

33. Zames, G., "On the Input-Output Stability of Time Varying Non-Linear Feedback Systems, Part I: Conditions Derived Using Concepts of Loop Gain, Conicity, and Positivity", IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-11, número2, pp. 228-238, 1966.
34. Zames, G., "On the Input-Output Stability of Time Varying Non-Linear Feedback Systems, Part II: Conditions Involving Circles in the Frecuency Plane and Sector Nonlinearities", IEEE Trns. Automatic Control, vol. AC-11, número 3, pp. 465-476, 1966.
35. Astrom, K.J., Introduction to Stochastic Control Theory, New York, Academic Press, 1970.
36. Mayr, O. The Origins of Feedback Control, Cambridge, MIT Press, 1970.
37. Bokharaie, M., "A summary of the History of Control Theory" Internal Rept. , School of Elect. Eng., Ga. Inst. of Technology, Atlanta, GA 30332, 1973.
38. Gelb, A., "Applied Optimal Estimation", Cambridge, MIT Press, 1974 Fuller, A.T., "The Early Development of Control Theory", Trns. ASME, vol. 98G, número 2, pp. 109-118, June 1976.
39. Doyle, J.C. and G. Stein, "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Cassical/Modern Synthesis", IEEE Trns. Automat. Control, vol. AC-26, pp. 4-16, Feb. 1981.
40. Safonov, M.G., A.J. Laub, and G.L. Hartmann, "Feedback Properties of Multivariable Systems: The Role and Use of the Return Difference Matrix", IEEE Trans. Auto. Control, vol.26, número 1, pp.47-65, 1981.
41. Astrom, K.J., and B.Wittenmark, "Computer-Controlled Systems: Theory and Design", New Jersey: Prentice Hall, 1984.
42. Dorato, P., "A Historical Review of Robust Control", IEEE Control Systems Magazine, pp. 44-47, April 1987.

11. Kolmogorov, A.N., "Interpolation and Extrapolation von Stationären Zufälligen Folgen", Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Math. Vol.5, pp.3-14, 1941.
12. MacColl, L.A., Fundamental Theory of Servomechanisms, N. Y. Van Nostrand, 1945.
13. James, H.M., N.B. Nichols, and R.S. Phillips, "Theory of Servomechanisms", N. Y. McGraw Hill, M.I.T. Radiation Laboratory Series, Vol. 25, 1947.
14. Brown, G.S. & Campbell, D.P., "Principles of Servomechanisms", N.Y. Wiley 1948.
15. Evans, W.R., "Graphical Analysis of Control Systems", Trans. AIEE, vol. 67, pp. 547-551, 1948.
16. Wiener, N. "Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine", Cambridge: MIT Press, 1948
17. Wiener, N. "The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications", N. Y. Wiley, 1949.
18. Whitehead, A.N., "Science and the Modern World", Lowell Lectures (1925), N.Y. MacMillan, 1953.
19. Chesnut, H. And R.W. Mayer, "Servomechanisms and Regulating System Design", vol. 1, 1951, vol. 2, 1955, Wiley.
20. Truxal, J.G., Automatic Feedback Control System Synthesis", New York, McGraw-Hill, 1955.
21. Bellman, R., "Dynamic Programming", New Jersey: Princeton Univ. Press, 1957.
22. Jury, E.I. "Recent Advances in the field of Sampled Data and Digital Control Systems", Proc. Conf. Int. Federation Automatic Control, pp. 240-246, Moscow, 1960.
23. Kalman, R.E., "Contributions to the Theory of Optimal Control", Bol. Soc. Mat. Mexicana, vol. 5, pp. 102-119, 1960.
24. Kalman, R.E., "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Theory", ASME J. Basic Eng., vol.82, pp. 34-45, 1960
25. Kalman, R.E. and J.E.Bertram, "Control System Analysis and Design via the Second Method of Lyapunov . I. Continuous-time Systems" , Trans. ASME J. Basic Eng., pp. 371-393, June 1960 .
26. Kalman, R.E. and R.S. Bucy, "New Results in Linear Filtering and Prediction Theory", ASME J. Basic Eng., vol. 80, pp. 193-196, 1961.
27. Popov, V.M., "Absolute Stability of Nonlinear Systems of Automatic Control", Automat. Remote Control, vol.22, número 8, pp. 857-875, 1961.
28. Pontryagin, L.S., V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze, and E.F.Mishchenko, "The Mathematical theory of Optimal Processes", New York, Wiley, 1962.
29. Narendra, K.S., and R.M.Goldwyn , "A Geometrical Criterion for Stability of Certain Nonlinear Nonautonomous Systems", IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-11, número 3, pp. 406-407, 1964.
30. Sandberg, I.W., "A Frequency-Domain Condition for the Stability of Feedback Systems Containing a Single Time-Varying Nonlinear Element", Bell Syst. Tech. J. Vol.43, número 4, pp.47-65, 1964.
31. Desoer, C.A., "A Generalization of the Popov Criterion", IEEE Trans. Autom. Control, vol. AC-10, número 2, pp. 182-185, 1965.
32. Hall, A.C., "Application of Circuit Theory to the Design of Servomechanisms", J. Franklin Inst., 1966.

