

# MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE NAVALLANA

Juan R. Cabello\*, Francisco Vázquez\*, José Agüera \*\*  
fvazquez@uco.es

\* Dpto. de Informática y Análisis Numérico

\*\* Dpto. de Química Física y Termodinámica Aplicada  
Universidad de Córdoba

## Resumen

*En este trabajo se presenta el modelo de una central hidroeléctrica utilizando el entorno EcosimPro. Este modelo permitirá obtener algunos datos interesantes en simulación como pueden ser el nivel de embalse, los caudales de paso, las presiones en cualquier punto del sistema, las pérdidas en los elementos, los rendimientos, etc. Para llevar a cabo dicho objetivo se ha realizado la identificación de los diferentes elementos, la creación y validación de los componentes aislados, la interconexión de subsistemas y su validación, así como el análisis del sistema completo mediante la simulación del mismo .*

**Palabras Clave:** Modelado y simulación orientados a objetos.

## 1 EL EMBALSE DE NAVALLANA

A pocos kilómetros de Córdoba capital se encuentra el embalse de San Rafael de Navallana. La capacidad de su presa es de  $156 \text{ hm}^3$  para embalse. Construida en el río Guadalquivir, muy próxima con su confluencia con el río Guadalquivir y aguas abajo de la presa del Guadalquivir, el embalse proporciona abastecimiento a unos 400.000 habitantes.



Fig. 1: Vista frontal de la presa

La presa, figuras 1 y 2, es de escollera con núcleo de arcilla, con 57'5 m de altura y 356 m de coronación. El aliviadero es doble con canales de descarga independientes: uno lateral, de labio fijo de 186 m de longitud que vierte  $634 \text{ m}^3/\text{s}$  y otro, de compuertas tipo Taintor, con tres vanos de 15 m para  $1157 \text{ m}^3/\text{s}$ . El desagüe de fondo utiliza el túnel de desvío y esta equipado con dos conductores de  $1'25 \times 1'50 \text{ m}$  cerrados con doble compuerta tipo Bureau y desagua hasta  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . La toma de explotación está formada por dos conductos de  $1'25 \text{ m}$  de diámetro con compuertas Bureau y Howell-Burger. El caudal de toma es de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Fig. 2: Vista lateral de la presa

De entre los sistemas de la presa que se han modelado, caben destacar los siguientes:

- Embalse.
- Tuberías o conducciones.
- Codos de diferentes ángulos.
- Bifurcaciones y uniones de tuberías.
- Válvulas con y sin regulación.
- Turbina Francis.
- Generador síncrono.
- Autómata de control.

## 2 MODELADO DE LOS ELEMENTOS

Para realizar el modelado de los diferentes componentes se ha utilizado el entorno EcosimPro, así como la herramienta SmartSketch para la implementación de los componentes gráficos. Este entorno permite el modelado orientado a objetos (MOO) de los diversos elementos, realizándose una librería de componentes 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.

A continuación se muestra cómo se han modelado algunos de los componentes más significativos.

### 2.1 El embalse

Este componente se ha modelado a partir de una curva cota-superficie-volumen. Estos valores son suficientes para conocer la presión a la salida del embalse, así como poder determinar en cualquier instante el nivel en que se encuentra partiendo de una cota inicial. El área es determinada en todo instante interpolando (EcosimPro realiza esta tarea de forma automática) en una tabla para obtener el volumen total de agua embalsada cuando cambia dinámicamente el nivel del mismo debido al caudal que es turbinado. Los valores de dicha tabla han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir de los que aparece un extracto en la tabla 1.

Cota (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
110	60	0
110.05	66.5	300
110.1	73	600

Tabla 1: Volumen frente a cota

El icono realizado para la librería gráfica se muestra en la figura 3.



