

Rescate de la magnitud tiempo en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Turbomáquinas Hidráulicas

Rescuing the time magnitude in the teaching-learning process of Hydraulic Turbomachinery

José Luíś Vicéns Moltó, Blas Zamora Parra
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
agricol@msn.com, blas.zamora@upct.es

Abstract

El comportamiento de una Turbomáquina Hidráulica incluye diversos procesos acoplados, en general no instantáneos, que precisan de periodos de tiempo específicos para su completa ejecución. Puesto que una parte relevante del alumnado de Ingeniería presenta una tendencia hacia la bidimensionalidad, evitando las evoluciones temporales, se propone en este trabajo una actuación docente sobre el aprendizaje de los procesos transitorios, rescatando la magnitud tiempo. Se identifican y calculan diversos tiempos hidráulicos característicos, que enlazan con los algoritmos de control y simulación de las turbomáquinas. La finalidad es facilitar que el alumno esté en condiciones de aprender significativamente y con capacidad metacognitiva el funcionamiento y el uso del modelo completo de una Central Hidroeléctrica, que MATLAB[©] lleva incorporado en una Toolbox de Simulink[®].

The behavior of a Hydraulic Turbomachine includes several coupled processes, which are in general not instantaneous, and require specific periods of time for achieving their final status. Since a relevant quantity of Engineering students shows a trend towards the two-dimensionality, avoiding the transient evolutions, a teaching approach to the learning of transient processes is proposed in this work. Different hydraulic characteristic times, which linking to the control and dynamic simulation of the turbomachine performance, are identified and calculated. The purpose is to facilitate that the student was able to significantly learn, with metacognitive capacity, the operation and use of the complete model of a Hydroelectric Power Plant, which MATLAB[©] incorporates in a Simulink[®] Toolbox.

Keywords: Engineering Education, Hydraulic Turbomachinery, Hydraulic characteristic times, MATLAB[©]

Palabras clave: Enseñanza de la Ingeniería, Turbomáquinas hidráulicas, Tiempo hidráulico característico, MATLAB[©]

1 Introducción

Gran parte del alumnado que cursa estudios de Ingeniería presenta una tendencia hacia la bidimensionalidad en su visualización cognitiva, así como un predominio del pensamiento lineal sobre el holístico o sistémico. Esta mentalidad bidimensional se deriva en parte de la falta de pensamiento geométrico de la enseñanza de la matemática pregrado, en tanto que puede decirse que el déficit de pensamiento sistémico resulta de la orientación conductista lineal del conjunto de la enseñanza en el pregrado.

1.1 Déficit de pensamiento sistémico. Un problema general

En efecto, puede decirse que existe cierto déficit de pensamiento sistémico, y que se trata de un problema que merece analizarse. La situación descrita se manifiesta en las Titulaciones de Grado en Ingeniería, en forma de ciertas dificultades para el proceso de enseñanza-aprendizaje, entre las que cabe señalar:

- Aversión al croquis a mano alzada y al dibujo manual en general.
- Débil prospectiva tridimensional en el diseño.

Estas dificultades en el grafismo y la tridimensionalidad (Suining, 2011; Lipson, Shpitalni, 2000), desatan a su vez ciertas repercusiones concretas en el aprendizaje de la Ingeniería (Gardner, 2001). Entre ellas cabe citar:

- Desubicación conceptual de las magnitudes vectoriales.
- Dificultad cognitiva para el análisis multivariable.
- Percepción algebraica del cálculo vectorial diferencial, infravalorando su naturaleza geométrica.
- Dificultad para relacionarse con las ecuaciones diferenciales, en especial con las ecuaciones en derivadas parciales.
- Problemas para una comprensión constructivista de la dinámica de sistemas.

Estas tendencias, bidimensionalidad y linealidad, favorecen la propensión a la simplificación de la modelización matemática, evitando la presencia de más de una variable independiente, en especial si las variables son de diferente naturaleza. La simplificación descrita lleva a una percepción estática, plana, fotograma a fotograma, del problema, al resultar dificultosa la presencia añadida de la variable tiempo. Existe pues una cierta separación de variables en el estudio de diversos procesos de Ingeniería, al separar la evolución espacial de la evolución temporal. Se añade además una parcelación académica que segmenta las competencias curriculares de procesos multidisciplinares, esto es, algunos procesos que conforman un sistema completo, se estudian de forma parcelada en diferentes asignaturas, con la consiguiente pérdida de consistencia e integridad.

Mientras que no se lleve a cabo un rescate del aprendizaje geométrico-matemático en los ciclos curriculares previos o se implante el Aprendizaje Basado en Proyectos en las titulaciones de Grado en Ingeniería (con el objeto de integrar competencias multiárea en las que no se aparten las evoluciones temporales de los procesos en el procedimiento de enseñanza-aprendizaje), caben

actuaciones puntuales como la que se expone en este trabajo. Como se explica a continuación, el rescate de una magnitud particular, el tiempo, se plantea en una aplicación clásica de Ingeniería: las Centrales Hidroeléctricas.

1.2 Particularización al caso de la Turbomaquinaria Hidráulica

Una Turbina Hidráulica constituye un sistema complejo que se integra a su vez en un sistema de mayor envergadura, esto es, en una Central Hidroeléctrica, que está conectada a una Red de Distribución eléctrica. Se tienen entonces implicados sistemas hidráulicos, sistemas mecánico-sólidos, sistemas mecánico-fluidos, sistemas electromagnéticos, y sistemas de distribución-consumo-disipación. Este hecho determina que la enseñanza-aprendizaje de este complejo proceso de producción de energía eléctrica de origen hidráulico, sólo cobre consistencia en un contexto cognitivo significativo que abarque a la vez todas las partes y el conjunto, dando paso al conocimiento metacognitivo, que es el objetivo final de la formación del Ingeniero. El nexa que puede servir para engranar cognitivamente los subsistemas presentados es la magnitud compartida por todos ellos en una misma forma, el tiempo.

