

## ESTUDIO DEL SISTEMA DE REGULACION DE FRECUENCIA EN CENTRALES HIDROELECTRICAS A PARTIR DE MODELOS EXPERIMENTALES

E. Bertran, J. Herranz, I. Munilla

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

Resumen. Para el estudio del comportamiento de los SEP, hay que obtener diversas representaciones dinámicas, entre ellas la de los sistemas de regulación de velocidad. Se presenta el modelo de los reguladores de velocidad de hidroturbinas para estudios de estabilidad y transitorios que permite representar la mayoría de los sistemas de regulación de velocidad existentes en la actualidad (tanto para turbinas Francis como Kaplan). Se describe el modelo detallado de un regulador de turbina Kaplan. Se programa y razona el programa de ensayos mediciones para la identificación de sus parámetros. La técnica de identificación utilizada es de naturaleza mixta temporal/frecuencial. Los resultados se verifican por simulación y el modelo obtenido se aplica al estudio del funcionamiento del sistema.

### 1. INTRODUCCION

La creciente complejidad de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) han estimulado el desarrollo de trabajos de modelación, identificación y simulación destinados al estudio de las características de su funcionamiento y estabilidad con objeto de mejorar la calidad y continuidad de su servicio.

El objetivo de la presente comunicación es el de presentar las experiencias de identificación realizadas en una central hidroeléctrica (concretamente, en el regulador hidromecánico de velocidad de una turbina Kaplan) con objeto de obtener una estimación de sus parámetros dinámicos para su posterior uso en un programa de simulación del SEP al que pertenece.

Aunque son muchos los métodos que se han propuesto para determinar los valores de los parámetros, los basados en la respuesta temporal han resultado ser, en este caso, los más adecuados debido fundamentalmente a diversas dificultades halladas para la aplicación de otros métodos.

Las señales de prueba han consistido en cambios de la velocidad de referencia que, debido a las condiciones de operación, no han podido ser de naturaleza simple.

Las variables observadas han sido, en general, desplazamientos, lo que ha requerido la selección y uso de potenciómetros adecuados.

Se ha creído oportuno profundizar en el detalle interno del funcionamiento del regulador para mejor comprender y validar los modelos propuestos.

El proceso de traducción de los parámetros físicos a parámetros dinámicos del modelo ha significado un reforzamiento de este objetivo

La simulación del sistema de control ha verificado la validez de los resultados obtenidos.

### 2. LA REGULACION DE VELOCIDAD

#### 2.1. Objetivo.

Durante más del 99% de su tiempo de funcionamiento, los SEP están operando en su estado llamado normal en el que tanto la frecuencia como la tensión se mantienen en sus valores prescritos. Esta constancia es el resultado de un cuidadoso equilibrio entre la potencia demandada y la suministrada por los diversos grupos turbina/alternador (T/A).

Una vez seleccionado el estado normal de un determinado grupo T/A, el

problema se centra en mantenerlo por medio de los correspondientes lazos de control de la velocidad y de la tensión.

Cuando la demanda se desvía de su valor nominal, el estado del sistema ( $f, v$ ) cambia. El sistema de control detecta dichos cambios e inicia las oportunas acciones correctoras que deberán eliminar rápida y eficazmente las desviaciones del estado. Aunque ambos lazos presentan cierto acople, en la práctica se los estudia de forma independiente.

El objetivo básico de la regulación de velocidad (o de frecuencia/potencia - RFP) es ayudar a mantener la frecuencia mediante su aportación a la potencia demandada.

En la RFP pueden considerarse básicamente dos lazos:

El lazo primario (relativamente rápido y de acción tipo P) destinado a compensar las pequeñas perturbaciones habituales, relativamente rápidas y frecuentes. Este lazo responde a las variaciones de velocidad/frecuencia (medida indirecta de un desequilibrio de potencia) variando la apertura del distribuidor (y, por ende, la potencia de la turbina) mediante la acción de un servomecanismo hidráulico. De esta manera se consigue una primera regulación de la velocidad ajustando la potencia generada y compartiendo, según su tamaño, el incremento de la demanda.