Fig. 3: Símbolo para el embalse

En la sección continua del objeto se incluye una sentencia  $a=\text{splineInterp1D}(\text{area}, h)$  que permite interpolar de la tabla anteriormente citada. En el código siguiente se muestra parte de la tabla programada.

```
TABLE_ID area={{110,110.05
,111,111.5,112,112.5,113,113.5,114,114.5
...
106750,108070,109390}}
"Superficie del embalse (m2) en función
del nivel del agua (cota)"
```

### 2.2 Túnel de descarga

El túnel de descarga por su geometría tan particular se ha dividido en dos elementos a efectos de pérdida de carga. Por un lado una pequeña conducción de escasa longitud y por otro, una bifurcación en la que se produce un estrechamiento de sección, con sus pérdidas correspondientes. Por tanto la pérdida de carga total en la conducción será calculada como la suma de las pérdidas de carga de estos dos elementos bien diferenciados.

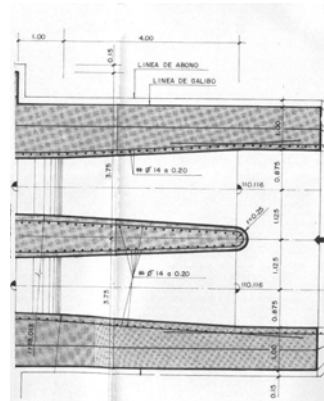


Fig. 4: Túnel de descarga

Además se produce una división del caudal demandado aguas abajo, pero en una proporción aún desconocida. Esta proporción será calculada de forma dinámica durante la simulación.

Los datos necesarios para modelar una tubería cualquiera son los mismos que para este "túnel", como han sido la cota de entrada (159.25 m) la cota de salida (111.6 m), su longitud (1.85 m), su diámetro (4 m) y su rugosidad absoluta (0.4, *acero soldado oxidado*).

### 2.3 Tuberías

Las diferentes tuberías son, sin duda, los elementos más importantes de entre los que forman el modelo completo junto con la turbina y el generador. No sólo por el número de ellas que habrá en el modelo, sino también, porque en este tipo de instalaciones las longitudes de los tramos de tuberías suelen ser importantes, y con ello las pérdidas de presión.

Se han programado tuberías de distintas formas, tales como las siguientes:

- Codos, con ángulo y diámetro variable
- Estrechamientos
- Ensanchamientos
- Uniones
- Bifurcaciones

En la figura 5 se muestran algunos de los iconos generados en la librería gráfica y a continuación parte del código realizado.

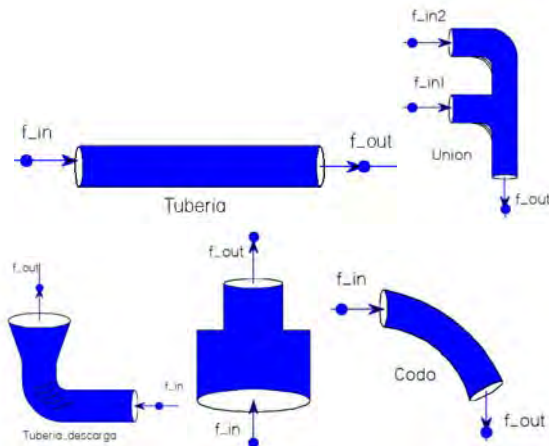


Fig. 5: Símbolos para distintas tuberías

```

COMPONENT Tuberia IS_A Conduccion
DATA
.....
DISCRETE
WHEN (lt<=0) THEN
    PRINT("EL RÉGIMEN LAMINAR----")
END WHEN
WHEN (Re<=0) THEN
    PRINT("Reynolds=0. VELOCIDAD NULA")
END WHEN
CONTINUOUS
--Área de la tubería
a=0.25 * PI * (d**2)
--Velocidad del agua en la tubería
vel=f_in.q/a
--Cálculo del nº de Reynolds
Re=(4*f_in.q*10**6)/(PI*d*v)
--Régimen laminar (lt=0) o turbulento(lt=1)
lt=regimen (Re)
--Coeficiente de fricción en tuberías
f=ZONE (f_out.q>=0 AND f_out.q<0.001) 0.08
ZONE (f_out.q>=0.001 AND TIME>=0.1)
(1/(2*log10((k*(10**3)/d)/3.7+2.5/(Re*sqrt(f))))**2
OTHERS 0.018
--Pérdida de Carga por rozamiento (m.)
hm=(0.0827*f*1*(f_in.q**2))/(d**5)
--Perdida de carga (Pa.)
hr= g*rho*hm
--Presión a la salida de la tubería
f_out.p=f_in.p+(z_max-z_min)*rho*g-hr
END COMPONENT
    
```

## 2.4 Válvulas

En el modelo se distingue entre válvulas con y sin posibilidad de control del flujo. En la figura 6 se muestra uno de los símbolos generados.

