

MODELACION Y ESTUDIO DE REGULADORES DE VELOCIDAD DE  
DIFERENTES TECNOLOGIAS A PARTIR DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Bertrán E., Herranz J., Munilla I.

Dpt. de Sistemas de Control  
E.T.S.I. Telecomunicación  
Universitat Politècnica de Catalunya.

**RESUMEN.** Se describen y modelan tres reguladores de velocidad de diferentes concepciones y tecnologías: El primero de turbina Kaplan y tecnología oleo-mecánica, los otros dos de turbinas Francis, uno oleo-mecánico y el otro electrónico. La estructura del modelo se ha elegido de acuerdo con la propuesta del IEEE Power Engineering Society; los parámetros se han determinado experimentalmente, presentando y razonando el proceso de identificación estructurado en los siguientes pasos: 1/ Formulación del modelo. 2/ Planificación de los procedimientos experimentales. 3/ Procesado de resultados y estimación de los parámetros y 4/ Validación del modelo. Se comparan los resultados numéricos, así como las respuestas de los tres reguladores. Por último se comentan algunos aspectos prácticos concernientes a cada uno de los parámetros del modelo.

INTRODUCCION

La creciente complejidad de los sistemas de energía eléctrica ha estimulado el desarrollo de trabajos de modelación, identificación y simulación destinados al estudio de sus características de funcionamiento con objeto de asegurar la calidad y continuidad de su servicio, así como mejor adecuar la concepción de los sistemas de seguridad y control en cada una de sus ampliaciones.

En los trabajos de obtención de modelos dinámicos los problemas se centran, fundamentalmente, en torno a reducir la complejidad estructural de los mismos y a desarrollar las técnicas experimentales y analíticas necesarias para determinar los valores de sus parámetros.

Aquí se presentan algunos aspectos prácticos sobre la identificación experimental de tres reguladores de velocidad de distintas tecnologías, así como un estudio comparativo de sus parámetros. El modelo utilizado es el del IEEE (1973) por su uso generalizado y, en especial, por su inclusión en gran parte de los programas de simulación existentes (ver fig.1).

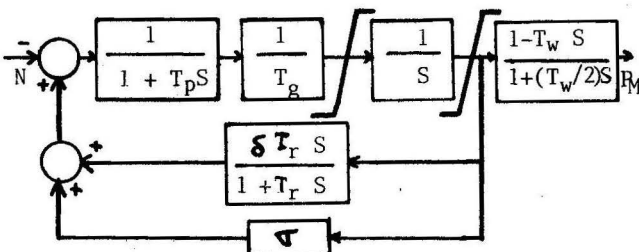


Fig. 1.- Modelo de un regulador de velocidad según la propuesta del IEEE.

La concepción y realización del programa de ensayos ha venido condicionada por los siguientes aspectos:

- 1/ Adecuación estructural del modelo.
- 2/ Perturbar al mínimo el funcionamiento normal del grupo turbina/alternador.
- 3/ Accesibilidad de los puntos de interés.
- 4/ Limitaciones del equipo de medida disponible.

Estas limitaciones, junto con el propio diseño del regulador, son las que han determinado la estrategia de identificación a emplear. En algunos casos, la accesibilidad del regulador y su semejanza con el modelo del IEEE ha permitido el uso de métodos de identificación "personalizada" de los diferentes bloques que, en esencia, se ha realizado del modo siguiente: Después de la obtención de los resultados experimentales, estos han sido adecuados para su posterior tratamiento en el laboratorio, intentando minimizar los errores de conversión de escala, de offset y de ruido (tanto el proveniente del propio equipo de medida como el del almacenamiento de resultados). Superada esta etapa, han sido identificados cada uno de los bloques del modelo y, finalmente, el modelo total, cuyas previsiones han sido contrastadas con los resultados experimentales.

