

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

### 3.3.4.- Detalles de funcionamiento del AGC.

Como se ha expuesto en el Apartado 3.2 de este capítulo, en el lazo de RPF de un área se comparan la frecuencia ( $f_1$ ) y el intercambio de potencia ( $P_1$ ) con los valores programados  $f_0$  y  $P_0$  a fin de conocer y anular al error de control (ACE). Esta anulación del ACE se efectúa considerando aspectos económicos y de seguridad, para lo cual se requiere el conocimiento de diversos estados del sistema. Dada la extensión geográfica de un SEE, el sistema de control necesitará un medio de transmisión (en el Apartado 3.4 se incluyen algunas posibilidades al respecto) para conocer el estado del sistema y supervisar su correcto funcionamiento enviando las órdenes oportunas a las unidades. Los sistemas físicos que realizan este conjunto de funciones reciben el nombre genérico de SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [128,42,22].

La supervisión del funcionamiento del SEE supone dos niveles de control. Por un lado, y como su nombre indica, se efectúa un proceso de inspección y de monitorización del sistema. Por otro lado, en los instantes de muestreo  $nT$  ( $n = 0,1,2,\dots$ ), normalmente comprendidos entre los 2 y los 10 segundos según la cantidad de telemidas [30], los centros de control calculan y acumulan el ACE, procesando la estrategia que determina la generación adicional ( $Y$ ) necesaria para su anulación.

La estrategia de control actualmente más utilizada en Europa está basada en el siguiente algoritmo PI (en el Capítulo 4 entraremos en mayor detalle sobre las estrategias de control) [83,205]:

$$Y_k = C_p \cdot ACE_k + C_i \cdot \sum_{j=1}^k ACE_j + Y_0 \quad [33.1]$$

siendo:

$Y_k$  = salida del regulador central (consigna de generación a las unidades) en el instante de muestreo  $k$ .

$ACE_j$  = valor del ACE en el instante  $j$ .

$Y_0$  = generación básica del sistema.

$C_p, C_i$  = constantes del regulador. Normalmente:

$$0,1 < C_p < 0,3 \quad \text{y} \quad 0,01 < C_i < 0,03.$$

La potencia generada total  $Y_k$  se distribuye entre las  $n$  unidades en regulación del sistema según la siguiente expresión:

$$P_{si} = P_{bi} + \gamma_i \left( Y_k - \sum_{i=1}^n P_{bi} \right), \quad [33.2]$$

siendo:

$P_{si}$  = consigna de generación a la unidad  $i$ .

$P_{bi}$  = generación base de la unidad  $i$ .

$\gamma_i$  = factor de participación (fijado por el ED).

y,

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1.$$

Los valores de  $P_{si}$  no deben rebasar los límites máximo y mínimo de generación de la unidad. Por otro lado existe también la limitación dinámica de velocidad de respuesta de las diferentes unidades, la cual puede subsanarse, principalmente, de dos formas:

a) Las unidades rápidas generan, de entrada, tanto la potencia asignada a ellas como la asignada a las lentas, recuperando sus valores de generación propios a medida que las unidades lentas vayan alcanzando los niveles requeridos. El problema radica en que se pueden forzar grados de generación elevados en las unidades rápidas pero, en contrapartida, se consigue ajustar rápidamente la generación a la demanda.

b) Cada unidad genera según su factor de participación con lo que se evita el sobreesfuerzo de generación de las unidades rápidas; el precio está en una discrepancia temporal entre la generación y la demanda.

Una solución intermedia (adoptada por FECSA) consiste en incluir en [33.2] la constante de tiempo dominante ( $\tau_i$ ) de cada central:

$$P_{si} = P_{bi} + \rho_i \left( Y_k - \sum_{i=1}^n P_{bi} \right) \quad [33.3]$$

$$\rho_i = K_1 \gamma_i + K_2 \tau_i$$

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1.$$

Los factores de participación  $\rho_i$  (ó  $\gamma_i$ ) son fijados por el ED, considerando la minimización de los costes y el reparto óptimo (seguro y eficaz) de cargas. Si el factor de participación  $\rho_i$  es pequeño, la generación de la unidad  $i$  sigue prácticamente al programa del despacho económico (valor de base  $P_{bi}$ ). Según la forma de imbricación de las consignas del ED con la RPF, hay dos modos básicos de AGC, denominados "modo obligatorio" si los requisitos del ED se aplican siempre a la RPF o "modo permitido" si la RPF sólo considera a las consignas del ED en aquellos casos en que no haya conflicto con sus propios requisitos. La situación típica [30] es que el AGC sea del tipo obligatorio si el valor del módulo del ACE permanece por debajo de un determinado valor, y permitido en caso contrario.

Los principales problemas prácticos [30,32] para relacionar el ED con la RPF derivan de la organización jerárquica de los programas del AGC, con tiempos de cálculos típicos de 5 min. para el ED y de unos 5 seg. para la RPF. Este funcionamiento asíncrono puede generar requisitos contradictorios entre las necesidades físicas del sistema y las económicas, los cuales pueden inducir oscilaciones en las unidades generadoras, tanto en modo obligatorio como en modo permitido.

Otro problema radica en que normalmente las consideraciones de seguridad requieren cálculos con una duración del orden de minutos, por lo que la RPF actúa de una forma "ciega" desde el punto de vista de la seguridad durante la mayoría de los instantes de muestreo, pudiéndose llegar a la sobrecarga de algunas líneas.



### 3.4.- LAS TELECOMUNICACIONES.

#### 3.4.1.- Generalidades.

Para poder llevar a cabo los procesos de supervisión, monitorización y control de un SEE es necesario disponer, como en todo gran sistema de transporte y distribución, de un amplio equipo distribuido de instrumentación, de sistemas digitales de alta velocidad conectados al ordenador central para la adquisición de datos y, obviamente, de un medio de transmisión de la información. La configuración de un sistema tipo SCADA puede ser múltiple [ 128, 117 ] , según la estructura de conexión de la unidad central de control (maestra) a las remotas (véase fig. 34.1). Dada la importancia de las telecomunicaciones en el funcionamiento de un SEE es conveniente disponer de caminos redundantes (estructuras en anillo) para garantizar su establecimiento si se corta algún camino.

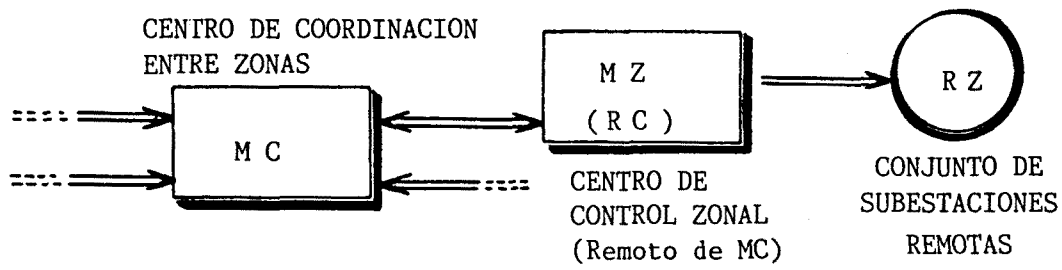
Según la estructura de la red de comunicaciones, los centros de control pueden transmitir desde una sola consigna para todas las unidades acopladas a una misma rama con un protocolo que identifique a su destinatario (esquemas c y d de la fig. 34.1) hasta una consigna particularizada para cada canal (esquemas a y b). Los esquemas c y d minimizan el tiempo requerido por el AGC para asignar las generaciones, ya que éste puede mandar una única consigna de generación total que cada miembro de la red interpreta según unos valores de participación pre-programados (que a su vez pueden ser modificados cuando convenga por telemando).

La ocupación del canal depende de las señales concretas que se estén transmitiendo. Intervalos de muestreo típicos son: 5 seg. para medidas de seguridad y para protecciones, entre 2 y 20 seg. para las telemedidas de estado (en el caso de Iberduero 4 seg. para la potencia generada y 2 seg. para las interconexiones; en el caso de Enher 3 seg. para el estado de los conmutadores de la red y el intercambio instantáneo de potencia) y entre 5 y 60 seg. para medidas de intercambio energético y consignas de los programas de alto nivel. Dado que tanto los centros de control como los subsistemas terminales están basados en computadores, las técnicas más normales de transmisión son las digitales, y concretamente la conmutación de paquetes, con los consiguientes beneficios en la calidad de la transmisión. Según el CCITT la velocidad de transmisión en bits/seg. debe estar comprendida entre 0,4 y 0,75 veces el ancho de banda del canal [ 195, 69, 173 ].

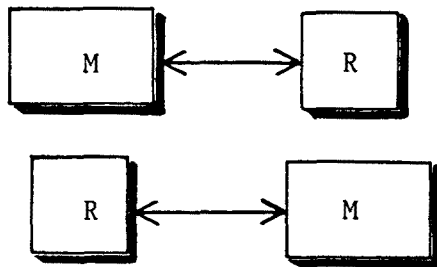
Los subsistemas terminales han ido evolucionando desde los terminales remotos (RTU en inglés) convencionales a sistemas de telecontrol integral [ 210, 71, 72 ] , cuyos objetivos son:

- a) Atender de forma unificada (integrada) a todas las funciones de explotación del SEE.

Fig. 34.1. - Esquemas básicos de conexión de un sistema tipo SCADA.



(a)

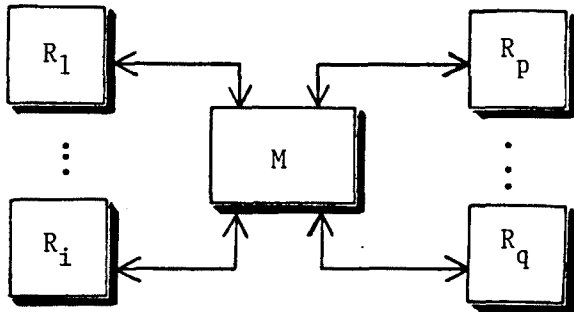


CONEXION "UNO A UNO"

M = MC ó MZ

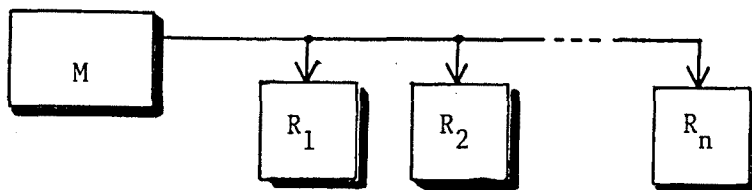
R = RC ó RZ

(b)



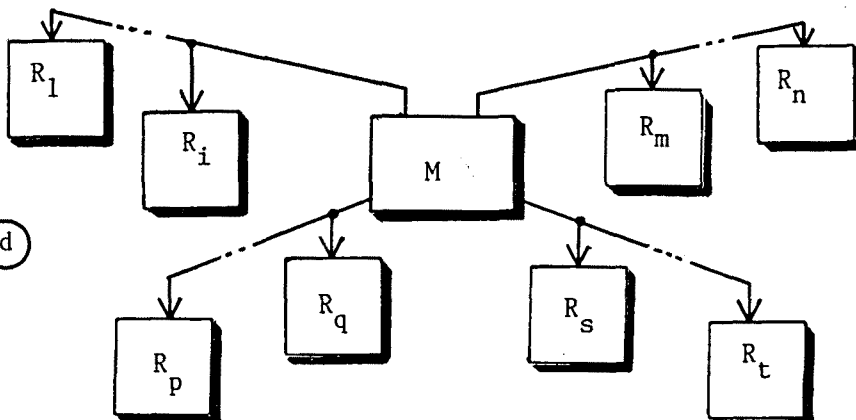
CONEXION EN ESTRELLA

(c)



CONEXION EN UNIBUS

(d)



CONEXION COMBINADA ESTRELLA - UNIBUS

- b) Lograr una gestión integrada de la información relativa a la explotación del sistema y facilitar el uso distribuido de la misma.
- c) Facilitar la actualización de la tecnología necesaria para la explotación del sistema.

Un ejemplo de sistema de telecontrol integral es la red TRAME de ENHER, con 29 nudos (conjuntos multi -  $\mu$ P) en servicio y con más de 170 terminales conectados. Esta red es mallada, de forma que cualquier terminal conectado a ella puede comunicarse con cualquier otro si el software residente en ambos terminales lo permite. Una característica de este sistema es su alta fiabilidad, funcionando todos los nudos autónomamente [210].

#### 3.4.2.- Medios de transmisión [130,4,128,195]

Las tecnologías usadas como soporte de las telecomunicaciones pueden dividirse en tres grandes grupos:

##### A/ Comunicación a través de las líneas de transporte de energía (red de corrientes portadoras).

En este caso se utiliza como canal de comunicación a los cables conductores de las líneas de transporte y distribución. Si bien este tipo de comunicaciones tiene la ventaja de aprovechar una infraestructura ya existente, adolece de tres principales defectos:

- Las transmisiones son de tipo monocal.
- Su fiabilidad es baja (dependen del estado de la red) y son altamente sensibles a los ruidos producidos por el propio sistema de transporte y por fenómenos externos (tormentas, etc.).
- Exigen equipo electrónico adicional sobre la propia red eléctrica.

Para facilitar la transmisión se han venido usando, históricamente, dos tipos de modulaciones (para un mayor detalle puede consultarse [130] y [195] :

##### 1.- Modulación en cuadratura de la señal de 50 Hz.

La señal a transmitir desde las estaciones maestras a las remotas se modula desplazando los pasos por cero de la señal de 50 Hz. Esto se consigue inyectando una señal de tensión, con una amplitud del orden del 1% de la tensión de una fase y a la frecuencia de 50 Hz, desfasada  $\pm 90^\circ$  en el transformador de acoplo del emisor a la red eléctrica. La inyección de una señal adelantada  $90^\circ$  avanza el paso por cero, con lo que el receptor (basado en un contador de alta frecuencia) interpreta un "1". La inyección en  $-90^\circ$  retarda los pasos por cero, interpretándose en este caso un "0" en la recepción.

La comunicación en sentido inverso (de las estaciones remotas a las maestras) se establece mediante pulsos de corriente, los cuales

están siempre en fase con la señal de tensión. El número y tipo de pulsos transmitidos determina la diferencia entre un "1" y un "0".

## 2.- Sistemas con portadora.

Los primeros sistemas de comunicación con portadora (denominados originalmente de control por rizado) usaban pulsos de banda estrecha (1 - 20 Hz), modulados con portadoras comprendidas entre los 100 Hz y 1 KHz. Dado que la frecuencia de operación no es muy distante de los 50 Hz de la red, se conseguían buenas características de propagación.

Estos sistemas de comunicación tenían dos principales limitaciones: En primer lugar el BW reducido de los pulsos suponía una baja velocidad de transmisión, insuficiente para sistemas de control complejos. En segundo lugar se requerían niveles elevados de energía para establecer una comunicación efectiva.

Con el uso de frecuencias de portadora más elevadas (del orden de 5 a 300 KHz, según las posibilidades de la red) se redujeron las limitaciones anteriores, aunque los problemas de ruido seguían siendo importantes.

## B/ Comunicación a través de líneas de transmisión de datos.

### 1.- Sistemas telefónicos.

Son la técnica más antigua para coordinar el funcionamiento de un SEE (en sus inicios los operadores de las centrales ajustaban la generación según las consignas telefónicas de los centros de control). Normalmente se usan cables de cuadretes.

El problema del uso de líneas telefónicas radica en su elevado coste de explotación. Además, precisan de elementos aisladores para evitar las sobretensiones peligrosas de las subestaciones.

### 2.- Cables coaxiales.

Sus principales ventajas respecto a los cables de cuadretes son el mayor ancho de banda y la mayor inmunidad a interferencias externas. Pero, al igual que estos, suponen un coste elevado de explotación y la presencia de aisladores cuando se usa el mismo tendido que las líneas de transporte de energía para su soporte.

### 3.- Fibras ópticas.

De reciente incorporación, aún no se dispone de unos datos fiables respecto al coste real de explotación, aunque su bajo peso y volumen facilitan la instalación al poderse aprovechar cualquier infraestructura sólida ya existente. Para los SEE tienen la gran ventaja

de su aislamiento galvánico e insensibilidad a perturbaciones eléctricas y magnéticas (precisamente las compañías eléctricas las están incorporando en largas distancias para evitar los problemas de las telecomunicaciones cuando hay tormentas). Otra característica de interés, especialmente para aplicaciones a nivel de subestaciones ó de grupos zonales de centrales que requieran gran cantidad de información es su gran ancho de banda. Además, al no ser conductores eléctricos, no requieren la instalación de complejos elementos de seguridad

#### C/ Radiación E/M.

Sus principales ventajas son el ancho de banda y la independencia del estado de la red eléctrica y de su tendido. Tradicionalmente se han venido usando emisiones de FM en la banda de VHF para la actuación y teledirigida de interruptores y para la comunicación en las centrales. Desde hace pocos años se han desarrollado en varias compañías sistemas de microondas, con lo que se ha aumentado la potencialidad del sistema de telecomunicaciones. Así, en el caso de Iberduero, es típica la presencia de 300 canales para los enlaces principales y de 120 para las derivaciones [4].

En sistemas de reciente desarrollo, con poca infraestructura en amplias zonas geográficas, se están utilizando los satélites para el establecimiento de las comunicaciones (como es el caso de Méjico) [33].

### 3.5.- SITUACION ESPAÑOLA

Coincidiendo con la entrada de los primeros controladores informatizados (sobre 1970, según las empresas) las compañías establecieron, además de las funciones de supervisión de las subestaciones, un control automático de la generación [ 4 ]. Posteriormente incluyeron en los ordenadores funciones de optimización de la producción y de análisis de seguridad. Los sistemas tipo SCADA vienen instalándose desde hace más de 10 años, disponiendo todas las compañías de uno en mayor o menor grado de desarrollo.

La estrategia de control normalmente utilizada es la descrita por las expresiones [33.1] y [33.2] del apartado anterior, con ligeras modificaciones en alguna compañía (como es el caso de la expresión [33.3]).

Hasta febrero de 1983 [156], cada empresa eléctrica se encargaba de la regulación de su propio mercado, siendo Iberduero la responsable de la regulación del conjunto del Sistema Peninsular frente al resto de Europa. El control del cumplimiento de los compromisos se efectuaba con contadores del transvase de energía instalados en los puntos frontera entre empresas, y efectuándose un balance cada hora. Otros aspectos que debían pagar las compañías eran su error de control (ACE) y su falta de disponibilidad de reserva rodante para atender a los compromisos con el resto de Europa (y concretamente con Francia). Dado que el ACE tenía definidas tres bandas con diferentes tarifas, siendo la inferior (alrededor del cero) una banda de error no penalizada económicamente, una de las prácticas habituales, era ajustar los reguladores de forma que trabajaran con el máximo ACE permitido sin necesidad de cotización.

Con el aumento de la potencia y la complejidad del sistema español y dado que la mayoría de empresas ya habían adoptado el uso del ordenador para el control de su proceso, se consideró necesario cambiar el sistema de RPF español, creándose la Regulación Compartida Peninsular (RCP), que incluye a Portugal. La RCP introduce, respecto al sistema anterior las siguientes variaciones básicas:

- 1/ Cada empresa, además de seguir regulando su mercado, participa en la regulación del conjunto en un porcentaje proporcional a su capacidad.
- 2/ El seguimiento de cada empresa se realiza continuamente, por lo que pasa a ser de potencia en lugar de energía.

El centro de control de la RCP es del de Iberduero, aunque se está creando otro (CECOEL) con participación de todas las compañías. Los objetivos de la RCP [156, 4] son:

- a) Distribuir entre todas las compañías españolas el esfuerzo derivado de compensar los desvíos con Francia.
- b) Repartir los desequilibrios energéticos entre las diferentes Zonas de Regulación.
- c) Utilizar la reserva rodante, evaluada en 1000 MW (en previsión de la pérdida de una central nuclear) para toda la RCP, de todos los participantes durante los desequilibrios temporales.

El centro de control, además de transmitir las ordenes de participación, vigila la respuesta de las diferentes zonas a las solicitudes del regulador central, obteniendo un registro de incumplimientos que deberá contrastarse con los datos almacenados en los ordenadores de cada compañía (y cuya pérdida supone una penalización) a fin de establecer las correspondientes compensaciones económicas.

Actualmente existen siete zonas de regulación, cada una de las cuales tiene una empresa cabecera de Zona cuya función es la de recibir órdenes del centro de control, interpretarlas y repartirlas entre los miembros de la Zona. Portugal no participa en la regulación, por lo que las restantes compañías deben compensar sus incumplimientos.

Dentro de la RCP cada Zona puede presentar cuatro estados [156] :

Activo: correspondiente a su comportamiento correcto.

Inactivo: cuando no puede efectuarse el seguimiento de la Zona por estar defectuosos los sistemas de telecomunicación.

Emergencia: si las telecomunicaciones son correctas pero la Zona no puede responder a los requerimientos del centro de control.

Desconectado: cuando no participa en la RCP.

Asimismo, hay cuatro modos de actuación de la RCP asociados a los estados de cada Zona:

Normal: cuando cada Zona cumple con sus obligaciones y el centro de control reparte el error remanente que pueda haber en los intercambios con Francia.

Compartido: cuando el incumplimiento se produce en alguna Zona desconectada o inactiva.

Emergencia: cuando alguna Zona está en estado de emergencia.

Nulo: cuando no puede determinarse con seguridad el modo de funcionamiento como alguno de los anteriores.

### 3.6.- CONCLUSIONES

En el presente capítulo se han presentado los diversos niveles de control de un SEE, destacándose los relacionados con el AGC. En particular se han expuesto los distintos lazos de la RPF, así como un detalle de las tareas y del funcionamiento de los centros de control. Asimismo se han expuesto los sistemas básicos de telecomunicaciones empleados en los procesos de telemedida y telemando, y se ha hecho un repaso a la situación española.

Con ello quedan definidos los problemas del AGC y, dentro de él, el de la RPF, objeto de estudio en los siguientes capítulos de esta Tesis.



#### 4.- EVOLUCION DE LAS ESTRATEGIAS DE REGULACION POTENCIA-FRECUENCIA.

##### 4.1.- INTRODUCCION.

En el presente capítulo se expone la evolución de las distintas estrategias y algoritmos de la RPF, presentándose de forma estructurada, conceptual e históricamente, desde las primeras técnicas de regulación de los SEE hasta la más actuales que, en general, no han implicado el abandono de las anteriores. Prueba de ello es la regulación del ACE, concebida sobre la década de los 40 y aún ampliamente usada en la actualidad.

La diversidad de estrategias existentes ha sido consecuencia de la importancia capital de los SEE, la cual ha motivado un gran esfuerzo investigador para asegurar la calidad y continuidad de su servicio. Aunque las estrategias actualmente usadas por las distintas compañías se limitan, prácticamente, a las convencionales, dada su mayor experimentación, el aumento de la probabilidad de emergencias en los SEE [207, 35] ha venido estimulando el desarrollo de estrategias más avanzadas (y, en contrapartida, menos probadas).

Si bien existen aspectos que justifican la actualización de las estrategias de control (como es el caso de reducir la probabilidad de "ceros" en la red), la mayoría de criterios dependen de las particularidades de las distintas zonas geográficas así como de aspectos coyunturales: si en un área los errores de control (ACE) son poco penalizados o tienen zonas de insensibilidad permitidas, la situación óptima será el uso de estrategias clásicas (fiables) que sólo consideren un número muy limitado de las variables del área. Pero en áreas en que se penalicen más las desviaciones respecto a los valores programados será más económico la implantación de reguladores que minimicen el error de control. Una situación híbrida se produce cuando un área que tolera acusados umbrales de error está conectada a otra que trabaja con ajustes más finos; en este caso los reguladores clásicos pueden ser suficientes para las necesidades internas del área, pero limitados para mantener una cierta calidad de energía en las interconexiones con el área externa, obligándola a una desconexión más frecuente.

En el presente capítulo se presentan, en primer lugar, los enfoques convencionales de la RPF, abarcándose desde los primeros esquemas de control (cuando las interconexiones entre compañías eran escasas) hasta el TLBC [37], el cual ha constituido la estrategia básica a partir de la cual se han ido implementando los actuales sistemas de RPF.

Los enfoques modernos, presentados en segundo lugar, complementan a los convencionales al buscar la minimización del transitorio. Después de presentar

los métodos basados en técnicas de optimización paramétrica, se exponen los basados en la Teoría del RLO, detallándose los logros alcanzados desde los primeros estudios de la aplicación del RLO a la RPF hasta la concepción de los RLOs descentralizados (de área autónoma).

En tercer lugar se revisan los estudios de RPF en los cuales se han considerado las peculiaridades del funcionamiento dinámico del SEE derivadas del aspecto discreto (digital) de las telemidas y de los ordenadores usados para soportar los algoritmos de RPF.

El carácter alineal y variable con el tiempo de los SEE, así como la consiguiente dificultad para su modelado, ha conllevado el estudio y la aplicación de otras estrategias complementarias de RPF, las cuales se exponen al final de este Capítulo.

#### 4.2.- ENFOQUES CONVENCIONALES.

##### 4.2.1.- Primeros métodos de control (Reguladores de Watt) [40].

A principios de siglo la regulación se efectuaba a nivel de unidad generadora, mediante reguladores de Watt, siguiendo una ley de control proporcional que relacionaba la generación de las centrales con la frecuencia de la red (regulación primaria), intentando mantener a ésta dentro de ciertos límites.

Dada la característica proporcional de estos reguladores, quedaba un error remanente de frecuencia en estado estacionario, de valor proporcional al nivel de las perturbaciones. Sin embargo, dado que las zonas eran pequeñas y que el compromiso entre generación y demanda era prácticamente invariante, este nivel de regulación era suficiente durante la mayor parte del tiempo. Si, por algún motivo, se rebasaban los límites de la desviación de frecuencia, se realizaba una acción manual (génesis de la acción integral de la regulación secundaria) que modificaba los puntos de consigna de los reguladores.

Las telemidas eran escasas y, en todo caso, se efectuaban por vía telefónica con captadores rudimentarios, normalmente de tipo potenciométrico.

##### 4.2.2.- Interconexiones (Evolución hasta el TLBC).

Durante la década de los 30 se fueron desarrollando las primeras interconexiones entre compañías. Asimismo se empezó a automatizar la regulación secundaria, usándose relojes para sincronizar la frecuencia y relés para regular el error acumulado en el tiempo [40].

La regulación de las interconexiones no estaba normalizada, existiendo dos estrategias básicas muy simples que eran el control a frecuencia constante (fig. 42.1 (a)) y a potencia constante (fig. 42.1 (b)), según el grado de coope-

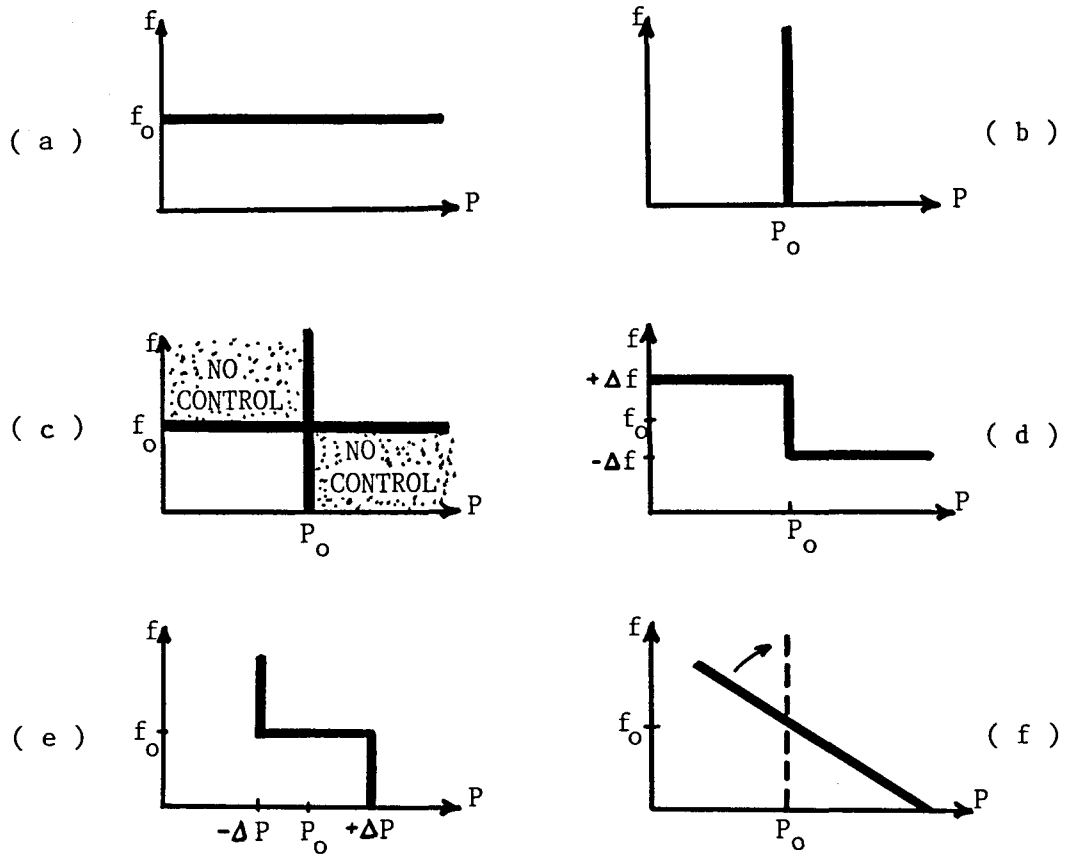


Fig. 42.1 .- Primeras estrategias de control de las interconexiones.

ración de cada compañía en los problemas que pudieran acontecer en las otras. En el caso de la fig. 42.1 (a) el objetivo del control era el mantener el valor programado de la frecuencia del sistema interconectado, independientemente de las variaciones de carga que ello supusiera. El caso de la fig. 42.1 (b) es complementario al de la fig. 42.1 (a), y en él el objetivo era el mantener constante la potencia transferida a través de la interconexión, independientemente de los desequilibrios (desviaciones de frecuencia) de las compañías interconectadas.

Sobre 1935 se fueron depurando las estrategias de control de las interconexiones, pasándose del control denominado de frecuencia selectiva de la fig. 42.1 (c), en el que una compañía sólo forzaba la generación si era ella la responsable de los desequilibrios de frecuencia en las interconexiones por no adaptar su generación a su propia carga, a los controles por tramos de las figs. 42.1 (d) y 42.1 (e). El primero de ellos (fig. 42.1 (d)) trabajaba a potencia constante (baja cooperación) si las desviaciones de frecuencia no rebasaban un determinado límite  $\Delta f$  (umbral de insolidaridad) pasando a trabajar a frecuencia constante en caso contrario. El segundo (fig. 42.1 (e)) tenía objetivos complementarios, regulando la frecuencia si para ello el esfuerzo de generación no rebasaba unos límites  $\Delta P$ . Si esto no era así, se pasaba al control de potencia constante.

Estos esquemas de control partían de un planteamiento dicotómico: cuando se regulaba la frecuencia no importaba el esfuerzo de generación, y cuando se regulaba la potencia no importaban las consecuentes desviaciones de la frecuencia. Williams y Morehouse (1935) [40] establecieron una estrategia que combinaba los errores de frecuencia con los de potencia, la cual puede considerarse como la base de los sistemas actuales (fig. 42.1 (f): Durante un período de tiempo limitado cada compañía ayudaba a las que tuvieran problemas de regulación según la línea continua de la fig. 42.1 (f) (funcionamiento primario), lo que comportaba un error de frecuencia acotado y proporcional a los desequilibrios entre la generación y la carga. Pero si este error no era subsanado por la compañía objeto del problema inicial en un período de tiempo estipulado, las demás suprimían su cooperación pasando al control de potencia constante (línea discontinua de la figura).

En la década de los 40 se empezó a establecer una estrategia más solidaria de control de los SEE interconectados, eliminándose el carácter transitorio de la cooperación entre compañías. Esta estrategia, desarrollada por Cohn [37] y ampliamente usada en la actualidad, parte del concepto del TLBC (Tie Line Bias Control), cuyo principio de funcionamiento se basa en que cada compañía intenta responder a sus propias demandas, pero de manera que todas las compañías interconectadas participen en todo momento en la regulación de la frecuencia del SEE. El TLBC pretende que cada área fuerce su generación hasta anular el ACE (concepto también introducido por Cohn), con lo que al regular la potencia transferida por

la interconexión se regulan automáticamente las desviaciones de carga de cada área (véase sección 3.2.2.2).

Para la anulación del ACE se usaban sencillos reguladores secundarios que, en Europa, eran de tipo PI y, en América, de tipo I (fig. 42.2). Estos reguladores se ajustaban, casi exclusivamente, de forma empírica hasta principios de los 70 [65], época en que empezaron a usarse métodos de optimización paramétrica para su ajuste.

A partir de 1950 la interconexión entre compañías empezó a adquirir grandes proporciones, tomándose como unidad de referencia en los estudios de interconexión el "área" (y no a una compañía o a una central "maestra"). El desarrollo industrial de esta época exigía optimizar los recursos energéticos existentes, por lo que Don Early, Miller y Kirchmayer, introducen, en 1954, [114, 40] el concepto del despacho económico. A nivel de RPF, la década de los 50 fué un período de tránsito en que se fué solidificando el TLBC de Cohn.

Una de las limitaciones del TLBC era, paradójicamente, consecuencia de su ventaja: la continua cooperación entre zonas. Si bien ésta es beneficiosa cuando un área tiene problemas para satisfacer su demanda, puede intervenir innecesariamente durante el transitorio. Así, si un área se ve sometida a una perturbación, el consiguiente transitorio forzaría la generación de las restantes áreas del SEE; sin embargo este transitorio no presupone la incapacidad del área en cuestión para compensar su propia perturbación. Por este motivo, Quazza [146] desarrolló el "Control No-Interactivo", estrategia dual de la de Williams y Morehouse y cuyos objetivos eran que, durante el primer transitorio, cada área se encargara de compensar, sus propias perturbaciones sin necesidad de ayuda de las áreas vecinas. Para ello estableció las siguientes premisas, basadas en la no interacción entre el control de frecuencia (control de la generación del área) y el control de la potencia intercambiada con otras áreas:

- 1/ Un cambio, debido a perturbaciones externas, en la potencia transferida por las interconexiones de un área no debe afectar a su propia generación.
- 2/ Una variación transitoria de frecuencia en un área no debe afectar la generación de las áreas vecinas.

Para poder cumplir sus objetivos el control no-interactivo requería una importante cantidad de reserva rodante en cada área [83]. Actualmente, con la presencia de centrales de gran capacidad de generación que no participan en la regulación, la reserva rodante de un SEE está repartida entre sus áreas, siendo conflictiva la aplicación del principio de no-interacción [101,102,166] al no disponer cada área por separado de la suficiente reserva.