El lazo secundario (de acción tipo I) destinado a eliminar las derivas que pueda experimentar la frecuencia y que, de forma más lenta, realiza el ajuste fino de la misma.

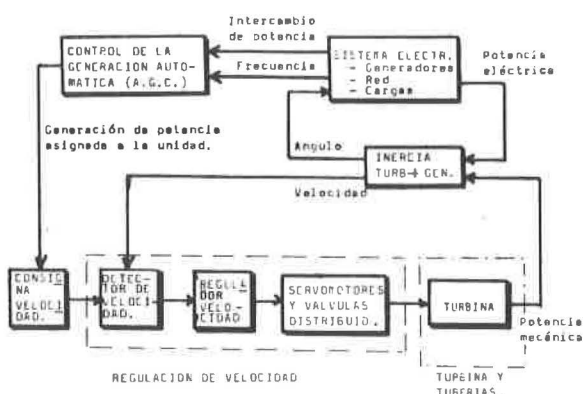


Fig.1 Regulación de velocidad/frecuencia en un SEP

## 2.2. Modelos Dinámicos.

En la fig. 1 se presenta el esquema de bloques de la regulación de frecuencia en el que se pone de relieve la interrelación entre el grupo T/A y el SEP así como el detalle de los principales elementos que componen los lazos primario y secundario de la RFP.

En la fig. 2 se presenta el correspondiente diagrama funcional según los modelos propuestos por Ramey (1970) y IEEE (1973). El primer bloque ( $T_p$ ) corresponde al preamplificador (servo-válvula piloto). El bloque TB corresponde a la linealización de la etapa hidráulica (tuberías/turbina). Los bloques de retroacción,  $\sigma$  y  $\delta$ , corresponden al estatismo permanente y transitorio del control del pistón.

## 3. REGULADOR DE VELOCIDAD DE UNA TURBINA KAPLAN

### 3.1. Particularidades del Modelo.

Dentro de los trabajos de identificación que se están llevando a cabo en el Departamento de Sistemas de Control cabe destacar el del regulador de la fig. 3, tema central de la presente comunicación y cuyo interés específico radica en los siguientes motivos:

- 1) Se trata de un regulador originalmente diseñado para turbinas Francis y luego modificado para ser aplicado a una turbina Kaplan.
- 2) Requiere el desarrollo de un modelo del posicionamiento de los álabes del rodete.
- 3) Requiere traducir su complejidad estructural al modelo reducido de la fig. 2.

El funcionamiento básico de este regulador es el siguiente:

- El detector de velocidad (recuadro) recibe la señal del giro de la turbina vía la generatriz tacométrica  $M$ , la del valor de referencia vía el dial R y, por último, realiza su comparación contraponiéndolas en la restricción  $DE$ .
- La señal de error así formada es debidamente amplificada y se traduce en el movimiento  $S$  que, después de tres nuevas amplificaciones, se convierte en el desplazamiento  $D$  del servomotor que acciona la apertura del distribuidor y modifica el caudal que entra en la turbina.
- La retroacción de la posición del servomotor se realiza vía la palanca  $\sigma$ .

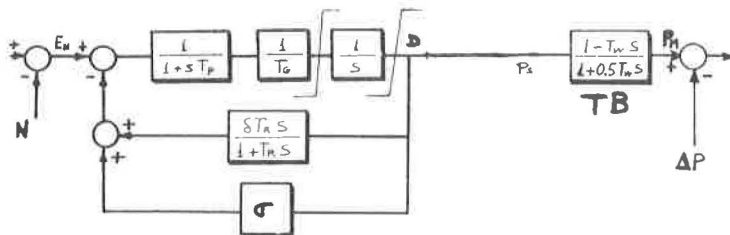


Fig. 2 Modelo del regulador de velocidad de una turbina

- La ganancia estática entre  $N_R$  y  $D$  puede ajustarse a través de la ganancia del detector de velocidad  $K_E$ .
- El estatismo transitorio (dash-pot) queda prácticamente anulado al conectar el grupo T/A a la red.
- La coordinación de los movimientos de distribuidor y álabes se hace a través de los contornos alineales  $K_{SA}$ ,  $i$ , e  $i$ .

