

1. Control Digital

<i>1. Control Digital</i>	<i>1</i>
1.1. Introducción	2
1.2. Características del Control Digital	4
1.3. ¿Porqué una teoría especial?	5
1.4. Sistemas Discretos	7
1.5. Características Discretas Intrínsecas de los Sistemas	8
1.6. Desarrollos Teóricos	9
<i>2. Referencias</i>	<i>11</i>

1.1. Introducción

El control automático no se habría podido desarrollar sin un paso previo dado por los controladores con la aparición de los computadores digitales los que abrieron un campo muy amplio de avance. K. Åström hace una reseña de hitos históricos en el llamado control digital que hablan de esta evolución.

Hasta el surgimiento de los sistemas digitales el único elemento de cálculo con que contaba la Ingeniería de Control eran los computadores analógicos electrónicos. Lo mismo ocurría con la implementación de los reguladores. Estos se construían con elementos analógicos mecánicos, neumáticos o electrónicos.

Pero el desarrollo de la electrónica y de los computadores digitales llevó a cambiar rápidamente la concepción. Los primeros computadores digitales fueron usados en sistemas de control de procesos extremadamente complejos. Con la reducción constante de los precios y tamaño, hoy se implementan reguladores digitales individuales por lazo de control.

Los computadores digitales son usados también como herramienta para el análisis y diseño de los sistemas automatizados.

La automática o ciencia del control cuenta con elementos mucho más poderosos que en el pasado. Los computadores digitales están en constante progreso especialmente con los avances en la tecnología de la integración en muy alta escala (VLSIT). Se esperan importantes cambios en los próximos años.

En un primer momento se intentaba trasladar todos los algoritmos y mecanismos de diseño del campo analógico a los elementos digitales. Pero la teoría del control ha avanzado creando técnicas imposibles de implementar en forma analógica.

Por lo tanto existen dos formas de analizar los sistemas discretos. Una, como una aproximación de los reguladores analógicos, pero ésta es una visión pobre y los resultados a lo sumo son iguales a los obtenidos anteriormente. La segunda es ver a los sistemas discretos de control como algo distinto y de esta manera obtener conclusiones más poderosas.

Un sistema discreto se inserta en el lazo de control a fin de reemplazar el regulador pero el proceso físico continúa siendo continuo, en la mayoría de los casos de interés. La señal de salida se muestrea cada cierto tiempo (llamado período de muestreo) y se discretizada mediante un conversor analógico digital. Esta información es procesada y convertida nuevamente a analógica mediante un conversor digital analógico. Por lo tanto internamente, el computador se independiza del tipo de señal con que está trabajando y ve todas las magnitudes como una serie de valores discretos (de precisión finita). Por esto resulta cómodo trabajar con ecuaciones en diferencia en lugar de ecuaciones diferenciales como se hacía con los métodos analógicos.

Analizando la historia del control digital se puede fijar como momento inicial los años '50 donde aparecen las primeras computadoras dedicadas al control proceso. Eran muy grandes en cuanto a volumen, tenían un gran consumo y generalmente su fiabilidad no era muy grande. En 1956 se instala en la compañía Texaco un sistema que controla 26 caudales, 72 temperaturas y 3 composiciones. Este computador realizaba una suma en 1 ms y una multiplicación en 20 ms. Su tiempo medio entre fallas (TMEF ó MTBF) que mide la fiabilidad de un equipo era de 50 a 100 hs solo para la cpu. Como características de la época se puede decir que no estaba avanzada aún la implementación de modelos en tiempo real. Lo que se usaba eran complejos modelos basados en el comportamiento físico del proceso. Había además un escaso desarrollo en materia de sensores. También se advierte por ese entonces un fuerte rechazo a la introducción de nuevas tecnologías.

En 1962, en la Imperial Chemical Industries (en Inglaterra) se instala un control digital con 224 entradas comandando 129 válvulas. Se utiliza por ese entonces, como argumentación el concepto de Control Digital Directo (CDD o DDC), es decir que una única computadora controla toda una planta o proceso. Una suma se hacía en .1 ms y se multiplicaba en 1 ms. El TMEF había ascendido a unas 1000 hs. Se comenzaba a reemplazar tableros de instrumentos por teclado y pantallas. Ya se observa una ventaja importante: la fácil reconfiguración del sistema.