Centrando la atención en la parte mecánico-hidráulica del problema, se considera el esquema de la Figura 1, donde se muestran las partes fundamentales de una Central Hidroeléctrica. El agua se almacena en un embalse a través de una presa, y el sistema galerías de presión-tuberías forzadas lleva el agua hacia la central de turbinado, donde la turbina transforma la energía cinética y de presión del agua a energía mecánica en un eje. El tubo difusor descarga el agua prácticamente sin energía hacia el desagüe o socaz. En la operación del sistema, existe un tiempo (una duración), y un tempo (el ritmo al que suceden los eventos), que son propios y críticos para el sistema hidráulico aguas arriba del rodete, así como para todo el sistema móvil del rotor, incluyendo la conversión energética de mecánica a electromagnética, y finalmente, también para la evacuación definitiva de la masa hídrica del sistema por el tubo de descarga o tubo difusor. Puesto que los programas de las asignaturas establecidos en las Guías Docentes suelen ser extensos, en muchas ocasiones las particularidades temporales no cobran relevancia en el contexto habitual de aprendizaje, al considerar en general procesos estacionarios para conseguir un aprendizaje más asequible para el alumno. Por otra parte, la enseñanza de procesos transitorios exige un esfuerzo mayor al profesor, que debe cambiar la tendencia mental del estudiante medio a la consideración del estudio de variables y procesos siempre en el espacio, no en el tiempo.

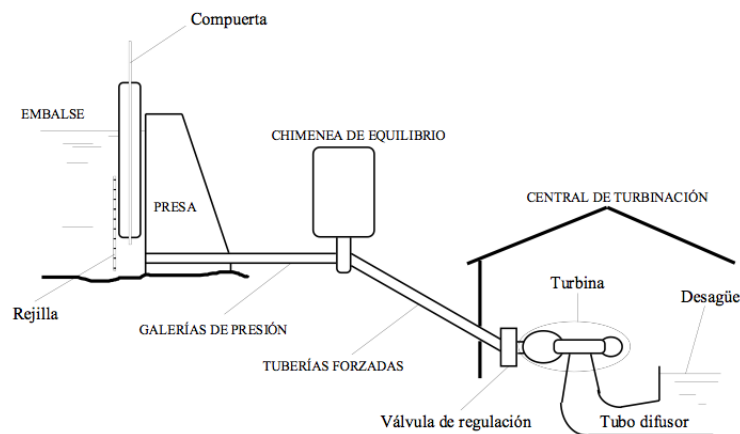


Figura 1 – Esquema con las distintas partes que pueden estar presentes en una Central Hidroeléctrica.

1.3 Objeto del presente trabajo

Este trabajo presenta una propuesta didáctica para que el alumno ubique por un lado el todo de un sistema complejo, y por el otro, las partes en las que puede dividirse el sistema, en un cauce común a todos ellos, que es el transcurrir del proceso en el tiempo físico real. Esta actitud de simultaneidad cognitiva le permite intuir las interdependencias y limitaciones recíprocas que ejercen unos subprocesos sobre otros, y así se facilita acometer el aprendizaje significativo de la regulación de una Central Hidroeléctrica, manejando el sentido físico y mecánico de los parámetros temporales que configuran los algoritmos de control. Se expone en primer lugar la metodología propuesta, para explicar a continuación su desarrollo de forma más detallada. El método se ordena en una etapa conceptual, en otra etapa de acercamiento a los modelos de regulación clásicos y por último en la etapa final de avance hacia modelos dinámicos más complicados. La herramienta que se propone para esta etapa final es Simulink[®], integrado en el entorno MATLAB[®].

2 Metodología

2.1 Etapa conceptual previa

La primera fase de esta etapa es de naturaleza autónoma. Comprende la auto revisión y la verificación por parte del alumno del bagaje competencial curricularmente exigible para una provechosa integración en el proceso de enseñanza-aprendizaje del contenido de interés. Para ello, la figura del tutor facilitador, descrita por ejemplo en Vicéns (2012), y Vicéns, Zamora (2014), proporciona algunos mapas conceptuales e indicaciones bibliográficas asequibles en el centro universitario, que abarquen y delimiten los contenidos mínimos de la Mecánica de Fluidos y de las Turbomáquinas Hidráulicas. El alumno dispone así de la oportunidad, de los medios y de la intencionalidad necesarias para actualizar sus conocimientos, de modo que el aprendizaje posterior sea claramente significativo.

En una segunda fase, de carácter presencial y dialogada, se efectúa el análisis de los diversos procesos temporales que intervienen en el funcionamiento global del sistema, determinando el tiempo característico en cada caso, así como su papel y su relevancia. Estos tiempos deben relacionarse con la morfología de la Central Hidroeléctrica, incluyendo la obra civil (tuberías forzadas desde el embalse) y la configuración mecánica de los conductos de admisión y de descarga de la turbina, así como de la turbina en sí, como elemento fundamental compuesto por distintos componentes (distribuidor, rodete, etc.).

2.2 Etapa de acercamiento a los modelos de regulación

Una vez conocidos los diversos tiempos característicos, o simplemente tiempos, se explora el ámbito de relación entre ellos con especial atención al hecho de que la realidad del sistema conducciones hidráulicas-turbina-generador-consumo no es estacionaria, sino que está sujeta permanentemente a variaciones de la carga solicitada (es decir, al consumo eléctrico). De este modo, para conseguir la eficiencia óptima del sistema, se hace necesaria la operación con unas condiciones mantenidas de minimización continua de estas pequeñas fluctuaciones, con el objetivo de que sean toleradas tanto hidráulica como eléctricamente.