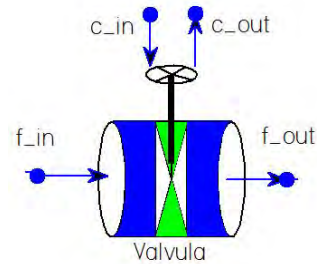


Fig. 6: Símbolo para las válvulas

La mayoría de las válvulas no modifica su estado mientras la central hidroeléctrica está en funcionamiento, permaneciendo totalmente abiertas en todo momento. Sólo en caso de reparación o sustitución de algún elemento se cierran para dejar sin presión alguna, aguas abajo. Sin embargo, hay excepciones, como una válvula de 1600 mm de diámetro previa a la turbina, en la que sí hay que tener en cuenta su apertura variable con la correspondiente pérdida de carga y su correspondiente modificación en el caudal. Para que esta válvula no sufra en los cambios de posicionamiento, está protegida con un bypass, figura 7, que iguala presiones antes y después de esta válvula; así la válvula siempre trabaja con igualdad de presiones en sus dos caras, no sufriendo daño alguno. Para esta válvula con regulación se realizó en primer lugar una tabla con las pérdidas de carga en función del caudal y del ángulo de apertura.

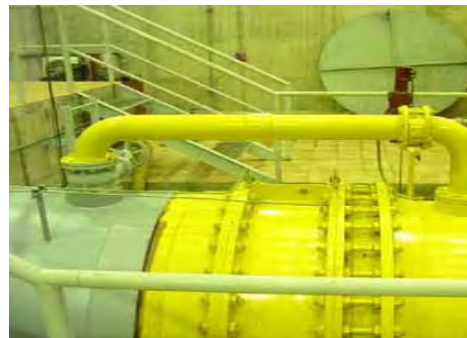


Fig. 7: Fotografía del bypass

A continuación se muestran los símbolos generados para la librería gráfica, tanto de la válvula como del bypass, así como parte del código realizado:

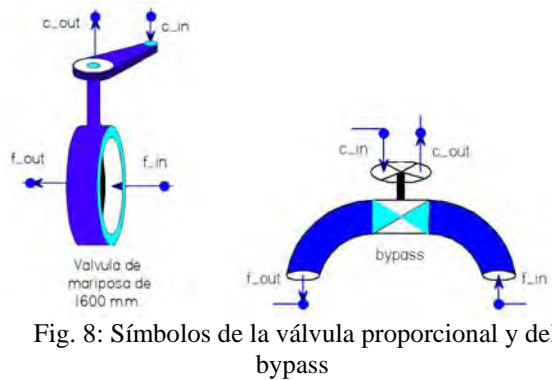


Fig. 8: Símbolos de la válvula proporcional y del bypass

```

DISCRETE
WHEN(c_in.s>=1) THEN
    aux_1=1 AFTER tiempo
END WHEN
WHEN(c_in.s<=0) THEN
    aux_2=0
END WHEN
WHEN(f_out.p==f_in.p AND c_in.s>=1
AND aux_1==1) THEN
    aux_2=1
END WHEN

```

## 2.5 La turbina

Se trata de uno de los elementos más importantes dentro de un sistema de producción de energía eléctrica. En este caso, se trata de una turbina tipo Francis horizontal, figura 9, de unos 4810 kW de potencia.



