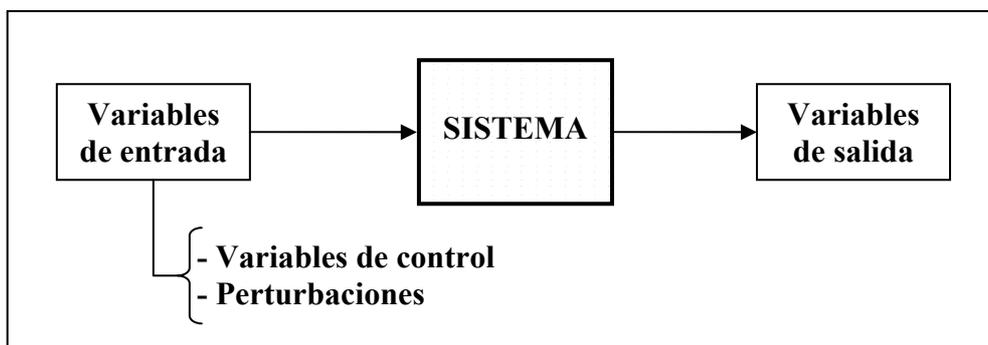


## 2-SISTEMAS DE CONTROL

### 2.1-¿QUÉ ES UN SISTEMA DE CONTROL?

Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida.

Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control. La *Figura 3* ilustra de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema.



*Figura 3 – Esquema general de un sistema*

Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

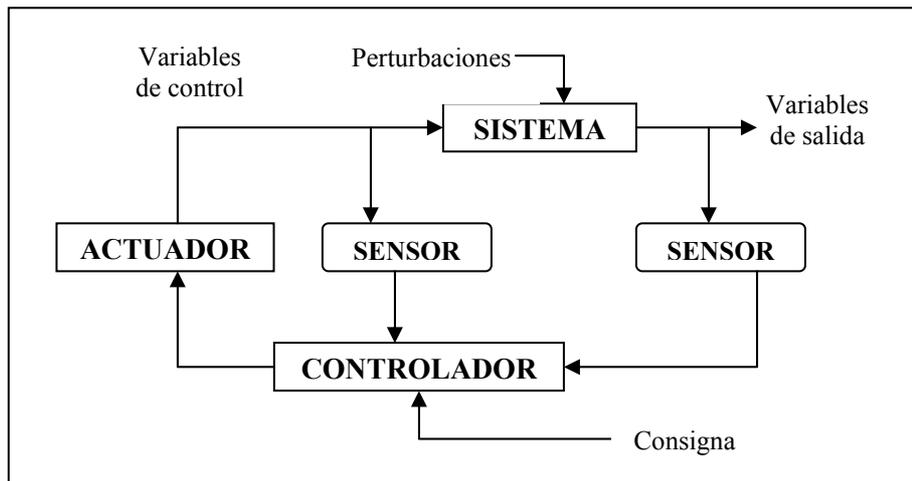
1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.

- Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.
- Actuador. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

La *Figura 4* ilustra el esquema de funcionamiento de un sistema de control genérico.



*Figura 4 – Esquema general de un sistema de control*

## **2.2-TIPOS SISTEMAS DE CONTROL EN CANALES DE REGADÍO**

Existen múltiples criterios para clasificar los distintos tipos de sistemas de control utilizados en la gestión de canales de regadío. Según Georges y Litrico (2002), los cuatro criterios esenciales son:

- Las variables consideradas
- La estrategia de control
- Los métodos de diseño
- La implementación en obra

### **2.2.1 Variables consideradas**

En un sistema de control, se consideran cuatro grupos de variables. Las perturbaciones, las variables controladas, las variables de control y las variables medidas.

Las perturbaciones son generalmente desconocidas. Las más importantes son las aportaciones extras debidas a las lluvias y las extracciones ilegales. Normalmente, estas perturbaciones no se pueden medir, pero sus efectos sobre las variables medidas permiten detectar su presencia. La utilización de un sistema de lazo cerrado (ver apartado 2.2.2) permite corregir los problemas derivados de la presencia de perturbaciones en el sistema.

Las variables controladas son aquellas sobre las que se aplican los valores de consigna. En el caso de un canal, estas variables controladas son principalmente de dos tipos: caudales y calados.