Puede dividirse la regulación del sistema en dos facetas: la detección y el gobierno. En la

primera de ellas, el objetivo principal consiste en la detección de una desviación en un parámetro crítico, como es la velocidad (normalmente la velocidad de giro del conjunto del rotor) o la potencia (en la mayoría de ocasiones, la potencia mecánica en el eje). En la segunda, se persigue la aplicación de medidas mecánicas correctoras en el plazo más breve posible, en armonía con las limitaciones temporales derivadas del régimen de funcionamiento, de la obra civil y de la magnitud y morfología del conjunto turbina-rotor.

La detección, el análisis y la orden de respuesta al fenómeno transitorio suponen un consumo de tiempo, que aunque sea pequeño, siempre es real y mensurable. La respuesta mecánica de la orden siempre está sujeta a las limitaciones de inercia propias y a las restricciones que otros componentes determinen. En particular, la no adecuación a los requerimientos de índole temporal de todos los elementos puede suponer la presencia de fenómenos transitorios de una violencia explosiva. El más representativo es el golpe de ariete, un proceso transitorio en el que las ondas oscilatorias producen sobrepresiones del orden de 100 veces la presión atmosférica.

2.3 Etapa de aproximación a la simulación

La simulación del proceso transitorio se lleva a cabo mediante el modelo hidráulico apropiado, que puede ser suficientemente simplificado (lineal), o más completo (no lineal, incluyendo los efectos de compresibilidad y elasticidad). En cualquier caso, los modelos hidráulicos no suelen incluir las pérdidas hidráulicas, con el objetivo de conseguir relaciones más simplificadas. Se acepta entonces la hipótesis de flujo ideal; sus implicaciones deben ser explicadas convenientemente al alumno, con anterioridad al estudio de los procesos. El alumno accede a estos modelos, que debe comprender de forma conveniente. Para concluir, se facilita al estudiante la opción de tantear la simulación de un Sistema de Control de tipo Proporcional Integrativo Derivativo (PID), mediante una simulación efectuada con la aplicación Simulink[®] de MATLAB[®], asistida por el tutor facilitador, como se ha indicado anteriormente.

3 Desarrollo. Etapa conceptual

3.1 Tiempos hidráulicos y mecánico-inerciales

Tiempo hidráulico de aceleración en la tubería forzada

El tiempo de aceleración en la galería de presión o tubería de forzada presenta en la literatura una sinonimia abundante: “Water starting time”, “Temps caractéristique de mise en régime”, “Time constant inertia water mass”, “Water start up time” o “Water running up time”. Es el tiempo requerido para que el flujo de agua cambie desde el estado de reposo (embalse) hasta alcanzar el valor de caudal nominal Q_n (m^3/s) para la altura neta nominal H_n (m). Suele designarse en la bibliografía como T_w y su expresión habitual de cálculo, deducida de la conservación de la cantidad de movimiento, en caso de tubería de sección constante, es:

$$T_w = \frac{LU_n}{gH_n} = \frac{LQ_n}{gH_nA}, \quad (1)$$

donde L es la longitud de la tubería de presión (m), A el área de la sección transversal de la conducción (m^2), g la aceleración de la gravedad (m/s^2) y U_n la velocidad nominal una vez alcanzado el régimen estacionario (m/s). En el caso general de que la tubería esté compuesta

por m tramos diferentes, puede plantearse una expresión más general:

$$T_w = \frac{Q_n}{gH_n} \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{\Delta_i}. \quad (2)$$

El tiempo de aceleración T_w pone en evidencia la importancia de la obra civil aguas arriba de la turbinas. Se utiliza como un parámetro dinámico de evaluación de la estabilidad del sistema de generación que debe de controlar el gobernador de la Central Hidroeléctrica. Sus valores típicos varían entre 0.5 y 4.0 s. Es el parámetro determinante en los modelos hidráulicos lineal simplificado y lineal no ideal (Kundur, 1994; Naghizadeh, Jazebi, Vahidi, 2012).

Tiempo hidráulico de parada en el tubo de descarga

Existe en la bibliografía cierta discusión con la inclusión del tubo de descarga (tubo de aspiración o tubo difusor) en el sistema de turbinado (véase la Figura 1). El sistema de conducción de agua desde el embalse comprende la torre de toma o simplemente toma de agua, conducción o conducciones forzadas, carcasa o caja espiral, distribuidor, rodete, y descarga o tubo de aspiración (Viedma, Zamora, 2008). Algunos autores, como Zopetti (1979) consideran que el tubo difusor debe considerarse independiente, puesto que al estar situado aguas abajo del rodete, presenta un fenómeno transitorio específico: el contragolpe de ariete (o golpe de ariete inverso). Este fenómeno es similar al golpe de ariete en una instalación de bombeo, cuando la bomba para súbitamente. El tiempo de parada de la columna de agua en el difusor después de un cierre repentino en el sistema rotor puede aproximarse por

$$T_{dif} = \frac{\varepsilon L_{dif} U_{dif}}{g \Delta H_{dif}}, \quad (3)$$

donde ε es un coeficiente experimental de valor 1,0 en tubos cortos y 1,7 en tubos largos, L_{dif} es la longitud del tubo difusor, U_{dif} es la velocidad media en su interior, y ΔH_{dif} es el salto energético en la conducción de descarga. Si el tiempo de cierre del distribuidor (es el tiempo crítico del problema en este caso) es inferior a T_w en la tubería forzada o a T_{dif} en el tubo de descarga, pueden aparecer fenómenos transitorios con sobrepresiones o depresiones elevadas. En el peor de los casos, si los efectos de compresibilidad del agua y elasticidad de la tubería son importantes, tiene lugar el golpe de ariete en la tubería de presión, o el contragolpe de ariete en el tubo de difusor, lo que lógicamente condiciona el diseño del grupo rotativo.