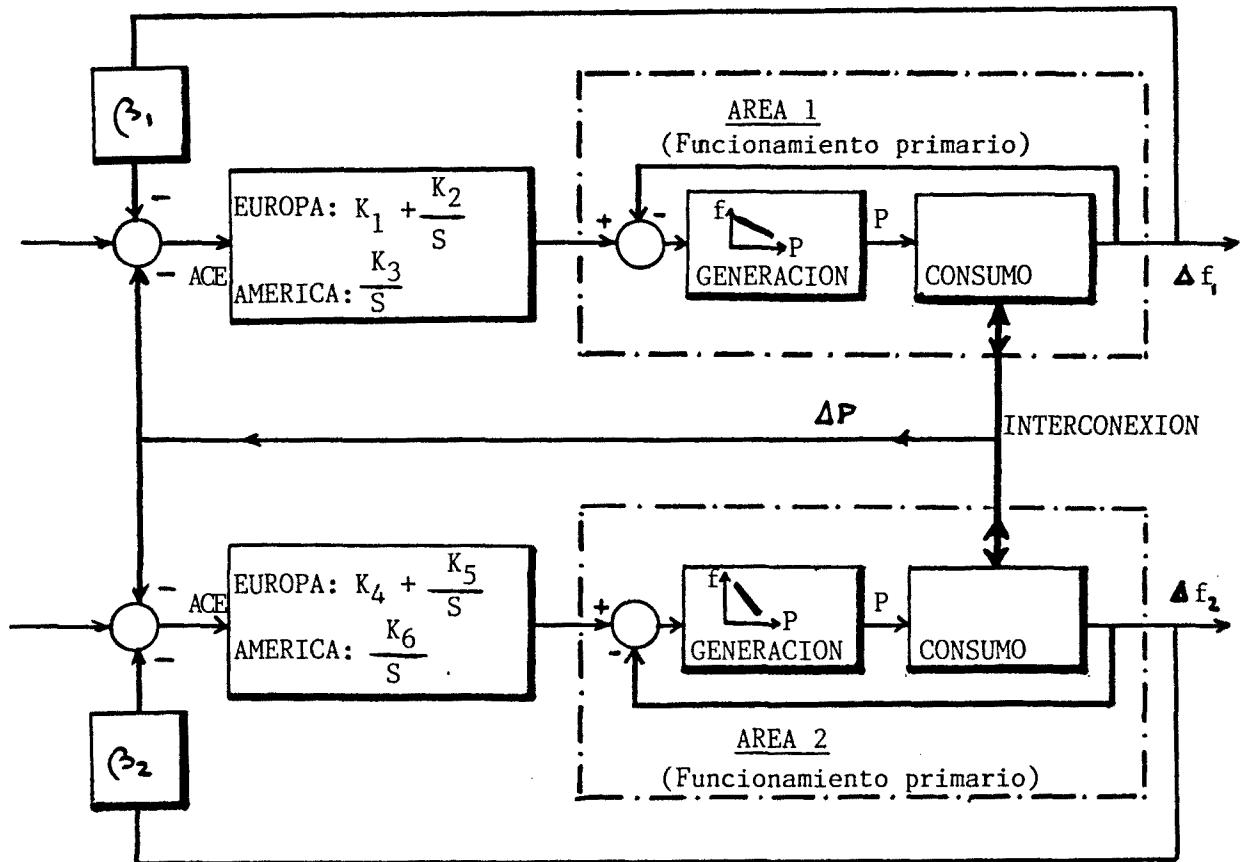


FIG . 42.2 .- Esquema de regulación del ACE.

#### 4.2.3.- Primeros sistemas de control asistidos por ordenador (EACC).

Durante la década de los 60, la aplicación de los ordenadores en los SEE, los avances realizados en telemetría y la potenciación de nuevas teorías de control permitieron la implementación de estrategias más avanzadas. Así, en 1966, Ross [157], basándose en el TLBC, desarrolló un método conocido como EACC (Error Adaptive Control Computer), en el cual el regulador secundario de cada área va analizando la magnitud y la tendencia de las perturbaciones y adaptando en consecuencia su ganancia, según la urgencia que requiera la acción de control. El análisis de perturbaciones del EACC puede interpretarse como un primer nivel de "pattern recognition" [79]: a partir de la probabilidad conjunta de las perturbaciones observadas prevé la magnitud de las esperadas y el sentido en que va a modificarse el ACE. Los objetivos de control del EACC son la anulación del ACE y la minimización de su desviación típica.

En 1972, De Mello, Mills y B'Rells [51] hicieron un segundo ajuste al EACC, al concebir una estrategia que no requiriera cálculos estadísticos, buscando, además de la anulación del ACE, la de su integral (ya que el ACE se acumula durante ciertos períodos de tiempo -típicamente cada hora- a fin de establecer las compensaciones económicas entre compañías). También, definieron unos umbrales de actuación ( $K_1$  y  $K_2$  de la fig. 42.3) para reducir así la acción de control hacia la centrales.

#### 4.2.4.- Objetivos convencionales del AGC.

A finales de los 60 los objetivos del AGC [40,85,123,128,132] eran:

- 1/ Adaptar la generación a la carga.
- 2/ Anular el error de frecuencia, limitando además sus desviaciones transitorias (típicamente entre 0,02 y 0,04 Hz).
- 3/ Anular las desviaciones en los intercambios de potencia (considerando también el transvase inadvertido).
- 4/ Ayudar durante las emergencias a las áreas con problemas.
- 5/ Evitar que los errores por acumulación de desviaciones de frecuencia (errores de tiempo) rebasaran los 2 ó 3 segundos.
- 6/ Distribuir la generación entre las unidades de cada área de forma que se minimicen los costes.

Mientras que el primer objetivo era cumplido por los reguladores primarios (reguladores de velocidad) en un intervalo del orden de segundos, el TLBC se encargaba, con una respuesta del orden del minuto, del 2º, 3º y 4º objetivos. Con un tiempo de respuesta algo superior, del orden de minutos, el despacho

económico se encargaba de los objetivos 5º y 6º.

Las principales limitaciones de los métodos clásicos eran su baja velocidad de respuesta y su marcada orientación a la conducción a cero del ACE, con pocas consideraciones sobre la dinámica de las restantes variables del sistema.

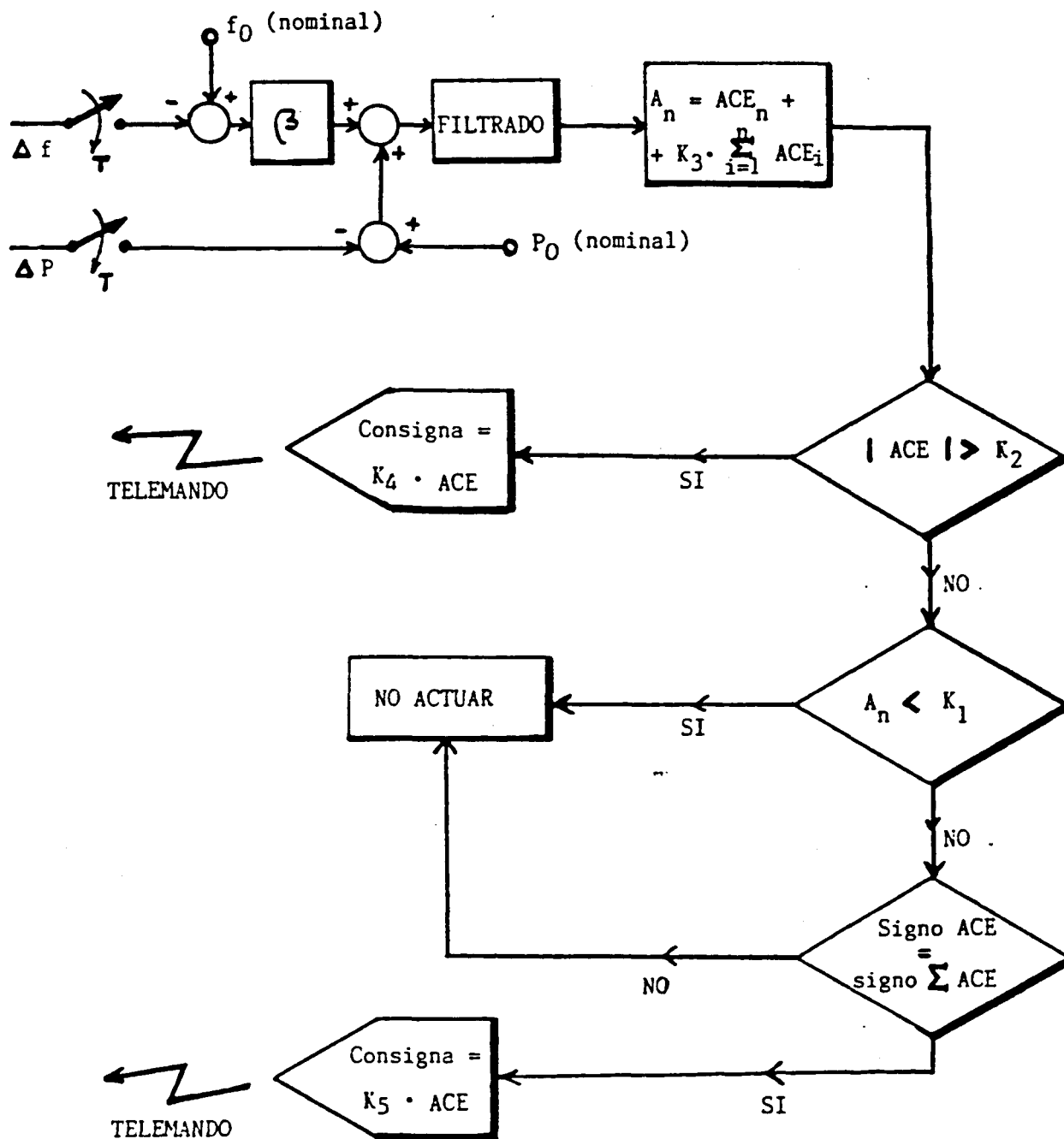


Fig. 42.3.- Esquema de control de De Mello, Mills y B'Rells (1972).  
(Modificación del EACC)



#### 4.3.- REGULACION OPTIMA.

Además de los objetivos de la RPF convencional, los enfoques más modernos se proponen también la minimización del transitorio. Esta mejora supone la consiguiente optimización de los parámetros del regulador, para lo cual hay dos enfoques básicos: la optimización paramétrica de los reguladores PI convencionales y la optimización dinámica basada en los métodos de estado (ó RLO).

##### 4.3.1.- Optimización paramétrica.

Los RPF ajustados con técnicas de optimización paramétrica parten de un criterio de calidad que, normalmente, es la integral del cuadrado del ACE o de alguna combinación de sus componentes, buscando los valores paramétricos de los reguladores secundarios que minimicen dicho criterio.

Un trabajo pionero en este campo es el de Elgerd y Fosha (1970) [65], en el cual se prueban las posibilidades del control óptimo (paramétrico) para mejorar el comportamiento dinámico de un SEE. En este trabajo se cuestiona el clásico ajuste del coeficiente  $\beta$  del ACE (véase sección 3.2.2.2), debido a Cohn y consistente en dar a  $\beta$  el valor de la característica estática del área (considerando a la carga y a las unidades generadoras), al comprobarse que valores de  $\beta$  inferiores a los clásicos ofrecen mejores características transitorias. Aunque este ajuste a un valor inferior a la característica estática fué seriamente criticado en su momento (discusiones de la referencia [65]) por Ross y Cohn (ya que ello repercutía en una menor ayuda a las restantes áreas, como se ha expuesto en el capítulo anterior), valió para mostrar que la optimización del funcionamiento del SEE durante los transitorios requería valores diferentes a los que se usaban desde un punto de vista estacionario.

Aparte de la optimización del funcionamiento del SEE respecto a los valores de  $\beta$ , Elgerd y Fosha también estudiaron el ajuste paramétrico de la ganancia del regulador secundario de tipo I. En trabajos posteriores [95,132,155,116,191] se han seguido usando métodos de optimización paramétrica para estimar la ganancia de los reguladores, confirmándose que, con mayores o menores desviaciones, el valor de  $\beta$  sugerido por Cohn y Ross no era óptimo desde el punto de vista del transitorio.

##### 4.3.2.- El Regulador Lineal Optimo (RLO).

###### 4.3.2.1.- Introducción.

La principal aportación del regulador lineal óptimo (RLO) a la Teoría de Control y, en particular, al control de los SEE, ha sido el permitir operar de una forma directa sobre modelos multivariables, dando

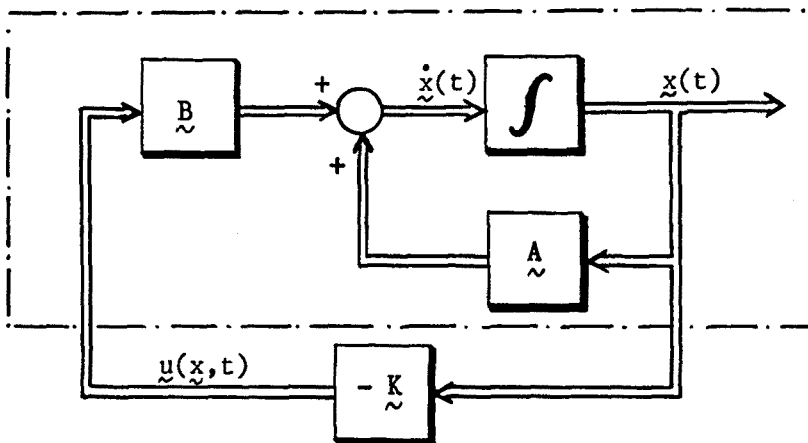
mayor libertad (que los métodos clásicos y que los de optimización paramétrica) en la fijación de la dinámica de las variables del SEE.

En esencia el problema del RLO (sobre el que se profundizará en el Cap.5) se formula de la siguiente manera: Dado un sistema lineal e invariante representado por la ecuación de estado [1, 44]

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B} \underline{u}(t) \quad [43.1]$$

donde

$\underline{x}$  = vector de estado (n x 1)  
 $\underline{u}$  = vector de control (m x 1)  
 $\underline{A}$  = matriz de planta (n x n)  
 $\underline{B}$  = matriz de control (n x m)



el problema se centra en determinar el valor del vector de control  $\underline{u}$  (mediante la determinación de los coeficientes de la matriz  $\underline{K}$  de realimentación) de forma que las variables de estado  $\underline{x}$  se comporten del modo deseado. Si bien para sistemas sencillos la solución más cómoda es recurrir a una fijación de polos de partir de especificaciones dinámicas, éstas son costosas de establecer cuando el orden del sistema es elevado, dada la interacción entre los modos de su respuesta. La solución más cómoda para formular fácil e intuitivamente las especificaciones, es el uso de la clásica función de coste cuadrática:

$$J = \int_0^{\infty} (\underline{x}^T \underline{Q} \underline{x} + \underline{u}^T \underline{R} \underline{u}) dt \quad [43.2]$$

donde  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$  son matrices de ponderación de la importancia relativa de las desviaciones de estado  $\tilde{x}$  y del esfuerzo de control  $\tilde{u}$ . En particular la matriz  $\tilde{Q}$  debe ser semidefinida positiva de orden  $n$  (y, en el caso más cómodo, diagonal) y  $\tilde{R}$  definida positiva de orden  $m$ .

Si el sistema [43.1] es controlable y la matriz  $\tilde{Q}$  reúne unas ciertas condiciones de observabilidad, la ley de control lineal que minimiza a  $J$  es

$$\tilde{u}^{\circ} = - \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} \tilde{x} \quad [43.3]$$

siendo  $\tilde{P}$  la matriz de Riccati.

En el caso de los SEE, con una adecuada ponderación de los elementos de la matriz  $\tilde{Q}$  se puede conseguir desde una mínima interacción de un área con las vecinas y una buena regulación de frecuencia, hasta la inclusión en el problema de aspectos sociales, como es el caso de la URSS [195] en que se plantean una penalización del consumo excesivo de energía en detrimento de generaciones futuras.

La RLO de P/f ha sido ampliamente tratada, tanto en sus versiones centralizada (un solo regulador para todo el SEE) como descentralizada (reguladores autónomos de área). En el presente apartado nos limitaremos a exponer los primeros trabajos desarrollados sobre el tema, los cuales eran del tipo centralizado; en el apartado 4.4 se expondrán los restantes trabajos sobre el RLO descentralizado.

#### 4.3.2.2.- Primera aplicación del RLO a la RPF: Fosha y Elgerd.

Fosha y Elgerd presentaron en 1970 [76] los primeros resultados de la aplicación de la teoría del RLO a la RPF, en un trabajo que ampliaba las conclusiones obtenidas en el expuesto en la sección 4.3.1 y basado en la optimización paramétrica. Este trabajo, que puede considerarse como revolucionario respecto a los métodos clásicos de diseño dada la gran cantidad de investigaciones posteriores que estimuló, mostró la superioridad del RLO respecto al regulador óptimo paramétrico para mejorar el comportamiento transitorio del SEE. En él se partió de las tres hipótesis siguientes:

- 1/ El sistema es capaz de reducir a cero los errores de frecuencia y de intercambio de potencia.
- 2/ Las demandas (consumo son directamente medibles).
- 3/ No hay limitaciones respecto a la capacidad ni a la velocidad de respuesta de las unidades generadoras.

Las variables de estado, seleccionadas (ver en el Apartado 2.2 el modelo de dos áreas interconectadas con generación térmica por ellos desarrollado) eran:

- Los errores de frecuencia de cada área (  $\Delta f_1$  y  $\Delta f_2$  )
- El error de tiempo de cada área (  $\int \Delta f_1 dt$  y  $\int \Delta f_2 dt$  )
- El transvase inadvertido de energía (  $\int \Delta P_{12} dt$  )
- La generación de cada área (  $P_{g1}$  y  $P_{g2}$  )
- La apertura de las válvulas de vapor (  $X_{g1}$  y  $X_{g2}$  )

Si bien incluyeron a todas estas variables en la función de coste  $J$ , no penalizaron en la matriz  $\underline{Q}$  (fig. 43.5) ni a los incrementos de la generación ni a los de apertura de las válvulas de salida, lo que producía fuertes e irreales variaciones de generación en las unidades (en el caso ideal de que no actuaran los limitadores de generación ni de velocidad). A pesar de esto, con el RLO de Fosha y Elgerd es posible fijar en la matriz  $\underline{Q}$  las características del transitorio de cada variable con la correspondiente penalización de sus desviaciones. Pero en situaciones anormales en que no se pueda adaptar la generación al consumo la falta de un término integrador en [43.3] producirá unos errores en estado estacionario [183] cuyo valor dependerá de los elementos de la matriz  $\underline{Q}$ , elegidos considerando sólo aspectos del transitorio (en situaciones normales acaban anulándose los errores de las variables del SEE, por lo que no se considera su penalización en estado estacionario) [183].

Así pues, el RLO de Fosha y Elgerd optimizaba el transitorio sin contemplar la posibilidad de errores en régimen permanente. Este defecto, así como la suposición de que las demandas y los estados fueran directamente medibles y la gran cantidad de telemidas necesarias para la implementación del RLO (dada la presencia de todas las variables del SEE en su formulación), eran las principales limitaciones de su trabajo, las cuales fueron subsanadas por otros investigadores cuyos trabajos se exponen en las siguientes secciones.

4.3.2.3.- Optimización del régimen permanente y del transitorio: Calović.

Calović (1972) [25] fué el primero en distinguir claramente el problema del régimen permanente del transitorio, ampliando al conjunto de variables de estado del sistema con la integral del ACE de cada área, de forma que el RLO resultara de tipo PI y fuera así capaz de anular el error en régimen permanente, además de tener las características transitorias deseadas.

Para ello partió de la siguiente representación de estado del SEE,

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A} \tilde{x}(t) + \tilde{B} u(t) + \tilde{F} z(t), \quad [43.4]$$

(donde  $\tilde{x}$ ,  $u$ ,  $\tilde{A}$  y  $\tilde{B}$  ya han sido definidas anteriormente,  $z$  es el vector de perturbaciones y  $\tilde{F}$  es la matriz de distribución de las perturbaciones, a las que aproximó por una constante bajo la suposición de que su variación fuera lenta respecto a la dinámica de las variables de estado del SEE), y la amplió con la ecuación:

$$\dot{\tilde{y}}(t) = (\underline{ACE}) = \tilde{C}^T \tilde{x}(t) \quad [43.5]$$

en la que la matriz ( $\underline{ACE}$ ) viene formada por los errores de control de cada una de las L áreas constituyentes del SEE

$$ACE_k = \Delta P_k + \beta_k \Delta f_k \quad (k = 1, 2, \dots, L) \quad [43.6]$$

El planteamiento es acorde a la estructura elaborada un año antes por Anderson y Moore (fig. 43.1) [1] :

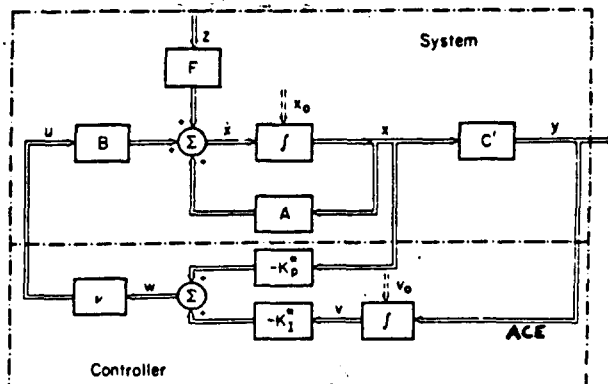


Fig. 43.1 : RLO de tipo PI.

La ley de control global viene dada por

$$\tilde{w}(t) = -\tilde{K}_p \tilde{x}(t) + \tilde{K}_I \int_{t_0}^t (\text{ACE}) dt + \tilde{w}_0 \quad [43.7]$$

siendo:

$$\tilde{K}_p = \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}_{11}, \text{ (matriz de ganancias proporcionales)}$$

$$\tilde{K}_I = \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}_{12}, \text{ (matriz de ganancias de los términos integradores)}$$

$$\tilde{w}_0 = -\tilde{R}^{-1} \tilde{P}_{12} \tilde{v}_0, \quad \tilde{v}_0 = \tilde{v}(t_0)$$

y la consigna de generación de cada unidad (participación en la generación conjunta  $\tilde{w}$ ),

$$\tilde{u}_i = \tilde{Y} \tilde{w}$$

Las matrices  $\tilde{P}_{11}$  y  $\tilde{P}_{12}$  proceden de una participación de la matriz de Riccati. Si se ordenan las variables de estado de forma que

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} \tilde{Q}_n & | & \tilde{Q} \\ \hline \tilde{Q} & | & \tilde{Q}_1 \end{bmatrix}$$

siendo

$\tilde{Q}_n$  = ponderación de los estados propios del SEE

$\tilde{Q}_1$  = ponderación de los estados ampliados ( $\int (\text{ACE}) dt$ )

la solución a la ecuación de Riccati adquiere la forma

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{11} & | & \tilde{P}_{12} \\ \hline \tilde{P}_{12}^T & | & \tilde{P}_{22} \end{bmatrix}$$

de donde se deducen  $\tilde{K}_p$  y  $\tilde{K}_I$ .

Un matiz interesante de este trabajo de Calović es que usó por primera vez en los SEE el criterio integral propuesto por Anderson y Moore [1] :

$$J = \int_0^{\infty} e^{2\alpha_0 t} (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + \tilde{u}^T \tilde{R} \tilde{u}) dt, \quad [43.8]$$

el cual asegura que los autóvalores de  $\tilde{x}$  tengan un grado de amortiguamiento superior a  $e^{-\alpha_0 t}$ , si el valor de la integral tiende a un mínimo cuando el tiempo tiende a infinito.

En este trabajo, Calović presento diversos resultados de simulación en los que, a diferencia de Elgerd y Fosha, no partió de un modelo de dos áreas de igual capacidad. En primer lugar experimentó el regulador PI óptimo sobre un modelo de dos áreas, ambas con generación hidráulica y térmica, pero siendo el área externa a la perturbación (área 2) cinco veces inferior en capacidad al área 1. En un segundo estudio simuló la respuesta de un sistema constituido por tres áreas, estando formada la que era sujeto de la perturbación (área 1) por elementos generadores hidráulicos y térmicos, y las dos externas, cada una de ellas con la mitad de capacidad de generación del área 1, por elementos generadores hidráulicos en una y térmicos en la otra.

Como conclusiones a estos trabajos, cabe resaltar las siguientes:

- El grado de amortiguamiento varía en el mismo sentido que el valor del coeficiente  $\alpha_0$  del criterio integral y que el valor de los elementos de la matriz  $\tilde{Q}$ . Asimismo, lo hace de forma inversa a los elementos de  $\tilde{R}$ .
- El valor del coeficiente  $\beta$  ("bias factor") del ACE tiene poca influencia en la dinámica del RLO.

Si bien la primera conclusión es una confirmación del funcionamiento del RLO, la segunda soluciona el problema del ajuste de  $\beta$ , que los métodos de optimización paramétrica (sección 4.3.1) aconsejaban que fuera inferior al sugerido por Cohn, con el consiguiente conflicto entre el régimen transitorio y el permanente.

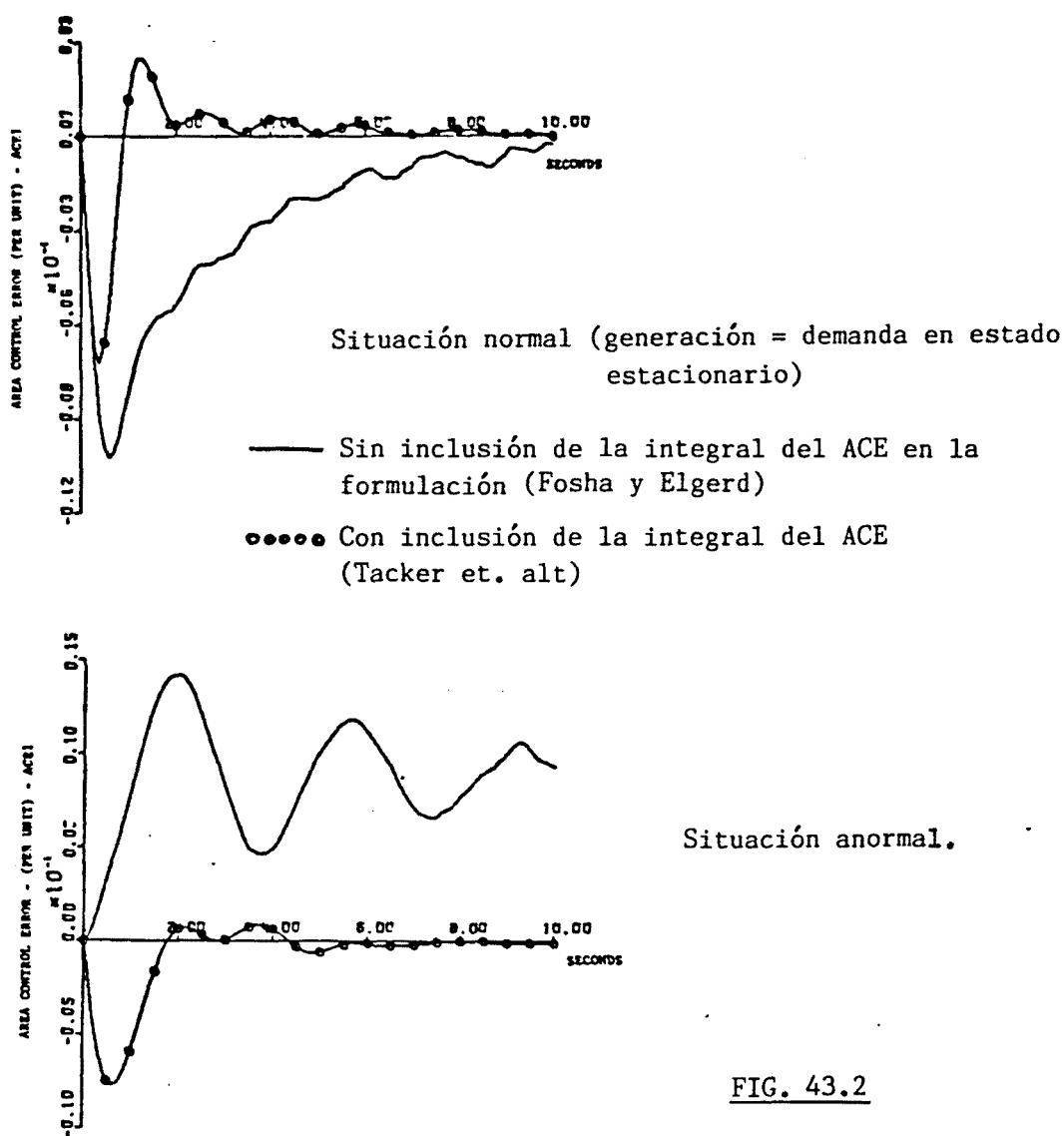
Otra aportación de Calović [24] fué la introducción en la formulación del RLO de una "matriz de participación" encargada de distribuir en esfuerzo de control  $\tilde{u}$  entre las diferentes unidades de cada área, según requiera el despacho económico. Así la consigna de generación ( $\tilde{u}_i$ ) de cada unidad viene dada por

$$\tilde{u}_i = \tilde{Y} \tilde{w} \quad [43.9]$$

siendo  $\tilde{Y}$  la matriz de participación y  $\tilde{w}$  el esfuerzo de control conjunto de todas las unidades del área.

Incluyendo a esta matriz de participación  $\gamma$  en la formulación del RLO, se dispone de un método alternativo a la penalización de los elementos de la matriz  $R$  para adecuar el esfuerzo de generación de las unidades.

Tacker et al. (1972) [183], pocos meses más tarde que Calović, también incluyeron al ACE en la formulación del RLO, obteniendo los resultados comparativos de la fig. 43.2.





4.3.2.4.- Estimación de estado y de las perturbaciones.

Como ya se ha avanzado, una de las limitaciones del RLO de Fosha y Elgerd era la suposición de que los estados y las demandas fueran medibles y, por lo tanto, conocidos.

En 1971, Cavin et alt. [36] y Tacker et alt. [183] reformularon el problema suponiendo que las demandas eran constantes pero desconocidas. Partiendo de la hipótesis de que sólo fueron medibles la frecuencia y el intercambio de potencia (lo cual reducía las telemidas), y que estas señales medibles estuvieran contaminadas por ruido, usaron el filtro de Kalman [182] para obtener una estimación óptima de las restantes variables de estado del SEE y de las demandas.

En 1972, Minesy y Bohn [129], suponiendo que la contaminación por ruido de las telemidas fuera despreciable, reemplazaron al filtro de Kalman por un observador de Luenberger, siempre con el mismo propósito de reducir el número de telemidas necesarias para la implementación del RLO. Con ello evitaron el problema de disponer de datos estadísticos (matrices de covarianzas) de difícil obtención y necesarios para el diseño del filtro de Kalman.

Yendo un paso más adelante y partiendo de la posibilidad de estimar las perturbaciones Calović [24], se planteó su compensación con un lazo adicional de "feed-forward", tal y como se refleja en la fig. 43.3 en la que  $\tilde{M}$  es una matriz que relaciona la magnitud de las perturbaciones  $z$  y los estados deseados del sistema en estado estacionario ( $x_{ss}$ ),

$$\tilde{x}_{ss} = \tilde{M} z \tag{43.10}$$

y siendo los restantes bloques de la figura los descritos en la sección anterior 4.3.2.3.

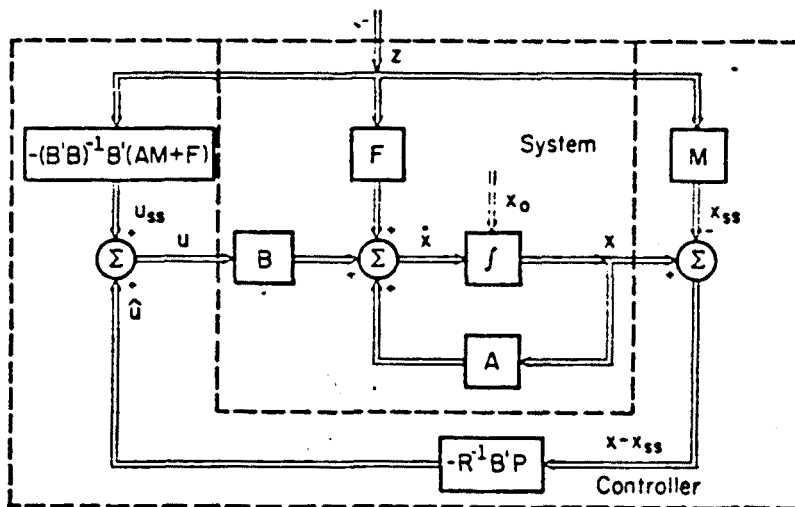


Fig. 43.3.- Primer esquema de control de Calović (1972) (Feedback + Feedforward)

Dado el aspecto variante con el tiempo de los modelos, actualmente la tendencia se orienta hacia el uso de estimadores adaptativos [148,196] en los cuales no es necesario un modelo rígido del SEE (como ocurre con el filtro de Kalman y el observador de Luenberger).

#### 4.4.- RLO DESCENTRALIZADO.

##### 4.4.1.- Introducción : LSS y descentralización.

Hasta mediados de la década de los 60, puede afirmarse que el control de los sistemas complejos era diseñado de forma independiente (nivel elemental de descentralización). Así, en una planta eléctrica, los reguladores de las calderas eran diseñados sin relación con los de los alternadores. Frente a su sencillez, este enfoque presenta varios inconvenientes, entre los que cabe resaltar los siguientes:

- 1/ Los subsistemas, aunque controlados de forma independiente, presentan en realidad interconexiones dinámicas entre sí, por lo que su estabilidad aislada no garantiza la del sistema global [171, 127, 216].
- 2/ El grado de optimalidad alcanzable en el sistema, regulando independientemente a cada subsistema, es inferior al que se obtiene con un regulador integrado o centralizado que considere las interconexiones [171, 172].

Por otra parte, el diseño integrado o centralizado de los sistemas de gran escala (LSS, en inglés) resulta extremadamente difícil y costoso, dada su elevada dimensión y complejidad y que las técnicas habituales de diseño multivariable topan con serias dificultades operativas cuando el número de salidas o de variables de estado superan un cierto número.

Históricamente, los primeros sistemas que requirieron el desarrollo de metodologías específicas para su control fueron los económicos, dada la limitación de los métodos clásicos para controlar las perturbaciones internas y externas de la economía de cada país. Posteriormente otros sistemas como los ecológicos, las redes de tráfico urbano y los SEE fueron estimulando nuevas investigaciones, siempre orientadas al desarrollo de métodos que redujeran la dificultad de modelación y de cálculo. Desde hace una década, los estudios de estabilidad en circuitos LSI, los de optimización del tráfico en redes de comunicación y los de robótica han sido un nuevo catalizador para el desarrollo de teorías. Dado su carácter fuertemente multidisciplinar, los SEE han sido un amplio campo de aplicación de estas nuevas teorías (desarrollo de ejemplos), ampliándose los índices de calidad convencionales (que sólo consideran las desviaciones del sistema) de forma que contemplen también el coste de las telecomunicaciones y el de las redes de ordenadores necesarios para su control.

Los nuevos enfoques de diseño desarrollados durante la última década [171, 127, 214, 216, 217, 160, 161, 89, 45-49] para soslayar los problemas de cálculo y de telecomunicación asociados a los LSS se basan, esencialmente, en la descomposición del sistema en subsistemas interconectados entre sí, cuyo menor tamaño permita la aplicación de las técnicas multivariables usuales y la reducción del número de telemidas.

En el Control Descentralizado, los subsistemas son controlados por reguladores que sólo disponen de información local, pero teniendo en cuenta las interacciones con otros subsistemas. Dado que una estructura de control que sólo considere las variables locales de cada subsistema y las de sus interconexiones no puede optimizar globalmente al sistema, el Control Jerárquico añade un nivel superior de cooperación entre los subsistemas mediante un coordinador que establece un intercambio de información entre los subsistemas (nivel primario) y el propio coordinador (nivel secundario).

#### 4.4.2- El caso de los SEE.

Un denominador común de los trabajos presentados en el apartado 4.3 [ 65,76,24,25,183,36 ] ha sido su carácter centralizado, interviniendo en la formulación del RLO todas las variables de estado del SEE.

Con el aumento del tamaño y complejidad de los SEE, aparecen dos grandes limitaciones para la implementación del RLO: en primer lugar, para disponer de la información de estado se requieren complejos sistemas de telecomunicación que soporten las telemidas (tanto más cuanto mayor extensión tenga el SEE) y, en segundo lugar, la optimización del funcionamiento global del SEE requiere largos y costosos cálculos.

Si bien el número de telemidas puede ser reducido recurriendo a estimadores que reconstruyen las restantes, el tiempo de cálculo necesario para la estimación hace poco práctica esta solución pues, en el mejor de los casos, resta flexibilidad de operación a los centros de control [184, 86, 26] . Ello lleva a una situación en la que hay que elegir entre la mejora dinámica que suponen los métodos de estado o el menor número de telemidas de los métodos convencionales.