**Caudales.** Las necesidades hídricas de los usuarios de un canal de riego se pueden definir normalmente en términos de caudales. Existen diversos sistemas de control que utilizan los caudales como variable controlada y son un ejemplo de ello los sistemas de control predictivo GPC (Sawadogo, 1992; Rodellar et al, 1989) y CAGG (Piquereau et al, 1982). No obstante, medir caudales no es tarea fácil, lo cual lleva a controlar otras variables de mayor facilidad en su lectura, como son los calados.

**Calados.** Los calados son fácilmente mensurables, y se trata de unas variables que usualmente se miden con diversos objetivos como son el control de la estabilidad de los taludes laterales del canal, el control y crecimiento de la vegetación o el riesgo de desbordamiento. Los calados controlados pueden ser aguas abajo, aguas arriba o en un punto central del tramo de canal controlado; controlar uno u otro tiene sus ventajas y desventajas. El control aguas arriba permite una respuesta rápida del sistema debido al volumen almacenado en la compuerta aguas arriba, sin embargo requiere taludes verticales, lo que encarece la obra. El control aguas abajo presenta el caso contrario, y el control de calado en un punto intermedio conlleva una solución ubicada entre los otros dos casos.

Las variables medidas son generalmente calados, aunque en ciertos casos pueden ser caudales, medidos mediante equipos especiales (molinetes, ultrasonidos,...) o mediante relaciones numéricas (curvas de gasto), o volúmenes, evaluados mediante balances caudal de entrada-caudal de salida o mediante los valores de diversos calados a lo largo del tramo de canal.

Las variables de control más habituales son las aberturas de compuertas, los incrementos de apertura de compuerta, los caudales o los incrementos de caudales. Considerar las aperturas de compuerta o sus incrementos permite tener en cuenta la compleja dinámica asociada a las aperturas de compuerta y a los niveles aguas arriba y abajo de ésta. Considerar caudales permite desacoplar el sistema en subsistemas, lo cual es interesante cuando se utilizan controladores locales monovariantes, aunque no tiene en cuenta la dinámica asociada a la apertura de la compuerta de modo que el comportamiento global del sistema no puede asegurarse. En el caso de que la variable de control sea un caudal, éste deberá convertirse en apertura de compuerta, para que sea aplicable al sistema, mediante la inversa de la ecuación de compuerta o mediante un controlador local dinámico monovariante (tipo PID o parecido) (ver apartado 2.2.3).

### **2.2.2 Estrategia de control**

La estrategia de control hace referencia a la naturaleza y la dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y/o controladas y las variables de control.

Se distinguen dos tipos de estrategias en función de la naturaleza de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema, lazo abierto y lazo cerrado.

Lazo abierto: La acción de control se calcula conociendo la dinámica del sistema, las consignas y estimando las perturbaciones. Esta estrategia de control puede compensar los retrasos inherentes del sistema anticipándose a las necesidades del usuario. Sin embargo, el lazo abierto generalmente es insuficiente, debido a los errores del modelo y a los errores en la estimación de las perturbaciones. Por ello, es común la asociación de lazo cerrado-lazo abierto, de modo que el lazo cerrado permite compensar los errores generados por el lazo abierto.

Lazo cerrado: La acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y la consigna deseada. Las perturbaciones, aunque sean desconocidas son consideradas indirectamente mediante sus efectos sobre las variables de salida. Este tipo de estrategia de control puede aplicarse sea cual sea la variable controlada. La gran mayoría de los sistemas de control que se desarrollan en la actualidad son en lazo cerrado.