En 1965 comienza la era de las mini computadoras. Una mini computadora típica tenía una longitud de palabra de 16 bits, de 8 a 124k de memoria fija mas una unidad de disco. Aparecen los circuitos integrados con lo que se reducen notablemente los costos y los tamaños. Aumenta la velocidad y la fiabilidad: una suma se ejecuta en 0,002 ms y en 0,007 ms una multiplicación. El TMEF sube a 20000 hs. Ya es posible pensar en aplicar el control digital a proyectos pequeños con lo que se observa un crecimiento de las aplicaciones de 5000 a 50000 en 5 años. El costo medio de una aplicación (en 1975) es de unos 10000 dólares llegando el costo total del proyecto a 100000 dólares.

En 1975 hacen su aparición las microcomputadoras con un costo medio de 500 dólares y un consumo despreciable. Ahora cambia el concepto del sistema y se habla de control dedicado es decir dar a cada variable o grupo de ellas un control específico y personalizado. También en este momento se observa un gran desarrollo de la teoría de control.

Con vistas al futuro se pueden prever avances en varios campos y con diversos ritmos. Uno de ellos es el propio conocimiento del proceso. Sus progresos son lentos pero constantes. Se ven potenciados actualmente por la facilidad en la recolección de datos y su posterior análisis. Asociado a esto están las técnicas de medición que se sofistican día a día al haber cada vez más sensores inteligentes incluso que incorporan computadores a bordo.

Quizás el avance más espectacular sea en el terreno de la tecnología de los computadores. Se observan avances en varias áreas: desarrollos electrónicos en materia de integración (*vlsi*), en el dominio de las comunicaciones, en la presentación de la información, la aparición de nuevos lenguajes y en la arquitectura propia de los computadores.

En cuanto al control avanzado, la teoría de control también prevé adelantos principalmente en las áreas de identificación de sistemas, algoritmos de control, optimización, control adaptativo, control inteligente y sistemas multivariables. Pero ya nunca más se podrá despegar el futuro de esta temática al del avance de los computadores digitales.

1.2. Características del Control Digital

Como características básicas del control digital se pueden mencionar las siguientes:

- No existe límite en la complejidad del algoritmo. Cosa que sí sucedía anteriormente con los sistemas analógicos.
- Facilidad de ajuste y cambio. Por el mismo motivo anterior un cambio en un control analógico implica, en el mejor de los casos, un cambio de componentes si no un cambio del controlador completo.
- Exactitud y estabilidad en el cálculo debido a que no existen derivadas u otras fuentes de error.
- Uso del computador con otros fines (alarmas, archivo de datos, administración, etc.)
- Costo vs. número de lazos. No siempre se justifica un control digital ya que existe un costo mínimo que lo hace inaplicable para un número reducido de variables.
- Tendencia al control distribuido o jerárquico. Se ha pasado de la idea de usar un único controlador o computador para toda una planta a la de distribuir los dispositivos inteligentes por variable o grupos de estas e ir formando estructuras jerárquicas.

En cuanto a la arquitectura de un lazo de control es de la forma en que lo muestra la Ilustración 1-1. El proceso en la mayoría de los casos es continuo, es decir se lo debe excitar con una señal continua y genera una salida continua. Esta señal, como en cualquier lazo de control es sensada por algún dispositivo que a su vez entrega una señal continua proporcional a la magnitud medida. Por otra parte está el computador que solo trabaja con valores discretos. Para compatibilizar ambos existen dos elementos: el CDA y el CAD que realizan la conversión de magnitudes.