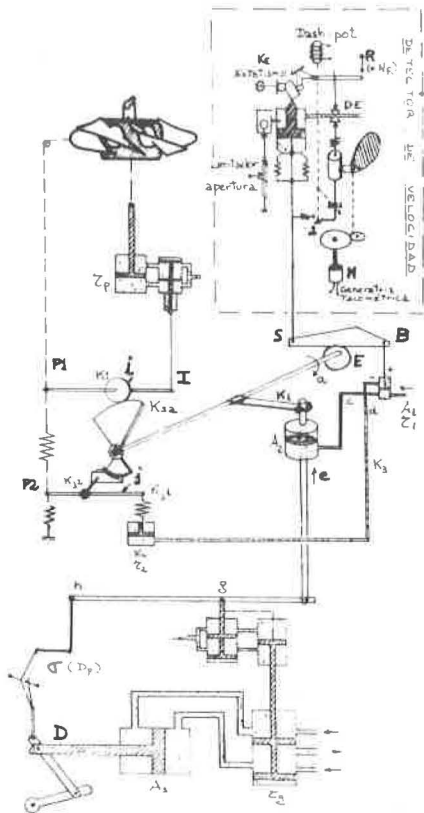


Fig. 3 Regulador de velocidad de una turbina Kaplan

Su diagrama funcional es el de la fig. 4. Obsérvese, en la parte izquierda, la aparición del lazo de control de los álabes y la existencia de alinealidades.

### 3.2. Variables a Medir.

Al no poderse establecer con claridad una correlación entre los parámetros físicos del regulador y los parámetros dinámicos del modelo, y con objeto de facilitar los posteriores trabajos de validación, se ha elegido un número elevado (redundante) de variables y parámetros a medir.

## 4. OBTENCION DE LOS DATOS

### 4.1. Estrategia. Consideraciones Previas.

- La concepción y realización del programa de ensayos a realizar se ha visto condicionado por una serie de limitaciones prácticas tales como:
- Difícil correlación entre las variables del modelo y las variables accesibles del regulador.
  - Perturbar al mínimo el funcionamiento normal del grupo T/A.
  - Dificultad de introducir señales de prueba típicas en los puntos adecuados.
  - Limitaciones del equipo disponible para la obtención y análisis de los datos.

Estas consideraciones nos ha llevado a elegir un método de identificación mixto temporal/frecuencial a partir de la grabación magnética de gran número de respuestas transitorias (algunas repetidas varias veces para asegurar su coherencia) que luego, previo cálculo de sus espectros (vía FFT), nos permitirán determinar las transmitancias.

Para la determinación de frecuencias bajas, la FFT impone la necesidad de disponer de señales dinámicas de larga duración así como la de múltiples medidas a fin de reducir el error producido por los truncamientos del procesado (Harris, 1978).

### 4.2. Selección de los Puntos de Observación.

Con objeto de facilitar las comprobaciones posteriores, se han escogido gran número de puntos de observación. Las mediciones se han visto facilitado por la robustez intrínseca del regulador. Los puntos elegidos han sido:

- Salida del tacómetro (M)
- Salida del detector de error de velocidad (S)
- Desplazamiento del servomotor (D)
- Desplazamiento de enlace (e)
- Desplazamientos alineales de enlace (j, i)
- Consigna válvula distribuidora (I)
- Orientación álabes del rodete ( $P_1$  y  $P_2$ )

