- **CÁTEDRA: "SISTEMAS DE CONTROL"**

  Asignatura: "Sistemas de Control"

  p/Ingeniería Mecánica (Plan 2004).

  Asignatura: "Automatización y aparatos de control"

  p/Ingeniería Azucarera (Plan 1967)
- Prof. Esp. Ing. Marcos A. Golato
- Email: mgolato@herrera.unt.edu.ar
- Cel. 381-5032288

Cátedra: “Sistemas de Control”

Responsable: Prof. Asoc. Ing. Mec. Marcos A. Golato

JTP: Ing. Electrón. David Aguirre Grazio

Auxiliar 2da: ----------

Código de la materia (Plan 2004): M20

Área: Energética II

Clases: Jueves de 8:00 a 11:00 hs. – Aula G.

Lunes de 16:00 a 18:00 hs. – Aula H.

Consultas: Martes y Jueves de 16:00 a 18:00 hs. (Cátedra).

Oficina: Box 3-2-16

E-mail: mgolato@herrera.unt.edu.ar

Información práctica sobre la asignatura

- La asignatura es una introducción al conocimiento del control automático. Se presentan principios, conceptos, técnicas fundamentales para el análisis y diseño de sistemas de control.
- Los sistemas que estudiaremos son lineales e invariantes en el tiempo. Nos restringiremos a sistemas de Entrada Simple/Salida Simple (SISO).
- Objetivos de la asignatura:

  1- Aprender los conceptos básicos de los "sistemas de control".

  2- Conocer las "acciones de control" clásicas.

  3- Analizar y diseñar sistemas de control para plantas SISO.

  4- Aprender técnicas de control avanzado.

  5- Estudiar técnicas usuales de control de procesos.

Condiciones para la aprobación de la asignatura

Conocimientos necesarios:

- Matemática Aplicada
- Termodinámica
- Electrotecnia General y Laboratorio
- Mecánica de los Fluidos
- Mediciones térmicas

Aprobación de la asignatura:

- Haber resuelto el 100% de los cuestionarios.
- Haber participado del 100% de las prácticas de laboratorio.
- Haber ejecutado el proyecto integrador grupal y realizado su defensa.
- Tener el 80% de la asistencia en clases teóricas y prácticas.

Inicio clases:

- Jueves 14 de Marzo de 2019.

Última clase:

- Jueves 27 de Junio de 2019.

Evaluación:

- Evaluativos teóricos de seguimiento (cuestionarios).
- Ejecuciones prácticas en laboratorio.
- Resolución de casos de estudios y exposición grupal de los mismos.
- Ejecución de un proyecto integrador grupal.

Bibliografía y material en internet

Bibliografía:

- Apuntes de Cátedra.
- Ingeniería de Control Moderna. Katsuhiko Ogata. 3ra Ed. 1998.
- Ingeniería del Control Automático. Francis H. Raven. 1ra Ed. 1972.
- Sistemas Automáticos de Control. Benjamín C. Kuo. 2da Ed. 1979.
- Control Automático de Procesos. Smith y Corripio. 1ra Ed. 1991.
- Instrumentación Industrial. Antonio Creus Solé. 6ta Ed. 1997.
- Controles Automáticos. Howard Harrison, John Bollinger. 1974.
- Sistemas de Control de Procesos. F. G. SHINSKEY. 3ra Ed. 1997.
- Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras. Egídio A. Bega. 3ra Ed. 2003.
- III Seminario de tecnología industrial. Centro de tecnología Copersucar. 1ra Ed. 1987.

Material en Internet:

- http://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/
- http://dea.unsj.edu.ar/control1/
- www.automatas.org
- www.aadeca.org
- http://csd.newcastle.edu.au/control

