

SISTEMAS DE CONTROL I

Grupo de Investigación en Control Industrial

Área de Automática

Profesores:

José Miguel Ramírez S.

Esteban Emilio Rosero García

UNIVERSIDAD DEL VALLE

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Santiago de Cali

23 de octubre de 2007

Contenido

1. Introducción a los sistemas de control	10
1.1. Importancia	11
1.2. Definiciones	12
1.3. Clasificaciones	13
1.4. Representación	19
1.5. Bucla típica	20
1.5.1. Bucla Típica Análoga	21
1.5.2. Bucla Típica Digital	23
1.6. Análisis	24
1.7. Diseño	25
Referencias	31

Introducción a los sistemas de control

Introducción

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, es una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Prácticamente, cada aspecto de las actividades de nuestra vida diaria está afectado por algún tipo de sistema de control. Los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria tales como control de calidad de los productos manufacturados, líneas de ensamble automático, control de máquina-herramienta, sistemas de transporte, sistemas de potencia, robótica, etc., aún el control de inventarios y los sistemas económicos y sociales se pueden analizar a través de la teoría de control automático.

Debido a que los avances de la teoría y la práctica del control automático aportan los medios para obtener un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, tales como mejorar la productividad y eliminar muchas de las operaciones repetitivas y rutinarias, los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo.

En esta unidad se presentarán las definiciones, las clasificaciones, las representaciones, la bucla típica análoga y digital, y de forma general, los procesos de análisis y diseño de los sistemas de control.

Objetivos

1. Conocer la importancia de los sistemas de control en la sociedad.
2. Emplear la terminología utilizada en los sistemas de control análogos y digitales. (**Conocimiento**)
3. Identificar, diferenciar y analizar los elementos y señales de la bucla típica de control análoga y digital. (**Comprensión**)

Contenidos

1.1. Importancia

1. *Los sistemas de control han sido de gran impacto para el desarrollo de nuestra sociedad ya que han permitido:*
 - Automatizar tareas humanas repetitivas, tediosas *y/o* peligrosas.
 - Trabajar con tolerancias mucho menores, mejorando la calidad de los productos.
 - Disminuir costos de producción en mano de obra e insumos.
 - Mejorar la seguridad de operación de las máquinas y procesos.
2. *Los sistemas de control tienen vastas áreas de aplicación en:*
Industrias del transporte, incluyendo la aeroespacial; procesos químicos y biológicos; sistemas mecánicos, eléctricos y electromecánicos; agroindustria, industrias de procesos y de manufactura; sistemas económicos, políticos y sociales.
3. *Los encontramos en nuestra cotidianidad:*
Desde la nevera hasta el sistema de control de combustión electrónica de los automóviles y así como en nuestro propio cuerpo: control de la temperatura corporal, presión arterial, equilibrio,...
El simple acto de señalar con el dedo es un sistema de control.

Ahora bien, su aplicación requiere de varias tecnologías como la informática, la eléctrica, la electrónica y las comunicaciones; también exige buena fundamentación matemática y conocimientos del proceso a controlar.

De lo anterior se deriva que los sistemas de control sean un área *multi-disciplinar y transversal* a las ingenierías y a otras ciencias.

1.2. Definiciones

- **SISTEMA DE CONTROL:** Arreglo de componentes físicos interconectados de forma que se puedan comandar dinámicamente.
- **ENTRADA:** Estímulo aplicado al sistema de control para producir una respuesta especificada.
- **SALIDA:** Respuesta obtenida que puede ser diferente a la especificada.
- **PERTURBACIÓN:** Es una entrada que afecta adversamente a la salida.

Ejemplos

- Sistema de control de excitación digital, ver figura 1.1.

Entrada	⇒	Voltaje de referencia (Nominal)
Salida	⇒	Voltaje en terminales
Perturbación	⇒	Carga (Corriente de armadura)

- Sistema de control de la velocidad en una turbina, ver figura 1.2.

Entrada	⇒	Velocidad de referencia ($f = 60$ Hz.)
Salida	⇒	Velocidad en el eje
Perturbación	⇒	Carga (Torque eléctrico)

