

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE TELECOMUNICACIÓ

TESI DOCTORAL

" APORTACIÓN AL CONTROL DIGITAL ÓPTIMO DE
SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA :
APLICACIÓN A LA REGULACIÓN POTENCIA -
FRECUENCIA " .

Autor: EDUARD BERTRAN ALBERTÍ

Director: JAUME HERRANZ LUIS

BARCELONA, SETEMBRE DE 1985

(2 toms)



U. P. C.

E.T.S.E. TELECOMUNICACIÓ

Biblioteca

6.- DISEÑO DEL RLO DISCRETO DE AREA AUTONOMA.

6.1.- INTRODUCCION.

La aplicación de ordenadores y de sistemas digitales de telemedida [61] para mejorar la seguridad de los SEE supuso también la informatización de los algoritmos de RPF [205], lo que la convierte en un problema de control digital en el que hay que considerar al SEE como un sistema híbrido en el cual las consignas discretas de los reguladores, elaboradas a partir de los valores muestreados de las telemedidas, se aplican a un sistema continuo (turboalternadores) [116,119,178,122,95].

El problema de la RPF digital ha sido abordado de distintas formas, que esquemáticamente se pueden agrupar en dos: 1/ Partiendo de estrategias diseñadas en el dominio continuo y estudiándose a posteriori y de forma empírica el efecto sobre la dinámica del SEE de la discretización de las acciones de control [16, 82,205]. 2/ Formulando desde el principio la RPF en el dominio discreto [95,122, 116,192]. Estos últimos, con un enfoque más coherente que los primeros, tratan la RPF con un período de muestreo simple cuya duración viene determinada por la del ciclo de telemedidas (normalmente entre 2 y 10 segundos), pero sin entrar en detalle sobre el efecto del retardo entre la llegada de las telemedidas y el cálculo de la acción de control en los ordenadores, y sin estudiar las prestaciones de una RPF basada en una acción de control múltiple (varias acciones dentro de un mismo período de muestreo).

En 1983, Dy Liacco [61] ha espuesto que una de las principales deficiencias de los algoritmos de RPF es el retardo en la ejecución de los programas. Esta misma deficiencia ya la había detectado también Zaborsky [213] en 1980, al proponer una forma de reducción de las variables de estado (que, en el fondo, puede interpretarse como una concepción paralela al concepto de área autónoma de Calović) que redujera el tiempo requerido por las telemedidas y las estimaciones de estado. Asimismo, en 1983, Stoffel y Ebert, al exponer algunos problemas detectados por Brown-Boveri y el Swiss Federal Institute of Technology en el desarrollo de unos programas de AGC, incluyen los debidos a los retardos de las telemedidas y a los desfases entre el tiempo de cálculo del ordenador y la adquisición de datos [178].

Por otro lado, los problemas de estabilidad derivados del asincronismo entre las consignas de los programas de RPF, de seguridad y de optimización económica están siendo paliados actualmente por diferentes autores [29-32,154] mediante la concepción de algoritmos que reduzcan el tiempo de cálculo requerido por los más lentos a fin de que sus consignas al programa de RPF se generen, idealmente, en tiempo real, de forma que se reduzca la probabilidad de que las consignas de seguridad y economía puedan ser contradictorias (apartado 3.3) a los

objetivos de control de la RPF (con la consiguiente posibilidad de oscilaciones en el SEE).

Por estos motivos el problema actual de la RPF, y en el caso concreto de esta Tesis el de la implementación digital del RLO de P/f, adquiere un nuevo grado de complejidad debiéndose evaluar el retardo de control, bien sea debido a las propias demoras entre el establecimiento de las telemidas y los cálculos de las acciones de control o sea consecuencia de una dilación en el período de muestreo debida a la interacción en tiempo real entre los programas de RPF, de seguridad y de economía.

Esta dilación del período de muestreo puede conllevar problemas de estabilidad en el SEE, por lo que, como apuntan Kumar y Malik (1984) [119], es importante evaluar la posibilidad de implementar estrategias de RPF capaces de aumentar la acción de control dentro de cada período de muestreo ("multirate control" en inglés). De esta forma, aunque haya un retardo de cálculo en el establecimiento de la última acción de control óptima, el telemando de consignas previas a las unidades generadoras posibilitaría el que no se perdiera la estabilidad por desatención del control (o, lo que es lo mismo, porque el aumento de tiempo entre acciones de control desplace fuera del círculo de radio unidad en el plano Z a raíces del sistema en lazo cerrado).

En el presente capítulo, después de repasar en las Bases Teóricas algunos aspectos sobre el diseño del RLO discreto, se desarrolla una nueva versión de la ecuación de Riccati, válida tanto para el diseño de RLOs discretos convencionales como para la optimización de sistemas en los que haya retaros de cálculo de la acción de control y para la de sistemas en que se duplique dicha acción dentro de cada período de muestreo.

A partir de esta nueva formulación del RLO discreto, se compara, via simulación con el modelo de dos áreas de distinta capacidad desarrollado en el Capítulo 2 previamente discretizado para un diseño realista del regulador, el comportamiento del RLO diseñado con ella con el de los RLOs diseñados con las ecuaciones discretas de Riccati convencionales, evaluándose la bondad de cada regulador tanto cuando hay retardos en el control como cuando no los hay. En un último trabajo de simulación se estudia el comportamiento del SEE frente a asincronismos entre el muestreo de las telemidas y las consignas del programa de RPF, comparándose las prestaciones del RLO discreto basado en una doble acción de control con las del RLO discreto convencional.

6.2.- BASES TEORICAS

6.2.1.- La ecuación discreta de estado. [120, 113, 179]

La formulación discreta de estado es directamente deducible a partir de la formulación continua cuando hay un operador de retención de orden cero (ZOH). Así, a partir de la ecuación de estado del sistema continuo

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{B} u, \quad [62.1]$$

y de su solución

$$\tilde{x}(t) = \tilde{\Phi}(t) \tilde{x}(0) + \int_0^t \tilde{\Phi}(t-\tau) \tilde{B} u(\tau) d\tau \quad [62.2]$$

donde $\tilde{\Phi}(t) = e^{\tilde{A}t}$ es la matriz de transición de estado, con la propiedad

$$\tilde{x}(t_1) = \tilde{\Phi}(t_1 - t_2) \tilde{x}(t_2), \quad [62.3]$$

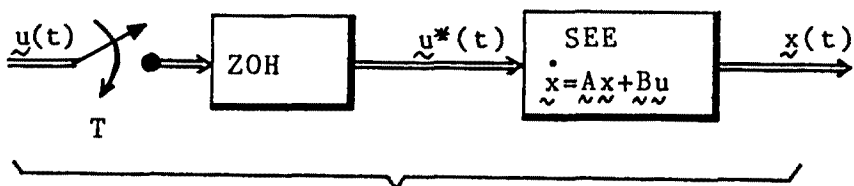
puede deducirse, cuando $u(\tau)$ es constante durante el periodo de muestreo T ,

$$\tilde{x}((k+1)T) = \tilde{\Phi}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T) u(kT), \quad [62.4]$$

siendo $\tilde{\Phi}(T) = e^{\tilde{A}T}$

$$\tilde{\Theta}(T) = \int_0^T \tilde{\Phi}(T-\tau) \tilde{B} d\tau \quad [62.5]$$

Esta última condición de que $u(\tau)$ sea constante en el intervalo $[0, T]$ supone, o bien que la frecuencia de muestreo sea muy elevada respecto a la dinámica del sistema, de forma que ésta varíe poco entre muestras, ó la presencia de un ZOH,



$$\tilde{x}((k+1)T) = \tilde{\Phi}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T) u(kT)$$

6.2.2.- El RLO discreto.

A partir de la ecuación de estado del sistema continuo [62.1] discretizado según [62.4], se trata de obtener un vector \tilde{K} tal que la ley de control

$$\tilde{u}^\circ(kT) = -\tilde{K} \tilde{x}^\circ(kT) \quad [62.6]$$

minimice a un determinado criterio integral J (fig. 62.1).

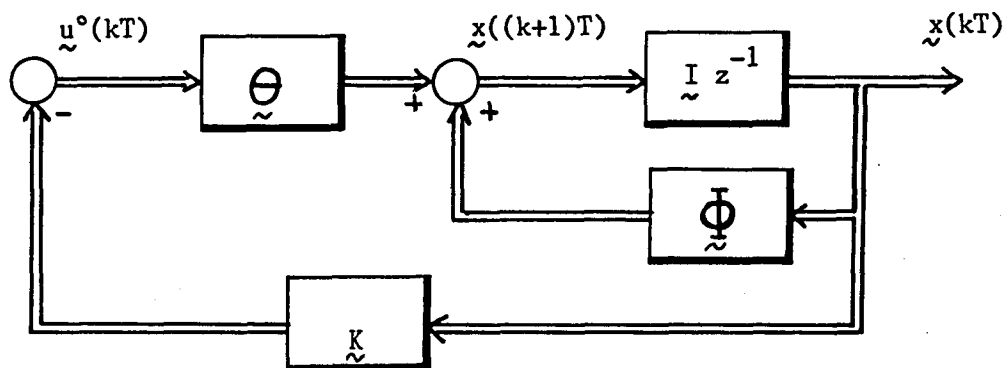


Fig. 62.1.- Esquema de regulación.

En el caso de un sistema discretizado a partir del muestreo y mantenimiento de señales continuas, este criterio integral viene definido como [57, 120]

$$J_1 = \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kT}^{(k+1)T} (\tilde{x}^T(t) \tilde{Q} \tilde{x}(t) + \tilde{u}^T(t) \tilde{R} \tilde{u}(t)) dt \quad [62.7]$$

siendo:

NT = intervalo de tiempo en el que se desea minimizar a J_1 .

\tilde{S} = matriz semidefinida positiva de penalización de las desviaciones de los estados en el intervalo final de muestreo NT .

\tilde{Q} = matriz semidefinida positiva de penalización de las desviaciones de los estados durante el transitorio.

\tilde{R} = matriz definida positiva de penalización del esfuerzo de control.

Reescribiendo la ecuación anterior [62.4] para $t > kT$, se obtiene

$$\tilde{x}(t) = \tilde{\Phi}(t - kT) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(t - kT) \tilde{u}(kT), \quad [62.8]$$

y

$$\tilde{x}^T(t) = \tilde{x}^T(kT) \tilde{\Phi}^T(t - kT) + \tilde{u}^T(kT) \tilde{\Theta}^T(t - kT) \quad [62.9]$$

y recordando la restricción impuesta en la sección anterior,

$$\tilde{u}(t) = \tilde{u}(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T \quad [62.10]$$

para poder formular [62.4], el criterio integral [62.7] se transforma en

$$J_1 = \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\tilde{x}^T(kT) \hat{\tilde{Q}}(T) \tilde{x}(kT) + 2 \tilde{x}^T(kT) \tilde{M}(T) \tilde{u}(kT) + \tilde{u}^T(kT) \hat{\tilde{R}}(T) \tilde{u}(kT) \right] \quad [62.11]$$

siendo:

$$\hat{\tilde{Q}}(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT) dt \\ \tilde{M}(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT) dt \\ \hat{\tilde{R}}(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \left[\tilde{\Theta}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT) + \tilde{R} \right] dt \quad [62.12]$$

El criterio integral J_1 , de [62.7] y [62.11], tiene en cuenta el hecho de que, aunque el regulador sea digital, la planta a regular es continua, siendo un criterio válido para la minimización de las desviaciones de los estados considerando tanto sus valores en los instantes de muestreo kT como en los intervalos de tiempo comprendidos entre ellos. Algunos autores [113, 23, 109] consideran, sin embargo, que la expresión [62.11] es engorrosa de operar, por lo que prefieren trabajar con un criterio integral distinto, en el cual sólo se consideren las desviaciones de los estados en los instantes concretos de muestreo kT ,

$$J_2 = \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\tilde{x}^T(kT) \tilde{Q} \tilde{x}(kT) + \tilde{u}^T(kT) \tilde{R} \tilde{u}(kT) \right] \quad [62.13]$$

Aunque J_2 es, por lo general, un índice de calidad más restringido que J_1 [57], la validez de ambos índices puede considerarse equiparable cuando la frecuencia de muestreo sea sensiblemente superior al ancho de banda de la planta a controlar.

Definiendo, al igual que se ha hecho en el Apéndice D para el caso continuo, al Hamiltoniano

$$\begin{aligned} \tilde{H}(kT) = & \frac{1}{2} \tilde{x}^T(kT) \hat{\tilde{Q}}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{x}^T(kT) \tilde{M}(T) \tilde{u}(kT) + \\ & + \frac{1}{2} \tilde{u}^T(kT) \hat{\tilde{R}}(T) \tilde{x}(kT) + \\ & + \tilde{m}^T((k+1)T) \left[\hat{\tilde{\Phi}}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T) \tilde{u}(kT) \right], \end{aligned} \quad [62.14]$$

en el que \tilde{m}^T es un operador equivalente a los multiplicadores de Lagrange en sistemas continuos, y considerando las condiciones que, según el principio de Pointryagin, harán que J_1 sea mínimo,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{H}^\circ(kT)}{\partial \tilde{x}^\circ(kT)} &= \tilde{m}^\circ(kT) \\ \frac{\partial \tilde{H}^\circ(kT)}{\partial \tilde{m}^\circ((k+1)T)} &= \tilde{x}^\circ((k+1)T) \\ \frac{\partial \tilde{H}^\circ(kT)}{\partial \tilde{u}^\circ(kT)} &= 0 \end{aligned} \quad [62.15]$$

se llega a un conjunto de tres ecuaciones cuya resolución da la ecuación de Riccati para sistemas discretos [120],

$$\begin{aligned} \tilde{P}(kT) = & \hat{\tilde{Q}}(T) + \hat{\tilde{\Phi}}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \hat{\tilde{\Phi}}(T) - \\ & - \left[\tilde{M}(T) + \hat{\tilde{\Phi}}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \right] \cdot \\ & \cdot \left[\hat{\tilde{R}}(T) + \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \right]^{-1} \cdot \\ & \cdot \left[\tilde{M}^T(T) + \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \hat{\tilde{\Phi}}(T) \right] \end{aligned} \quad [62.16]$$

siendo $\tilde{P}(kT)$ la matriz de Riccati para el caso discreto, con la cual se obtiene la ley de control óptimo:

$$\begin{aligned} \tilde{u}^{\circ}(kT) = & - \left[\hat{\tilde{R}}(T) + \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \right]^{-1} \cdot \\ & \cdot \left[\tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Phi}(T) + \tilde{M}^T(T) \right] \tilde{x}^{\circ}(kT). \quad [62.17] \end{aligned}$$

En el caso de usarse al criterio integral J_2 , donde

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= \tilde{Q} \\ \tilde{Q}(T) &= \tilde{Q} \\ \tilde{R}(T) &= \tilde{R} \end{aligned}$$

la ecuación de Riccati anterior pasa a ser :

$$\begin{aligned} \tilde{P}(kT) = & \tilde{Q} + \tilde{\Phi}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Phi}(T) - \tilde{\Phi}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \cdot \\ & \cdot \left[\tilde{R} + \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \right]^{-1} \cdot \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Phi}(T) \quad [62.18] \end{aligned}$$

y la ley de control óptimo,

$$\begin{aligned} \tilde{u}^{\circ}(kT) = & - \left[\tilde{R} + \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Theta}(T) \right]^{-1} \cdot \\ & \cdot \tilde{\Theta}^T(T) \tilde{P}((k+1)T) \tilde{\Phi}(T) \tilde{x}^{\circ}(kT). \quad [62.19] \end{aligned}$$

Paralelamente al caso continuo (Apéndice D), la obtención de las leyes [62.17] y [62.19] presupone que el par $(\tilde{\Phi}, \tilde{\Theta})$ sea completamente controlable y el par $(\tilde{\Phi}, \tilde{D})$, siendo $\tilde{Q} = \tilde{D}\tilde{D}^T$, completamente observable.

6.2.3.- Retardos en la acción de control.

La formulación de las secciones anteriores responde al caso más estudiado en la literatura sobre Control Digital, en el cual se supone instantaneidad entre el muestreo de los estados y la consiguiente acción de control. (fig. 62.2).

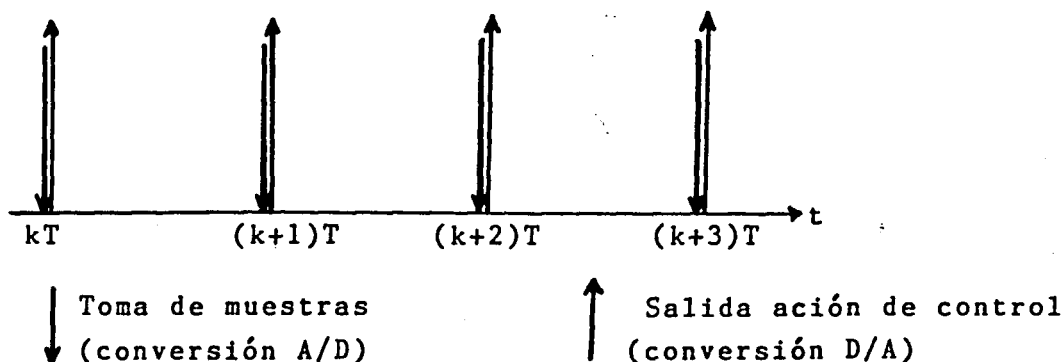


Fig. 62.2.

En una aplicación real esta situación correspondería al caso en que el ordenador encargado de elaborar la acción de control tuviera que efectuar tal cantidad de tareas adicionales antes de volver a muestrear los estados que fuera despreciable el tiempo de cálculo de la acción de control respecto al período total de muestreo.

La situación contraria se da cuando el ordenador se dedica exclusivamente al cálculo de la acción de control. En este caso la cadencia viene dada por la fig. 62.3,

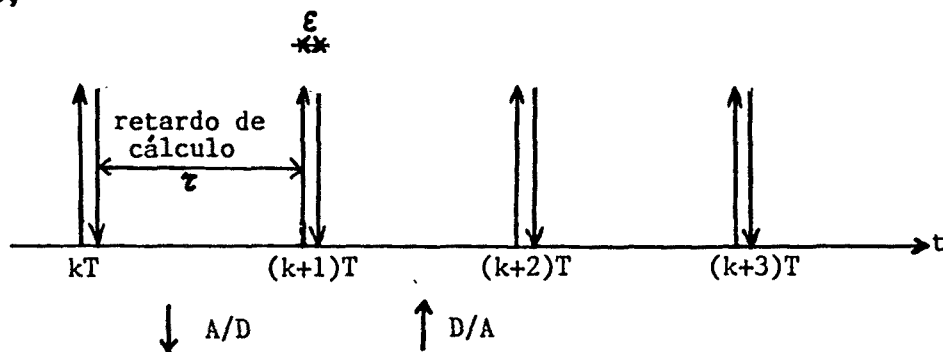


Fig. 62.3.

siendo fácilmente formulable mediante la transformada Z [23, 170]. Despreciando el tiempo ε transcurrido desde la acción de control hasta el muestreo de los estados (tiempo de adquisición de datos), la fórmula [62.4] también es válida para representar esta situación. La diferencia respecto al caso anterior radica en que ahora, al cerrar el lazo, $\underline{u}(kT)$ no depende del valor de $\underline{x}(kT)$, sino de $\underline{x}((k-1)T)$.

Cuando el retardo en la acción de control no es despreciable ni ocupa todo el período de muestreo (fig. 62.4).

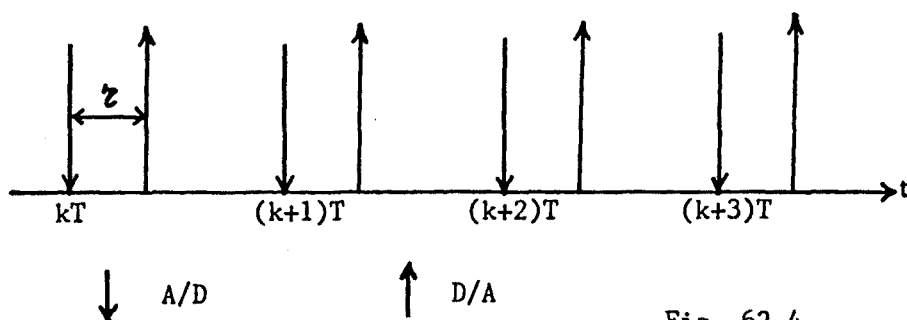


Fig. 62.4.

la forma convencional de tratar el problema es mediante la transformada Z modificada [120, 170], lo que hace engorrosa la formulación, especialmente para plantas de órdenes elevados. Sin embargo, los métodos de estado facilitan esta formulación. Si al retardo de la fig. 62.4 es τ , se obtiene, a partir de [62.4],

$$\tilde{x}((k+1)T) = \tilde{\Phi}(T-\tau) \tilde{x}(kT+\tau) + \tilde{\Theta}(T-\tau) \tilde{u}(kT+\tau)$$

$$\tilde{x}(kT+\tau) = \tilde{\Phi}(\tau) \tilde{x}(kT)$$

de donde,

$$\begin{aligned} \tilde{x}((k+1)T) &= \tilde{\Phi}(T-\tau) \tilde{\Phi}(\tau) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T-\tau) \tilde{u}(kT+\tau) = \\ &= \tilde{\Phi}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T-\tau) \tilde{u}(kT+\tau) \quad [62.20] \end{aligned}$$

6.2.4.- Muestreo y acción de control múltiples ("multirate")

Cuando la adquisición de datos no se centra en los instantes de muestreo, sino que éstos se adquieren de forma ciclica durante todo el período de muestreo, el problema (denominado de muestreo múltiple) requiere una formulación específica [120].

Sea el sistema muestreado según la figura 62.5,

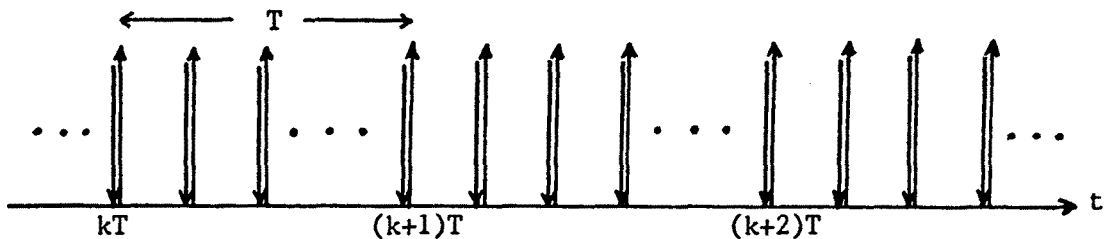


Fig. 62.5

en el que se muestrean los estados en los intervalos,

$$T = kT, kT + T_1, kT + T_1 + T_2, \dots, kT + T_1 + T_2 + \dots + T_q$$

siendo: $T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_q$.

A partir de la formulación discreta de estado en cada instante de muestreo,

$$\tilde{x}(kT + T_1) = \tilde{\Phi}(T_1) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(T_1) \tilde{u}(kT)$$

$$\tilde{x}(kT + T_1 + T_2) = \tilde{\Phi}(T_2) \tilde{x}(kT + T_1) + \tilde{\Theta}(T_2) \tilde{u}(kT + T_1)$$

y, en $t = (k + 1)T$,

$$\begin{aligned} \tilde{x}((k + 1)T) &= \tilde{\Phi}(T_q) \tilde{x}(kT + T_1 + T_2 + \dots + T_{q-1}) + \\ &+ \tilde{\Theta}(T_q) \tilde{u}(kT + T_1 + T_2 + \dots + T_{q-1}), \end{aligned} \quad [62.21]$$

se obtiene la expresión general:

$$\begin{aligned} \tilde{x}((k + 1)T) &= \tilde{\Phi}(T_q) \tilde{\Phi}(T_{q-1}) \dots \tilde{\Phi}(T_2) \tilde{\Phi}(T_1) \tilde{x}(kT) + \\ &+ \tilde{\Phi}(T_q) \tilde{\Phi}(T_{q-1}) \dots \tilde{\Phi}(T_2) \tilde{\Theta}(T_1) \tilde{u}(kT) + \\ &+ \tilde{\Phi}(T_q) \tilde{\Phi}(T_{q-1}) \dots \tilde{\Phi}(T_3) \tilde{\Theta}(T_2) \tilde{u}(kT + T_1) + \\ &+ \dots + \\ &+ \tilde{\Phi}(T_q) \tilde{\Theta}(T_{q-1}) \tilde{u}(kT + T_1 + T_2 + \dots + T_{q-2}) + \\ &+ \tilde{\Theta}(T_q) \tilde{u}(kT + T_1 + T_2 + \dots + T_{q-1}) \end{aligned} \quad [62.22]$$

En el caso de que la adquisición de datos esté centrada en los instantes de muestreo, pero la acción de control se distribuya durante el período, el problema se denomina de acción de control múltiple (fig. 62.6). La expresión [62.21] también es válida para representar este caso.

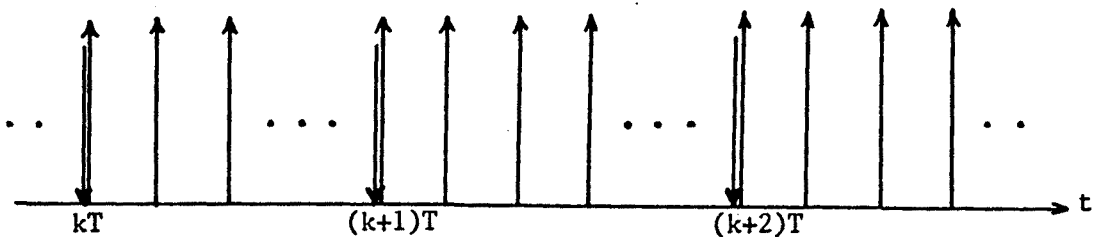


Fig. 62.6.