La superación de dicho dilema ha llevado al desarrollo de Sistemas de Control Descentralizado, basados en el diseño de RLOs de áreas autónomas (subsistemas), que conjugan los aspectos positivos de ambos planteamientos (moderno y convencional) al permitir operar con conjuntos de variables de estado más reducidos (correspondientes al área) y, sin embargo, "optimizar" el transitorio. En primer lugar puede partirse de las telemidas mínimas (frecuencia e intercambio de potencia) para poder reconstruir los restantes estados con un tiempo de cálculo aceptable [213, 86] . En segundo lugar los cálculos necesarios para determinar la matriz  $\underline{X}$  de realimentación del RLO son más reducidos.

De esta forma se puede optimizar el funcionamiento del SEE combinando algoritmos descentralizados (autónomos de cada área) y centralizados (de coordinación de las áreas) [14, 89, 125, 204] . Estas estructuras jerárquicas están típicamente compuestas por tres niveles de control:

Control de área: optimización de funcionamiento interno de cada área autónoma a partir de la información local.

Control de las interconexiones entre áreas: ayuda a las áreas más próximas con problemas respetando las limitaciones (niveles de potencia) de las interconexiones entre ellas (primer nivel de cooperación), lo que supone la optimización del funcionamiento del área considerando la dinámica de las interconexiones.

Coordinación: cálculo de los requisitos (generación, demandas, seguridad, etc) de cada área y establecimiento de una política de cooperación.

En primera aproximación, un RLO que sólo contemple las variables del área en que se va a implementar y las de sus interconexiones (niveles 1 y 2) no puede dar el mismo grado de optimalidad que el RLO tratado en el apartado 4.3, en el cual se consideraban conjuntamente las variables de estado de todas las áreas, hablándose entonces de un regulador sub-óptimo [171, 172] .

#### 4.4.3.- Formulación del RLO de área autónoma a partir del modelo global del SEE.

En 1970, Fosha y Elgerd [76] ya consideraron la descentralización del RLO al estudiar por simulación su comportamiento cuando sólo se realimentaban las variables de un área, aunque no habían profundizado en el diseño de un regulador sub-óptimo.

Fueron Calović, Cuk y Djorović [26] quienes, en 1977, se plantearon seriamente el diseño de un regulador de área autónoma que sólo requiriera la telemedida (o estimación) de las variables de la propia área y las de las interconexiones con las áreas vecinas. Para ello ampliaron los resultados obtenidos por Calović en los trabajos presentados en las secciones anteriores, usando la formulación de estado de todo el SEE como base de partida

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A} \tilde{x}(t) + \tilde{B} u(t) + \tilde{F} z(t) \\ y(t) &= \tilde{C}^T \tilde{x}(t), \quad (\text{salidas medibles}) \end{aligned} \quad [44.1]$$

ampliándola (bajo la suposición de que  $z(t) \approx \text{cte}$ ) con las variables  $\dot{\tilde{y}} = (\text{ACE})$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\tilde{x}}}(t) &= \hat{\tilde{A}} \hat{\tilde{x}}(t) + \hat{\tilde{B}} \hat{\tilde{w}}(t), \quad \hat{\tilde{x}}(t_0) = \hat{\tilde{x}}_0, \quad \hat{\tilde{w}}(t) = \hat{\tilde{Y}} u(t) \\ \hat{\tilde{y}}(t) &= \hat{\tilde{C}}^T \hat{\tilde{x}}(t) \end{aligned} \quad [44.2]$$

siendo,

$\hat{\tilde{Y}}$  = matriz de participación.

$$\hat{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{x} - \tilde{x}_{ss} \\ \vdots \\ \tilde{v} - \tilde{v}_{ss} \end{bmatrix}, \text{ (n estados } \tilde{x} \text{ y L estados } \tilde{v} \text{)}$$

$$\hat{\tilde{w}} = \tilde{w} - \tilde{w}_{ss}, \text{ (m entradas de control)}$$

$$\hat{\tilde{y}} = \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 - \tilde{y}_{ss1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_L - \tilde{y}_{ssL} \end{bmatrix}, \text{ (r salidas observables en las L áreas)}$$

ss = estado estacionario (steady state)

El regulador de cada área lo diseñaron a partir de los subconjuntos de salidas  $\hat{\tilde{y}}_k$  de la formulación de estado global que afectan al área en cuestión,

$$\hat{\tilde{y}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{\tilde{y}}_1(t) \\ \hat{\tilde{y}}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{\tilde{y}}_L(t) \end{bmatrix}, \text{ (L áreas)}$$

La ley de control de cada área k seguía el esquema del trabajo anterior (sección 4.3.2.3),

$$\hat{\tilde{w}}_k(t) = -\hat{K}_{pk} \hat{\tilde{y}}_k(t) - \hat{K}_{Ik} \int_{t_0}^t \hat{\tilde{y}}_k^\circ(t) dt + \hat{\tilde{w}}_{ok} \quad [44.3]$$

siendo

$$\hat{\tilde{y}}_k(t) = \hat{C}_k^T \hat{\tilde{x}}(t) \text{ las variables de salida del área k.}$$

$$\hat{\tilde{y}}_k^\circ(t) = \hat{D}_k^T \hat{\tilde{x}}(t) \text{ la combinación de variables que constituyen el ACE del área k.}$$

y la participación de las unidades,

$$\tilde{u}_k(t) = \tilde{Y}_k w_k(t),$$

$$\tilde{Y}_k = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{\text{TERM}} \\ \tilde{Y}_{\text{HIDRO}} \end{bmatrix}$$

[44.4]

Con ello el esquema de control es el de la fig. 44.1, compuesto por un regulador óptimo descentralizado de tipo PI en cada área.

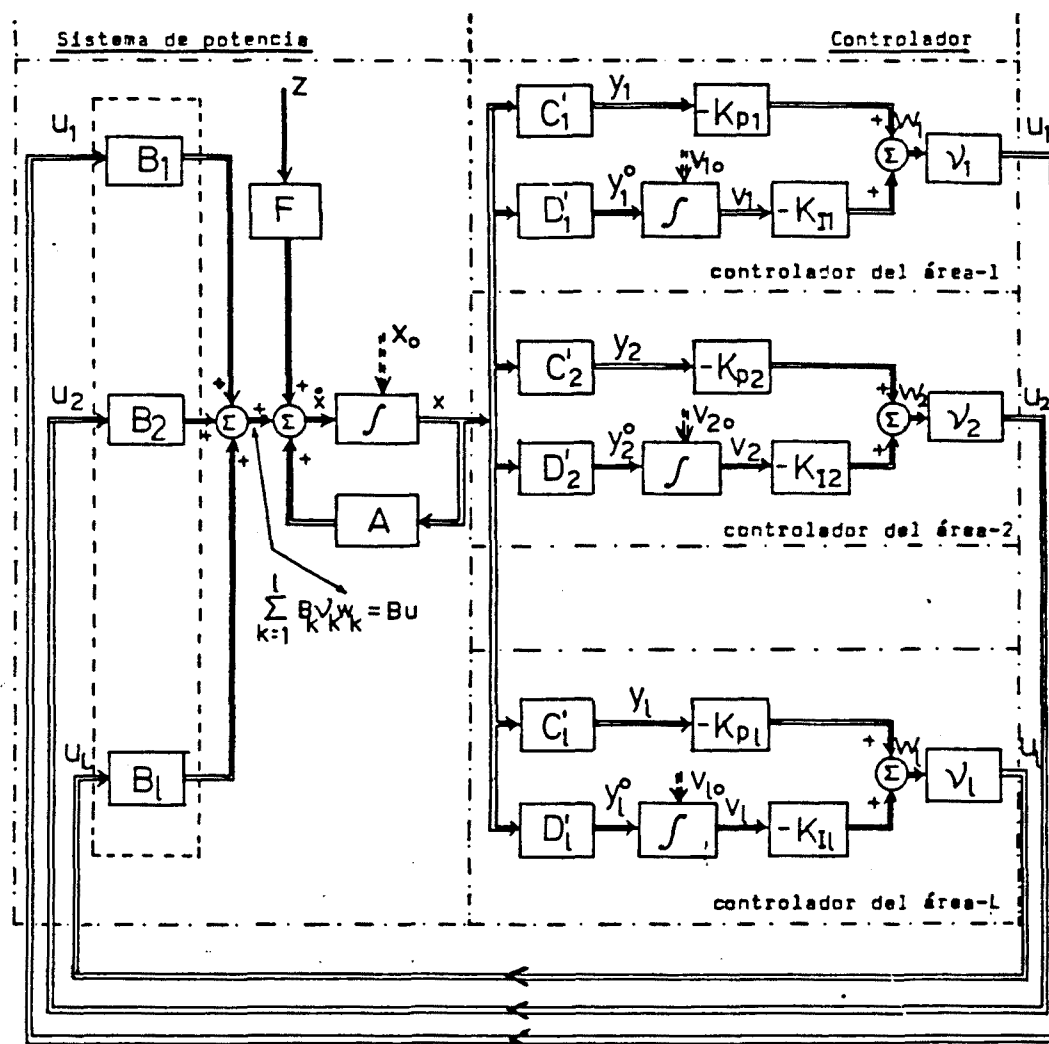


Fig. 44.1.- Diagrama de bloques de un AGC descentralizado en un SEE constituido por L áreas interconectadas.

Bengtson y Lindahl [10] desarrollaron un método de reducción de feedback que sería usado por Calović, Cuk y Djorović [26] para la determinación del vector de ganancias  $\hat{\tilde{K}}_k = \begin{bmatrix} \hat{\tilde{K}}_p & \hat{\tilde{K}}_I \end{bmatrix}$  de [44.3], basado en la aproximación del espacio propio del SEE al conjunto de autovalores dominantes. El método consiste en la minimización de la norma

$$\| (\hat{\tilde{K}}_k \hat{\tilde{C}}_k^T \hat{\tilde{S}} - \hat{\tilde{K}}_k^* \hat{\tilde{S}}) \hat{\tilde{W}} \| \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, L \quad [44.5]$$

donde

- $\hat{\tilde{S}}$  es una matriz de base, formada por los autovectores ( $s_i$ ) correspondientes a los autovalores dominantes del SEE en lazo cerrado con la ley de control óptimo global

$$\tilde{w}(t) = - \tilde{K} \tilde{x}(t), \quad [44.6]$$

(siendo  $\tilde{w}(t)$  y  $\tilde{x}(t)$  los de [44.2], y  $\tilde{K}$  el vector óptimo de realimentación global), de dimensión  $(n + L) \times q$ , siendo  $q$  el número seleccionado de autovalores dominantes.

$$\hat{\tilde{S}} = \begin{bmatrix} s_1 & | & s_2 & | & s_3 & | & \dots & | & s_q \end{bmatrix}$$

- $\hat{\tilde{W}}$  es una matriz de penalización de la importancia relativa de las desviaciones de los autovalores dominantes del SEE con la ley de control global 44.6 al sustituirse ésta por las leyes descentralizadas [44.3].

$$\hat{\tilde{C}}_k^T = \begin{bmatrix} \tilde{c}_k^T & | & 0 \\ \hline 0 & | & \tilde{c}_k^T \end{bmatrix}$$

es una nueva matriz de salida de dimensión  $(r + 1) \times (n + L)$  para el sistema aumentado con el ACE de la ecuación [44.2] y particularizado a un área  $k$  (a fin de emplear la ley de control [44.3]), siendo  $\tilde{c}_k^T$  un vector fila de dimensión  $L$  con todos los elementos nulos excepto el correspondiente a la integral de la salida  $y_k^o$  (ACE), el cual toma el valor 1.

- $\hat{\tilde{K}}_k^*$  es un vector fila, de dimensión  $n + L$ , definido por la partición de la matriz  $\tilde{K}$  de realimentación global del SEE (obtenida a partir del cálculo del RLO para todo el SEE),



$$\hat{\underset{\sim}{K}} = \begin{bmatrix} K_{\sim 1}^* \\ K_{\sim 2}^* \\ \cdot \\ \cdot \\ K_{\sim L}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\sim p1}^* & K_{\sim I1}^* \\ K_{\sim p2}^* & K_{\sim I2}^* \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ K_{\sim pL}^* & K_{\sim IL}^* \end{bmatrix}$$

donde los componentes  $K_{\sim pk}^*$  y  $K_{\sim Ik}^*$  son subvectores fila de dimensiones  $n$  y  $L$  respectivamente.

Cuando es posible la minimización de [44.5] y el sistema en lazo cerrado es estable, el vector de ganancias de realimentación del área  $k$  (de dimensión  $r + 1$ ) viene dado por

$$\hat{\underset{\sim}{K}}_k = \hat{\underset{\sim}{K}}_k^* \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}} (\hat{\underset{\sim}{C}}_k^T \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}})^+ \quad [44.7]$$

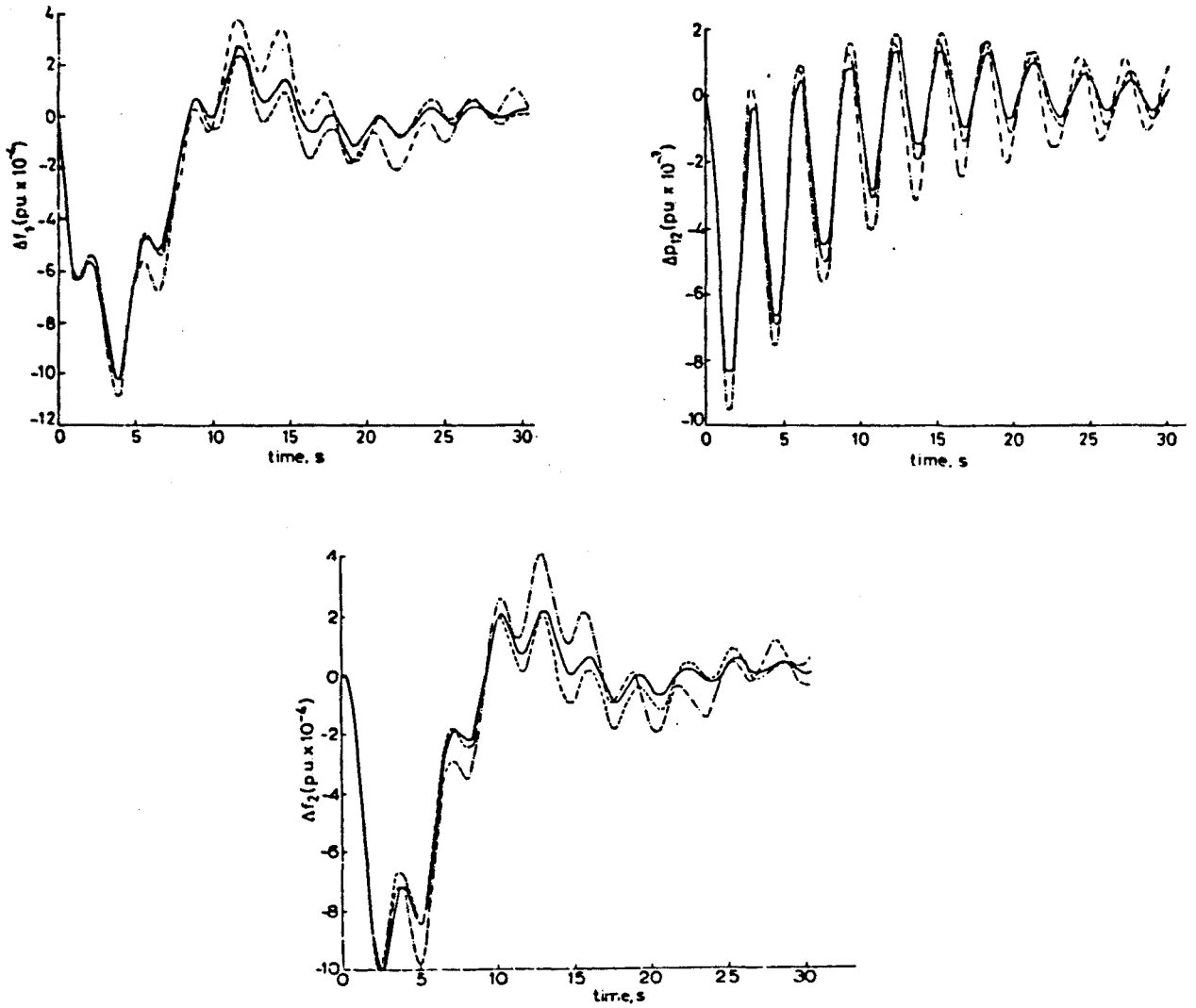
donde

$$(\hat{\underset{\sim}{C}}_k^T \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}})^+ = (\hat{\underset{\sim}{C}}_k^T \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}})^T ((\hat{\underset{\sim}{C}}_k \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}}) (\hat{\underset{\sim}{C}}_k^T \hat{\underset{\sim}{S}} \hat{\underset{\sim}{W}})^T)^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, L$$

A partir de esta última expresión [44.7], Calović, Cuk y Djorović obtuvieron diversos resultados de simulación (fig. 44.2) operando con un modelo de dos áreas iguales (ambas con generación hidráulica y térmica) desarrollado por Calović [25]. De estos resultados se desprende una gran similitud de comportamiento entre un SEE regulado con un solo RLO centralizado y el mismo SEE descompuesto en áreas, cada una de ellas con su propio RLO descentralizado. Sin embargo, esta similitud de comportamiento supone haber seleccionado adecuadamente los elementos de penalización de la matriz  $\hat{\underset{\sim}{W}}$ .

Por otro lado, en estos trabajos se detectó una gran similitud entre los autovalores del SEE en lazo cerrado regulado con un RLO descentralizado en cada área y los del mismo SEE con un RLO centralizado, lo que estaba en concordancia con los resultados de un trabajo anterior de Calović [25], en el cual se comprobó que, para el caso del RLO centralizado, la ley de control de cada área dependía más de los propios estados del área que de los de las restantes.

Otros trabajos orientados a la obtención de reguladores descentralizados se han basado en la optimización paramétrica. Un ejemplo es el de Hiyama [94] en el que, partiendo de un modelo global del SEE compuesto por un modelo detalla-



RLO: ( $\tilde{R} = \tilde{I}$ ,  $Q_{ii} = 0,01$ )

- Realimentación de estado global.
- Realimentación de las variables del área (diseño global y desprecio de las variables foráneas al área).
- Realimentación de área autónoma ( $\tilde{W} = \tilde{I}$ ,  $q = 11$ )

Fig. 44.2.— Algunos resultados de simulación obtenidos por Calović, Cuk y Djorovic [26]

do del área  $i$  objeto de diseño del regulador y por un modelo reducido equivalente del resto de áreas del SEE, usa el algoritmo de Newton-Ralphson para determinar las ganancias que minimizan al criterio integral definido como,

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta P_{ij}^2 + \Delta f_i^2 + q \Delta P_{gen_i}^2) dt \quad [44.8]$$

siendo  $q$  un factor de ponderación de la generación del área  $i$ .

#### 4.4.4.- Formulación del RLO descentralizado a partir del modelo del área.

Apoyándose en los trabajos anteriores de Calović [25,26], Siljak aportó un método de diseño del RLO descentralizado en el cual sólo era precisa la formulación de estado del área objeto de estudio y la de sus interconexiones [171].

Este método se basa en la representación del SEE como un conjunto de áreas superpuestas mediante la notación perturbacional [160,161,181], consistente en la descomposición de la ecuación de estado global,

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{B} u$$

en  $s$  subsistemas de la forma,

$$\dot{\tilde{x}}_i = \tilde{A}_i \tilde{x}_i + \tilde{B}_i u_i + \sum_{j=1}^s H_{ij} \tilde{x}_j \quad (i \neq j) \quad [44.9]$$

( $i = 1, 2, \dots, s$ )

donde  $H_{ij}$  son las constantes de interconexión del subsistema  $i$  con los  $s-1$  subsistemas restantes. La metodología de diseño del RLO descentralizado de RPF, tanto en sus versiones determinística como estocástica [197,144,8], parte de la consideración de que los elementos  $H_{ij}$  suponen un término de perturbación sobre la ecuación de estado de cada subsistema (área), diseñándose al RLO (determinación de la ley de control [44.3] de la sección anterior) como si el área estuviera aislada (concepto tanto más válido cuanto más dispersa sea la matriz  $\tilde{H}$  formada por los elementos  $H_{ij}$ ),

$$\dot{\tilde{x}}_i = \tilde{A}_i \tilde{x}_i + \tilde{B}_i u_i \quad [44.10]$$

$$H_{ij} = 0, \quad \forall i, j$$

Lógicamente esta aproximación lleva a la obtención del RLO con un cierto grado de suboptimalidad (diferencia entre la mínima función de coste alcanzable

con el RLO global y la suma de las funciones de coste conseguibles en cada área con los RLOs descentralizados).

Una vez obtenido el regulador sub-óptimo, se puede elaborar una estrategia de coordinación entre las áreas capaz de reducir el grado de suboptimalidad. En este sentido hay dos grandes líneas: una de ellas, asignable a Siljak [171, 172] parte de una visión pesimista de las interconexiones  $H_{ij}$ , buscando una ley de coordinación que reduzca su efecto nocivo. La otra, debida a Sundareshan [181] pretende obtener un coordinador que explote los efectos positivos de las interconexiones. En el siguiente capítulo se profundizará en estos conceptos.

#### 4.4.5.- Ajuste empírico de los RPF descentralizados. (Davison y Tripathi)

Davison y Tripathi (1980) [49], basándose en trabajos anteriores sobre los controladores descentralizados y robustos [45, 46, 47, 48], se plantearon con una óptima distinta el problema de la RPF, desarrollando un método de diseño que no requiere la disponibilidad de un modelo detallado del SEE (aspecto de gran interés por las dificultades que ello conlleva).

El trabajo de Davison y Tripathi tiene como objetivo la búsqueda de la estabilidad del SEE a nivel de regulación secundaria. Para ello parten de la hipótesis de que el SEE, sin regulación secundaria en ningún área, es estable y puede ser representado por un modelo lineal, finito e invariante en el tiempo (aunque no se disponga de él). Por otro lado suponen que es posible el ajuste del regulador de un y solo un área en un intervalo de tiempo dado y que después del ajuste del regulador de un área, éste permanece constante durante los ajustes de los siguientes.

Esquemáticamente, el procedimiento de diseño consiste en aplicar sucesivamente una entrada en escalón a la consigna de generación de cada área interconectada (primero el área 1 hasta llegar al área n), midiendo en cada ensayo el ACE de todas las áreas. Así, denominando  $y_i$  al ACE medido en el área i cuando la excitación es un escalón  $u_j$  en el área j, se crean los elementos de la matriz de ganancias  $F$ ,

$$F(i,j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{y_i}{u_j} \quad [44.11]$$

$$(i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2 \dots, n)$$

Si es posible ordenar a las áreas de forma que,

$$\begin{aligned}
 \text{rango } \begin{bmatrix} F(1, 1) \end{bmatrix} &= 1 \\
 \text{rango } \begin{bmatrix} F(2, 2) & F(2, 1) \\ F(1, 2) & F(1, 1) \end{bmatrix} &= 2 \\
 \vdots & \\
 \text{rango } \begin{bmatrix} F(n, n) & F(n, n-1) \dots F(n, 1) \\ \vdots & \vdots \vdots \vdots \\ F(1, n) & F(1, n-1) \dots F(1, 1) \end{bmatrix} &= n
 \end{aligned} \tag{44.12}$$

y el SEE es estabilizable aplicando sucesivamente ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) a cada área las leyes de control descentralizadas

$$u_i = -\epsilon_i F^{-1}(1,1) \int_0^t \text{ACE}(t) dt. \tag{44.13}$$

siendo  $\epsilon_i$  un parámetro de ajuste empírico y cuyo valor suele estar comprendido entre 0,01 y 0,1. Nótese que, disponiendo de un modelo de simulación del SEE, se puede ajustar a  $\epsilon_i$  por métodos de optimización paramétrica (y así lo hacen Davison y Tripathi buscando la minimización de la constante de tiempo); sin embargo ello está en disonancia con el interés primordial del método al ser preciso un modelo sobre el que optimizar.

#### 4.5.- CONTROL DIGITAL.

##### 4.5.1.- Generalidades.

La mejora de la seguridad, objetivo básico de los centros de control, ha venido impulsando desde hace varias décadas el desarrollo de nuevos y más completos sistemas de telemida y de control [60,61]. Tanto las decisiones de los operadores como el funcionamiento automático de los programas de seguridad dependen, en gran medida, de la eficacia de la recepción y del tratamiento de la información recibida del SEE, por lo cual, desde la década de los 60 vienen usándose ordenadores tanto para el tratamiento de la información como para la monitorización de la seguridad [58,59,61,159].

Con la inclusión de ordenadores y el consiguiente desarrollo de sistemas digitales de telemida, los centros de control fueron informatizando las restantes tareas del AGC [122]. Así, los programas de RPF adquieren periódicamente muestras de distintas variables del SEE (vía telemidas cíclicas) y van enviando, también en tiempo discreto, sus consignas a las unidades generadoras. A su vez, los programas de seguridad y economía se encargan de ir ajustando periódicamente a la RPF, repartiendo la carga entre las distintas unidades generadoras [30,31,32,60,61,122,178].

Esta informatización del AGC, que hoy en día es indispensable, ha hecho aparecer retardos entre las propias telemidas (lo que supone un término de ruido en la estimación de los estados) y entre ellas y los cálculos del AGC [178,52]. Además, el mayor tiempo de cálculo requerido por los programas de más alto nivel (seguridad y economía) respecto a la RPF introduce un nuevo grado de discontinuidad en el funcionamiento de los centros de control [30,32,73].

La digitalización de las telemidas y de los algoritmos de control, así como la presencia de componentes digitales en los equipos de control local de turbinas y alternadores [96,122,200,201], conllevan que un estudio realista de la respuesta y/o de la estabilidad de un SEE deba basarse necesariamente en un modelo en el cual sus componentes y subsistemas digitales estén formulados en tiempo discreto. Así los actuales sistemas de RPF son sistemas de control esencialmente híbridos, en los que las señales procedentes del regulador digital se aplican a un sistema continuo (turboalternadores) [95,116,122], debiéndose abordar su análisis y síntesis mediante la Teoría del Control Digital.

La mayor parte de las publicaciones [17,69,88,91,137,158,174] sobre el control por ordenador de los SEE se han centrado en los estudios de protección, de monitorización y en las interficies necesarias para su implementación, así como en el análisis de las posibilidades de los ordenadores en los SEE; sin embargo, sólo en algunos estudios [82,116,192,201,85,122] se ha abordado a la RPF como un problema dinámico de Control Digital Directo (DDC).

Algunos esquemas de RPF presentados anteriormente, como el EACC de Ross [157] ó la modificación de De Mello, Mills y B'Rells en 1972 [52], si bien fueron concebidos por su peculiar concepción, no requerían de una formulación específica en el dominio discreto. En un segundo paso, otros autores han estudiado de forma empírica el efecto de la discretización sobre esquemas ya desarrollados, como es el caso de Bose y Atiyah (1980) [16], que estudian la discretización del EACC para diferentes períodos de muestreo verificando la conocida degradación del funcionamiento del sistema al aumentar dicho período.

Sin embargo, otros esquemas clásicos de control han sido diseñados para su funcionamiento continuo [205, 95] sin considerar en la formulación del problema las modificaciones derivadas de su soporte en ordenador.

#### 4.5.2.- Evolución.

Dentro de los estudios de los SEE en los que se ha considerado de partida la Teoría del Control Digital Directo (DDC) cabe distinguir dos grupos:

1/ El formado por los estudios de lazos de control local de las unidades generadoras, como es el caso de Walker y Abdalla (1978) [201], que estudian el posicionamiento digital del lazo de apertura de los distribuidores.

2/ El formado por los estudios del problema de la regulación digital de P/f. Unos trabajos pioneros de esta línea fueron los de Glover y Schweppe (1972) [85] y de Bohn y Miniesy (1972) [15]. Glover y Schweppe partieron de la formulación discreta (global) de estado del SEE para obtener el RLO discreto, el cual se basaba en la siguiente estrategia de control dual:

A/ Acción Lineal:  $\underline{u}(kT) = \underline{K} \underline{x}(kT)$ , siendo  $\underline{K}$  el vector óptimo de coeficientes de realimentación obtenido a partir de la teoría del RLO. Esta acción se aplicaba sólo si la desviación entre los valores teledados en el instante de muestreo  $kT$  y los valores previstos por el modelo de diseño en el mismo instante era pequeña.

B/ Zona muerta:  $\underline{u}(kT) = \underline{u}((k-1)T)$ , siguiéndose la ley de control del instante de muestreo anterior si la actual es dudosa por haber disparidades importantes entre las previsiones del modelo de diseño y las teledadas.

El regulador de Glover y Schweppe tiene la ventaja de reducir la acción de control mediante la adaptación de la amplitud de la zona muerta a la concordancia entre las teledadas y las previsiones del modelo sobre el que se ha diseñado el RLO. Sin embargo, tiene un defecto de forma en el diseño del RLO, pues estos autores confundieron la formulación del regulador de salida solo muestreada, con la del regulador de salida muestreada y mantenida (en el Capítulo 6 insistiremos sobre las diferencias de diseño de ambos casos).

Mientras que Glover y Schweppe no evaluaron el efecto del período de muestreo, Bohn y Miniesy [15] estudiaron su efecto sobre la dinámica de un SEE constituido por un área conectada a un bus infinito, comprobando que un período de muestreo de 1 seg. permitía mantener los valores del regulador óptimo calculados en el caso continuo.

Aunque los trabajos de Glover y Schweppe y de Bohn y Miniesy fueron ampliamente referenciados, hasta finales de la década de los 70 no se ha vuelto a estudiar a la RPF formulándola en el dominio discreto.

En 1979, Kusic [122] modeló detalladamente cada una de las etapas del sistema y obtuvo la representación del SEE en el dominio de la transformada Z para estudiar la estabilidad de un SEE formado por dos centrales térmicas convencionales operando sobre una misma carga. Para ello usó una formulación que, dentro de la sencillez, distinguía claramente el problema de mezclar las variables continuas del SEE con las variables discretas de los reguladores.

Ghosh (1979) [82] partió de una sencilla discretización de la función de transferencia continua entre las desviaciones de frecuencia y las perturbaciones de carga, obteniendo una ecuación en diferencias que usó para la simulación del modelo de un área aislada de Elgerd y Fosha y así estudiar el comportamiento de reguladores PI y PID. Sin embargo, no la explotó para ajustar los coeficientes de los reguladores, los cuales iba adecuando según la excursión relativa del ACE (siguiendo la idea del EACC de Ross).

Hiyama (1982) [95] consideró, tanto en la formulación del problema como en la selección del criterio integral a minimizar, la presencia de elementos de muestreo y mantenimiento en el regulador al plantearse la optimización paramétrica de reguladores PI del ACE.

En 1983 se ha publicado un amplio trabajo de Kothari, Satsangi y Nanda [116] en el que se estudia la variación de los valores paramétricos óptimos del regulador al discretizar los clásicos reguladores PI del ACE, evaluándose la modificación de estos valores para diferentes períodos de muestreo. Para ello desarrollan una formulación discreta del SEE a partir del espacio de estado ampliado con el ACE (siguiendo la línea de Calović), restringiendo la matriz de salida de forma que sólo intervengan el ACE y su integral en el diseño del regulador. La optimización paramétrica la efectúan a partir del clásico modelo de dos áreas iguales interconectadas, llegando a la conclusión de que los valores óptimos obtenidos para el RPF continuo no lo son para el caso discreto, incluso para períodos de muestreo del orden de 1 ó 2 segundos.

Recientemente, Tripathy, Malik y Hope (1984) [192] han presentado un trabajo también orientado a la optimización paramétrica de los clásicos reguladores PI del ACE, en el que han usado la misma formulación discreta del SEE que Kothari, Satsangi y Nanda, ampliándola para el caso estocástico (demandas continuas y desconocidas).



También en 1984, Kumar y Malik [119] , al revisar trabajos anteriores [116, 95] en los que se podía recuperar la estabilidad, perdida a partir de determinadas ganancias, reduciendo el período de muestreo, han remarcado el efecto paralelo que sobre la estabilidad tienen la modificación de la ganancia de los reguladores y la del período de muestreo. En su trabajo Kumar y Malik aconsejan la selección de una frecuencia de muestreo comprendida entre 5 y 10 veces el ancho de banda, remarcando que ello puede conllevar el uso de técnicas de muestreo doble (doble adquisición de muestras por cada acción de control [120] ).

#### 4.6.- OTROS METODOS DE RPF.

##### 4.6.1.- Control no lineal.

##### 4.6.1.1.- Restricciones no lineales.

Los SEE presentan ciertas restricciones no lineales, tales como las limitaciones de generación y las zonas muertas de los detectores de velocidad, que afectan directamente al margen de estabilidad de la RPF [190, 116, 95]. Los efectos desestabilizadores de estas restricciones han sido considerados en diversos trabajos, en los cuales se ha abarcado desde la revisión de los reguladores lineales, adecuándose sus ganancias frente a la presencia de alinealidades en el SEE [116, 191, 192], hasta la inclusión de alinealidades en el propio algoritmo de RPF [95].

El efecto de la zona muerta de los detectores de velocidad ha sido especialmente estudiado por S.C. Tripathy [190, 191, 192]. Después de demostrar en un primer trabajo [190] que un regulador descentralizado y basado en una realimentación de estado logra una mejor neutralización de los efectos desestabilizadores de dicha alinealidad que el clásico regulador de acción PI sobre el ACE, ha orientado sus trabajos [191, 192] hacia la optimización paramétrica de estos reguladores PI, incluyendo la función descriptiva de la zona muerta en la formulación del regulador (véase el final del Apartado 2.2).

La limitación de velocidad en las unidades generadoras ha sido tratada de dos formas distintas. En el caso más sencillo, se han estudiado por simulación sus efectos sobre reguladores ajustados sin considerar esta alinealidad, reajustándose los parámetros de dichos reguladores en función de las variaciones dinámicas derivadas de la inclusión de los limitadores de velocidad en los modelos de simulación [116].

La segunda forma de considerar esta limitación de velocidad ha consistido en incluir un cierto grado de alinealidad en el regulador, acotándose la magnitud de las acciones de control telemandadas a las unidades según la máxima velocidad de generación de cada una de estas [95].

##### 4.6.1.2.- Estrategias no lineales.

Las estrategias de control no lineal han estado presentes en la RPF desde sus orígenes, usándose ya en la década de los 30 relés para regular las interconexiones (Apartado 4.2.2).

Aparte de las estrategias no lineales orientadas a la compensación de las propias alinealidades del SEE, se han venido desarrollando otros esquemas de control no lineal con el objetivo de mejorar diferentes aspectos de la RPF. Así, el

esquema de De Mello, Mills y B'Relis presentado anteriormente eliminaba la acción de control cuando el ACE no era lo suficientemente elevado mediante la inclusión de zonas muertas en el algoritmo de control. Por otro lado, el RLO de Glover y Schweppe incorporaba una alinealidad dinámica al suprimir la acción de control según la concordancia entre las previsiones del modelo de diseño y los valores reales telemedidos.

Recientemente se han venido aplicando a la RPF estrategias de control no lineal ya experimentadas en otros sistemas, como es el caso del controlador de estructura variable (VSC), propuesto por Bengiamin y Chan (1982) [9] para regular el SEE y basado en un control dual que conmuta entre dos ganancias  $\alpha$  y  $\beta$  (fig. 46.1) según los valores medidos de la frecuencia y de la potencia intercambiada (componentes del ACE).

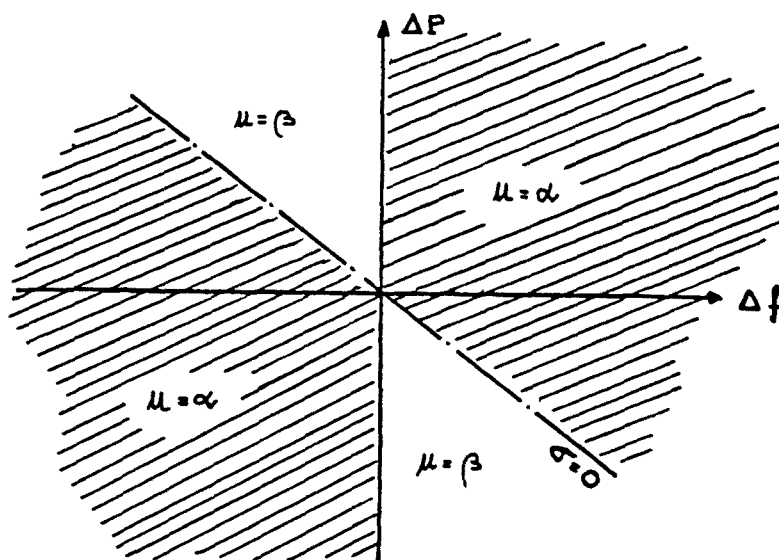


Fig. 46.1.- Control dual (bang - bang).