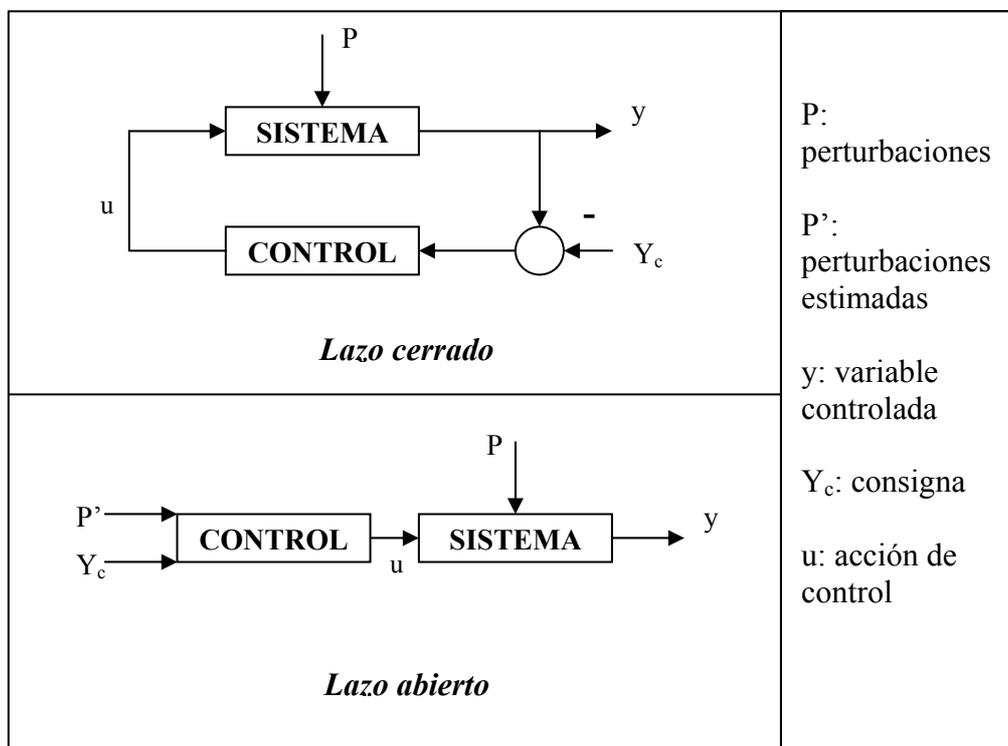


Figura 5 – Control lazo cerrado vs. Control lazo abierto

Según la dirección de la estrategia de control podemos distinguir tres casos, control aguas abajo, control aguas arriba y control mixto.

En el control aguas abajo, la acción de control consiste en variar el caudal aguas arriba del tramo, la compuerta situada aguas arriba es la que realiza dicha acción. En el control aguas arriba la acción consiste en variar el nivel aguas abajo, en este caso, la compuerta que actúa es la situada aguas abajo del tramo. Una compuerta realiza un control aguas abajo cuando el nivel que está controlando es el del tramo ubicado aguas debajo de la misma. En cambio, una compuerta realiza un control aguas arriba cuando el nivel controlado es el del tramo situado aguas arriba (observar Figura 6).

El control aguas abajo genera indirectamente un control en lazo cerrado de caudales, ya que se obtiene mediante una modificación del caudal aguas arriba. En cambio, el control aguas arriba no genera un control de caudal de lazo cerrado, ya que se obtiene mediante una simple modificación del calado aguas arriba de la compuerta. Es por ello que este tipo de control es insuficiente y debe de ser complementado mediante un lazo de control en caudales.

El control mixto es una estrategia de control que combina estrategias de control aguas arriba y aguas abajo. Este tipo de control también genera indirectamente un lazo cerrado de caudales.