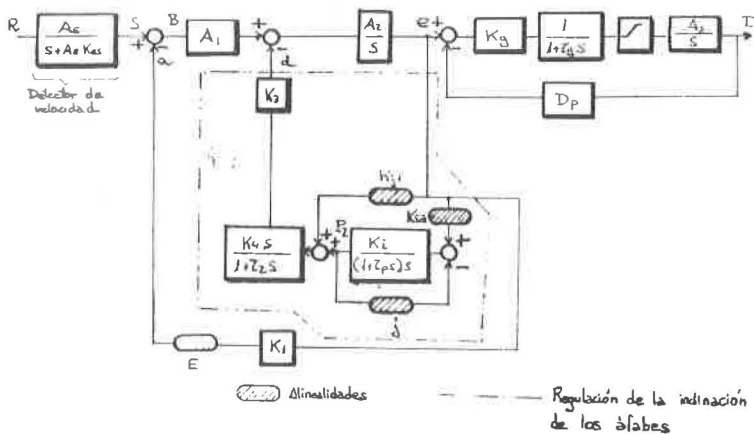


Fig. 4 Modelo detallado del regulador de la fig. 3

#### 4.3. Selección de Captadores y Equipo de Medida.

Excepto en el punto de medida  $M$  (cuya señal es directamente eléctrica) las medidas se han realizado previa transducción potenciométrica (rotativa para las variables  $e$  y  $D$  y lineal el resto).

Por consideraciones económicas y de disponibilidad, los potenciómetros lineales usados son los de uso general normalmente hallados en el mercado y elegidos después de una verificación y selección en el laboratorio. Su carga mecánica no altera el funcionamiento del regulador, y su recorrido máximo ha permitido hacer ensayos con variaciones de carga de 0 a 30 MW.

Considerando el compromiso entre linealidad y efecto de carga, se eligió un valor de potenciómetro de 50 K

La foto muestra parte del equipo utilizado en los ensayos del que cabe destacar el equipo grabador en cinta magnética de 8 canales HP3968A.

#### 4.4. Resultados Obtenidos. Respuestas Transitorias.

Para recuperar la información grabada en la cinta, se procedió a un previo trabajo de ajuste y calibración:

- 1) Los niveles de tensión registrados fueron ajustados a sus valores de la variable medida mediante los oportunos factores de conversión.
- 2) Los niveles de tensión ya ajustados fueron traducidos a los valores de la variable medida mediante los oportunos factores de conversión.
- 3) Los errores de conversión se estimaron en un 10%.

Para facilitar la conversión, se han trazado una serie de curvas de ganancia

estáticas obtenidas mediante repetidas grabaciones con igual nivel de carga. Estas curvas (fig. 5) han resultado de gran utilidad para detectar y compensar los desajustes de la grabadora y la pérdida de magnetización de la cinta.

Como resultado de todo este proceso, se han obtenido una serie de familias de respuestas transitorias adecuadamente escaladas. La fig. 6 muestra una de dichas familias.

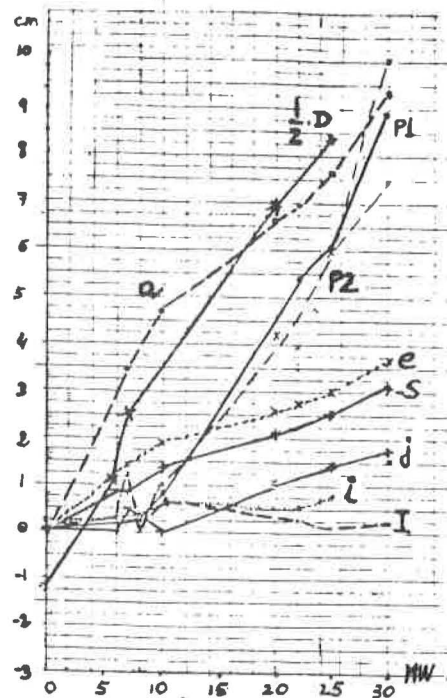


Fig. 5 Curvas de ganancias estáticas

### 5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

#### 5.1. Consideraciones Previas. Traducción al Dominio Frecuencial.

Con objeto de poder obtener la función de transferencia, y puesto que las señales de excitación al no ser sencillas no permitían una identificación por técnicas estrictamente temporales, se recurrió a una previa conversión al dominio frecuencial. Dicha conversión (obtención de los espectros así como la determinación de su cociente) se ha realizado con ayuda del Analizador