El control de estructura variable permite conducir al sistema en un tiempo mínimo (seleccionando la pendiente  $\sigma$ ) y con bajos ó nulos sobreimpulsos (seleccionando adecuadamente las ganancias  $\alpha$  y  $\beta$ ), lo que es de gran interés para la reducción de las oscilaciones de frecuencia en los SEE. Sin embargo, este tipo de estrategias requieren para su diseño un modelo detallado (evaluación de las trayectorias en función de  $\alpha$  y  $\beta$ ) y, además debe reducirse el tiempo de cálculo necesario para decidir la conmutación entre las dos leyes de control (ganancias), la cual debe ser más rápida que la propia dinámica del SEE a fin de que el cambio de ganancia se produzca en el instante de tiempo en que se de la combinación concreta de la potencia y de la frecuencia para la que ha sido diseñado. Concretamente, el control de estructura variable simulado por Bengiamin y Chan requiere tiempos de

conmutación del orden de 0,15 seg. para mejorar, respecto al clásico regulador PI, el transitorio del modelo de un área de Elgerd y Fosha.

Otro ejemplo de la aplicación a la RPF de estrategias ya experimentadas en otros campos es el trabajo de Huynh y Lefevre (1982) [99] en el que rehacen los trabajos de Gieseking (1963) sobre el autopilotaje de aviones proponiendo un esquema de control dual multivariable.

#### 4.6.2.- Control adaptativo.

El carácter variante con el tiempo de los SEE supone una seria restricción para el diseño de los RPF, al limitar el margen de validez de los reguladores PI de salida o de los RLO, diseñados a partir de modelos concretos.

La RPF basada en esquemas de control adaptativo pretende superar este carácter variante con el tiempo de los SEE modificando el comportamiento (adaptación) del regulador según las propias variaciones del SEE. Obviamente esto supone la detección de estas variaciones, tarea que puede tener un grado de complejidad muy diverso, yendo desde la telemida directa de determinados estados hasta la reconstrucción de éstos.

Históricamente, el primer esquema de control adaptativo aplicado a los SEE fué el EACC desarrollado por Ross (Apartado 4.2), el cual iba ajustando la ganancia del regulador según la varianza del ACE. Otro esquema con un cierto nivel de adaptación (acción dual), presentado en el apartado 4.5 es, el de Glover y Schweppe, en el cual se decidía la actuación del RLO según el grado de similitud entre las telemidas y las previsiones del modelo de diseño.

En 1973, Galiana y Glavitsch [79] se plantearon por primera vez el diseño de un RLO adaptativo que fuera modificando el esfuerzo de control según la desviación relativa de las variables de estado respecto a sus valores programados. Para ello reformularon la función de coste cuadrática

$$J = \int_0^{\infty} (\tilde{x}^T \tilde{Q}(\tilde{x}) \tilde{x} + \tilde{u}^T \tilde{R} \tilde{u}) dt \quad [46.1]$$

siendo

$$\tilde{Q}(\tilde{x}) = \tilde{Q}_0 + \epsilon \tilde{Q}_1 (\tilde{x}^T \tilde{Q}_2 \tilde{x}) \quad [46.2]$$

El término  $\epsilon \tilde{Q}_1 (\tilde{x}^T \tilde{Q}_2 \tilde{x})$  modula la matriz de penalización de las desviaciones de los estados, de forma que la acción de control sea gradualmente mayor cuando las desviaciones vayan aumentando. El precio de esta estrategia era la cantidad de reserva rodante necesaria para poder soportar elevados esfuerzos de control (generación) durante el intervalo de tiempo consiguiente a una perturbación (máximas desviaciones de las variables de estado).

El objetivo del esquema de control de Galiana y Glavitsch era el de reducir la acción de control cuando ésta fuera menos necesaria. En este sentido tiene un paralelismo con el EACC de Ross, que modifica la generación según el estado del ACE.

Al igual que Glover y Schweppe, Galiana y Glavitsch requerían un modelo para el diseño del RLO. La tendencia actual se orienta hacia el diseño de esquemas que adapten la estrategia de control a la situación del SEE, pero sin que sea preciso, a priori, un modelo detallado de éste, al ser el propio algoritmo de control quien se encarga de ir identificando al SEE y elaborando un modelo en tiempo real. Así, por ejemplo, Kanniah et al. [112], han experimentado satisfactoriamente un esquema de control adaptativo soportado por un uP de 8 bits (el 6800 de Motorola) en un pequeño SEE accionado por un microalternador de 3 KW. El objetivo de este esquema era la minimización de la varianza del ACE (equivalente al objetivo del EACC),

$$\sum_{i=1}^N (\text{ACE}_i)^2, \quad N = \text{número de muestras}$$

a partir de la ley de control,

$$u(t) = \frac{1}{b_1} (a_1 y(t) + \dots + a_n y(t-n) - b_2 u(t-1) - \dots - b_n u(t-n+1)), \quad [46.3]$$

donde los coeficientes  $a_i$  y  $b_i$  se ajustan a partir de los valores paramétricos del SEE identificados en tiempo real (fig. 46.2).

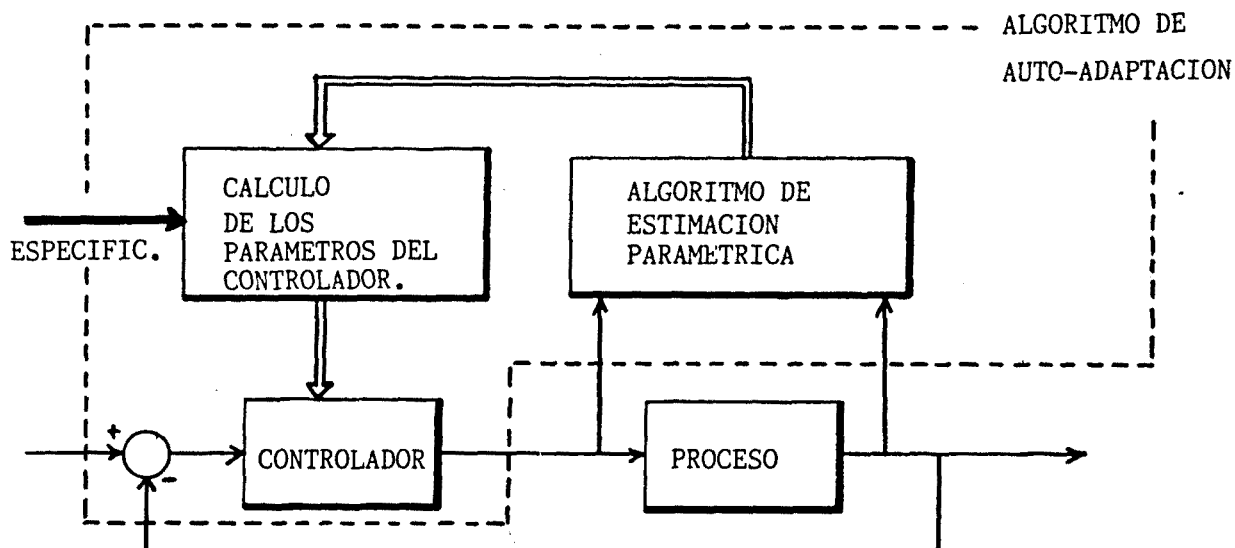


Fig. 46.2.- Diagrama de bloques de un controlador de parámetros adaptativos.

Este tipo de reguladores de parámetros adaptativos (auto-ajustables) [5] se están aplicando actualmente al estudio [108,50] de reguladores de presión y tempe-

ratura en centrales térmicas convencionales y nucleares. Sin embargo, para su aplicación en tiempo real a la RPF [108] deben reducirse los tiempos de cálculo necesarios para la identificación del SEE y para el ajuste de los parámetros del regulador (que en el caso del RLO pueden llegar a los 150 minutos [25]).

Irving et al (1979) [106] han experimentado una segunda línea de control adaptativo sobre un modelo a escala de "Electricité de France", consistente en el control adaptativo sobre un modelo de referencia. El esquema de funcionamiento de este tipo de control adaptativo puede verse en la fig. 46.3,

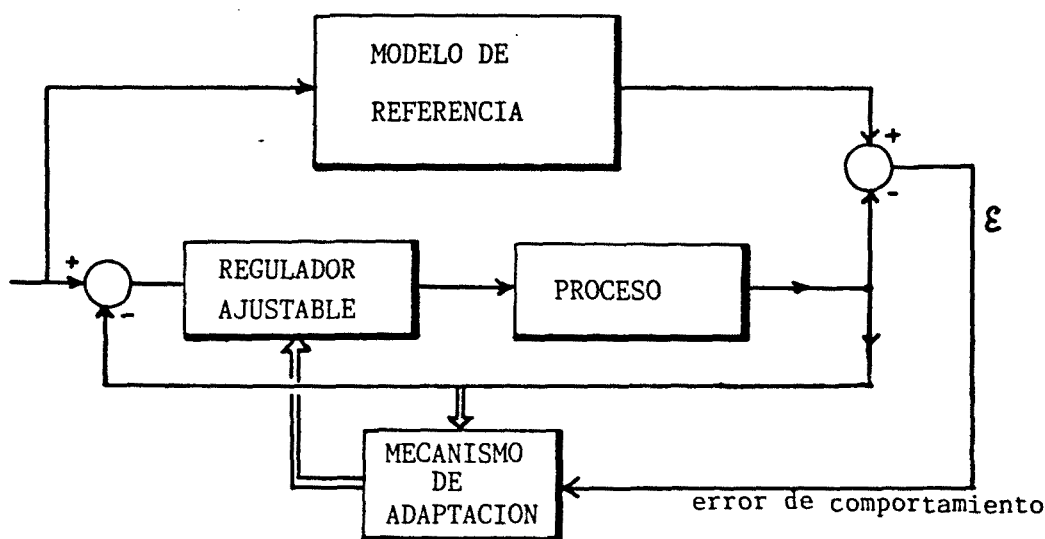


Fig. 46.3.- Regulador adaptativo con modelo de referencia en paralelo.

El objetivo del mecanismo de adaptación es hacer que el error  $\epsilon$  entre la salida del modelo de referencia en paralelo y la del circuito real tienda a cero, con lo que se asegura que el modelo de referencia "conduzca" al sistema físico. Según el tipo de perturbaciones a que se vea sometido el SEE, el modelo de la figura anterior debe ampliarse con un modelo de referencia en serie a fin de evitar acciones de control desproporcionadas [106, 107].

Al igual que los auto-ajustables, los esquemas de adaptación basados en modelos de referencia también se están aplicando al estudio de reguladores de centrales térmicas [107].

Los dos esquemas de las figs. 46.2 y 46.3 adolecen del mismo defecto para su aplicación a la RPF: el tiempo de cálculo requerido para la adaptación. Sin embargo, en aspectos parciales de la RPF que puedan ser controlados de un modo más lento, como es el caso de la anulación del ACE acumulado al cabo de una hora, las estrategias de control adaptativo ya están dando resultados satisfactorios [193].

#### 4.7.- CONCLUSIONES.

Las estrategias de RPF existentes abarcan un amplio espectro de alternativas, algunas de las cuales han sido ampliamente experimentadas mientras que otras aún están en fase de discusión y experimentación. Dentro de estas últimas se encuentran la mayoría de los enfoques no convencionales de la RPF y, en particular, el RLO. Si bien las mejoras dinámicas ofrecidas por estas estrategias han sido ampliamente probadas en los diferentes trabajos expuestos en este capítulo, hay una serie de limitaciones prácticas, como son el tiempo de cálculo requerido para su aplicación en tiempo real o la cantidad de telemidas necesarias para su soporte, que han venido reteniendo su aceptación y uso por parte de las compañías eléctricas. A pesar de ello, se han desarrollado aplicaciones puntuales de estas estrategias avanzadas en los SEE [193, 196, 19], habiendo cada vez más autores directamente relacionados con compañías que consideran su implementación [84, 85, 195, 196, 50].

Los problemas originales para la aplicación del RLO de P/f se fueron solucionando a nivel teórico mediante la descomposición del SEE en un conjunto de áreas con un RLO descentralizado en cada una de ellas [26, 171, 8, 14, 197] (lo que, además de reducir las telemidas, reducía también el tiempo de cálculo requerido por el control) y con el uso de estimadores de estado [153, 56, 123, 36]. Actualmente la polémica se centra entorno a la contrastación entre las mejoras dinámicas del RLO y su coste de instalación, el cual tiene la doble componente del propio coste de las telecomunicaciones y del coste del soporte informático preciso para su funcionamiento con un tiempo de cálculo aceptable. No obstante, dado que hay otros aspectos del SEE como son el control de la seguridad y el reparto óptimo de cargas que también pueden mejorarse con una ampliación del número de telemidas [29], y que el aumento del soporte informático, tanto en hardware como en la concepción de algoritmos más rápidos, es también necesario para los nuevos programas de seguridad (previsión de contingencias) [154], estos costes no serían sólo atribuibles a la implementación del RLO de P/f, lo que los hace más viables.

En el diseño del RLO, el cálculo de las ganancias supone la adecuada penalización de las desviaciones de los estados del SEE y de las del esfuerzo de control y, por tanto, implica la elección de las matrices  $\underline{Q}$  y  $\underline{R}$ , tema sobre el que se dispone de escasa información. Repasando la bibliografía se observa que, en la mayoría de los casos, se ha definido a la matriz  $\underline{Q}$  como  $k\underline{I}$ , no disponiéndose de un estudio detallado del efecto de variadas elecciones de los elementos de dicha matriz.

Por otro lado, la adecuación del esfuerzo de generación de las unidades se ha abordado de dos formas diferentes: una de ellas, de acción lineal, se basa en una adecuada ponderación de la matriz  $\underline{R}$  del criterio integral, penalizándose

el esfuerzo de control en concordancia a las posibilidades de generación y repartiéndose el esfuerzo de generación del área con la matriz de participación  $\mathcal{Y}$ . La otra, de acción alineal, consiste en la inclusión de los limitadores de velocidad del modelo, comprobándose por simulación su efecto sobre el RLO diseñado. Sin embargo, del estudio de la bibliografía se detecta un cierto grado de desconexión entre la limitación del esfuerzo de control del RLO y el funcionamiento concreto de los elementos de control local de las unidades generadoras. Así, por ejemplo, aunque Calović ha incluido al lazo de realimentación transitoria en la formulación, no se ha abordado la posibilidad de reducir el esfuerzo de control penalizando adecuadamente en la matriz  $\mathcal{Q}$  las desviaciones de la variable de salida del lazo de realimentación transitoria ("dash-pot"), la cual tiene un efecto de "frenado" sobre la velocidad de generación.

Otro aspecto no suficientemente analizado hasta ahora es el derivado del hecho de que en los estudios del RLO descentralizado se parte de una estructura del SEE en la que cada una de las áreas dispone de su propio RLO, no habiéndose evaluado las prestaciones de un SEE en que sólo un área o un conjunto de áreas con baja capacidad de generación dispongan del RLO, limitándose el resto de las áreas al uso del clásico regulador PI de salida. Por último, en los estudios del RLO descentralizado se ha venido usando la estructura de área autónoma de Calović, en la que sólo se precisa la telemida de los estados del área y de los de sus interconexiones, pero no se ha considerado la posibilidad de incluir el modelo de la carga externa, de forma que un área de baja capacidad de generación pueda conjugar, durante el transitorio, su propia generación con la energía cinética cedida por las masas rodantes del resto del SEE (la cual puede ser poco importante respecto a la capacidad del resto del SEE, pero mucho para el área de baja capacidad de generación).

Estos aspectos de diseño del RLO (efecto de las penalizaciones  $\mathcal{Q}$ , limitación del esfuerzo de generación penalizando la realimentación transitoria y aplicación del RLO sólo a un área de baja capacidad), serán analizados en el Capítulo 5.

Por otra parte en 1972 [15, 85] se empezó a estudiar la discretización del RLO (aunque durante esta década los problemas principales se centraban entorno al RLO continuo), pero no ha sido hasta los últimos años [122, 95, 116, 192, 178, 119] en que se ha empezado a considerar seriamente la necesidad de operar con modelos más realistas que tuvieran en cuenta el aspecto discreto de las telemidas y de los reguladores. En particular, los problemas de estabilidad debidos al asincronismo entre las consignas de los programas de seguridad, de RPF y del ED han sido abordados por diferentes autores tratanto de reducir el tiempo de cálculo requerido para los más lentos (seguridad y economía) [32, 154, 29, 30] a fin de que pudieran dar en tiempo real sus consignas al programa de RPF. Con ello el problema del RLO discreto, que hasta ahora como máximo se venía tratando como un problema



de muestreo simple, pasa a ser un problema más complejo, en el cual deben considerarse tanto los retardos entre las telemidas y los cálculos de los programas de los centros de dispatching como la posibilidad de que el funcionamiento conjunto de los programas de seguridad, de economía y de RPF, dilate el período de muestreo obligando a los centros de control a enviar consignas a las unidades durante intervalos submúltiplos del período de muestreo a fin de que no se pierda la estabilidad del proceso por desatención del control.

Estos problemas asociados con la implementación digital del RLO descentralizado serán analizados en el Capítulo 6.

## 5.- DISEÑO DEL RLO CONTINUO DE AREA AUTONOMA.

### 5.1.- INTRODUCCION.

En el presente capítulo se analizan ciertos aspectos relacionados con el diseño del RLO continuo descentralizado, no suficientemente tratados hasta la fecha, consistentes en: el efecto de diferentes y variadas penalizaciones de la matriz  $Q$ , la limitación del esfuerzo de generación penalizando la realimentación transitoria de los reguladores de velocidad de las unidades generadoras y la aplicación del RLO sólo a un área de baja capacidad de generación.

Después de rehacer la formulación de Calović [26] y Siljak [171] del RLO descentralizado, adecuándola a la propuesta de Elgerd y Fosha [65] para el modelado de las interconexiones y considerándo la práctica habitual de no forzar la generación si las variaciones de carga no son lo suficientemente importantes, se estudia la importancia de la carga externa en el diseño del RLO descentralizado, comparándose, tanto analíticamente como por simulación la estructura original de Calović [26] (en la que sólo se requieren los estados propios del área y los de sus interconexiones) con la estructura ampliada con un modelo de la carga externa [94]. Dado que en esta Tesis se estudia la aplicación del RLO sólo a un área de reducida capacidad respecto al resto del SEE, la energía cinética cedida por las masas rodantes externas al área puede ser comparativamente importante respecto a la capacidad de generación de ésta, por ello se ha planteado la posibilidad de que el RLO de este área pueda actuar reduciendo las desviaciones de la frecuencia del área externa, consecuencia de la cesión de energía cinética, y de que pueda conjugar la propia generación del área con esta energía cedida.

En segundo lugar, a partir de la formulación rehecha del RLO descentralizado, se diseña al RLO del Area 1 del modelo desarrollado en el Capítulo 2 (ponderada según la capacidad de generación de la zona catalana), incluyéndose al lazo de realimentación transitoria de las unidades generadoras.

Finalmente, se presentan los resultados de un exhaustivo trabajo de simulación en el que se amplian los resultados ofrecidos por diversos autores [25,26, 153, 76, 197] sobre el efecto que tienen en la dinámica y en la calidad de funcionamiento del SEE las distintas penalizaciones (en la matriz  $Q$ ) de las desviaciones de las variables del modelo de diseño del RLO descentralizado. Un aspecto adicional de interés de este trabajo es que, al operarse con un modelo de dos áreas interconectadas distintas diseñándose el RLO sobre la menor capacidad (normalmente se estudian los efectos de aplicar el RLO a todas las áreas del modelo [26,145,8,197]), se obtendrá una primera previsión del comportamiento del SEE interconectado en el supuesto de que sólo una compañía (o un grupo reducido de ellas) se proponga implementar al RLO para la RPF.

Las conclusiones obtenidas via simulación no pretenden tener un carácter definitivo, siendo una ampliación de los datos presentados en los trabajos que se han publicado, de forma que los centros de control, responsables últimos de la fijación de las penalizaciones, dispongan de una información que les permita prever el efecto cualitativo de distintas formas de penalización.

## 5.2.- BASES TEORICAS

5.2.1.- El Regulador Lineal Optimo [1,44,182]

Los métodos convencionales de diseño de sistemas de control parten de un conjunto de especificaciones dinámicas del transitorio ( $f$ ,  $w_0$ ,  $t_s$ , etc.), de fácil aplicación para sistemas de una sola entrada y una sola salida (SISO). Pero cuando no es fácil la especificación del problema a partir de parámetros del transitorio, bien sea porque sólo interese orientar el esfuerzo de control hacia una determinada característica (por ejemplo, el tiempo que tarde el error en anularse), ó por la propia complejidad del sistema (varias entradas y salidas - MIMO), la solución más cómoda es la determinación de un criterio de funcionamiento (o índice de funcionamiento) que evalúe la "bondad" de la respuesta. Los criterios de funcionamiento convencionales sólo consideran a una variable del sistema (normalmente el error), basándose la optimización de la dinámica de ésta en la minimización del criterio integral, pero sin restringir la dinámica de ninguna variable.

La teoría del Regulador Lineal Optimo (RLO), o del Regulador Lineal Cuadrático (LQR, en inglés), parte de un índice de comportamiento cuadrático.

$$J = \int_0^{\infty} (\underset{\sim}{x}^T \underset{\sim}{Q} \underset{\sim}{x} + \underset{\sim}{u}^T \underset{\sim}{R} \underset{\sim}{u}) dt \quad [52.1]$$

basado en la formulación general de estado,

$$\underset{\sim}{\dot{x}}(t) = \underset{\sim}{A} \underset{\sim}{x}(t) + \underset{\sim}{B} \underset{\sim}{u}(t) \quad (*) \quad [52.2]$$

donde,

$\underset{\sim}{x}$  = vector de estado ( $n \times 1$ )

$\underset{\sim}{u}$  = vector de control ( $m \times 1$ )

$\underset{\sim}{A}$  = matriz de planta ( $n \times n$ )

$\underset{\sim}{B}$  = matriz de control ( $n \times m$ )

[(\*) Nota.- Por simplicidad suele expresarse a  $\underset{\sim}{x}(t)$  y a  $\underset{\sim}{u}(t)$  como  $\underset{\sim}{x}$  y  $\underset{\sim}{u}$ , en todo caso se sobreentiende que tanto  $\underset{\sim}{x}$  como  $\underset{\sim}{u}$  son funciones del tiempo.]

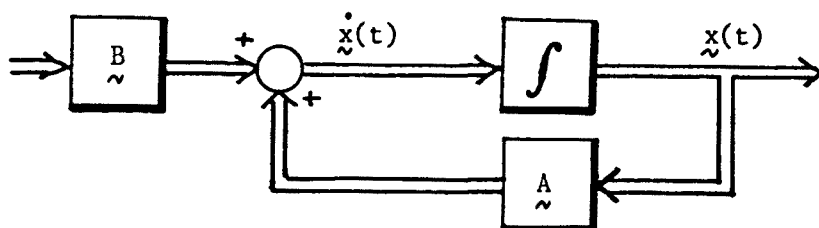


Fig. 52.1

en el cual se puede limitar tanto la dinámica de los estados del sistema ( $\tilde{x}$ ) como del esfuerzo de control ( $\tilde{u}$ ).

Recordando que la diferencia entre el problema servo y el problema regulador radica en la forma de la consigna, variable para el servo y fija para el regulador (consigna cero en un modelo incremental),

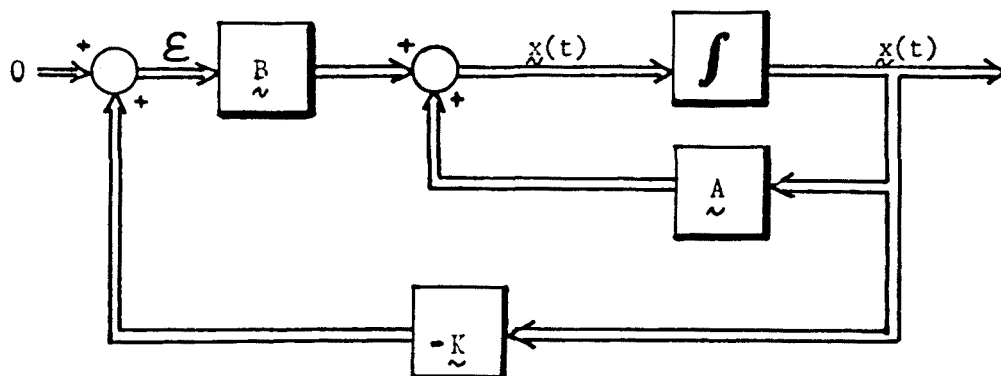


Fig. 52.2

podemos notar que para el caso del regulador, el error de control  $\tilde{\mathcal{E}}$  coincide con las variables de estado  $\tilde{x}$ , por lo que en realidad la expresión [52.1] responde a un índice del error, definido éste como la suma ponderada (a través de la matriz de ponderación o de penalización  $Q$ ) de los cuadrados de las variables de estado.

La inclusión del término cuadrático  $\tilde{u}^T R \tilde{u}$  tiene la finalidad de asegurar que la minimización del error de los estados  $\tilde{x}$  no se base en un esfuerzo de control  $\tilde{u}$  (fig. 52.2) desproporcionado (excesiva energía para amplificar en el bloque  $\tilde{K}$  los estados  $\tilde{x}$ ).

El problema de diseño del RLO radica en obtener la ley de control óptimo

$$\tilde{u}^{\circ} = - \tilde{K}^{\circ} \tilde{x} \quad [52.3]$$

que minimice a la expresión [52.1]. Según demostró Kalman en 1960, la solución de este problema existe y es única si se cumplen las siguientes condiciones:

- 1/ Que el par  $(\tilde{A}, \tilde{B})$  sea completamente controlable.
- 2/ Que  $\tilde{R}$  y  $\tilde{Q}$  sean matrices simétricas y definidas positivas.
- 3/ Que el par  $(\tilde{A}, \tilde{D})$ , siendo  $\tilde{Q} = \tilde{D}\tilde{D}^T$ , sea completamente observable.

La primera condición es un prerrequisito básico de diseño: la controlabilidad del sistema. La tercera condición supone una limitación práctica a la selección de los elementos de la matriz  $\tilde{Q}$ , de forma que la calidad exigida al control sea coherente con las posibilidades del sistema (matriz  $\tilde{A}$ ).

La condición 2 está relacionada con la solución del problema, forzado a que ésta sea estable via Lyapunov.

En la práctica se suelen escoger a los elementos de  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$  de forma que éstas sean matrices diagonales, dada la pérdida de intuición que supone la penalización de los productos cruzados  $(x_i x_j)$  entre las variables de estado. Si, por otro lado, se toman valores positivos para los elementos de las matrices de penalización  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$ , el teorema de Silvester asegura el cumplimiento automático de la condición 2.

La determinación de la ley de control óptimo [52.3] presupone el cálculo de la matriz  $\tilde{P}$  de Riccati (Apéndice D), la cual satisface la ecuación:

$$\tilde{0} = \tilde{Q} + \tilde{A}^T \tilde{P} + \tilde{P} \tilde{A} - \tilde{P} \tilde{B} \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}, \quad [52.4]$$

con la cual el vector  $\tilde{K}^{\circ}$  de ganancias de realimentación óptima es:

$$\tilde{K}^{\circ} = \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} \quad [52.5]$$

Anderson y Moore [ 1 ] proponen una modificación del clásico criterio integral de la expresión [52.1], cambiándolo por

$$J = \int_0^{\infty} e^{2\alpha_0 t} (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + \tilde{u}^T \tilde{R} \tilde{u}) dt \quad [52.6]$$

el cual, con los cambios de variable:

$$\begin{aligned}\hat{\underline{x}} &= e^{\alpha_0 t} \underline{x} \\ \hat{\underline{u}} &= e^{\alpha_0 t} \underline{u}\end{aligned}\quad [52.7]$$

se convierte en la expresión clásica 52.1

$$J = \int_0^{\infty} (\hat{\underline{x}}^T \underline{Q} \hat{\underline{x}} + \hat{\underline{u}}^T \underline{R} \hat{\underline{u}}) dt \quad [52.8]$$

(asimismo se puede recuperar la formá clásica [52.1] con los cambios

$$\begin{aligned}\hat{\underline{Q}} &= e^{2\alpha_0 t} \underline{Q} \\ \hat{\underline{R}} &= e^{2\alpha_0 t} \underline{R}\end{aligned}\quad [52.9]$$

llegándose entonces a

$$J = \int_0^{\infty} (\underline{x}^T \hat{\underline{Q}} \underline{x} + \underline{u}^T \hat{\underline{R}} \underline{u}) dt \quad [52.10]$$

La inclusión de la exponencial positiva en el integrando de [53.6] obliga a que  $\underline{x}(t)$  tenga un grado de amortiguamiento superior a  $e^{-\alpha_0 t}$ , a fin de que la integral  $J$  tienda a cero cuando el tiempo tienda a infinito. De esta forma se puede fijar una grado mínimo de estabilidad en el sistema, acotado solamente por una condición de controlabilidad que se verá más adelante.

La modificación del criterio integral según la propuesta de Anderson y Moore supone algunos cambios respecto a la formulación clásica del RLO. A partir de los cambios de variable [52.7], tenemos:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\underline{x}}}(t) &= \frac{d}{dt} (e^{\alpha_0 t} \underline{x}(t)) = \\ &= \alpha_0 e^{\alpha_0 t} \underline{x}(t) + e^{\alpha_0 t} \dot{\underline{x}}(t) = \\ &= \alpha_0 \hat{\underline{x}}(t) + e^{\alpha_0 t} \underline{A} \underline{x}(t) + e^{\alpha_0 t} \underline{B} \underline{u}(t) = \\ &= (\underline{A} + \alpha_0 \underline{I}) \hat{\underline{x}}(t) + \underline{B} \hat{\underline{u}}(t) \quad \Rightarrow \\ &\Rightarrow \dot{\hat{\underline{x}}}(t) = (\underline{A} + \alpha_0 \underline{I}) \hat{\underline{x}}(t) + \underline{B} \hat{\underline{u}}(t)\end{aligned}\quad [52.11]$$

que será la nueva ecuación del sistema modificado para aplicar [52.8].

El vector de control óptimo [52.3] será ahora, deshaciendo las ecuaciones [52.7],

$$\begin{aligned}\underline{u}(t) &= -\underline{K}^{\circ} \underline{x}(t) = -\underline{K}^{\circ} e^{-\alpha_0 t} e^{\alpha_0 t} \underline{x}(t) = \\ &= -\underline{K}^{\circ} e^{-\alpha_0 t} \hat{\underline{x}}(t) = e^{-\alpha_0 t} \hat{\underline{u}}^{\circ}(t)\end{aligned}\quad [52.12]$$

siendo  $\hat{u}^{\circ}(t)$  el vector de control óptimo obtenido mediante el criterio [52.8] (equivalente a [52.6]) y  $\tilde{u}^{\circ}(t)$  el vector de control óptimo deducido a partir de las ecuaciones de estado sin modificar (y, por tanto, el físicamente aplicable al sistema).

Según la ecuación [52.11], las condiciones anteriores de controlabilidad y observabilidad quedan modificadas, siendo ahora que el par  $(\tilde{A} + \alpha_0 \tilde{I}, \tilde{B})$  sea completamente controlable y que el par  $(\tilde{A} + \alpha_0 \tilde{I}, \tilde{D})$  sea completamente observable.

La ecuación de Riccati también queda modificada según [52.11], siendo ahora,

$$\tilde{Q} = \tilde{Q} + \tilde{P} (\tilde{A} + \alpha_0 \tilde{I}) + (\tilde{A} + \alpha_0 \tilde{I})^T \tilde{P} - \tilde{P} \tilde{B} \tilde{R}^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} \quad [52.13]$$

Aparte del aumento de estabilidad que supone la aplicación del criterio integral de Anderson y Moore (según el término  $e^{-2\alpha_0 t}$ ), este criterio también reduce, respecto al criterio cuadrático clásico de [52.1], la sensibilidad del sistema a las variaciones de los parámetros de la planta .

## 5.2.2.- Control de sistemas de gran escala. [171,47,49,127,160,161,214,216,217]

### 5.2.2.1.- Introducción

Cuando aumenta el tamaño y, consecuentemente, la complejidad del sistema, la aplicación de esquemas de control donde tanto la información como los cálculos están centralizados en un punto concreto de la estructura, es extremadamente costosa, dada la dificultad de modelación y la cantidad de cálculos necesarios para elaborar el control.

Los problemas asociados a los sistemas grandes y complejos (sistemas de gran escala, LSS en inglés), como son la dificultad de obtener y operar con la suficiente precisión con un modelo global, el tiempo de cálculo necesario para regular la forma integrada a todo el sistema y los costes del telecontrol, pueden superarse mediante técnicas de control descentralizado, basadas en estructuras más o menos jerárquicas en las cuales hay unos reguladores "locales" que se encargan del control de los distintos subsistemas, supervisados por reguladores de más alto nivel (coordinadores). De esta forma los problemas de telemedida, de modelación y de cálculo se centran en cada subsistema, requiriendo el coordinador un número reducido de informaciones de las interconexiones entre ellos.

El control de sistemas de gran escala abandona la filosofía de tratar al sistema como un solo bloque integrado, desagregándolo en subsistemas de menor complejidad. Obviamente una exposición detallada de las técnicas de control de LSS requeriría una extensión que no estaría en concordancia con los objetivos de esta Tesis. En el presente subapartado de Bases Teóricas, se presentará de forma cualitativa el problema de la reducción y el de la descentralización de modelos,



el de la estabilidad y el del control, enfatizando en aquellos puntos de mayor interés para el desarrollo de los restantes apartados de esta Tesis.

#### 5.2.2.2.- Reducción del modelo.

Dado el modelo de un sistema complejo, el problema se centra en obtener unos modelos más sencillos y operables sin que la pérdida de precisión suponga serias restricciones a los objetivos del control. A grandes líneas se puede distinguir entre dos tipos de descomposición: la física y la matemática, según que los subsistemas tengan sentido físico por si mismos (como es el caso de un SEE descompuesto en áreas) ó no. Aunque los dos métodos básicos de simplificación de modelos que se van a exponer a continuación no están rígidamente ligados al aspecto físico ó matemático de los subsistemas, la metodología concreta hace más aconsejable el uso de uno (método de agregación) para la descomposición del sistema en subsistemas matemáticos y al otro (métodos perturbacionales) en subsistemas físicos.

#### A/ Métodos de agregación:

Estos métodos parten de la hipótesis de que un sistema puede simplificarse, mediante la reducción de sus ecuaciones de estado, a una formulación aproximada que respete las características de interés del sistema.

Si denominamos  $S_1$  al conjunto de ecuaciones de un sistema y  $S_2$  a otro conjunto más reducido que describa al mismo sistema, entonces  $S_2$  es un modelo agregado de  $S_1$ .

Las condiciones para que el sistema desagregado  $S_1$ , descrito por

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B} \underline{u}(t) \quad [ 52.14 ]$$

pueda ser representado por el sistema agregado  $S_2$ ,

$$\dot{\underline{z}}(t) = \underline{F} \underline{z}(t) + \underline{G} \underline{u}(t) \quad [ 52.15 ]$$

es que

$$\underline{z}(t) = \underline{C} \underline{x}(t) \quad , \quad \forall t. \quad [ 52.16 ]$$

Este requisito, denominado de "exactitud dinámica", puede resumirse por las ecuaciones

$$\begin{aligned} \underline{FC} &= \underline{CA} \\ \underline{G} &= \underline{CB} \end{aligned} \quad [ 52.17 ]$$

La exactitud dinámica entre dos modelos supone que  $z(t)$  sea una combinación lineal de los modos de  $x(t)$ . A fin de operar con modelos agregados simplificados, lo más habitual es adecuar a la matriz  $C$  de forma que  $x(t)$  esté formado por una combinación de los modos dominantes de  $x(t)$ . Esta última consideración restringe el conjunto de matrices  $C$  que pueden ser consideradas como "matrices de agregación" de un sistema.