Fig. 9: Fotografía de la turbina Francis

Sin llegar a ser una turbina de gran potencia, su producción es considerable, aunque la finalidad del embalse de San Rafael de Navallana no sea la producción de energía eléctrica, sino la regulación de la lámina de agua del Guadalquivir. Conocer el caudal que pasa por el distribuidor cuando éste va aumentando su apertura es realmente complicado cuando no se disponen de las curvas características de la turbina. Tampoco es fácil saber el par máximo o la velocidad a la que gira el eje sin estas curvas. En la figura 10 se muestra la curva de rendimiento de la turbina, obtenida experimentalmente.

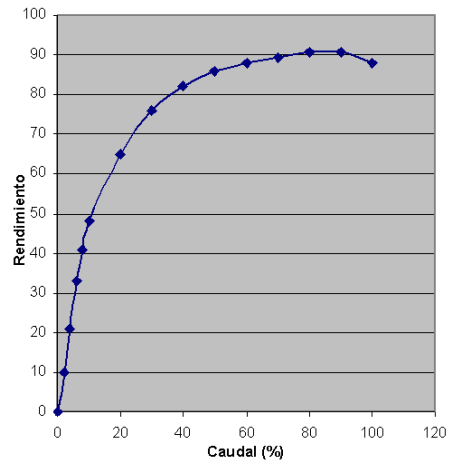


Fig. 10: Curva de rendimiento de la turbina

En la figura 11 se muestra el símbolo generado en la librería realizada y a continuación la sección CONTINUA del modelo.

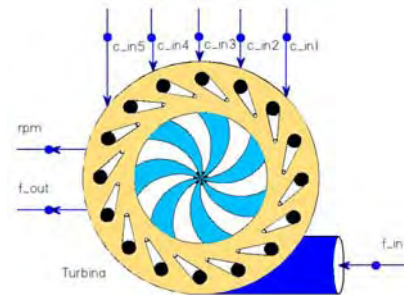


Fig. 11: Símbolo de la turbina

```

COMPONENT Turbina IS_A Conduccion
CONTINUOUS
--Caudales
f_in.q=ZONE(c_in1.s<=0)0
ZONE(0>=a1+a2*c_in2.s+a3*c_in1.s)0
OTHERS a1+(a2*c_in2.s)+(a3*c_in1.s)
--Ecuación de la energía
v1=f_out.q/(PI*d2**2/4)
--Diámetro de salida del rodete:1330 m.m.
v2=f_out.q/(PI*(da)**2/4)
--Diámetro de salida tubería descarga: 2400 m.m.
f_out.p=((v2**2)/(2*g)-(v1**2)/(2*g)+(z_min-
z_max)+hmt)*rho*g+c_in4.s
--Presiones
Hb=c_in2.s*rho*g
Ht=f_in.p-f_out.p
p2=(c_in3.s-103.8)*rho*g
--Cinématica de la turbina-----
--Revoluciones de la turbina (r.p.m.)
rpm.n=ZONE(c_in5.s==1 AND Pe>=Pn)nn
ZONE(Pe>0)nn*Pe/Pn OTHERS 0
--Velocidad angular (rad/s)
w=PI*rpm.n/30
--Potencia del flujo en la turbina
P=(f_in.p-p2)*f_out.q/1000
--Potencia exterior en el eje
Pe=(f_in.p-p2)*f_out.q*Rt/1000
....

```

## 2.6 Generador síncrono

Con el generador, cuya fotografía se muestra en la figura 12, se ha tenido el siguiente problema: su dinámica es muy rápida, mientras que las del propio sistema hidráulico son bastante lentas. Si se quisiese conocer en cada instante de tiempo la tensión en bornes del generador, se necesitaría un periodo de integración muy pequeño en el algoritmo de simulación, pero al mismo tiempo, la dinámica de apertura de las válvulas para llegar al estacionario de la central es relativamente grande por lo que no se podría usar este periodo de integración tan pequeño deseado para el generador. En definitiva, si se pretendiese representar estas dinámicas el sistema sería muy rígido (*stiff*) por lo que se ha optado por simplificarlas al máximo.