El método de identificación utilizado se ha basado en técnicas mixtas de tipo temporal/frecuencial a partir de la grabación magnética de un número considerable de respuestas correspondientes a señales de prueba fáciles y permisibles. En algunos casos, con ayuda de los datos constructivos, ha podido obtenerse una primera aproximación de ciertos parámetros del regulador que, posterior-

mente, han pasado por un primer ajuste vía frecuencial (FFT) mediante la determinación de las frecuencias de codo dominantes (aunque la exactitud de dicha determinación se ha visto limitada por requerir señales de larga duración y medidas repetitivas a fin de detectar el error producido por los truncamientos). La presencia de alinealidades ha exigido la realización de medidas con diferentes niveles de consigna con el fin de obtener una función de coherencia que hiciera fiables los resultados de la FFT.

A partir de esta primera estimación individualizada de los parámetros, se ha efectuado un ajuste global posterior con ayuda de un programa de optimización paramétrica. Para más detalles del proceso de identificación ver Bertrán et al. (1984), Munilla et al. (1984) y Bertrán et al. (1984a).

#### REGULADOR DE VELOCIDAD OLEO-MECANICO DE UNA TURBINA KAPLAN.

Los valores paramétricos del modelo de un regulador de turbina Kaplan tiene especial interés ya que no aparecen frecuentemente en la bibliografía. Este regulador experimentado de la firma ESCHER-WYSS pertenece a una central hidroeléctrica con cuatro grupos accionados por turbinas Kaplan de una potencia nominal de 68 MW cada uno. Dichos reguladores son de diseño especial (fig. 2) ya que, originalmente, habían sido concebidos para turbinas Francis.

Aunque en un principio se intentó el desarrollo de un modelo específico más ajustado a su estructura física finalmente se abandonó la idea por el gran esfuerzo experimental que requería, regresando al modelo propuesto por el IEEE. Para ello se partió de la hipótesis de que el movimiento de los álabes del rodetete seguía de forma prácticamente instantánea al distribuidor (hipótesis que ha sido confirmada experimentalmente para potencias superiores a los 8 MW).

Una dificultad en la identificación de estos reguladores ha sido la difícil correlación entre las variables del modelo adoptado y las variables directamente accesibles: en primer lugar porque el modelo está orientado a los reguladores de turbinas Francis y, por lo tanto, no contempla el lazo de coordinación de los álabes del rodetete; en segundo lugar, como es característica de los reguladores de esta firma, los ajustes del estatismo permanente y del transitorio no están dentro del lazo de posición del servomotor (tal y como aparecen en el modelo) sino que están implementados en el propio regulador de velocidad.

En cuanto a las técnicas de identificación, la presencia de ciertas alinealidades ( $K_{sa}$ ,  $j$ ,  $E$  de la fig. 2) que disminuyen el valor de la función de coherencia, ha obligado a dar más énfasis a la información constructiva y a los registros temporales que a la información derivada de los análisis frecuen-