Tiempo mecánico de arranque

El tiempo mecánico de arranque o tiempo de lanzamiento, también se denomina en la literatura en inglés por “Mechanical startup time”, “Mechanical running up time”, “Mechanical starting time” o “Unit acceleration time turbine/generator”. Es el tiempo en el que el sistema rotativo de producción de energía se acelera desde el reposo hasta la velocidad nominal ω_R (rad/s) (también denotado en la bibliografía por N_R , expresado en revoluciones por minuto, *r.p.m.*), cuando se aplica el par nominal T_R (N.m). Aplicando la segunda ecuación de Newton,

$$T_m = \frac{I\omega_R}{T_R} = \frac{2\pi I N_R}{60 T_R}, \quad (4)$$

donde I ($kg.m^2$) es el momento angular de inercia del conjunto turbina-generador. Es de uso más práctico la expresión en función de la potencia nominal, P_R , expresada en *MW*,

$$T_{dif} = \frac{I N_R^2}{91.21 \cdot 10^6 P_R}. \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que en el caso de presentarse un desequilibrio entre el par motor y el par resistente de la red, la tendencia es a que el distribuidor actúe rápidamente, es de suponer que un incremento del tiempo mecánico de arranque para un sistema dado, llevará a que se incremente el tiempo de cierre del distribuidor para acoplar ambos y evitar así la aparición del golpe de ariete.

Tiempo de inercia del generador

La relación entre la energía cinética acumulada en el eje a la velocidad de sincronismo y la potencia nominal del generador suele llamarse en la literatura constante de inercia del generador, y se denota por H . Véase que tiene unidades de tiempo, de modo que puede interpretarse también como un tiempo de inercia del generador

$$T_{dif} = \frac{(1/2)I\omega_R^2}{P_R}. \quad (6)$$

Efectivamente, la potencia almacenada de origen mecánico en un eje (kW) estará disponible para ser convertida en potencia eléctrica (kVA), al menos durante un cierto periodo de tiempo, H . En ese periodo, se evitará la variación de la velocidad angular, por lo que se impedirá también una variación de la tensión eléctrica producida. El uso de este parámetro en la ecuación de gobierno del sistema, con magnitudes normalizadas, facilita el manejo de los tiempos implicados en el proceso de aceleración y desaceleración del conjunto giratorio cuando se rompe el equilibrio entre el par mecánico y el par eléctrico, debido a alguna perturbación (Piriz et al., 2012; Otto Villa, 2012; Rojas, Martín, 1997). Véase que la relación entre los tiempos mecánico de arranque e inercial del generador es

$$T_{dif} = \frac{T_m}{2}. \quad (7)$$

Inercia natural

Existe un valor especial del tiempo de inercia del generador, H , llamado tiempo de inercia natural, denotado como $H_{natural}$, con dimensiones de tiempo, que es el valor de H que se corresponde con el diseño de las masas del conjunto giratorio que ocasiona el menor costo de construcción, manteniendo la máxima eficiencia. Pueden encontrarse distintas expresiones en la literatura. Por ejemplo, Sanz Feito (1993) propone

$$H_{natural} = \left(\frac{(k_1 k_3 / k_2^2) T_R^2}{3(a(k_3 k_2^2) / k_1^2)(1/T_R^3)} \right)^{1/4}, \quad (8)$$

donde a , k_1 , k_2 y k_3 son constantes experimentales. Otto Villa (2012) presenta una expresión más sencilla,

$$H_{natural} = 1.7 \left(\frac{P_R}{N_R^{1.5}} \right)^{0.166}, \quad (9)$$

siendo P_R la potencia eléctrica en kVA .

3.2 Tiempos relacionados con fenómenos de elasticidad

En este apartado, se centra la atención en los tiempos que guardan una estrecha relación con el carácter compresible del agua para muy altos valores de la presión, y con la elasticidad de las paredes de las conducciones forzadas.

Tiempo de ida y vuelta de las ondas de presión

En una tubería en la que el flujo de líquido se interrumpe de forma súbita, el fenómeno transitorio generado tiene un tiempo característico de reflexión o de ida y vuelta de las ondas de presión que recorren la tubería. Si el tiempo crítico o tiempo de cierre del distribuidor de la turbina es inferior a este tiempo, aparece el fenómeno del golpe de ariete puro (puede calcularse con la clásica fórmula de Allievi). Cuando el tiempo de cierre no es lo suficientemente rápido, se tienen situaciones intermedias (pueden utilizarse aproximaciones como la de Michaud), pero en cualquier caso el tiempo de reflexión condiciona la configuración de los mecanismos de apertura y de cierre del sistema (Sharma Kumar, 2014).

El tiempo de reflexión (en inglés, “Penstock reflection time”) o tiempo de ida y vuelta de las ondas de presión se calcula por

$$T_{al} = \frac{2L}{c}. \quad (10)$$

También se utiliza el tiempo característico de ida de una onda de presión (la mitad del tiempo anterior, T_{al}),

$$T_{ep} = \frac{L}{c}. \quad (11)$$

El valor de c , que es la velocidad de la onda de presión (también llamada celeridad) puede calcularse por la expresión de Joukowski,

$$c = \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\rho D}{E e} \right)^{-1/2}, \quad (12)$$

donde a es la velocidad del sonido en el agua, ρ la densidad del líquido, D el diámetro interior de la conducción, e el espesor de la conducción, y E el módulo de Young del material de la tubería. Efectivamente, los tiempos presentados se utilizan como parámetros determinantes en los modelos hidráulicos no lineales que asumen los fenómenos de compresibilidad del agua y de elasticidad del material de la tubería forzada (Naghizadeh, Jazebi, Vahidi, 2012).

