producto de un factor de pérdidas por el cuadrado de la velocidad angular.

$$\dot{w} = \frac{P_{entrada} - Pr}{J \cdot w} \quad (11)$$

Si el alternador está acoplado “Pr” vale lo mismo que la potencia de entrada. De esta forma \dot{w} es cero y la velocidad angular permanece constante e igual a la que hace que la frecuencia sea de 50 Hz. Con esto, además, se tiene en cuenta el hecho de que una vez que el grupo acopla a la red, prácticamente permanece girando a una velocidad constante (en condiciones normales) aunque abramos o cerremos el distribuidor. Esto es así porque la red tiene una gran inercia y acelera o frena al grupo si la velocidad de éste tiende a variar. Por esta razón, este modelo de generador solo es válido para grupos que se acoplen directamente a la red eléctrica y no funcionen en instalaciones aisladas, es decir, en modo isla. Su símbolo se muestra en la figura 8.

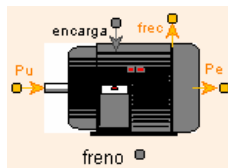


Figura 8: Símbolo del generador síncrono

2.9 GRUPO HIDROELÉCTRICO

Mediante la agregación de componentes más simples se ha creado un componente llamado “Grupo_Indep”, que representa a un grupo hidroeléctrico que funciona independientemente. En la figura 9 se representa el conexionado de los componentes que lo forman, que son los siguientes:

- Una turbina Kaplan/Francis.
- Un generador que gira junto a la turbina y produce la energía eléctrica.
- El autómata que controla el grupo.
- Un controlador PID que se usa como regulador de velocidad (o frecuencia) del grupo. Controla a la turbina durante el arranque y la parada, siendo activado o no por el autómata según el estado deseado del grupo.
- Un controlador PID del rodete, que gobierna el servomotor del rodete de manera independiente. Recibe la posición del distribuidor para determinar, en función de la curva de correlación, la referencia del rodete.

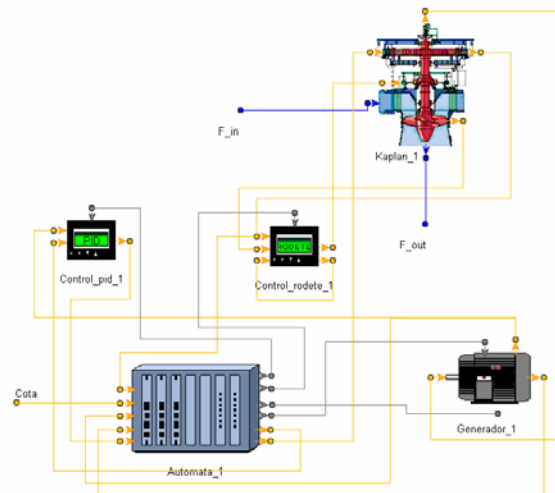


Figura 9: Conexionado del grupo hidroeléctrico

En la figura 10 se muestra el símbolo del grupo hidroeléctrico que se usa en la librería desarrollada, el cual engloba todo el esquema de la figura 9.

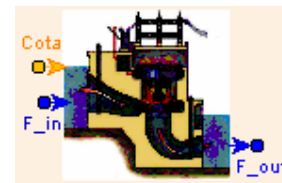


Figura 9: Símbolo del grupo hidroeléctrico

2.10 MODELO DE LA CENTRAL

Por último, una vez creados y explicados los distintos componentes que conforman la librería de centrales diseñada, se implementa el modelo completo de la central hidroeléctrica. En el anexo I se muestra su esquema de conexionado. Los componentes que lo forman son:

- El embalse, de cuya cota va a depender el funcionamiento de la central
- El contraembalse
- El labio fijo
- Ocho compuertas tipo stoney
- Autómata de las compuertas
- Cinco grupos que se pueden configurar como Kaplan o Francis
- Catorce tomas del embalse, una por cada grupo, por cada compuerta y otra para el labio
- Catorce entradas al contraembalse, una por cada grupo, por cada compuerta y otra para el labio

En este proyecto se ha decidido crear la central con un máximo de ocho compuertas y cinco grupos, pues la mayoría de centrales no sobrepasan dicho valor. Sin embargo, el número tanto de compuertas como de grupos puede reducirse, haciendo que no tengan efecto sobre los resultados de la simulación.