basada en la función transferencia y, para algunas aplicaciones es más conveniente que la descripción interna.

## CONCLUSIONES

Es muy importante y provechoso conocer la historia y la literatura del Control Automático, además de interactuar permanentemente con otros investigadores y tecnólogos. Como reflexión podemos mencionar algunos casos en la historia del Control Automático, donde no se cumplimentó lo mencionado precedentemente:

- Routh y Hurwitz no sabían que Hermite había resuelto el problema.
- Imaginemos que hubiese sucedido si Routh, Hurwitz y Lyapunov hubiesen trabajado juntos.
- Los resultados de Maxwell y Routh eran conocidos en los círculos científicos pero tuvieron poco impacto en el diseño de reguladores prácticos. Este es uno de los primeros ejemplos de la brecha entre la teoría y la práctica. La cual se debe, entre otros aspectos, a:
  - Especulaciones.
  - No dar respuesta a los aspectos críticos del diseño.
  - No considerar los rozamientos u otras cuestiones importantes.
  - Malas recomendaciones, debidas a simplificaciones del modelo.

Estos ejemplos indican que:

- No se debe olvidar al “cliente” y la forma en que los resultados son envasados y presentados. A modo de comparación podemos mencionar, la diferencia de impacto(en el tema reguladores) entre Maxwell y Stodola:
  - Maxwell estaba, solamente, interesado en reguladores automáticos especiales y no en el típico regulador para una máquina (aplicación a la ingeniería).
  - El trabajo de Stodola,(Regulación de la turbina de agua) estuvo mucho más orientado a la ingeniería. A tal punto que el criterio de Hurwitz fue publicado, primero, por Stodola en 1894, sin someterlo a prueba en una revista de ingeniería.
- Los resultados son importantes. Como ejemplo tenemos el principio del argumento.

## BIBLIOGRAFIA:

1. Airy, G.B., “On the Regulator of the Clock-Work for Effecting Uniform Movement of Equations”. *Memories of the Royal Astronomical Society*, Vol. II, pp. 249-267, 1840.
2. Maxwell, J.C., “On Governors”, *Proc. Royal Society London*, vol. 16 pp.270-283, 1868.
3. Routh, E.J., “A Treatise on the Stability of a given State of Motion”, London: MacMillanCo., 1877.
4. Vyshnegradsky, I.A., “On Controllers of Direct Action”, *Izv. SPV Tekhnolog. Inst.* 1877.
4. Hurwitz, A., “On the Conditions Under Which an Equations Has Only Roots With Negative Real Parts”, *Mathematische Annalen*, Vol.46, pp. 273-284, 1895.
5. Lyapunov, M.A., “Problème général de la Sbalité du mouvement”, *Ann. Fac. Sci. Toulouse*, vol.9, pp. 203-474, 1907(Traslación del paper original publicado en 1892 en *Comm. Soc. Math. Kharkow* y re-impreso como vol. 17 en *Ann. Math Studies*, Princeton University Press, Princeton, N.Y., 1949)
6. Minorsky, N., “Directional Stability and Automatically Steered Bodies”, *J.Am.Soc.Nav.Eng.*, vol. 34, p. 280, 1922.
7. Nyquist, H. “Regeneration Theory”, *Bell Syst. Tech. J.*, 1932
8. Black, H.S., “Stabilized Feedback Amplifiers” *Bell System Technical J.*, 1934.
9. Házen, H.L., “Theory of Servomechanisms”, *J. Franklin Inst.*, 1934.
10. Bode, H.W., “Feedback Amplifiers Design” *Bell Syst. Tech. Journal*, vol. 19, p. 42, 1940.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{y}$$

es mucho más útil. Las ecuaciones de diseño para el regulador LQR con realimentación del vector de salida(en lugar del vector de estado) son más complicadas.

El diseño moderno basado en la realimentación del vector de salida, *permite diseñar controladores para complicados sistemas de múltiples entradas y salidas*, resolviendo las ecuaciones matriciales de diseño en una PC.