Constante temporal elástica

La relación entre el tiempo característico de la onda de presión (al cuadrado) y el tiempo de aceleración del agua en la tubería forzada da lugar a un tiempo que juega un importante papel en la modelización de los fenómenos en estudio, llamado constante temporal elástica,

$$T_e = \frac{T_{ep}^2}{T_w} = \frac{L^2}{T_w c^2}. \quad (13)$$

De hecho, siempre que el tiempo de cierre del distribuidor sea lo suficientemente pequeño como para considerar un cierre rápido, T_e evaluará de alguna manera la importancia de los efectos de compresibilidad y elasticidad frente a los habituales de establecimiento de la corriente en el conducto.

Impedancia hidráulica normalizada

Siguiendo con el razonamiento anterior, la Ecuación 13 puede expresarse $T_e = T_{eq}/(T_w/T_{ep})$, de modo que es posible interpretar que la relación T_w/T_{ep} juega un papel similar a una impedancia. Si esta impedancia es lo suficientemente elevada, los efectos de compresibilidad y elasticidad deben ser forzosamente considerados, de manera que el modelo para la simulación transitoria resulta no lineal (Mishra, Singal, Khatod, 2012; Sharma, Kumar, 2014). Por tanto, la

impedancia hidráulica normalizada Z_p puede definirse por

$$Z_p = \frac{T_w}{T_{ep}}. \quad (14)$$

4 Desarrollo. Etapa de acercamiento a los modelos de regulación

4.1 Discusión del modelo de regulación

Una de las razones de la nueva pujanza de las Centrales Hidroeléctricas radica en la fiabilidad y potencia de los mecanismos, tanto para monitorizar sus parámetros de funcionamiento, como para una inmediata transducción de las órdenes de gobierno correctoras a sistemas eficaces de regulación mecánica. Estos mecanismos se conciben a partir de una modelización apropiada de los sistemas, que permite diseñar los algoritmos de adquisición de datos de funcionamiento y de emisión de instrucciones adecuadas. Los modelos del sistema hidráulico pueden ser lineales o no lineales, como se ha venido indicando.

En general, la evolución temporal de la generación hidráulica integral presenta un comportamiento no lineal (Naghizadeh, Jazebi, Vahidi, 2012). Su descripción y simulación alcanzan grados de complejidad que dificultan el proceso de enseñanza-aprendizaje de la materia. El alumno debe entender que la no-linealidad del proceso implica que el grado de aproximación será mayor al aumentar la complejidad de las ecuaciones. En todo caso el alumno debe identificar en todas las expresiones que componen los modelos los tiempos ya estudiados, en especial, T_w , T_m y H . Conceptualmente, estos tres tiempos contienen de forma implícita las características y dimensiones físicas de la obra civil, de la magnitud del conjunto turbina-generator, y del régimen de funcionamiento.

En la simulación de los sistemas en estudio, los primeros modelos eran lineales, y se ciñen a pequeñas variaciones respecto al punto de funcionamiento considerado. Los modelos más recientes incorporan ecuaciones no lineales, y son los adecuados cuando las variaciones de velocidad y potencia son grandes durante unas condiciones de aislamiento, de rechazo de carga, o de restauración del sistema. Un modelo no lineal debe incluir el efecto de la compresibilidad del agua y de la elasticidad de la tubería que dan lugar a ondas de presión en las conducciones (Xiao et al., 2015). Los modelos lineales admiten un tratamiento algorítmico convencional, en tanto que los modelos no lineales precisan de la representación con diagramas de bloque, y del manejo como sistema dinámico. El alumno debe estructurar la idealidad o no del modelo, y su linealidad o no, en el contexto de la simulación dinámica, estableciendo las distinciones conceptuales precisas respecto del sentido que tienen las expresiones “lineal” y “no-lineal”, por un lado, e “ideal”, y “no ideal”, por el otro, en el ámbito de la Mecánica de Fluidos en general.

4.2 Función de transferencia

Para conocer la respuesta de un sistema en función del tiempo, parecen lógicas dos actuaciones. La primera consiste en definir una señal identificable en la entrada del modelo, para evaluar la respuesta que se origina en la salida. La segunda estriba en hacer que las condiciones iniciales de la entrada y la salida sean nulas.

La Transformada de Laplace simplifica el manejo de las ecuaciones diferenciales, convirtiéndolas en algebraicas, ya que la integración y derivación se convierten en multiplicación y división por

el operador s . Como los sistemas se modelizan en forma de ecuaciones diferenciales respecto del tiempo, la comparación entre las Transformadas de Laplace de las señales de entrada y de salida simplifica el estudio del problema de forma considerable. En un sistema, el output que resulta de un input depende de cómo funciona el sistema. Un modelo, una simulación, puede entenderse como un proceso matemático que imita ese comportamiento, intentando generar un output a partir de un input, buscando una relación similar a la real,

$$Gtr(s) = \frac{Output(s)}{Input(s)}, \quad (15)$$

de manera que puede definirse la función de transferencia $Gtr(s)$ de un sistema como el cociente entre la Transformada de Laplace de la señal de salida, y la Transformada de Laplace de la señal de entrada, suponiendo las condiciones iniciales nulas. Su uso permite analizar la respuesta del sistema ante una señal de entrada determinada, verificar su estabilidad y explorar qué parámetros lo hacen estable.

En el tema que nos ocupa, la función de transferencia de una turbina hidráulica es, funcionalmente, su modelo de comportamiento, embridado por las constantes temporales propias de todo el sistema en el que la turbina está situada.