La formulación presentada responde a una descripción general del problema, el cual puede ser resuelto de formas muy diferentes. El método de Bengtsson y Lindahl [10] presentado en el apartado 4.4.3 es un método de agregación basado en la aproximación del sistema por sus autovalores dominantes.

El principal peligro de agregar a un sistema a partir de los modos dominantes es el de despreciar algún modo cuyo residuo sea pequeño, pero que pueda interferir desestabilizando al sistema. Por este motivo Siljak [171] propone un método de agregación basado en las funciones de Lyapunov de los subsistemas y de sus interconexiones, de forma que el modelo agregado mantenga el índice de estabilidad del modelo amplio. Sin embargo, el método de agregación de Siljak está más orientado al análisis de estabilidad que a la síntesis de controladores.

#### B/ Métodos perturbacionales.

Estos métodos parten de la suposición de que ciertas interconexiones entre los subsistemas puedan ser obviadas, considerándolas como un elemento de perturbación dentro de la formulación de cada subsistema.

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = \tilde{A}_i \tilde{x}_i(t) + \tilde{B}_i u_i(t) + \underbrace{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \tilde{E}_{ij} \tilde{x}_j(t)}_{\text{término de perturbación en el subsistema } i.} \quad [52.18]$$

Aunque no está comunmente aceptada una nomenclatura para distinguir los diferentes métodos perturbacionales de simplificación de modelos, tomaremos la propuesta por Sandel et al. [161], dado su significado físico.

#### B.1/ Acoplamiento débil :

Los métodos perturbacionales basados en técnicas de acoplamiento débil parten del concepto de perturbación no singular (términos de perturbación a la derecha de la ecuación diferencial), siendo fácilmente aplicables a sistemas representados por matrices dispersas con fuerte dominancia diagonal.

La formulación típica es

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{x}}_1(t) \\ \dot{\tilde{x}}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & \epsilon A_{12} \\ \epsilon A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1(t) \\ \tilde{x}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \quad [52.19]$$

siendo  $\epsilon$  un número pequeño y positivo (término de perturbación). Notesé que para  $\epsilon = 0$  los dos subsistemas quedan desacoplados.

La técnica más habitual de simplificación de sistemas débilmente acoplados en estudios de estabilidad parte de un desacoplo entre ellos ( $\epsilon = 0$ ), evaluándose y acotándose (vía Lyapunov) la nueva zona de estabilidad del modelo simplificado. En problemas de síntesis de correctores la técnica de diseño sigue los dos siguientes pasos:

- 1/ Desacoplo ( $\epsilon = 0$ ) de los subsistemas y diseño de un regulador autónomo para cada uno de ellos.
- 2/ Si la calidad del control obtenido con la simplificación  $\epsilon = 0$  no es suficiente, se diseña un coordinador que controle las interconexiones entre subsistemas.

El paso 1/ simplifica enormemente la síntesis al no ser necesario (como ocurre en los métodos de agregación) operar con la formulación global del LSS. Este aspecto es de gran interés para el estudio de SEE, dada su enorme complejidad y la dificultad de elaborar un modelo global.

#### B/ Acoplamiento fuerte:

Se dice que un sistema está fuertemente acoplado cuando el grado de interconexión entre los subsistemas es tal que no se puede desacoplarlos despreciando los términos de interconexión. En este caso la simplificación del modelo suele basarse en una descomposición del sistema en autovalores lentos y rápidos,

$$\dot{\tilde{x}}_1 = A_{11} \tilde{x}_1 + A_{12} \tilde{x}_2 \quad (\text{modos lentos}) \quad [52.20]$$

$$\epsilon \dot{\tilde{x}}_2 = A_{21} \tilde{x}_1 + A_{22} \tilde{x}_2 \quad (\text{modos rápidos}) \quad [52.21]$$

siendo  $\epsilon$  un número ajustado convenientemente a un valor pequeño y positivo (y asociado a las constantes de tiempo más pequeñas), de forma que se pueda considerar al término  $\epsilon \dot{\tilde{x}}_2$  como un elemento perturbacional en la formulación.

Al igual que en el caso anterior, la solución clásica del problema parte de la anulación del elemento perturbacional (aproximación de orden cero),

$$\tilde{x}_2 = -A_{22}^{-1} A_{21} \tilde{x}_1$$

$$\dot{\tilde{x}}_1 = (A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}) \tilde{x}_1 \quad [52.22]$$

Si bien tanto los métodos de agregación como los perturbacionales de acoplamiento fuerte simplifican al modelo a partir de sus autovalores dominantes, en el primer caso el modelo agregado no suele tener significado físico, aunque lo tengan los elementos  $\tilde{z}$  de [52.15] pues las condiciones [52.17] suelen llevar a una formulación puramente matemática.

Los métodos perturbacionales de acoplamiento fuerte parten de una aproximación física del sistema (por ejemplo, de su identificación con filtros paso bajo y paso alto a la salida), siendo una sistematización de la aproximación habitual de despreciar a las constantes de tiempo más rápidas del sistema ( $\mathcal{E} = 0$ ). Así, en el caso de los SEE, la ecuación [52.20] correspondería a la dinámica de los reguladores de velocidad (modos lentos), mientras que la ecuación [52.21] correspondería a la de los reguladores de tensión (de dinámica más rápida). Con la aproximación  $\mathcal{E} = 0$  se desprecia la dinámica de los reguladores de tensión, convirtiéndose la ecuación [52.21] en una relación puramente algebraica.

Como puede verse en [161], una de las ventajas de descomponer al sistema por el método de acoplamiento fuerte es la posibilidad de diseñar controladores que regulen por separado a los modos rápidos y a los lentos (con diferentes cadencias de muestreo).

### 5.2.2.3.- Descentralización.

Una vez descompuesto un sistema en un conjunto de subsistemas, hay que considerar de que forma se aplica la acción de control  $\tilde{u}$  sobre la estructura y de que forma interaccionan los subsistemas sobre las salidas de control. Si los subsistemas tienen una entrada centralizada (fig. 52.3 (a)), será preciso aplicar una transformación lineal

$$\tilde{x} = T_1 \hat{x} \quad [52.23]$$

que descentralice a esta entrada (fig. 52.3 (b)) a fin de poder aplicar un control autónomo  $\tilde{u}_i$  a cada subsistema.

El mismo razonamiento puede hacerse respecto a las salidas centralizadas (fig. 52.3 (c)) que requieren otra transformación lineal  $T_2$  para su descentralización (fig. 52.3 (d)).

Es normalmente difícil, y en muchos casos imposible, encontrar dos transformaciones lineales que descentralicen simultáneamente a las entradas y a las salidas. Sin embargo, muchos sistemas, y entre ellos los SEE, pueden ser representados de partida por modelos cuyas entradas y salidas ya están físicamente descentralizadas (recuerdese, por ejemplo, al modelo elaborado en el Cap. 2).

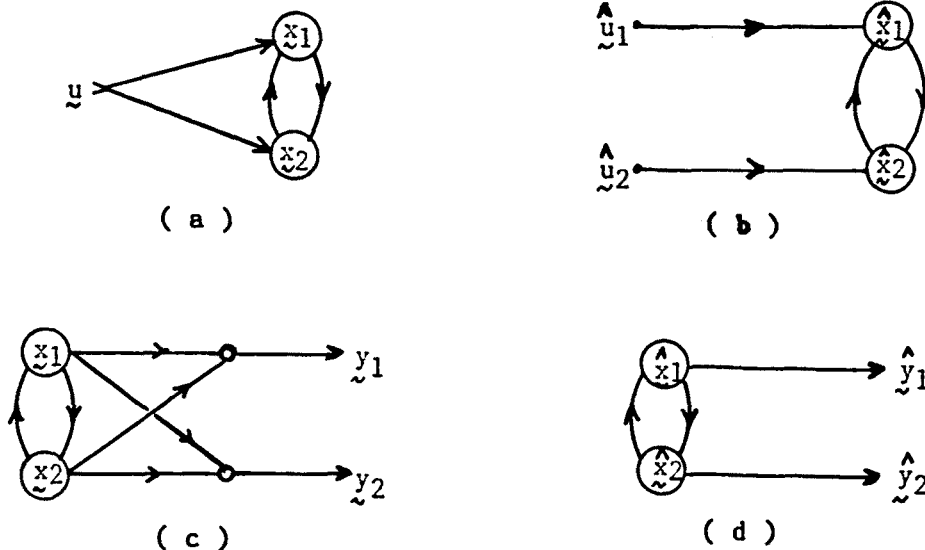


Fig. 52.3

#### 5.2.2.4.- Estabilidad

Dado que en el modelo obtenido en el Capítulo 2, la estabilidad de cada subsistema y la estabilidad de su interconexión ya han sido verificadas en el proceso de elaboración, no será preciso aplicarle técnicas de análisis de estabilidad.

A grandes rasgos hay tres enfoques básicos para el análisis de la estabilidad de los LSS:

- 1/ El primero de ellos, desarrollado por Siljak, consiste en estudiar por separado (vía Lyapunov) la estabilidad de cada subsistema y la de las interconexiones (estabilidad conectiva). Michel y Miller [127], con una visión menos conservadora que Siljak, han modificado el método considerando que la estabilidad del LSS es compatible con un cierto grado de inestabilidad en algunos subsistemas, ya que éste puede ser compensado por las interconexiones.
- 2/ El segundo enfoque [161] de la estabilidad no entra en detalle de los subsistemas, tratanto el problema desde un punto de vista global (entrada-salida). Dentro de este enfoque hay dos grandes líneas. La primera, desarrollada por Davison [45, 46] se centra en el estudio de la estabilización de los LSS a partir de reguladores descentralizados evaluando la posibilidad de que algunos modos del sistema global no puedan ser regulados por éstos. La segunda línea, desarrollada por Araki [3] y Michel [124] se orienta al estudio de la estabilidad en presencia de alinealidades en el sistema.
- 3/ El tercer enfoque, debido a Davison [47], es el expuesto en la sección 4.4.5, con el cual se puede evaluar la estabilización de un SEE a partir de tanteos empíricos de las ganancias de los diferentes subsistemas interconectados.

### 5.2.2.5.- Control descentralizado.

El control de los LSS, al igual que el del resto de sistemas, puede enfocarse, según los objetivos, desde alternativas muy distintas.

Algunos métodos de control de LSS parten de un análisis de los autovalores del sistema, distinguiendo entre los modos fijos (no controlables) y los modos controlables mediante un conjunto de reguladores descentralizados. Si los modos fijos son estables, Davison [45, 46, 48] ofrece un método para fijar a los restantes polos del sistema. La dificultad de estos métodos radica en la necesidad de disponer de un modelo global del sistema para la determinación de sus autovalores. En los SEE es difícil elaborar este modelo global, dada su extensión y complejidad; por ello, nos centraremos en una estrategia de control (concretamente la de Siljak) que nos permita diseñar al regulador de cada subsistema (área) a partir de su modelo concreto y del de sus interconexiones [171].

Dado un sistema S el cual pueda descomponerse en s subsistemas  $S_i$ , descritos por:

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = \tilde{A}_i \tilde{x}_i(t) + \tilde{B}_i u_i^1(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s e_{ij} \tilde{A}_{ij} \tilde{x}_j(t) \quad [52.24]$$

donde  $u_i^1$  es la ley de control local para el subsistema i y  $e_{ij} \tilde{A}_{ij}$  son los términos de interconexión del subsistema i con los restantes subsistemas, siendo  $\tilde{A}_{ij}$  la matriz de ganancias en las interconexiones (relaciones entre  $x_i(t)$  y  $x_j(t)$ ) y  $e_{ij}$  los elementos de una "matriz de interconexión", definidos de modo que su valor sea 1 ó 0 según que el estado estructural del sistema permita ó no la interacción entre las variables  $x_i$  y  $x_j$ , puede obtenerse, mediante la reducción perturbacional ( $e_{ij} = 0, \forall i, j$ ), un conjunto de ecuaciones representativas de los subsistemas desacoplados,

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = \tilde{A}_i \tilde{x}_i(t) + \tilde{B}_i u_i^1(t) \quad [52.25]$$

cada uno de los cuales se optimiza según su propio índice de calidad,

$$J_i^0 = \int_0^{\infty} L_i(\tilde{x}_i(t), u_i^1(t)) dt \quad [52.26]$$

(equivalente a [52.1]).

Como ya se ha visto en la sección 5.2.1. de estas Bases Teóricas, la expresión de la ley de control local que minimiza a  $J_i^0$  en cada susbsistema es

$$u_i^{o1}(t) = - \tilde{K}_i^{o1} \tilde{x}_i(t) \quad [52.27]$$

(siendo  $\tilde{K}_i^{o1} = \tilde{R}^{-1} \tilde{B}_i^T \tilde{P}$ , según la expresión [52.5]).

Obviamente, el diseño de un RLO en cada subsistema bajo la aproximación inicial de  $e_{ij} = 0, \forall i, j$ , lleva a un índice de calidad total

$$J^{\circ} = \sum J_i^{\circ} \quad [52.28]$$

cuyo valor es diferente del que se obtendría ( $\tilde{J}$ ) si se hubiera diseñado un RLO para todo el sistema (el cual considerara todas las interconexiones posibles,  $e_{ij} = 1, \forall i, j$ ),

$$\tilde{J} \leq J^{\circ} \quad [52.29]$$

Se define al índice de suboptimalidad  $\epsilon^{\circ}$  como

$$\epsilon^{\circ} = \frac{\tilde{J} - J^{\circ}}{J^{\circ}} \quad [52.30]$$

siendo la relación entre los dos índices de calidad

$$\tilde{J} = (1 + \epsilon^{\circ}) J^{\circ} \quad [52.31]$$

y diciéndose entonces que el sistema [52.24] es subóptimo con un índice  $\epsilon^{\circ}$ .

En el caso general de que las interconexiones puedan sufrir modificaciones estructurales (cambios topológicos), de forma que no todos los elementos  $e_{i,j}$  sean unitarios, el índice de suboptimalidad  $\epsilon$  viene acotado por la siguiente relación debida a Siljak y Sundareshan [172, 171], y cuyo detalle de obtención, basado en un acotación de los términos del Hamiltoniano del Apéndice D, puede verse en [171],

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s e_{ij} \mathcal{F}_{ij} \leq \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \frac{\min_i \lambda_m(\tilde{W}_i(t))}{\max_i \lambda_M(\tilde{P}_i(t))} \quad [52.32]$$

$i = 1, \dots, s$

siendo:

$\tilde{P}_i$  = Matriz de Riccati para el subsistema  $i$ .

$$\tilde{W}_i = \tilde{P}_i B_i R^{-1} B_i^T \tilde{P}_i + Q_i$$

$\lambda_m(\cdot)$  = autovalor mínimo de la matriz  $(\cdot)$ .

$\lambda_M(\cdot)$  = autovalor máximo de la matriz  $(\cdot)$ .

$$\mathcal{F}_{ij} = \lambda_M^{\frac{1}{2}}(\tilde{H}_{ij}^T(t) \tilde{H}_{ij}(t))$$

siendo  $\tilde{H}_{ij} = A_{ij}$  cuando la ley de control de cada área se base sólo en las variables internas del área; y  $\tilde{H}_{ij} = A_{ij} - B_i K_{ij}^S$  cuando la ley de control del área ( $u_i$ ) esté formada por el término  $u_i^1$  deducido a partir

de las variables internas del área ( $u_i^1 = K_i x_i$ ) más otro término  $u_{ij}^g$  que considere a las variables de interconexión ( $u_{ij}^g = K_{ij} x_j$ ). En el siguiente subapartado profundizaremos en este aspecto.

#### 5.2.2.6.- Regulación jerárquica: Coordinación.

El método de diseño de reguladores descentralizados de la sección anterior requiere sólo las ecuaciones del subsistema (o del área) objeto de diseño del regulador. La gran ventaja de este método radica en que no es preciso el conocimiento de las variables de estado de las áreas foráneas para el diseño del RLO (con la consiguiente disminución de complejidad en los cálculos y en los modelos y la reducción de las telemidas y las estimaciones de estado); pero, en contrapartida la regulación del sistema tiene un índice de suboptimalidad  $\epsilon$ .

En esta sección se va a añadir un nivel superior de regulación, estableciéndose una estrategia de control jerárquico compuesta por los reguladores de cada área (diseñados bajo la hipótesis de desacoplamiento) y un regulador centralizado (coordinador) que considere de un modo global a las interconexiones entre áreas.

El diseño de coordinadores abarca un espectro muy variado, yendo desde sencillos algoritmos recursivos que vayan determinando las ganancias del coordinador mediante técnicas de optimización paramétrica [ 8 ], hasta concepciones basadas en coordinaciones secuenciales y lógicas (cadencia programada de consignas, cuyo valor varía al ir alcanzando los subsistemas ciertos estados predeterminados).

En el caso de los SEE el concepto de coordinador tiene una doble acepción. Desde un punto de vista estacionario puede interpretarse como la parte del despacho económico que se encarga de distribuir la generación y el transporte según consideraciones de seguridad y de economía; por otro lado puede definirse como el elemento encargado de armonizar la dinámica de cada área según el estado de las restantes, de forma que se mejore el índice de suboptimalidad del sistema. En lo sucesivo nos referimos a la segunda acepción, relacionada con el aspecto dinámico, centrándonos en dos coordinadores que han tenido una gran influencia en la literatura sobre LSS: el de Siljak y Sundareshan (que denominaremos método I) y el de Sundareshan (método II).

Con la presencia de un coordinador, la ley de control óptimo en cada subsistema vendrá dada por

$$u_i^o = u_i^{o1} + u_i^{og} \quad [ 52.33 ]$$

siendo  $u_i^{o1}$  la ley de control óptimo local de la sección anterior y  $u_i^{og}$  la consigna



enviada por el coordinador al área  $i$ , y cuyo objetivo es el de mejorar la optimalidad del conjunto de subsistemas en coordinación.

Ahora el problema se centra en determinar  $u_i^g$ . Para ello se expondrán los dos métodos antes citados: el primero de ellos (metodo I) parte de una visión pesimista de las interconexiones (característica de los trabajos de Siljak) y trata de neutralizar su efecto nocivo, el segundo (método II) parte de una visión optimista intentando aprovechar los posibles efectos beneficiosos de las interconexiones entre subsistemas.

A/ Método I. (Siljak y Sundareshan, 1976) [ 17 2 ]

Sea un sistema compuesto por  $s$  subsistemas lineales,

$$\dot{\tilde{x}}_i = A_{\tilde{i}} \tilde{x}_i + B_{\tilde{i}} u_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s e_{ij} A_{\tilde{ij}} \tilde{x}_j, \quad i=1, \dots, s \quad [ 52.34 ]$$

Descomponiendo la ley de control  $u_i$  en una acción propia del subsistema desacoplado ( $u_i^1$ ) y otra acción  $u_i^g$  que considere a las interconexiones del subsistema con los restantes, no consideradas en  $u_i$ , se puede escribir

$$u_i = u_i^1 + u_i^g = -K_{\tilde{i}}^1 \tilde{x}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s K_{\tilde{ij}}^g \tilde{x}_j, \quad i=1, \dots, s \quad [ 52.35 ]$$

Para la determinación de los coeficientes  $K_{\tilde{i}}^1$  basta desacoplar al sistema y repetir los cálculos de la sección 5.2.1, obteniéndose la expresión anterior 52.5

$$K_{\tilde{i}}^1 = R_{\tilde{i}}^{-1} B_{\tilde{i}}^T P_{\tilde{i}}$$

Combinando esta última relación con [52.34] y [52.35], se obtiene la expresión del sistema en lazo cerrado,

$$\dot{\tilde{x}}_i = (A_{\tilde{i}} - B_{\tilde{i}} R_{\tilde{i}}^{-1} B_{\tilde{i}}^T P_{\tilde{i}}) \tilde{x}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s e_{ij} (A_{\tilde{ij}} - B_{\tilde{i}} K_{\tilde{ij}}^g) \tilde{x}_j \quad [ 52.36 ]$$

El criterio que se sigue para obtener los coeficientes  $K_{\tilde{ij}}^g$  es el de minimizar el índice de suboptimalidad de la expresión [52.32]. Según esta expresión, el valor mínimo que se puede obtener del índice  $\mathcal{E}$  viene acotado por el valor de la raíz cuadrada del mayor autovalor del producto  $H_{\tilde{ij}}^T H_{\tilde{ij}}$ , siendo

$$H_{\tilde{ij}} = A_{\tilde{ij}} - B_{\tilde{i}} K_{\tilde{ij}}^g \quad [ 52.37 ]$$

La minimización de  $\mathcal{E}$  supone la minimización de  $H_{ij}$ , que será cero cuando se cumpla la condición

$$K_{ij}^g = B_{ij}^+ A_{ij} \quad [ 52.38 ]$$

siendo  $B_{ij}^+$  la matriz inversa generalizada (de Moore-Penrose) de  $B_{ij}$ , definida como:

$$B_{ij}^+ = (B_{ij}^T B_{ij})^{-1} B_{ij}^T \quad [ 52.39 ]$$

con ello, la ley de control óptimo del área i es

$$u_{ij}^o = -R_{ij}^{-1} B_{ij}^T P_{ij} x_{ij} - (B_{ij}^T B_{ij})^{-1} B_{ij}^T A_{ij} x_j \quad [ 52.40 ]$$

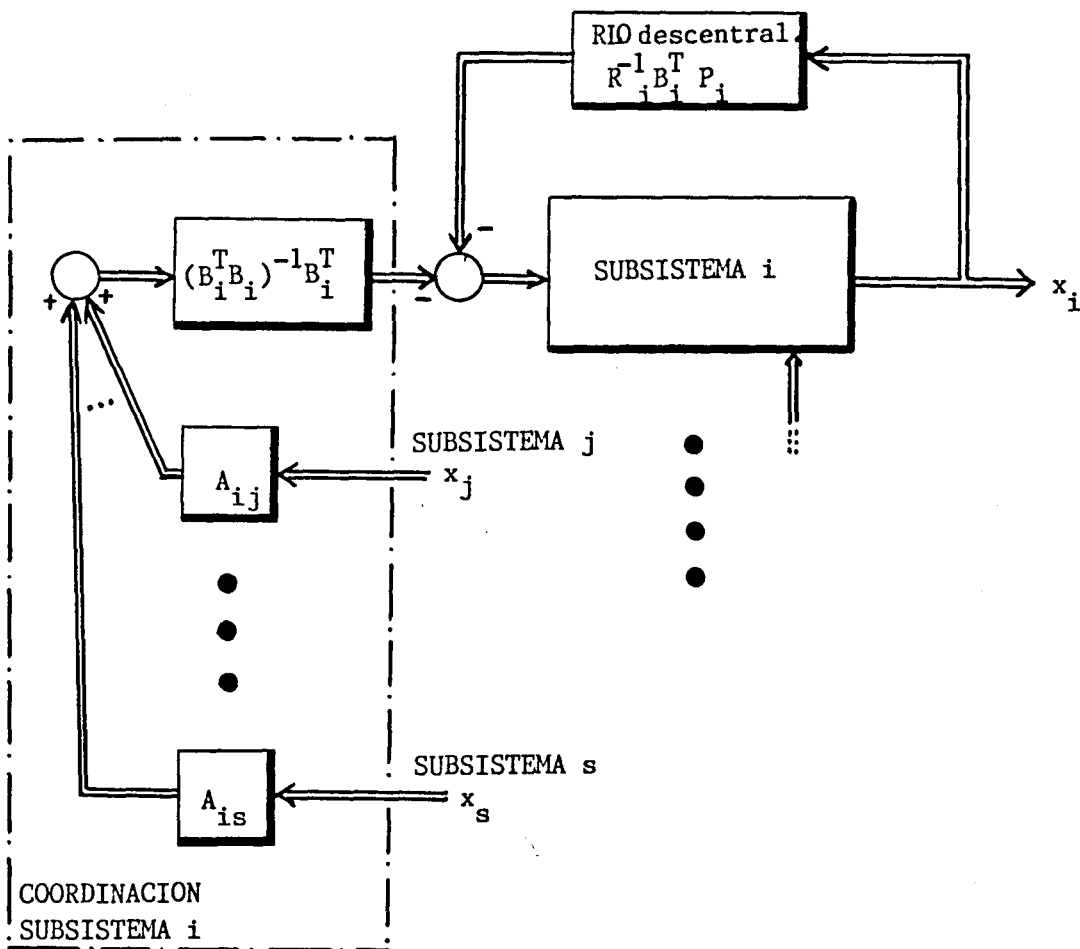


Fig. 52.4.- Esquema de coordinación de un subsistema según Siljak y Sundareshan (1976).

B/ Método II. (Sundareshan, 1977) [181]

Como ya se ha anticipado, este método pretende aprovechar los posibles aspectos beneficiosos de las interconexiones.

Partiendo, igual que en el método anterior, de un sistema compuesto por  $s$  subsistemas descritos por la expresión [52.34], se trata de determinar la ley de control óptimo, también compuesta por una acción de control local  $u_i^1$  y una acción de coordinación  $u_i^g$

$$u_i = u_i^1 + u_i^g = -K_i^1 x_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s M_{ij} x_j \quad [52.41]$$

Los términos  $K_i^1$  se determinan igual que en el caso anterior (expresión [52.5]). El problema se centra en la determinación de las ganancias  $M_{ij}$  del coordinador; para ello se definen unas matrices ampliadas formadas por las matrices de estado y de control de los  $s$  subsistemas:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \text{diag} ( A_1, A_2, \dots, A_s ) \\ \tilde{B} &= \text{diag} ( B_1, B_2, \dots, B_s ) \\ \tilde{K} &= \text{diag} ( K_1^1, K_2^1, \dots, K_s^1 ) \\ \tilde{H} &= [A_{ij}] \end{aligned} \quad [52.42]$$

A partir de la ecuación en lazo cerrado de cada subsistema,

$$\dot{x}_i = (A_i + B_i K_i^1) x_i + \sum_{j=1}^s (A_{ij} - B_i M_{ij}) x_j \quad [52.43]$$

y definiendo a la matriz de ganancias  $\tilde{M} = [M_{ij}]$  de forma que cumpla la relación

$$\tilde{B} \tilde{M} = \tilde{B}^P \tilde{K} \quad [52.44]$$

siendo  $\tilde{B}^P$  una matriz a determinar, se puede describir (fig. 52.5) al sistema mediante una formulación diagonal en bloques,

$$\begin{aligned} \dot{x}^p &= (\tilde{A} + \tilde{H}) x^p - \tilde{K} (\tilde{B} + \tilde{B}^P) x^p \\ x^p &= (x_1, x_2, \dots, x_s)^T \end{aligned} \quad [52.45]$$

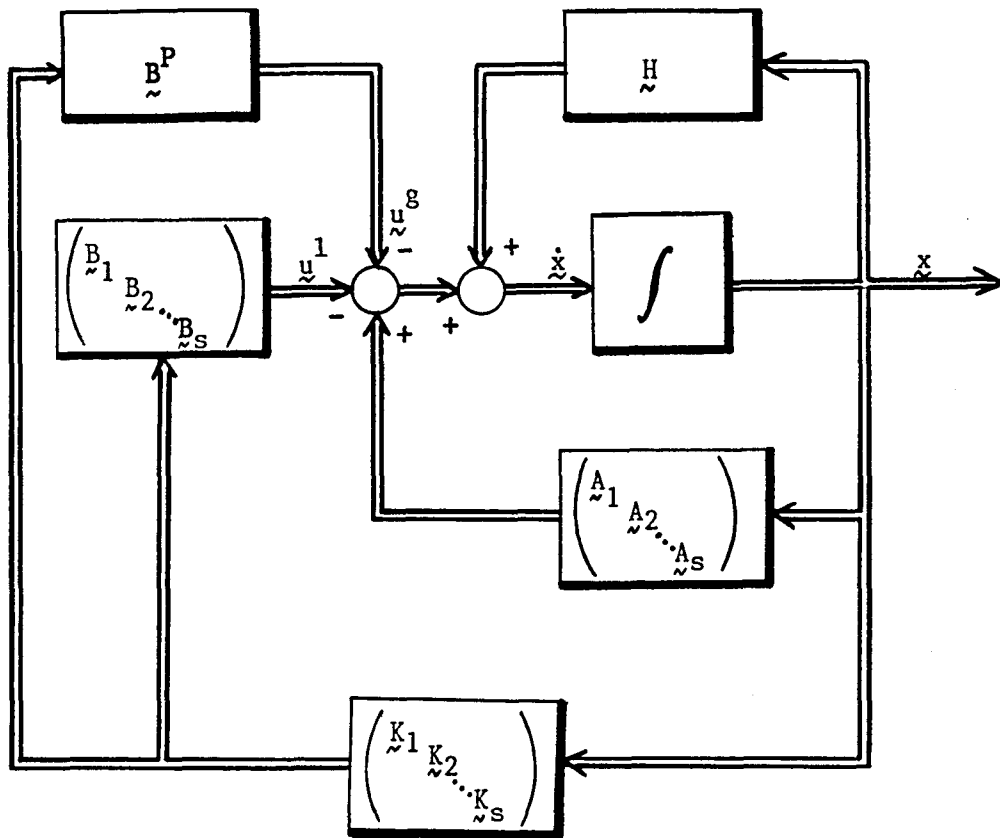


Fig. 52.5.- Esquema de coordinación de Sundareshan (1977)

La función de la matriz  $B^P$  es la de adecuar a los términos de perturbación (interconexiones) no incluidos en el cálculo de la acción de control local, de modo que se mejore la optimalidad del sistema sin que sea preciso modificar a la matriz de ganancias locales  $K$ . En el apéndice de la ref. [181] Sundareshan demuestra, recalculando la ecuación de Riccati para el sistema ampliado [52.45] (en el cual la matriz de planta es  $B+B^P$ ), que la matriz  $B^P$  que cumple con estas condiciones viene definida por

$$\tilde{B}^P = - (\tilde{P} + \tilde{\tilde{P}})^{-1} \tilde{P} \tilde{B} \quad [52.46]$$

siendo  $\tilde{P}$  una matriz formada por las matrices de Riccati de los  $s$  subsistemas

$$\tilde{P} = \text{diag} ( \tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_s ) \quad [52.47]$$

y  $\tilde{\tilde{P}}$  es una matriz que cumple la relación

$$\tilde{\tilde{P}} = (\tilde{S} - \tilde{P}\tilde{H})(\tilde{A} + \tilde{H})^{-1} \quad [52.48]$$

donde  $\tilde{S}$  es la solución de la ecuación matricial

$$\tilde{S} (\tilde{A} + \tilde{H}) + (\tilde{A} + \tilde{H})^T \tilde{S} + \tilde{H}^T \tilde{P} \tilde{A} - \tilde{A}^T \tilde{P} \tilde{H} = 0 \quad [52.49]$$

Con el coordinador de la expresión [52.46] (fig. 52.5) se obtiene un nuevo índice de suboptimalidad  $\mathcal{E}$  acotado por

$$\mathcal{E} \leq \frac{\lambda_M(\tilde{\tilde{P}})}{\lambda_m(\tilde{P})} \quad [52.50]$$

siendo su valor negativo si las interconexiones entre subsistemas son benéficas para éstos (cooperación entre ellos) ó positivo si las interconexiones son perjudiciales (subsistemas competitivos). En caso de que las interconexiones sean neutras ( $\mathcal{E} = 0$ ), la matriz  $\tilde{\tilde{P}}$  sería nula.

El método II, a diferencia del método I, permite explotar los efectos benéficos de las interconexiones, pudiéndose llegar a un  $\mathcal{E}$  negativo (mejora de la optimalidad ofrecida por los RLO de los subsistemas desacoplados). En contrapartida requiere la formulación de estado de todos los subsistemas.

El método I también precisa de esta formulación de estado total si se pretende coordinar a todos los subsistemas. Sin embargo este método (expresión

[52.40]) permite la coordinación de un solo subsistema (o de un grupo reducido de ellos) respecto a los restantes; en este caso sólo es precisa la formulación de estado del subsistema en cuestión y su matriz de ganancias  $A_{ij}$  con los restantes subsistemas.

La aplicación estricta en los SEE de los dos métodos de coordinación presentados supone la telemida o la estimación de las variables del área [86, 145, 172, 181]. Mientras que el método II requiere, además, una centralización de estas telemidas y estimaciones para efectuar los cálculos de las ganancias del coordinador (ecuaciones [52.46] a [52.49]), el método I es compatible con una red de telemidas prácticamente descentralizada, de forma que éstas queden acotadas a cada área, a excepción de las variables de interconexión con las áreas vecinas (ecuación 52.40).

Por otro lado el método II, al explotar los efectos beneficiosos de las interconexiones, ofrece una mejor dinámica del SEE frente a perturbaciones, como ha demostrado Premakumaran [145] (reducción de la función de coste en un factor aproximado de 20 respecto al método I), aunque el precio de esta mejor dinámica es el esfuerzo de generación de las unidades. Dada la cantidad de telemidas y de estimaciones de estado que supone la implementación del método II, es difícil pensar en su aplicación física actual. Por ello, y en consideración al estado actual de los SEE (actualmente todas las compañías disponen de telemidas de sus interconexiones), nos centraremos en el método I por su mayor viabilidad (grupos reducidos de telemidas), al estudiar la optimalidad de diferentes estructuras de control.

### 5.2.3.- Formulación del RLO de área autónoma.

En la presente sección se va a establecer una formulación general del RLO del área autónoma, ampliación de la de Calović [ 25, 26 ] y Siljak [171] y adecuada al modelo de las interconexiones de Elgerd y Fosha descrito en el Capítulo 2.

Dado un SEE descrito por:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A} \tilde{x}(t) + \tilde{B} \tilde{u}(t) + \tilde{F} \tilde{z}(t)$$

$$\tilde{y}(t) = \tilde{C}^T \tilde{x}(t) \quad [ 52.51 ]$$

donde:

$\tilde{x}(t)$  = estados de las áreas.

$\tilde{u}(t)$  = acciones de control.

$\tilde{z}(t)$  = perturbaciones.

$\tilde{y}(t)$  = salidas medibles

se pretende establecer un controlador local para cada área, capaz de minimizar un determinado criterio integral, y basado en las siguientes especificaciones:

- 1/ Cada área intenta regular sus propias perturbaciones de carga.
- 2/ Cada área contribuye al control de la frecuencia del SEE.
- 3/ En régimen estacionario, los errores de frecuencia y de intercambio de potencia entre áreas deben anularse.
- 4/ Deben reducirse las oscilaciones de frecuencia sin necesidad de acciones de control desproporcionadas.
- 5/ La regulación del SEE debe ser viable sin necesidad de enviar excesivas señales de telemedida y telemando, a fin de no comprometer otros posibles objetivos (como la regulación terciaria).
- 6/ Cada área dispone de su propio regulador descentralizado, el cual sólo requiere mediciones (ó estimaciones) disponibles en la propia área.
- 7/ Para el diseño del regulador, sólo serán precisos los modelos del área y de sus líneas de interconexión.
- 8/ El control será lineal, constante e independiente de la forma de la demanda de energía.

Descomponiendo a [52.51] para cada subsistema (área), se obtiene:

$$\dot{\tilde{x}}_i(t) = A_i \tilde{x}_i(t) + B_i u_i(t) + F_i z_i(t) + V_i \Delta p_i(t) \quad [ 52.52 ]$$

siendo  $\Delta p_i(t)$  los intercambios de potencia a través de las líneas de interconexión, y  $V_i$  un vector constante encargado de ponderar el grado de acoplamiento de las diferentes interconexiones.