Fig. 12: Fotografía del generador

Otros datos necesarios para que el modelo se parezca lo máximo posible al sistema real, son:

- Revoluciones de sincronismo: 428.6 r.p.m
- Tiempo en que el generador conecta a red: 10 s

En la sección "Discrete" del modelo en EcosimPro se programaron los eventos de mayor importancia:

1. Cuando el generador alcanza la velocidad de sincronismo. Una vez que sucede este hecho, es el generador el que desde ese instante no permite que la velocidad de giro no se vea afectada, es decir, el generador síncrono por sus propias características, mantiene constante las revoluciones incluso aumentando el caudal de paso por la turbina.
2. Cuando el generador conecta con la red de distribución eléctrica.

En la figura 13 se muestra el símbolo utilizado.

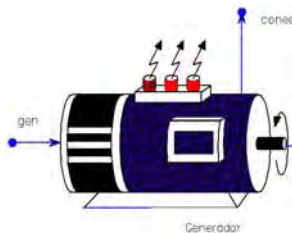


Fig. 13: Símbolo del generador

## 2.7 El autómata

Tal y como sucede en la Central de San Rafael de Navallana, en el modelo se ha diseñado un componente que imita el funcionamiento de un autómata, cuyo símbolo se muestra en la figura 14, describiendo las diferentes etapas de comportamiento, y haciendo hincapié en las secuencias de puesta en marcha y parada de la central que controla éste. En el anexo I se muestra el diagrama de bloques que sigue el autómata instalado en la central, así como el modelo realizado.

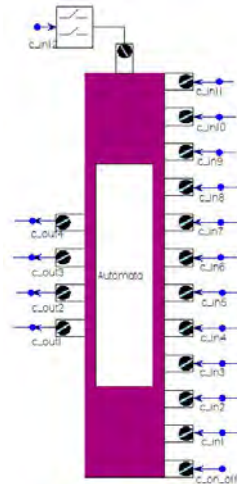


Fig. 14: Símbolo del autómata

La evolución de los estados en el código implementado se efectúa mediante secciones WHEN, como se muestra parcialmente en las líneas siguientes:

```

-- Secuencia de estados finitos --
WHEN (c_on_off.s<=0 AND estado_11<=0)
THEN inicio=1
     PRINT(";; ESTADO INICIAL !!")
END WHEN
WHEN (inicio==1 AND c_on_off.s>=1 AND
c_in3.s==0 AND c_in4.s==0\
AND c_in5.s==0 AND c_in6.s==0 AND
c_in7.s==0 AND c_in8.s<cota_max AND
c_in8.s>cota_min AND c_in9.s>cota_min_can)
THEN estado_1=1
     c_out1.s=1
     PRINT(";; ESTADO 1 (TEST DE
VALVULAS Y APERTURA BYPASS) !!")
END WHEN
WHEN (estado_1==1 AND c_in1.s>=1) THEN
inicio=0
estado_1=0
estado_2=1
tiempo_aux1=TIME+tiempo_apertura
PRINT(";; ESTADO 2 (APERTURA
VALVULA DE 1600 m.m.) !!")
END WHEN

```

## 2.8 Otros elementos modelados

Además de los anteriores se han modelado otros elementos necesarios para la simulación final como son los siguientes:

- Cámara y las tuberías de aspiración, figurs 15 y 16.
- Medidor de presión: Sirve para conocer en todo momento la presión en un punto de la instalación.

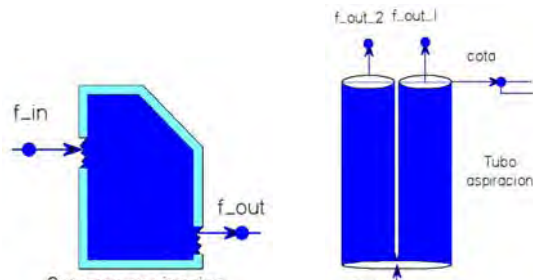


Fig. 15: Símbolo de la cámara y tuberías de aspiración

## 2.9 Modelo completo

En el Anexo II se muestra una representación del modelo completo, donde se pueden apreciar los elementos anteriormente descritos.