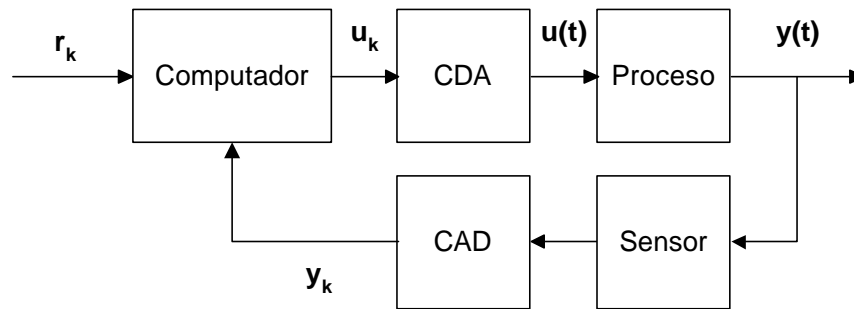


Ilustración 1-1 Lazo típico de Control Digital

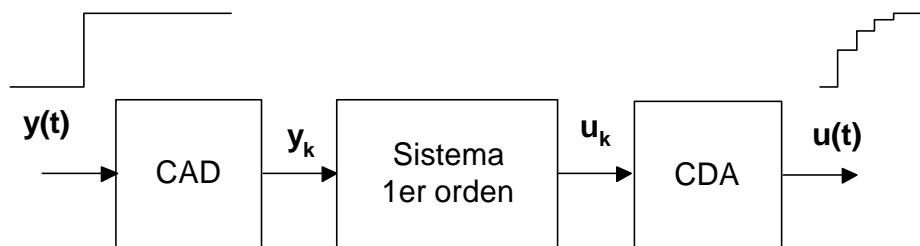
1.3. ¿Porqué una teoría especial?

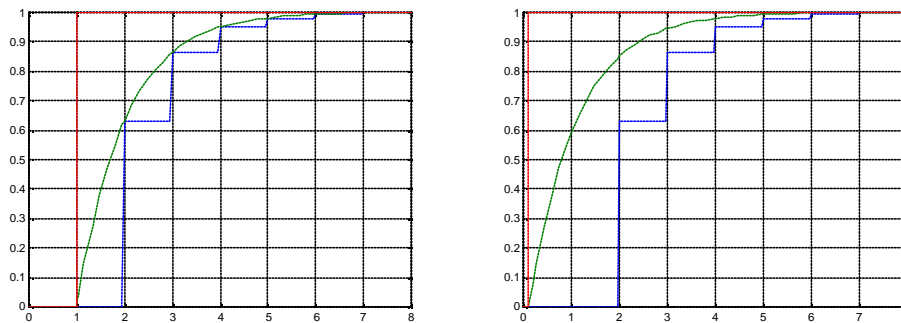
Una teoría adecuada debería permitir analizar un sistema muestreado de control y poder diseñarlo. Resulta obvio que un sistema muestreado se comporta como uno continuo para períodos muy pequeños. ¿Entonces porqué desarrollar una teoría especial?

Algunos ejemplos mostrarán cómo este sistema no puede ser completamente entendido dentro de la teoría clásica aún si el proceso es lineal, invariante en el tiempo y continuo.

Ejemplo 1. Dependencia del tiempo

Supóngase la implementación de un simple regulador de primer orden usando un CAD, un computador digital y un CDA. La ecuación diferencial de primer orden es aproximada a una ecuación en diferencias de primer orden. La respuesta al escalón se muestra en la figura.





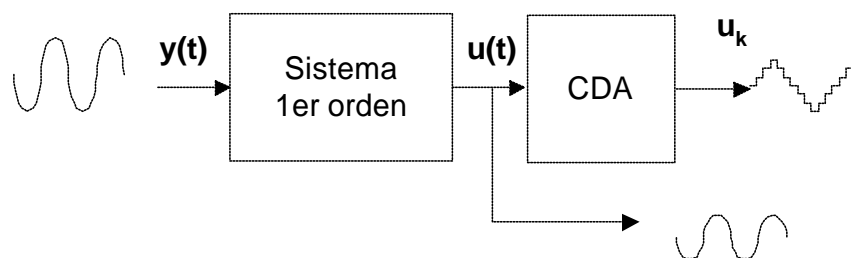
Se observa que no es independiente del momento en que se aplica la entrada. Si la entrada es retardada la salida es igualmente retardada solo si el retardo es múltiplo del período de muestreo.