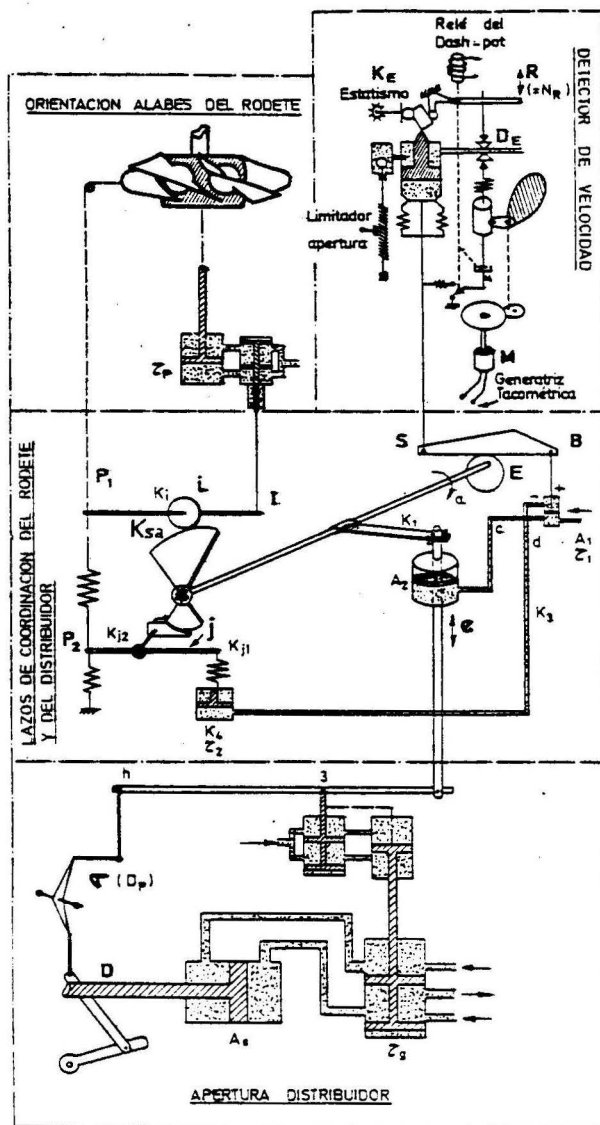


Fig. 2.- Esquema del regulador de velocidad de una turbina Kaplan.

ciales.

Finalmente, y considerando que el estatismo transitorio queda constructivamente anulado al acoplar el grupo a la red, se obtuvieron los resultados experimentales de la primera columna de la Tabla 1 (para la validación del modelo ver Bertrán (1984)).

#### REGULADOR OLEO-MECANICO DE UNA TURBINA FRANCIS.

El segundo de los reguladores experimentados ha sido el modelo 570 de NEYRPHIC. Este regulador (fig. 3), al requerir menores esfuerzos mecánicos, presenta un tamaño reducido en comparación con el regulador del apartado anterior. En contrapartida, es altamente sensible a las perturbaciones mecánicas y tiene algunos de los puntos de interés para su identificación difícilmente accesibles.

Su modelación se ha visto facilitada por la gran concordancia entre su propia estructura y la del modelo propuesto por el IEEE, basando los planos del fabricante y algunos registros temporales para una buena estimación de los parámetros.

REGULADOR ELECTRONICO DE UNA TURBINA FRANCIS

Este regulador de la firma VEVEY es más versátil que los anteriores al disponer de lazos separados para el ajuste de velocidad y de la apertura del distribuidor. dado que, prácticamente, está implementado con tecnología electrónica, los ensayos se han visto enormemente facilitados tanto por la accesibilidad como por no requerir transductores específicos. Otra ventaja derivada de su constitución electrónica ha sido la posibilidad de obtener resultados a partir del análisis de los esquemas electrónicos, lo que ha servido para reafirmar los valores obtenidos experimentalmente. El esquema de este regulador se muestra en la fig.5.

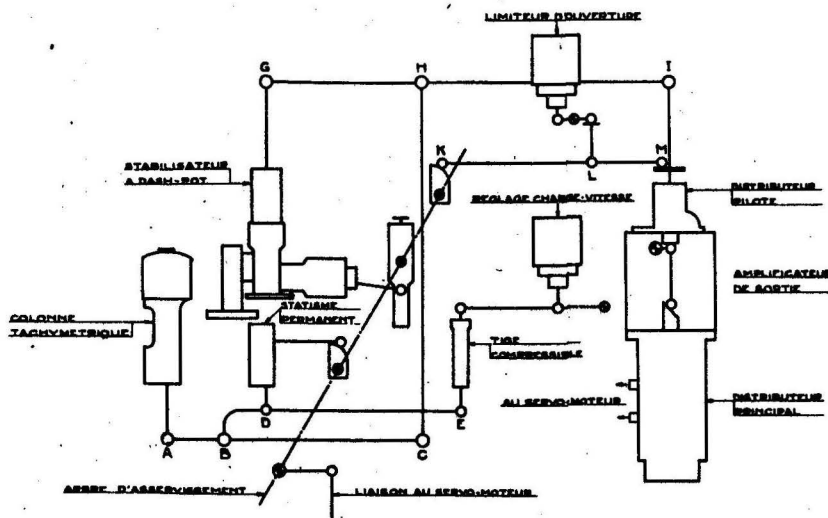


Fig. 3.- Regulador oleo-mecánico de una turbina Francis.