## 3. SIMULACIONES

Se han realizado una serie de simulaciones con los elementos aislados, con objeto de validar los mismos, y tales como la evaluación de pérdidas en las diferentes tuberías y diferentes accesorios, etc.

Sin embargo, las simulaciones de mayor interés de han efectuado con el sistema completo, como se describe a continuación.

### 3.1 Transitorios en la central

El proceso completo de puesta en marcha va siendo dirigido por las diferentes fases del autómata. En primer lugar se comprueba el estado de las válvulas y si éste es el indicado (*todas las válvulas abiertas excepto la de 1600 m.m.*), el bypass iguala instantáneamente las presiones (figura 16). Posteriormente se abren la válvula de 1600 (figura 17) y el distribuidor hasta que se alcanza la velocidad de sincronismo del generador. Una vez conectado el generador a la red, se continúa con la apertura del distribuidor hasta el caudal deseado (figura 17).

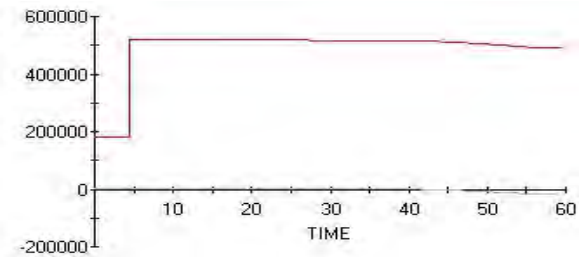


Fig. 16: Evolución de presiones en turbina

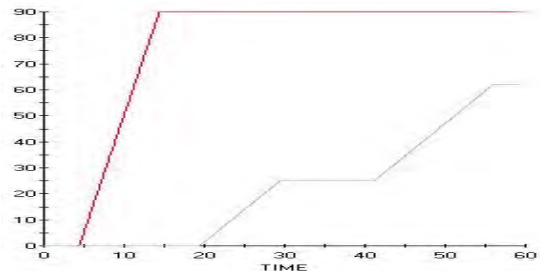


Fig. 17: Apertura de válvula y velocidad de sincronismo

En simulación puede observarse cómo, mientras no fluye caudal porque el distribuidor no está abierto, no se tiene pérdida de carga (figura 18) ni rendimiento en la turbina (figura 19), como era de suponer.

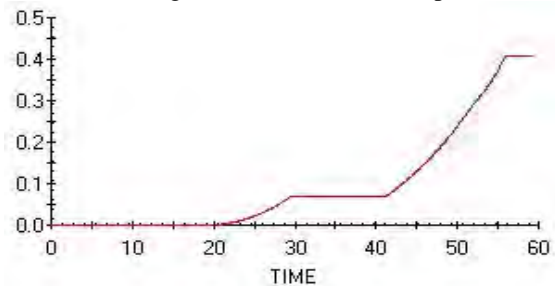


Fig. 18: Pérdida de carga

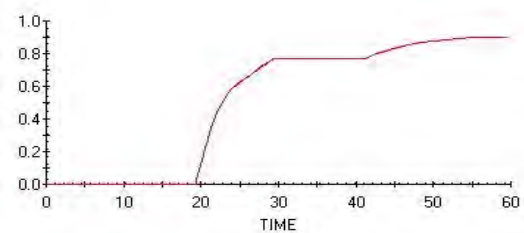


Fig. 19: Rendimiento en la turbina

### 3.2 Régimen estacionario

A continuación se muestran algunos datos obtenidos en simulación para diferentes experiencias realizadas a partir de distintos datos iniciales:

### Simulación 1

#### Datos iniciales

- Cota inicial de embalse: 158 m.
- Cota de cantara: 105 m
- Caudal que le llega al embalse:  $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$
- Coeficientes de rugosidad en tuberías: 0.4
- Tiempo de apertura de válvula: 10 s
- Tiempo de apertura de distribuidor: 40 s
- Tiempo de cierre de válvula: 10 s
- Tiempo de cierre de distribuidor: 30 s
- Volumen de agua a desaguar:  $288000 \text{ m}^3$
- Caudal (8 horas)  $\rightarrow 288000/3600*8 = 10\text{m}^3/\text{s}$