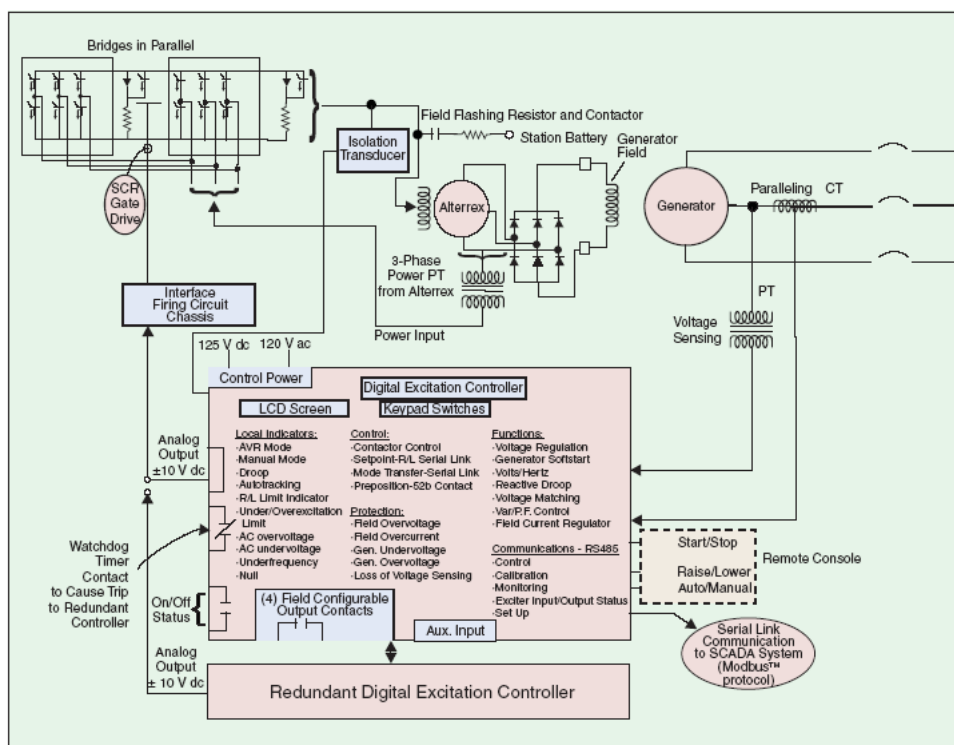


Figura 1.1: Sistema de control de excitación digital. Fuente: [R. C. Schaefer, 2001]

1.3. Clasificaciones

Son muchas las clasificaciones posibles de realizar; aquí se presentan algunas de mayor interés.

- **DE ACUERDO A LA ACCIÓN DE CONTROL:** Variable que activa el sistema a controlar.

DE LAZO ABIERTO: Acción de control independiente de la salida; para su buen desempeño se requiere de una buena calibración; si el proceso a controlar es estable, no hay riesgo de inestabilidad.

DE LAZO CERRADO: Se compara la entrada y la salida y usa la diferencia (error) como acción de control; se requiere por tanto de una **realimentación**, la cual genera posibilidad de inestabilidad.

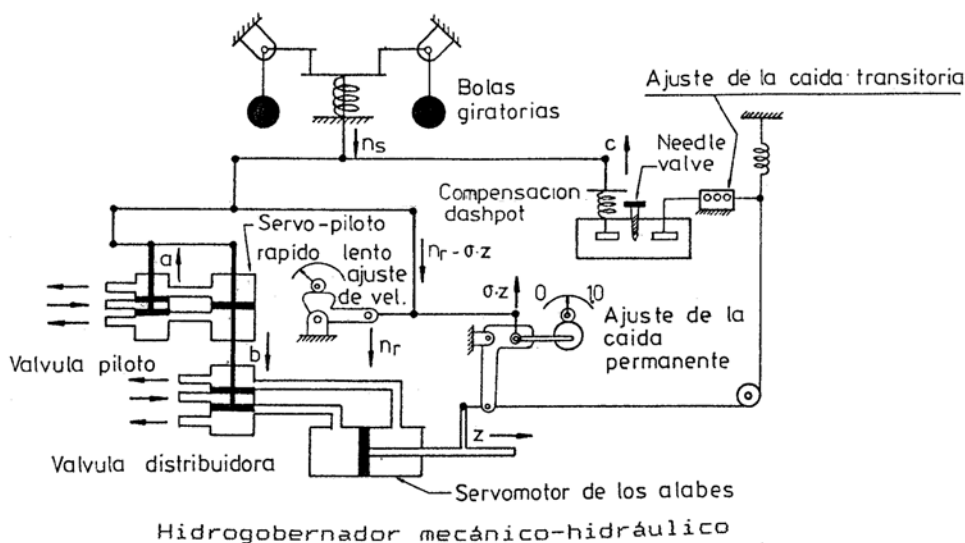


Figura 1.2: Sistema de control de frecuencia

- **DE ACUERDO A LA FUENTE DE ENERGÍA** del elemento que genera la acción de control:
 - Neumáticos (Aire a presión).
 - Hidráulicos (Aceite o agua a presión).
 - Eléctricos - Electrónicos (Electricidad).

- **DE ACUERDO A COMO SE GENERA LA ACCIÓN DE CONTROL** a partir del error:
 - Todo - Nada (ON - OFF).
 - Proporcional (P), Integral (I), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD), Proporcional Integral Derivativo (PID).
 - Adelanto *y/o* Atraso de Fase.
 - RST

- **DE ACUERDO A LA FUNCIÓN:**

SERVOMECANISMO: Busca seguir una entrada variante; la salida es la posición y /o sus derivadas; por ejemplo, el sistema de control de posición hidráulico, figura 1.3.

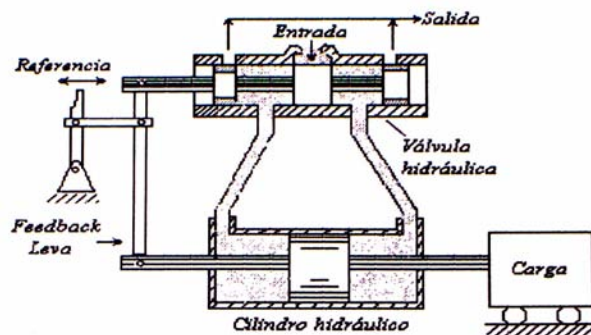


Figura 1.3: Servomecanismo de posición.