A partir de dichos registros se ha reconstruido, mediante un calculador analógico, la dinámica de los puntos inaccesibles, disponiendo así de la información necesaria para poder hacer una primera estimación de los parámetros del modelo. En una segunda aproximación se han ajustado los mismos minimizando la desviación cuadrática. Así se han obtenido los valores expuestos en la segunda columna de la Tabla 1.

La figura 4 muestra la validez de los resultados obtenidos al comparar la respuesta medida con la simulada.

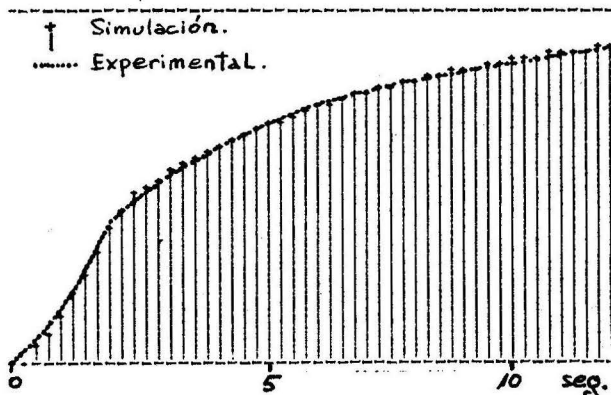


Fig.4.- Respuesta del distribuidor frente a una variación de carga de 10 a 5 MW. (grupo de 80 MW nominales)

Una de las principales dificultades encontradas para adecuar este regulador al modelo del IEEE han sido la presencia de un compensador acelerotacométrico a la entrada del

lazo primario y la alinealidad de la válvula distribuidora de aceite al servomotor, no contemplada en el modelo del IEEE. La primera dificultad se ha superado con mediante técnicas de reducción del orden del modelo y la segunda adecuando los valores paramétricos según la excursión relativa del servomotor (en concreto se ha recurrido a dar dos valores al parámetro  $T_r$  para poder representar satisfactoriamente las dos zonas de funcionamiento de la válvula distribuidora).

Los valores obtenidos se incluyen en la columna tercera de la Tabla 1, y en la fig. 6 se comparan las previsiones del modelo obtenido con los resultados experimentales.

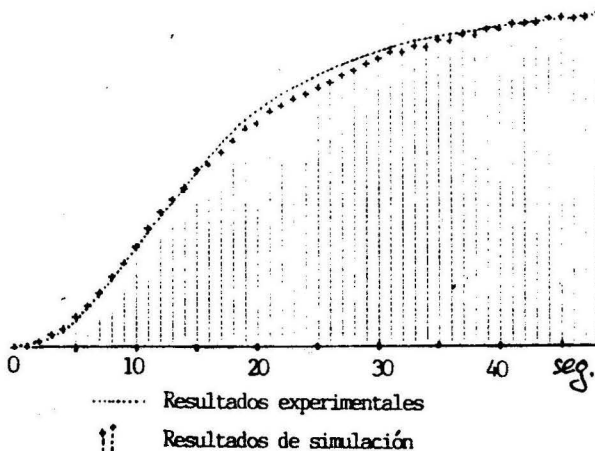


Fig.6.- Respuesta del distribuidor frente a una variación de carga de 10 a 2 MW (grupo de 45 MW nominales)