6.3.- FORMULACION DEL RLO CONSIDERANDO RETARDOS EN EL CONTROL Y DOBLE ACCION DE CONTROL.

Como ya se ha ido avanzando, el tiempo necesario para el establecimiento de las telemidas y el de cálculo en los ordenadores representan un retardo desde que se inicia el período de muestreo (toma de la primera telemida) hasta que se dispone de la acción de control que deberá ser enviada a las unidades generadoras.

La tendencia actual a imbricar más fuertemente [29—32 , 154] los programas de RPF, de seguridad y de economía contribuye asimismo al aumento de este retardo, dado el mayor tiempo de cálculo requerido. Mientras no se logre reducir aún más el tiempo requerido por los programas más lentos [61] , esta misma tendencia puede llevar a que se dilaten los actuales períodos de muestreo si no se modifica la infraestructura informática necesaria para el soporte de los algoritmos de control.

En el caso del RLO de P/f, los estudios realizados hasta la fecha han partido de esquemas de muestreo simple sin considerar en la formulación a los retardos entre las telemidas y los telemandos. Por ello, en un intento de aproximar más a estos estudios a las limitaciones reales, en este apartado se desarrolla una nueva formulación del RLO discreto de P/f, aportación de esta Tesis, válida tanto para el caso en que haya retardos en el control, sean parciales (fig. 62.4) u ocupen todo el período de muestreo (fig. 62.3), como para el diseño de reguladores en que se tome una doble acción de control en cada período

El estudio de una doble acción de control tiene dos motivos. Por un lado la posible dilatación del período de muestreo por causa de la tendencia a hacer funcionar conjuntamente a los programas del ED, de la RPF y de seguridad puede compensarse reforzando las redes de ordenadores; caso de no hacerse así, como es bien sabido por la teoría básica de Control Digital, el aumento del período de muestreo puede desestabilizar fácilmente al SEE. Sin embargo, una opción alternativa al aumento de la complejidad del hardware es la modificación de la estrategia del control, proponiéndose la duplicación de la acción de control dentro de cada período de muestreo a fin de que la generación de las unidades no quede demasiado tiempo desatendida por parte de los centros de control.

Esta doble acción es susceptible de diferentes interpretaciones. Para centrarnos en un caso concreto, se considerará (fig. 63.1) que la primera acción de control viene determinada sólo por el programa de RPF (manteniéndose los factores de participación de cada unidad determinados en el período de muestreo anterior), y que en la segunda, aprovechándose los cálculos efectuados para el establecimiento de la primera, el programa de RPF interacciona con los de seguridad y economía. Esta estrategia es un caso híbrido entre los modos permitido y obligatorio expuestos en el Capítulo 3.

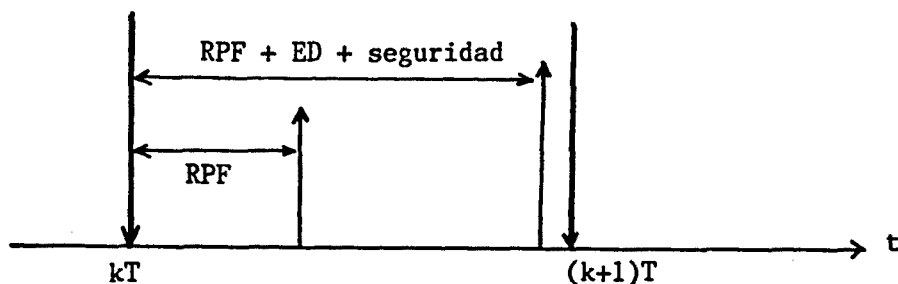


Fig. 63.1.

La segunda razón para estudiar esta acción de control doble es la posibilidad de asincronismos entre la llegada de las telemidas cíclicas y el cálculo del control (por ejemplo, si se crea un "cuello de botella" en la recepción de datos [61] ó si se alarga excesivamente el cálculo de la acción de control). En una situación normal basada en una acción de control simple en que todo el período esté ocupado por los cálculos de la RPF, éste se efectúa a partir del último muestreo de las telemidas (fig. 63.2 (a)) pero, si por algún motivo, la ejecución de los algoritmos se dilata (fig. 63.2 (b)) de forma que la acción asociada a los estados muestreados en kT se genere alrededor (ó después) del instante de muestreo $(k+1)T$ puede haber fácilmente problemas de estabilidad.

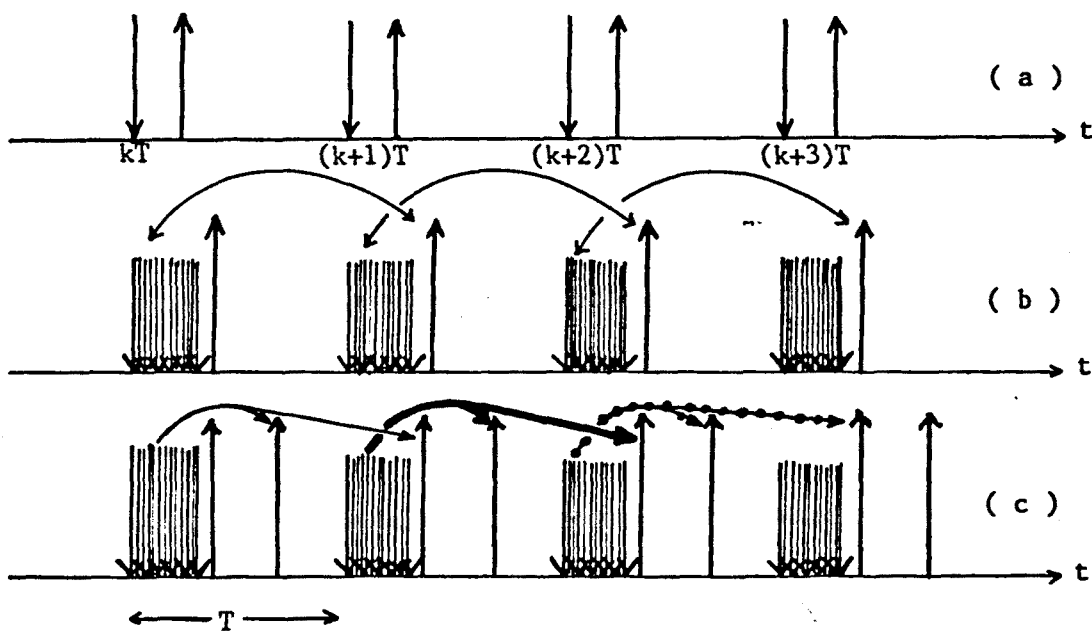


Fig. 63.2.

Al dividirse el período de muestreo en dos acciones de control, el mismo asincronismo podría afectar sólo a la segunda acción, manteniéndose sincronizada la primera (fig. 63.2 (c)). Por este motivo y dadas las ventajas del muestreo múltiple sobre la estabilidad, en este capítulo se hará posteriormente un estudio comparativo de la sensibilidad respecto a las pérdidas de sincronismo entre el RLO basado en una acción de control simple y el de doble acción.

6.3.1.- Adecuación del criterio integral.

Previamente a la reformulación del RLO para los dos casos expuestos (retardos en el cálculo de la acción de control y acción doble), se van a revisar los criterios integrales [62.7] y [62.13], adecuándolos a estos casos. Para ello se empezará considerando al regulador basado en una doble acción de control, cuyo funcionamiento viene esquematizado en la fig. 63.3, rehaciéndose posteriormente los resultados obtenidos al caso de acción de control simple, tanto cuando haya retardo en el cálculo de la ley de control como cuando no lo haya.

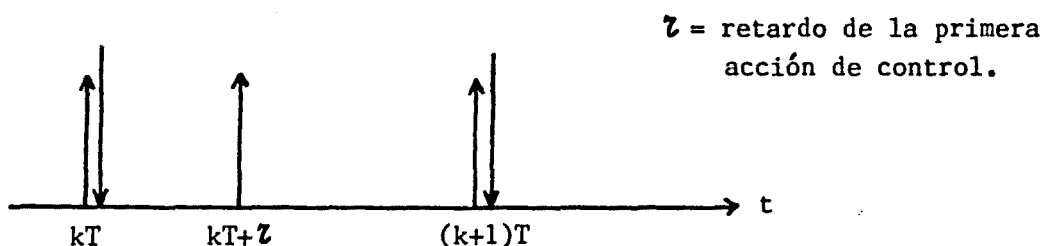


Fig.63.3.

A partir de la fig. 63.3, se puede formular,

$$\begin{aligned}
 \tilde{x}(kT+z) &= \tilde{\Phi}(z) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}(z) \tilde{u}(kT) \\
 \tilde{x}((k+1)T) &= \tilde{\Phi}(T-z) \tilde{x}(kT+z) + \tilde{\Theta}(T-z) \tilde{u}(kT+z) = \\
 &= \tilde{\Phi}(T-z) \tilde{\Phi}(z) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Phi}(T-z) \tilde{\Theta}(z) \tilde{u}(kT) + \\
 &+ \tilde{\Theta}(T-z) \tilde{u}(kT+z) = \\
 &= \tilde{\Phi}(T) \tilde{x}(kT) + \tilde{\Phi}(T-z) \tilde{\Theta}(z) \tilde{u}(kT) + \tilde{\Theta}(T-z) \tilde{u}(kT+z)
 \end{aligned}$$

[63.1]

que es la ecuación discreta de estado de un sistema con doble acción de control en los instantes kT y $kT + \tau$, siendo $\tau < T$.

A partir de ella se puede desglosar al integrando del criterio integral [62.7], que se repite a continuación,

$$J = \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{kT}^{(k+1)T} (\tilde{x}^T(t) \tilde{Q} \tilde{x}(t) + \tilde{u}^T(t) \tilde{R} \tilde{u}(t)) dt \quad [63.2]$$

observando que, para $t \geq kT$,

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= \tilde{\Phi}(t - kT) \tilde{x}(kT) + \\ &+ \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) \tilde{u}(kT) + \\ &+ \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) \tilde{u}(kT + \tau) \end{aligned} \quad [63.3]$$

A partir de esta última relación, se descompone al primer término del integrando de [63.2] de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \tilde{x}^T(t) \tilde{Q} \tilde{x}(t) &= \\ &= \tilde{x}^T(kT) \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT) \tilde{x}(kT) + \\ &+ \tilde{x}^T(kT) \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) \tilde{u}(kT) + \\ &+ \tilde{x}^T(kT) \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) \tilde{u}(kT + \tau) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT) \tilde{\Theta}^T(t - \tau) \tilde{\Phi}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT) \tilde{x}(kT) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT) \tilde{\Theta}^T(t - \tau) \tilde{\Phi}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) \tilde{u}(kT) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT) \tilde{\Theta}^T(t - \tau) \tilde{\Phi}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) \tilde{u}(kT + \tau) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT) \tilde{x}(kT) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) \tilde{u}(kT) + \\ &+ \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) \tilde{u}(kT + \tau) \end{aligned} \quad [63.4]$$

Descomponiendo, por otro lado, a la penalización \tilde{R} del esfuerzo de control,

$$\tilde{u}^T(t) \tilde{R} \tilde{u}(t) = \tilde{u}^T(kT) \tilde{R} \tilde{u}(kT) + \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{R} \tilde{u}(kT + \tau) \quad [63.5]$$

se puede definir al siguiente conjunto de matrices,

$$\begin{aligned} \hat{Q}(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT) dt \\ M_1(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) dt \\ M_2(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Phi}^T(t - kT) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) dt \\ M_3(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Theta}^T(t - \tau) \tilde{\Phi}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) dt \\ \hat{R}(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} [\tilde{\Theta}^T(t - \tau) \tilde{\Phi}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Phi}(t - kT + \tau) \tilde{\Theta}(t - \tau) + \tilde{R}] dt \\ V(T) &= \int_{kT}^{(k+1)T} [\tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) + \tilde{R}] dt \end{aligned} \quad [63.6]$$

de las cuales, por paralelismo con el desarrollo de sistemas de muestreo simple [57, 120] y dada su posterior aplicación al cálculo del RLO, $\hat{Q}(T)$ es una matriz simétrica semidefinida positiva y $\hat{R}(T)$ y $V(T)$ matrices simétricas definidas positivas. Sin embargo no se pueden establecer definiciones similares sobre la forma de las matrices $M_i(T)$ [57].

A partir de estas últimas definiciones, el criterio integral anterior [63.2] se descompone en el sumatorio:

$$\begin{aligned}
J_N = & \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \\
& + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\tilde{x}^T(kT) \hat{Q}(T) \tilde{x}(kT) + 2 \tilde{x}^T(kT) \tilde{M}_1(T) \tilde{u}(kT) + 2 \tilde{x}^T(kT) \tilde{M}_2(T) \tilde{u}(kT + \tau) + \right. \\
& \left. + 2 \tilde{u}^T(kT) \tilde{M}_3(T) \tilde{u}(kT + \tau) + \tilde{u}^T(kT) \hat{R}(T) \tilde{u}(kT) + \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{V}(T) \tilde{u}(kT + \tau) \right] \\
& \qquad \qquad \qquad [63.7]
\end{aligned}$$

que será el criterio integral del que se partirá para el diseño del RLO.

Por otro lado, el criterio integral simplificado de [62.13],

$$\begin{aligned}
J = & \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \\
& + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\tilde{x}^T(kT) \tilde{Q} \tilde{x}(kT) + \tilde{u}^T(kT) \tilde{R} \tilde{u}(kT) \right] \\
& \qquad \qquad \qquad [63.8]
\end{aligned}$$

es fácilmente adaptable a [63.7]: Igualando

$$\begin{aligned}
\hat{Q}(T) &= \tilde{Q} \\
\hat{R}(T) &= \tilde{R} \\
\tilde{V}(T) &= \tilde{V} \text{ (siendo } \tilde{V} = \tilde{R} \text{ si se penaliza igual al esfuerzo de las dos acciones de control en } kT \text{ y } kT + \tau \text{)} \\
\tilde{M}_1(T) &= \tilde{M}_2(T) = \tilde{M}_3(T) = \tilde{0} \\
& \qquad \qquad \qquad [63.9]
\end{aligned}$$

se obtiene el equivalente de [63.7] cuando sólo se penalizan las desviaciones de los estados en los instantes de muestreo kT (expresión [63.8]),

$$\begin{aligned}
J_N = & \frac{1}{2} \tilde{x}^T(NT) \tilde{S} \tilde{x}(NT) + \\
& + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\tilde{x}^T(kT) \tilde{Q} \tilde{x}(kT) + \tilde{u}^T(kT) \tilde{R} \tilde{u}(kT) + \tilde{u}^T(kT + \tau) \tilde{V} \tilde{u}(kT + \tau) \right] \\
& \qquad \qquad \qquad [63.10]
\end{aligned}$$

Esta formulación desarrollada es directamente traducible al caso en que la acción de control sea simple, tanto si hay retardos como si no. Definiendo

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Phi}_1 &= \tilde{\Phi}(T - \tau) \tilde{\Phi}(\tau) = \tilde{\Phi}(T) \\
 \tilde{\Theta}_1 &= \tilde{\Phi}(T - \tau) \tilde{\Theta}(\tau) \\
 \tilde{\Theta}_2 &= \tilde{\Theta}(T - \tau)
 \end{aligned}
 \tag{63.11}$$

se obtiene,

$$\tilde{x}((k + 1)T) = \tilde{\Phi}_1 \tilde{x}(kT) + \tilde{\Theta}_1 \tilde{u}(kT) + \tilde{\Theta}_2 \tilde{u}(kT + \tau)
 \tag{63.12}$$

Cuando $\tilde{\Theta}_2$ sea nulo el problema del regulador de doble acción se traduce al de acción simple sin retardos, siendo en este caso (expresiones [63.7] y [63.10])

$$\tilde{M}_2(T) = \tilde{M}_3(T) = \tilde{V}(T) = \tilde{0}
 \tag{63.13}$$

Por otro lado, cuando $\tilde{\Theta}_1$ sea nulo, se obtiene la expresión de un regulador de acción simple con un retardo τ desde la adquisición de las muestras hasta el establecimiento del control, siendo ahora:

$$\tilde{M}_1(T) = \tilde{M}_3(T) = \tilde{R}(T) = \tilde{0}
 \tag{63.14}$$

6.3.2.- Reformulación del RLO.

A partir de la expresión [63.7] desarrollada en la sección anterior para adaptar el criterio integral al caso en que se ejerza una doble acción de control en cada período de muestreo, transformable a [63.10] mediante la simplificación [63.9] y válida también para el caso en que la acción de control sea simple (tanto si hay retardos como si no) mediante las simplificaciones [63.13] y [63.14], se va a reformular al RLO discreto a fin de obtener una expresión que permita un diseño general, independiente de la presencia de retardos en el control y de que la acción sea doble o simple.

Para elaborar esta nueva formulación del RLO, aportación de esta Tesis, se partirá, al igual que en [179] y [120] para la formulación clásica del RLO de acción simple, de la versión discreta del principio de Pointryagin, definiendo al hamiltoniano:

$$\begin{aligned}
\tilde{H}(kT) = & \frac{1}{2} \langle \tilde{x}(kT), \hat{Q}(T) \tilde{x}(kT) \rangle + \langle \tilde{x}(kT), \tilde{M}_1(T) \tilde{u}(kT) \rangle + \\
& + \langle \tilde{x}(kT), \tilde{M}_2(t) \tilde{u}(kT + \tau) \rangle + \langle \tilde{u}(kT), \tilde{M}_3(t) \tilde{u}(kT + \tau) \rangle \\
& + \frac{1}{2} \langle \tilde{u}(kT), \hat{R}(T) \tilde{u}(kT) \rangle + \frac{1}{2} \langle \tilde{u}(kT + \tau), \tilde{V}(T) \tilde{u}(kT + \tau) \rangle \\
& + \langle \tilde{m}((k+1)T), \hat{\Phi}_1 \tilde{x}(kT) + \hat{\Theta}_1 \tilde{u}(kT) + \hat{\Theta}_2 \tilde{u}(kT + \tau) \rangle
\end{aligned}
\tag{63.15}$$

denotándose por $\langle \tilde{A}, \tilde{B} \rangle$ al producto $\tilde{A}^T \tilde{B}$ y siendo $\tilde{m}(kT)$ un vector de multiplicadores de Lagrange y $\hat{\Phi}_1, \hat{\Theta}_1, \hat{\Theta}_2$ la matriz y los vectores definidos en [63.11]

Usando el método de las perturbaciones del cálculo variacional [179], se define,

$$\begin{aligned}
\tilde{x}(kT) &= \hat{x}(kT) + \varepsilon \tilde{\delta}(kT) \\
\tilde{u}(kT) &= \hat{u}(kT) + \varepsilon \tilde{\eta}(kT) \\
\tilde{u}(kT + \tau) &= \hat{u}(kT + \tau) + \varepsilon \tilde{\rho}(kT + \tau)
\end{aligned}
\tag{63.16}$$

siendo las perturbaciones $\tilde{\delta}$, $\tilde{\eta}$ y $\tilde{\rho}$ mutuamente independientes.

Con estas dos últimas expresiones se puede reescribir al criterio integral [63.7] de la sección anterior de la forma

$$\begin{aligned}
J^* = & \varphi \left[\tilde{x}(N) + \varepsilon \tilde{\delta}(N) \right] + \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ H(kT) - \tilde{m}^T((k+1)T) \left[\hat{x}((k+1)T) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \varepsilon \tilde{\delta}((k+1)T) \right] \right\}
\end{aligned}
\tag{63.17}$$

siendo el primer sumando un término constante cuantificador de las desviaciones de los estados en régimen permanente ($kT = NT$).

Las condiciones que se deben cumplir para que J^* alcance un mínimo son:

$$1/ \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial J^*}{\partial \varepsilon} = 0 \quad \text{y} \quad 2/ \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial^2 J^*}{\partial \varepsilon^2} > 0$$

[63.18]

Según [179] la segunda condición se cumple siempre para criterios integrales cuadráticos de sistemas lineales, por lo que nos centraremos en el estudio de la primera condición. A partir de [63.16] y [63.17], esta primera condición obliga a que:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{x}(kT)} \right]^T \underline{\delta}(kT) + \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kT)} \right]^T \underline{\eta}(kT) + \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kT + \tau)} \right]^T \underline{\rho}(kT + \tau) - \right. \\ \left. - \underline{m}^T((k+1)T) \underline{\delta}((k+1)T) \right\} = 0 \quad [63.19]$$

El último término de esta ecuación es:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \underline{m}^T((k+1)T) \underline{\delta}((k+1)T) = \sum_{k=0}^{N-1} \underline{m}^T(kT) \underline{\delta}(kT) = \\ = \sum_{k=0}^{N-1} \underline{m}^T(kT) \underline{\delta}(kT) + \underline{m}^T(N) \underline{\delta}(N) - \underline{m}^T(0) \underline{\delta}(0) \quad [63.20]$$

y, siendo nulos los términos de perturbación $\underline{\delta}(N)$ y $\underline{\delta}(0)$ para unos valores inicial y final $\underline{x}(0)$ y $\underline{x}(NT)$ concretos y acotados, la expresión [63.19] pasa a ser:

$$\sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{x}(kT)} \right]^T - \underline{m}^T(kT) \right\} \underline{\delta}(kT) + \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kT)} \right]^T \underline{\eta}(kT) + \\ + \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kT + \tau)} \right]^T \underline{\rho}(kT + \tau) = 0 \quad [63.21]$$

que se puede descomponer, recordando la condición de simetría en la selección de $\hat{\underline{Q}}(T)$, $\hat{\underline{R}}(T)$ y $\underline{V}(T)$ impuesta en la sección anterior y las leyes de diferenciación de productos de matrices [23], en las tres ecuaciones:

$$\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{x}(kT)} = \underline{m}(kT) = \hat{\underline{Q}}(T) \underline{x}(kT) + \underline{M}_1(T) \underline{u}(kT) + \underline{M}_2(T) \underline{u}(kT + \tau) + \\ + \underline{\Phi}_1^T \underline{m}((k+1)T) \quad [63.22]$$

$$\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kT)} = \underline{0} = \underline{M}_1^T(T) \underline{x}(kT) + \underline{M}_3(T) \underline{u}(kT + \tau) + \hat{\underline{R}}(T) \underline{u}(kT) + \\ + \underline{\Theta}_1^T \underline{m}((k+1)T) \quad [63.23]$$

$$\frac{\partial \underline{H}(kT)}{\partial \underline{u}(kt + \tau)} = 0 = \underline{M}_2^T(t) \underline{x}(kT) + \underline{M}_3^T(T) \underline{u}(kT) + \underline{\Theta}_2^T \underline{m}((k+1)T) +$$

$$+ \underline{V}(T) \underline{u}(kT + \tau)$$

[63.24]

Introduciendo la matriz discreta de Riccati $\underline{P}(kT)$, tal que

$$\underline{m}(kT) = \underline{P}(kT) \underline{x}(kT),$$

[63.25]

y sustituyendola en [63.24], se obtiene la ley de control en el instante $kT + \tau$,

$$\underline{u}(kT + \tau) = - \left[\underline{V}(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_2 \right]^{-1} \left\{ \left[\underline{M}_2^T(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Phi}_1 \right] \underline{x}(kT) + \right.$$

$$\left. + \left[\underline{M}_3^T(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_1 \right] \right\} \underline{u}(kT)$$

[63.26]

Sustituyendo ahora a [63.25] y [63.26] en [63.23], se obtiene la ley de control en el instante de muestreo kT ,

$$\underline{u}(kT) = \left\{ \hat{\underline{R}}(T) + \underline{\Theta}_1^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_1 - \left[\underline{M}_3(T) + \underline{\Theta}_1^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_2 \right] \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \left[\underline{V}(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_2 \right]^{-1} \cdot \left[\underline{M}_3(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_1 \right] \right\}^{-1} \cdot$$

$$\left\{ \left[\underline{M}_3(T) + \underline{\Theta}_1^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_2 \right] \cdot \left[\underline{V}(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Theta}_2 \right]^{-1} \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \left[\underline{M}_2^T(T) + \underline{\Theta}_2^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Phi}_1 \right] - \left[\underline{M}_1^T(T) + \underline{\Theta}_1^T \underline{P}((k+1)T) \underline{\Phi}_1 \right] \right\} \underline{x}(kT)$$

[63.27]

Finalmente, operando en [63.22] con estas tres últimas expresiones de $\underline{m}(kT)$, $\underline{u}(kT)$ y $\underline{u}(kT + \tau)$, se obtiene la ecuación de Riccati:

$$\begin{aligned}
\tilde{P}(kT) = & \left\{ \hat{Q}(T) - \left[\tilde{M}_2(T) + \tilde{\Phi}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right] \left[\tilde{V}(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right]^{-1} \right. \\
& \left. \left[\tilde{M}_2^T(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Phi}_1 \right] + \tilde{\Phi}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Phi}_1 \right\} - \\
& - \left\{ \left[\tilde{M}_2(T) + \tilde{\Phi}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right] \left[\tilde{V}(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right]^{-1} \right. \\
& \left. \left[\tilde{M}_3^T(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_1 \right] - \tilde{M}_1(T) - \tilde{\Phi}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_1 \right\} \cdot \\
& \cdot \left[\hat{R}(T) + \tilde{\Theta}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_1 - \left[\tilde{M}_3(T) + \tilde{\Theta}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right] \right. \\
& \left. \left[\tilde{V}(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right]^{-1} \left[\tilde{M}_3^T(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_1 \right] \right\}^{-1} \cdot \\
& \cdot \left\{ \left[\tilde{M}_3(T) + \tilde{\Theta}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right] \left[\tilde{V}(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Theta}_2 \right]^{-1} \right. \\
& \left. \left[\tilde{M}_2^T(T) + \tilde{\Theta}_2^T P((k+1)T) \tilde{\Phi}_1 \right] - \left[\tilde{M}_1^T(T) + \tilde{\Theta}_1^T P((k+1)T) \tilde{\Phi}_1 \right] \right\} \\
& \qquad \qquad \qquad [63.28]
\end{aligned}$$

válida para sistemas con doble acción de control, y a partir de la cual se deducen las leyes de control [63.26] y [63.27].