Otro factor importante es el siguiente. Mientras la realimentación del vector de estado implica realimentación desde cada estado a todas las entradas, procedimiento que no ofrece una estructura en el sistema de control, en cambio la realimentación del vector de salida se puede utilizar para diseñar un *compensador con la estructura dinámica deseada*, reteniendo mucha de la intuición del diseño clásico del control.

Las leyes de realimentación enunciadas se suelen llamar *estáticas*, porque las ganancias de control son constantes o como mucho variables con el tiempo. Una alternativa al diseño estático de realimentación de la salida es utilizar un compensador dinámico de la forma:

$$\frac{dz}{dt} = \mathbf{Fz} + \mathbf{Gy} + \mathbf{Eu}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{Hz} + \mathbf{Dy}$$

Las entradas a este compensador son las entradas y salidas del sistema. Esto da un lazo cerrado y se llama *realimentación dinámica de salida*. El problema del diseño es seleccionar las matrices **F, G, E, H, D**, para obtener un adecuado comportamiento a lazo cerrado. Un importante resultado del control moderno es que la estabilidad a lazo cerrado puede ser garantizada seleccionando:

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} - \mathbf{LC}$$

para cierta matriz **L** que se calcula utilizando la ecuación de diseño de Riccati. Este diseño se basa en el *principio de separación*.

Una desventaja del diseño utilizando **F=A-LC**, es que el compensador tiene el mismo número de estados internos que la planta. En aplicaciones complicadas de modernos sistemas aerospaciales o de plantas generadoras, esta dimensión puede ser muy alta. Debido a ello se han desarrollado varias técnicas para *reducir el controlador*(reduction controller) y *reducir el orden del diseño* (reduced-order design).

En Control moderno estándar se supone que el sistema está descrito exactamente por su modelo matemático. En realidad, este modelo es una descripción aproximada de la planta real. Más aún, en la práctica puede haber perturbaciones actuando sobre la planta, así como ruido en las mediciones para determinar  $y(t)$ .

El regulador LQR utilizando la realimentación completa del vector de estado, tiene algunas propiedades importantes de robustez para tales desordenes, como ser margen de ganancia infinito, margen de fase de 60°, y robustez a ciertas alinealidades en los lazos de control. Por otra parte los reguladores que utilizan realimentación estática o dinámica de la salida en su diseño, no tienen garantizada las propiedades de robustez. Con el trabajo sobre control robusto moderno a principios de 1980, ahora se dispone de una técnica (LQG/LTR) para diseñar sistemas de control multivariables y robustos. El diseño basado en LQG/LTR incorpora rigurosos tratamientos del efecto de las incertidumbres en el modelado sobre la estabilidad a lazo cerrado y, los efectos de las perturbaciones sobre el comportamiento a lazo cerrado.

Con el trabajo sobre diseño robusto moderno, *muchas de las intuiciones de las técnicas del control clásico pueden ser ahora incorporadas en el diseño multivariable moderno*.

Con los desarrollos modernos sobre *teoría del control digital y sistemas en tiempo discreto*, el control moderno se adecua perfectamente para el diseño de sistemas de control que pueden ser implementados en microprocesador. Esto permite la implementación de dinámicas de controlador que son más complicadas y más efectivas que las simples estructuras PID o redes de atraso-adelanto de los controles clásicos.

Trabajos recientes sobre *descripciones de la matriz- fracción*(matrix-fraction descriptions) y *diseño por ecuación polinómica*(polynomial equation design) una planta MIMO puede describirse mediante una forma entrada/salida y no en forma de estados. Esto significa una extensión directa de la representación clásica

En el regulador cuadrático lineal estándar(LQR), la ganancia de realimentación  $\mathbf{K}$  se selecciona para minimizar un índice de comportamiento cuadrático en el dominio temporal(PI), como el siguiente:

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt$$

El mínimo se busca sobre todas las trayectorias de estado. Esto es una extensión a los sistemas MIMO de la clase de índices de comportamiento(ITSE, ITAE, etc.)que fueron utilizados en control clásico.  $\mathbf{Q}$  y  $\mathbf{R}$  son matrices de peso que sirven como *parámetros de diseño* Sus elementos se pueden seleccionar para suministrar un adecuado comportamiento.