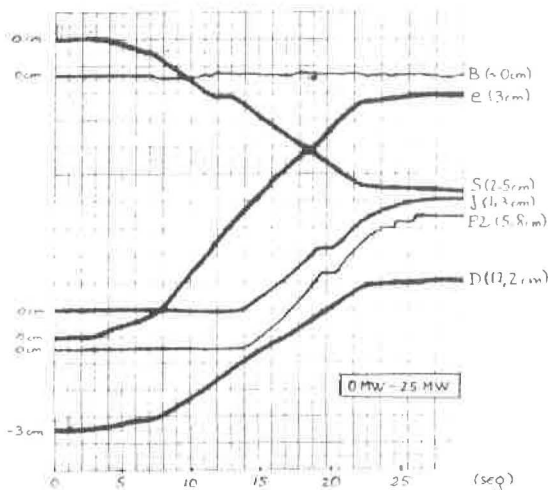


Fig 6 Respuestas transitorias

Digital HP5420A. Ello, no obstante, ha significado la superación de una serie de dificultades previas:

- 1) Búsqueda y elección de señales cuya función de coherencia sea alta ya que la presencia de elementos alineales, así como el ruido superpuesto a las medidas, ha reducido el nivel de coherencia entre bastante de las señales obtenidas.
- 2) Como la utilización de la FFT supone un truncamiento de las muestras tomadas sobre la información temporal, con la consiguiente influencia sobre el espectro, ello conlleva un segundo nivel de selección de las señales grabadas.
- 3) La influencia del truncamiento del muestreo de la información temporal está asociada a las ventanas utilizadas. Como, en nuestro caso, hemos empleado ventanas rectangulares, previamente hemos hecho un estudio empírico de la influencia que, sobre la respuesta frecuencial, tiene la función sinc introducida por la ventana. Para ello, en un calculador analógico, hemos implementado un sistema de segundo orden cuya respuesta temporal es de la fig. 7a obteniendo su espectro (fig. 7b) para diferentes puntos de truncamiento. La conclusión observada es que, para señales unipolares, los lóbulos de la función sinc tienen desviación de signo opuesto al de la polaridad.

Como resultado hemos aplicado lo anterior a la obtención de la  $T(w)$  entre las señales  $D$  y  $S$  (fig. 8a) obteniendo el resultado de la fig. 8b.

### 5.2. Determinación de los Parámetros del Modelo.

A partir de los resultados experimen-

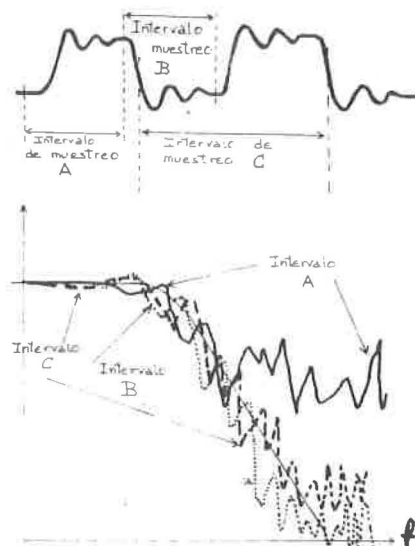


Fig. 7 Efecto espectral del truncamiento

tales, se pueden determinar los parámetros del modelo de la fig. 2.

### Consideraciones Previas.

- Suponemos  $\zeta = 0$  ya que el modelo trata de simular el comportamiento del grupo T/A acoplado a la red (ver 3.1).
- Se desprecia la dinámica del posicionamiento de los álabes (hipótesis validada por los experimentos realizados excepto cuando se opera con potencias inferiores a los 8 MW.)

Valores medidos (p.u.)	Valores típicos (p.u.)	Rango
$T_G = 0,06$	0,2	0,2-0,4
$T_p = 0,214$	0,04	0,03-0,05
$\sigma = 0,04$	0,05	0,03-0,06
$\zeta = 0$	0,3	0,2 - 1
$T_w = 0,764^{(*)}$	1	0,5 - 5

TABLA 1.

(\*)  $T_w$  es la constante de tiempo de la etapa hidráulica (tubería forzada y turbina) que según Ramey (1970) puede obtenerse

$$T_w = \frac{0,366 PL}{H_T A e} \quad \text{donde}$$

$P$  = potencia eléctrica en KW

$L$  = longitud de la tubería (pies)

$A$  = area tubería (pies<sup>2</sup>)

$H_T$  = altura del salto (pies)

e = rendimiento del grup T/A.