Nótese que, según la expresión [63.13] del apartado 6.2.2., si

$$\tilde{\Theta}_2 = \tilde{M}_2(T) = \tilde{M}_3(T) = \tilde{V}(T) = \tilde{0} \qquad [63.29]$$

las relaciones [63.27] y [63.28] se transforman en las [62.17] y [62.16] del mismo apartado (siendo en este caso nula la acción de control $\tilde{u}(kT + \tau)$ de [63.26]), válidas para el diseño del RLO discreto en sistemas sin retardo en el establecimiento de la ley de control. Por otro lado, las expresiones [63.26] y [63.28] son también válidas para el diseño del RLO discreto en sistemas con retardo si, según [63.14],

$$\tilde{\Theta}_1 = \tilde{M}_1(T) = \tilde{M}_3(T) = \tilde{R}(T) = \tilde{0} \qquad [63.30]$$

resultando en este caso nulo el vector de control $\tilde{u}(kT)$ de [63.27].

6.4.- ESTUDIO DEL RLO DISCRETO SOBRE EL MODELO OBTENIDO.

6.4.1.- Introducción.

En el presente apartado se van a estudiar algunas peculiaridades de funcionamiento del SEE derivados de la implementación digital del RLO de P/f.

Para ello se va a continuar usando el modelo de dos áreas distintas y dimensionado según la capacidad de generación de la zona catalana y del resto del sistema español y francés que se ha elaborado en el Capítulo 2, aprovechándose y ampliándose los resultados obtenidos en el Capítulo 5 al estudiar el comportamiento del RLO continuo.

Respetando la formulación del modelo desarrollada en el Apartado 5.4, se van a estudiar diversos aspectos de la implementación digital del regulador. En primer lugar, y suponiendo que el tiempo transcurrido desde la llegada de las telemidas hasta el establecimiento del telemando no suponga un retardo significativo, se estudia el efecto de la discretización del regulador de acción simple, comparándolo con el regulador continuo del Capítulo 5.

En un segundo estudio se considera un retardo entre las telemidas y el telemando, estudiándose diferentes formas de discretización del RLO de P/f.

En tercer lugar se estudian las posibilidades del RLO basado en un doble acción de control, usándose para ello la formulación desarrollada en el Apartado 6.3.

Finalmente, se evalúa la sensibilidad del SEE a las pérdidas de sincronismo entre las telemidas y los telemandos para diferentes formas de discretización del RLO.

6.4.2.- Discretización del RLO sin retardos en el control.

En esta sección se va a estudiar la discretización del RLO sin considerar retardos de telemedida ni de cálculo de la ley de control.

Para ello se mantendrá la formulación del Apartado 5.4 del modelo desarrollado en el Capítulo 2, discretizándola según [62.4] y [62.5], y se aprovecharán algunas conclusiones del Capítulo 5.

En primer lugar no se incluirá al modelo de la carga externa en el diseño del RLO descentralizado del Area 1, dado que, como se ha visto en el capítulo anterior, la inclusión de este modelo no modifica sustancialmente al vector de control óptimo. Con ello la formulación continua del modelo es la de la expresión [54.5], con los valores paramétricos de [54.7], que se repiten a continuación:

MATRIZ $\tilde{A}(t)$

-4.8890E-01	-3.7700E-02	0.0000E 00	-3.7700E-02	0.0000E 00	0.0000E 00
-2.6168E 00	-4.7420E-01	0.0000E 00	-2.0170E-01	0.0000E 00	0.0000E 00
3.0525E 00	7.5400E-02	-2.0746E 00	7.5400E-02	0.0000E 00	0.0000E 00
0.0000E 00	0.0000E 00	6.2500E 00	-9.3700E-02	0.0000E 00	-6.2500E 00
0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00	9.2000E-02	0.0000E 00	1.0000E 00
0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00	1.5300E 00	0.0000E 00	0.0000E 00

MATRIZ $\tilde{B}(t)$

3.7700E-02
2.0170E-01
-7.5400E-02
0.0000E 00
0.0000E 00
0.0000E 00

Dado que los valores típicos del periodo de muestreo suelen estar comprendidos entre los 2 y los 10 seg. [30], se selecciona un valor de :

$$T = 8 \text{ seg. } (f_n = 0,125 \text{ Hz})$$

Aproximando la respuesta del modelo elaborado en el Capítulo 2 a una de segundo orden (fig. RS-56 del Apéndice C), con $t_p = 10$ seg. y $\zeta = 0,7$, la frecuencia natural del sistema es

$$f_o = 0,036 \text{ Hz,}$$

con lo que el valor seleccionado cumple la condición de muestreo de Nyquist.

Con este valor de T, y usándose el programa "BASMAT" de la referencia [126], el cual, por el desarrollo de Sylvester [120], permite obtener la matriz de transición de estado

$$\Phi(t) = e^{At} = F_1 e^{\lambda_1 t} + F_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + F_N e^{\lambda_N t}$$

se ha obtenido el siguiente conjunto de matrices $F_{\sim 1}$:

ELEMENTS DE LA MATRIU DE TRANSICIO D'ESTAT

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(-1.082121E-01)T*COS(3.182874E-01)T

-8.4330E-02	-2.8562E-02	-3.7103E 00	-2.0387E-01	0.0000E 00	3.7534E 00
-2.3219E 00	6.9135E-03	-1.9806E 01	-2.1166E-01	0.0000E 00	2.0146E 01
-7.0171E 01	-3.2891E 00	4.0920E 01	-3.2871E 00	0.0000E 00	-7.3776E 00
3.0076E 02	7.3405E 00	-1.0246E 02	-1.4279E 02	0.0000E 00	-1.0262E 02
-1.4574E 01	5.4212E-01	7.8375E 00	2.5292E 01	0.0000E 00	8.7075E 00
1.9601E 00	2.0795E-01	1.5124E 02	2.5120E 01	0.0000E 00	-1.4863E 02

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(-1.082121E-01)T*SIN(3.182874E-01)T

-5.1352E-01	-1.1494E-02	-3.3305E 00	1.6265E-01	0.0000E 00	3.3829E 00
-8.3834E-01	-5.0269E-01	-1.7815E 01	1.6487E 00	0.0000E 00	1.7842E 01
-8.8175E 01	-4.0910E 00	4.8425E 01	-3.6419E 00	0.0000E 00	-6.6087E 00
2.6969E 02	6.6547E 00	-1.4923E 02	-1.3456E 02	0.0000E 00	-3.4746E 01
1.4375E 00	8.1785E-01	1.0550E 01	2.3015E 01	0.0000E 00	-1.4989E 00
4.5502E 00	-2.5875E-01	1.3568E 02	8.5059E 00	0.0000E 00	-1.4065E 02

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(-1.000000E 00)T

4.2649E-01	3.9323E-02	-6.3287E-01	7.7390E-02	0.0000E 00	5.8287E-01
3.0971E 00	3.2438E-01	-3.4343E 00	5.4785E-01	0.0000E 00	3.0665E 00
-2.3796E 01	-1.0302E 00	1.3238E 01	-7.8501E-01	0.0000E 00	-1.3157E 00
5.0875E 00	1.3525E 00	-3.6015E 01	-2.3112E 01	0.0000E 00	2.2045E 00
2.2773E 01	1.9410E-01	1.2707E 00	3.8812E 00	0.0000E 00	-1.4857E 00
-2.4230E 00	-2.0652E-01	2.4935E 01	-5.3967E-01	0.0000E 00	-2.4460E 01

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(-9.574876E-01)T*COS(2.816285E 00)T

-5.0034E-03	2.3297E-04	1.3044E-02	1.3591E-02	0.0000E 00	-6.1194E-03
-1.2085E-02	1.5759E-03	7.3502E-02	7.0742E-02	0.0000E 00	-4.5248E-02
-3.2689E-01	-1.4686E-02	1.2653E-01	-1.4193E-02	0.0000E 00	3.3013E-02
-1.0279E 00	-3.2758E-02	-1.7781E 00	5.2875E-03	0.0000E 00	2.3778E 00
3.4121E-01	1.1713E-02	1.8533E-01	-3.5426E-02	0.0000E 00	-3.8148E-01
4.6281E-01	-1.4302E-03	-4.4231E-01	-5.8209E-01	0.0000E 00	2.6512E-03

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(-9.574876E-01)T*SIN(2.816285E 00)T

3.0934E-02	8.7979E-04	1.3556E-02	-7.5014E-03	0.0000E 00	-3.3217E-02
1.7196E-01	4.4154E-03	5.7947E-02	-4.7502E-02	0.0000E 00	-1.6886E-01
-2.0757E-01	-8.0535E-03	1.0625E-01	2.8502E-02	0.0000E 00	7.4498E-03
-1.2085E 00	-9.3433E-04	1.7558E 00	1.4827E 00	0.0000E 00	-6.4397E-01
2.0221E-01	1.3037E-03	-3.7701E-01	-2.3050E-01	0.0000E 00	2.0181E-01

MATRIU DE COEFICIENTS DE EXP(0.000000E 00)T

6.6284E-01	-1.0994E-02	4.3302E 00	1.1288E-01	0.0000E 00	-4.3302E 00
-7.6309E-01	6.6713E-01	2.3167E 01	-4.0694E-01	0.0000E 00	-2.3167E 01
9.4293E 01	4.3341E 00	-5.3284E 01	4.0863E 00	0.0000E 00	8.6603E 00
-3.5060E 02	-8.6603E 00	1.4025E 02	1.6690E 02	0.0000E 00	9.8035E 01
1.1955E 01	-7.4794E-01	-9.2934E 00	-2.9138E 01	1.0000E 00	-6.8405E 00
-1.6785E-04	1.9073E-06	-1.7573E 02	-2.3999E 01	0.0000E 00	1.7409E 02

con las cuales, particularizando para $t = T$, se ha obtenido, mediante el programa "TRANS" (los programas están en el Apéndice F), la siguiente matriz discreta de planta $\Phi(T)$ (ecuaciones [62.6]) :

$$\Phi(T) = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & G_3 & G_4 & G_5 & G_6 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} .053624026888 \\ -.009293451752 \\ -.002537023314 \\ -.000530828794 \\ 0 \\ .001258029398 \end{bmatrix}$$

$$G_4 = \begin{bmatrix} .582525717967 \\ -.084238697846 \\ -.05238755072 \\ -.049046751127 \\ 0 \\ .006533988916 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} -1.02326921248 \\ .146538014397 \\ .036123794475 \\ .012064506509 \\ 0 \\ -.003339152625 \end{bmatrix}$$

$$G_5 = \begin{bmatrix} 3.86508200007 \\ -.179730499161 \\ .512402436676 \\ .174541682382 \\ j \\ -.007037274679 \end{bmatrix}$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} .067400224395 \\ -.01303839341 \\ -.003370813235 \\ -.001463470904 \\ 0 \\ -.000923282175 \end{bmatrix}$$

$$G_6 = \begin{bmatrix} .095939979876 \\ -.013985324047 \\ .029063721172 \\ -.001803750192 \\ 0 \\ -.07774731407 \end{bmatrix}$$

Estos valores han sido confirmados con el programa "TRAD", con el cual puede obtenerse $\Phi(T)$ sin que sea preciso el cálculo previo de $\Phi(t)$.

Por otro lado, con el programa "FITA", desarrollado para el modelo concreto de esta Tesis, se ha calculado a partir de $\Phi(T)$ la matriz discreta de planta $\Theta(T)$:

$$\Theta(T) = \begin{bmatrix} .050052768481 \\ .045181898364 \\ .029222479429 \\ .240201026083 \\ .304859566559 \\ .042982162487 \\ .218780373304 \end{bmatrix}$$

Obtenidas las matrices $\Phi(T)$ y $\Theta(T)$ de [52.4], se han seleccionado las matrices de penalización Q y R del criterio integral [62.7] según las conclusiones del Capítulo 5. Así, dado el paralelismo entre los efectos de aumentar α_0 ,

y de disminuir \tilde{R} (expresión [52.30]), se ha seleccionado $\alpha_0 = 0$ y $\tilde{R} = \tilde{I}$. Por otro lado, dada la baja sensibilidad del comportamiento del SEE a las penalizaciones individuales de sus variables físicas y la mayor sensibilidad a la del ACE, se ha elegido (siguiendo con la misma definición de variables que en el Apartado 5.4.2)

$$\tilde{Q} = \text{diag} (0,5; 0,5; 0,5; 0,5; 1; 0,5).$$

y

$$\tilde{S} = \text{diag} (5; 5; 5; 5; 10; 5).$$

[64.1]

Con estos valores se ha hecho un estudio comparativo del comportamiento del SEE, tanto desde el punto de vista del transitorio como desde el de ciertos índices de calidad, con los dos criterios integrales [62.11] y [62.13]. Para ello se ha desarrollado el programa "RTR2", para la resolución de la ecuación de Riccati [62.18] y el programa "RTRT" para la ecuación [62.16]. El hecho de que estos programas estén en Basic, a diferencia del usado en el Capítulo 5 para la resolución de la ecuación continua de Riccati que estaba en Fortran, se debe a la mayor velocidad de convergencia del algoritmo para el caso discreto que para el continuo (20 seg. para uno - en Basic no compilado - respecto a unos 120 seg. para el otro - en Fortran). Por otro lado, esta mayor rapidez de cálculo (y considerando que el ordenador usado era un TI990 con 19KB de memoria una vez cargado el sistema operativo) aminora el problema de la determinación en tiempo real del vector de control óptimo.

Para el cálculo de las matrices $\tilde{Q}(T)$, $\tilde{M}(T)$ y $\tilde{R}(T)$ de ! 62.16 ! se han resuelto las ecuaciones [62.12] mediante los programas "MATQ" y "SIMP". Como se detalla en el Apéndice F, la capacidad de memoria del ordenador usado ha obligado a la ejecución secuencial de los programas:

"TRANS" ó "TRAD" \rightarrow "FITA" \rightarrow "MATQ" ó "SIMP" \rightarrow "RTRT" ó "RTR2"

creándose unos ficheros para la transferencia de datos de unos a otros.

Con el programa "RTRT" se ha obtenido, a partir de [62.13] el vector de control óptimo (expresión [62.19]),

$$\tilde{u}^{\circ}(kT) = \tilde{K}^{\circ} \tilde{x}^{\circ}(kT)$$

$$\tilde{K}^{\circ} = \begin{bmatrix} 3,367 \\ -0,2022 \\ 0,3716 \\ 0,1238 \\ 0,7647 \\ -0,00341 \end{bmatrix}^T \quad [64.2]$$

y con el RTR2 (obtención de [62.17] a partir de [62.11]),

$$\tilde{K}^{\circ} = \begin{bmatrix} 6,926 \\ -0,4029 \\ 0,7749 \\ 0,2570 \\ 1,609 \\ 0,00328 \end{bmatrix}^T \quad [64.3]$$

Con estos valores se han obtenido, para una perturbación indicial de 0,01 p.u.MW en el Area 1, los resultados de simulación de la fig. 64.1 (detalle de los listados del Apéndice G), en la cual se han incluido unas simulaciones del comportamiento del SEE con el vector \tilde{K}° del caso ① (sobrepenalización del ACE, con la misma matriz \tilde{Q} que en [64.1]) del Capítulo 5, tanto cuando el regulador funcionaba en modo continuo como en modo discreto.

En este mismo trabajo de simulación se han obtenido unos índices de calidad definidos (al igual que en la tabla T5.2 del Apartado 5.4.3) como:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{160 \text{ seg.}} (ACE_1) dt \\ I_2 &= \int_0^{160 \text{ seg.}} f_1^2(t) dt \\ I_3 &= \int_0^{160 \text{ seg.}} P_{12}^2(t) dt \end{aligned} \quad [64.4]$$

que para el caso del criterio integral [62.13] (penalización de las desviaciones de los estados y del esfuerzo de control sólo en los instantes de muestreo kT) son:

$$I_1 = -0,2186$$

$$I_2 = 0,0068$$

$$I_3 = 0,0016$$

[64.5]

y para el del criterio [62.11] (penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control),

$$I_1 = -0,1285$$

$$I_2 = 0,0078$$

$$I_3 = 0,0009$$

[64.6]

Cuando el regulador funciona en modo discreto, pero con los valores del vector de control óptimo obtenido para el caso (continuo) ① del Capítulo 5, estos índices son:

$$I_1 = -0,1811$$

$$I_2 = 0,0073$$

$$I_3 = 0,0014$$

[64.7]

Fig. 64.1 (a)

Desviaciones de frecuencia del Area 1
(RLO de acción simple sin retardo)

- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- .-.- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.
- - - - RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54.6) Curva de referencia para la contrastación de resultados.

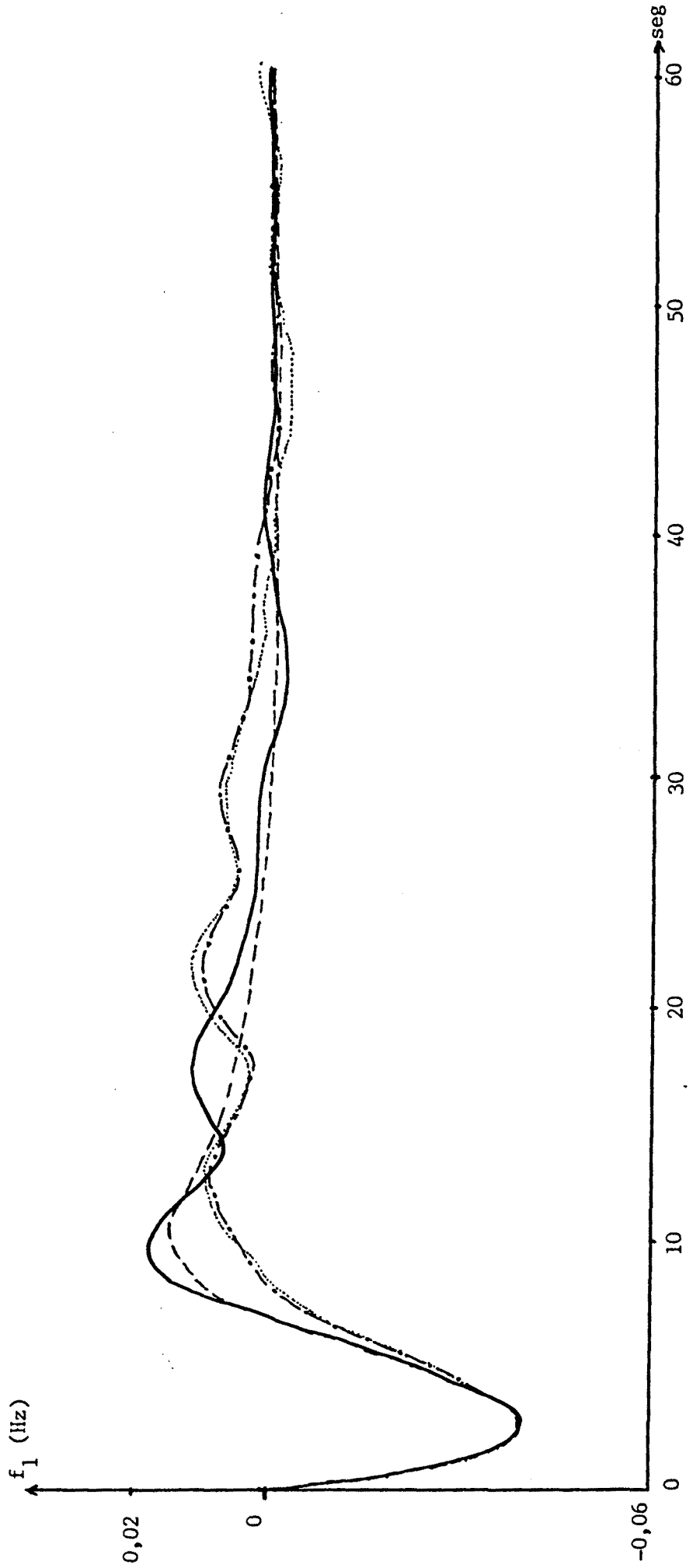
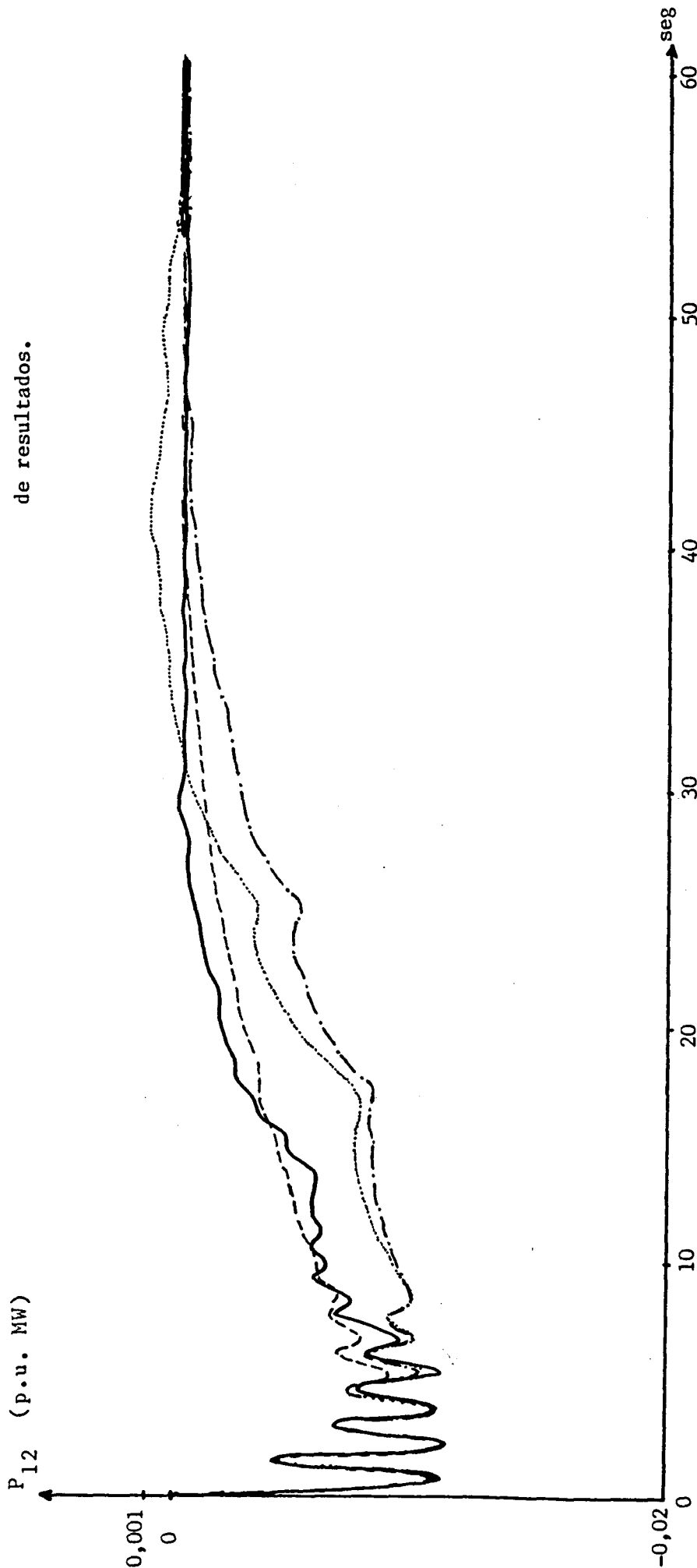


FIG. 64.1 (b)

Intercambio de potencia
(RLO de acción simple sin retardo)

- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- - - RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: vector de control del caso **I** del Capítulo 5.
- - - - RLO continuo: Caso **I** (reproducción de la fig. 54.7) Referencia para la contrastación de resultados.



- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- · - · RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.
- - - - RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54.8)

Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.1. (c)

Generación Area 1

(RLO de acción simple sin retardo)

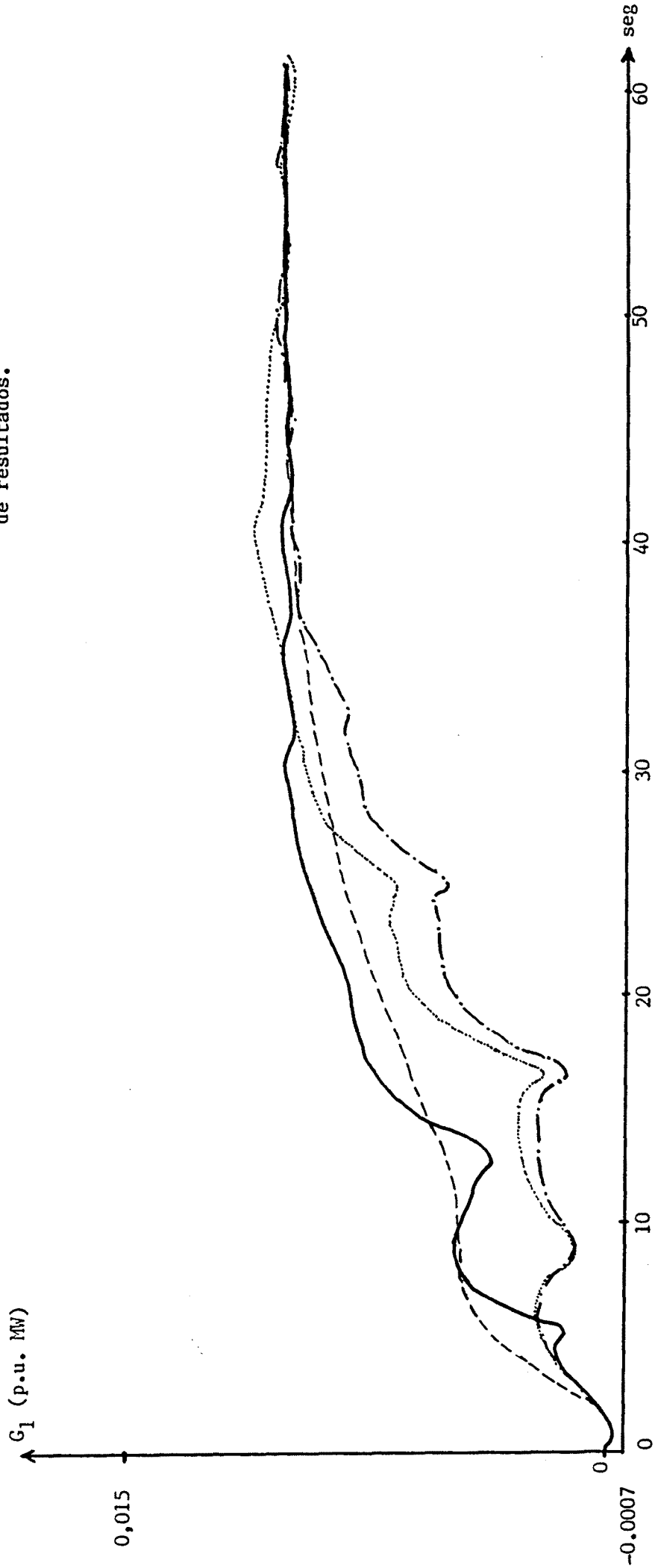


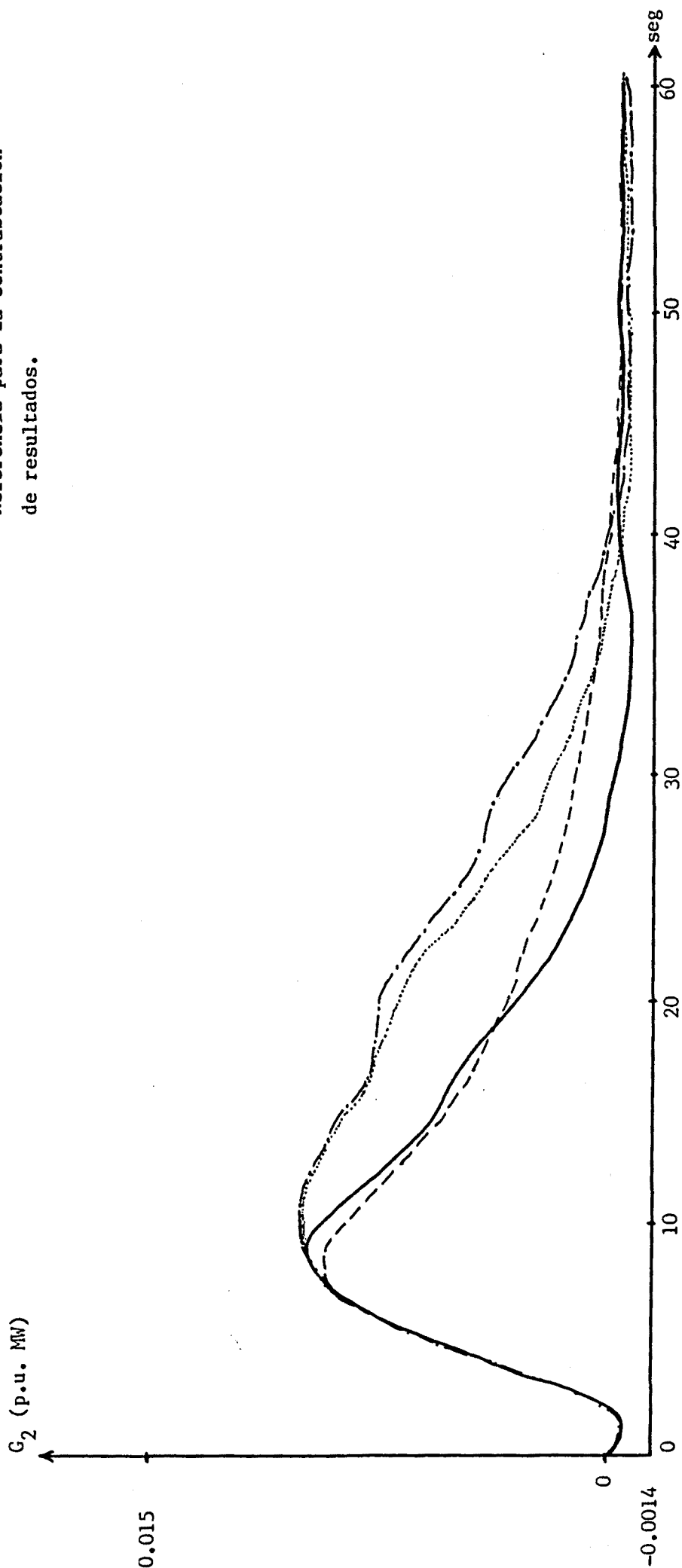
Fig. 64.1. (d)

Generación Area 2.

(RLO de acción simple sin retardo)

- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.
- - - - RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54.9)

Referencia para la contrastación de resultados.



6.4.3.- Discretización del RLO con retardo de control.

Manteniendo las mismas penalizaciones \tilde{Q} y \tilde{S} de la sección anterior y el mismo período de muestreo, se va a estudiar por simulación el comportamiento del SEE considerando un retardo en el establecimiento de la acción de control derivado de las limitaciones físicas de los elementos (demoras propias del proceso de teledadida ó debidas al tiempo de cálculo de los algoritmos de control).

Para ello se ha usado la formulación de estado desarrollada en [63.12] con las simplificaciones [63.14], cuantificándose al retardo para el diseño del RLO, en 4 seg., lo que representa la mitad del período de muestreo. Dado que en este caso no existe acción de control en los instantes de muestreo kT , $\hat{R}(T) = 0$. Por otro lado, la penalización del esfuerzo de control en los instantes $kT + \tau$ ($\tau = 4$ seg. y $T = 8$ seg.), inexistente en la sección anterior, se fija en

$$\tilde{V}(T) = \tilde{I}$$

de forma que sea la misma que la de los instantes kT de la sección anterior.

Usando los mismos programas que antes, se ha obtenido, para el criterio integral [63.10], el siguiente vector de control óptimo:

$$K^{\circ} = \begin{bmatrix} 3,875 \\ -0,2393 \\ 0,4174 \\ 0,1382 \\ 0,8655 \\ -0,0021 \end{bmatrix}^T \quad [64.8]$$

y para el caso del criterio [63.7],

$$K^{\circ} = \begin{bmatrix} 7,462 \\ -0,4494 \\ 0,8065 \\ 0,2679 \\ 1,697 \\ 0,0065 \end{bmatrix}^T \quad [64.9]$$

En la fig. 64.2 se muestra la respuesta indicial del SEE para la misma perturbación de la fig. 64.1 y cuando hay un retardo de 4 seg. en el establecimiento del control (para un mayor detalle de la figura puede consultarse el Apéndice G). En concreto, las cuatro curvas de la fig. 64.2 corresponden al RLO dis-

creto ajustado con los valores [64.8] (diseño considerando el retardo y con el criterio [63.10]), [64.9] (considerando el retardo y con el criterio [63.7]), [64.2] (sin considerar el retardo y con el criterio [62.13], equivalente a [63.10]) y con los valores del caso ① del Capítulo 5 (diseño del RLO como si fuera a funcionar en modo continuo).

Los valores de los índices de calidad I_1 , I_2 y I_3 anteriores son, para los cuatro casos simulados en esta sección:

1/ Valores del caso ① (diseño para el RLO continuo)

$$I_1 = -0,1812$$

$$I_2 = 0,0070$$

$$I_3 = 0,0012$$

2/ Valores de [64.2] (diseño optimizando sólo los instantes de muestreo y sin incluir el retardo en la formulación).

$$I_1 = -0,2185$$

$$I_2 = 0,0067$$

$$I_3 = 0,0014$$

3/ Valores de [64.8] (idem al caso 2 pero incluyendo el retardo en la formulación)

$$I_1 = -0,1995$$

$$I_2 = 0,0068$$

$$I_3 = 0,0013$$

4/ Valores de [64.9] (optimización continua e inclusión del retardo en la formulación).

$$I_1 = -0,1252$$

$$I_2 = 0,0079$$

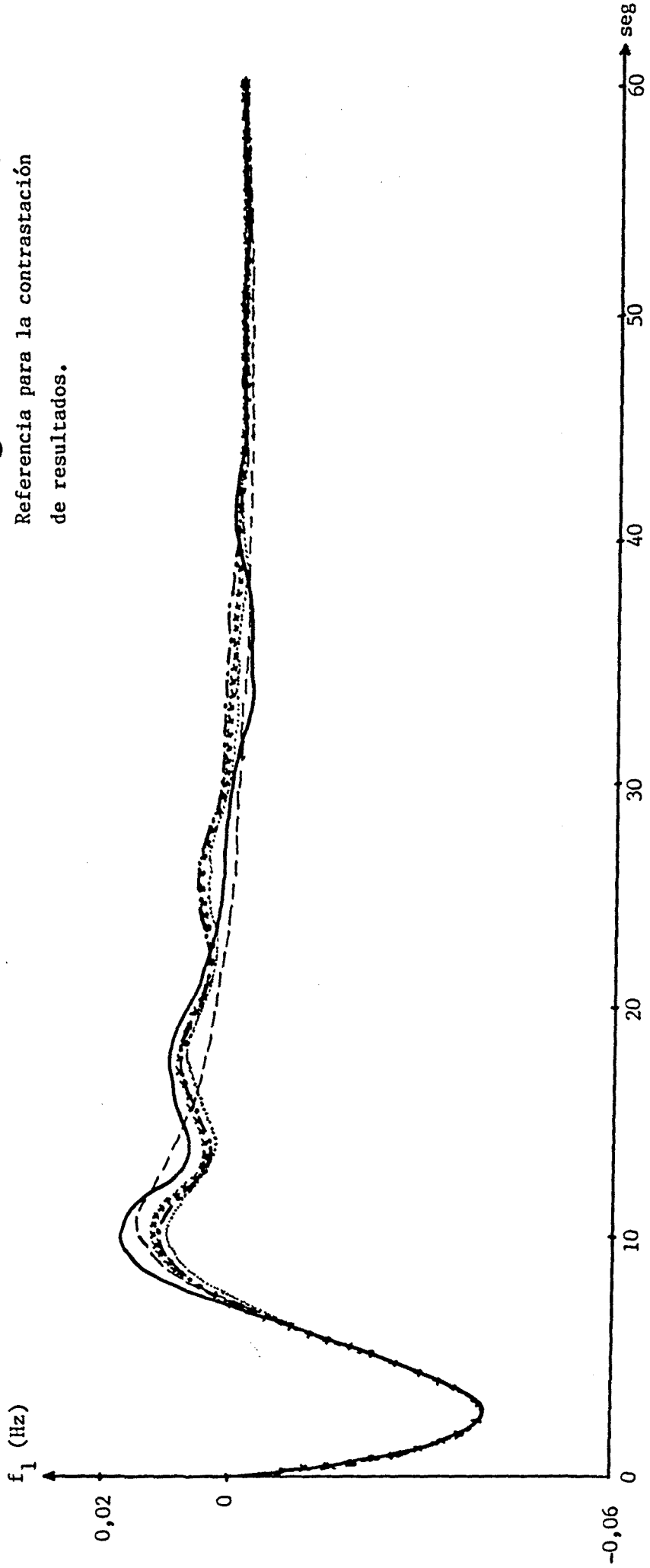
$$I_3 = 0,0009$$

Fig. 64.2 (a)

Desviaciones de frecuencia del Area 1.

(RLO de acción simple con retardo de control)

- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.
- ~~~~~ RLO discreto: vector de control del caso (I) del Capítulo 5.
- - - RLO continuo: Caso (I) (reproducción de la fig. 54.6) Referencia para la contrastación de resultados.

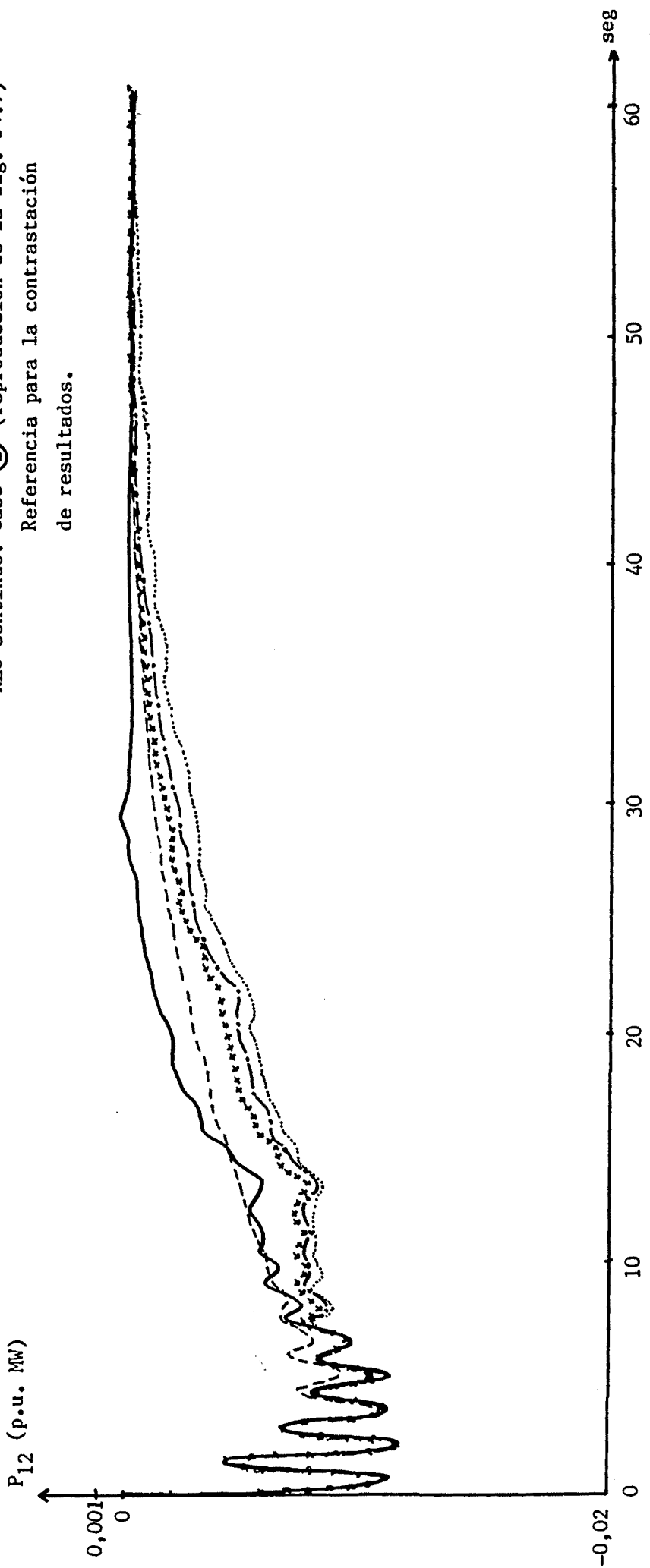


- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- · - · RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.
- ***** RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.

- - - - RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54.7) Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.2. (b)

Intercambio de potencia.
(RLO de acción simple con retardo de control)



— RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).

·-·-· RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).

····· RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.

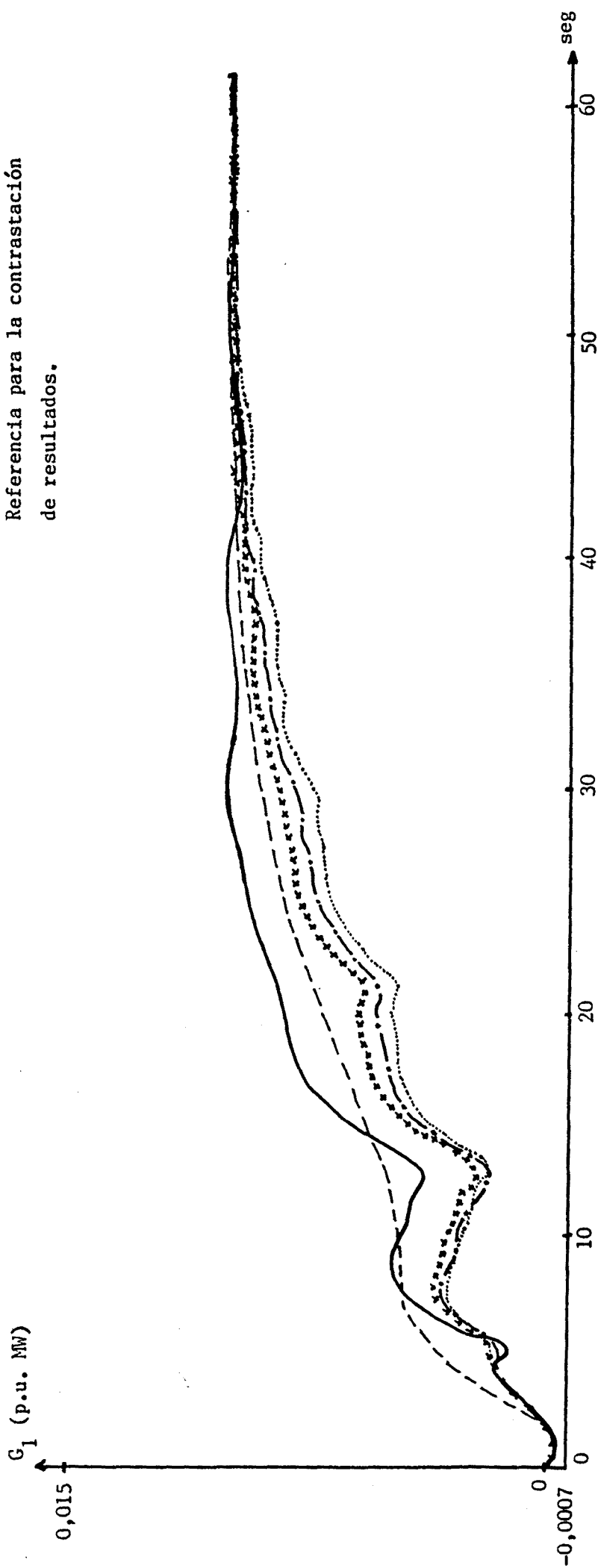
***** RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.

- - - - RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54.8) Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.2. (c)

Generación Area 1.

(RLO de acción simple con retardo de control)



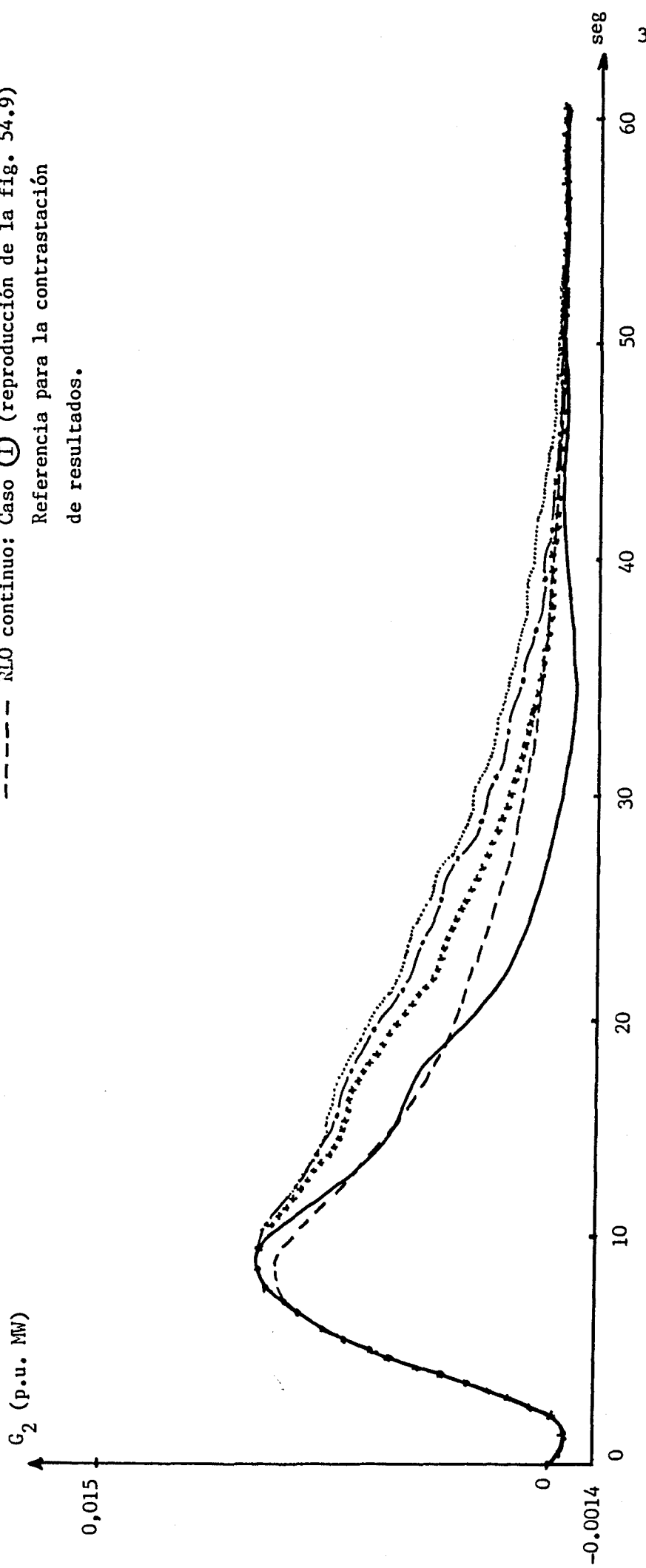
- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).
- · · · · RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).
- RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.
- * * * * * RLO discreto: vector de control del caso (I) del Capítulo 5.
- - - - - RLO continuo: Caso (I) (reproducción de la fig. 54.9)

Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.2. (d)

Generación Area 2.

(RLO de acción simple con retardo de control)



6.4.4.- RLO discreto de doble acción de control.

En esta sección se va a estudiar el funcionamiento del SEE con el RLO de doble acción de control en cada período de muestreo desarrollado en el Apartado 6.3. Para ello se mantendrán las penalizaciones \underline{S} y \underline{Q} usadas en las secciones anteriores, así como la penalización \underline{R} del esfuerzo de control en los instantes de muestreo kT , a fin de facilitar la contrastación de resultados.

Aunque se podrían analizar muchas combinaciones entre el período de muestreo y el período entre acciones de control, este estudio se centrará en dos casos. En primer lugar, se mantendrán los 8 seg. de período de muestreo, tardándose 4 seg. entre las dos acciones de control (el mismo retardo que en 6.4.3).

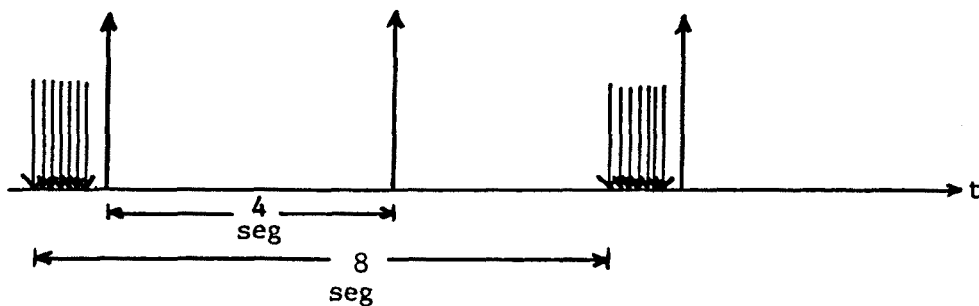


fig. 64.3

En segundo lugar se estudiará un período de muestreo más dilatado (12 seg.), según indica la fig. 64.4.

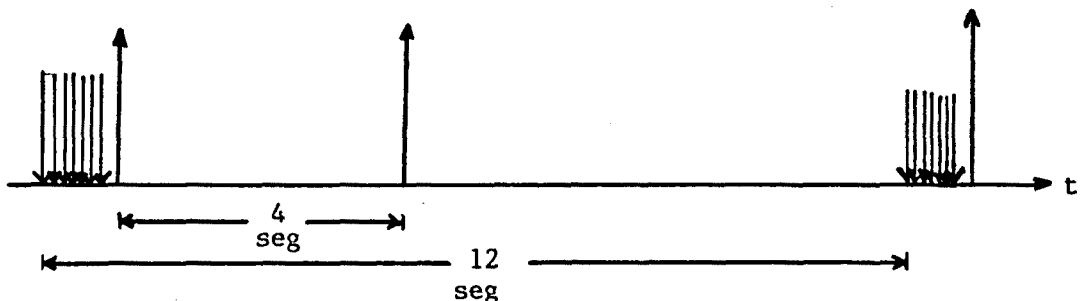


fig. 64.4.

Para la resolución de la ecuación de Riccati [62.38] y las ecuaciones de control [63.26] y [63.27] se ha desarrollado el programa "MULTC" (Apéndice F), el cual, para un mismo sistema y unas mismas penalizaciones, ha dado los mismos resultados que el programa "RTR2" si se fuerzan las condiciones [63.29].

El programa "MULTR" es una adaptación de "MULTC" al caso en que sólo se desee penalizar a las desviaciones y al esfuerzo de control en los instantes kT (criterio [63.8]).

Con estos programas y para el caso de la fig. 64.3 se han hecho cuatro estudios de simulación del RLO de doble acción. El primero (a) se ha basado en la penalización exclusiva de los instantes de muestreo kT ("programa MULTR"), adaptándose el criterio [63.7] a [63.8] mediante las simplificaciones [63.9] El segundo (b) ha consistido en una penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control ejercido en los instantes kT (criterios [63.2] y [63.7]), pero sin importar el esfuerzo en los instantes $kT + \tau$:

$$V(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) dt$$

El tercer estudio (c) es una ampliación del segundo cuando importa tanto el esfuerzo de control en kT como en $kT + \tau$,

$$V(T) = \int_{kT}^{(k+1)T} \left[\tilde{\Theta}^T(t - kT + \tau) \tilde{Q} \tilde{\Theta}(t - kT + \tau) + \tilde{R} \right] dt$$

Los resultados de estos tres estudios de simulación, en los que se ha mantenido la misma perturbación de 0,01 p.u.MW en el Area 1 que en las secciones anteriores, se muestran en la fig. 64.5, en la que se ha añadido otro estudio (d) en el que el período de muestreo se dividía según la fig. 64.4, penalizándose las desviaciones como en el estudio c. Además se añade la curva \textcircled{I} obtenida para el RLO continuo (fig. 54.6 - 54.9) como referencia para facilitar la contrastación de resultados (para un mayor detalle de las gráficas, véase Apéndice F).

Los valores paramétricos de los vectores de realimentación en kT y $kT + \tau$ así como los índices de calidad I_1 , I_2 e I_3 obtenidos en los cuatro estudios citados (a, b, c y d), así como los obtenidos en un quinto estudio (e), efectuado con $T = 8$ seg. y en el cual se han ensayado los valores del RLO continuo diseñado para el caso \textcircled{I} del Capítulo 5, se exponen a continuación:

a)

$$K^\circ(kT) = \begin{bmatrix} 2,925 \\ -0,1756 \\ 0,3229 \\ 0,1081 \\ 0,6629 \\ -0,001814 \end{bmatrix}^T \quad K^\circ(kT+\tau) = \begin{bmatrix} 2,234 \\ -0,1379 \\ 0,2408 \\ 0,07931 \\ 0,5 \\ -0,002047 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{aligned} I_1 &= -0,2448 \\ I_2 &= 0,0065 \\ I_3 &= 0,0016 \end{aligned}$$

b)

$$K^\circ(kT) = \begin{bmatrix} 5,715 \\ -0,3224 \\ 0,655 \\ 0,2135 \\ 1,263 \\ 0,01496 \end{bmatrix}^T \quad K^\circ(kT+z) = \begin{bmatrix} 5,955 \\ -0,3565 \\ 0,6279 \\ 0,2109 \\ 1,417 \\ 0,02379 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{aligned} I_1 &= -0,1489 \\ I_2 &= 0,0074 \\ I_3 &= 0,0010 \end{aligned}$$

c)

$$K^\circ(kT) = \begin{bmatrix} 7,109 \\ -0,4095 \\ 0,8017 \\ 0,2627 \\ 1,59 \\ -0,01046 \end{bmatrix}^T \quad K^\circ(kT+z) = \begin{bmatrix} 3,042 \\ -0,1833 \\ 0,3205 \\ 0,1077 \\ 0,7205 \\ 0,01137 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{aligned} I_1 &= -0,2333 \\ I_2 &= 0,0066 \\ I_3 &= 0,0015 \end{aligned}$$

d)

$$K^\circ(kT) = \begin{bmatrix} 1,77 \\ -0,1057 \\ 0,1968 \\ 0,06511 \\ 0,4038 \\ -0,001419 \end{bmatrix}^T \quad K^\circ(kT+z) = \begin{bmatrix} 2,825 \\ -0,1748 \\ 0,3036 \\ 0,1007 \\ 0,6297 \\ -0,00009565 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -0,2508 \\
 I_2 &= 0,0068 \\
 I_3 &= 0,0017
 \end{aligned}$$

e)

$$K^\circ(kT) = \begin{bmatrix} 4,627 \\ -0,19 \\ 0,506 \\ 0,146 \\ 1 \\ 0,05 \end{bmatrix}^T$$

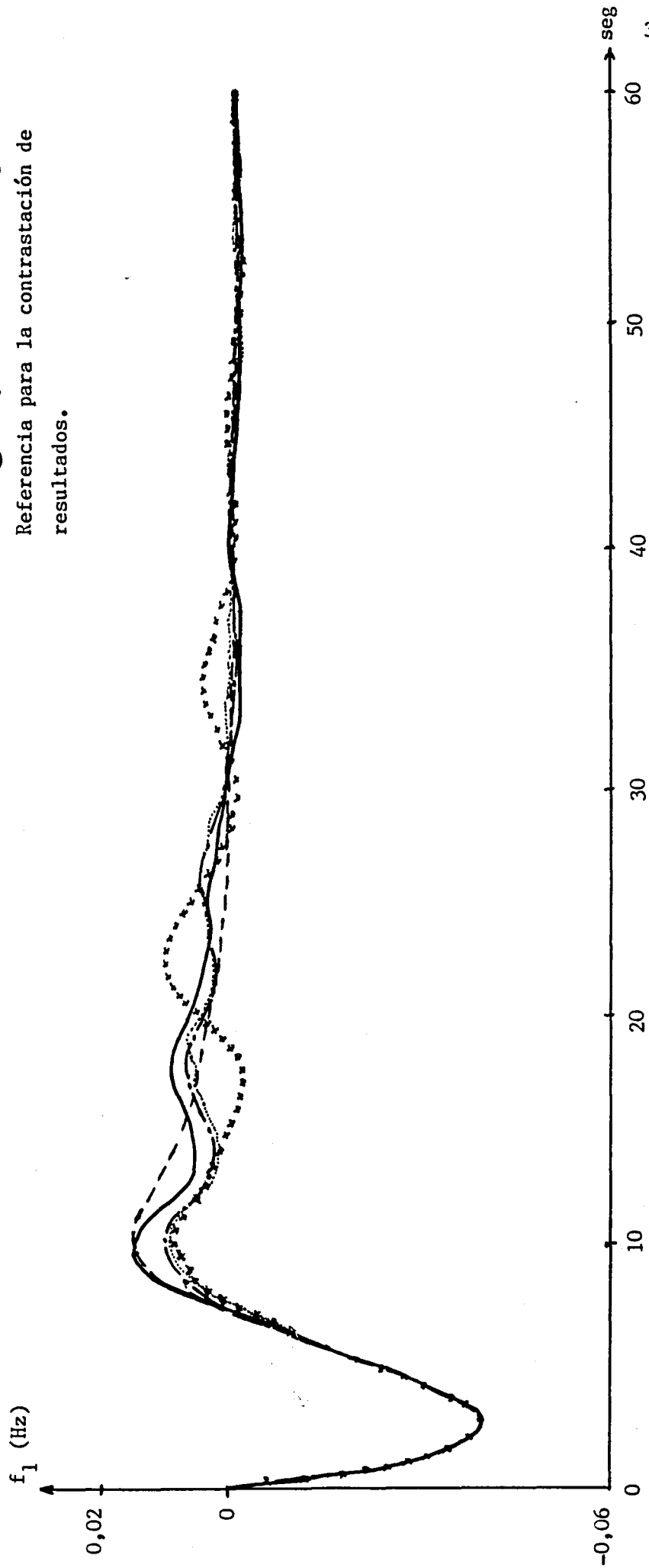
$$K^\circ(kT+\tau) = \begin{bmatrix} 4,627 \\ -0,19 \\ 0,506 \\ 0,146 \\ 1 \\ 0,05 \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -0,1812 \\
 I_2 &= 0,0070 \\
 I_3 &= 0,0012
 \end{aligned}$$

- RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a).
 - RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).
 - · - · - RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \zeta$).
 - ***** RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)
 - - - - RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54.6)
- Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.5. (a)

Desviaciones de frecuencia del Area 1.
(RLO de doble acción).

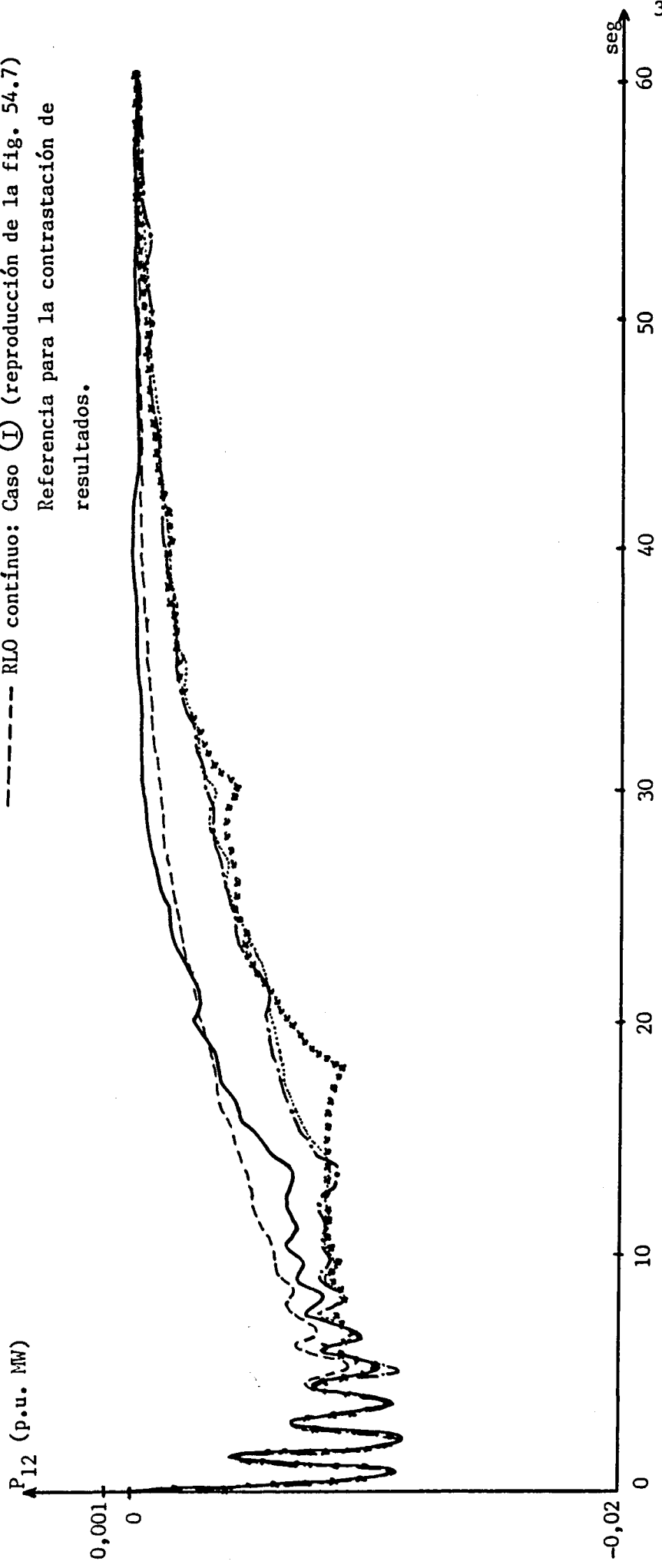


- RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a).
- RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).
- - - - RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \tau$).
- ***** RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)
- - - - RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54.7)

Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.5. (b)

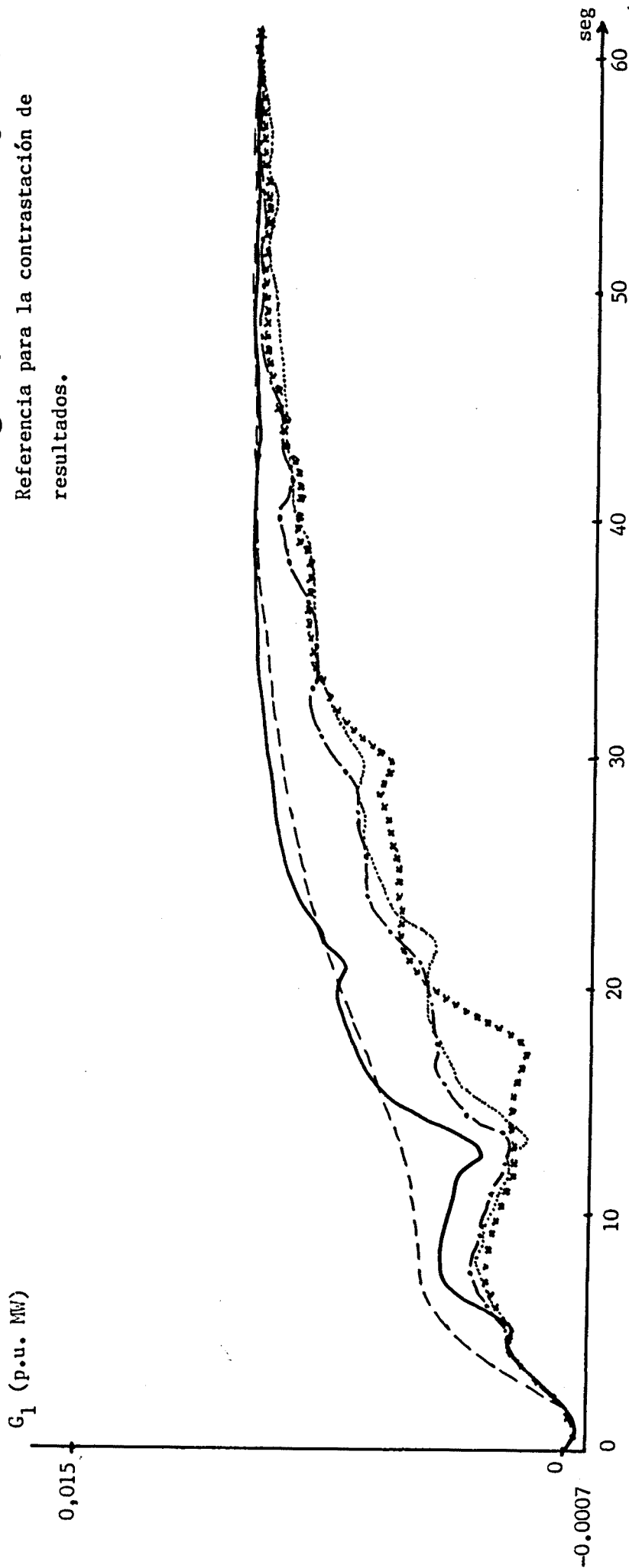
Intercambio de potencia.
(RLO de doble acción)



- RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a).
 - RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).
 - .-.- RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \mathcal{Z}$).
 - ***** RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)
 - - - - RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54.8)
- Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.5. (c)

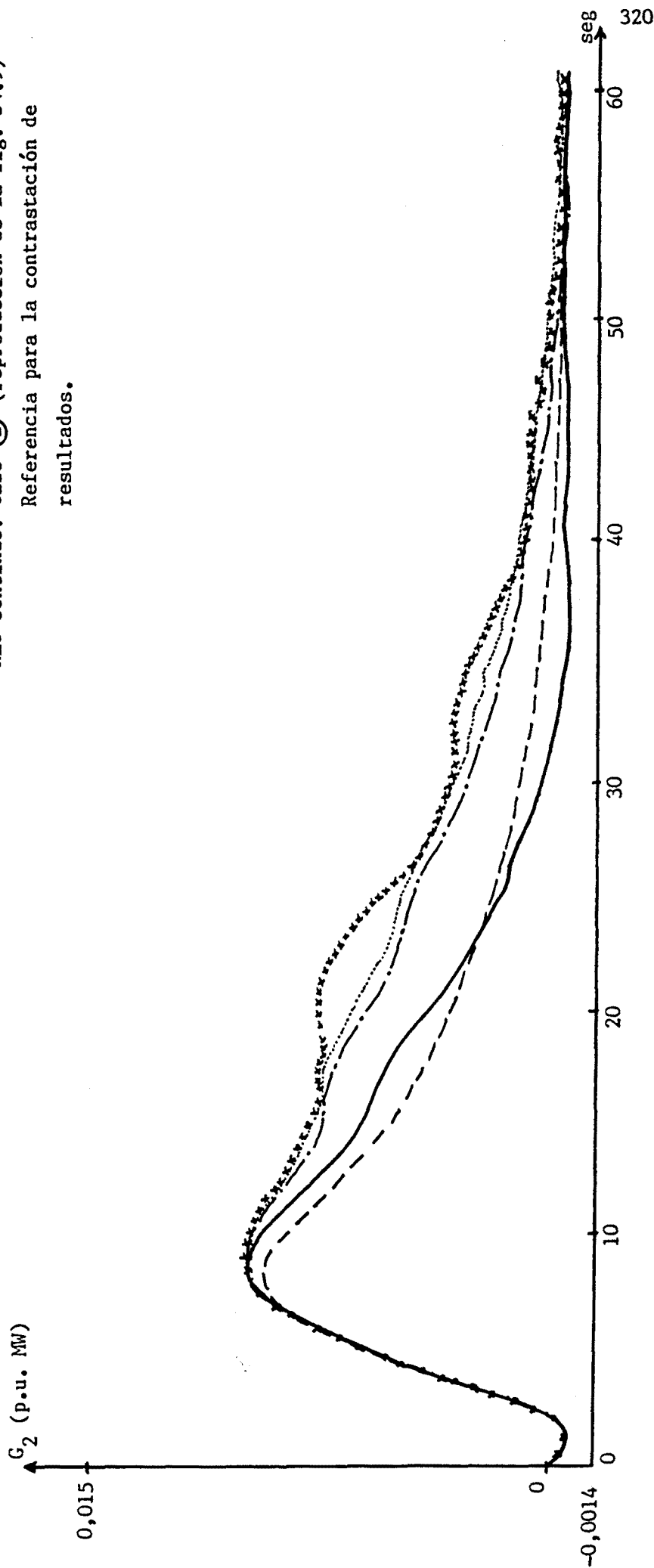
Generación Area 1.
(RLO de doble acción)



- RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a).
 - RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).
 - RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \mathcal{V}$).
 - ***** RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)
 - - - - - RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54.9)
- Referencia para la contrastación de resultados.

Fig. 64.5. (d)

Generación Area 2.
(RLO de doble acción)



6.4.5.- Estudio del efecto de la pérdida de sincronismo.

Tal y como se ha avanzado en la introducción de este apartado, puede haber problemas de sincronismo si, por la concepción de los programas de cálculo de la ley de control ó porque se creen colas en la recepción e interpretación de las telemedidas, la acción de control telemandada en el instante kT no se calcula a partir de los estados muestreados en el período $[(k - 1)T, kT]$, sino que se hace con los estados muestreados en el intervalo anterior.

En esta sección se prueban por simulación los efectos de estas pérdidas de sincronismo para los casos b y c de la sección anterior, en los que el RLO se basa en una doble acción de control diseñada según [63.26] y [63.27], contrastándolos con una pérdida de sincronismo del RLO de acción simple diseñado según [62.11] (sección 6.4.2). Para ello se han mantenido los valores de los vectores de control calculados en cada caso, pero se ha añadido un retardo en la simulación de forma que la acción de control en el instante kT se calcule a partir de las muestras obtenidas en $(k - 1)T$.

Los resultados obtenidos para la misma perturbación que en las secciones precedentes se muestran en la fig. 64.6, en la cual se han reproducido también las simulaciones del caso d de la sección anterior (sin pérdida de sincronismo) y las del RLO continuo (funcionando como tal) diseñado para el caso Ⓘ en el Capítulo 5 (fig. 54.6 - 54.9), a fin de facilitar la contrastación de resultados.

La pérdida de sincronismo en los dos casos b y c de la sección anterior ha conllevado los siguientes índices de calidad:

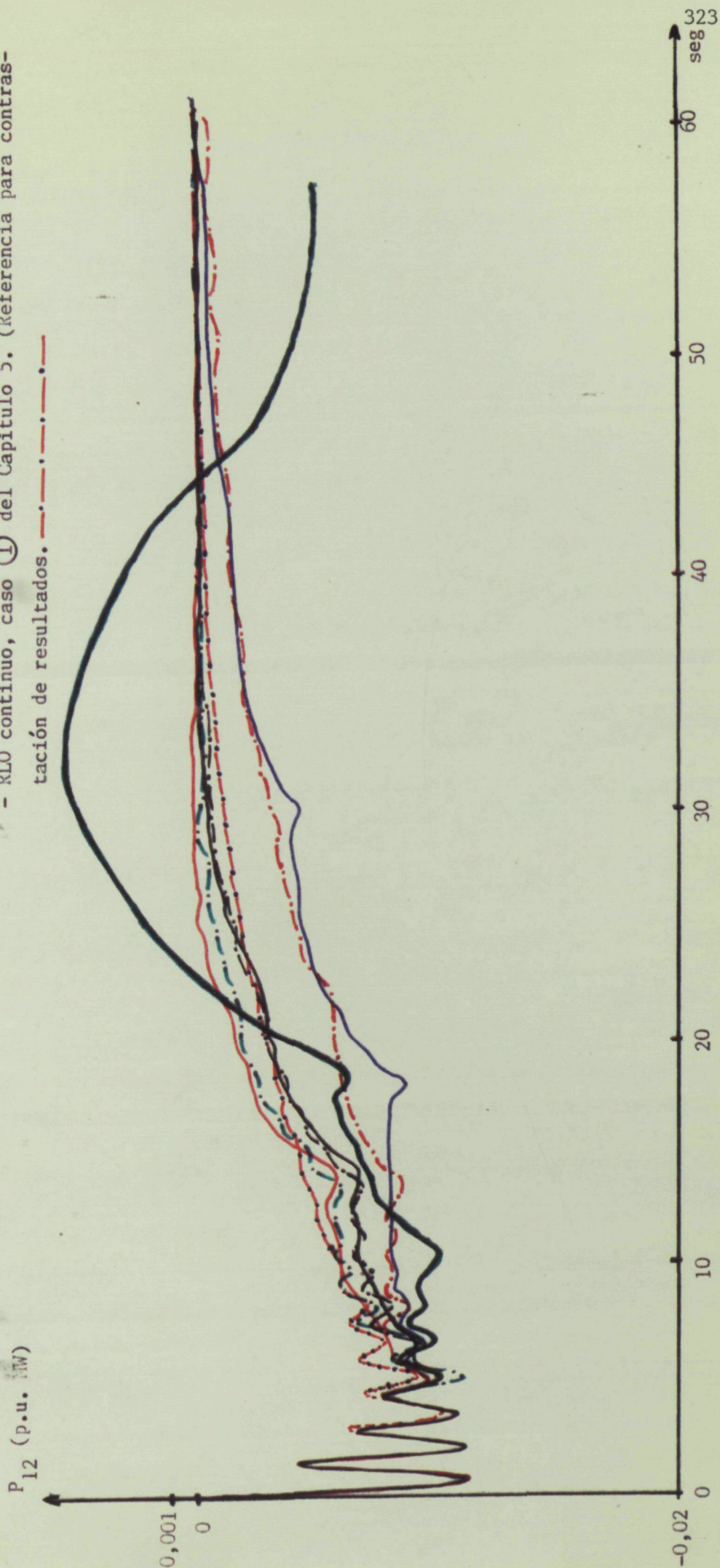
$$\begin{array}{l} \underline{b/} \\ I_1 = -0,1532 \\ I_2 = 0,0074 \\ I_3 = 0,0011 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \underline{c/} \\ I_1 = -0,1315 \\ I_2 = 0,0079 \\ I_3 = 0,0009 \end{array}$$

Fig. 64.6. (b)

Intercambio de potencia.

- RLO discreto, doble acción de control, penalización continua.
- Penalización del esfuerzo de control en kT .
- Pérdida de sincronismo. — — — Sin pérdida de sincronismo.
- Penalización del esfuerzo de control en kT y $kT + \sqrt{\quad}$.
- Pérdida de sincronismo. — — — Sin pérdida de sincronismo.
- Ampliación del período de muestreo de 8 seg. a 12 seg.
- RLO discreto, simple acción de control, penalización continua.
- Pérdida de sincronismo. — — — Sin pérdida de sincronismo.
- RLO continuo, caso (I) del Capítulo 5. (Referencia para contras-
- tación de resultados. — — — — —)



Generación Area 1.

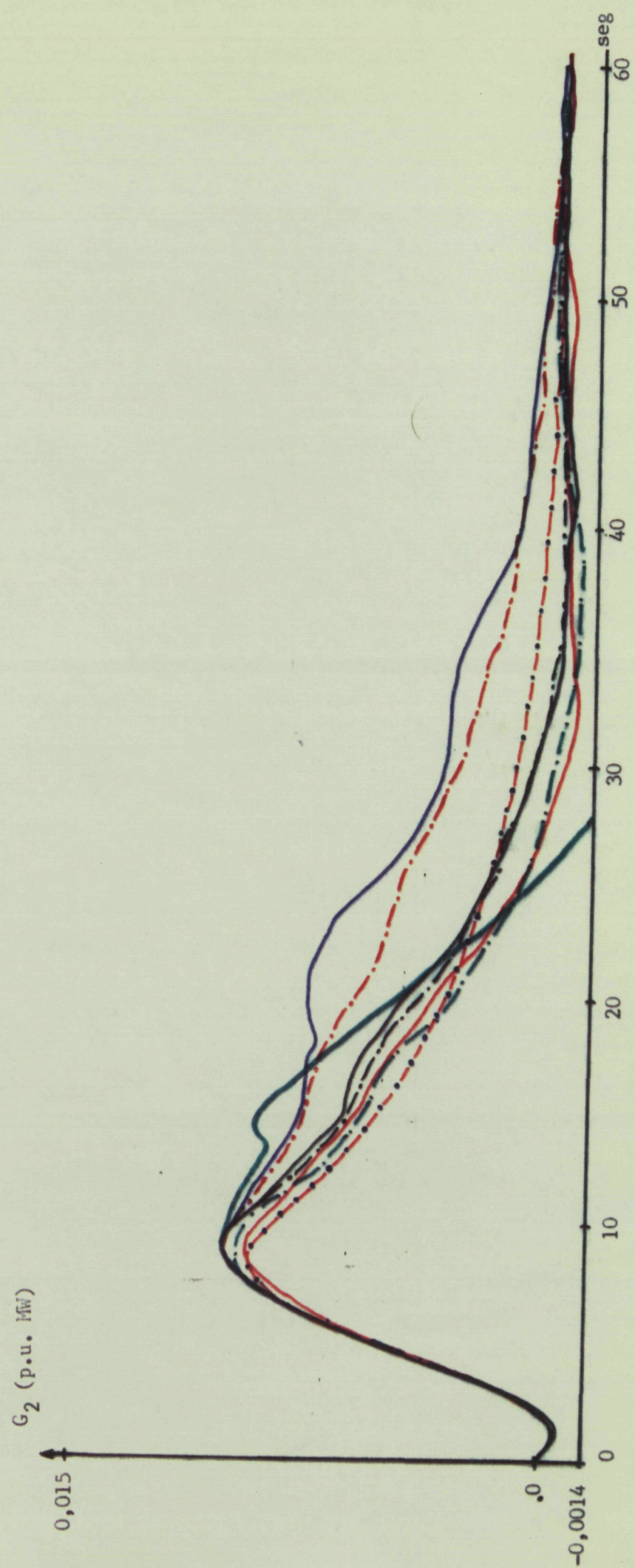
- Pérdida de sincronismo. - - - - Sin pérdida de sincronismo.
- Penalización del esfuerzo de control en kT y $kT + \tau$.
- Pérdida de sincronismo. - - - - Sin pérdida de sincronismo.
- Ampliación del período de muestreo de 8 seg. a 12 seg.
- RLO discreto, simple acción de control, penalización continua.
- Pérdida de sincronismo. - - - - Sin pérdida de sincronismo.
- RLO continuo, caso (I) del Capítulo 5. (Referencia para contras-
- tación de resultados. - - - - .



- RLO discreto, doble acción de control, penalización continúa.
- Penalización del esfuerzo de control en kT .
- Pérdida de sincronismo, — — — Sin pérdida de sincronismo.
- Penalización del esfuerzo de control en kT y $kT + \mathcal{L}$.
- Pérdida de sincronismo. - - - Sin pérdida de sincronismo.
- Ampliación del período de muestreo de 8 seg. a 12 seg.
- RLO discreto, simple acción de control, penalización continúa.
- Pérdida de sincronismo. - - - Sin pérdida de sincronismo.
- RLO continuo, caso (I) del Capítulo 5. (Referencia para contras-
- tación de resultados. - - - - -

Fig. 64.6. (d)

Generación Area 2.



6.5.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

6.5.1.- Generalidades.

En este capítulo se ha abordado el problema del funcionamiento discreto del RLO de P/f. Para ello se han estudiado diferentes formas de discretización del RLO, y se ha probado por simulación el funcionamiento de cada una de ellas sobre el modelo elaborado en el Capítulo 2.

En primer lugar se ha estudiado la aplicación de la teoría convencional del RLO discreto al regulador de P/f, comparándose el funcionamiento de éste según que se escogiera un criterio integral que penalizara de modo continuo las desviaciones de las variables ó que sólo las penalizara en los instantes concretos de muestreo kT . Con ello se han obtenido diversos resultados que se comentarán en las siguientes secciones de este apartado, los cuales suponen un primer paso para diagnosticar la validez de los dos criterios integrales mencionados (los más usados en la literatura de Control Digital) al caso de la regulación P/f. Este primer estudio se ha ampliado comparando el funcionamiento del RLO discreto diseñado con estos criterios integrales con el RLO también discreto pero ajustado con los valores obtenidos en el caso (I) del Capítulo 5 (por usarse en él las mismas penalizaciones \tilde{Q} y \tilde{R} que en el presente capítulo) para el RLO continuo. Asimismo, para facilitar la contrastación de resultados, se ha reproducido en todas las curvas la dinámica del RLO continuo del caso (I) del capítulo anterior.

En segundo lugar se ha estudiado la discretización del RLO considerando un retardo desde la llegada de las telemidas hasta el establecimiento de la ley de control en cada período de muestreo. Este retardo, que responde a las propias limitaciones físicas de los reguladores no había sido tratado en los trabajos precedentes. En concreto se han estudiado los dos criterios integrales del caso anterior (penalización continua y penalización en kT), comparándose al RLO discreto diseñado con estos criterios con el RLO discreto ajustado con los valores del caso (I) del capítulo anterior y con el RLO discreto diseñado a partir del criterio integral que sólo penaliza las desviaciones de los estados en los instantes kT , pero formulado como si no existiera el retardo de control.

En tercer lugar se han estudiado las posibilidades de un RLO basado en una doble acción de control en cada período de muestreo. Para ello se ha desarrollado una nueva formulación del RLO discreto, concebida para el diseño de sistemas con doble acción de control y válida también para sistemas de acción simple, esté esta o no retardada respecto a las telemidas (muestras).

En este estudio del RLO discreto de doble acción se han experimentado tres criterios: la penalización de las desviaciones de los estados y del esfuer-

zo de control en kT , la penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control, pero sin que importara el ejercido en $kT + \mathcal{Z}$ (sólo se penalizaba el esfuerzo en kT), y la penalización continua limitando el doble esfuerzo de control (en kT y $kT + \mathcal{Z}$). Paralelamente a los estudios anteriores, los resultados obtenidos se han contrastado con un RLO de doble acción ajustándose las dos acciones con los valores del caso $\textcircled{\text{I}}$ del Capítulo 5. Este estudio del RLO de doble acción se ha completado considerando una dilatación del período de muestreo, que en todos los estudios mencionados es de 8 seg., a 12 seg.

Finalmente se ha evaluado la sensibilidad de distintos RLO discretos a las pérdidas de sincronismo entre las telemedidas y los telemandos.

En las siguientes secciones se detallan las conclusiones de los diversos estudios.

6.5.2.- RLO discreto de acción simple sin retardo.

Como se desprende de los índices de calidad I_1 , I_2 e I_3 de la sección 6.4.2, sólo en el caso en que se penalicen de forma continua (criterio [62.7]) las desviaciones de los estados se logra una reducción importante del ACE.

El uso del criterio integral [62.12], en el que sólo se penalizan los instantes de muestreo kT lleva a una situación peor, desde el punto de vista de la integral del ACE, que si se usaran los valores paramétricos diseñados para el caso continuo $\textcircled{\text{I}}$, aunque en este caso el transitorio es algo más oscilante (fig. 64.1).

Con ello, una primera conclusión es la invalidez del criterio [62.13] para optimizar el funcionamiento de un SEE con un RLO de P/f discreto. Por otro lado, como puede comprobarse en la fig. 64.1, el RLO discreto es más oscilatorio que el continuo, forzando mayores esfuerzos en las unidades generadoras que el RLO continuo.

Esta divergencia de resultados entre el RLO discreto y el continuo y el hecho de que los reguladores de P/f reales sean digitales, confirma la necesidad expuesta por varios autores [122, 116, 178, 192] de operar con modelos realistas en que se aborde el análisis y diseño en el dominio discreto.

6.5.3.- RLO de acción simple con retardo.

Como se refleja en los índices de calidad y las dinámicas obtenidas en la sección 6.4.3, las conclusiones anteriores se mantienen íntegramente si hay un retardo en el establecimiento de la acción de control y el RLO se diseña considerando a este retardo.

Adicionalmente, se puede concluir que la implementación de un RLO discreto diseñado sin considerar el retardo ofrece ligeras mejorías en el transitorio,

como es un menor esfuerzo de generación en las unidades del área y un menor sobrepico de frecuencia (aunque las desviaciones de frecuencia no son generalizables por depender directamente de la selección del coeficiente (β del ACE). Sin embargo, la acumulación de ACE es casi el doble de la obtenida con un RLO discreto en el que se haya considerado el retardo en su diseño (penalizando de modo continuo las desviaciones), por lo que es necesario prever el retardo en el diseño del RLO.

6.5.4.- RLO de doble acción.

Como puede comprobarse con los resultados de la sección 6.4.4, incluso cuando la acción de control es doble, el RLO diseñado a partir de la penalización de las desviaciones en los instantes concretos kT sigue dando una mayor acumulación de ACE que el RLO ajustado con los valores obtenidos para el caso continuo (I), confirmándose la invalidez del criterio [62.13] para el diseño del RLO discreto.