3 SIMULADOR

Una vez creado el modelo de una central general que sirva para simular varias centrales con diversas configuraciones, el siguiente paso ha sido la elaboración de una aplicación, un “simulador”, desde el cual se puedan configurar los parámetros del modelo, realizar simulaciones y observar su comportamiento ante distintas circunstancias.

Para ello se ha utilizado la herramienta de desarrollo Visual Basic 6.0 debido a la facilidad que EcosimPro nos brinda para enlazar sus modelos con dicha herramienta. Al crear el modelo de la central y configurar en él un experimento, se genera una librería de enlace dinámico (dll), la cual puede ser llamada desde un programa hecho en Visual Basic. Además, EcosimPro facilita varias instrucciones para ser usadas en Visual Basic y que entre otras muchas acciones, nos permiten cargar el modelo, iniciar su ejecución, pausarlo, pararlo, leer o modificar el valor de variables, etc.

El funcionamiento básico del simulador se muestra en la figura 10. En primar lugar, al iniciar la aplicación aparece una pantalla de presentación con el nombre de la herramienta. Seguidamente se carga el modelo de la central configurado con unos valores por defecto. Tras esto se pasa el control al usuario, el cual puede realizar varias acciones:

- Cargar parámetros de una simulación anterior.
- Configurar los parámetros de la central.
- Guardar estos parámetros en un archivo.
- Pasar a realizar la simulación del modelo.

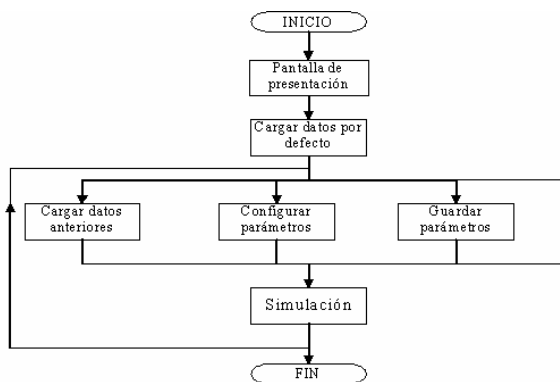


Figura 10: Funcionamiento básico del simulador

La aplicación desarrollada en Visual Basic consta de un módulo de funciones y de seis formularios:

- Pantalla de presentación
- Pantalla principal
- Pantalla de configuración de datos del embalse
- Pantalla de configuración de los grupos
- Pantalla de configuración de las compuertas
- Pantalla acerca del simulador

3.1 FORMULARIO PRINCIPAL

Este formulario contiene la pantalla principal de la aplicación desde la que el usuario controla la simulación del modelo. Para su apariencia hay cuatro posibilidades en función de que controles se muestren y cuales se escondan:

- Mostrar información de los grupos
- Mostrar información de las compuertas
- Mostrar gráficas de los grupos
- Mostrar gráficas de las compuertas

Desde el menú principal, siempre visible, se puede elegir entre cargar datos de una central a partir de un archivo existente, guardarlos o salir del simulador, configurar los parámetros de la central, o iniciar, pausar o detener la ejecución de la simulación.

El formulario también consta de un cuadro donde se muestra el tiempo de simulación en segundos, la cota del embalse y sus caudales totales de entrada y salida, y que tiene una barra de desplazamiento que permite variar la velocidad de simulación.

En el modo de los grupos (figura 11), se muestra la potencia, velocidad, caudal, rendimiento, posición de distribuidor (y de rodete, en las turbinas Kaplan) de cada uno de los grupos seleccionados. Además se indica su cota de control, tipo de turbina y estado (arranque, parada o acoplado), junto con el caudal turbinado, potencia y rendimiento totales.

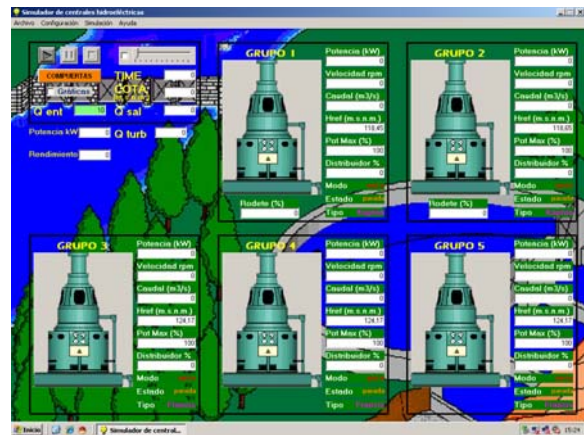


Figura 11: Pantalla del simulador (modo grupos)

En el modo de las compuertas (figura 12) se enseña su apertura, caudal y cota. También se nos permite actuar sobre ellas si se cambia su control a modo manual. Además se muestra el caudal total evacuado por las compuertas y por el labio fijo.