PROGRAMA ANALÍTICO DE LA ASIGNATURA

TEMA 1	INTRODUCCIÓN. Generalidades. Descripción general de sistemas de control. Realimentación. Sistemas de control de lazo cerrado y de lazo abierto. Conceptos. Ejemplos.
TEMA 2	MODELOS MATEMÁTICOS. Representación en ecuaciones diferenciales lineales. Función transferencia: definición. Ejemplos mecánicos y eléctricos. Función transferencias de elementos en cascada. Diagramas de bloques. Representación de un lazo cerrado en diagramas de bloques. Sistemas de lazo cerrado sometidos a una perturbación. Álgebra de bloques. Procedimientos. Operación.
TEMA 3	ACCIONES DE CONTROL. Algoritmos. Conceptos. Acciones de control: a) De dos posiciones o si-no; b) Proporcional (P); c) Integral (I); d) Derivativa (D); e) Combinaciones: (P+I), (P+D), (P+I+D). Control proporcional de un sistema de primer orden. Efectos de la acción derivativa e integral en los comportamientos de los sistemas. Efectos de la realimentación.
TEMA 4	ANÁLISIS DE RESPUESTA TRANSITORIA. Señales de prueba típicas. Respuesta transitoria y estacionaria. Estabilidad absoluta. Estabilidad relativa y error estacionario. Sistemas de primer y segundo orden: respuestas a diversas entradas. Especificaciones de respuesta transitorias. Análisis de estabilidad en el plano complejo. Criterio de estabilidad de Routh.
TEMA 5	RESPUESTA DE FRECUENCIA. Respuesta a una entrada sinusoidal. Diagramas de Bode, polar y del módulo en función de la fase. Análisis de estabilidad. Criterio de estabilidad de Nyquist. Otros criterios.
TEMA 6	ELEMENTOS DE CONTROLES AUTOMÁTICOS INDUSTRIALES. Clasificación. Controles auto actuantes. Elementos componentes de controladores automáticos. Elementos neumáticos: mecanismo tobera – aleta, relés neumáticos. Elementos hidráulicos: servomotor hidráulico, amortiguadores. Elementos mecánicos: regulador centrífugo o de Watt. Combinaciones. El regulador centrífugo como controlador automático de velocidad. Elementos componentes de sistemas de control. Válvula de control neumática. Posicionadotes. Elementos auxiliares en sistemas de control. Relés. Introducción a los Controladores lógicos programables (PLC). Protocolos de comunicación industriales.
TEMA 7	SISTEMAS DE CONTROL. Simbología. Norma IRAM. Sistemas de control en cascada: concepto; ventajas; condiciones de aplicación; diagrama de bloques; ejemplos. Control feedforward (avanacción): conceptos; condiciones; diagramas de bloques; ejemplos. Control de relación: conceptos; condiciones; diagramas de bloques; ejemplos. Otros tipos de control.
TEMA 8	ESQUEMAS USUALES DE SISTEMAS DE CONTROL. Controles automáticos en calderas. Regulación automática de nivel de domo: sistemas de control de uno, dos y tres elementos. Control de combustión. Relación aire – combustible. Control de tiro inducido. Control de presión de vapor. Otros controles.