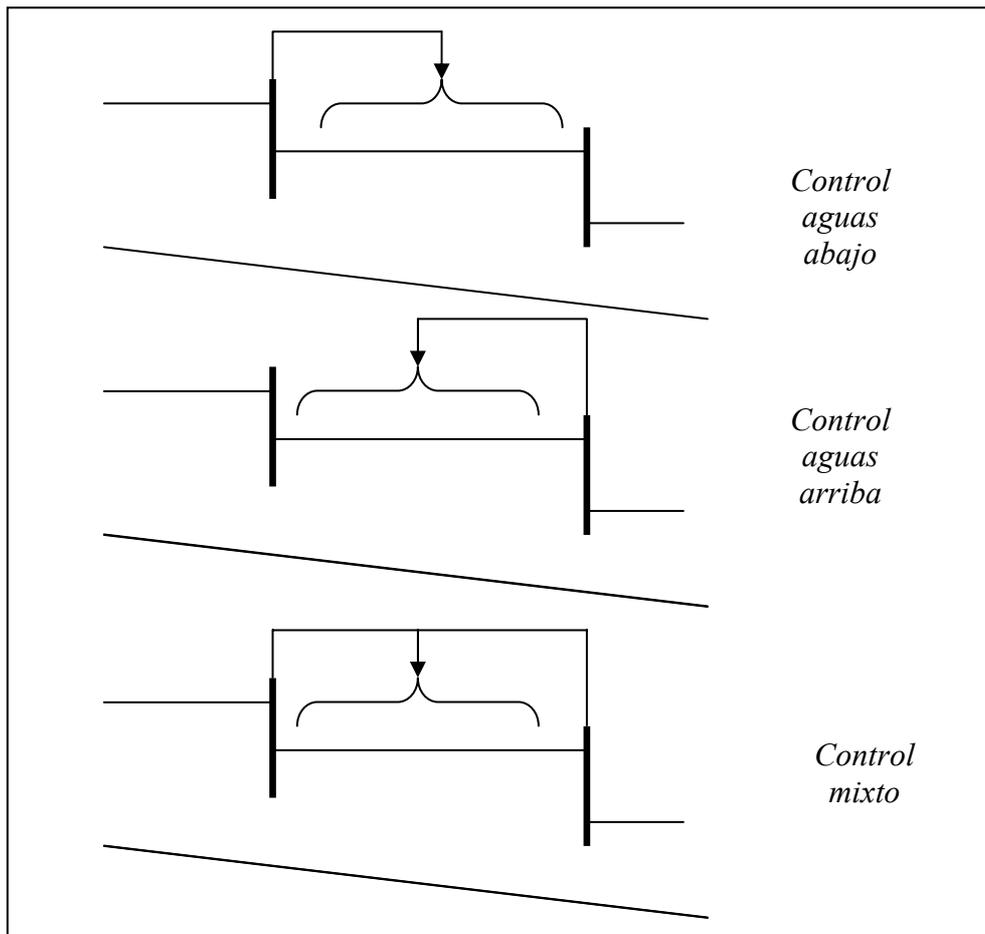


Figura 6 – Esquemas de control según la dirección de control

### **2.2.3 Métodos de diseño**

Los métodos de análisis de sistemas y de diseño de los controladores han evolucionado del mismo modo que la mayoría de las herramientas utilizadas en ingeniería. La evolución en los sistemas informáticos ha permitido que actualmente estén disponibles entornos en los que se pueden realizar simulaciones dinámicas (por ejemplo Matlab). Es por ello que en los últimos años, estos progresos han permitido que las investigaciones y aplicaciones en la teoría de control automático hallan pasado de utilizar una implementación analógica y monovariable a una implementación digital y multivariable.

### *Forma digital vs. forma analógica*

En un esquema analógico, todas las variables son función de un tiempo continuo; en cambio, en un esquema digital las variables se conocen en unos instantes determinados, en un tiempo discreto.

Los sistemas de control digital presentan una serie de ventajas como son una menor susceptibilidad al deterioro debido al transcurso del tiempo o a factores del entorno, presenta unos componentes menos sensibles a los ruidos y a las vibraciones en las señales, tienen una mayor flexibilidad a la hora de programar, o poseen una mejor sensibilidad frente a la variación de parámetros. En cambio, la evolución de los ordenadores y de sus capacidades de cálculo permiten reducir los inconvenientes que presentan los controladores digitales, por lo que últimamente su uso se ha extendido en gran cuantía.

Las variables medidas en el sistema mediante los sensores llegan al controlador en forma analógica, de modo que en el caso de un controlador digital es necesario utilizar dos convertidores de señal, uno analógico-digital, que permite discretizar la señal para que el controlador pueda realizar los cálculos necesarios, y uno digital-analógico para poder convertir las órdenes de control calculadas por el controlador en señales continuas, de modo que los actuadores puedan ejecutar los cambios precisos.

### *Métodos monovariantes vs. métodos multivariantes*

Un controlador es monovariante si trabaja con una única variable de entrada y una única variable de salida, es decir con variables escalares. En cambio, un controlador es multivariante cuando trabaja con más de una variable de entrada y más de una variable de salida, es decir, las variables de entrada y salida son vectoriales.