REGULADOR: Busca mantener constante la salida, principalmente ante cambios debidos a disturbios; por ejemplo, los sistemas de control de tensión y frecuencia de los sistemas de generación; el sistema de control de temperatura, la figura 1.4 muestra un regulador de temperatura.

- **DE ACUERDO A LAS PROPIEDADES** del proceso controlado:
 - Parámetros Concentrados - Distribuídos.
 - Determinístico - Estocástico.
 - Continuo - Discreto (Flujo del producto).
 - Estático - Dinámico.
 - Variante - Invariante.
 - Lineal - No lineal.
- **DE ACUERDO A LA APLICACIÓN INDUSTRIAL:**
 - **De Procesos:** temperatura, flujo, presión, PH, nivel, densidad, composición, viscosidad, color, etc.

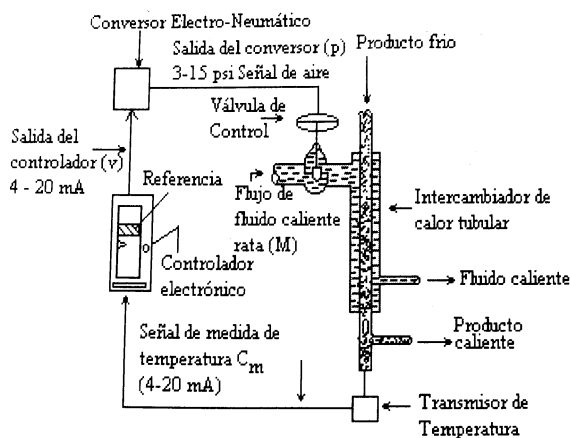


Diagrama Esquemático de un Sistema de Control de Temperatura

Figura 1.4: Regulador de temperatura.

- **De Manufactura:** Producción de partes: autos, equipos domésticos, etc.
- **DE ACUERDO A LA ESTRATEGIA DE CONTROL:**
 - Directo (feedforward) - Realimentado (feedback).
 - Serie - Paralelo.
 - Centralizado - Distribuido
 - Cascada, sobrerango, selectivo, etc.
- **DE ACUERDO A LAS SEÑALES INVOLUCRADAS** en el sistema de control.
 - Monovariante, si el sistema controla una sola variable.
 - Multivariante, si tiene múltiples entradas y salidas.
 - Sistema de control análogo, discreto, de datos muestreados o digital, dependiendo del tipo de señal presente en el sistema.

Para esta última clasificación, definamos los **tipos de señales**:

Señal de tiempo continuo: Se define sobre un rango continuo del tiempo; su amplitud puede ser continua o cuantificada; por ejemplo, la salida de un conversor D/A es una señal de tiempo continuo cuantificada. Ver figura 1.5.

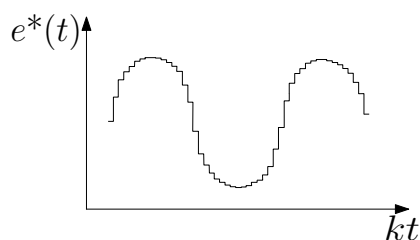


Figura 1.5: Señal de tiempo continuo

Señal análoga: Señal de tiempo continuo con un rango continuo de amplitud; por ejemplo, la salida del sistema de control. Ver figura 1.6.

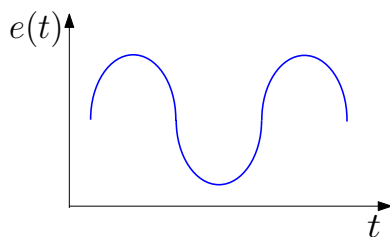


Figura 1.6: Señal análoga

Señal de tiempo discreto: Sólo está definida en instantes discretos del tiempo; el tiempo está cuantificado.

Señal de datos muestreados: Señal de tiempo discreto en un rango continuo de valores; por ejemplo, el muestreo de una señal análoga. Ver figura 1.7.

Señal digital: Señal de tiempo discreto con amplitud cuantificada; por ejemplo, la salida de un conversor A/D, la cual es una secuencia de números binarios. Ver figura 1.8.

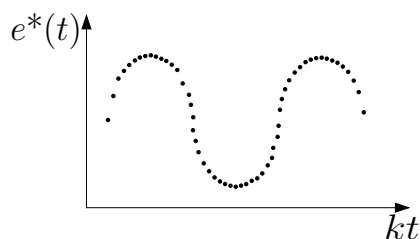


Figura 1.7: Señal de datos muestreados

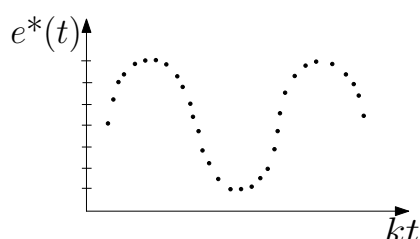


Figura 1.8: Señal digital

Así, a partir del tipo de señal presente en el sistema, los sistemas se clasifican en:

- **SISTEMAS ANÁLOGOS:** Sólo contienen señales análogas; se describen mediante ecuaciones diferenciales.
- **SISTEMAS DISCRETOS:** Sólo contienen señales discretas; se describen mediante ecuaciones de diferencia.
- **SISTEMAS DE DATOS MUESTREADOS:** Tienen señales discretas y señales de tiempo continuo.
- **SISTEMAS DIGITALES:** Se incluyen señales de tiempo continuo y señales digitales en forma de código numérico.