#### Resultados obtenidos:

- Presión a la entrada a la turbina: 487862.977 Pa.
- Presión a la salida de la turbina: -20401.85 Pa.
- Potencia en el eje: 4403.502 kW.
- Potencia eléctrica: 4051.22 kW.
- Rendimiento turbina: 0.9083
- Pérdida en la válvula de 1600 m.m.: 0.4698 m.
- Apertura del distribuidor: 66 %
- Perdidas en el codo de  $45^\circ$ : 0.3428 m.
- f de Colebrook en la tubería número 3: 0.01435
- N° de Reynolds e la tubería número 3: 2948886.01
- Pérdidas en la tubería número 3: 0.288 m.

### Simulación 2

#### Datos iniciales:

- Cota inicial de embalse: 140 m.
- Cota de cantara: 106.5 m
- Caudal que le llega al embalse:  $0 \text{ m}^3/\text{s}$
- Coeficientes de rugosidad en tuberías: 0.4
- Tiempo de apertura de válvula: 10 s
- Tiempo de apertura de distribuidor: 40 s
- Tiempo de cierre de válvula: 10 s
- Tiempo de cierre de distribuidor: 30 s
- Volumen de agua a desaguar:  $200000 \text{ m}^3$
- Caudal (6 horas)  $\rightarrow 200000/3600*6 = 9.26 \text{ m}^3/\text{s}$

#### Resultados obtenidos:

- Presión a la entrada a la turbina: 316840.95 Pa.
- Presión a la salida de la turbina: -16119.417 Pa.
- Potencia en el eje: 2497.45 kW.
- Potencia eléctrica: 2297 kW.
- Rendimiento turbina: 0.9
- Pérdida en la válvula de 1600 m.m.: 0.3815 m.
- Apertura del distribuidor: 74.5 %
- Perdidas en el codo de  $45^\circ$ : 0.282 m
- f de Colebrook en la tubería número 3: 0.0143
- N° de Reynolds e la tubería número 3: 2676743.72
- Pérdidas en la tubería número 3: 0.238 m.

### Simulación 3

#### Datos iniciales:

- Cota inicial de embalse: 138 m.
- Cota de cantara: 105.5 m

- Caudal que le llega al embalse:  $10 \text{ m}^3/\text{s}$
- Coeficientes de rugosidad en tuberías: 0.4
- Tiempo de apertura de válvula: 10 s
- Tiempo de apertura de distribuidor: 40 s
- Tiempo de cierre de válvula: 10 s
- Tiempo de cierre de distribuidor: 30 s
- Volumen de agua a desaguar:  $350000 \text{ m}^3$
- Caudal (8 horas)  $\rightarrow 350000/3600*8 = 12.15 \text{ m}^3/\text{s}$