4.3 Modelos lineales

Los modelos lineales merecen confianza cuando describen oscilaciones respecto a un estado determinado, lo que se conoce como modelos de pequeña señal (Kundur, 1994; Naghizadeh, Jazebi, Vahidi, 2012). Su formulación se obtiene desarrollando las ecuaciones básicas de los modelos hidráulicos de la turbina y asumen determinadas simplificaciones, por lo que son aproximados.

Cuando se utilizan generadores síncronos, lo adecuado es valorar la respuesta dinámica del gobierno de los álabes del distribuidor que alimenta a una turbina que se encuentra acoplada al generador mediante un eje mecánico. Si se considera el caso del modelo lineal ideal, la función de transferencia utilizada para este tipo de turbinas se formula habitualmente mediante un modelo lineal simplificado (Kundur, 1994),

$$\frac{\Delta \overline{P}_m}{\Delta \overline{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + (1/2)T_w s}, \quad (16)$$

donde $\Delta \overline{P}_m$ representa la variación en la potencia rendida normalizada y $\Delta \overline{G}$ una variación pequeña de la apertura normalizada del distribuidor. Esta es la función clásica de transferencia del sistema de turbina-tubería forzada. Expone los cambios que experimenta la potencia de la turbina en respuesta a la variación pequeña de la apertura del distribuidor. El alumno puede revisar el camino matemático que lleva a esta expresión a partir de la formulación básica, suponiendo que la velocidad establecida en la tubería forzada es función del salto y de la posición de los álabes del distribuidor,

$$\Delta \overline{U} = \frac{\partial \overline{U}}{\partial \overline{H}} \Delta \overline{H} + \frac{\partial \overline{U}}{\partial \overline{G}} \Delta \overline{G}. \quad (17)$$

De este modo, el alumno internaliza la continuidad cognitiva significativa desde los elementos mecánicos propios del sistema hidráulico a los elementos matemáticos que configuran los algoritmos de control. La respuesta temporal final viene dada por

$$\Delta \overline{P}_m = (1 - 3e^{(2/T_w)t}) \Delta \overline{G}, \quad (18)$$

expresión en la que observa que la variación inmediata a la apertura se define en el sentido contrario al cambio de la posición del distribuidor. La inercia tiende a impedir el cambio pero la disminución de presión origina una pérdida de potencia mecánica. El alumno puede desarrollar los modelos lineales con ayuda de MATLAB[®], como se ha indicado en la Figura 2. Ello le permite explorar un ejemplo de sensibilidad de este tipo de modelos. Se presenta en esta figura un modelo lineal de variación de la potencia en la turbina, en función del gasto a través de la apertura de las palas del distribuidor.

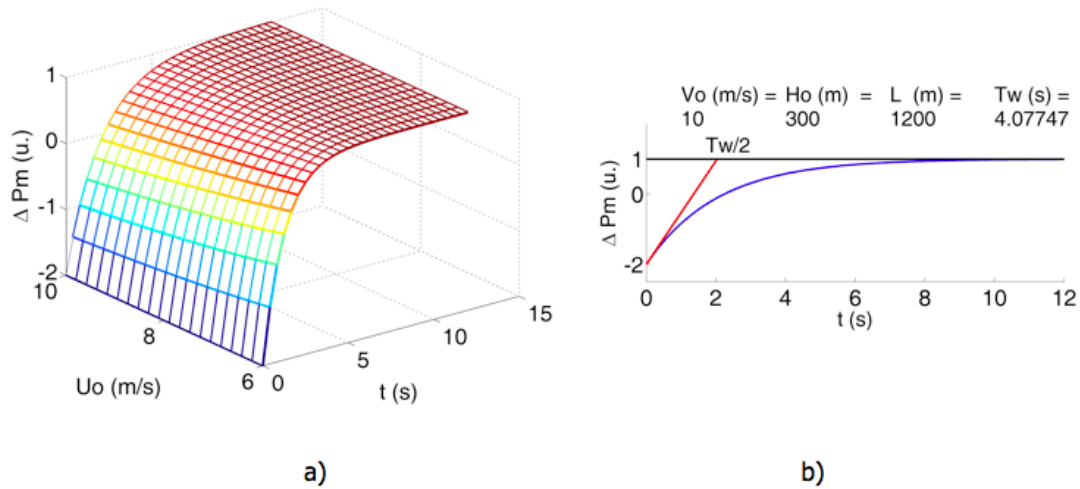


Figura 2 – Modelo lineal ideal de variación de la potencia normalizada en función de la velocidad ante un cambio del gasto (apertura de compuertas) normalizado, con una magnitud de un escalón unitario, dependiendo del tiempo hidráulico T_w (Ecuación 18). a) Superficie de respuesta. b) Representación 2D para $U_0 = 10$ m/s.

Sin embargo, los modelos lineales no ideales o elásticos, que tienen en cuenta las interacciones del fluido con las conducciones y el generador, presentan una complejidad de cálculo excesiva, precisando la determinación de seis coeficientes correspondientes a las derivadas parciales de la potencia normalizada y la velocidad respecto de la altura de cabecera, del gasto y de la velocidad de giro del generador. Suelen obtenerse por simulación o con ayuda de bases de datos experimentales.

5 Desarrollo. Modelos no lineales y simulación dinámica

Los modelos no lineales son adecuados para variaciones más acusadas, y abarcan las dinámicas del fluido y del proceso mecánico-eléctrico, por lo que son preferibles para galerías de presión largas (Nanaware, Sawant, Jadhav, 2013). El manejo de sus ecuaciones resulta cuando menos engorroso y poco práctico, como es el caso del modelo no lineal asumiendo la elasticidad de la columna de agua:

$$F(s) = \frac{-1}{Z_p \tanh(T_{ep}s)}, \quad (19)$$

donde la función de transferencia $F(s)$ relaciona velocidad del rotor y salto neto (Naghizadeh, Jazebi, Vahidi, 2012).