En este curso se despreciarán los efectos de la cuantificación de señales en los conversores A/D y en el cálculo de la ley de control en un procesador digital; por ello, a un sistema de control gobernado por un procesador digital de señales (Computador, Microcontrolador, DSP, etc.) se le denominará ***SISTEMA DE CONTROL DIGITAL SCD***.

1.4. Representación

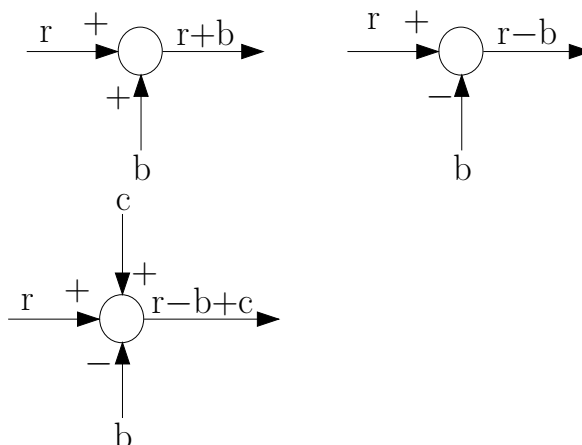
La representación más usual es por **DIAGRAMAS DE BLOQUES**; están compuestos por bloques, sumadores, puntos de reparto, flechas y las señales o variables.

BLOQUES

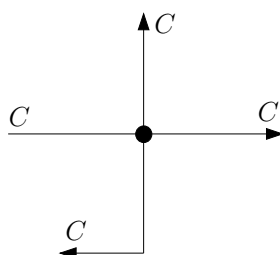
$$\text{Entrada} \rightarrow \boxed{\text{BLOQUE}} \rightarrow \text{Salida}$$

Dentro del bloque se tiene el nombre, la descripción, el dibujo u operación matemática que realiza.

SUMADORES: Suman o restan señales.



PUNTOS DE REPARTO: Permiten usar una señal varias veces.



FLECHAS: Representan la dirección de las señales; esta dirección corresponde a la información de control, no de potencia.

VARIABLES o señales en el sistema; cuando haya lugar a confusión, se usará como notación:

Minúsculas: Dominio del tiempo.

Mayúsculas: Dominio de la frecuencia compleja (S)

En proyectos de automatización, los sistemas de control se representan a partir de estándares como el *Instrumentation Symbols and Identifications* preparado por la **Instrument Society of America (ISA)**, el cual es un sistema de designación por símbolos y códigos de identificación como se muestra en la figura 1.9.

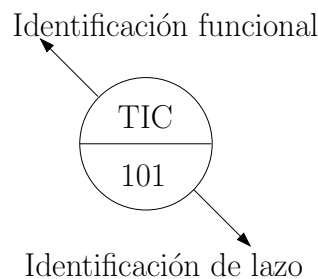


Figura 1.9: Normas ISA

El círculo es el símbolo general del instrumento. Las letras y números en su interior, el código de identificación. En la identificación funcional, la primera letra corresponde a la variable medida del lazo; las restantes indican las funciones del instrumento: Registrador, Indicador, Controlador, Transmisor, etc. El estándar también define los símbolos para los actuadores, sensores primarios, procesos y líneas de comunicación de señales. La figura 1.10 muestra un ejemplo de estos diagramas.

1.5. Bucla típica

Veremos las buclas típicas para los sistemas de control análogos y digitales; como su nombre lo indica, estas buclas se encuentran ampliamente en la industria.