Cuando el criterio integral penaliza de forma continua a las desviaciones de los estados y al esfuerzo de control ([63.2] y [63.7]), la situación es diferente según que se considere en la penalización al esfuerzo de control en kT , exclusivamente, ó en kT y $kT + \tau$. En el primer caso se reduce sensiblemente la acumulación del ACE respecto al segundo y se obtiene una dinámica más parecida a la del caso continuo (I). Además, los vectores de control de este primer caso en kT y en $kT + \tau$, son muy parecidos, lo que significa un reparto equitativo del esfuerzo de generación entre las dos acciones de control de cada período. En el segundo caso, la adición de una penalización del esfuerzo de control en $kT + \tau$ reduce el vector de ganancias en este instante, aumentando el esfuerzo de generación en el instante kT . Esto es debido a que, al ser [63.2] el sumatorio de una integral definida en todo el período de muestreo, la penalización del esfuerzo en $kT + \tau$ es redundante, recibiendo una mayor penalización las desviaciones en $kT + \tau$ que en el primer caso.

Con ello se concluye que el sumando R de la expresión de $\tilde{V}(T)$ en [63.6] debe ser nulo si se pretende repartir equitativamente el esfuerzo de control entre las dos acciones. En caso contrario este esfuerzo se centra principalmente en los instantes de muestreo kT .

Por otro lado, un aumento del período de muestreo de 8 seg. a 12 seg. penalizándose el esfuerzo de control en $kT + \tau$ y en kT , no modifica sustancialmente los índices de calidad, aunque las dinámicas sean diferentes.

6.5.5.- Comparación entre los diferentes estudios. Asincronismos.

En las figuras 64.7 - 64.10 se han superpuesto las dinámicas obtenidas en las diferentes simulaciones hasta ahora comentadas. Comparando las del RLO diseñado considerando el retardo de control con las del RLO diseñado bajo hipótesis de acción inmediata, puede verse que sólo la penalización continua de las desviaciones [62.11] permite una buena compensación del retardo, siendo la dinámica de ambos casos muy similar (así como los índices de calidad).

El RLO discreto de doble acción en el que se penalizan de forma continua las desviaciones de los estados y el esfuerzo de control en kT y el RLO de acción simple penalizado según [62.11] tienen una dinámica parecida al RLO continuo. Los restantes reguladores, tanto de simple como de doble acción, ofrecen una dinámica y unos índices sensiblemente peores que el RLO continuo.

Al producirse pérdidas de sincronismo (sección 6.4.5), el RLO discreto de doble acción con penalización continua del esfuerzo en kT mantiene la misma dinámica y los mismos índices de calidad que antes de perderse el sincronismo. Esto es una consecuencia de la semejanza entre los vectores de control en kT y en $kT + \tau$. Por otro lado, el RLO discreto de doble acción en el cual también se ha penalizado el esfuerzo en $kT + \tau$ presenta una menor acumulación de ACE y unos transitorios más cortos al perderse el sincronismo. Ello es debido a que, con esta pérdida de sincronismo, el vector de control de mayor ganancia se centra ahora en $kT + \tau$, forzándose más la generación. Sin embargo, sería objeto de otro estudio el poder confirmar esta aparente mayor sensibilidad de la generación al vector de control de $kT + \tau$ respecto al de kT .

Una pérdida de sincronismo del RLO discreto de acción simple ha provocado una situación inestable (al igual que ocurre al aumentar el período de muestreo) en el SEE, aún en el caso de usarse el criterio [62.11] (penalización continua), que era el que había ofrecido mejores prestaciones en los restantes estudios. Por ello, aunque el RLO discreto de doble acción no mejora de una forma clara la acumulación del ACE ni los transitorios respecto al de acción simple, es más robusto frente a las pérdidas de sincronismo (y a las modificaciones del período de muestreo), por lo que su uso es aconsejable si la actuación conjunta de los programas de RPF, de seguridad y de economía conlleva problemas de estabilidad.

En resumen, las principales aportaciones de este capítulo han sido, además de confirmarse la necesidad de diseñar en el dominio discreto al RLO (soportado por ordenadores), el desarrollo de una nueva formulación del RLO discreto, detectándose la baja calidad del criterio [62.13] respecto al [62.11], la reducida sensibilidad al retardo en el control del RLO diseñado según [62.11] e incluyendo este retardo en la formulación, y la mayor robustez del RLO de doble acción frente a los asincronismos entre la recepción de las telemedidas y las

órdenes telemandadas a las unidades generadoras. Asimismo, para este RLO de doble acción también se ha constatado la necesidad de usar al criterio integral que penalice de forma continua las desviaciones de los estados.

RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a)

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).

(AD) ----- (CR) -----
 RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).

(AS) ----- (CR) -----
 RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).

(AD) ----- (CR) -----
 RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + 7$).

(AS) ----- (CR) -----
 RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.

(AD) ----- (CR) -----
 RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)

(AS) ----- (CR) -----
 RLO discreto: vector de control del caso I del Capítulo 5.

(AD) ----- (CR) -----
 RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54. Referencia para la contrastación de resultados.

(AS) ----- (CR) -----
 RLO continuo: acción de control doble. (AS)= acción simple. (CR)= con retardo en la acción de control. (SR)= sin retardo.

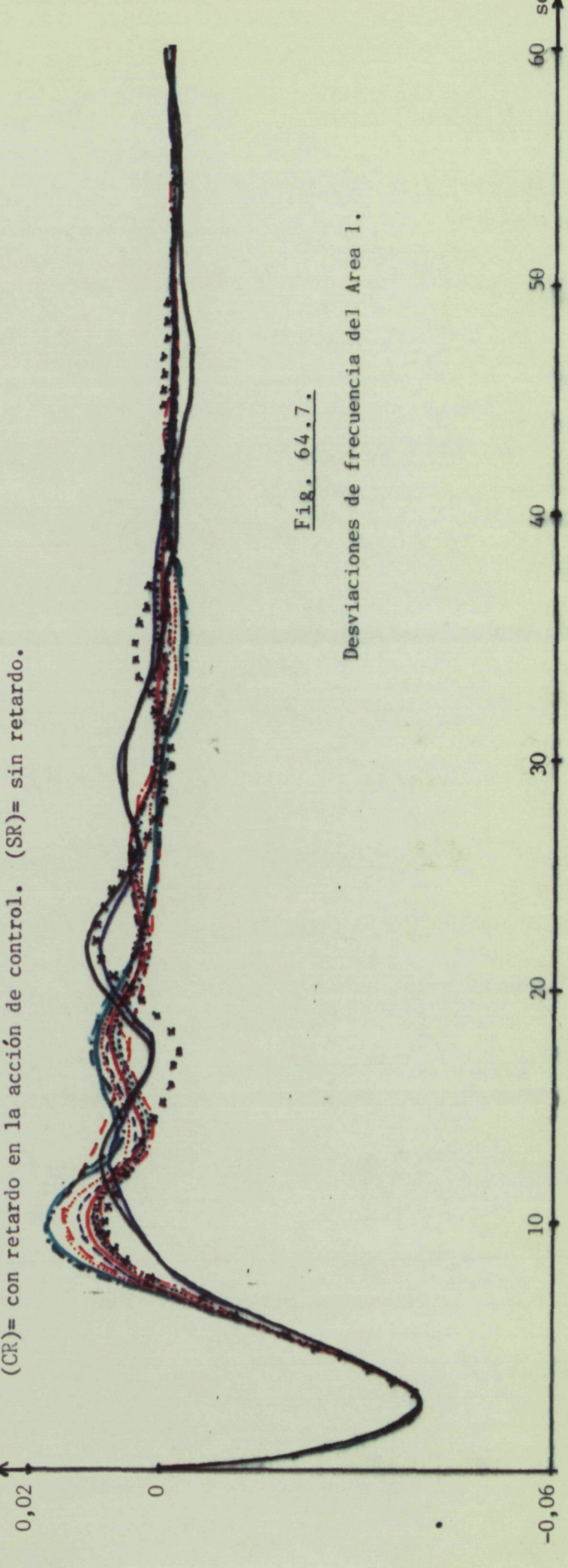


Fig. 64.7.

Desviaciones de frecuencia del Area 1.

RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a)

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).

RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \tau$).

RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)

RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54. Referencia para la contrastación de resultados.

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).

(SR) ——— (CR) ———

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).

(AS) ——— (CR) ———

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.

(AS) ——— (CR) ———

RLO discreto: vector de control del caso I del Capítulo 5.

(AD) ——— (CR) ———

(AD) = acción de control doble. (AS) = acción simple.

(CR) = con retardo en la acción de control. (SR) = sin retardo.

P_{12} (p.u.MW)

0,001
0

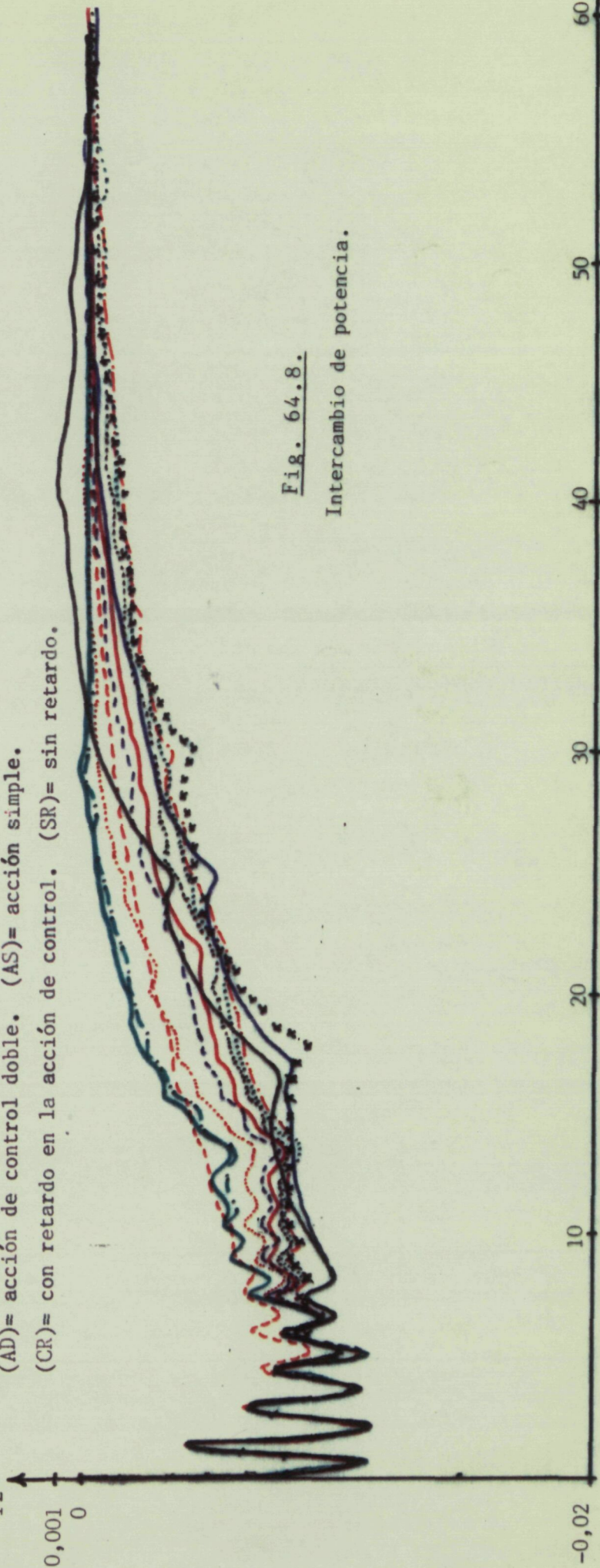


Fig. 64.8.

Intercambio de potencia.

-0,02

10

20

30

40

50

60 seg

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).

(AS) ——— (CR) ———

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).

(AS) ——— (CR) ———

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.

(CR)

RLO discreto: vector de control del caso \textcircled{I} del Capítulo 5.

(AS) ——— (CR) - - - - -

(AD)= acción de control doble. (AS)= acción simple.
 (CR)= con retardo en la acción de control. (SR)= sin retardo.

RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso \underline{a})

(AD) - - - - -

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso \underline{b}).

(AD)

RLO discreto: Caso \underline{c} (= caso \underline{b} + penalización del esfuerzo en $kT + \tau$).

(AD)

RLO discreto: Caso \underline{d} (= caso \underline{c} con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)

(AD) xxxxxxxxxxxx

RLO continuo: Caso \textcircled{I} (reproducción de la fig. 54. Referencia para la contrastación de resultados.)

- - - - -

G_1 (p.u.MW)

0,015

0

-0,0007

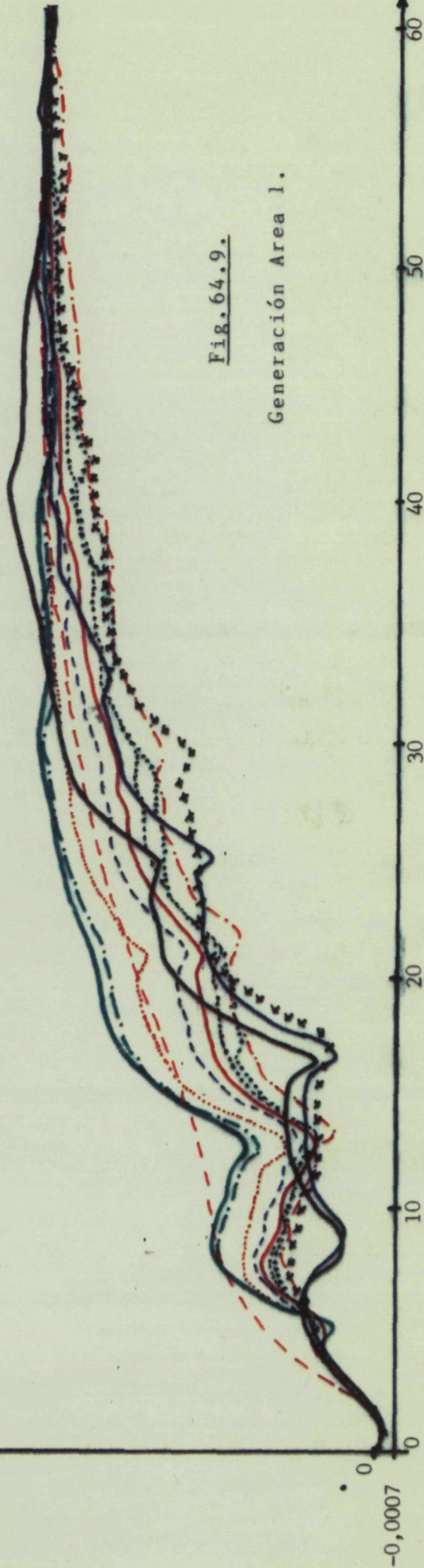


Fig. 64.9.

Generación Area 1.

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones ([62.11]).

(AS) ----- (CR) -----

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT ([62.13]).

(AS) ----- (CR) -----

RLO discreto: penalización de las desviaciones en los instantes kT , pero sin incluir el retardo en la formulación del RLO.

(CR)

RLO discreto: vector de control del caso (I) del Capítulo 5.

(AS) ----- (CR) -----

(AD)= acción de control doble. (AS)= acción simple.
 (CR)= con retardo en la acción de control. (SR)= sin retardo.

RLO discreto: penalización de las desviaciones y del esfuerzo de control sólo en kT (caso a)

(AD) -----

RLO discreto: penalización continua de las desviaciones y del esfuerzo de control en kT (caso b).

(AD)

RLO discreto: Caso c (= caso b + penalización del esfuerzo en $kT + \mathcal{T}$).

(AD)

RLO discreto: Caso d (= caso c con un aumento del período de muestreo a 12 seg.)

(AD) *****

RLO continuo: Caso I (reproducción de la fig. 54.

Referencia para la contrastación de resultados.

G_2 (p.u.MW)
 0,015
 0
 -0,0014

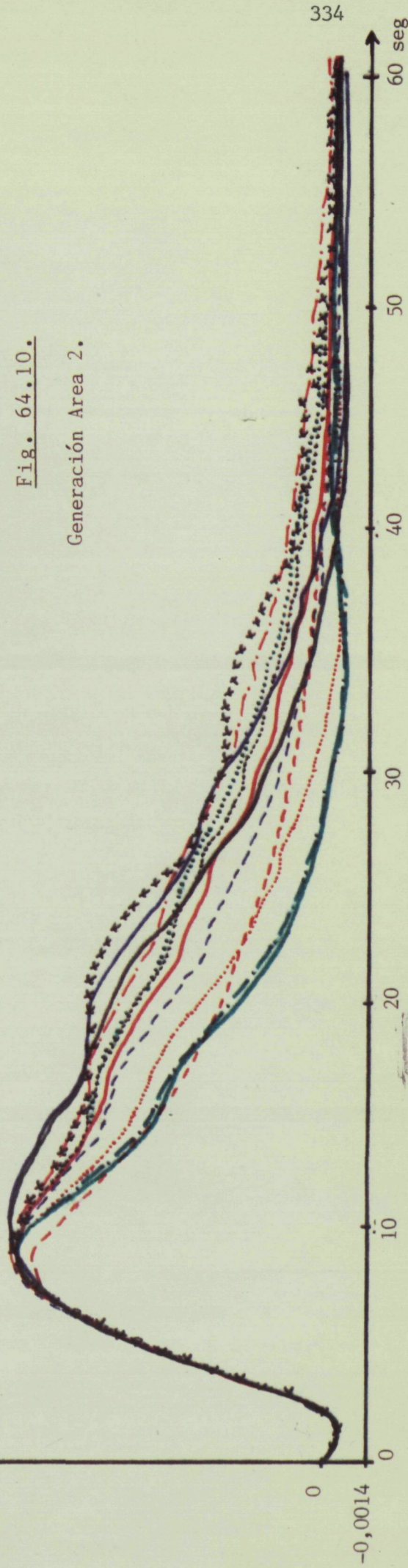


Fig. 64.10.
 Generación Area 2.

6.6.- CONCLUSIONES.

En el presente capítulo se han introducido en el diseño del RLO las características propias del funcionamiento discreto de las telemedidas y de los reguladores. En concreto se han estudiado los efectos del retardo entre la llegada de las telemedidas y el envío de órdenes a las unidades generadoras (retardo de cálculo) sobre la estabilidad del SEE y el diseño óptimo de los reguladores, estudiándose también las posibilidades del RLO discreto basado en una doble acción de control.

Para ello se ha reformulado al típico RLO discreto en que se supone que la acción de control simple no sufre retardos de interés respecto al muestreo de las telemedidas, desarrollándose una nueva formulación del RLO discreto capaz de optimizar el funcionamiento del sistema tanto cuando se ejerce una doble acción de control como cuando hay retardos de cálculo importantes (en consideración a la actual tendencia a hacer funcionar los programas de seguridad y economía en la misma escala de tiempo que la RPF). Esta nueva formulación se ha adecuado a los dos tipos de penalizaciones usadas en la Teoría del Control Digital: la penalización continua de las desviaciones de los estados y la de éstos sólo en los instantes concretos de muestreo.

Después de discretizar el modelo elaborado en el Capítulo 2 y de desarrollar unos programas para el cálculo de la nueva formulación del RLO, se ha podido comparar (por simulación) el RLO diseñado con la formulación aportada en esta Tesis con el RLO discreto clásico, llegándose a las conclusiones detalladas en la sección anterior, las cuales pueden resumirse en las siguientes:

1/ En primer lugar se ha mostrado la no validez del criterio integral en que sólo se penalizan los instantes concretos de muestreo, lo cual conduce al diseño de un RLO discreto sensiblemente peor que el RLO diseñado sobre un modelo continuo (peores índices de calidad para unas mismas matrices Q y R).

2/ En segundo lugar, se ha comprobado que la inclusión del retardo de cálculo en el modelo de diseño del RLO permite compensar sus efectos perjudiciales, obteniéndose un comportamiento similar al del mismo SEE si no existiera este tipo de retardo.

3/ De la comparación entre los índices de calidad del RLO discreto en cuyo diseño se ha considerado el retardo de cálculo con el RLO diseñado con el modelo continuo del Capítulo 2, se ha confirmado la necesidad de operar con modelos realistas que consideren el aspecto discreto de los reguladores para optimizar al SEE.

4/ Por último, el RLO de doble acción de control no ha mejorado los índices de calidad respecto al RLO de acción simple, pero ha mostrado una mayor robustez frente a alteraciones en el período de muestreo. Así, un aumento de dicho

período de 8 a 12 seg. ha modificado poco la calidad de control del SEE. Por otro lado, en situaciones extremas en que se pierda el sincronismo entre el muestreo de las telemidas y el establecimiento de la acción de control elaborándose la acción correspondiente al instante kT a partir de los valores muestreados en $(k-1)T$, el RLO de doble acción ha modificado poco su dinámica y sus índices de calidad cuando se ha escogido, para su diseño el criterio integral que penaliza de forma continua las desviaciones de las variables y el esfuerzo de control (generación) en los instantes kT , mientras que el RLO de acción simple ha llevado al SEE a una situación inestable frente a la misma pérdida de sincronismo.

7.- CONCLUSIONES.

En esta Tesis se han estudiado diversos aspectos relacionados con la implementación digital de la RPF basada en RLOs descentralizados, desarrollándose una nueva formulación para el diseño de éstos capaz de abarcar una gama de situaciones más amplia que el RLO discreto convencional. En particular, con esta formulación desarrollada se han podido incluir en el diseño los retardos en el cálculo de la acción de control (con lo que ha sido posible la compensación de los efectos perjudiciales de dichos retardos), así como se ha podido diseñar un RLO de doble acción de control capaz de mejorar la estabilidad del SEE cuando se producen asincronismos entre la recepción de las telemidas y el envío de órdenes a las unidades generadoras.

Para llegar a esta formulación se han ido superando una serie de etapas previas en las que se ha organizado la estructura y los parámetros del modelo del SEE, así como la estrategia de su control, referido en particular al problema de la RPF. Por otro lado, antes de abordarse el estudio del RLO digital se han evaluado determinados aspectos del RLO continuo que no habían sido profundizados en la bibliografía.

Los estudios de esta Tesis han sido enmarcados al caso de que sólo un área (o un conjunto de áreas con reducida capacidad de generación respecto al resto del SEE interconectado) se propongan la implementación del RLO, lo que obedece a un enfoque más realista, dadas las estrategias actualmente usadas para la RPF, que los restantes estudios en que se propone la aplicación de un RLO a todas las áreas del SEE.

En concreto, en el Capítulo 2, se ha elaborado un modelo cuyos valores paramétricos han sido adecuados, a partir de los valores obtenidos en diversos trabajos de identificación experimental y de una minuciosa recopilación bibliográfica, a las capacidades de generación de la zona catalana y del resto del sistema español y francés. Con todo ello se ha logrado obtener un modelo realista, con un margen de validez acotado a niveles normales de las perturbaciones. En este capítulo es de destacar también la recopilación realizada sobre los distintos modelos y valores paramétricos de los reguladores de velocidad (y, en especial, de los de centrales hidroeléctricas), fruto de unos trabajos realizados para una compañía eléctrica. En ella se han revisado los datos recopilados en 1973 por un grupo de trabajo del IEEE, ampliándose los trabajos experimentales considerados en su momento por dicho grupo, con lo cual se ha comprobado que, si bien el margen de valores prácticamente se mantiene, los valores típicos quedan alterados respecto a los del IEEE. Su interés es pues ampliable a futuros trabajos en que se precise un modelo detallado de las unidades generadoras.

Una vez elaborado el modelo, en el Capítulo 3 se han presentado los niveles de control de un SEE, poniéndose en evidencia la importancia del AGC y de las telecomunicaciones.

En el Capítulo 4 se ha presentado el resultado de un exhaustivo estudio bibliográfico sobre las estrategias de RPF, estructurándose conceptual e históricamente su evolución, trabajo que ha supuesto una ampliación de otros realizados en sentido similar. En particular se han establecido las diferentes etapas en que ha ido evolucionando la aplicación del RLO a la RPF, enfatizándose los problemas derivados de las telemedidas y del tiempo de cálculo precisado por los ordenadores de los centros de control y poniéndose en evidencia que el mayor problema para la aplicación del RLO a la RPF es la cantidad de telemedidas necesarias. A nivel teórico se ha solucionado en parte este problema con las estrategias de Control Descentralizado, aunque, por otro lado, puede afirmarse que la limitación que han venido suponiendo las telemedidas para la implementación del RLO es cada vez menos restrictiva dada la creciente dependencia a éstas de otras funciones de los centros de control.

Del análisis de los trabajos sobre el RLO de P/f, se han detectado tres aspectos aun no suficientemente resueltos, los cuales se han estudiado en el Capítulo 5. El primero era la importancia del modelo de la carga externa en el diseño del RLO, el segundo, la influencia de distintas y variadas penalizaciones de la matriz Q sobre la dinámica del SEE y el tercero, la posibilidad de reducir el esfuerzo de generación penalizando adecuadamente la realimentación transitoria de los reguladores de velocidad. El primer aspecto ha merecido especial atención en este Tesis, dado que el área objeto de diseño del RLO descentralizado era de menor capacidad que el resto del SEE.

Así pues, en este Capítulo 5 se ha abordado el estudio de estos tres aspectos del RLO descentralizado, llegándose a una serie de conclusiones: En primer lugar, de un estudio analítico comparativo entre la suboptimalidad de la estructura más comunmente utilizada para el diseño del RLO descentralizado y la de la estructura ampliada con un modelo de la carga externa, se ha concluido la poca importancia, incluso en el caso de que la capacidad del área externa sea elevada, de incluir dicho modelo en el diseño del RLO descentralizado, la cual ha sido confirmada por simulación. Con ello se han ampliado las conclusiones de Calović sobre la importancia del área externa en el diseño del RLO descentralizado.

Del estudio de las diferentes penalizaciones de las desviaciones de las variables del área se ha notado una baja sensibilidad del SEE a ellas, debiendo ser elevadas para que se noten sus efectos (consecuencia de la mayor capacidad del área externa). Por otro lado, si bien el comportamiento del SEE cuando se aplica el RLO sólo a un área reducida es mejor desde el punto de vista del transitorio que con los clásicos reguladores PI, disminuye el grado de bondad reflejado en otros trabajos sobre el RLO de P/f, lo que aporta un nuevo elemento

a la clásica controversia entre la relación calidad/coste de estos RLOs. En este Capítulo 5 se ha probado también la posibilidad de limitar el esfuerzo de generación penalizando las desviaciones de la realimentación transitoria de los reguladores de velocidad de las unidades generadoras.

Finalmente, en el Capítulo 6 se han estudiado las peculiaridades de diseño del RLO debidas al propio funcionamiento discreto de las telemedidas y los reguladores, estudiándose y compensándose el efecto del retardo entre la llegada de las telemedidas y el envío de órdenes a las unidades generadoras, tanto desde el punto de vista de la estabilidad del SEE como del diseño óptimo de los reguladores.