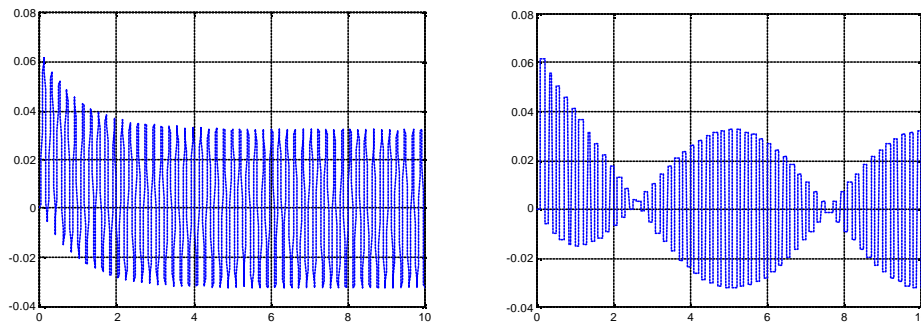
Esto es así debido a la existencia del reloj de muestreo. Un sistema controlado con computador y muestreado con un período de muestreo fijo es un sistema periódico. Este efecto se puede reducir eligiendo un pequeño período de muestreo. O sea que es necesario considerar el muestreo al estudiar estos sistemas.

Ejemplo 2. Armónicas Superiores

Si se aplica una onda senoidal a un sistema estable, lineal e invariante, después de un transitorio, su salida es senoidal y de igual frecuencia que la entrada. La figura muestra lo que pasa si se muestrea una señal de $4,9 \text{ Hz}$ cada $0,1 \text{ seg}$.

Esto no es posible explicarlo con la teoría clásica, es necesario tener otras herramientas para su análisis

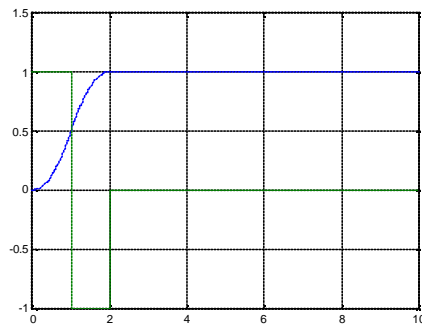




Ejemplo 3. Control de Tiempo Finito

Sea un doble integrador con una ley de control como la de la figura. Este tipo de control es llamado de *tiempo finito o mínimo*. Vemos que la respuesta es mejor que la obtenida con una aproximación continua.

Esto demuestra claramente que aún en el caso de un sistema lineal es posible construir un regulador algo mejor que su simple aproximación continua.



Para períodos de muestreos muy pequeños se puede aproximar al control continuo.

Se pueden utilizar técnicas digitales específicas de control.

1.4. Sistemas Discretos

Los Modelos de Sistemas Discretos parecen una buena opción para el análisis.

Un ejemplo de estos modelos son los algoritmos de computación

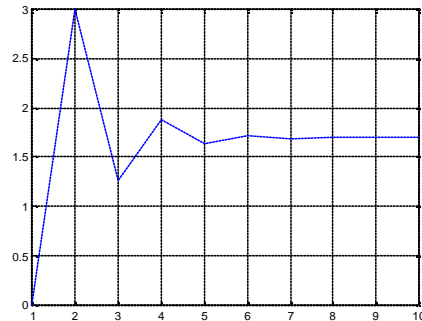
Ejemplo 4. Solución Iterativa

$$x - f(x) = 0$$

algoritmo

$$x_{k+1} = f(x_k)$$

Por ejemplo si $f(x) = 3 - \sqrt{x}$, la solución es $x = 1,697$



Ejemplo 5. Control PI

`r=lectura_referencia`

`y=lectura_salida`

`e=r-y`

`u=kp*(e+i)`

`escritura_actuacion`

`i=i+T*e/Ti`

1.5. Características Discretas Intrínsecas de los Sistemas

En muchos casos el carácter discreto de está en la etapa de medición:

- antena de radar: información en una dirección una vez por revolución.
- mediciones químicas: espectrografía o cromatógrafos.
- sistemas económicos

En otros aparece en la actuación:

- tiristor
- motor de combustión interna
- sistemas biológicos. transmisión por pulsos nerviosos

Lo común a todos los sistemas es la *periodicidad* del muestreo.

Esto complica el análisis con las herramientas convencionales.

Se simplifica el análisis estudiándolos en el momento del muestreo.