Para cada uno de estos modos anteriores (grupos o compuertas) hay un modo con cuatro componentes gráficos con la evolución temporal de algunas variables de la central. Para los grupos se muestran la

potencia, rendimiento, caudal y posición del distribuidor de cada grupo, y para las compuertas se grafican su apertura y caudal, la cota del embalse y los caudales de entrada y salida totales.



Figura 12: Pantalla del simulador (modo compuertas)

3.1 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS

Para establecer los parámetros de los distintos componentes de la central hay tres formularios a los que se accede desde el submenú de configuración: embalse, grupos y compuertas. Como ejemplo, en la figura 13 se muestra el cuadro de ajuste de los grupos. En él se introducen los valores de los datos de cada grupo, esto es, los de su turbina, su generador, sus controladores y su automático. Aquí es donde se selecciona el tipo de turbina, las tablas de datos de rendimientos y factores desagüe que la caracteriza, o donde se indica la cota de control o parada para el grupo.

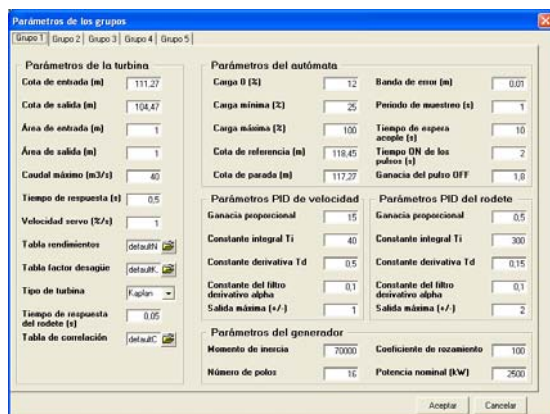


Figura 13: Cuadro de configuración de los grupos

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Una vez explicada la aplicación, ésta se pone a prueba comprobando si su comportamiento es correcto y estudiando su funcionamiento ante distintos casos. La central propuesta para realizar

dicha validación fue la *Central Hidroeléctrica de Villafranca*, ya que cuenta con la mayoría de los componentes y automatismos existentes en este tipo de centrales y su modo de funcionamiento normal (por nivel) se ajusta a la mayor parte de las instalaciones. Como resumen de sus características, podemos citar las siguientes [3]:

- Central tipo fluyente construida en 1948
- Embalse en el río Guadalquivir (0,63 Hm3)
- Presa tipo gravedad de 8,5 m de salto bruto máximo
- Un aliviadero de labio fijo
- Cuatro compuertas de presa (figura 14):
 - 13,5 m de anchura
 - 5,5 m de apertura máxima
- Dos grupos generadores verticales:
 - Potencia nominal: 2,5 MW
 - Velocidad de sincronismo: 187 rpm
 - Turbinas tipo Kaplan
 - Caudal máximo: 36,5 m³/s



Figura 14: Compuertas de la central de Villafranca

A continuación se realizaron varias simulaciones con las que ver el distinto comportamiento de la central. Primero se realiza una simulación para un caudal de entrada de 30 m³/s, luego con el doble, y por último, con unos 100 m³/s, lo cual debe hacer que la regulación de las compuertas entre en funcionamiento. Se parte del reposo y una cota del embalse de 118.45 metros.

En la tabla 2 se comparan el valor real y simulado en el estacionario (tras uno hora en el tiempo de simulación) de las principales variables con las que se valida el modelo. Sólo entra en funcionamiento un grupo, lo cual es suficiente para manejar el caudal de entrada al embalse. La referencia de este grupo es 118.45 m.

Tabla 2: Resultados para un caudal de 30 m³/s

GRUPO I			
	Potencia (kW)	Distribuidor (%)	Cota (m.s.n.m.)
Valores simulación	2476	89	118.45
Valores reales	2500	87	118.44

De manera similar en la tabla 3 aparecen los resultados estacionarios para el segundo caso tras tres horas de simulación. Esta vez entran en funcionamiento los dos grupos, ambos casi a plena carga, para controlar el nivel del embalse a la

referencia del segundo grupo, que es de 118.65 m.