Por la razón expuesta, la herramienta adecuada para construir, manejar y explorar estos modelos, es del tipo de Simulink[®], que es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos, incorporado a MATLAB[®]. Con esta herramienta

es posible estructurar el problema por bloques correspondientes a entidades funcionales individuales, e ir adquiriendo soltura en el manejo del entorno para explorar la sensibilidad de respuesta frente a los diversos parámetros (T_m , T_w , y otros), que configuran las funciones de transferencia asignadas a cada bloque.

En primer lugar, el alumno, asistido por el tutor facilitador, explora con Simulink® un modelo sencillo de control de velocidad tomado del texto de referencia de Kundur (1994) (véase la Figura 3). Este modelo consta de un factor de ganancia y de funciones de transferencia lineales de turbina y generador. Es importante advertir la transcendencia de los valores de T_m y T_w para configurar la modelización de forma correcta.

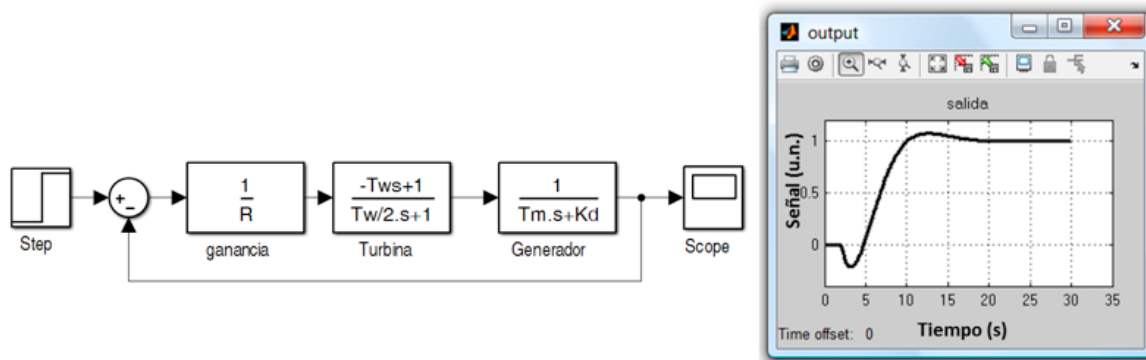


Figura 3 – Control de velocidad de una central hidráulica con una carga aislada. En esta simulación, $T_w = 2s$, $T_m = 10s$, $K_d = 0$, y la estabilidad aparece a partir de $R > 0.2$, siendo R el factor de ganancia.

A continuación (véase la Figura 4), el alumno maneja un modelo para explorar la influencia de los parámetros de proporcionalidad, derivación e integración del controlador PID en relación a una función de transferencia constante. Finalmente, el alumno (Figura 5), explora otro modelo inspirado en Kundur (1994), un regulador de velocidad PID con caída transitoria. En suma, las simulaciones propuestas en las Figuras 3, 4 y 5 con ejemplos del modelo propuesto, que pretende que el propio alumno lleve a cabo el rescate de la magnitud tiempo para comprender y asimilar el carácter sistémico de una Central Hidroeléctrica. La finalidad es facilitar que el alumno esté en condiciones de aprender significativamente y con capacidad metacognitiva el funcionamiento y el uso del modelo completo de una Central Hidroeléctrica, utilizando como herramienta la Toolbox Simulink® que MATLAB® incorpora.

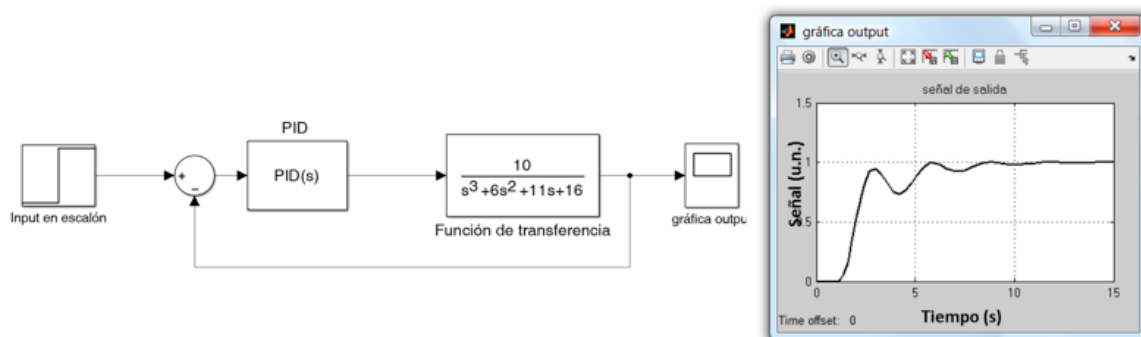


Figura 4 – Modelo sencillo de control PID efectuado con Simulink®. Incluye una función de transferencia sencilla. El alumno puede desarrollar modelos elementales y explora su sensibilidad.