Usando el modelo de interconexión de Elgerd y Fosha (Cap. 2),

$$\Delta P_{ij}(s) = \frac{2 \pi T_{ij}^{\circ}}{s} (\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s))$$

$$T_{ij}^{\circ} = \frac{|V_i^{\circ}| |V_j^{\circ}|}{X} \cos(\delta_i^{\circ} - \delta_j^{\circ})$$

$$2 \pi T_{ij}^{\circ} = T'_{ij} \quad [ 52.53 ]$$

donde  $\delta_i^{\circ}$  y  $\delta_j^{\circ}$  son los ángulos de las tensiones  $V_i^{\circ}$  y  $V_j^{\circ}$  en los extremos de la interconexión  $i, j$  (Fig. 52.6)

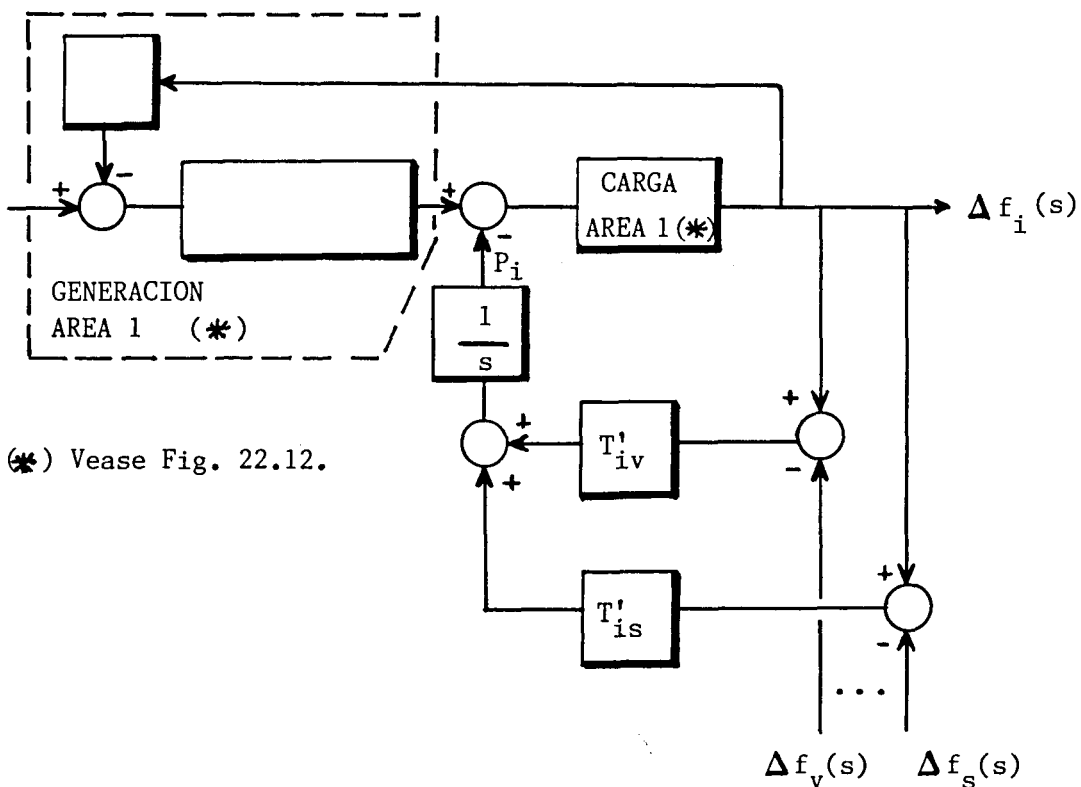


Fig. 52.6.- Esquema de interconexión del área i.



podemos escribir, modificando la figura anterior según la Fig. 52.7

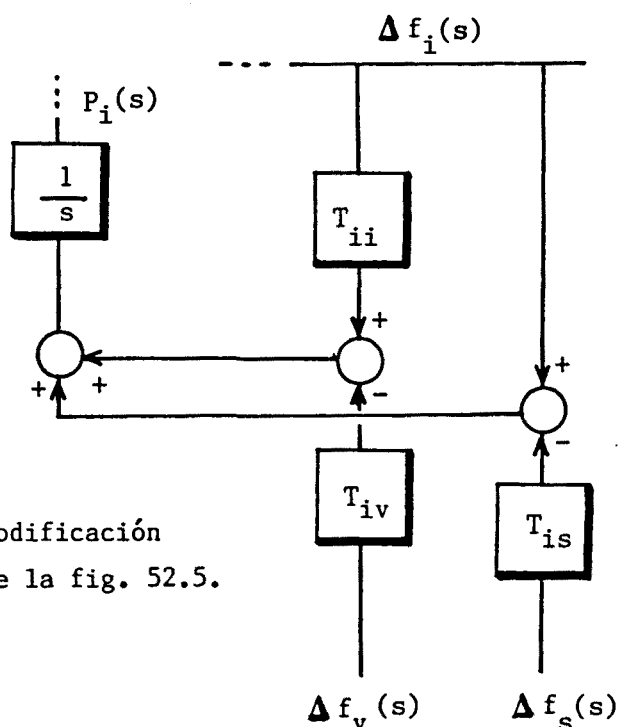


Fig. 52.7.- Modificación de la fig. 52.5.

$$\Delta \dot{p}_i(t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s (T_{ii} \Delta f_i(t) - T_{ij} \Delta f_j(t)), \quad i = 1, 2, \dots, s \quad [52.54]$$

Definiendo unos vectores  $m_{ii}$  y  $q_{ij}$  con un solo elemento unitario y los restantes nulos, tales que

$$m_{ii} x_i(t) = \Delta f_i(t)$$

$$q_{ij} x_j(t) = \Delta f_j(t) \quad [52.55]$$

se puede ampliar a [52.52],

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i z_i(t) + V_i \Delta p_i(t)$$

$$\Delta \dot{p}_i(t) = T_{ii} m_{ii} x_i(t) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s T_{ij} q_{ij} x_j$$

$$y_i(t) = C_i^T x_i(t) \quad [52.56]$$

siendo el vector de estado  $x_i$  de dimensión  $n$ .

Las especificaciones 1, 2 y 3, obligan a que los errores de frecuencia y de intercambio de potencia se anulen en estado estacionario. Para asegurar su cumplimiento, los métodos modernos de RPF incorporan el concepto clásico del ACE, tratándolo como una variable más del sistema ampliado.

Por otro lado, las especificaciones 4 y 5 obligan a adecuar la acción de control. Siguiendo la línea de Calović, supondremos cada área compuesta por  $g$  unidades generadoras, de las cuales  $t$  son térmicas y  $h$  son hidráulicas

$$g = t + h,$$

cuyos niveles de participación a la generación total del área vendrán establecidos según un vector de participación  $\tilde{y}_i$ , determinado y ajustado (por ejemplo, cada 5 minutos) por el despacho económico,

$$\tilde{y}_i = \begin{bmatrix} y_{T1} \\ y_{T2} \\ \vdots \\ y_{Tt} \\ y_{H1} \\ \vdots \\ y_{Hh} \end{bmatrix} \quad [ 52.57 ]$$

donde el subíndice T denota "térmicas" y el H "hidráulicas".

De esta forma, adecuando los elementos de la matriz  $\tilde{y}_i$ , se reparte el esfuerzo de generación del área.

Por otro lado, el despacho económico puede también ajustar a otro vector  $\tilde{u}_i$ , encargado de autorizar las acciones de control  $u_i$  según que el valor obtenido en cada cálculo tenga ó no la suficiente diferencia respecto al valor anterior, con lo que se reduce el telecontrol (especificación 5). Esto supone la inclusión de una alinealidad de cuantificación en el control, con unos niveles cuánticos determinados según consideraciones económicas y de seguridad en el SEE (en la ref. [182] puede verse una sencilla forma de evaluar, via Lyapunov, la región de estabilidad de un sistema operando con una alinealidad de este tipo). Con ello,

$$\tilde{u}_i = \tilde{u}_i \tilde{y}_i w_i \quad [ 52.58 ]$$

siendo  $\underline{w}_i$  el vector de control óptimo que se haya obtenido para el sistema (expresión [52.5], con  $\underline{w}_i = \underline{u}^\circ$ ) y  $\underline{u}_i$  el vector de las consignas que se mandan a las unidades generadoras.

Suponiendo a las perturbaciones  $z(t)$  constantes e incluyendo al ACE y a los vectores  $\underline{\mu}_i$  y  $\underline{\gamma}_i$  en la formulación, se puede expresar de forma perturbacional a [52.56],

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = \hat{A}_i \hat{x}_i(t) + \hat{B}_i \hat{w}_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s \hat{E}_{ij} \hat{x}_j$$

siendo, para el área  $i$  :

$$\hat{x}_i = \left\{ (x_{i1} - x_{i1ss})^T, v_i - v_{i1ss}, \Delta p_i \right\}^T, \text{ de dimensión } n + 2.$$

$$\dot{v}_i = ACE_i = d_i^T x_i + \Delta p_i$$

$$d_i^T x_i = \beta_i \Delta f_i$$

$$\hat{u}_i = (u_i - u_{i1ss}) = \underline{\mu}_i \underline{\gamma}_i (w_i - w_{i1ss}) = \underline{\mu}_i \underline{\gamma}_i \hat{w}_i$$

$$\hat{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & 0 & v_i \\ d_i^T & 0 & 1 \\ T_{ii}^m & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \underline{\mu}_i \underline{\gamma}_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{E}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^s T_{ij}^q & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

[ 52.59 ]

y denotando el subíndice ss los valores deseados (programados) en estado estacionario (traducción del problema servo al problema regulador).

A partir de [52.59] y de [52.56], el modelo del área  $i$  es el representado en la Fig. 52.8. Nótese que la estructura de este modelo es acorde a las especificaciones 6, 7 y 8.

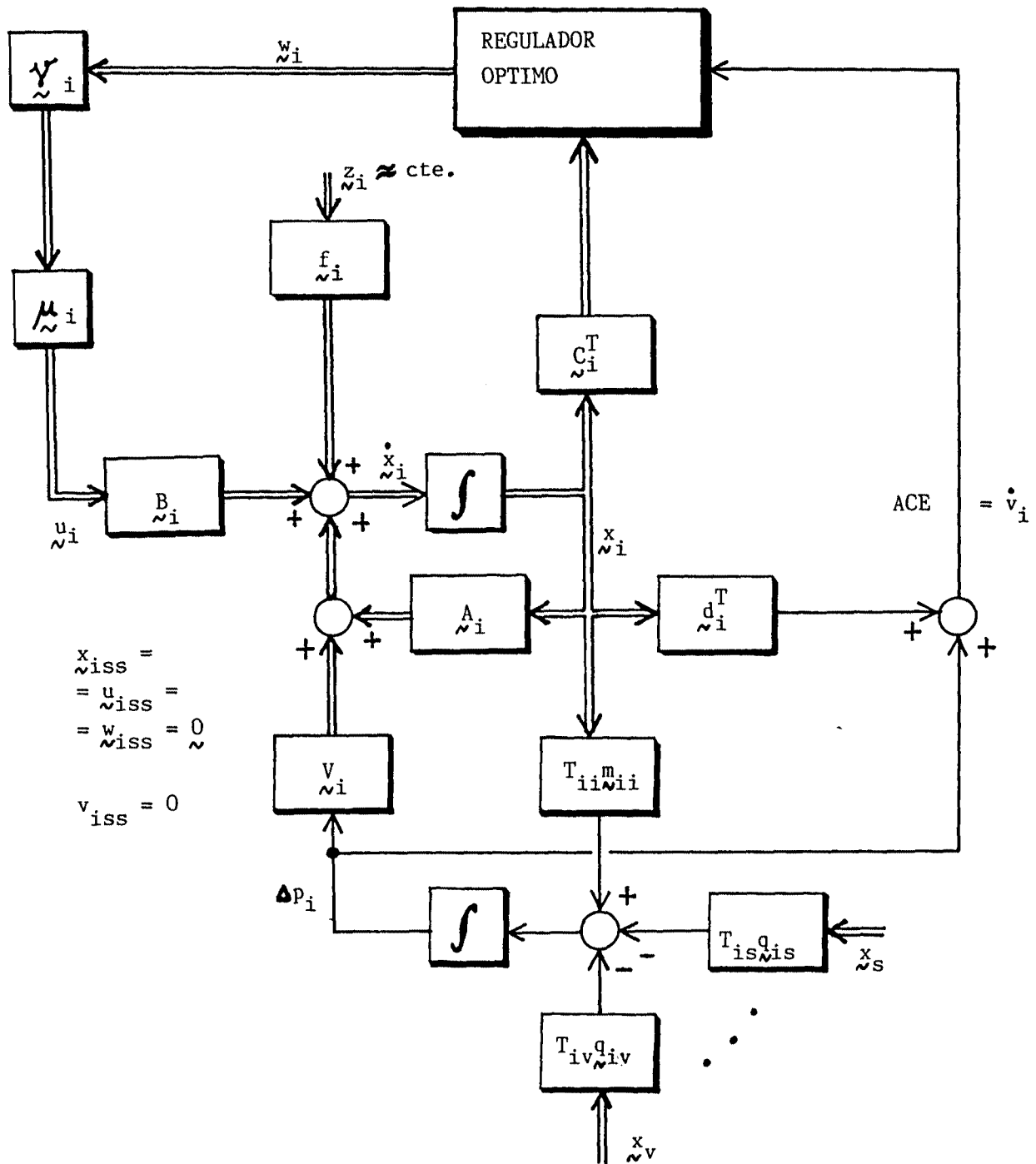


Fig. 52.8.- Modelo del área  $i$ .

Dadas las especificaciones 6 y 7 (normalmente es costoso poder medir ó estimar los estados  $\tilde{x}_j$  de las áreas vecinas al área i), se considerará el diseño del regulador para el área i desacoplada. Ello nos llevará a un diseño subóptimo, ya que no intervendrán los elementos de la matriz  $\hat{E}_{ij}$  en los cálculos del RLO (en el siguiente apartado se estudiará la suboptimalidad de diferentes tipos de desacoplos).

La ecuación del área i desacoplada por sus interconexiones es:

$$\dot{\tilde{x}}_i = \hat{A}_i \tilde{x}_i + \hat{B}_i \tilde{w}_i \quad [ 52.60 ]$$

Esta ecuación considera al ACE como una variable de estado del sistema, como refleja el siguiente detalle de la expresión anterior [53.59], desacoplándola ( $\hat{E}_{ij} = 0$ ) y suponiendo  $x_{ss} = v_{ss} = 0$ .

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_i \\ \dot{v}_i \\ \Delta p_i^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_i & 0 \\ d_i^T & 0 \\ T_{ii}^m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ v_i \\ \Delta p_i^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{B}_i / \mu_i \gamma_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{w}_i \Rightarrow$$

$$\dot{\tilde{x}}_i = \hat{A}_i \tilde{x}_i + v_i \Delta p_i + \hat{B}_i / \mu_i \gamma_i \tilde{w}_i$$

$$\dot{v}_i = d_i^T \tilde{x}_i + \Delta p_i = \text{ACE}$$

$$\Delta p_i^m = T_{ii}^m \tilde{x}_i$$

( $\Delta p_i^m$  es la modificación de  $\Delta p_i$  cuando  $\hat{E}_{ij} = 0$ )

$$[ 52.61 ]$$

Nótese que las variables  $\tilde{x}_i$  y  $\Delta p_i$  corresponden a variables físicas del sistema, mientras que la variable  $v_i$  se obtiene artificialmente a partir de muestras de la frecuencia y del intercambio de potencia.

Siljak y Calović mezclan la variable  $v_i$  con las variables continuas del sistema, definiendo una matriz de planta ampliada. Si bien esta concepción es correcta para el diseño de reguladores teóricamente continuos (en los que el periodo de cálculo del ordenador sea muy pequeño respecto a las constantes de tiempo del sistema), adolece de cierta incoherencia cuando el tiempo requerido por los ordenadores para establecer la acción de control es considerable, lo que conlleva la necesidad de formular el problema en el dominio discreto (como se hará en el Capítulo 6).

Volviendo a la ecuación del área  $i$  desacoplada,

$$\dot{\hat{x}}_{\sim i} = \hat{A}_{\sim i} \hat{x}_{\sim i} + \hat{B}_{\sim i} \hat{w}_{\sim i}$$

se trata de diseñar el RLO que minimice al criterio integral presentado en la sección 5.2.1,

$$J = \int_0^{\infty} e^{2\alpha_0 t} (\hat{x}_{\sim i}^T Q_{\sim i} \hat{x}_{\sim i} + \hat{w}_{\sim i}^T R_{\sim i} \hat{w}_{\sim i}) dt \quad [ 52.62 ]$$

Puesto que los vectores  $\hat{\mu}_i$  y  $\hat{y}_i$  los establece el despacho económico después de que se haya determinado la acción de control, y que el criterio integral escogido supone los cambios de variable [ 52.7 ], el modelo de diseño es

$$\dot{\hat{x}}_{\sim i} = \hat{A}_{\sim i} \hat{x}_{\sim i} + \hat{B}_{\sim i} \hat{w}_{\sim i} \quad [ 52.63 ]$$

siendo  $\hat{x}_{\sim i} = e^{\alpha_0 t} \hat{x}_{\sim i}$  y  $\hat{w}_{\sim i} = e^{\alpha_0 t} \hat{w}_{\sim i}$

Seleccionando una matriz  $Q_i$  cuasi-diagonal (diagonal por bloques),

$$Q_i = \begin{bmatrix} Q_{\sim ai} & & & \\ & q_{Ii} & & \\ & & 0 & \\ & & & q_{Pi} \end{bmatrix} \quad [ 52.64 ]$$

en la que  $Q_{\sim ai} = Q_{\sim ai}^T$  es una matriz definida positiva de  $n \times n$  elementos ( $n =$  orden de la matriz  $A_{\sim i}$ ) penalizadora de las desviaciones de los estados internos del área  $i$ , y  $q_{Ii}$ ,  $q_{Pi}$  son, respectivamente, constantes positivas penalizadoras del ACE y de la potencia transferida a través de las interconexiones, a una matriz  $R_{\sim i}$  definida positiva y a un coeficiente  $\alpha_0$  tal que se cumplan las condiciones de que el par  $(A_{\sim i} + \alpha_0 I_{\sim i}, B_{\sim i})$  sea completamente controlable y el par  $(A_{\sim i} + \alpha_0 I_{\sim i}, D_{\sim i})$ , siendo  $Q_{\sim i} = D_{\sim i} D_{\sim i}^T$ , completamente observable, la resolución de la ecuación de Riccati (Apéndice D) lleva a la obtención de la ley de control óptimo

$$\hat{w}_{\sim i}^{\circ} = - R_{\sim i}^{-1} B_{\sim i}^T P_{\sim i} \hat{x}_{\sim i} \quad [ 52.65 ]$$

que, traducida al vector de control físico  $\hat{w}_i^{\circ}$  (expresión [ 52.12 ]), es

$$\hat{w}_{\sim i}^{\circ} = - e^{-\alpha_0 t} R_{\sim i}^{-1} B_{\sim i}^T P_{\sim i} e^{\alpha_0 t} \hat{x}_{\sim i} = - R_{\sim i}^{-1} B_{\sim i}^T P_{\sim i} \hat{x}_{\sim i} \quad [ 52.66 ]$$

Con una adecuada ponderación de  $R_i$  así como con los vectores  $\mu_i$  y  $\gamma_i$  se puede reducir el esfuerzo de control (especificaciones 4 y 5). Asimismo, puede reducirse penalizando adecuadamente en  $Q_{\tilde{w}_i}$  a las variables que actúen directamente sobre la dinámica de las unidades generadoras (como es el caso del lazo de realimentación transitoria de los reguladores de velocidad), en el supuesto de que estas penalizaciones no comprometan la estabilidad del sistema.

La selección de la matriz  $Q_i$  de la forma [ 52.64 ] conduce a una matriz  $P$  de Riccati tal que

$$\hat{u}_{\tilde{w}_i}^o = - R_i^{-1} B_i^T \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ v_i \\ \Delta p_i^m \end{bmatrix} =$$

$$= - K_P x_i - K_I \int ACE dt - K_T \Delta p_i^m, \quad [ 52.67 ]$$

siendo

$$K_P = R_i^{-1} B_i^T P_{11}$$

$$K_I = R_i^{-1} B_i^T P_{12}$$

$$K_T = R_i^{-1} B_i^T P_{13}$$

Como puede comprobarse en [ 52.67 ], la inclusión del ACE en la formulación da lugar a un RLO del tipo PI.

Considerando los vectores  $\mu_i$  y  $\gamma_i$ , la ley de control final de las unidades del área  $i$ , es

$$\hat{u}_{\tilde{w}_i}^o = \mu_i \gamma_i \hat{w}_i^o \quad [ 52.68 ]$$

Mientras que el vector de participación  $\gamma_i$  no altera la optimalidad del control, limitándose a repartir entre las unidades del área  $i$  el esfuerzo de control calculado sobre el modelo global del área  $i$ , el vector  $\mu_i$  tiene un carácter alineal (cuantificación) que puede modificar el comportamiento del sistema.

La acción de este vector  $\underline{\mu}_i$ , propuesto en esta Tesis, es de tipo discreto al compararse la acción de control en el instante de muestreo  $kT$  con la del instante anterior  $(k - 1)T$ , y su efecto sobre la estabilidad del SEE puede evaluarse según el Capítulo 12 de la referencia [182]. Sin embargo, si el SEE en lazo primario es estable, la selección de los niveles cuánticos de  $\underline{\mu}_i$  no desestabiliza al sistema (pues, incluso en el caso extremo de que  $\underline{\mu}_i$  eliminara totalmente la acción de control, se mantendría el funcionamiento primario del SEE).

En el proceso de obtención de la ley de control óptimo del área  $i$  se ha desacoplado al resto del SEE. A partir de la expresión [52.32] puede evaluarse el efecto de no haber considerado totalmente las interacciones entre áreas ( $E_{ij} = 0$ ) en el diseño del RLO, aunque ello supone el esfuerzo de diseñar un RLO para cada una de las  $s-1$  áreas restantes del SEE. Por este motivo, la solución más cómoda es estimar el efecto de las interconexiones por simulación.



### 5.3.- ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DE LAS AREAS.

#### 5.3.1.- Introducción.

Como se ha expuesto en el Capítulo 4 y en el apartado 5.2.3. de las Bases Teóricas, los estudios sobre la RPF descentralizada han partido, normalmente, del desacoplo de las áreas del SEE a través de su línea de interconexión. (Fig. 52.6).

Cuando la capacidad del área objeto de estudio es reducida respecto al resto del SEE, puede haber ciertos cambios estructurales derivados del intercambio no advertido (no detectado) de energía y de la práctica habitual entre compañías de no forzar la generación (a nivel secundario) si el error de control (ACE) no rebasa un cierto valor. Dado que en nuestro caso se pretende estudiar una situación realista (basada en el modelo elaborado en el Cap. 2), de forma que la capacidad del resto de zonas del SEE (resumidas como Area 2) sea mucho más elevada que la de la zona de regulación conjunta (Area 1) donde se proponga implementar al RLO, se distinguirá entre dos situaciones diferentes, según el nivel de las perturbaciones.

Si el Area 1 sufre una perturbación, las restantes zonas le aportarán energía, cada cual según su capacidad y su error de control. Si esta perturbación es reducida, y dada la capacidad global de las zonas externas, los intercambios unitarios de cada una de ellas con el Area 1 pueden ser bajos, no forzándose significativamente la generación del Area 2 por parte de la regulación secundaria, bien sea porque el ACE de sus zonas no llegue a rebasar el umbral de generación, bien por ciertas deficiencias [38,128] tales como errores ó insensibilidades en las telemedidas de la frecuencia ó de los intercambios de potencia. En este caso la energía transferida por las zonas del Area 2 al Area 1 procederá de su regulación primaria, interviniendo la energía cinética cedida por las masas rodantes de la carga.

Cuando las acciones de control del Area 2 son limitadas, Hiyama (1982) [94] ha experimentado satisfactoriamente una optimización paramétrica de reguladores PID del Area 1 basada en un modelo compuesto por el del Area 1 y por el modelo equivalente del área externa, aproximado al modelo de su carga. (Fig. 53.1).

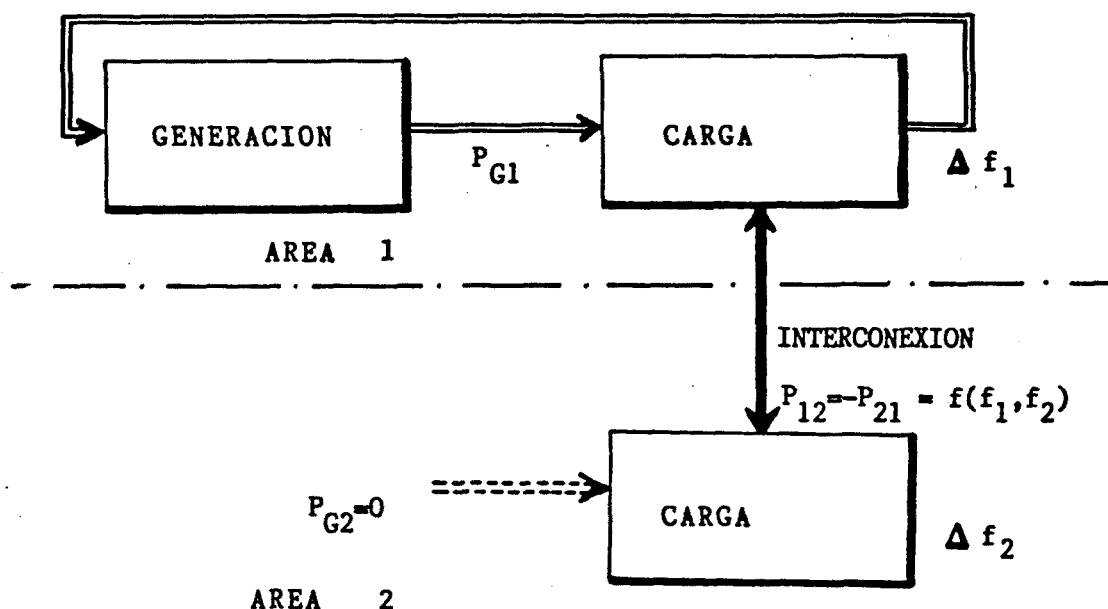


Fig. 53.1.- Estructura de diseño cuando el área 2 no fuerza su generación.

Aunque, por lo general, esta simplificación del modelo del Area 2 al de su carga parece inadecuado, dada la importancia de la regulación primaria de un área potente (característica estática más plana), los resultados obtenidos por Hiyama operando con el modelo de la Fig. 53.1 y, especialmente, la posibilidad de diseñar un RLO del Area 1 que pueda actuar (expresión [52.1]) sobre la carga del área externa a fin de minimizar sus desviaciones (reducción del traspaso de energía cinética) ó de conjugar su propia generación con la energía cedida por las masas rodantes externas, son aspectos cuyo interés potencial justifica la simulación del comportamiento de un RLO diseñado según el modelo de la Fig. 53.1.

Por otro lado, si el nivel de las perturbaciones en el Area 1 es elevado, forzándose de forma significativa la generación en el Area 2, entonces la estructura de diseño de la Fig. 53.1 pasa a ser una subestructura del sistema ( $e_{ij} = 1$  en [52.24] con lo que el índice de suboptimalidad  $\epsilon$  no es nulo. Nótese, sin embargo, que con una adecuada limitación de las desviaciones de las variables de la carga externa, el regulador diseñado según la estructura de la Fig. 53.1 puede reducir, en principio, la probabilidad de que se produzca esta generación en el área externa.

Cuando el nivel de la perturbación fuerza la generación en las dos áreas, la alternativa de diseño del RLO más utilizada es la presentada en el Capítulo 4 y estudiada en el apartado 5.2.3., la cual se basa en el desacoplo de las dos áreas a través de su línea de interconexión. En esta Tesis se va a estudiar, además, una estructura de diseño del RLO diferente, basada en las consideraciones

anteriores y consistente en incluir al modelo de la carga del área de mayor potencia en la formulación del RLO descentralizado del área de menor capacidad. Con ello se evaluará posteriormente, vía simulación, el interés del método.

Esta inclusión del modelo de la carga no supone un aumento importante de las telemidas. En primer lugar, y dado que el modelo de la carga se establece, en su versión determinística, a partir de informaciones estadísticas del consumo (Cap. 2) y que éstas son transferibles entre compañías, las necesidades de cada área para el establecimiento del RLO pueden ser la telemida ó la estimación de sus variables internas, la telemida de la potencia transferida por las interconexiones (a fin de incluir al ACE en la formulación) y la simulación del comportamiento de la carga de las restantes áreas, pudiéndose ajustar periódicamente el modelo de simulación de ésta a partir de los datos que las áreas vecinas le vayan facilitando (anomalías en la red de transporte y distribución, demandas fuertes e imprevistas, etc) ó mediante el uso de estimadores descentralizados [171] de los valores paramétricos del modelo de la carga externa.

### 5.3.2.- Estudio de la suboptimalidad.

Usando, por su simplicidad, el clásico modelo de dos áreas interconectadas de Elgerd y Fosha (Fig. 53.2), se pueden hacer unas primeras consideraciones sobre la suboptimalidad de las dos alternativas antes mencionadas (desacoplo de los modelos a través de la línea de interconexión entre las dos áreas y desacoplo de la generación del área externa).

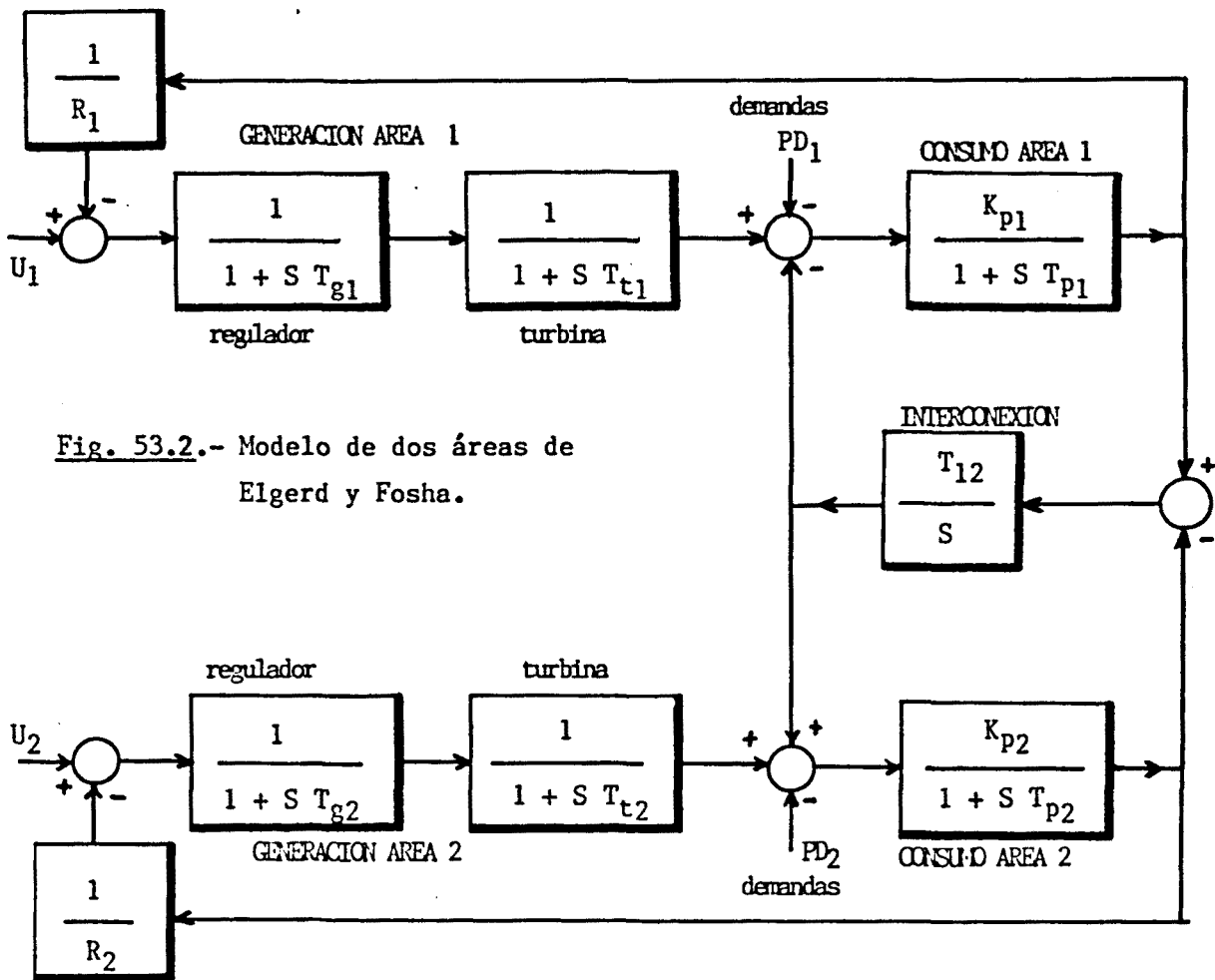


Fig. 53.2.- Modelo de dos áreas de Elgerd y Fosha.

Aplicando movilidad al integrador del bloque modelador de la interconexión de la fig. 53.2, se obtiene el flujograma de la fig. 53.3, a partir del cual se puede usar fácilmente a la notación perturbacional para formular al sistema (ya que no hay variables compartidas por los subsistemas).

Tomando como variables de estado al siguiente conjunto de variables físicas:

$x_1, x_6$  = aperturas de las válvulas distribuidoras.

$x_2, x_7$  = potencias generadas.

$x_3, x_8$  = desviaciones de frecuencia.

$x_4, x_5$  = desviaciones de fase,

se va a estudiar, en primer lugar, la suboptimalidad del sistema desacoplado por la línea de interconexión. Esta estructura de diseño ha sido seguida por varios autores (Calović, Cuk y Djorović (1977) [26], Venkateswarlu (1977) [197], Siljak (1978) [171], Bengiamin (1978) [8] y Premakumaran (1982) [144]).

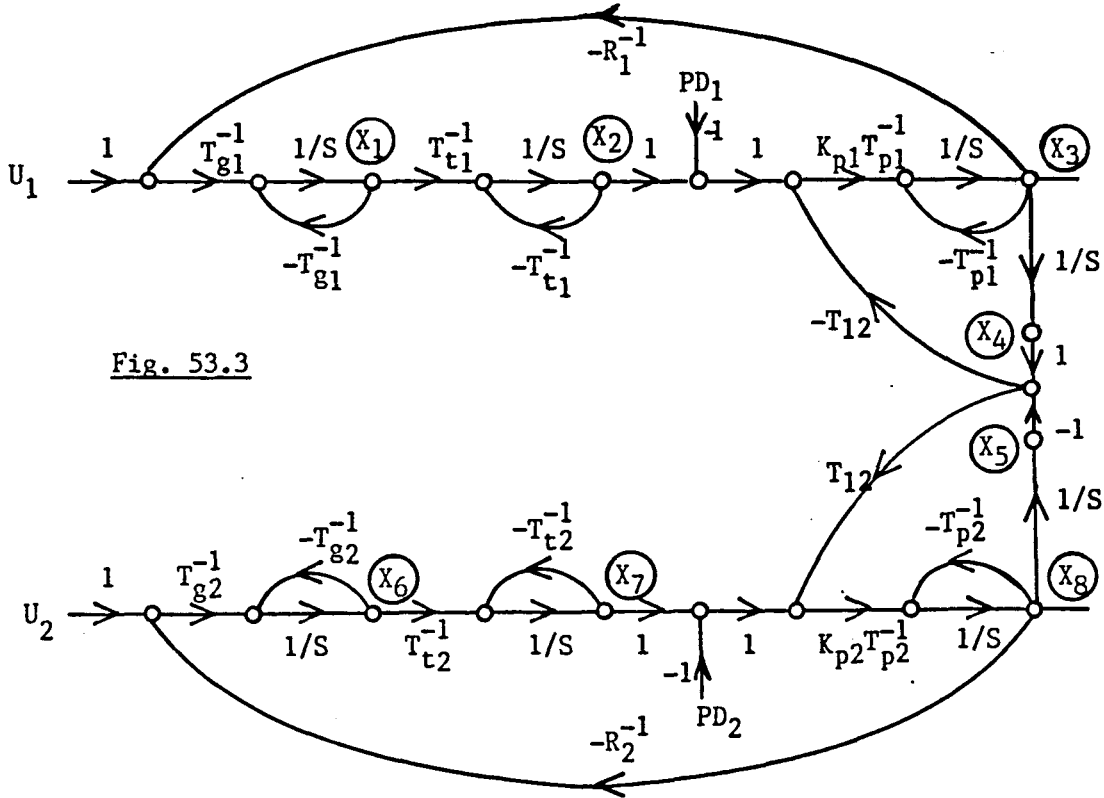


Fig. 53.3

Usando la notación perturbacional de la expresión [52.18], se obtiene para el área 1 (bajo la suposición de  $PD \approx cte.$ , siguiendo la línea de Calović),

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_{g1}^{-1} & 0 & -R_1^{-1}T_{g1}^{-1} & 0 \\ T_{t1}^{-1} & -T_{t1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p1}T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & -T_{12}K_{p1}T_{p1}^{-1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \\
 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12}K_{p1}T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} \quad [53.1]$$

Dada la simetría del modelo, la formulación perturbacional del área 2 es idéntica a la del área 1 (cambiando adecuadamente los subíndices).