1.6. Desarrollos Teóricos

A pesar de que la teoría de sistemas muestreados es anterior a su aplicación al control, cobró realmente fuerza con ello. Mostraremos algunos de sus principales ideas.

Es importante saber bajo qué condiciones una señal muestreada puede ser totalmente reconstruida. Los primeros tratamientos fueron hechos por Nyquist quien demostró que para reconstruir una señal senoidal es necesario muestrearla al menos dos veces por período. La solución completa la dio Shannon en 1949.

Las ecuaciones en diferencias (1948 - Oldenburg-Sartorius) reemplazan las ecuaciones diferenciales en un sistema continuo. Así por ejemplo se puede investigar la estabilidad por el método de Schur-Cohn que es equivalente al de Routh-Hurwitz.

Con el estudio de los radares se vio la necesidad de una teoría de la transformación. En 1945 surgen estudio simultáneamente en la URSS, GB y EEUU.

- Hurewicz (1947) plantea la transformación $Z(f(kT)) = \sum_{k=0}^{\infty} z^{-k} f(kT)$
- Tsytkin, URSS, (1950) la llama *Transformada de Laplace Discreta*
- En EEUU, en Columbia University, Ragazzini y Zadeh (1952) la rebautizan como *Transformada Z*
- Barker (1952), GB, llega a idénticos resultados.
- Jury, EEUU, alumno de Ragazzini, presenta su tesis doctoral con este tema.

La transformada en Z lleva a resultados sencillos y como contrapartida tiene la limitación de dar información solo en los instantes de muestreo. Para esto existe una herramienta adecuada que es la transformada en Z modificada.

Un evento importante en los años 60 fue el desarrollo de la teoría del espacio de estado. Los principales aportes lo dieron Pontryagin y Bellman. Kalman desarrolló más esta teoría aplicada al control. Crecen en forma paralela con los sistemas discretos. El Control de tiempo finito es difícil analizarlo con ecuaciones diferenciales

Muchos de los elementos teóricos aparecieron al estudiar el problema del control en tiempo finito. Se llegó así a los conceptos de controlabilidad y observabilidad.

También se desarrollaron a fines de los 50' los conceptos de Control Óptimo y Estocástico. Bellman (1957), Pontryagin (1962) y otros mostraron la posibilidad de formular el diseño del control como un problema de optimización.

Una solución explícita para sistemas lineales con función de costo cuadrática la dio Bellman en 1958. Kalman obtuvo su célebre demostración donde el problema lineal cuadrático podía ser reducido a la solución de una ecuación de Riccati. Fue también

Kalman el que formuló el filtro de Wiener para el espacio de estado lo que permitió resolverlo con ecuaciones recursivas, fácilmente aplicables al cálculo numérico.

A comienzo de los '60 el problema variacional estocástico se formula asumiendo que la perturbación es un proceso aleatorio. Todo esto contribuyó a desarrollar la teoría del control estocástico.

Cuando se intentó aplicar la teoría a la práctica surgió la necesidad de tener herramientas de modelización. Se desarrolla entonces toda una teoría al respecto generándose una gran cantidad algoritmos (Aström, Eykhoff (1971), Goodwin, Payne (1977), etc)

El advenimiento del computador de control hizo posible la implementación de algoritmos más y más complejos permitiendo el uso de técnicas adaptativas. Los mayores adelantos fueron hechos en los '70 (Aström, Wittenmark (1973), etc).

2. Referencias

1. Åström, Karl J.: *Computer Controlled Systems. Theory and Design*, Prentice Hall – 1984
2. Aracil Santonja, R.: *Sistemas Discretos de Control*, Universidad Politécnica de Madrid – 1980
3. Isermann, R.: *Digital Control Systems*, Springer Verlag – 1981
4. Papoulis, A: *Sistemas Digitales y Analógicos*, Marcombo – 1978
5. Kuo, B: *Discrete Data Control Systems*, Prentice Hall – 1970
6. Tou, : *Digital and Sampled Data Control Systems*, Mac Graw Hill – 1959
7. Proakis, J.G. & Manolakis, D.G.: *Tratamiento Digital de Señales: Principios, Algoritmos y Aplicaciones*, Traducción de *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*, 3rd. edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, UK., 1998.