La mayoría de los métodos desarrollados para la regulación de canales se basan en controladores lineales monovariantes en lazo cerrado de tipo PID (proporcional, integral, diferencial). Los métodos monovariantes requieren dividir el sistema en varios subsistemas, sin tener en cuenta la interacción entre ellos. Debido a que un canal es un sistema multivariante que presenta grandes interacciones entre sus subsistemas, una posible solución consiste en considerar el proceso global multivariante como una serie de procesos monovariantes independientes actuando en paralelo.

Hasta el día de hoy se han desarrollado diversos métodos multivariantes, aunque su utilización en el control de canales es casi nula. Entre ellos se puede destacar el controlador PID multivariante

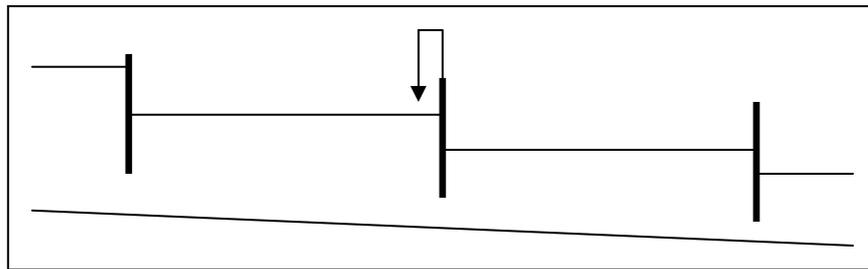
## **2.2.4 Implementación en canal**

Dentro de la implementación en obra de un método de regulación es posible distinguir diversos aspectos como son la configuración (centralizado o descentralizado), los mecanismos (compuertas manuales o automáticas), la instrumentación (sensores de nivel, aparatos para medir el caudal,..), sistemas de comunicación (telefonía fija, telefonía móvil, radiotelefonía, ...), procedimientos de cálculo (empíricos, principios hidrodinámicos, mediante ordenadores,...). Dentro de estos aspectos, el más importante

para entender las distintas características de los métodos de regulación es la configuración.

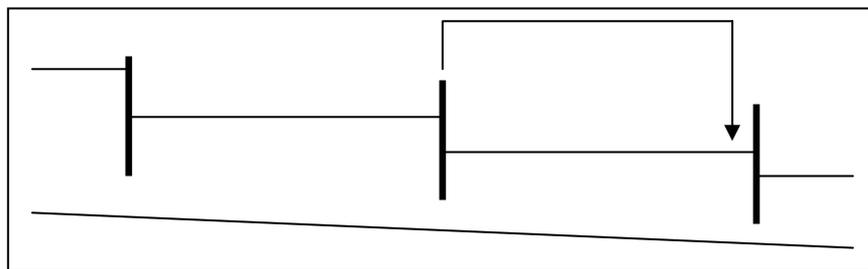
La configuración del sistema tiene relación con la ubicación del controlador respecto de los mecanismos y las variables controladas, y con la jerarquía entre los controladores. Podemos clasificar los controladores en los siguientes tipos: local, local a distancia, semilocal, centralizado y jerárquico.

En un control local (*Figura 7*), cada mecanismo es accionado por un controlador independiente, que solo usa información local (variables medidas en la zona próxima al mecanismo).



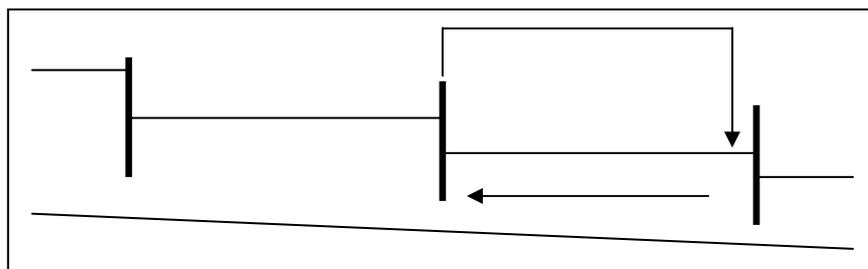
*Figura 7 – Control Local*

Un control local a distancia (*Figura 8*) difiere del anterior en que las variables utilizadas son medidas en una zona alejada del mecanismo.