Alimentac. Velocidad Apertura Potencia Ordenes exteriores

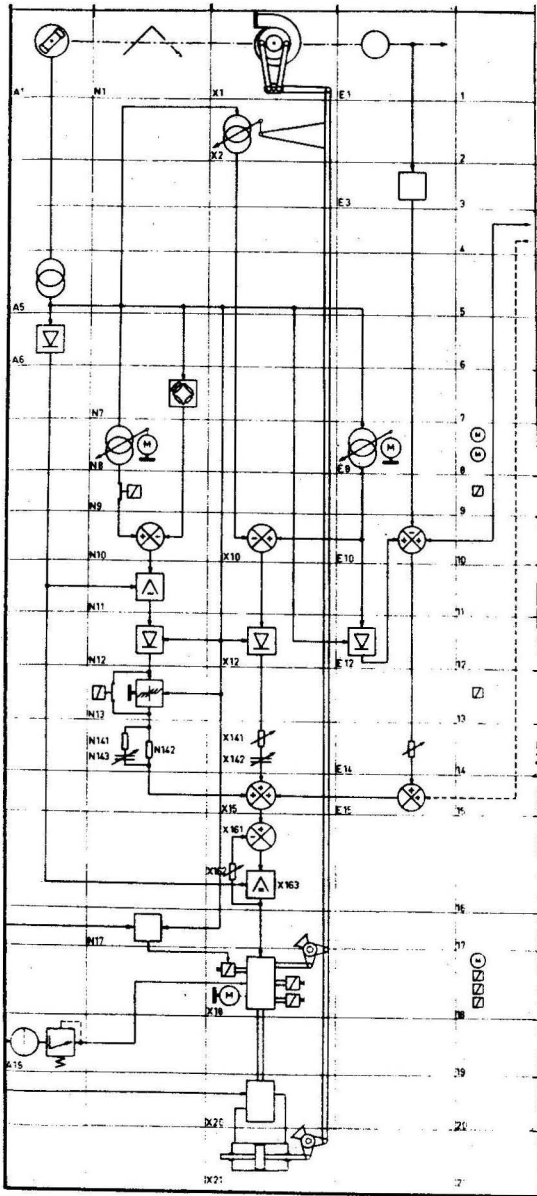


Fig.5.- Esquema del regulador electrónico de una turbina Francis.

TABLA DE RESULTADOS.  
COMPARACION.

En la Tabla 1 se presentan los resultados paramétricos obtenidos en los experimentos descritos, ampliándolos con los obtenidos por otros autores.

EXPERIM. PROPIAS	IEEE		RAMEY	CALOVIC.	HIYAMA	
	nº1	nº2	nº3	(1973)	(1970)	(1972)
0,067	0,061	0,201	0,2	0,2	0,1	0,6
0,214	0,04	0,03	0,04	0,1	0	0
0,04	0,0749	0,06	0,05	0,04	0,05	0,036
0	0,107	1,33	0,3	0,31	0,4	0,48
-	2,197	0,5*	5	5	2	4
0,764	0,867	1,3	1	1	0,757	1

TABLA 1.- VALORES EXPERIMENTALES.

La dispersión de valores paramétricos de la tabla anterior es reflejo de la diversidad de dinámicas, como hemos comprobado en trabajos de simulación en los que hemos reproducido el comportamiento de distintos reguladores de velocidad experimentados por diferentes autores. Aproximando las respuestas simuladas a un primer orden, se han obtenido constantes de tiempo comprendidas entre los 6 y los 69 seg. para reguladores de turbinas Francis y entre los 2 y los 15 seg. para reguladores de turbinas Kaplan. De esta disparidad de resultados se desprende la necesidad de efectuar los estudios de simulación (estabilidad y seguridad del sistema eléctrico) con valores paramétricos propios del sistema objeto del estudio.

En la fig. 7 se muestra la respuesta comparada de la apertura del distribuidor de cada una de las centrales experimentadas frente a una entrada en escalón unitario de 1 Hz., siendo de destacar la mayor velocidad del regulador de la turbina Kaplan. La dinámica de los dos reguladores de turbinas Francis depende, principalmente, del ajuste de  $\delta$ .

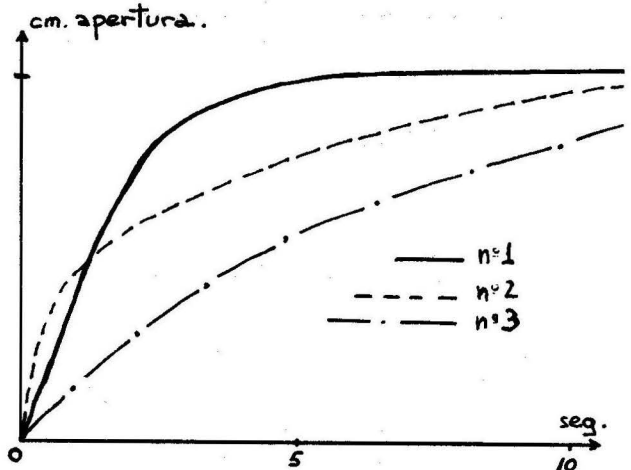


Fig. 7.- Comparación de las respuestas de los tres reguladores experimentados.