Para ello se ha reformulado al RLO discreto aportándose una nueva formulación de éste capaz de considerar en el diseño tanto los retardos de cálculo como la doble acción de control y adecuándola a dos tipos diferentes de penalización de las desviaciones de los estados del sistema.

Después de discretizar el modelo elaborado en el Capítulo 2 se ha comparado por simulación al nuevo RLO discreto formulado en esta Tesis con el RLO discreto clásico, con lo cual se ha mostrado la no validez del criterio integral discreto en que sólo se penalizan las desviaciones en los instantes concretos de muestreo comprobándose la necesidad de incluir el retardo de cálculo en el diseño del RLO. Además se ha comprobado también que esta inclusión del retardo de cálculo en el diseño permite compensar sus efectos perjudiciales tanto sobre la calidad del control como sobre la estabilidad del SEE. Por último, se ha mostrado una mayor robustez del RLO de doble acción frente a modificaciones en el período de muestreo y a pérdidas de sincronismo entre el muestreo de las telemedidas y el establecimiento de la acción de control que el RLO de acción simple.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Anderson, B.D.O. Moore, J.B. (1971). "Linear Optimal Control". Prentice-Hall, 1971.
- 2 Anderson, P.M. Fouad, A.A. (1977). "Power System Control and Stability". A Iowa University Press, 1977.
- 3 Araki, M. (1978). "Stability of Large-Scale Nonlinear Systems —Quadratic-Order Theory of Composite-System Method Using M-Matrices. IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-23, nº 2, Abril 1978, pp. 129-142.
- 4 Arriola, F.J. (1984). "Sistema de Control Centralizado en Empresas Eléctricas". II Symposium Nacional sobre Automática en la Industria. Noviembre 1984, pp. 3-17.
- 5 Aström, K.J. et al. (1977). "Theory and Application of Self-Tuning Regulators". Automática. vol. 13, 1977, pp. 457-476.
- 6 Bailey, J.M. Pierce, G.F. (1976). "Backlash and Rate Saturation Effects on Governor Performance at the Bull Run Steam Plant". IEEE Conference on Engineering in a Changing Economy. Clemson, South Carolina, 1976, pp. 10-12.
- 7 Barraud, A. (1974). "Sur la Resolution Numerique des Equations de Riccati". Revue R.A.I.R.O. J-3, Octubre 1974, pp. 75-91.
- 8 Bengiamin, N.N. Chan, W.C. (1978). "Multilevel Load-Frequency Control of Interconnected Power Systems". IEE PROCEEDINGS. vol. 125, nº 6, Junio 1978, pp. 521-526.
- 9 Bengiamin, N.N. Chan, W.C. (1982). "Variable Structure Control of Electric Power Generation". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-100, nº 2, Febrero 1982, pp. 376-380.
- 10 Bengtson, G. Lindahl, S. (1974). "A Design Scheme for Incomplete State or Output Feedback with Application to Boiler and Power System Control". Automática. vol. 10, 1974, pp. 15-30.
- 11 Bertrán, E. Herranz, J. Munilla, I. (1985). "Modelación y Estudio de Reguladores de Velocidad de Diferentes Tecnologías a partir de Resultados Experimentales". Aceptado para el VI Congreso de Informática y Automática (AEIA), nº 177, Octubre 1985.

- 12 Bertrán, E. Herranz, J. Munilla, I. (1984). "Estudio del Sistema de Regulación de Frecuencia en Centrales Hidroeléctricas a partir de Modelos Experimentales". II Symposium Nacional sobre Automática en la Industria. Noviembre 1984, pp. 99-106.
- 13 Bertrán, E. Herranz, J. Munilla, I. (1984). "Identificación Paramétrica de Reguladores de Velocidad". ENHER. 1984.
- 14 Binder, Z. et al. (1979). "Decentralized Control in Multi-Enterprise Power Pools". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 113-116.
- 15 Bohn, E.V. Miniesy, S.M. (1972). "Optimal Load-Frequency Sampled-Data Control with Randomly Varying System Disturbances". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-91, 1972, pp. 1916-1923.
- 16 Bose, A. Atiyah, I. (1980). "Regulation Error in Load Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-99, nº 2, Marzo/Abril 1980, pp. 650-657.
- 17 Bouzon, B. (1983). "Digital Control in Nuclear Power Plants". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 353-356.
- 18 Boykin, W.H. Frazier, B.D. (1975). "Multirate Sampled-Data Systems Analysis via Vector Operators". IEEE trans. on Automatic Control. Agosto 1975, pp. 548-551.
- 19 Brasca, C. et al. (1980). "Centralized versus Decentralized Damping of Low-Frequency Oscillations in a Large Power Systems". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 341-344.
- 20 Bryce, G.W. et al. (1977). "On-Site Investigation of Electrohydraulic Governors for Water Turbines". IEE PROCEEDINGS. vol. 124, nº 2, Febrero 1977, pp. 147-153.
- 21 Bühler, H. (1982). "Réglages échantillonnés". Presses Polytechniques Romandes, 1982.

- 22 Byars, C.L. (1983). "Distributed Energy Control System Installation Challenge". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, n^o 11, Noviembre 1983, pp. 3489-3495.
- 23 Cadzow, J. Martens, H. (1970). "Discrete-Time and Computer Control Systems". Prentice-Hall, 1970.
- 24 Calović, M.S. (1972). "An Applications of Optimal Linear Regulators with Prescribed Steady States". Int. J. Control. vol. 16, n^o 5, 1972, pp. 801-816.
- 25 Calović, M.S. (1972). "Linear Regulators Desing for Load-Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-91, 1972, pp. 2271-2285.
- 26 Calović, M.S. Cuk, N.M. Djorović, M. (1977). "Autonomous Area Generation Control of Interconnected Power Systems". IEE PROCEEDINGS. vol. 124, n^o 4 Abril, 1977, pp. 393-402.
- 27 Calvet, J.L. Titli, A. (1980). "Hierarchical Optimisation and Control of Large Scale Systems with Dinamical Interconnection System". IFAC Symp. on Large Scale Systems. Toulouse, Junio 1980, pp. 117-126.
- 28 Carpentier, J. (1973). "Optimal Power Flows". International Journal of Electric Power and Energy Systems. vol. 1, n^o 1, Abril 1973, pp. 3-15.
- 29 Carpentier, J.L. (1980). "Principe of a Segure and Economic Automatic Generation Control". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 463-471.
- 30 Carpentier, J.L. (1983). "Evolution of Digital Control in Energy Control Centers". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 315-324.
- 31 Carpentier, J.L. Cotto, G. (1983). "Modern Concepts for Security Control in Electric Power System". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-102-01.
- 32 Carpentier, J.L. Cotto, G. Niederlander, P.L. (1983). "New Concepts for Automatic Generation Control in Electric Power Systems Using Parametric Quadratic Programing". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 595-600.

- 33 Carrasco, D. Torres, G. Vazquez, A. (1983). "Transmission of Digital Information Via Satellite for the Real Time Control System of the 'Comisión Federal de Electricidad' Mexico". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 587-593.
- 34 Carter, J.Q. et alt. (1983). "Using a Unit Commitment Program to Coordinate Power Transactions with Internal Systems Generation". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, n° 11, Noviembre 1983, pp. 3502-3508.
- 35 Carvalho, V.F. (1983). "Power Plant Control". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia; 1983, Survey Paper D.
- 36 Cavin, R.K. Budge, M.C. Rasmussen, P. (1971). "An Optimal Linear Systems Approach to Load-Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-90, n° 6, 1971, pp. 2472-2482.
- 37 Cohn, N. (1966). "Control of Generation and Power flow on Interconnected Power System". John Wiley, 1966.
- 38 Cohn, N. (1982). "Decomposition of Time Deviation and Inadvertent Interchange on Interconnected Systems, Part I: Identification, Separation and Measurement of Components". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-101, n° 9, Mayo 1982, pp. 1144-1151.
- 39 Cohn, N. (1983). "Area Control Performance Measurement and Corrective Control in Interconnected System". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 325-333.
- 40 Cohn, N. (1983). "The Evolution of Real Time Control Applications to Power Systems". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 1-17.
- 41 Concordia, C. Ihara, S. (1982). "Load Representation in Power System Stability Studies". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol PAS-101, n° 4, 1982.
- 42 Chan, E.H. et alt. (1983). "A Coordinated Statewide Load Management and Scada System". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, n° 11, Noviembre 1983, pp. 3496-3501.

- 43 Chen, M.S. et al. (1982). "The Effects of Reduced Voltages on the Efficiency of Electric Loads". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-101, n° 7, 1982.
- 44 D'Azzo, J. Houpis, C. (1975). "Linear Control System Analysis and Design (Conventional and Modern)" Mc. Graw-Hill, 1975.
- 45 Davison, E.J. (1976). "The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear Time-Invariant Multivariable Systems". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-21, n° 1, Febrero 1976, pp. 25-34.
- 46 Davison, E.J. (1976). "The Robust Decentralized Control of a General Servomechanism Problem". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-21, n° 1, Febrero 1976, pp. 14-24.
- 47 Davison, E.J. (1978). "Decentralized Robust Control of Unknown Systems Using Tuning Regulators". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-23, n° 2, Abril 1978, pp. 276-289.
- 48 Davison, E.J. Tripathi, N.K. (1978). "The Optimal Decentralized Control of a Large Power System: Load and Frequency Control". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-23, n° 2, Abril 1978, pp. 312-325.
- 49 Davison, E.J. Tripathi, N.K. (1979). "Decentralized Tuning Regulators: An Application to Solve the Load and Frequency Control Problem for a Large Power System". Large Scale Systems. vol. 1, 1979, pp. 3-15.
- 50 De Keyser, R.M.C. Van Cauwenberghe A.R. (1980). "Self-Tuning Load-Following Control of a Nuclear Power Plant". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 227-234.
- 51 De Mello, F.P. Mills, R.J. B'ells, W.F. (1972). "Automatic Generation Control Part I - Process Modelling; Part II - Digital Control Techniques". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-91, 1972, pp. 710-724.
- 52 De Mello, F.P. Paulson, R.E. (1966). "Simulation of Plant Dynamics and Design of Plant Control Systems". Southeastern Electric Exchange Meeting. New Orleans, Abril 1966.

- 53 Departament de Sistemes de Control. Biblioteca de Programas del TI 990.
- 54 Dhaliwal, N.S. Wichert, H.E. (1978). "Analysis of P.I.D. Governors in Multi-machine System". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. Marzo/Abril 1978, pp. 456-463.
- 55 Dhar, R.N. (1982). "Computer Aided Power System Operation & Analysis". Mc. Graw-Hill, 1982.
- 56 Doraiswami, R.A. (1978). "A Nonlinear Load-Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-97, n^o 4, Julio/Agosto 1978, pp. 1278-1284.
- 57 Dorato, P. Levis, A.H. (1971). "Optimal Linear Regulators: The Discrete-Time Case". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-16, n^o 6, Diciembre 1971, pp. 613-620.
- 58 Dy Liacco, T.E. (1974). "Real-Time Computer Control of Power Systems". IEEE PROCEEDINGS. vol. 62, n^o 7, Julio 1974, pp. 884-891.
- 59 Dy Liacco, T.E. (1975). "System Control Center Design". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 196-232.
- 60 Dy Liacco, T.E. (1978). "System Security: The Computers Role". IEEE SPECTRUM. vol. 15, n^o 6, Junio 1978, pp. 43-50.
- 61 Dy Liacco, T.E. (1983). "The Impact of Control and Information Systems on the Security of the Power System". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, Keynote Address.
- 62 Edwin, K.W. Machate, R.D. (1980). "Influence of Inaccurate Input Data on the Optimal Short-Term Operation of Power Generation Systems". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 43-49.
- 63 Eggenberger, M.A. (1960). "A Simplified Analysis of the No Load Stability of Mechanical-Hydraulic Speed Control System for Steam Turbines". ASME Conference. Diciembre 1960. Ref. 60-WA-34.

- 64 Eilts, I.E. Schleif, F.R. (1977). "Governing Features and Performance of the First 600 MW Hydrogenerating Unit at Grand Coulee". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-96, n^o 2, Marzo/Abril 1977, pp. 457-466.
- 65 Elgerd, O.I. Fosha, Ch.E. (1970). "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-89, n^o 4, Abril 1970, pp. 556-563.
- 66 Elgerd, O.I. (1971). "Electric Energy Systems Theory: An Introduction". Mc. Graw-Hill, 1971. (2^a Edición en 1982).
- 67 Elgerd, O.I. (1981). "Control of Electric Power Systems". IEEE Control Syst. Soc. 1981, pp. 4-16.
- 68 ENHER. Estudio del Comportamiento de la Red con la Central Reversible de Moralets (Estudio interno). 1982.
- 69 Engström, G. (1980). "Electronics in Future Power Systems". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp.cix-cxxi.
- 70 Enriquez, G. (1982). "Análisis moderno de sistemas eléctricos de potencia". Limusa, 1982.
- 71 Equipo CONCE-EHNER. "CONCE: El Núcleo de un Sistema de Control de Redes Eléctricas". Mundo Electrónico. n^o 142 y 143, 1984.
- 72 Equipo TAC de ENHER. "Sistema de Telecontrol Integral para Redes Eléctricas. Una avanzada realización española". Mundo Electrónico. n^o 110, 1981.
- 73 Ewart, D.N. (1975). "Automatic Generation Control: Performance Under Normal Conditions". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 1-14.
- 74 Fink, L.H. Carlsen, K. (1978). "Operating under Stress and Strain". IEEE SPECTRUM. vol. 15, n^o 3, Marzo 1978, pp. 48-53.

- 75 Foord, T.R. (1978). "Steep Response of a Governed Hidrogenerator". IEE PROCEEDINGS. vol. 125, nº 11, Noviembre 1978, pp. 1247-1248.
- 76 Fosha, Ch.E. Elgerd, O.I. (1970). "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-89, nº 4, Abril 1979, pp. 563-577.
- 77 Friedlander, G.D. (1977). "Planning for a Brighter Future". IEEE SPECTRUM. vol. 14, nº 3, Marzo 1977, pp. 60-66.
- 78 Frowd, R.J. Podmore, R. Waldron, M. (1982). "Synthesis of Dynamic Load Models for Stability Studies". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-101, nº 1, 1982.
- 79 Galiana, F. Glavitsch, H. (1974). "State Adaptation in Power Systems Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-93, 1974, pp. 1670-1678.
- 80 Gaunt, C.T. Elphick, K. (1980). "Economic Control of Power Systems Using Microcomputers". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 71-77.
- 81 Generalitat de Catalunya (1981). "Llibre Blanc de l'energía a Catalunya". 1981.
- 82 Ghosh, A.M. (1979). "Automatic Generation Control in a Power System Using Microprocessor". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 172-178.
- 83 Glavitsch, H. Stoffel, J. (1980). "Automatic Generation Control". International Journal of Electric Power and Energy Systems. vol. 2, nº 1, 1980, pp. 21-28.
- 84 Glavitsch, H. (1980). "Control of Power Generation and System Control with the Emphasis on Modern Control Theory". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. xcvi-cvii.
- 85 Glover, J.D. Scheweppe, G.C. (1972). "Advanced Load Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-91, nº 5, Septiembre/Octubre 1972, pp. 2095-2103.

- 86 Goro Shirai. (1978). "Load Frequency Control Using a Governor and Voltage Controls Via a New Approach". IEEE PROCEEDINGS. vol. 66, n° 10, Octubre 1978, pp. 1293-1294.
- 87 Goro Shirai. (1983). "Load Frequency Sampled-Data Control with Unknown Deterministic Power Demand". IEEE PROCEEDINGS. vol. 71, n° 3, Marzo 1983, pp. 442-443.
- 88 Gritsenko, D. (1982). "The Use of Microprocessor Control in the Automatic Control System in High Capacity Generating Units". Teploenergitika. vol. 29, n° 10, 1982, pp. 534-535.
- 89 Hagra, A.N. Binder, Z. (1980). "Three Level Cooperative Decentralized Control for Interconnected Dynamic Systems". IFAC Symp. on Large Scale Systems. Toulouse, Junio 1989, pp. 149-156.
- 90 Handschin, E. Reissing, Th. (1983). "Theory and Practice of Load Modelling for Power System Dynamics". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-413-03.
- 91 Hanganut, M. Pusztaj, K. (1979). "Microprocessors in Hydroelectrical Power Unit Control". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 328-334.
- 92 Happ, H.H. (1975). "Optimal Power Dispatch". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 36-51.
- 93 Ha Ren-Mu, Germond, A. (1983). "Identification de Modeles de Charges en Fonction de la Tension et de la Fréquence". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-413-02.
- 94 Hiyama, T. (1982). "Design of Decentralised Load-Frequency Regulators for Interconnected Power Systems". IEEE PROCEEDINGS. vol. 129, n° 1, Enero 1982, pp. 17-23.
- 95 Hiyama, T. (1982). "Optimisation of Discrete-Type Load-Frequency Regulators Considering Generation-Rate Constraints". IEE PROCEEDINGS. vol. 129, n° 6, Noviembre 1982, pp. 285-289.

- 96 Hope, G.S. Malik, O.P. Farag, A.S.A. (1976). "Real Time Digital Governor for a Generating Unit: Analysis, Design and Test Results". IEEE PROCEEDINGS. vol. 123, n° 12, Diciembre 1976, pp. 1357-1359.
- 97 Hovey, L.M. (1962). "Optimum Adjustment of Hidro Governors on Manitoba Hydro System". AIEE transactions. Diciembre 1962, pp. 581-587.
- 98 Hutarew, G. (1963). "Tests on Turbine Governing System". Water Power. n° 15, 1963, pp. 157-248.
- 99 Huynh, H.T. Lefevre, J.P. (1982). "A Comparative Study of Linear and Non-linear Controls Applied to a Power System". IEEE PROCEEDINGS. vol. 70, n° 1, Enero 1982, pp. 93-95.
- 100 IEEE Committee Report. (1973). "Dynamic Models for Steam and Hidro-turbines in Power System Studies". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-92, 1973, pp. 1904-1915.
- 101 IEEE Committee Report. (1975). "Economy-Security Functions in Power System Operations a Summary Introduction". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-94, n° 5, Septiembre/Octubre 1975, pp. 1618-1623.
- 102 IEEE Committee Report. (1979). "Current Operating Problems Associated with Automatic Generation Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-98, Enero/Febrero 1979, pp. 88-96.
- 103 IEEE Power Generation Committee. (1977). "IEEE Recommended Practice for Preparation of Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended to Drive Electric Generators". IEEE Std. 125-1977.
- 104 IEEE Reliability Test System. (1979). IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-98, n° 6, Noviembre/Diciembre 1979, pp. 2047-2054.
- 105 IEEE Standard Definition of Terms for Automatic Generation Control on Electric Power Systems. (1970). IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-89, 1970, pp. 1358-1364.
- 106 Irving, E. (1979). "Improving Power Network Stability and Unit Stress with Adaptative Generator Control". Automática. vol. 15, 1979, pp. 31-46.