La llave para el diseño mediante LQR es el hecho que, si la matriz ganancia  $\mathbf{K}$  se puede elegir adecuadamente para hacer  $\mathbf{J}$  finito, entonces la integral que involucra la norma de los vectores  $\mathbf{u}(\mathbf{t})$  y  $\mathbf{x}(\mathbf{t})$  resulta limitada. Si  $\mathbf{Q}$  y  $\mathbf{R}$  son adecuadamente seleccionados, principios matemáticos bien conocidos aseguran que  $\mathbf{x}(\mathbf{t})$  y  $\mathbf{u}(\mathbf{t})$  van a cero con el tiempo. Esto garantiza la *estabilidad a lazo cerrado*, como así también señales de control limitadas en el sistema a lazo cerrado.

Se puede demostrar que el valor de  $\mathbf{K}$  que minimiza el índice de comportamiento(PI) esta dado por:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S}$$

donde  $\mathbf{S}$  es una matriz  $n \times n$  que satisface la *ecuación de Riccati*:

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} - \mathbf{S} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{Q}$$

Dentro de esta estructura LQ se pueden indicar varios aspectos:

- En la medida que el sistema sea controlable y  $\mathbf{Q}$  y  $\mathbf{R}$  se seleccionen adecuadamente, el valor de  $\mathbf{K}$  dado por estas ecuaciones *garantiza la estabilidad del sistema a lazo cerrado*.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

- Esta técnica es fácil de aplicar, incluso, para plantas de múltiples entradas.
- La solución del índice LQR depende de la solución de la ecuación matricial de Riccati, de manera que es inadecuado para el cálculo manual. Afortunadamente varios paquetes de software están disponibles para correr en PC y poder resolver la ecuación de diseño de Riccati en términos de  $\mathbf{S}$  y también para obtener  $\mathbf{K}$ . Por ello el diseño basado en computadora(CAD) es un hecho esencial para el control moderno.

La solución del LQR es un camino formal que da una *única respuesta* al problema del control realimentado una vez que el parámetro de diseño  $\mathbf{Q}$  ha sido seleccionado. A decir verdad *el arte de ingeniería en el diseño moderno yace en la selección de las matrices de peso  $\mathbf{Q}$  y  $\mathbf{R}$  del índice de comportamiento*. Se ha desarrollado una importante teoría con relación al proceso de selección de dichas matrices de peso. Una vez que se ha seleccionado apropiadamente  $\mathbf{Q}$ , la ecuación matricial de diseño se resuelve formalmente para el único  $\mathbf{K}$  que garantiza estabilidad.

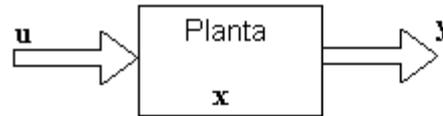
Obsérvese que  $\mathbf{K}$  se calcula sobre la base de cantidades de lazo abierto como son  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{Q}$ , de manera que el control clásico y el moderno tienen en común, el hecho de determinar las propiedades de lazo cerrado en términos de las cantidades de lazo abierto. Sin embargo en el control moderno, todas las componentes de  $\mathbf{K}$  se determinan al mismo tiempo, utilizando las ecuaciones de diseño matricial. Esto se corresponde con *cerrar todos los lazos de control simultáneamente*, lo cual contrasta completamente con el procedimiento de diseño de un lazo por vez en control clásico.

Desgraciadamente, el diseño formal del regulador LQR da *poca intuición sobre la naturaleza o propiedades del sistema a lazo cerrado*. En los años recientes, esta desventaja ha sido cubierta desde distintos puntos de vista.

A pesar que el diseño del regulador LQR utilizando la realimentación del vector de estado garantiza la estabilidad a lazo cerrado, las componentes del vector de estado rara vez están disponibles con el propósito de realimentarlas en un problema de diseño práctico. Por ello la *realimentación de la salida* de la forma:

## 2.CONTROL MODERNO

El diseño en control moderno es fundamentalmente una técnica en el dominio temporal. Se requiere un *modelo de estados exacto* para el sistema a ser controlado(o planta). Este modelo es una *ecuación diferencial vectorial de primer orden*, que para el caso general es de la forma(Ver figura 5):



$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t)$$

$$y = g(x, u, t)$$

Donde :

$x$  = vector de estado

$u$  = vector de entradas de control

$y$  = vector de salida o de medición de las salidas

Fig.5. Esquema de un sistema multivariable y su modelo general

Cuando el sistema a controlar o planta es lineal y de coeficientes constantes el modelo matemático se reduce a:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Es posible sumar los términos, para representar el ruido del proceso y de la medición. Nótese que la planta se describe en el dominio temporal.

La potencia del control moderno tiene sus raíces en el hecho que el modelo de estados puede representar muy bien a los sistemas MIMO y SISO ya sean lineales o no lineales.