Como se ha expuesto en las Bases Teóricas, la optimalidad de un sistema estructurado en áreas desacopladas puede evaluarse a partir de la expresión [52.32], viniendo acotado el valor mínimo alcanzable del índice de suboptimalidad  $\epsilon$  por el coeficiente  $\mathcal{F}_{ij}$ , definido como

$$\mathcal{F}_{ij} = \lambda_M^{\frac{1}{2}} (H_{ij}^T H_{ij}) \quad [53.2]$$

siendo  $H_{ij} = A_{ij} - B_i K_{ij}^g$ .

La anulación de  $\epsilon$  supone la posibilidad de obtener una matriz de ganancias  $K_{ij}^g$  que cumpla la relación (ecuaciones de coordinación [52.38] y [52.39]),

$$K_{ij}^g = (B_i^T B_i)^{-1} B_i^T A_{ij} \quad [53.3]$$

Contrastando la expresión [53.1] con [52.24], puede comprobarse fácilmente que el producto  $B_{i1}^T A_{i12}$  es nulo, por lo que

$$K_{i12}^g = 0$$

Dada la simetría entre la formulación del área 1 con la del área 2, se obtendría asimismo

$$K_{21}^g = 0$$

con lo que

$$H_{i12} = A_{i12}$$

$$H_{21} = A_{21}$$

A partir de esta última expresión, se obtiene, sustituyendo en [53.2],

$$\mathcal{F}_{12} = \lambda_M^{\frac{1}{2}} \left\{ \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array} \right\}$$

$$= T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1}$$

Siguiendo los mismos pasos para el área 2, se llegaría a

$$\mathcal{P}_{21} = T_{12} K_{p2} T_{p2}^{-1}$$

con lo que la expresión [52.32] queda acotada por:

$$T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} + T_{12} K_{p2} T_{p2}^{-1} \leq \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \frac{\min_i \lambda_m(\tilde{W}_i)}{\max_i \lambda_M(\tilde{P}_i)}, \quad i=1,2. \quad [53.4]$$

Desafortunadamente, los autovalores mínimo de la matriz  $\tilde{W}_i$  y máximo de la matriz de Riccati  $\tilde{P}_i$  no dependen sólo de la estructura del sistema, interviniendo también las penalizaciones de las matrices  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$  en su determinación. Dada la arbitrariedad del diseñador en la selección de estas penalizaciones, no se puede acotar de un modo general el valor de  $\varepsilon$  en la expresión anterior, aunque la estructura sea fija.

Sin embargo, la expresión anterior nos ofrece una primera información sobre el valor de  $\varepsilon$ : Este dependerá del estado de las interconexiones ( $T_{12}$ ) y del de la carga en las dos áreas ( $K_p$  y  $T_p$ ). Como se ha expuesto en el Capítulo 2, el parámetro  $T_{12}$  se determina a partir de los valores nominales de las tensiones y de las fases en las dos áreas, parámetros intrínsecamente variables en el tiempo. Asimismo, los parámetros  $K_p$  y  $T_p$  son también variables en el tiempo, al depender del estado de la carga en cada momento. Por ello, aunque estén determinadas la estructura del sistema y las matrices  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$ , el valor de  $\varepsilon$  tiene una componente aleatoria debida a la variabilidad de los parámetros de las interconexiones y de la carga.

La evaluación de la suboptimalidad de la alternativa de diseño propuesta a partir de la estructura de diseño de la fig. 53.1 no es tan inmediata como en el caso anterior, ya que el modelo de la carga del área externa es compartido por los dos subsistemas (fig. 53.4) y que la formulación del apartado 5.2.2. se aplica a interconexiones de subsistemas aislados. Por ello se incluye de modo indirecto a la variable  $x_8$  compartida por los RLO de los dos subsistemas, en la formulación del subsistema 1 (área de menor capacidad).

Esta inclusión indirecta de la variable  $x_8$  la efectuamos adelantando en el flujograma de la fig. 53.3 al elemento  $k_8^0$  del vector de control óptimo del área 1, el cual relaciona a la variable  $x_8$  con la entrada de control  $u_1$ .

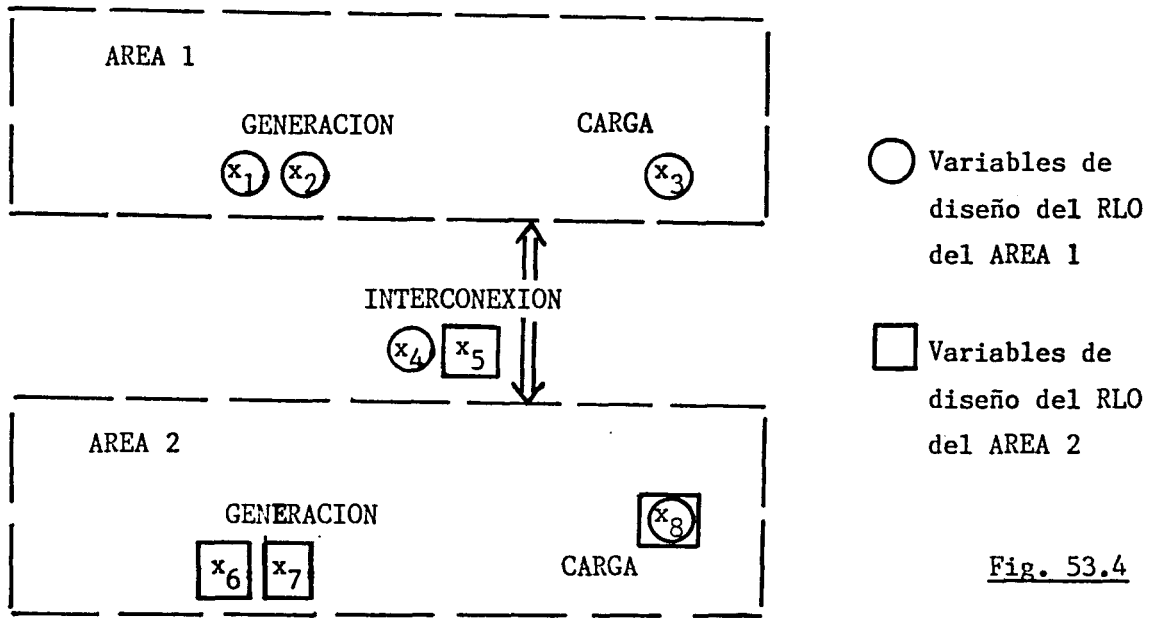


Fig. 53.4

Con ello la formulación del área 1 es:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_{g1}^{-1} & 0 & -R_1^{-1}T_{g1}^{-1} & 0 \\ T_{t1}^{-1} & -T_{t1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{p1}T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & -T_{12}K_{p1}T_{p1}^{-1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \\
 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_8^\circ T_{g1}^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12}K_{p1}T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} \quad [53.5]$$

En este caso la expresión [53.3] no es nula, permitiéndose un cierto nivel de coordinación

$$K_{12}^8 = (B_{\sim 1}^T B_{\sim 1})^{-1} B_{\sim 1}^T A_{12} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad k_8^\circ)$$

[ 53.6 ]



con la cual

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{12} &= A_{12} - B_1 K_{12}^g = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dado que este valor de  $\tilde{H}_{12}$  es igual al del caso anterior y que la formulación del área 2 permanece invariante, la acotación [53.4] es también válida para la segunda alternativa de control cuando se aplique la coordinación de [53.6]. En el caso de que no se implemente esta coordinación, la matriz  $\tilde{H}_{12}$  es

$$\tilde{H}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_{g1}^{oT-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

siendo entonces  $\tilde{F}_{12}$  (vease [53.2])

$$\tilde{F}_{12} = \text{MAX} ( k_{g1}^{oT-1} , T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} )$$

y quedando acotada la expresión [52.32] por

$$\text{MAX} ( k_{g1}^{oT-1} , T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} ) + T_{12} K_{p2} T_{p2}^{-1} \leq \frac{\epsilon}{1 + \epsilon} \frac{\min_i \lambda_m (W_i)}{\max_i \lambda_M (P_i)} , i=1,2$$

[ 53.7 ]

Las dos estructuras tienen índices de optimalidad parecidos (una afirmación más ajustada supone la determinación de los autovalores de  $\underline{W}_i$  y  $\underline{P}_i$ ) cuando en el segundo caso se implemente la ley de coordinación [53.6]. Por otro lado, contrastando [53.7] con [53.4] se deduce que si

$$T_{12} K_{p1} T_{p1}^{-1} > k_8^o T_{g1}^{-1}$$

la suboptimalidad entre las dos estructuras es también parecida, permaneciendo invariante el término de la izquierda de la desigualdad.

Si el cálculo del coeficiente  $k_8^o$  da un valor tal que

$$k_8^o T_{g1}^{-1} > T_{12} K_{p1} R_{p1}^{-1}$$

entonces el término de la izquierda de la expresión [53.7] es mayor que el de [53.4], lo que, en principio, puede repercutir desfavorablemente a la reducción de  $\mathcal{E}$ . En contrapartida, en este caso se reduce la aleatoriedad en la determinación de  $\mathcal{E}$ , al no depender ahora de los parámetros de la carga del Area 1.

Con los valores paramétricos recopilados en el Capítulo 2, puede afirmarse que, por lo general, los términos de la izquierda de [53.4] y [53.7] tendrán magnitudes parecidas, de lo que se deduce que la diferencia de optimalidad entre las dos estructuras de diseño dependerá más de la selección de los elementos de  $\underline{Q}$  y  $\underline{R}$  (que intervendrán en los autovalores de  $\underline{W}$  y  $\underline{P}$ ) que de la propia estructura de diseño.

## 5.4.- DISEÑO SOBRE EL MODELO OBTENIDO.

### 5.4.1.- Introducción

En el presente apartado se va a formular el diseño del RLO sobre el modelo elaborado en el Capítulo 2, y que se reproduce en la Fig. 54.1.

Como ya ha sido expuesto, este modelo de generación primaria ofrece la ventaja de estar dimensionado con las capacidades de generación de la zona catalana por un lado y del resto del sistema español y francés por otro. Aunque el modelo no pretende reproducir exactamente la dinámica de estas dos zonas, para lo cual se precisarían datos experimentales no disponibles, sus valores paramétricos han sido adecuados a partir de resultados experimentales propios en centrales del ámbito empresarial catalán, ampliados con una detallada recopilación bibliográfica.

Para reducir las dificultades de formulación y de cálculo, se ha procurado limitar la complejidad del modelo de generación primaria. Para ello se ha acotado la generación de las dos zonas a la hidroeléctrica (aunque se ha incluido la inercia de las centrales térmicas en el modelo de la carga) y se ha simplificado la estructura. En consecuencia, el margen de validez del modelo se centra a pequeñas perturbaciones (tales que no rebasen la zona muerta de los reguladores de velocidad de las centrales térmicas), valiendo para una primera estimación del comportamiento de la zona catalana interconectada al resto del sistema. Por otro lado, este modelo permite el estudio de un SEE formado por dos áreas de distintas capacidad.

Como se ha adelantado en el Capítulo 4, no se seguirá la línea de estudio más abundada en la bibliografía, consistente en concebir un RLO descentralizado para todas las áreas del modelo, sino que, en consideración al estado actual de los SEE, se mantendrá un regulador PI convencional en el área de mayor capacidad (Area 2 ó área externa) y se diseñará el RLO sobre el área más pequeña.

Aparte de esta modificación de los trabajos actuales sobre los RLO de P/f descentralizados, se evaluará la posibilidad de limitar el esfuerzo de las unidades generadoras acotando las desviaciones del lazo de realimentación transitoria de los reguladores de velocidad.

El diseño del RLO se hará según las dos estructuras del apartado anterior (desacoplo por la línea de interconexión y desacoplo de la generación del área externa), estudiándose por simulación el efecto de diferentes penalizaciones de los estados y evaluándose el caso de que el área externa no fuerce su generación cuando el Area 1 sea sujeto de perturbaciones. Con ello se pretende ampliar la información actual sobre el diseño de RLO continuos y descentralizados, estableciéndose unas conclusiones prácticas sobre las posibles ventajas de implementar un RLO en un área reducida respecto al conjunto y sobre el efecto de diferentes penalizaciones de las variables en la dinámica del sistema.

#### 5.4.2.- Formulación del modelo

Seleccionando como variables de estado al siguiente conjunto de variables físicas:

##### Area 1

$x_1$  = apertura distribuidores.

$x_2$  = desplazamiento realimentación transitoria ("dash-pot").

$x_3$  = potencia generada.

$x_4$  = frecuencia.

##### Area 2

$x_6$  = frecuencia.

$x_7$  = potencia generada.

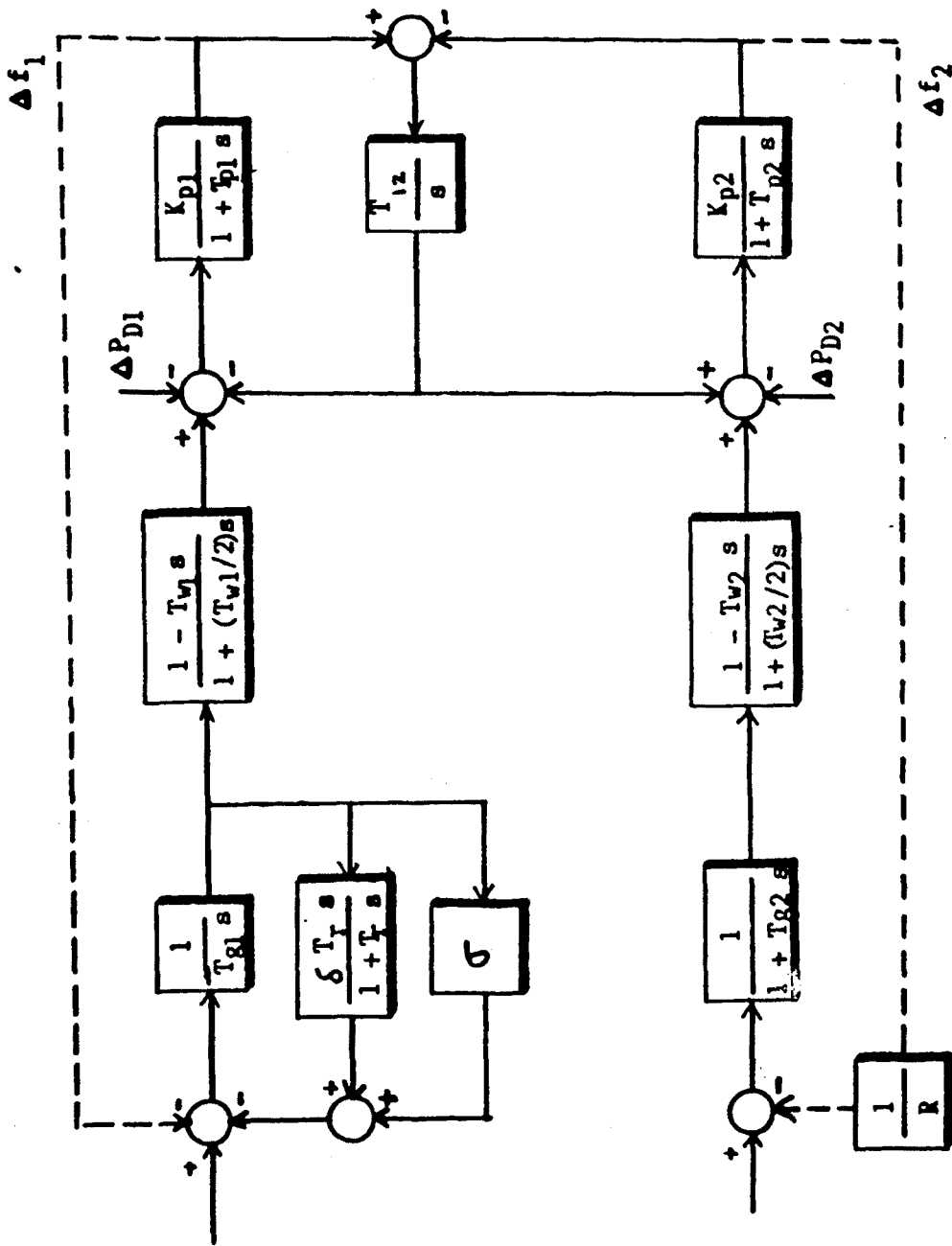
$x_8$  = apertura distribuidores.

##### Interconexión

$x_5$  = potencia intercambiada,

se ha obtenido, a partir del modelo de la Fig. 54.1, el flujograma representado en la Fig. 54.2.

Con ello, las ecuaciones de estado del sistema, acordes a [ 52.51 ] son:



- $T_{g1} = 26,51 \text{ p.u. cm } \delta V / \text{p.u. MW cm}$
- $\delta = 5,3518 \text{ Hz/p.u.MW}$
- $\sigma = 12,97 \text{ Hz/p.u.MW}$
- $T_r = 3,66981 \text{ seg.}$
- $T_{w1} = 0,964 \text{ seg.}$
- $K_{p1} = 66,6666 \text{ Hz/p.u.MW}$
- $T_{p1} = 10,666 \text{ seg.}$
- $T_{12} = 1,53 \text{ p.u.MW x seg / Hz.}$
- $R^{-1} = 1,777 \text{ p.u.MW/Hz}$
- $T_{g2} = 33,86 \text{ seg.}$
- $T_{w2} = 1 \text{ seg.}$
- $K_{p2} = 5,0625 \text{ Hz/p.u.MW}$
- $T_{p2} = 0,81 \text{ seg.}$

----- Funcionamiento primario.

Fig. 54.1.1.- Modelo elaborado en el Capítulo 2.



$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta T_{g1}^{-1} & -T_{g1}^{-1} & 0 & -T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\delta T_{g1}^{-1} & -(\delta T_{g1}^{-1} + T_r^{-1}) & 0 & -\delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_{w1}} + 2\delta T_{g1}^{-1} & 2T_{g1}^{-1} & -\frac{2}{T_{w1}} & 2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{p1} T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & -K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{12} & 0 & -T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{p2} T_{p2}^{-1} & -T_{p2}^{-1} & K_{p2} T_{p2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2R^{-1} T_{g2}^{-1} & -\frac{2}{T_{w2}} & \frac{2}{T_{w2}} + 2T_{g2}^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} T_{g2}^{-1} & 0 & -T_{g2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2R^{-1}T_{g2}^{-1} & 0 \\ -2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R^{-1}T_{g2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{p1}T_{p1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{p2}T_{p2}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} PD_1 \\ PD_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[ 54.1 ]

(  $u_1 = f_1$  ,  $u_2 = f_2$  )



Como puede comprobarse, las entradas del modelo ya están descentralizadas.

La inclusión de las perturbaciones  $PD_1$  y  $PD_2$  en el vector de control llevaría a la obtención de unos coeficientes  $\tilde{K}_{ij}$  (fig. 54.3) de realimentación no implementables que forzarían la generación proporcionalmente a los estados del sistema (aunque en un segundo estudio podría evaluarse la posibilidad de hacerlo mediante centrales magnetoeléctricas o de aire comprimido, dada su gran velocidad de respuesta).

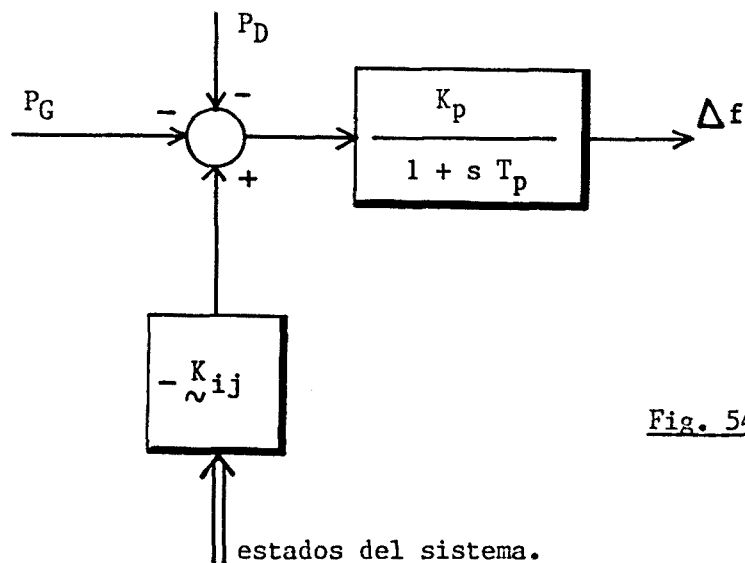


Fig. 54.3.

Por ello, siguiendo la línea más usada en la bibliografía, se supondrá que la variación de las perturbaciones es lenta respecto a la dinámica propia del SEE, de forma que éstas se puedan considerar constantes en la formulación.

Con ello, y ampliando con el ACE a las ecuaciones de estado del Area 1, objeto de diseño del RLO,

$$v = \int ACE \, dt = \int (\beta_3 x_4 + x_5) \, dt \quad [ 54.2 ]$$

se obtiene la siguiente notación perturbacional del Area 1, acorde a [ 52.59 ], cuando el desacoplo entre los modelos de las dos áreas se efectúa a través de la línea de interconexión según se ha formulado en el apartado 5.2.3,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta T_{g1}^{-1} & -T_{g1}^{-1} & 0 & -T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ -\delta T_{g1}^{-1} & -(\delta T_{g1}^{-1} + T_r^{-1}) & 0 & -\delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_{w1}} + 2\delta T_{g1}^{-1} & 2T_{g1}^{-1} & \frac{2}{T_{w1}} & 2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{p1} T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & 0 & -K_{p1} T_{p1}^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & T_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -T_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ \delta T_{g1}^{-1} \\ -2T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

[ 54.3 ]

Eliminando de la expresión anterior el término de perturbación, se obtiene la siguiente expresión del Area 1 desacoplada, que será el modelo de diseño del RLO descentralizado.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta T_{g1}^{-1} & -T_{g1}^{-1} & 0 & -T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ -\delta \delta T_{g1}^{-1} & -(\delta T_{g1}^{-1} + T_r^{-1}) & 0 & -\delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_{w1}} + 2\delta T_{g1}^{-1} & 2T_{g1}^{-1} & -\frac{2}{T_{w1}} & 2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{pl} T_{pl}^{-1} & -T_{pl}^{-1} & 0 & -K_{pl} T_{pl}^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & T_{12} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ \delta T_{g1}^{-1} \\ -2T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

[ 54.4 ]

Por otro lado, si se desacopla al modelo de forma que la estructura de diseño del RLO del Area 1 incluya a la carga del Area 2, la notación perturbacional del Area 1 es:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta T_{g1}^{-1} & -T_{g1}^{-1} & 0 & -T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\delta T_{g1}^{-1} & -(\delta T_{g1}^{-1} + T_r^{-1}) & 0 & -\delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_{w1}} + 2\delta T_{g1}^{-1} & 2T_{g1}^{-1} & \frac{2}{-T_{w1}} & 2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{p1} T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & 0 & -K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -T_{p1}^{-1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{12} & 0 & 0 & -T_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{p2} T_{p2}^{-1} & -T_{p2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_{p2} T_{p2}^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ \delta T_{g1}^{-1} \\ -2T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

de donde se deduce el modelo de diseño del RLO descentralizado para este caso (expresión [ 54.6 ] de la siguiente hoja).

Los valores paramétricos de los modelos [ 54.4 ] y [ 54.6 ] son los reflejados en la Fig. 54.1. El coeficiente  $\beta$  (bias factor) del ACE se ha escogido a partir del coeficiente D de autoregulación de la carga y del estatismo permanente  $\sigma$  (ó R) de las unidades, siendo para el Area 1,

$$\beta_1 = D_1 + \sigma^{-1} = 0,092 \text{ p.u.MW/Hz.}$$

y para el Area 2,

$$\beta_2 = D_2 + R^{-1} = 1,9745 \text{ p.u.MW/Hz.}$$

Los valores paramétricos del modelo del Area 1 desacoplada según [ 54.4 ] se reflejan en [ 54.7 ] , mientras que los del modelo [ 54.5 ] son los de [ 54.8 ] .

Obtenido el modelo de diseño para los dos tipos de desacoplo, y seleccionando al criterio integral [ 52.30 ] ,

$$J = \int_0^{\infty} e^{2\alpha_0 t} (\tilde{x}^T \tilde{Q} \tilde{x} + \tilde{u}^T \tilde{R} \tilde{u}) dt,$$

solo falta escoger a las matrices de ponderación  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$  y al coeficiente  $\alpha_0$  (que determina el grado de estabilidad del sistema) para poder abordar la resolución de las ecuaciones [ 52.13 ] y [ 52.4 ] que llevarán a la obtención del vector de control óptimo de cada uno de los dos esquemas de control de la fig. 54.4.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sigma T_{g1}^{-1} & -T_{g1}^{-1} & 0 & -T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ -\sigma T_{g1}^{-1} & -(\delta T_{g1}^{-1} + T_r^{-1}) & 0 & -\delta T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{T_{w1}} + 2\sigma T_{g1}^{-1} & 2T_{g1}^{-1} & -\frac{2}{T_{w1}} & 2T_{g1}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{p1} T_{p1}^{-1} & -T_{p1}^{-1} & 0 & -K_{p1} T_{p1}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{l2} & 0 & 0 & -T_{l2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{p2} T_{p2}^{-1} & -T_{p2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} T_{g1}^{-1} \\ \delta T_{g1}^{-1} \\ -2T_{g1}^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4889 & -0,0377 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2,6168 & -0,4742 & 0 & -0,00377 & 0 & 0 \\ 3,0525 & 0,0754 & -2,0746 & -0,2017 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6,25 & 0,0754 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0937 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,092 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,53 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0,0377 \\ 0,2017 \\ -0,0754 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

[ 54.7 ]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{v} \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,4889 & -0,0377 & 0 & -0,00377 & 0 & 0 & 0 \\ -2,6168 & -0,4742 & 0 & -0,2017 & 0 & 0 & 0 \\ 3,0525 & 0,0754 & -2,0746 & 0,0754 & 0 & 0 & -1,53 \\ 0 & 0 & 6,25 & -0,0937 & 0 & -6,25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,092 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,53 & 0 & 0 & -1,53 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6,25 & -1,2343 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ v \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0,0377 \\ 0,2017 \\ -0,0754 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1$$

[ 54.8 ]



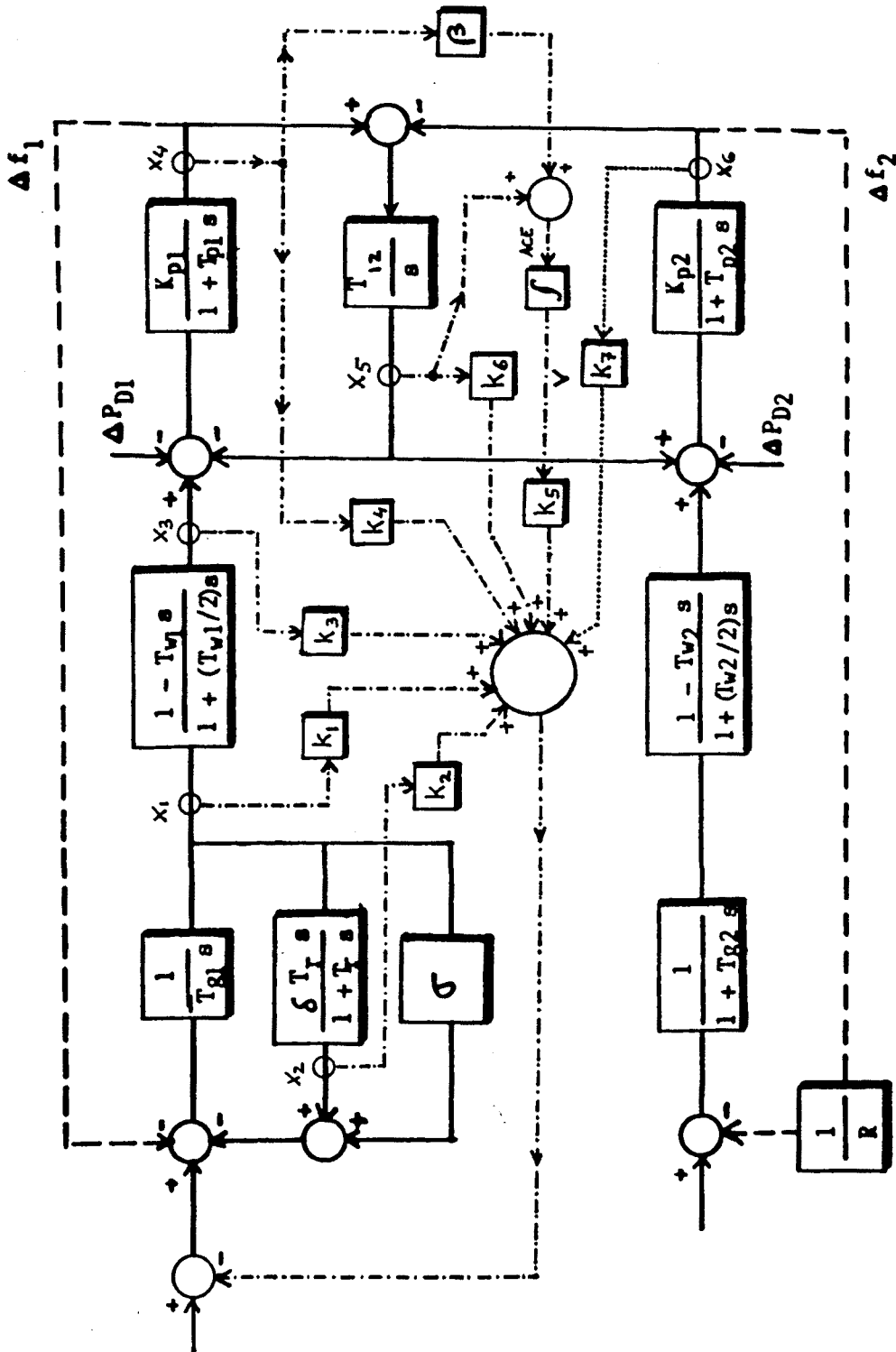
Fig. 54.4:

$k_1-k_6$  (-----)

Estructura de diseño típica del RLO descen-tralizado.

$k_1-k_7$  (----- + .....)

Inclusión de la carga externa.



----- Funcionamiento primario.

### 5.4.3.- Selección de las penalizaciones y resultados de simulación.

Se han seleccionado y experimentado 17 casos con diferentes valores de los elementos de las matrices  $\tilde{Q}$  y  $\tilde{R}$  y del coeficiente  $\alpha_0$ .

En primer lugar se ha estudiado el comportamiento del sistema cuando el RLO ha sido diseñado a partir del modelo obtenido al desacoplar las dos áreas por su línea de interconexión (expresión [54.4]), seleccionándose (caso (A)) los siguientes valores:

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

En segundo lugar se ha estudiado la otra estructura de diseño propuesta en el apartado 5.3 y modelada según la expresión [54.6] (consistente en incluir al modelo de la carga del área externa en la formulación del RLO), seleccionándose en primer lugar (caso (B)):

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

y evaluándose posteriormente la influencia de ponderar de forma especial diferentes variables del SEE. Así, se han seleccionado las siguientes penalizaciones:

Caso (C): Sobrepenalización de las desviaciones de la frecuencia del Area 1 ( $x_4$ , fig. 54.2):

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (D): Subpenalización de  $x_4$ :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (E) : Sobrepenalización de las desviaciones de la frecuencia del Area 2 ( $x_6$ ):

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (F) : Subpenalización de  $x_6$ :

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (G) : Sobrepenalización de la potencia transferida por la interconexión ( $x_5$ ):

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (H) : Subpenalización de  $x_5$ :

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (I) : Sobrepenalización de la integral del ACE (IACE en lo sucesivo):

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

En un segundo estudio se han evaluado distintas formas de reducir el esfuerzo de control, comparándose respecto al caso (F) el efecto de penalizar menos las desviaciones de la variable de salida del lazo de realimentación transitoria de los reguladores de velocidad (aumentándose así su efecto de "frenado" sobre la velocidad de generación), en los dos casos:

Caso (J) : Subpenalización de la realimentación transitoria ( $x_2$ ):

$$\alpha_o = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

Caso (K) : Subpenalización de  $x_2$ :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

$$\tilde{Q} = \text{diag} (0,5; 0,02; 0,5; 0,5; 1; 0,5; 0,5),$$

el de penalizar más la potencia generada en el Area 1 ( $x_3$ ):

Caso (L) : Sobrepenalización de  $x_3$ :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

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

y el de modificar directamente el esfuerzo de control mediante la matriz  $\tilde{R}$  (línea de Calović):

Caso (M) : Aumento de  $\tilde{R}$ :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = 2 \tilde{I}$$

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

Caso (N) : Reducción de  $\tilde{R}$ :

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = 0,5 \tilde{I}$$

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

En el siguiente caso se han seleccionado valores diferentes de los elementos de la matriz  $\tilde{Q}$ ,

Caso (O) : Diferenciación entre las penalizaciones de IACE y de sus variables constituyentes y las de las variables de la generación.

$$\alpha_0 = 0$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

$$\tilde{Q} = \text{diag} (0,2; 0,5; 0,2; 0,8; 1; 0,9; 0,8)$$

de forma que el ACE, el intercambio de potencia y la frecuencia de las dos áreas, por este orden, sean más penalizadas que las variables relacionadas con la generación.

A partir del caso ① se han seleccionado los valores de los dos últimos casos, orientados al estudio del efecto del coeficiente  $\alpha_0$ ,

Caso ② : Aumento de  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = 0,01$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

$$\tilde{Q} = \text{diag} (0,2; 0,5; 0,2; 0,8; 1; 0,9; 0,8)$$

Caso ③ : Aumento de  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = 0,02$$

$$\tilde{R} = \tilde{I}$$

$$\tilde{Q} = \text{diag} (0,2; 0,5; 0,2; 0,8; 1; 0,9; 0,8)$$

(Para valores de  $\alpha_0$  superiores a 0,02 empezaban a aparecer problemas de controlabilidad).

A partir de las penalizaciones presentadas se ha efectuado un amplio estudio de simulación que amplía los resultados ofrecidos en la bibliografía. Con ello se pretende, por un lado, obtener una información empírica válida para que los centros de control (que son los que, en última instancia, se encargarán de seleccionar las penalizaciones) puedan, a priori, estimar el efecto de penalizaciones diferentes y particulares de las distintas variables sobre la dinámica del SEE (transitorios, calidad y esfuerzo de control). Por otro lado, al estudiarse la implantación del RLO solo en el área de menor capacidad, se puede evaluar si, en un caso más realista, se mantienen las ventajas demostradas en la bibliografía cuando se aplica un RLO descentralizado a todas las áreas.