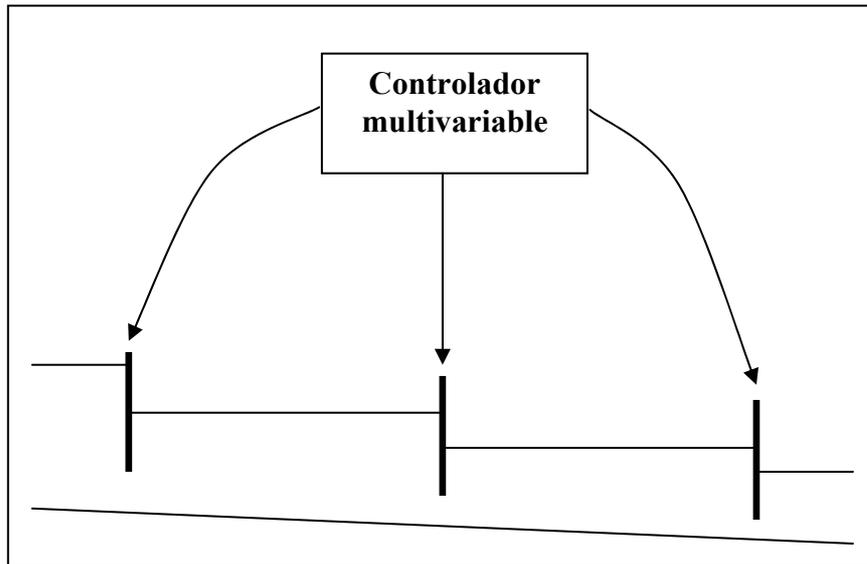
*Figura 8 – Control Local a Distancia*

En un control semilocal (*Figura 9*), no se realiza un control global del sistema, pero los controladores no solo utilizan su propia información, sino que también utilizan información generada por los controladores adyacentes.



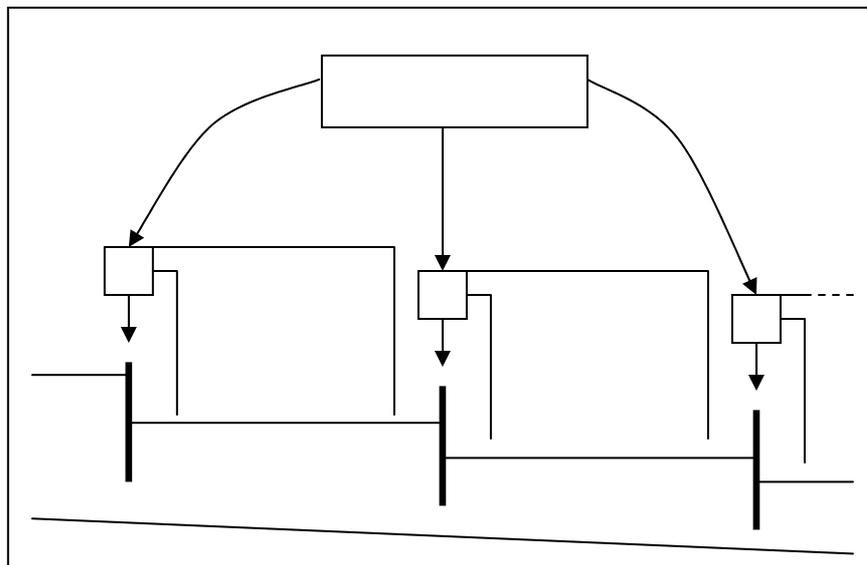
*Figura 9 – Control Semilocal*

En un control centralizado (*Figura 10*), existe un único controlador que utilizando toda la información global del sistema genera las acciones de control para cada uno de los mecanismos.



*Figura 10 – Control Centralizado*

En un control jerárquico (*Figura 11*), existe una jerarquía de control. La acción de control se toma en función de las decisiones tomadas a distintos niveles. Por ejemplo, en un control centralizado jerárquico existe un controlador que comunica a distancia un cambio de consigna a un controlador local presente en cada mecanismo.



*Figura 11 – Control Jerárquico*