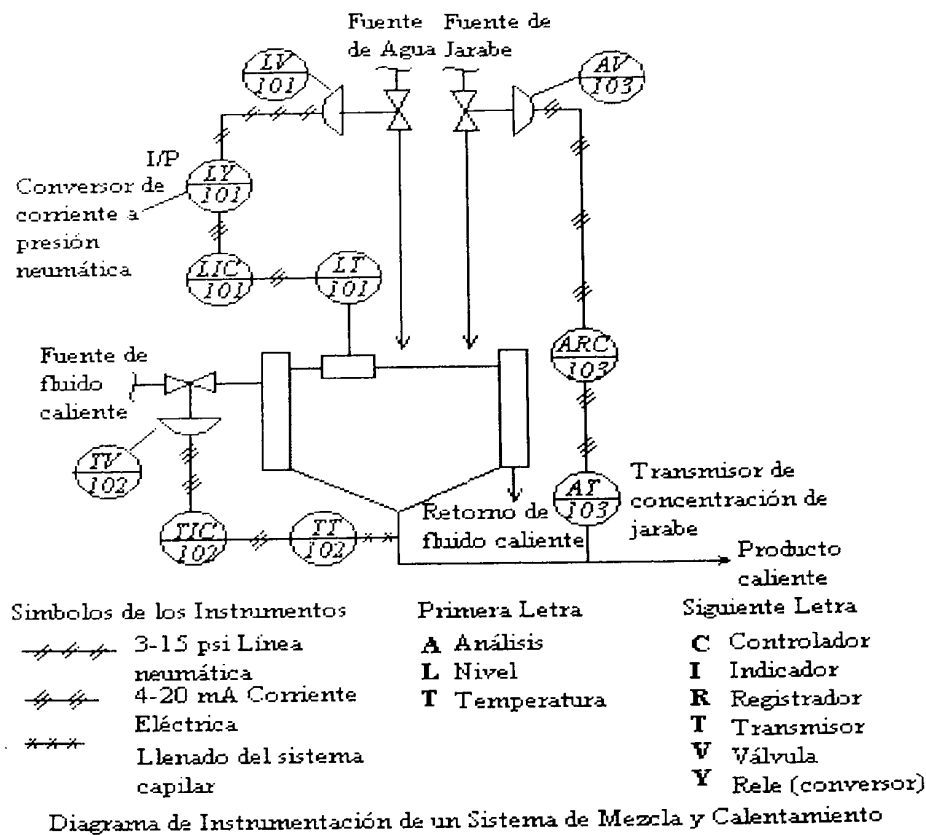


Figura 1.10: Diagrama ISA de un sistema de control

1.5.1. Bucla Típica Análoga

La bucla típica análoga se muestra en la figura 1.11.

Los elementos y señales de la bucla típica análoga, se describen a continuación.

CONTROLADOR: Comparador más el compensador. El comparador genera la señal de error y a partir de ella, el compensador define la señal de control apropiada para compensar las deficiencias de desempeño del sistema.

ACTUADOR: (Elemento final de control). Adecúa los niveles de potencia entre la señal de control y la variable manipulada.

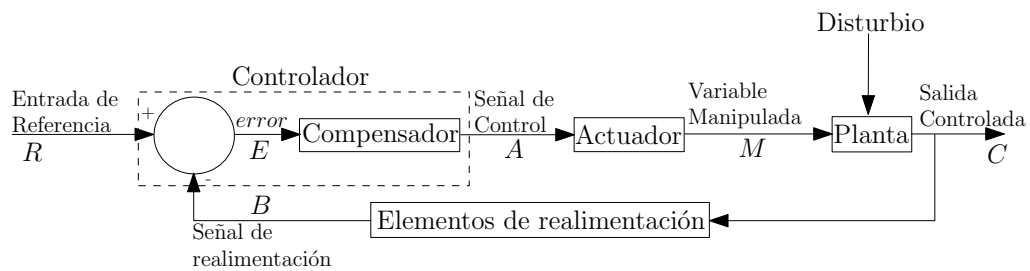


Figura 1.11: Bucla típica analógica

PLANTA: Representa la máquina o proceso a controlar.

ELEMENTOS DE REALIMENTACIÓN: Son dispositivos que permiten medir la señal de salida y entregar un valor de magnitud apropiada para el comparador; pueden incluir sensores (captadores de la señal), transductores (adecuadores de la señal) o transmisores de señal.

ENTRADA O REFERENCIA: Es un estímulo del sistema que corresponde al valor deseado de la salida.

ERROR: Es la diferencia entre la referencia y la salida.

SEÑAL DE CONTROL: Es la señal de salida del controlador.

VARIABLE MANIPULADA: Es la variable del proceso que permite variar la salida controlada.

DISTURBIO O PERTURBACIÓN: Es una señal de entrada al sistema de control que afecta adversamente la salida del sistema; cuando entra en la realimentación se le denomina RUIDO.

SALIDA O VARIABLE CONTROLADA: Es la cantidad o condición que se mide y trata de controlar del sistema; representa la respuesta del sistema y puede ser diferente de la entrada deseada.

SEÑAL DE REALIMENTACIÓN: Es la señal medida de la planta.

Ejemplo:

1. Sistema de control de la Tensión: Ver figura 1.12.

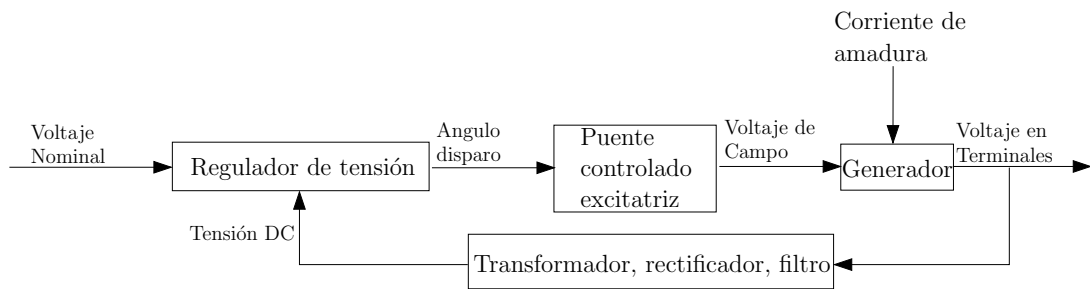


Figura 1.12: Bucla típica del controlador de tensión

2. Sistema de control de velocidad: Ver figura 1.13.

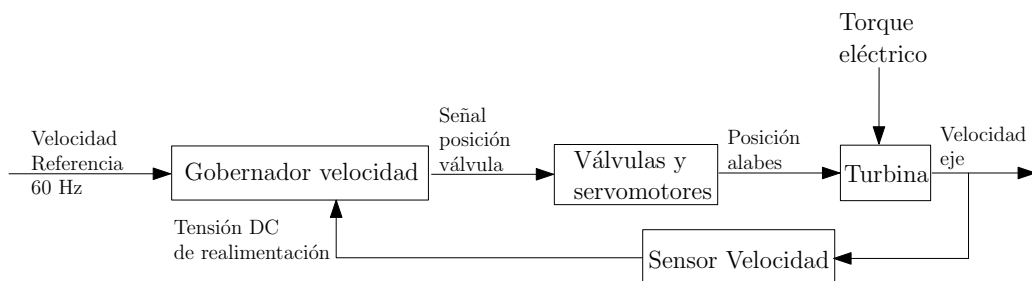


Figura 1.13: Bucla típica del controlador de velocidad

1.5.2. Bucla Típica Digital

La bucla típica digital se muestra en la figura 1.14

PROCESADOR DIGITAL: Realiza el algoritmo de control; recibe, procesa y entrega señales digitales.

S/H: (Sampler and Holder) Muestreo y Retención: Convierte la señal análoga $e(t)$ en una señal de datos muestreados $e(kT)$ y extrapola la señal muestreada un cierto tiempo.

A/D: (Analog to Digital conversor) Conversor análogo a digital: Convierte una señal análoga en una digital; realiza el proceso de codificación. Normalmente el S/H es parte integral del A/D.

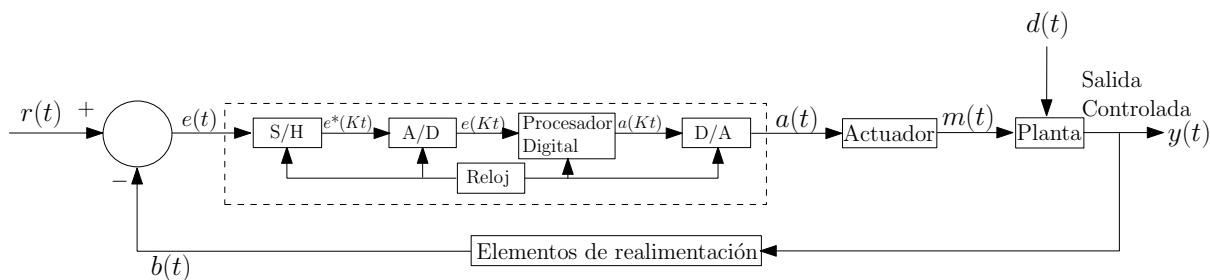


Figura 1.14: Bucla típica digital

D/A: (Digital to Analog conversor) Conversor digital a análogo: Convierte una señal digital en una análoga; realiza el proceso de decodificación. Lleva implícito el mantenimiento de la señal análoga.

Reloj: Sincroniza los procesos de codificación y decodificación.

El A/D puede medir directamente $b(t)$; en tal caso, la comparación la hace el procesador digital.

Si el sistema es multivariable, se tendrán circuitos multiplexores y demultiplexores.

1.6. Análisis

ANALIZAR un sistema es determinarle sus *características* de funcionamiento que cuantifiquen:

- La velocidad de respuesta
- Su exactitud permanente
- El grado de estabilidad

Se considerarán tres pasos generales para el análisis de un sistema de control:

1. Obtener una idea cualitativa de su funcionamiento; básicamente se logra obteniendo los elementos y señales de la bucla típica y observando la secuencia de eventos, luego de una variación en la entrada deseada o del disturbio.

2. Establecer un modelo matemático que represente al sistema:
 - En una representación entrada-salida, los diferentes componentes del sistema se representan por *funciones de transferencia* y se interconectan construyéndose así un diagrama de bloques o un gráfico de flujo de señal. (**Control clásico**)
 - En una representación del estado interno del sistema utilizando *variables de estado*. (**Control moderno**)
3. Analizar el sistema mediante:

$$\begin{array}{l} \text{Enfoque Clásico : } \left\{ \begin{array}{l} * \text{ La respuesta en el tiempo.} \\ * \text{ El lugar geométrico de las raíces.} \\ * \text{ La respuesta en frecuencia.} \end{array} \right. \\ \text{Enfoque Moderno : } \left\{ \begin{array}{l} * \text{ Valores y vectores propios.} \\ * \text{ Respuesta en el tiempo.} \end{array} \right. \end{array}$$

1.7. Diseño

DISEÑAR un sistema de control, es obtener uno que cumpla determinadas *especificaciones de funcionamiento*; las especificaciones de funcionamiento son los límites, rangos o cotas de las *características*. Ésto se logra ajustando el controlador.

En el enfoque clásico, el diseño más usual es por análisis; con cuatro pasos generales:

1. Conocer las especificaciones y expresarlas en términos matemáticos.
2. Analizar el sistema; mediante tanteos con la guía de un método de compensación, ajustar el controlador hasta cumplir con las especificaciones.
3. Verificar el funcionamiento mediante simulación digital para incluir dinámicas no modeladas, no linealidades, perturbaciones, etc, realizar *reajustes*.
4. Ajuste en sitio, *realizar reajustes*.

En el enfoque moderno, el diseño se realiza por un procedimiento analítico, lo que se conoce como *Síntesis*.