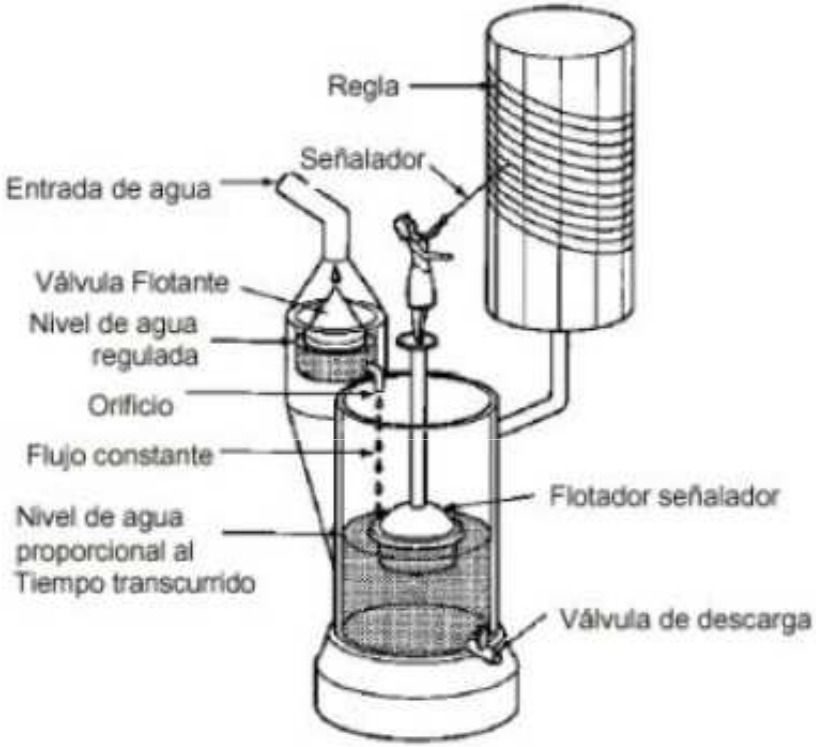
CRONOGRAMA DE DICTADO

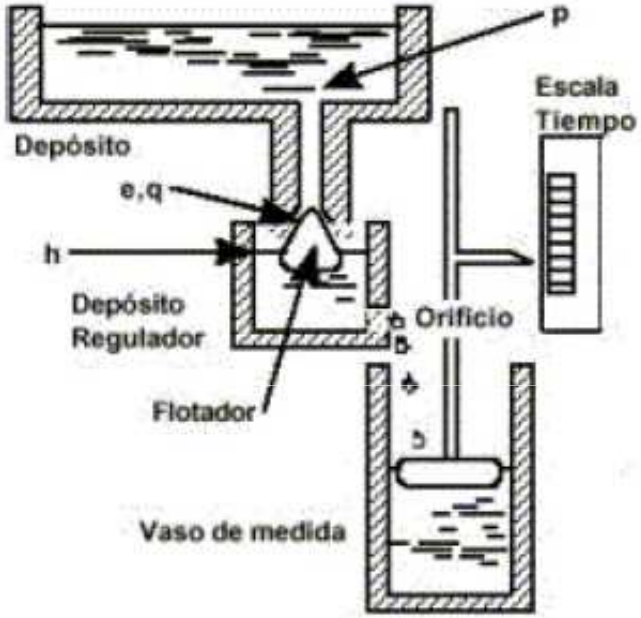
Fecha	Contenidos mínimos	Actividades de aprendizaje	Resultados del aprendizaje	Sistema de evaluación
J 14/03 L 18/03 J 21/03	Modelos, función transferencia, diagramas de bloques. Respuestas de sistemas de primer y segundo orden.	Exposición conceptual. Resolución de problemas.	Comprender los concentos básicos de la teoría del control.	Resolución de cuestionarios.
J 28/03 L 01/04 J 04/04 L 08/04	Acciones de control. Elementos básicos de un sistema de control. Sintonización de controladores. Controladores Lógicos Programables (PLC). Protocolos de comunicación.	Exposición conceptual. Práctica de laboratorio. Resolución de problemas en grupos de trabajo.	Distinguir las diferentes acciones de control y sus particularidades y aplicaciones.	Evaluaciones prácticas de los temas abordados en laboratorio. Presentación de informes de ensayos.
J 11/04 L 15/04 L 22/04 L 29/04	Válvulas de control	Exposición conceptual. Práctica de laboratorio. Resolución de problemas en grupos de trabajo	Conocer las características de diseño, aplicación y selección de válvulas de control de procesos.	Resolución grupal de problemas prácticos. Exposición grupal de los resultados.
J 02/05 L 06/05 J 09/05	Sistemas de control avanzados. Control en cascada, Avanacción, Relación y Restricción. Algoritmos de control.	Exposición conceptual. Resolución de casos de estudios en grupos de trabajo.	Conocer las diferentes estrategias básicas de control aplicadas a diferentes casos de estudios.	Exposición grupal de los resultados.
L 13/05 J 16/05 L 20/05	Control en hornos de procesos. Control de la calidad de la combustión. Algoritmos.	Exposición conceptual. Resolución de un proyecto integrador en grupos.	Conocer, diseñar y aplicar estrategias de control en hornos de procesos.	Exposición grupal de los resultados.
J 23/05 L 27/05 J 30/05	Controles aplicados a calderas de vapor. Control de balance de energía. Algoritmos.	Exposición conceptual. Resolución de un proyecto integrador en grupos.	Conocer, diseñar y aplicar estrategias de control en calderas de vapor.	Exposición grupal del trabajo integrador.
L 03/06	Control de combustión y presión del horno.	Exposición conceptual. Resolución de un proyecto integrador en grupos.	Conocer, diseñar y aplicar estrategias de control en calderas de vapor.	Exposición grupal del trabajo integrador.
J 06/06 L 10/06	Control de nivel de domo de calderas de vapor. Algoritmos.	Exposición conceptual. Resolución de un proyecto integrador en grupos.	Conocer, diseñar y aplicar estrategias de control en calderas de vapor.	Exposición grupal del trabajo integrador.
J 13/06 L 24/06 J 27/06	Controles de temperaturas del aire precalentado y del vapor.	Exposición conceptual. Resolución de un proyecto integrador en grupos.	Conocer, diseñar y aplicar estrategias de control en calderas de vapor.	Exposición grupal del trabajo integrador.

Historia del Control Automático

Relojes de agua de los Griegos y los Árabes (300 AC a 1200 DC).