ALGUNAS CONSIDERACIONES PRACTICAS.

De los trabajos realizados pueden obtenerse algunas conclusiones teórico-prácticas de los diferentes parámetros, así como de los métodos aconsejables para su determinación:

$T_w$ : El uso de la relación clásica

$$\frac{W}{Z} = \frac{1 - T_w S}{1 + (T_w/2)S}$$

W=velocidad turbina  
Z= apertura distribuidor

para representar al comportamiento de la parte hidráulica de una central depende del diseño concreto de ésta. Así, cuando cada turbina es alimentada desde el embalse mediante su propia tubería forzada, el modelo resulta satisfactorio, perdiendo validez a medida que las tuberías forzadas se vayan ramificando.

Por otra parte, aunque sencillo, este modelo



responde a una hipótesis pesimista, ya que el diseño de las tuberías puede minimizar el golpe de ariete y, consecuentemente, el comportamiento de fase no mínima.

En cuanto a la determinación del valor del parámetro  $T_w$ , una solución exacta sería la implantación de un transductor de par en el eje de la turbina, evaluándose  $T_w$  a partir de un análisis espectral del par y  $\omega$  de la apertura del distribuidor. Dado el esfuerzo experimental que ello representa, una solución más sencilla es aproximar  $T_w$  por expresiones como la descrita en (IEEE, 1973). Para un segundo ajuste de  $T_w$  hay que considerar que la relación clásica anterior (usada por el IEEE) es tanto más válida cuanto mayor sea el nivel de carga de la turbina. Por otro lado hemos detectado una variación de  $T_w$  según la excursión relativa del servomotor.

$\sigma$  : Este parámetro es muy crítico ya que es el que determina la ganancia estática del regulador. Si bien su cálculo es fácil a partir del valor porcentual que suele venir indicado en el propio regulador, su determinación experimental es costosa (especialmente en los reguladores mecánicos), y no suele ser posible con el grupo desacoplado de la red, ya que en este estado los reguladores acostumbra a cambiar algunos de sus parámetros. Además, a menos que existan lazos separados para la regulación de apertura y de la velocidad, es difícil excitar al sistema con una señal de prueba adecuada.

En los reguladores mecánicos, al igual que en algunos electrónicos, el error de velocidad es detectado mediante un motor de bolas, y la entrada de la consigna se efectúa añadiendo un offset a la posición del eje de este motor. Esta consigna no puede ser usada como señal de entrada para la determinación de  $\sigma$ , ya que es difícil establecer una relación cuantitativa entre el offset añadido manualmente al eje del motor de bolas y las desviaciones de la frecuencia de la red. Una alternativa es el uso cruzado de dos grupos de la central, empleándose al alternador piloto del primero (desacoplado de la red) para excitar el motor de bolas del segundo. De esta forma, si se ajustase la velocidad del primer grupo a 50 Hz y luego se fuera modificando ligeramente, obtendríamos una señal de entrada al detector de velocidad del segundo grupo válida para su identificación.

Este procedimiento presenta algunas dificultades, ya que la excitatriz piloto efectúa funciones tales como la alimentación del motor auxiliar de la amplidina (en regulación automática) y, eventualmente, el suministro de una intensidad constante de polarización del devanado magnetizante de ésta. Por esto la conexión del detector de velocidad de un grupo a la excitatriz piloto de otro puede suponer un exceso de carga para ésta, lo que puede obligar a alterar su conexionado normal a fin de intentar reducir su carga.

En los reguladores que no detectan el error de velocidad mediante un motor de bolas (p.e., mediante un puente de Wien), es más fácil in-

troducir una señal de prueba que simule una variación de la frecuencia de la red.