Resumen

En esta unidad expusimos los conceptos básicos de lo que es un sistema de control. Describimos sus componentes básicos, los clasificamos de acuerdo a las señales que manejan, objetivos de control, dimos varios ejemplos de la vida real, y de forma general describimos el proceso de análisis y diseño de un sistema de control que puede ser aplicado a diferentes ramas de la ciencia y la ingeniería.

Actividades de aprendizaje

1. Realice una lectura reflexiva y crítica del material del curso.
2. Realice las lecturas complementarias.
3. Una consulta en internet sobre avances de la tecnología y los sistemas de control para discutir en clase.
4. La figura 1.15 muestra el diagrama de un sistema de control (Evaluación año 2003). El desplazamiento de la polea móvil es perpendicular al del indicador y el del objeto; x_1 , x_2 y x_3 son las posiciones del indicador, objeto y polea móvil respectivamente; la tensión V_1 entre el punto móvil del potenciómetro y la conexión entre las resistencias R , es proporcional al desplazamiento x_3 en el factor k_1 ; la tensión de salida del amplificador es k_2 veces su tensión de entrada; la dinámica para la velocidad del motor se rige por la segunda ley de Newton rotacional:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = k_3 V_3(t) - t_L(t) \quad (1.1)$$

donde J es el momento de inercia equivalente del motor y la carga, k_3 es una constante y $t_L(t)$ es un par arbitrario y desconocido de carga. El piñón tiene un radio r . Todos los parámetros y variables están en unidades del sistema internacional.

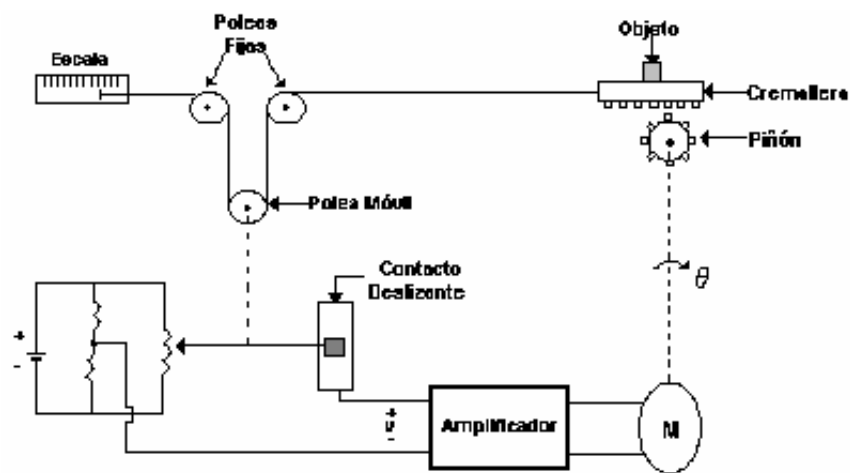


Figura 1.15: Sistema de control

- Identifique los elementos y señales de la bucla típica realimentada.
5. Identificar los diferentes elementos y señales de la bucla de realimentación típica para:
- a) Regulador de Velocidad de Watt. (figura 1.16)

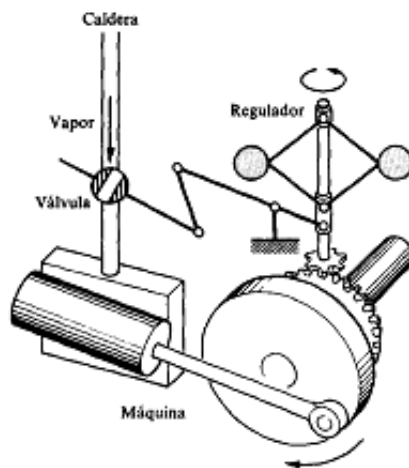


Figura 1.16: Regulador de velocidad de Watt

- b) Diagrama esquemático de un sistema de seguimiento del Sol, sin considerar el tacómetro, (figura 1.17).

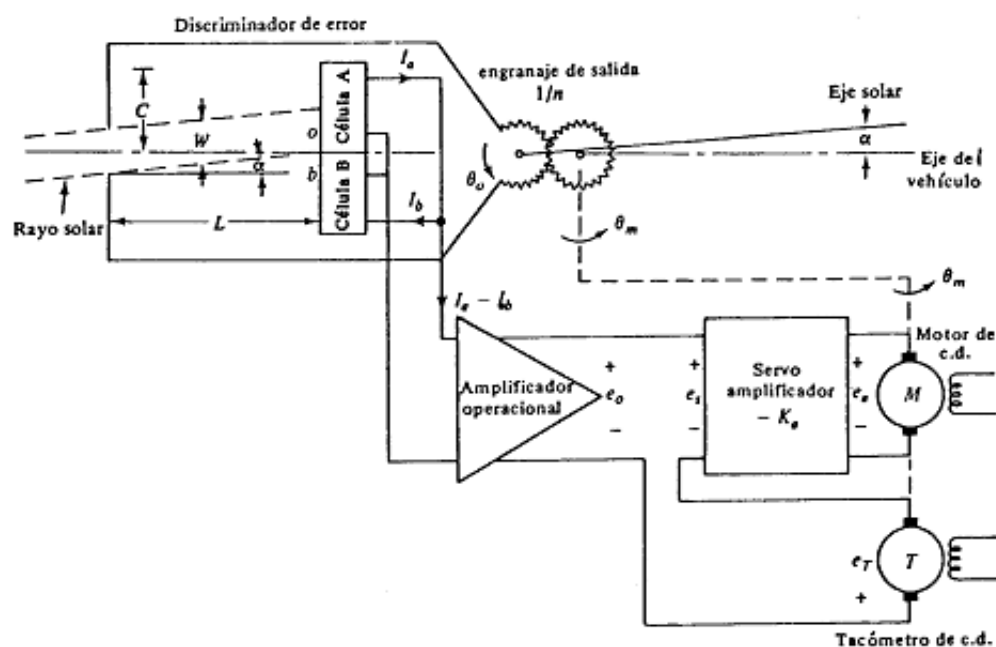


Figura 1.17: Sistema de seguimiento del sol. Fuente: [Kuo, 1996]