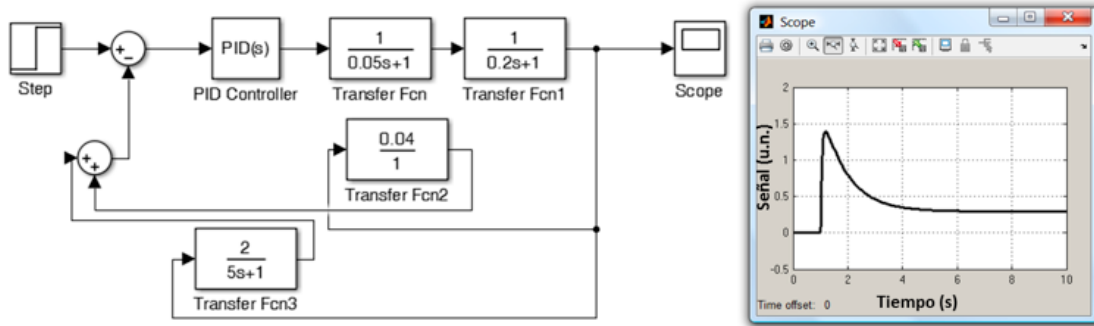


Figura 5 – Modelo de control PID, de la respuesta de apertura de las palas del distribuidor ante cambios de velocidad, que incluye una caída permanente.

6 Conclusiones

En este trabajo se ha planteado un “rescate” de la magnitud tiempo en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Turbinas Hidráulicas funcionando en Centrales Hidroeléctricas. El proceso didáctico presentado puede contribuir a superar algunas barreras conductistas previas, propiciando que el alumno construya un continuum cognitivo de todos los procesos que intervienen, desde las características físicas de la obra civil aguas arriba, hasta los problemas de demanda de red. El procedimiento puede mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Centrales Hidroeléctricas, y en concreto coadyuva a:

1. Temporalizar unos procesos que suelen estudiarse por separado, estableciendo la simultaneidad para facilitar el acercamiento a la complejidad sistémica del conjunto.
2. Favorecer la hibridación cognitiva, al facilitar la continuidad entre una fuerte carga conceptual mecánica y el entorno abstracto de la simulación dinámica.
3. Facilitar un acercamiento amistoso a la simulación dinámica, consiguiendo un uso (y disfrute) de la simulación, sin proceder como caja negra, fomentando el aprendizaje autónomo posterior.

Se propone la Toolbox Simulink[®] de MATLAB[®] para conseguir que el alumno aprenda con calidad metacognitiva el funcionamiento completo de una Central Hidroeléctrica, haciendo especial hincapié en el carácter transitorio y completamente acoplado de los distintos procesos que intervienen.

Referencias

-  Gardner, H. (2001).
Estructuras de la mente. La teoría de las inteligencias múltiples.
Santafé de Bogotá, Colombia: Fondo de Cultura Económica Ltda.
-  Kundur, P. (1994).
Power System Stability and Control.
MacGraw-Hill. Toronto, Canada: McGraw-Hill.
-  Lipson, H., Shpitalni, M. (2000).
Conceptual design and analysis by sketching.
Journal of Artificial Intelligence in Design and Manufacturing 14(5), 391–401.
-  Mishra, S., Singal, S.K, Khatod, D.K. (2012).
Effect of Variation of Penstock Parameter on Mechanical Power.
International Journal of Energy Science 2(3), 110–114.
-  Naghizadeh, R. A., Jazebi, S., Vahidi, B. (2012).
Modeling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline.
International Review on Modelling and Simulations 5(4), 1780–1790.
-  Nanaware, R. A., Sawant, S. R., Jadhav, B. T. (2013).
Modeling of Hydraulic Turbine and Governor for Dynamic Studies of HPP.
IJCA Proceedings on International Conference on Recent Trends in Information Technology and Computer Science 2012 ICRTITCS, 10, 6–11.
-  Otto Villa, A. (2012).
Estudio Estabilidad en Unidades de Generación Hidráulica.
Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad 24 (34), 124–130.
-  Piriz, H.D., Cannatella, A.R., Guerra, E., Porcari, D. A. (2012).
Inertia of Hydro Generators. Influence on the Dimensioning, Cost, Efficiency and Performance of the Units.
7th Annual CIGRÉ Canada Conference on Power Systems, Monreal, Quebec, Canadá.
-  Sanz Feito, J. (1993).
Centrales Eléctricas.
Madrid (Spain): Universidad Politécnica de Madrid.
-  Rojas, S., Martín, V. (1997).
Centrales hidroeléctricas: Teoría y problemas.
Cáceres, Spain: Universidad de Extremadura.



Sharma, J.D., Kumar, A. (2014).

Development and Implementation of Non-Linear Hydro Turbine Model with Elastic Effect of Water Column and Surge Tank.

International Journal of Electrical and Electronics Research 2(4), 234–243.



Suining, D. (2011).

Freshmen's Drawing Abilities with Multimedia: an Analysis of Portfolios with Grading Rubrics.

American Society of Engineering Education (ASEE). Presented at American Society of Engineering Education (ASEE) Annual Conference & Exposition, Vancouver, BC, Canada. http://opus.ipfw.edu/viscomm_facpres/11



Vicéns, J.L., Zamora, B. (2014).

Utilización de la CFD como herramienta de apoyo al estudio inicial de las Turbomáquinas Hidráulicas.

Modelling in Science Education and Learning 7, 49–59.



Vicéns, J. L. (2012).

Una modalidad de Tutor Facilitador en la Enseñanza de la Ingeniería.

Actas del XV Congreso Nacional y V Iberoamericano de Pedagogía, Burgos (España).



Viedma, A., Zamora, B. (2008).

Teoría y problemas de máquinas hidráulicas.

Cartagena, Spain: H. Escarabajal & Universidad Politécnica de Cartagena.



Xiao Z., Meng S., Lu N., Malik O.P. (2015).

One-Step-Ahead Predictive Control for Hydroturbine Governor.

Mathematical Problems in Engineering 2015 (Article ID 382954).

[doi:10.1155/2015/382954](https://doi.org/10.1155/2015/382954).



Zoppetti, G. (1979).

Centrales Hidroeléctricas: su Estudio, Montaje y Ensayo.

Barcelona, Spain: Gustavo Gili.