$\delta, T_r$  : Estos dos parámetros pertenecen al lazo de realimentación transitoria, teniendo la dinámica del sistema una considerable sensibilidad a sus variaciones. El ajuste que se hace de estos parámetros tiene por objetivo fundamental contrarrestar los efectos nocivos (para la estabilidad) de la respuesta de fase no mínima de la etapa hidráulica. Para obtener (experimentalmente) una buena dinámica en el lazo de realimentación transitoria, lo ideal es desacoplar al grupo de la red y variar bruscamente la consigna de velocidad desde el mando local del regulador. En algunos casos el valor de estos parámetros, y especialmente el de  $\delta$ , se ve alterado al quedar el grupo desacoplado de la red. En este caso hay dos alternativas: una, la propuesta por Hovey (1962), basada en desmontar el "dash-pot" y otra, tomar gran cantidad de información durante los ensayos a fin de poder ajustar posteriormente  $\delta$  y  $T_r$  por simulación.

$T_g$  : La determinación de  $T_g$ , sea por métodos temporales o por frecuenciales, no supone un gran problema, dado que la cadena directa del regulador suele tener puntos accesibles para las mediciones. Cuando la válvula distribuidora tenga un acusado comportamiento alineal, este parámetro dependerá del punto de trabajo de la válvula. Si la alinealidad es elevada, puede que con la modificación de  $T_g$  no se consiga reproducir la dinámica del regulador en un margen suficiente de funcionamiento, debiéndose recurrir a la inclusión de dicha alinealidad en el modelo (alterando así la propuesta del IEEE) o a la modificación de parámetros a los que la respuesta sea más sensible.

$T_p$  : Este es un parámetro poco importante y muchos autores lo fijan en cero. Como se ha detectado en las simulaciones efectuadas, la respuesta del regulador no presenta una gran sensibilidad con relación al mismo. La gama de valores sugeridos por el IEEE suele dar resultados satisfactorios cuando  $T_p$  es de difícil obtención experimental.

## CONCLUSIONES

Se han descrito y modelado según la propuesta del IEEE tres reguladores de velocidad de diferentes tecnologías, presentándose los valores paramétricos obtenidos experimentalmente y razonándose el proceso de obtención. Los resultados numéricos se han contrastado con los de otros trabajos y, finalmente, se han comentado aspectos teórico-prácticos relacionados con la determinación experimental de los parámetros del modelo.

## BIBLIOGRAFIA

Bertrán E., Herranz J., Munilla, I. (1984). Estudio del sistema de regulación de frecuencia en centrales hidroeléctricas a partir de modelos experimentales. II Simposio Nacional sobre Automática en la Industria. pp. 99-106.

- Bertrán E., Herranz J., Munilla I. (1984a) Identificación experimental de la Central Hidroeléctrica de Ribarroja. Proyecto P.I.E. (ENHER). Parte I.
- Calovic M.S., (1972). Linear Regulator Design for Load-Frequency Control. IEEE transactions on PAS. vol PAS-91, pp 2271-2285.
- Hiyama T. (1982) Design of Decentralised Load Frequency Regulators for Interconnected Power Systems. IEE proceedings, vol 129, nº 1. pp. 17-23.
- Hovey L.M., (1962). Optimum adjustment of hidrogovernors on Manitoba hidro-system. AIEE transactions. pp 581-588.
- IEEE Committee Report (1973). Dynamic Models for Steam and Hidroturbine in Power System Studies. IEEE trans. on PAS. vol PAS-92, pp. 1904-1915.
- Munilla I., Bertrán E., Herranz J. Identificación paramétrica de sistemas de regulación de tensión en centrales hidroeléctricas. "case - study". II Simposio Nacional sobre Automática en la Industria. pp. 91-98.
- Ramey D.G., Skooglund J.W. (1970). Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies. IEEE trans. on PAS. vol. PAS-89, nº 1 ,pp 106-112.

#### SUMMARY

Three speed regulators of different structure and technology are described: one for Kaplan turbine and the other two for Francis. The model structure has been selected according to the IEEE. The parameters has been determined experimentally presenting and reasoning the identification process organized according to the following steps: 1/ Model formulation. 2/ Experiments plant. 3/ Data processing and parameters stimation. 4/ Model validation. The numerical results and dynamic response of the three regulators are compared. Finally some practical aspects are considered of each one of the parameters of the model.