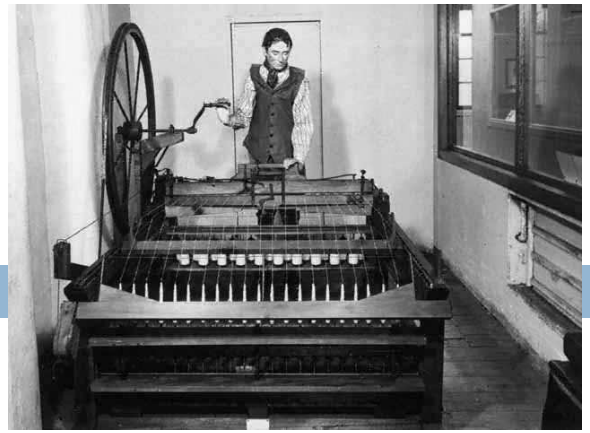
La primera motivación para el control en tiempos antiguos fue la necesidad de determinaciones precisas del devenir del tiempo.





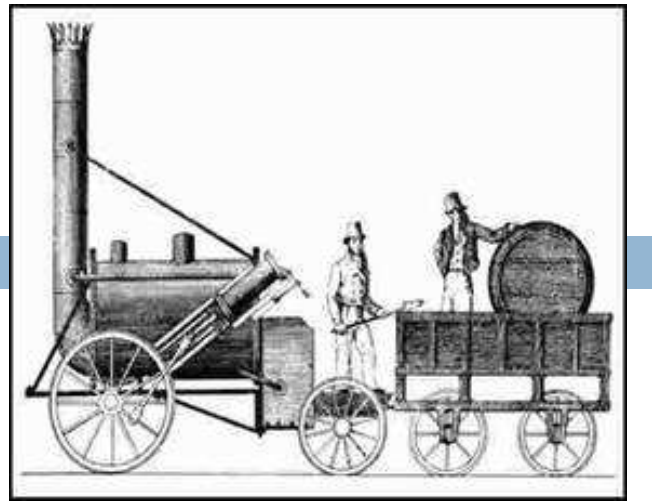
Alrededor de -270, el mecánico griego Ktesibios de Alejandría inventó un regulador de corcho (válvula de flotador) para un reloj de agua

La Revolución Industrial



- **Comprendida entre la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX, donde inicialmente Inglaterra, y luego todo Europa continental, sufre el mayor conjunto de transformaciones socioeconómicas, tecnológicas y culturales de la historia de la humanidad.**
- **La economía basada en el trabajo manual fue reemplazada por la industrialización y la manufactura. La Revolución comenzó con la mecanización de las industrias textiles y el desarrollo de los procesos del hierro.**
- **La expansión del comercio fue favorecida por la mejora de las rutas de transportes y posteriormente por el nacimiento del ferrocarril.**
- **Las innovaciones tecnológicas más importantes fueron la máquina de vapor y la denominada "Spinning Jenny", una potente máquina relacionada con la industria textil que favoreció el incremento de la capacidad de producción.**
- **La producción y desarrollo de nuevos modelos de maquinaria en las dos primeras décadas del siglo XIX facilitó la manufactura en otras industrias e incrementó también su producción. Así es que en la revolución industrial, se aumenta la cantidad de productos y se disminuye el tiempo de fabricación de los mismos, dando paso a la producción en serie, ya que se simplifican tareas complejas en varias operaciones simples que pueda realizar cualquier obrero sin necesidad de que sea mano de obra calificada, y de este modo bajar costos en producción y elevar la cantidad de unidades producidas bajo el mismo costo fijo.**