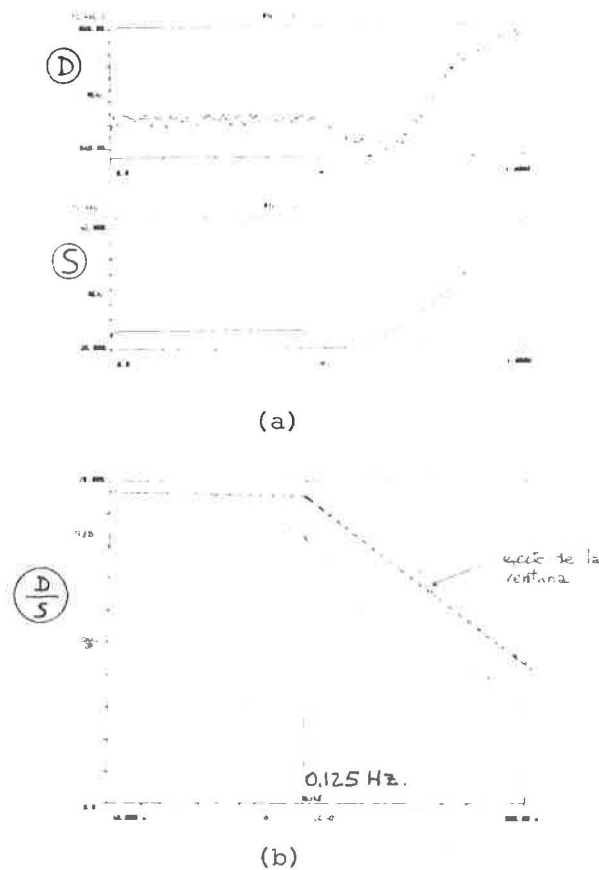


Fig. 8 a) Evolución temporal  
b) Módulo de la transmitancia

### 6. VALIDACION DEL MODELO. SIMULACION

Comparando estos valores con los recogidos por el IEEE (ver Tabla 1), observamos que las constantes de tiempo medidas  $T_C$  y  $T_D$  difieren sustancialmente de los valores típicos quedando el resto de parámetros dentro del rango de valores observados.

Con los valores obtenidos se ha simulado el modelo de la fig. 2, obteniéndose los resultados que se acompañan:

La figura 9b corresponde a la respuesta del distribuidor (D) frente al cambio de la velocidad de referencia ( $E_N$ ) de la fig. 9a (aumento de carga de 0 a 25 MW).

Las figuras 10a y 10b corresponden a una disminución de la carga de 25 a 8 MW. Como podemos observar, el límite de validez del modelo acaba alrededor de 9 MW, siendo la potencia final simulada de 8,8 MW. Cualquier intento de ampliar el rango de validez del

modelo supone la inclusión de las alinealidades.