Las técnicas del control moderno fueron ampliamente establecida, en primer lugar, para los sistemas lineales. Se puede hacer la extensión a los sistemas no-lineales empleando el enfoque de Lyapunov, el cual extiende fácilmente a los sistemas MIMO, programación dinámica y otras técnicas.

De la misma manera que en el caso clásico, ciertas cuestiones fundamentales sobre el comportamiento de los sistemas a lazo cerrado pueden abordarse investigando las *propiedades a lazo abierto*. Por ejemplo, las propiedades de controlabilidad y observabilidad a lazo abierto, permiten discernir sobre lo que es posible obtener al utilizar control realimentado. La diferencia es que, para tratar con el modelo de estados, se requiere un *buen conocimiento de matrices y álgebra lineal*.

Para conseguir adecuadas propiedades a lazo cerrado, debe utilizarse un control realimentado de la forma

$$u = -Kx$$

La ganancia de realimentación  $K$  es una matriz cuyos elementos son las ganancias de control individuales del sistema. Como todos los estados se utilizan para realimentar, esta técnica se conoce como *realimentación del vector de estado*. Obsérvese que múltiples ganancias de realimentación y grandes sistemas pueden manejarse fácilmente en esta estructura. De esta manera si tenemos  $n$  variables de estado(donde  $n$  puede ser grande en sistemas aeroespaciales o de distribución de energía) y  $m$  entradas de control, entonces  $K$  resulta una matriz de dimensión  $m \times n$ .

principalmente para *sistemas lineales e invariantes en el tiempo*, no obstante, a través de ciertas extensiones se puede aplicar para analizar algunos controles no-lineales a través de la función descriptiva. La descripción necesaria del sistema para diseñar controles utilizando los métodos de Nyquist y Bode, es la respuesta en frecuencia, es decir la magnitud y fase en función de la frecuencia. Esto es una ventaja ya que la respuesta en frecuencia puede medirse experimentalmente. Así, sobre la base de la respuesta en frecuencia, se puede determinar la función transferencia. Para el diseño basado en el lugar de raíces se necesita la función transferencia. *No se necesita una descripción exacta de la dinámica interna del sistema* para el diseño clásico, solo es importante el comportamiento entrada/salida del sistema (Ver fig. 4).

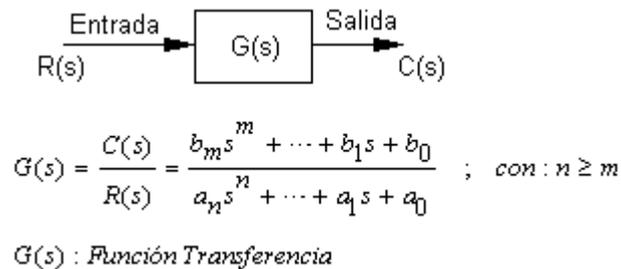


Fig.3. Función Transferencia y su diagrama en bloque

El diseño puede realizarse a mano y utilizando técnicas gráficas. Este método suministra una gran cantidad de intuición y proporciona al ingeniero de control un rango de posibilidades para el diseño, de manera que los sistemas de control resultantes no son únicos. El proceso de diseño es un arte de ingeniería.

Los sistemas reales tienen perturbaciones y ruido en las mediciones, y no pueden ser descritos exactamente por el modelo matemático que el ingeniero está utilizando para el diseño. La teoría clásica es natural para diseñar sistemas de control que son robustos frente a estos desórdenes, dando un buen comportamiento a lazo cerrado a pesar de dichos desórdenes. El diseño robusto se lleva a cabo utilizando nociones como margen de ganancia y fase.

Generalmente se utilizan en la estructura del control compensadores simples, como ser proporcional-integral-derivativo (PID), redes de atraso-adelanto de fase o circuitos de corrimiento. El efecto de tales circuitos es fácil de entender en los gráficos de Nyquist, Bode o lugar de raíces, de manera que puede seleccionarse una estructura adecuada para el compensador. Una vez diseñado, el compensador se puede sintonizar fácilmente en línea.

Un concepto fundamental en control clásico es la habilidad para describir las propiedades de lazo cerrado en función de las propiedades de lazo abierto, las cuales son conocidas o fáciles de medir. Por ejemplo: los diagramas de Nyquist, Bode y los lugares de raíces se obtienen sobre la base de la función transferencia a lazo abierto. También las propiedades de rechazo a las perturbaciones por el sistema a lazo cerrado y el error en régimen permanente se pueden describir por la transferencia a lazo abierto y la sensibilidad.