Para obtener los coeficientes de realimentación (vector de control óptimo) de cada uno de los 17 casos seleccionados, ha sido preciso resolver la ecuación de Riccati [D.21] del Apéndice D. Para ello se ha usado un programa Fortran basado en una adaptación y modificación del programa "RICATI" de la referencia [126]. En concreto las modificaciones han sido (además de corregir la instrucción 320 de la pag. 86 de la citada referencia) la inclusión de la posibilidad de seleccionar el período de muestreo y la precisión de los resultados (véase apartado 5.2.1), así como la de usar el criterio integral de Anderson y Moore (cambio de la matriz  $\tilde{A}$  por  $\tilde{A} + \alpha_0 \tilde{I}$ , según [52.13]). En las hojas S1 y S2 del Apéndice E se muestra un ejemplo de aplicación del programa, cuyo tiempo de cálculo ha oscilado entre los 120 minutos (cuando R es pequeña) y los 255 minutos (al aumentar  $\alpha_0$ ). El vector de control óptimo obtenido para cada uno de los casos estudiados se refleja en la tabla T5.1.

←----- VARIABLES (véanse figs. 54.1 y 54.2) -----→

CASO	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$\int$ ACE dt	$x_5$	$x_6$
(A)	3,282	-0,131	0,3401	0,1137	0,7068	0,0398	
(B)	3,535	-0,1378	0,3536	0,0954	0,706	0,0558	0,019
(C)	3,7629	-0,1443	0,3627	0,0899	0,7066	0,0848	0,0252
(D)	3,35	-0,1325	0,3463	0,0998	0,7064	0,0325	0,0141
(E)	3,778	-0,1444	0,3607	0,0878	0,7065	0,0706	0,0276
(F)	3,3379	-0,1323	0,3479	0,1015	0,7064	0,0438	0,0123
(G)	3,5477	-0,1380	0,348	0,0912	0,7064	0,0643	0,0223
(H)	3,525	-0,137	0,358	0,0988	0,7065	0,0489	0,0165
(I)	4,6268	-0,1895	0,5061	0,1455	0,9996	0,0534	0,023
(J)	4,5638	-0,219	0,5098	0,1479	0,9996	0,05	0,025
(K)	4,512	-0,283	0,510	0,1497	0,999	0,048	0,0283
(L)	4,644	-0,1898	0,5024	0,1453	0,9996	0,0537	0,023
(M)	3,2402	-0,1503	0,353	0,1059	0,7067	0,0271	0,0114
(N)	6,6425	-0,2279	0,7286	0,1973	1,4141	0,1046	0,0466
(O)	4,887	-0,196	0,5138	0,1346	0,9996	0,086	0,0348
(P)	5,7149	-0,243	0,6082	0,1647	1,186	0,0883	0,0373
(Q)	6,6244	-0,2947	0,7124	0,198	1,3919	0,0906	0,04

TABLA T5 . 1.- Coeficientes de realimentación.

Con los valores de la tabla anterior se ha procedido a simular el comportamiento del sistema en los diferentes casos seleccionados. Para ello se ha determinado, en primer lugar, la ganancia del regulador secundario del Area 2, ajustándola bajo la suposición de que, previamente a la implementación del RLO en el Area 1, las dos áreas dispusieran de un regulador secundario de tipo I. En las figs. 54.4 y 54.5 (en las que se adelanta un resultado de simulación con un RLO que se comentará más adelante), se muestran las respuestas de la frecuencia del Area 1 y de la generación del Area 2 frente a una perturbación de 0,01 p.u.MW en el Area 1 cuando varían las ganancias de los integradores de los reguladores secundarios de las dos áreas ( $K_1$  para el Area 1 y  $K_2$  para el Area 2).

A partir de estos resultados se ha seleccionado un valor de

$$K_2 = 0,02,$$

el cual se mantendrá constante en las restantes simulaciones.

Con este valor de  $K_2$  y usando el modelo desarrollado en el Capítulo 2 se han obtenido, para los diferentes vectores de control de la tabla T5.1, los resultados del Apéndice E, los cuales se resumen (con menor detalle) en las Figs. 54.6, 54.7, 54.8 y 54.9. En todos los casos la entrada al modelo de simulación ha consistido en una perturbación indicial de 0,01 p.u.MW en el Area 1.

En la tabla T5.2 se muestran diferentes índices de calidad de algunas de las penalizaciones seleccionadas.



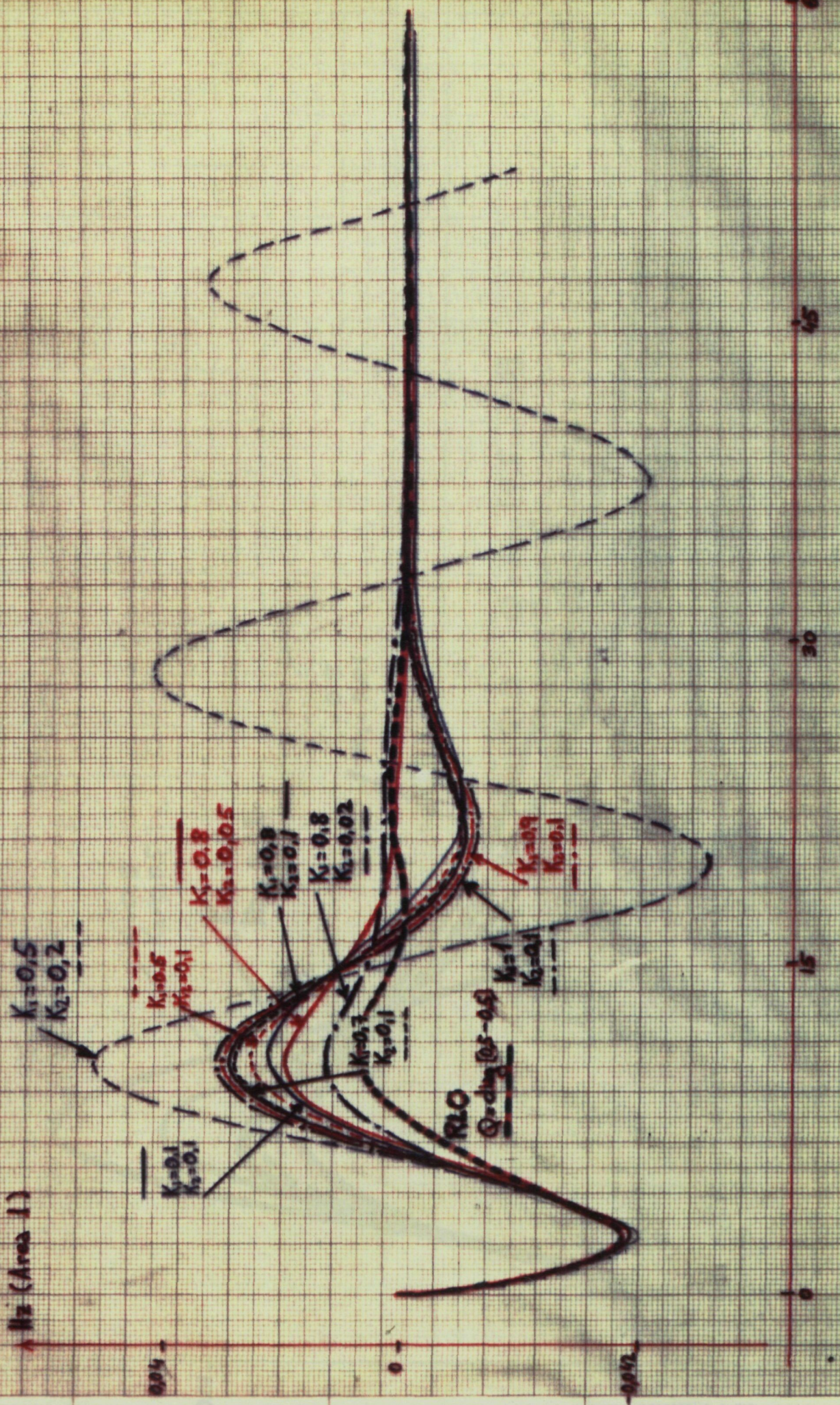
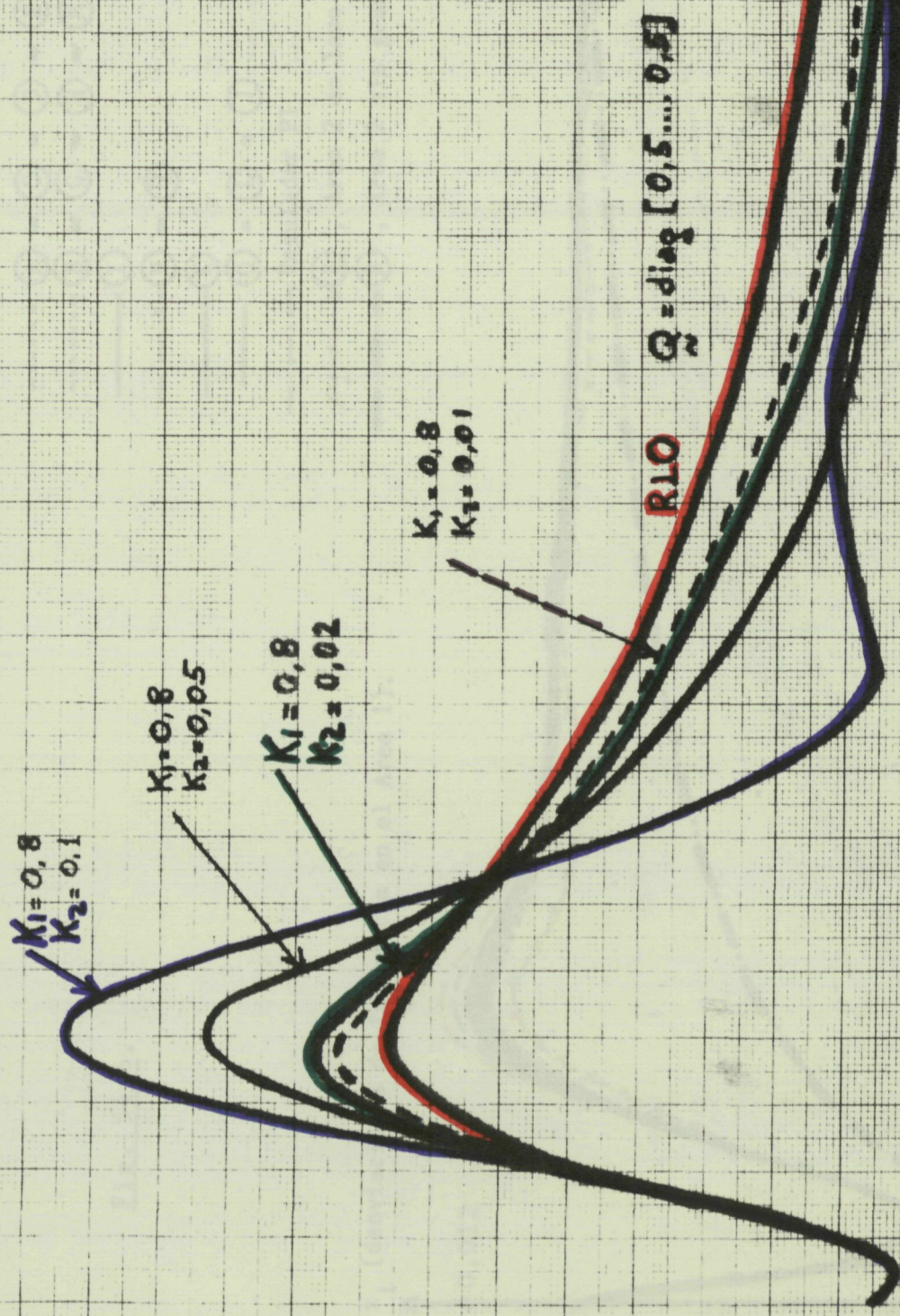


Fig. 54.4



↑ p.u. MW (Area 2)

0.01 —



0 15 20 25 30 km

0.01

60 km

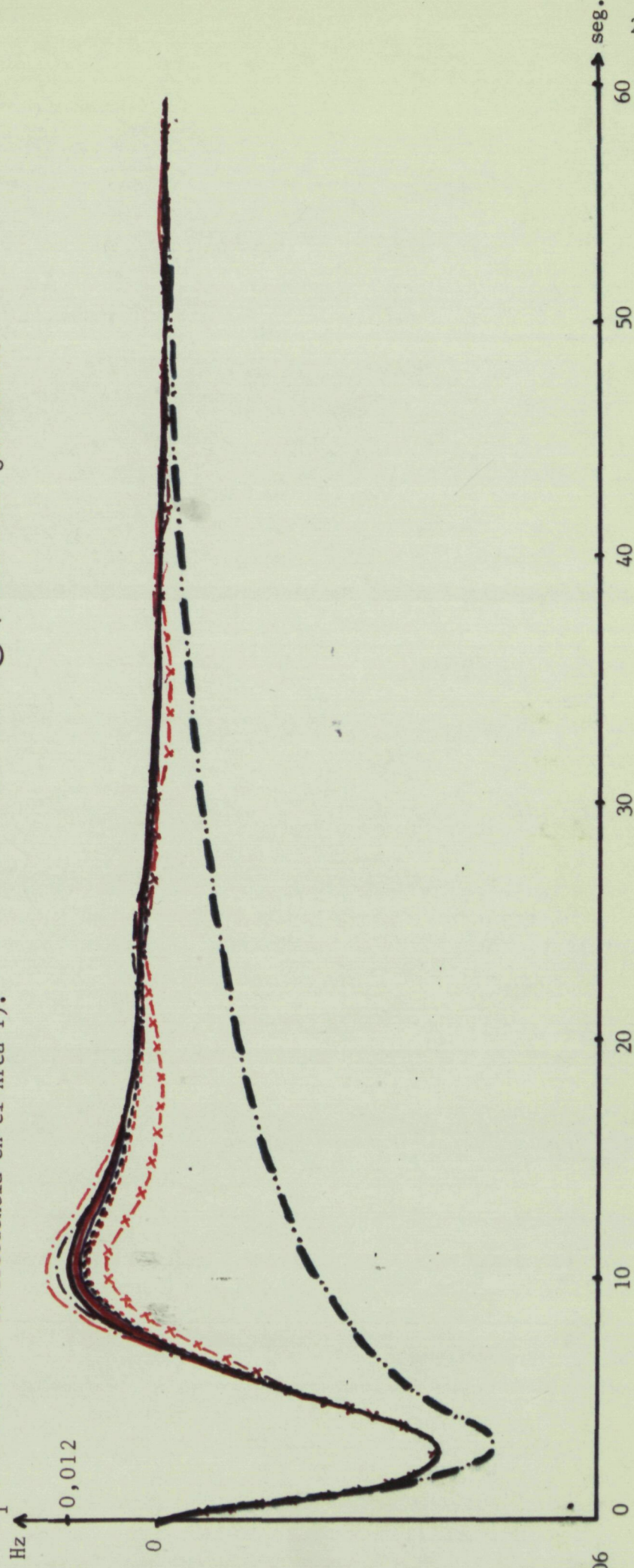
Fig. 54.5.



Fig. 54.6.

- (A) = (C) = (D) = (E) = (F)
- (B) = (G) = (H) = (M)
- (I)
- (N) = (Q)
- (K)
- (O) = (L) = (J)
- · - · - Regulator PI
- x - x - (B) , Area 2 en lazo primario.
- · — · — (B) , Area 2 sin generación.

$x_1$  (desviaciones de frecuencia en el Area 1).



### 5.5.- CONCLUSIONES.

En este capítulo se han estudiado algunos aspectos del RLO continuo de P/f que no habían sido adecuadamente tratados en la bibliografía, mejorándose así el diseño del RLO continuo antes de entrar en su versión discreta.

En el apartado 5.2.3 se ha rehecho la formulación de Siljak y Calović sobre el RLO descentralizado (de área autónoma), adaptándola al modelo usado por Elgerd y Fosha para las interconexiones y aportándose una matriz de cuantificación  $\underline{M}$  con el objetivo de anular las consignas que supongan variaciones poco importantes en la generación (reduciéndose consecuentemente las necesidades de telemando).

Por otro lado se ha cuestionado la importancia de incluir el modelo de la carga externa en la estructura de diseño del RLO descentralizado, la cual se ha evaluado de dos formas distintas: En primer lugar, y operando con el modelo de dos áreas iguales de Elgerd y Fosha por su mayor simplicidad, se ha hecho un estudio analítico comparativo entre la suboptimalidad de la estructura típica del diseño del RLO descentralizado (comunmente usada por Siljak, Calović y Bengiamin) y la de la estructura ampliada con un modelo de la carga externa (siguiendo la línea de Hiyama), se deduce la imposibilidad de establecer unos criterios rígidos que diagnostiquen la mayor o menor optimalidad de cada estructura. En todo caso, la única conclusión es la menor ambigüedad en el establecimiento del índice de suboptimalidad de la estructura ampliada con el modelo de la carga externa si el valor del coeficiente de realimentación de las desviaciones de frecuencia del área externa es elevado. En segundo lugar, operando y simulando sobre el modelo elaborado en el Capítulo 2, se ha observado que esto no era así, dado que dicho coeficiente de realimentación tenía valores pequeños para las diferentes penalizaciones seleccionadas de la matriz  $\underline{Q}$ , de lo que se concluye la poca importancia de incluir el modelo de la carga externa en el diseño del RLO descentralizado al no tener efectos significativos sobre la optimalidad la conjugación de la propia generación del área con la energía cinética cedida por las masas rodantes externas a ella, incluso en el caso de que la capacidad del área externa sea elevada. Con ello se han ampliado las conclusiones de Calović [25,26], quién ya había notado por simulación un efecto similar cuando la capacidad de las áreas eran más parecida y se implementaba un RLO en cada una de ellas.

Del estudio de las diferentes penalizaciones de las desviaciones de las variables del área, se ha notado que estas deben ser elevadas para que se note la limitación de dichas variables, ya que el área externa, de mayor potencia, arrastra la dinámica del área objeto de diseño del RLO. Si bien la dinámica del SEE ha resultado ser más sensible a la penalización de la integral del ACE que

a la de las restantes variables del sistema (lo que es lógico al estar éste formado por la combinación lineal de dos variables), de la comparación entre las diferentes dinámicas obtenidas para las penalizaciones seleccionadas y de la de estas dinámicas con la del RPF basado en los clásicos reguladores PI, se desprende que el comportamiento del SEE cuando se aplica el RLO a un área puede considerarse superior al del mismo sistema con los clásicos reguladores PI, pero no teniendo esta mejora de comportamiento el grado de espectacularidad que se había reflejado en otros trabajos [26, 145, 144, 197, 153, 86, 8], dada la reducida capacidad del área objeto de diseño del RLO. En todo caso, el RLO ofrece unas dinámicas que pueden considerarse superiores a las del regulador PI cuando sea importante reducir el uso de la reserva rodante del área externa, o se pretendan menores sobrepicos de frecuencia.

La limitación del esfuerzo de control mediante la penalización de la realimentación transitoria de los reguladores de velocidad ha resultado ser posible, aunque, al igual que la de las otras variables, requiere fuertes penalizaciones para que sea significativa. Sus efectos han resultado parecidos a la limitación de dicho esfuerzo mediante una adecuada penalización de la matriz  $\tilde{R}$  (como propone Calović) o de la potencia generada por el área, por lo que sólo puede ser considerada como un método alternativo de reducción del esfuerzo de generación.

Por último, se ha evaluado la utilización del criterio integral de Anderson y Moore, comprobándose que la fijación de un grado mínimo de estabilidad da unos efectos semejantes a los derivados de la reducción de la matriz  $\tilde{R}$ .



Fig. 54.7.

$x_3$  ( potencia generada en el Area 1 )

p.u.MW.

012

- (A) --- (C) --- (D) --- (E) --- (F)
- - - (B) - - - (G) - - - (H) - - - (M)
- (I)
- · - · (N) - · - · (O)
- (K)
- (J) = (L)
- · - · Regulator PI.
- x — x (B), Area 2 en lazo primario.

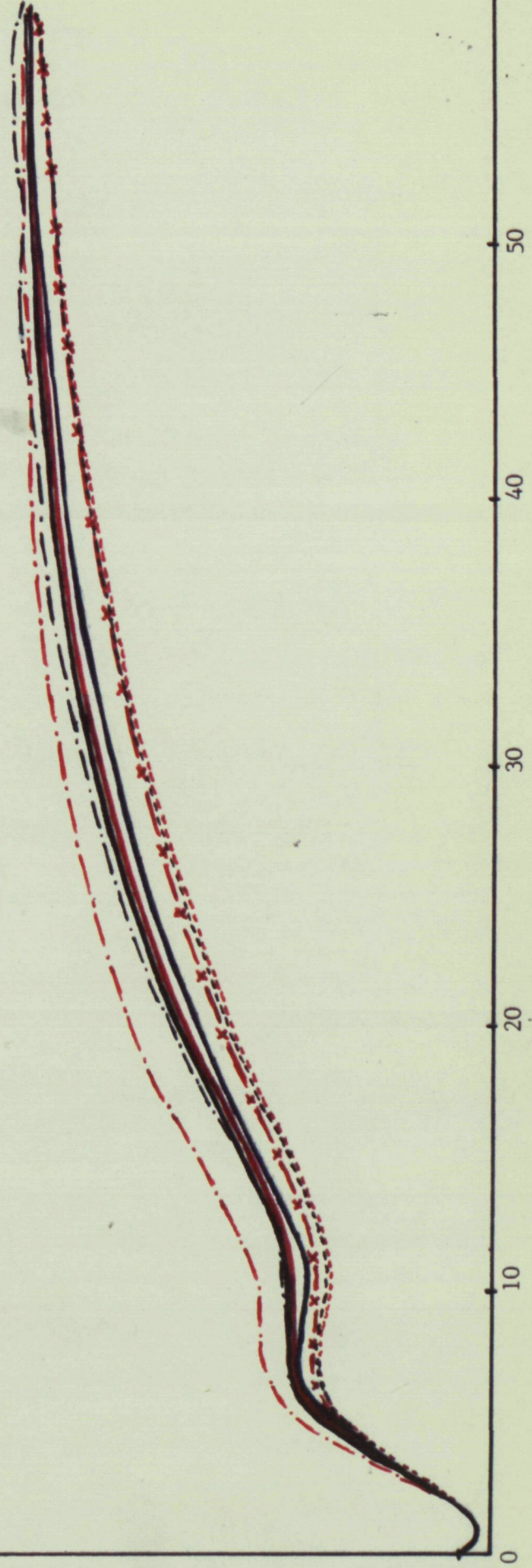
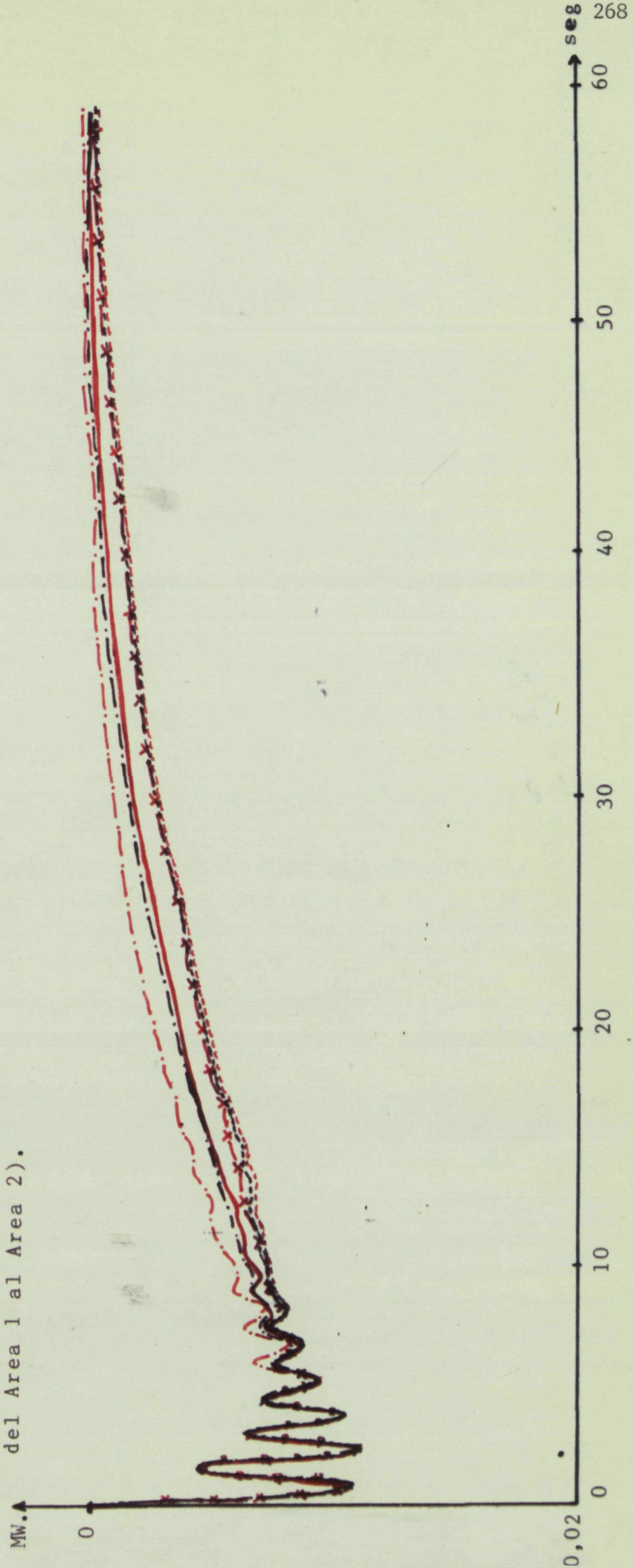




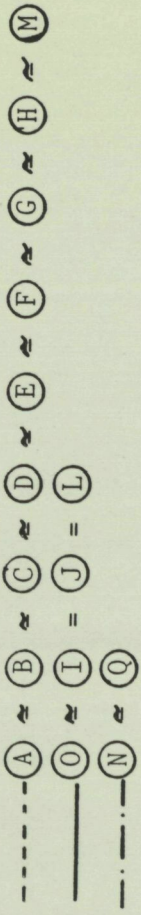
Fig. 54.8.

- (A) ≈ (C) ≈ (D) ≈ (E) ≈ (F)
- (B) ≈ (G) ≈ (H) ≈ (M)
- (O) ≈ (I) = (J) = (L)
- · - · (N) ≈ (Q)
- · - · Regulator PI.
- x—x (B), Area 2 en lazo primario.

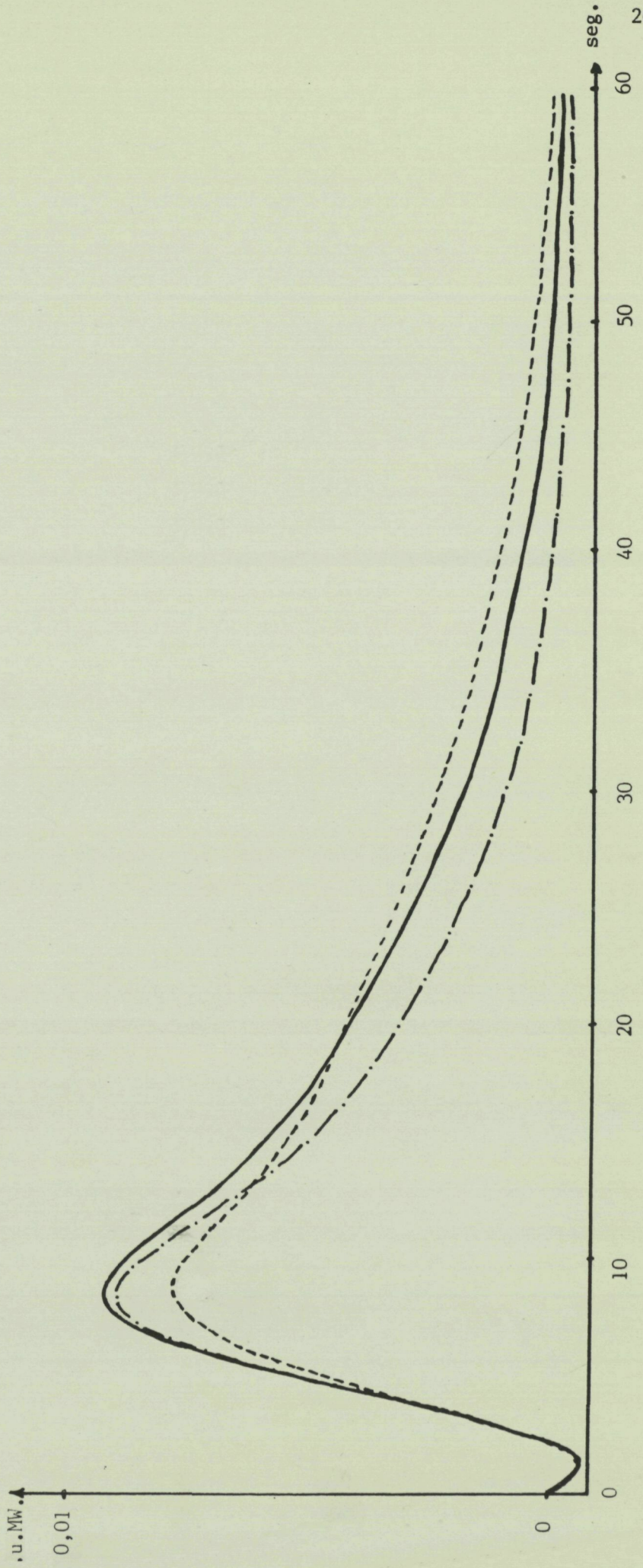
$x_5$  (intercambio de potencia del Area 1 al Area 2).







$x_7$  (potencia generada en el Area 2).



CASO	$\int_0^{160} ACE(t) dt$	$\int_0^{160} x_3^2(t) dt =$ $= \int_0^{160} f_1^2(t) dt$	$\int_0^{160} x_5^2(t) dt =$ $= \int_0^{160} P_{12}^2(t) dt$
Ⓐ	-0,2388	0,0061	0,0013
Ⓑ	-0,2386	0,0061	0,0013
Ⓑ Area 2 en lazo primario.	-0,2383	0,0061	0,0013
Ⓑ Area 2 sin generación.	-0,1811	0,014	0,0006
Ⓒ	-0,2420	0,0061	0,0013
Ⓔ	-0,2422	0,0061	0,0013
Ⓖ	-0,2394	0,0061	0,0013
Ⓘ	-0,1812	0,0063	0,0010
Ⓙ	-0,1806	0,0062	0,0010
Ⓜ	-0,2344	0,0061	0,0013
Ⓝ	-0,1439	0,0064	0,0008
Ⓞ	-0,1838	0,0062	0,0010
Ⓠ	-0,1459	0,0064	0,0008
Regulador PI	-0,1622	0,0065	0,0010

Tabla T5.2.



#### 5.4.4.- Conclusiones.

De las tablas y figuras de la sección precedente se deducen de forma inmediata una serie de conclusiones que se van a ir exponiendo a continuación. Para ello se seguirá el mismo orden con que se han ido eligiendo las penalizaciones en la sección anterior.

En primer lugar, la comparación entre los casos (A) y (B) refleja que el efecto de incluir al modelo de la carga externa en la estructura de diseño del RLO es despreciable. El parecido entre los transitorios y los índices de calidad en ambos casos no puede atribuirse totalmente a que la mayor capacidad de generación del área externa equipare ambas dinámicas, dado que, como puede comprobarse en la Tabla T5.1, los coeficientes de realimentación son muy semejantes en ambos casos. Esta conclusión amplia y ratifica las de Calović [25,26](Capítulo 4) al probarse que, incluso en el caso de que sólo se incluya al modelo de la carga externa en el diseño del RLO de un área de reducida capacidad, el vector de control óptimo depende poco de los estados externos al área.

Al modificarse la penalización de las desviaciones de frecuencia en los casos (C), (D), (E) y (F) se llega a unos coeficientes de realimentación, a unos transitorios y a unos índices de calidad con ligeras desviaciones entre si y entre los de los casos (A) y (B). Esta semejanza de valores y comportamiento no se produce en otros trabajos sobre RLOs descentralizados [26, 153, 94], en los que se estudia un RLO para cada área, por lo que es atribuible a la mayor potencia del área externa, cuya dinámica arrastra al área objeto de diseño del RLO diluyendo el efecto de la penalización de las desviaciones de la frecuencia.

En los casos (G) y (H), correspondientes a una modificación de la penalización de las desviaciones de la potencia transferida por la interconexión, la situación es parecida a los casos anteriores.

Al aumentarse la penalización de las desviaciones del ACE (caso (I)), se está modificando indirectamente la de las de la frecuencia del área y de las del intercambio de potencia, siendo ahora el comportamiento del sistema sensible a esta penalización. El hecho de que se produzca una menor acumulación de potencia intercambiada, así como una mayor desviación de la frecuencia, tanto en sobrepico (fig. 54.6) como en criterio cuadrático (tabla T5.2), está directamente relacionado con el valor de  $\beta$  escogido. Esta mejora del ACE repercute, obviamente, en una mayor generación del Area 1; por otro lado se produce, a pesar del menor transpaso de energía del Area 2 al Area 1 (véase tabla T5.2), un acusado esfuerzo de generación en el Area 2 durante los primeros segundos del transitorio, lo que supone una considerable capacidad de reserva rodante en este área.

La disminución de la penalización de las variaciones del lazo de realimentación transitoria de los reguladores de velocidad, manteniéndose el aumento de penalización de IACE, en el caso (J) refleja una muy ligera disminución del

sobrepico de frecuencia y del esfuerzo de generación del área, siendo precisa una muy baja penalización de la realimentación transitoria (caso  $\textcircled{K}$ ) para que se reduzca sensiblemente el esfuerzo de generación (fig. 54.7).

La reducción del esfuerzo de generación mediante el aumento de la penalización de la potencia generada por el área (caso  $\textcircled{L}$ ) solo es posible cuando ésta es fuerte, al contrario de lo que pasaba en el caso anterior.

La tercera forma de reducción del esfuerzo de generación, basada en la duplicación de los elementos de la matriz de penalización  $\tilde{R}$  (caso  $\textcircled{M}$ ) lleva a una dinámica muy parecida a la del caso  $\textcircled{K}$ , aunque más acusada. Comparando la dinámica obtenida en la fig. 54.7 para el caso  $\textcircled{M}$  respecto a la del caso  $\textcircled{K}$  (división por 20 de la penalización de la realimentación transitoria) y a la del caso  $\textcircled{L}$  (división por 5 de la de la potencia generada), puede deducirse una mayor sensibilidad de la generación a las variaciones de  $\tilde{R}$  que a las de las penalizaciones de las variables directamente relacionadas con ella ( $x_2$  y  $x_3$  de la fig. 54.2).

Al permitirse un mayor esfuerzo de control en el caso  $\textcircled{N}$  (disminución de  $\tilde{R}$ ) se logra reducir significativamente al ACE acumulado, produciéndose unas mayores desviaciones de frecuencia respecto al caso  $\textcircled{I}$ . Por otro lado, además del incremento en la generación de la propia área, se produce un acusado sobrepico de generación en el área externa que, si bien se amortigua más rápidamente que en el caso  $\textcircled{I}$ , requiere también una cantidad importante de reserva rodante en este área.

Las diversas penalizaciones del caso  $\textcircled{O}$  llevan a una situación parecida a la de los casos  $\textcircled{L}$  y  $\textcircled{J}$ , lo que reafirma la sensibilidad de la dinámica del sistema a las penalizaciones de IACE.

Al forzarse un grado de estabilidad en el caso  $\textcircled{Q}$  se obtiene una situación muy parecida a la del caso  $\textcircled{N}$ .

Respecto a un regulador PI convencional ajustado por técnicas de optimización paramétrica de forma que se reduzca el ACE acumulado (tabla T5.2), el RLO produce, a excepción de los casos  $\textcircled{N}$  y  $\textcircled{Q}$ , menores sobrepicos de frecuencia con menores esfuerzos de generación en el Area 1 (figs. 54.6 y 54.7). Además este regulador PI convencional requiere una mayor reserva rodante en el área externa (fig. 54.5).