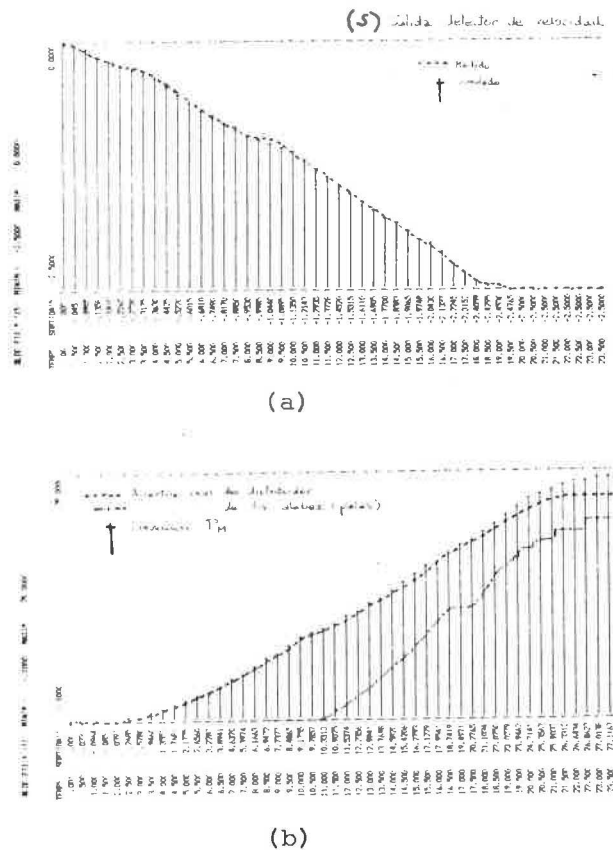


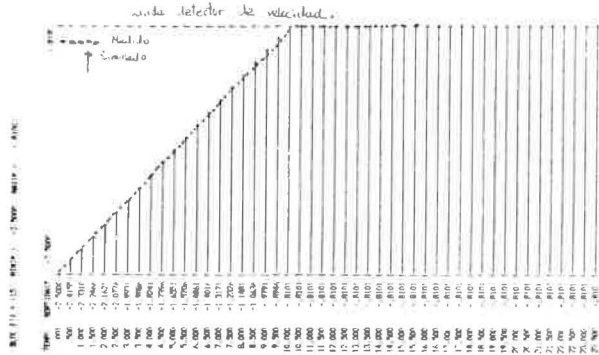
Fig. 9 a) Cambio de carga de 0 - 25 MW  
b) Respuesta del distribuidor

En las figuras 12a y 12b se ha simulado la evolución de la potencia generada ( $P_M$ ) por el grupo conectado en isla a una red (ver fig. 11 con detalle del lazo primario de frecuencia) ante el aumento repentivo de la demanda ( $P_O$ ) de 10 MW.

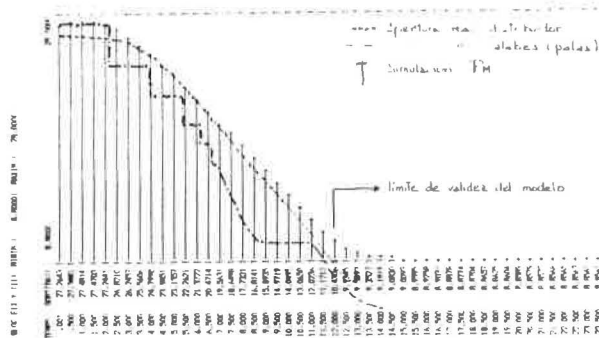
### 7. CONCLUSIONES

Se ha realizado la identificación del regulador de una turbina Kaplan por medios relativamente simples y muy relacionados con la estructura física del sistema. Los resultados obtenidos se ajustan bien a los valores normales en este tipo de regulador.

La validez del modelo lineal quede limitado a potencias superiores a los 9 MW. Una de las características del regulador estudiado es la ausencia en el control de posición del servomotor de un lazo de realimentación derivativo (dash-pot), lo que repercute en una fuerte disminución de la estabilidad en el caso de trabajar en isla.



(a)



(b)

Fig. 10 a) Cambio de carga de 25 - 8 MW  
b) Respuesta del distribuidor

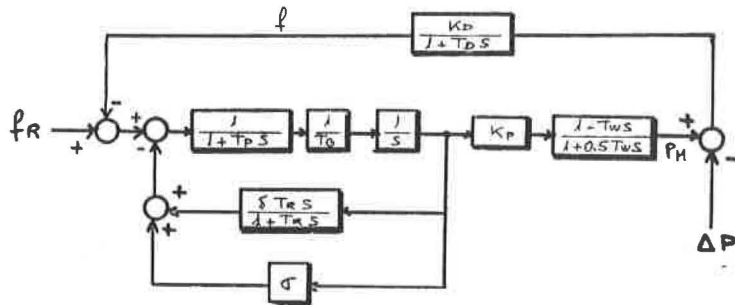
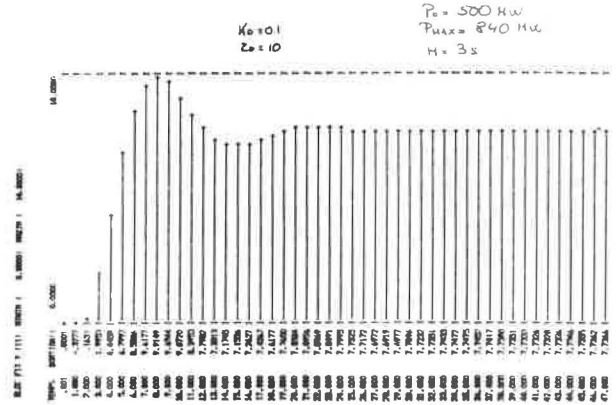