La teoría del control clásico es difícil de aplicar en sistemas de múltiples entradas y salidas (MIMO) o sistemas multilazos. Debido a la interacción de los lazos de control en un sistema multivariable, cada función transferencia entrada/salida simple (SISO) puede tener propiedades aceptables en términos de la respuesta al escalón y robustez, pero el control coordinado del sistema multivariable o multilazo puede dejar de ser aceptable.

El diseño clásico de los sistemas MIMO o multilazo requieren de un cuidadoso esfuerzo si se utiliza la aproximación de cerrar un lazo a la vez mediante técnicas gráficas. Por ejemplo el lugar de raíces debe dibujarse para cada ganancia, teniendo en cuenta la ganancia previamente seleccionada. Este es un procedimiento de prueba y error que requiere múltiples iteraciones, y no garantiza buenos resultados incluida la estabilidad a lazo cerrado.

Los procedimientos de aproximación del dominio frecuencial aplicado a los sistemas multivariables, desarrollados por la escuela inglesa en la década del setenta, así como la teoría cuantitativa de la realimentación, superan muchas de las limitaciones mencionadas, suministrando una efectiva aproximación para el diseño de muchos sistemas MIMO.

Durante la década del cincuenta la teoría de los *sistemas de datos muestreados* fue desarrollada en la Universidad de Columbia por J.R.Regazzini, G.Frankin y L.A. Zadeh, como así también por E.I.Jury en 1960, B.C.Kuo en 1963 y otros. La idea de utilizar la computadora digital en el *control industrial de procesos* surgió durante este periodo. Un trabajo serio y firme comenzó el 1956 en un proyecto conjunto entre TRW y Texaco, el cual culminó en un sistema controlado por computadora que fue instalado en la Refinería de Petróleo de Port Arthur en Texas en el año 1959.

El desarrollo de los *reactores nucleares* durante la década de 1950 fue un gran motivo para explorar la *instrumentación y control de procesos* industriales. Esta actividad tiene sus raíces en el control de plantas químicas realizado en la década del cuarenta.

En 1970 con el trabajo de K.Astrom y otros, se establecieron firmemente las bases del control digital aplicado a los procesos.

En la década del cincuenta el trabajo de C.E.Shannon en los laboratorios Bell ha revelado la importancia de la técnica de los datos muestreados en el procesamiento de señales. Las aplicaciones de la *teoría del filtrado digital* fueron investigadas en la empresa ASC (Analytical Sciences Corporation) en 1974 (Gelb) , como así también en otros lugares.

### **La Computadora Personal.**

Con la introducción de la PC en 1983, el diseño de sistemas de control moderno se transformó en posible para el ingeniero individual. A partir de allí se desarrollaron una gran cantidad de paquetes de software para el diseño de sistemas de control entre los cuales se encuentran: ORACLs, Program CC, Control-C, PC-Matlab, MATRIXx, Easy5, SIMNON y otros.

### **Unión del Control Clásico y Moderno.**

Con la publicación del primer libro de texto en los años sesenta, la teoría del control moderno se estableció como un paradigma en sí mismo, para el diseño de sistemas de control automático, en países como Estados Unidos. Una intensa actividad en investigación e implementación fue seguida con la fusión del I.R.E. y del A.I.E.E., para formar el I.E.E.E. al principio de los años sesenta

Con toda su potencia y ventajas, el control moderno fue deficiente en muchos aspectos. El comportamiento garantizado obtenido mediante la solución de las ecuaciones matriciales de diseño, significa que es posible, frecuentemente, diseñar un sistema de control que trabaje en teoría sin ganancia alguna de *intuición de ingeniería* en relación con el problema. Por otra parte las técnicas de diseño en el dominio frecuencial del control clásico ponen mucha atención en la intuición de ingeniería.

Otro problema es que un sistema de control moderno con cualquier dinámica del compensador *puede dejar de ser robusto* a las perturbaciones, dinámica no modelada y ruido de medición. Por otra parte *la robustez* se logra en la técnica del dominio frecuencial utilizando nociones como el margen de fase y margen de ganancia.

Debido a esto en la década del setenta, especialmente en Inglaterra hubo una importante actividad para extender las técnicas clásicas del dominio frecuencial y del lugar de raíces a los sistemas multivariables(H.H.Rosenbrock, 1974; A.G.J. MacFarlane & I. Postlethwaite, 1977).Se obtuvieron importantes resultados utilizando nociones como lugar característico, dominancia diagonal y el arreglo inverso de Nyquist.

El mayor proponente de las técnicas clásicas para los sistemas multivariables fue I.Horowitz, en cuya *teoría cuantitativa de la realimentación*, desarrollada a principios de 1970, realizó diseño robusto utilizando las cartas de Nichols.