- 107 Irving, E. et al. (1980). "Adaptative Multivariable Control of a Power Plant Boiler". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 211-218.
- 108 Isermann, R. (1980). "Digital Control Methods for Power Station Plants based on Identified Process Models". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. xliii-lxiv.
- 109 Isermann, R. (1981). "Digital Control Systems". Springer Verlag, 1981.
- 110 Jasmin, G. (1983). "Electric Simulation of a Hydro-turbine with its Penstock, Speed Regulator and Damping Unit". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, n° 9, Septiembre 1983, pp. 3023-3029.
- 111 Kallina, G. Lausterer, G.K. (1980). "Adaptative Nonlinear Compensators for Power Plant Control". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 219-225.
- 112 Kanniah, J. et al. (1984). "Microprocessor-Based Adaptative Load-Frequency Control". IEEE PROCEEDINGS. vol. 131, n° 4, Julio 1984, pp. 121-128.
- 113 Katz, P. (1981). "Digital Control Using Microprocessor". Prentice-Hall, 1981.
- 114 Kirchmayer, L.K. (1958). "Economic Operation of Power Systems". John Wiley & Sons, 1958.
- 115 Knight, U.G. et al. (1974). "Computers in Power System Planning". IEEE PROCEEDINGS. vol. 62, n° 7, Julio 1974, pp. 872-883.
- 116 Kothari, M.L. Satsangi, P.S. Nanda, J. (1981). "Sampled-Data Automatic Generation Control of Interconnected Reheat Thermal Systems Considering Generation Rate Constraints". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol PAS-100, 1981, pp. 2334-2342.
- 117 Kowal, J. (1979). "Real-Time Control of the E.D.F. Power System. Structure of the Network of Interconnected Computers". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 109-114.
- 118 Krogh, B.H. Kokotovic, P.V. (1984). "Feedback Control of Overloaded Networks". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-29, n° 8, Agosto 1984, pp. 704-711.

- 119 Kumar, A. Malik, O.P. (1984). "Discrete Analysis of Load-Frequency Control Problem". IEEE PROCEEDINGS. vol. 131, n° 4, Julio 1984, pp. 144-145.
- 120 Kuo, B.C. (1980). "Digital Control Systems". Holt, Rinehart and Winston, 1980.
- 121 Kurz, H. Isermann, R. Schumann, R. (1980). "Experimental Comparison and Application of Various Parameter-Adaptative Control Algorithms". Automática. vol. 16, 1980.
- 122 Kusic, G. (1979). "Estructure and Sampled Data Aspects of AGC for Power Systems". IEEE Power Engineering Society. Summer Meeting. Vancouver, Canada, Julio 1979, R- A 79 510-9.
- 123 Kwatny, H.G. Kalnitsky, K.C. Bhatt, A. (1975). "An Optimal Tracking Approach to Load-Frequency Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-94, n° 5, Septiembre/Octubre 1975, pp. 1635-1643.
- 124 Lasley, E.L. Michel, A.N. (1976). "Input-Output Stability of Interconnected Systems". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-21, n° 1, Febrero 1976, pp. 84-89.
- 125 Mahmoud, M.S. (1977). "Multilevel Systems Control and Aplications: A Survey". IEEE trans. on Systems, Man, and Cybernetics. vol. SMC-7, n° 3, Marzo 1977, pp. 125-143.
- 126 Nelsa, J.L. (1970). "Computer Programs for Computational Assistance in the Study of Linear Control Theory". Mc. Graw-Hill, 1970.
- 127 Michel, A.N. Miller, R.K. (1977). "Qualitative Analysis of Large Scale Dynamical Systems". Academic Press, 1977.
- 128 Miller, R. (1983). "Power System Operation". Mc. Graw-Hill, 1983.
- 129 Miniesy, S.M. Bohn, E.V. (1972). "Optimum Load-Frequency Continuous Control with Unknown Deterministic Power Demand". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-91, n° 5, 1972, pp. 1910-1915.
- 130 Morgan, M.G. Talukdar, S.N. (1979). "Electric Power Load Management: Some Technical, Economic, Regulatory and Social Issues". IEEE PROCEEDINGS. vol. 67, n° 2, Febrero 1979, pp. 241-310.

- 131 Namba M. et al. (1981). "Development for Measurement of Operating Parameters of Synchronous Generator and Control Systems". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol PAS-100, nº 2, Febrero 1981, pp. 618-628.
- 132 Nanda, J. Kaul, B.L. (1978). "Automatic Generation Control of an Inter-connected Power System". IEE PROCEEDINGS. vol. 125, nº 5, Mayo 1978, pp. 385-390.
- 133 Neyrpic (1984). "Regulateur de Vitesse Electronique MINIPID-MICROPID". Febrero 1984.
- 134 Oldengurger, R. Donelson, J. (1962). "Dynamic Response of a Hydroelectric Plant". AIEE transactions. Octubre 1962, pp. 403-419.
- 135 Pai. (1981). "Power System Stability". North Holland, 1981.
- 136 Pantalone, D.K. Piegza, D.M. (1981). "Limit Cycle Analysis of Hidroelectric Systems". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-100, 1981, pp. 629-638.
- 137 Parmella, R. (1980). "Microprocessor-Based Equipment for Automatic Control in Power Generation and Distribution Systems". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 173-182.
- 138 Perez, A. (1984). "Tratamiento de la Seguridad de un Sistema de Energía Eléctrica en los Centros de Control". Regulación y Mando Automático. xviii, nº 137, Abril 1984, pp. 95-98.
- 139 Phi, D.T. Bourque, E.J. Thorne, D.H. Mill E.F. (1981). "Analysis and Application of the Stability Limits of a Hidro-Generating Unit". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-100, nº 7, Julio 1981, pp. 3203-3212.
- 140 Podmore, R. et al. (1979). "Automatic Generation Control of Jointly-Owned Generating Units". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-98, nº 1, Enero/Febrero 1979, pp. 207-218.
- 141 Poon, S.C.A. et al. (1980). "Decentralized and Centralized Automatic Generation Control- A Multi-Variable Servomechanism Approach". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. xxxiii-xlii.

- 142 Posner, J.F. Christie, R.D. Johnson, B.L. (1983). "A Comprehensive Generation Control and Dispatch System for an Electric Utility with Special Requirements". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, n° 11, Noviembre 1983, pp. 3619-3623.
- 143 Pun, M.L. (1955). "Régulation de Vitesse des Groupes Hydroélectriques. Analyse et Recherche d'une Constitution Optimum". Bull. Soc. Franç. des Electric. Octubre 1955, pp. 727-748.
- 144 Premakumaran, N. et alt. (1981). "Multilevel Load Frequency Control (A Perturbational Approach)". IEEE PROCEEDINGS. vol. 69, n° 6, Junio 1981, pp. 762-764.
- 145 Premakumaran, N. et alt. (1982). "Some Aspects of Multilevel Load-Frequency Control of a Power System". IEE PROCEEDINGS. vol. 129, n° 6, Noviembre 1982, pp. 290-294.
- 146 Quazza, G. (1966). "Non-interacting Control of Interconnected Electric Power Systems". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol PAS-85, 1966, pp. 727-741.
- 147 Quazza, G. (1977) "Large Scale Control Problems in Electric Power Systems". Automática. vol. 13, 1977, pp. 579-593.
- 148 Queiroz, J.F. (1980). "A Two-Stage Adaptive Estimator for Load Demand Prediction". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 381-387.
- 149 Ramamurthi, V. et alt. (1981). "Transient Performance and Control of Hydraulic Turbine-Generator Units". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-100, n° 1, Enero 1981, pp. 288-294.
- 150 Ramey, D.G. Skooglund, J.W. (1970). "Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-89, n° 1, Enero 1970, pp. 106-112.
- 151 Reddoch, T.W. Julich, P.M. Tan, T.O. Tacker, E.C. (1971). "Models and Performance Functionals for Load Frequency Control in Interconnected Power Systems". IEEE Conf. on Decision and Control. 1971.

- 152 Reddoch, T.W. (1975). "Load Frequency Control Performance with Reference to Advanced Control Theory". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 15-26.
- 153 Reddy, P.L. Rao, B.S. Indulkar, C.S. (1979). "Automatic Generation Control Through System Sub-division". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 152-159.
- 154 Ribbens-Pavella, M. Evans, F.J. (1985). "Direct Methods for Studying Dynamics of Large-Scale Electric Power Systems. A Survey ". Automática. vol. 21, nº 1, 1985, pp. 1-21.
- 155 Riera, J. Basañez, L. Ayza, J. (1983). "Load Frequency Control Modelling and Sensitivity Analysis of the Catalonian Power System". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-412-03.
- 156 Riera, J. Basañez, L. Xampeny, J. (1984). "Regulación Frecuencia-Potencia de Sistemas de Energía Eléctrica Interconectada". Regulación y Mando Automático. nº 137, Abril 1984, pp. 87-93.
- 157 Ross, C.W. (1966). "Error Adaptive Control Computer for Interconnected Power Systems". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-85, 1966, pp. 742-749.
- 158 Saly, S. Signer, K. Sullivan, A. (1980). "Power System Monitoring" IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 189-198.
- 159 Saminaden, V. Cabourin, F. (1979). "Effect of Real Time Computers on the Secure Operation of Power Systems". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 115-122.
- 160 Sandell, N.R. Varaiya, P. Athans, M. (1975). "A Survey on Decentralized Control Methods for Large Scale Systems". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 334-354.
- 161 Sandell, N.R. et al. (1978). "Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems". IEEE trans. on Automatic Control. Vol. AC-23, nº 2, Abril 1978, pp. 108-128.

- 162 Sankaranarayanan, V. et al. (1979). "Dynamic Equivalents for Excitation Controllers and Governor Turbine Systems". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 66-73.
- 163 Sasson, A.M. Merrill, H.M. (1974). "Some Applications of Optimization Techniques to Power Systems Problems". IEEE PROCEEDINGS. vol. 62, n° 7, Julio 1974, pp. 959-971.
- 164 Schackshaft, G. Symons, O.C. Hadwick, J.C. (1977). "General-Purpose Model of Power System Loads". IEEE PROCEEDINGS. vol. 124, n° 8, Agosto 1977, pp. 715-723.
- 165 Schlaepfer, F. Stewart, D. Jordan, J.A. (1975). "Data Bases in Power System Operations and Planning". Proc. of Systems Engineering for Power: Status and Prospects. Henniker (New Hampshire), Agosto 1975, pp. 311-333.
- 166 Scheidt, J.L. et al. (1984). "Problems Associated with the Operation of Jointly-Owned Generator". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-103, n° 7, Julio 1984, pp. 1569-1575.
- 167 Schellstede, G. Wagner, H. (1980). "Design Aspects of a Software Package for Automatic Generation Control with Instantaneous Economic Dispatch and Load Forecasting Functions". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 61-69.
- 168 Sekine, Y. Matsushima, T. (1983). "Digital Control Applied to Power System Protection". IFAC Symp. on Real Time Digital Control Applications. Guadalajara (Méjico), 1983, pp. 345-351.
- 169 Selga, J.M. Rivera, J. Xampeny, J. (1983). "Red TRAME de Conmutación de Paquetes". Teleinformática y Redes de Conmutadores. Marcombo, 1983.
- 170 Sèvely, Y. (1973). "Systèmes et Asservissements Linéaires Echantillonnés". Dunod, 1973.
- 171 Siljak, D.D. (1978). "Large Scale Dynamic Systems". North Holland, 1978.
- 172 Siljak, D.D. Sundareshan, M.K. (1976). "A Multilevel Optimization of Large-Scale Dynamic Systems". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-21, n° 1, Febrero 1976, pp. 79-84.

- 173 Simonnet, G. Dumont, A. (1979). "The Dedicated Real-Time Transmission Network between Regional and the National Control Centers of the E.D.F." IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 137-143.
- 174 Slatem, R.R. (1980). "Modern Trends in Power System Protection." IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. lxxxi-xcvi.
- 175 Slott, B. Alsac, O. Marinho, J.L. (1980). "The Optimal Power Flow Problem". SIAM Symp. on Mathematical Problems in E.P.S. Seattle, 1980, pp. 327-351.
- 176 Smith, J.R. Mc Lean, R. Robbie, J.R. (1983). "Assessment of Hydroturbine Models for Power Systems Studies". IEE PROCEEDINGS. vol. 130, n^o 1, Enero 1983, pp. 1-7.
- 177 Smith, D.C. (1980). "The Major Control and Protection Functions of the Telecommunication System Installed on The Cahora Bassa - Apollo Scheme". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 155-164.
- 178 Stoffel, J. Ebert, K. (1983). "Simulation of Automatic Generation Control Concepts". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-412-01.
- 179 Strejc, V. (1981). "State Space Theory of Discrete Linear Control". John Wiley & Sons, 1981.
- 180 Strinivasan, K. et alt. (1981). "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-100, n^o 8, Agosto 1981, pp. 3818-3827.
- 181 Sundareshan, M.K. (1977). "Generation of Multilevel Control and Estimation Schemes for Large-Scale Systems: A Perturbational Approach". IEEE trans. on Systems, Man, and Cybernetics. vol. SMC-7, n^o 3, Marzo 1977, pp. 144-152.
- 182 Takahashi, Y. Rabins, M. Auslander, D.M. (1979). "Control and Dynamic Systems". Addison-Wesley, 1970.
- 183 Tacker, E.C. et alt. (1972). "Optimal Control of Intrconnected Electric Energy Systems- A New Formulation". IEEE PROCEEDINGS. Octubre 1972, pp. 1239-1241.

- 184 Tan, J.S.C. (1979). "Decentralized Control of Large Scale Systems via Disturbance Localization". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 106-112.
- 185 Taylor, C.W. Lee, C.R. (1976). "Real-Time Power System Simulation for Automatic Generation Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-95, n° 1, Enero/Febrero 1976, pp. 375-384.
- 186 Taylor, C.W. Lee, K.Y. Dave, D.P. (1979). "Automatic Generation Control Analysis with Governor Deadband Effects". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-98, n° 6, Noviembre/Diciembre 1979, pp. 2030-2036.
- 187 Thoma, M. (1980). "Distributed Processing in Power System Operation". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 559-560.
- 188 Thorne, D.H. Hill, E.F. (1974). "Field Testing and Simulation of Hydraulic Turbine Governor Performance". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-93, Julio/Agosto 1974, pp. 1183-1191.
- 189 Thorne, D.H. Hill, E.F. (1975). "Extensions of Stability Boundaries of a Hydraulic Turbine Generating Unit". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-94, n° 4, Julio/Agosto 1975, pp. 1401-1409.
- 190 Tripathy, S.C. Saha, N. (1979). "A Comparative Study of the Effects of Governor Dead-Band Nonlinearity on Stability of Conventional and Dynamic Load-Frequency Controls". IFAC Symp. on Computer Applications in Large Scale Power Systems. Nueva Delhi, Agosto 1979, pp. 317-318.
- 191 Tripathy, S.C. Hope, G.S. Malik, O.P. (1982). "Optimisation of Load-Frequency Control Parameters for Power Systems with Reheat Steam Turbines and Governor Deadband Nonlinearity". IEE PROCEEDINGS. vol. 129, n° 1, Enero 1982, pp. 10-16.
- 192 Tripathy, S.C. et al. (1984). "Sampled Data Automatic Generation Control Analysis with Reheat Steam Turbines and Governor Dead-Band Effects". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-103, n° 5, Mayo 1984, pp. 1045-1052.

- 193 Vajtk, I. et alt. (1985). "Adaptive Load-Frequency Control of the Hungarian Power System". Automática. vol. 21, nº 2, 1985, pp. 129-137.
- 194 Van Cutsem, Horward, J.L. Ribbens-Pavella, M. (1980). "Application of a Two Level State Stimulation for Anomalous Data Analysis in Electric Power Systems". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 423-433.
- 195 Venikov, V.A. (1982). "Automatic Power System Control". MIR, 1982.
- 196 Venikov, V.A. Zhuavlev, V. Filippova, T. (1984). "Optimal Operation of Power Plants and Electric Systems". MIR, 1984.
- 197 Venkateswarlu, B.E. Mahalanabis, A.K. (1977). "Design of Decentralised Load-Frequency Regulators". IEEE PROCEEDINGS. vol. 124, nº 9, Septiembre 1977, pp. 817-820.
- 198 VEVEY. "Regulateurs de Turbines Hydrauliques". Bulletin Technique Vevey, 1968.
- 199 Vivier, L. "Turbines Hidrauliques et leur Regulation". Ed. Albin Michel, Paris, 1966.
- 200 Vockel, E. (1983). "On the Application of D.D.C. in Power Stations". MSR (Alemania). vol. 26, Septiembre 1983, pp. 508-512.
- 201 Walker, P.A. Abdalla, O.H. (1978). "Discrete Control of an A.C. Turbogenerator by Output Feedback". IEEE PROCEEDINGS. vol. 125, nº 9, Octubre 1978, pp. 1031-1038.
- 202 Walker, L.N. Harbourt, C.O. (1983). "Analysis of Electric Power Systems". IEEE POTENTIALS. Invierno 1983, pp. 19-22.
- 203 Walker, L.N. (1983). "Flying an Electric Power System". IEEE POTENTIALS. Invierno 1983, pp. 9-15.
- 204 Walsh, P.M. Cruz, J.B. (1979). "An Example of the Impact of Information Structure on Decentralized Multicriterion Control Problems". IEEE trans. on Automatic Control. vol. AC-24, nº 6, Diciembre 1979, pp. 978-980.

- 205 Weiss, J. (1974). "Digital Load Frequency Control in a Multiarea Power Systems". IFAC-IFIP Conference. Zurich, Febrero 1974, pp. 394-405.
- 206 Welfonder, E. et alt. (1980). "Control Behaviour of Electrical Power Stations and Loads Operating in Interconnection". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. 409-415.
- 207 "Wellcoming address, Reply to wellcoming address, Opening address and Closing address". IFAC Symp. on Power Generation, Distribution and Protection. Pretoria, Septiembre 1980, pp. xvii-xxxi.
- 208 Wood, A.J. Wollenberg, B.F. (1984). "Power Generation, Operation and Control". John Wiley & Sons, 1984.
- 209 Woodward, J.L. (1968). "Hidroturbine Transfer Functions for use in Governing Studies". IEE PROCEEDINGS". vol. 115, nº 3, 1968, pp. 424-426.
- 210 Xampeny, J. Roselló, F. (1984). "Requerimientos de Control en los Sistemas de Energía Eléctrica. El Sistema de Telecontrol Integral: Una Respuesta Futuro". Regulación y Mando Automático. XVIII, nº 137, Abril 1984, pp. 101-106.
- 211 Yu, Y.N. et alt. (1979). "Estimation of Unknown Large Power System Dynamics". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-98, 1979, pp. 279-289.
- 212 Zaborszky, J. Mukai, H. (1983). "Automatic Generation Control with Load Managements, Jointly Owned and Cogeneration Utilizing up to date Digital Methodologies". CIGRE-IFAC Symposium. Florencia, 1983, R-412-02.
- 213 Zaborszky, J. Prasad, K. Whang, K. (1980). "Operation of the Large Inter-connected Power System by Decision and Control". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-99, nº 1, Enero/Febrero 1980, pp. 37-45.

- 214 Mesarovic, M. (1970). "Theory of Hierarchical Multi-level Systems". Academic Press, 1970.
- 215 Nanda, J. Kothari, M.L. Satsangi, P.S. (1983). "Automatic Generation Control of an Interconnected Hidrothermal System in Continous and Discrete Modes Considering Generation Rate Constraints". IEE PROCEEDINGS. vol. 130, nº 1, Enero 1983, pp. 17-27.
- 216 Singh, M.G. (1981). "Decentralized Control". North-Holland, 1981.
- 217 Singh, M.G. Titli, A. (1979). "Handbook of Large Scale Systems Engineering Applications". North-Holland, 1979.

Reg 8203

U. P. C. T. S. I. TELECOMUNICACION
BIBLIOTECA

AUTOR BERTSAND ALBERTO, E.

TITULO APORTACION AL CONTROL DIGITAL
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELECTRICA

6815 (043)

TR

V-I

EDITADO

1-8263