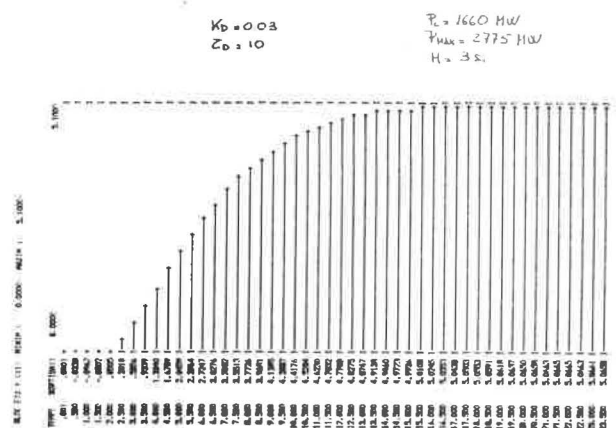
Fig. 11 Regulación de F/P. Funcionamiento en isla

REFERENCIAS

Harris, F.J., On the use of windows for Harmonic Analysis with the DFT. Proc. IEEE, Vol 66, nº 1 (enero, 1978)



(a)



(b)

Fig. 12 Simulación de su funcionamiento en isla

Hovey, L.M., Optimum adjustment of hydrogovernors on Man-itoba hydro-system. AIEE Trans. (dic. 1962)

Jasmin, G., Electric simulation of a hydro-turbine with its Penstock speed regulator and damping unit. IEEE Trans. PAS-102 (set, 1983)

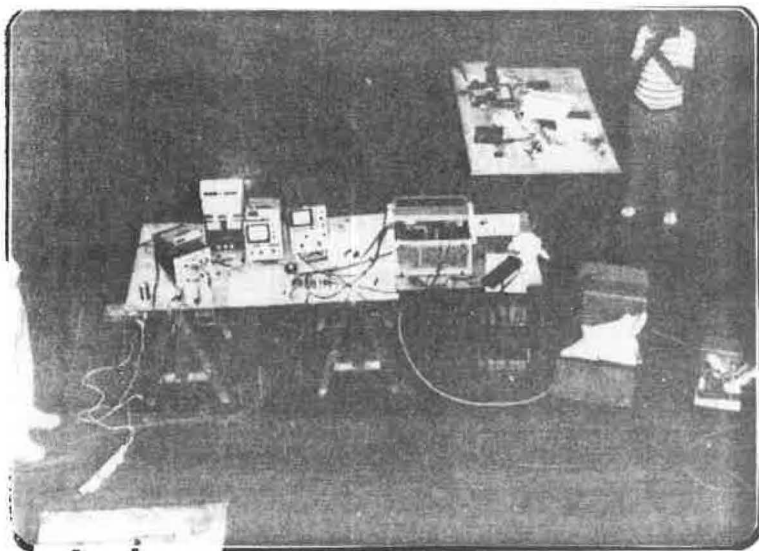
Oldenburger, R., Dynamic response of a hydroelectric plant. AIEE Trans. (oct, 1962)

Ramey, O.G., Detailed hydro-governor representation for system stability studies. IEEE Trans. PAS-89 nº 1 (enero, 1970)

Vevey, Regulateurs de turbines hydrauliques. Bulletin Technique VEVEY (1968)

## APENDI

### Detalle del montaje experimental



### SUMMARY

A detailed description of the speed regulatory system of a Kaplan turbine is presented. Its model is developed. The identification process is analyzed. Validation of the model is carried out by simulation.