6. Una Universidad desea establecer un modelo del sistema de control que represente la población estudiantil como salida, con la población estudiantil deseada como entrada. La administración determina el porcentaje de admisiones al comparar la población estudiantil actual y la deseada. La oficina de admisiones utiliza entonces ese porcentaje para admitir estudiantes. Trace un diagrama de bloques funcional que muestre la administración y la oficina de admisiones como bloques del sistema. También muestre las siguientes señales: la población estudiantil deseada, la población estudiantil real, el porcentaje deseado de estudiantes determinando por la administración, el porcentaje real de estudiantes generado por la oficina de admisiones, el porcentaje de deserciones y el porcentaje neto de influjo. [Nise, 2004]
7. Durante una operación médica, un anestesista controla la profundidad

de inconciencia al controlar la concentración de isoflurano en una mezcla vaporizada con oxígeno y óxido nitroso, la profundidad de anestesia es medida por la presión sanguínea del paciente. El anestesista también regula la ventilación, el equilibrio de fluido y la administración de otros medicamentos. Para liberar al anestesista de dedicar más tiempo a estas últimas tareas, y en el interés de la seguridad del paciente, deseamos automatizar la profundidad de la anestesia al automatizar el control de concentración de isoflurano. Dibuje un diagrama de bloques funcional del sistema, mostrando las señales y subsistemas pertinentes (Meier,1992). [Nise, 2004]

8. Un sargento se detenía en una joyería cada mañana a las 9 en punto y ajustaba su reloj comparándolo con el cronómetro del escaparate. Un día el sargento entró en el comercio y felicitó al dueño por la exactitud del cronómetro. Está ajustado con la hora de Arlington? -preguntó el sargento-. No -contestó el dueño- lo ajusto según el cañonazo del fuerte a las 5 p.m. Dígame, sargento por qué se detiene todos los días y comprueba la hora de su reloj?. El sargento le contestó, yo soy el artillero del fuerte. Es la retroalimentación positiva o negativa?. El cronómetro del joyero se atrasa un minuto cada 24 horas y el reloj del sargento se atrasa un minuto cada 8 horas. Cuál es el error total en la hora del cañón del fuerte después de 15 días?. [Dorf, 1989]
9. Adam Smith(1723-1790) analizó el tema de la libre competencia entre los participantes de una economía en su libro "La riqueza de las Naciones". Puede decirse que Smith sugirió que:
 - 1) los trabajadores, como un todo, comparan los diferentes empleos posibles y toman aquellos que ofrecen mayor remuneración, y
 - 2) en cualquier empleo el pago disminuye según aumenta el número de trabajadores solicitantes. Supongamos que r =total promedio de pagos en todas las actividades, c =total de pagos en una actividad particular; q =afluencia de trabajadores dentro de una actividad específica. Dibuje un ciclo de retroalimentación que represente este sistema. [Dorf, 1989]

Lecturas complementarias

- **A brief history of feedback control**, Capítulo 1: Introduction to Modern Control Theory, en: F.L. Lewis, Applied Optimal Control and Estimation, Prentice-Hall, 1992.
- **Computer Technology**, capítulo 1, sección 1.2: Computer Controlled Systems, Theory and Design, Karl Astrom and Bjornn Wittenmark, Prentice Hall, 1997.

Referencias

- KUO BENJAMIN, Sistemas de Control Automático, Prentice Hall 1997.
- DORF RICHARD, Sistemas Modernos de Control, Addison-Wesley Iberoamericana, 2da edición en español; 1989.
- NISE, NORMAN, Sistemas de Control para Ingeniería, Editorial CEC-SA, 3ra Edición.

Bibliografía

- R. Dorf. *Sistemas Modernos de Control*. Addison Wesley Iberoamericana, 2da. Edición, 1989.
- Benjamin. Kuo. *Sistemas de Control Automático*. Prentice Hall-Hispanoamericana, 1996.
- N.Ñise. *Sistemas de Control para Ingeniería*. CECSA, 3ra. Edición, 2004.
- K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall, 1993.
- K. Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall Hispanoamericana, 3a. Edición, 1998.
- Kiyong Kim R. C. Schaefer. Excitation control of the synchronous generator. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(2), 2001.
- R. Bishop R. Dorf. *Modern control systems*. Prentice Hall, 10 Edición, 2005.
- J.M. Ramírez. *Diseño del regulador de Tensión para un generador autoexcitado*. PhD thesis, Universidad del Valle, Julio 1989.
- Westinghouse. *electrical Trasmision and distribution*. Reference Book, 1950.