En 1981 en publicaciones originales escritas por J.Doyle, G.Stein y M.G.Safonov como así también por A.J.Laub y G.L.Hartmann ,se mostró la importancia de los *diagramas de valores singulares* en función de la frecuencia para el diseño robusto de sistemas multivariables. Utilizando estos diagramas muchas de las técnicas clásicas del dominio frecuencial pueden ser incorporadas dentro del diseño moderno. Una visión general de esta *teoría moderna del control robusto* es suministrada por P.Dorato(1987).

## **BREVE DESCRIPCION FILOSOFICA DEL CONTROL AUTOMATICO.**

### **1. CONTROL CLASICO**

Desarrollado para el diseño de amplificadores realimentados, la teoría del control clásico se inclinó naturalmente al *dominio frecuencial* y al *plano-s*. Al depender del método de la transformada, se aplica

En un periodo de un año, las mayores limitaciones de la teoría del control clásico salieron a la luz, y se introdujeron nuevas e importantes herramientas teóricas, y así comenzó una nueva era en la teoría del control, que se llama *control moderno*.

Los puntos clave del trabajo de Kalman han sido: Es una *técnica en el dominio temporal*, lo cual la hace aplicable a sistemas lineales de parámetros variables como así también a sistemas no-lineales. Introdujo el *álgebra lineal y las matrices*, de manera que los sistemas de múltiples entradas y salidas pueden tratarse fácilmente. Empleó el concepto de *estado interno del sistema*, de manera que la técnica está relacionada con la dinámica interna del sistema y no solamente con el comportamiento de su relación salida/entrada.

En teoría del control, Kalman formalizó la noción de *optimización* mediante la minimización de una función cuadrática generalizada de energía. En teoría de la estimación, introdujo nociones estocásticas que aplicó a sistemas no-estacionarios *variantes en el tiempo* que suministró soluciones recursivas, el filtro de Kalman por la técnica de los cuadrados mínimos (utilizada por primera vez por C.F.Gauss) en la estimación de la órbita planetaria.

La técnica clásica del dominio frecuencial provee herramientas formales para el diseño de sistemas de control; pero la fase del diseño se asemeja más a un arte dando como resultado sistemas realimentados que no son únicos. Por el contrario, la teoría de Kalman da *soluciones óptimas* que permiten obtener sistemas de control con un *comportamiento garantizado*. Estos controles se obtienen directamente mediante la *solución de las ecuaciones de diseño matriciales*, las cuales generalmente tienen soluciones únicas.

### **Teoría del control no-lineal.**

Durante la década del sesenta en los Estados Unidos G. Zames, I.W.Sandberg, K.S.Narendra y C.A.Desoer entre otros ampliaron y extendieron el trabajo de Popov y Lyapunov acerca de la estabilidad de sistemas no-lineales. Se realizó una extensa aplicación de estos resultados en el estudio de la distorsión no-lineal de los lazos realimentados con ancho de banda limitado, control de procesos no-lineales, diseño de controles para aviones y aplicaciones robóticas.

### **La Computadora en el Diseño e Implementación de Controles.**

Las técnicas de diseño de control clásico pueden llevarse a cabo mediante la utilización manual de cálculos y aproximaciones gráficas. En cambio los diseños de controles modernos requieren la solución de complicadas ecuaciones matriciales no-lineales. Ha sido afortunado que en la década de los sesenta se produjera un gran desarrollo en el área de la tecnología de computadoras digitales. Sin las computadoras, el control moderno tendría aplicaciones limitadas.

### **Desarrollo de las Computadoras Digitales.**

En el año 1830 C.Babbage introdujo los principios de las modernas computadoras, incluyendo memoria, programa de control, y capacidad de ramificación. En 1948 J. Von Neumann dirigió la construcción de la computadora con programa almacenado IAS, en la Universidad de Princeton. A su vez IBM construyó su máquina de programa almacenado llamada SSEC. Sperry Rand en 1950, construyó en forma comercial, la primera máquina de procesamiento digital de datos, llamada UNIVAC I. Poco después IBM comercializó la computadora 701.

En 1960 se produjo un gran avance, ya que se introdujo la segunda generación de computadoras que utilizaban *tecnología de estado sólido*. En 1965 la empresa DEC(Digital Equipment Corporation) construyó la computadora PDP-8, comenzando así la industria de las *mini-computadoras*. Finalmente, en 1969 W. Hoff inventó el *microprocesador*.

### **Teoría del Control y Filtrado Digital.**

Las computadoras digitales se necesitan por dos propósitos en los controles modernos.