Tabla 3: Resultados para un caudal de 60 m³/s

	Cota (m.s.n.m.)	GRUPO I		GRUPO II	
		Potencia (kW)	Distribuidor (%)	Potencia (kW)	Distribuidor (%)
Valores simulación	118.65	2475	87	2475	87
Valores reales	118.64	2500	88	2440	84

En la tercera simulación (con 100 m³/s de caudal de entrada) los dos grupos son incapaces por sí solos de controlar la cota del embalse, ya que no pueden evacuar todo este caudal aún a plena carga. Ello provoca que sea el autómatas de las compuertas el que se encargue de mantener la cota del embalse entre 118.68 y 118.73 m. Al final de la simulación, que dura unos 7200 segundos, los grupos consumen 69.69 m³/s produciendo una potencia de unos 5001 kW con un rendimiento de 91%. En la figura 15 se aprecian estos resultados. Por su parte las compuertas 1, 2 y 3 abren 25 cm cada una y evacuan un total de 70.92 m³/s. Esta simulación no ha podido ser validada por la imposibilidad de realizar pruebas en unas condiciones similares, pero da una idea de la respuesta de la central.

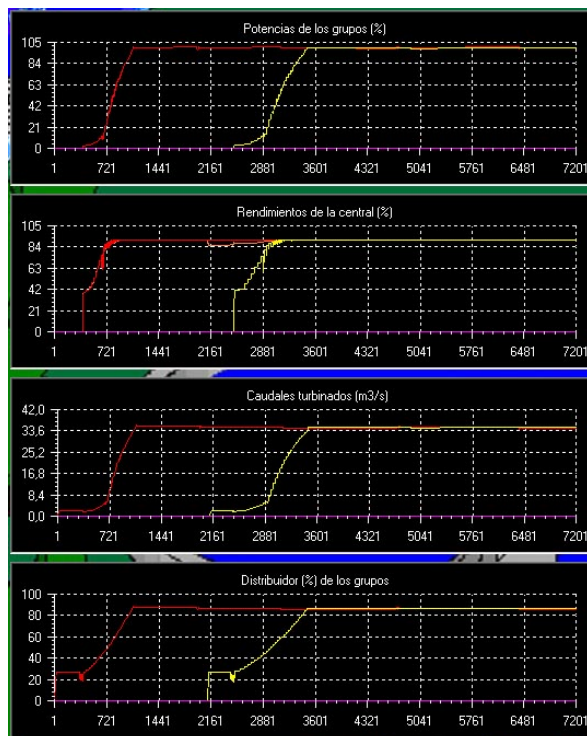


Figura 15: Gráficas de los grupos de su potencia, rendimiento, caudal y posición del distribuidor

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado en EcosimPro una librería con los componentes necesarios para modelar una central hidráulica. Se ha creado un modelo de central de tipo fluyente con carácter general, que pueda usarse para varias centrales simplemente modificando sus parámetros. Para facilitar el uso de dicho modelo, se ha desarrollado una aplicación en Visual Basic desde la que realizar las simulaciones. Además, se ha diseñado con un aspecto similar a los programas de control usados en los sistemas de supervisión de las centrales de Endesa, de manera que sirva como entrenador al operario.

La central de Villafranca en Córdoba se ha usado como ejemplo de aplicación del simulador, obteniendo unos resultados satisfactorios. Su respuesta permite por tanto de una forma rápida y sin coste, el análisis de situaciones dispares que ayuden a mejorar determinados aspectos de la central como:

- Estabilidad de sistema.
- Rendimiento de la instalación.
- Disminución del número de arranques.

Por otro lado, el simulador puede ser de gran utilidad para analizar como se comporta el sistema, al menos de una forma aproximada, en situaciones extremas que se presentan de forma inesperada en los ríos y son difíciles de controlar, como las avenidas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado gracias a un convenio OTRI entre la Universidad de Córdoba y Endesa Generación.

Referencias

- [1] Agüera, J. 1996. *Mecánica de fluidos incompresibles*. Editorial Ciencia. 4ª Ed. ISBN 84-86204-73-9.
- [2] E. A. International. 2005. *EcosimPro User Manual*. EcosimPro V.3.4.
- [3] Endesa Generación. 2002. *Plan de operación normal de la central hidráulica de Villafranca*. Unidad de Producción Hidráulica Sur.
- [4] Mataix, C. 1986. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones del Castillo S.A. 2ª Ed. ISBN 84-219-0175-3.
- [5] Vázquez F. 2002. *Apuntes de Modelado y Simulación de sistemas dinámicos*.

ANEXO I: MODELO COMPLETO DE LA CENTRAL