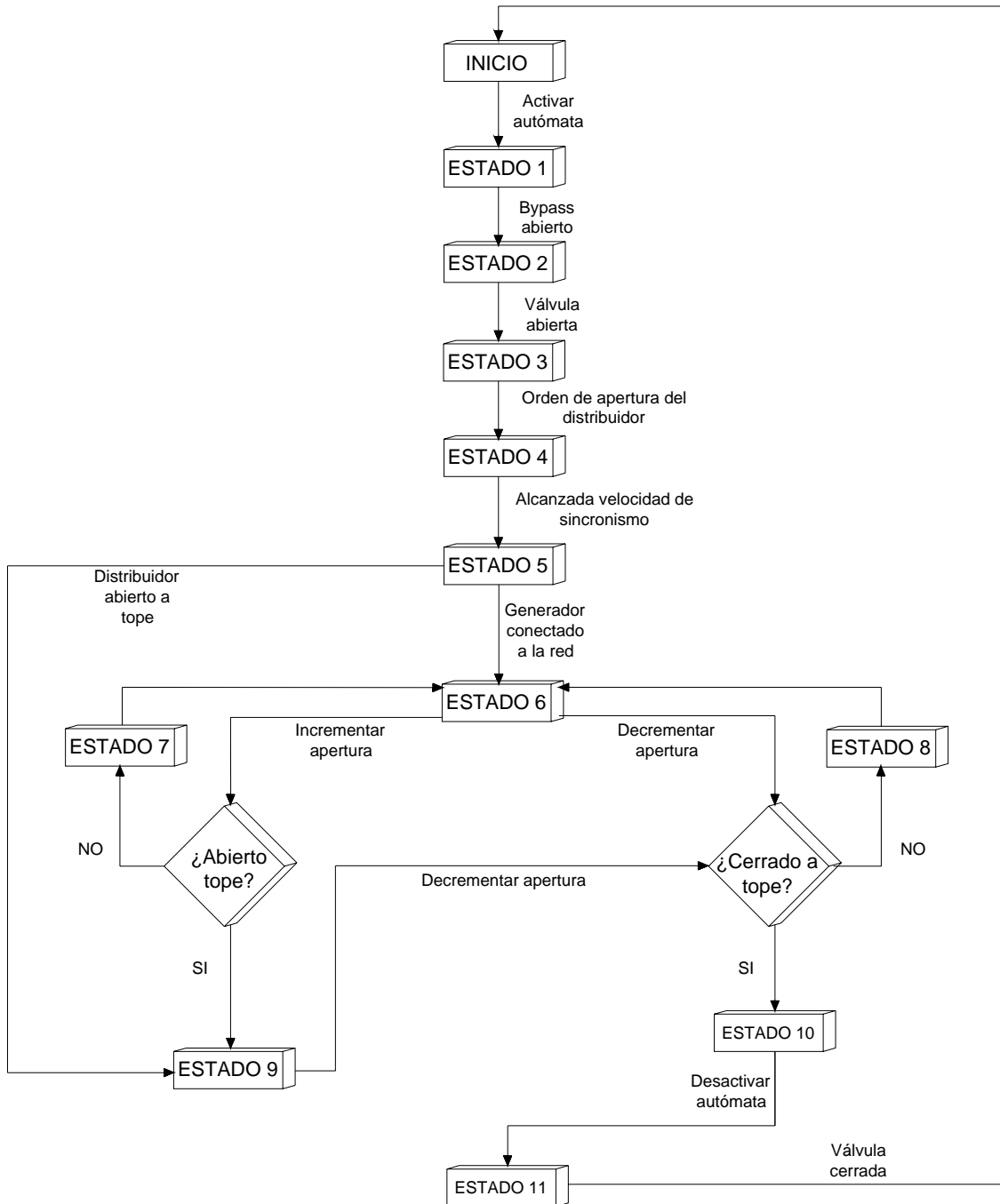
#### Resultados obtenidos:

- Presión a la entrada a la turbina: 278525.04 Pa.
- Presión a la salida de la turbina: -30291.1015 Pa.
- Potencia en el eje: 2818.053 kW.
- Potencia eléctrica: 2592.609 kW.
- Rendimiento turbina: 0.89
- Pérdida en la válvula de 1600 m.m.: 0.6586
- Apertura del distribuidor: 94.66 %
- Perdidas en el codo de  $45^\circ$ : 0.4822 m.
- f de Colebrook en la tubería número 3: 0.0143
- N° de Reynolds e la tubería número 3: 3497333.17
- Pérdidas en la tubería número 3: 0.40484 m.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado cómo utilizar un entorno de modelado orientado a objetos (MOO) para construir, en primer lugar, una librería de componentes de un sistema, en concreto una central hidroeléctrica, y posteriormente para realizar diferentes experimentos con el modelo construido. Algunas de las simulaciones, así como parte del código realizado y de los símbolos generados, se han mostrado en apartados anteriores.

# ANEXO I: DIAGRAMA DE FLUJO DEL AUTÓMATA





## ANEXO II: MODELO COMPLETO