- Para resolver las *ecuaciones matriciales de diseño*, que dan la ley de control.
- Las leyes de control óptimo y los filtros son variables en el tiempo, lo cual requiere de las computadoras para implementar el control moderno, y los esquemas de filtrado para los sistemas reales.

Con el advenimiento del microprocesador en 1969, se desarrolló una nueva área. Los sistemas de control que se implementaban en computadoras digitales debían ser formulados en *tiempo discreto*. Así el desarrollo de la *teoría del control digital* ha sido natural en esa época.

## Satélite Sputnik-1957.

Dada la historia de la teoría del control en la Unión Soviética, ha sido natural que el lanzamiento del primer satélite, llamado Sputnik, se produjera en ese país en 1957. La primera conferencia de la nueva formación, llamada: Federación Internacional de Control Automático (IFAC), se realizó en Moscú en 1960.

El lanzamiento del Sputnik, generó una tremenda actividad en el diseño de controles automáticos en los Estados Unidos. Ante la falta de cualquier paradigma, se requiere retornar a la historia y a los primeros principios naturales. Entonces quedó en claro la necesidad de retornar a las técnicas del dominio temporal de la época primitiva de la teoría del control, basadas en las ecuaciones diferenciales. Así los trabajos de Lagrange y Hamilton hicieron posible la obtención de las ecuaciones del movimiento de muchos sistemas dinámicos. Debido a esto se requirió una teoría del control que tratara con dichas ecuaciones diferenciales no-lineales.

Es notable que, casi exactamente, en 1960 los principales desarrollos ocurrieron independientemente en varios frentes de la teoría de las comunicaciones y el control.

## Navegación

En 1960, C.S. Draper inventó su sistema de navegación inercial, que utilizaba giróscopos para suministrar información exacta de la posición de un cuerpo moviéndose en el espacio, como ser un barco, avión o un vehículo espacial. De esta manera fue necesario desarrollar los sensores apropiados para el diseño de los controles de navegación.

## Optimización en los Sistemas Naturales.

El primero en mencionar el *Principio de Optimización* fue J. Bernoulli en relación con el problema del Brachistochrone en 1696. Este problema fue resuelto por los hermanos Bernoulli y por I. Newton, y quedó claro que la cuestión de la optimalidad es una propiedad fundamental del movimiento en los sistemas naturales. Se investigaron varios principios de optimalidad, incluyendo el principio del mínimo tiempo en óptica por parte de P. de Fermat. El trabajo de L. Euler en 1744 y Hamilton condujo a la conclusión que el sistema se mueve por un camino que minimiza la integral de la diferencia entre la energía cinética y potencial.

Estos principios de optimización son todos *principios de mínima*. Es interesante mencionar que a principios de 1900, A. Einstein, mostró que en relación con el sistema de coordenadas 4D espacio-tiempo, el movimiento de los sistemas ocurren según un camino que *maximiza* el tiempo.

## Control Óptimo y Teoría de la Estimación

Desde que los sistemas con ocurrencia natural exhiben optimalidad en su movimiento, tiene sentido diseñar sistemas hechos por el hombre en forma óptima. La mayor ventaja es que este diseño puede ser realizado en el dominio temporal. En el contexto de diseño del control moderno, es usual minimizar el tiempo de tránsito, o una función energía cuadrática generalizada o *índice de comportamiento*, posiblemente con ciertas restricciones sobre el control permitido.

En 1957 R. Bellman aplicó la *programación dinámica* para el control óptimo de sistemas en tiempo discreto, demostrando que la dirección natural para resolver los problemas de control óptimo es *retrocediendo en el tiempo*. Su procedimiento ha resultado en un esquema realimentado de lazo cerrado, generalmente no-lineal.

En 1958, L.S. Pontryagin desarrolló su *principio de máxima*, que resuelve los problemas de control óptimo apoyándose en el *cálculo de variaciones* desarrollado por L-Euler (1707-1783). Resolvió el problema de mínimo tiempo, obteniendo una ley de control On/Off como control óptimo [Pontryagin, Boltyansky, Gamkrelidze y Mishchenko, en 1962]. En 1960 aparecieron tres importantes publicaciones realizadas por R. Kalman y otros co-autores. La primera de estas dio a publicidad el trabajo más importante de Lyapunov para el control de sistemas no lineales en el dominio temporal. En el segundo analizó el control óptimo de sistemas, suministrando las ecuaciones de diseño para el regulador cuadrático lineal (LQR). En el tercero analizó el filtrado óptimo y la teoría de estimación, suministrando las ecuaciones de diseño para el *filtro digital de Kalman*. En 1961 Kalman y Bucy, desarrollaron el *filtro continuo de Kalman*.