Inicio del control automático



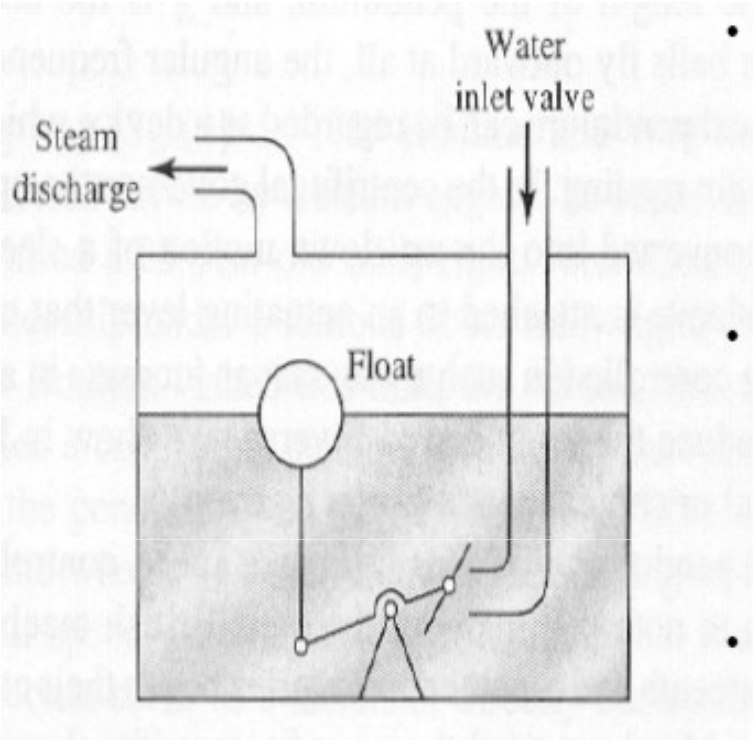
- La Revolución Industrial en Europa fue consecuencia, entre otros factores, de la introducción de las primeras máquinas motrices, especialmente las máquinas de vapor.
- La historia comienza con la invención de los molinos para moler grano, y continúa con el diseño y construcción de hornos, calderas, y por fin, la máquina de vapor.
- Estos dispositivos no podían ser regulados de forma adecuada a mano, y de esa forma surgió la necesidad de desarrollar sistemas de control automático adecuados.
- Se inventaron en esta época una gran variedad de dispositivos de control, tales como reguladores flotantes, reguladores de temperatura, reguladores de presión, y dispositivos de control de velocidad.

Los molinos de viento.

Sistemas de control:

- El *"fantail"* o "ventilador de cola", inventado en 1745 por el herrero británico Edmund Lee
- La tolva es un dispositivo que regula el flujo de grano en un molino, dependiendo de la velocidad de rotación de la muela
- dispositivos para medir y regular la velocidad de rotación de los molinos

Reguladores flotantes.

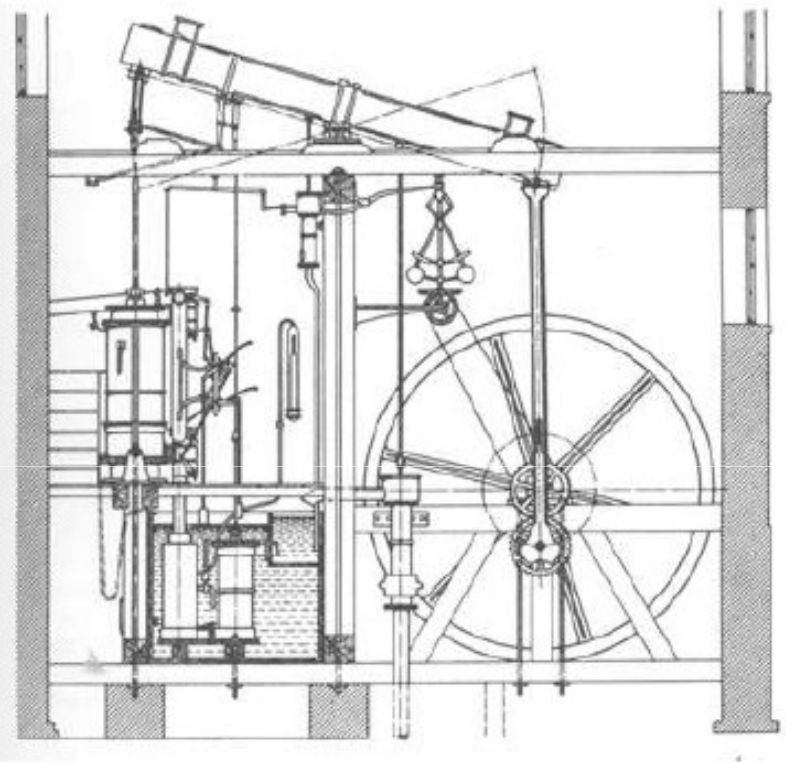


- La regulación del nivel de un líquido era condición indispensable en dos áreas importantes en los últimos años del siglo XVIII: en la caldera de una máquina de vapor y en los sistemas de distribución de agua doméstica.
- En su libro de 1746, W. Salmon citaba precios para reguladores flotantes usados para mantener el nivel de depósitos de agua para viviendas. Este regulador fue usado en las primeras patentes de las cisternas de WC alrededor de 1775.
- La cisterna fue refinada posteriormente por Thomas Crapper, un fontanero londinense, que gracias a sus inventos, fue armado caballero por la Reina Victoria, y pasó por tanto a ser sir Thomas Crapper.

Reguladores de presión.

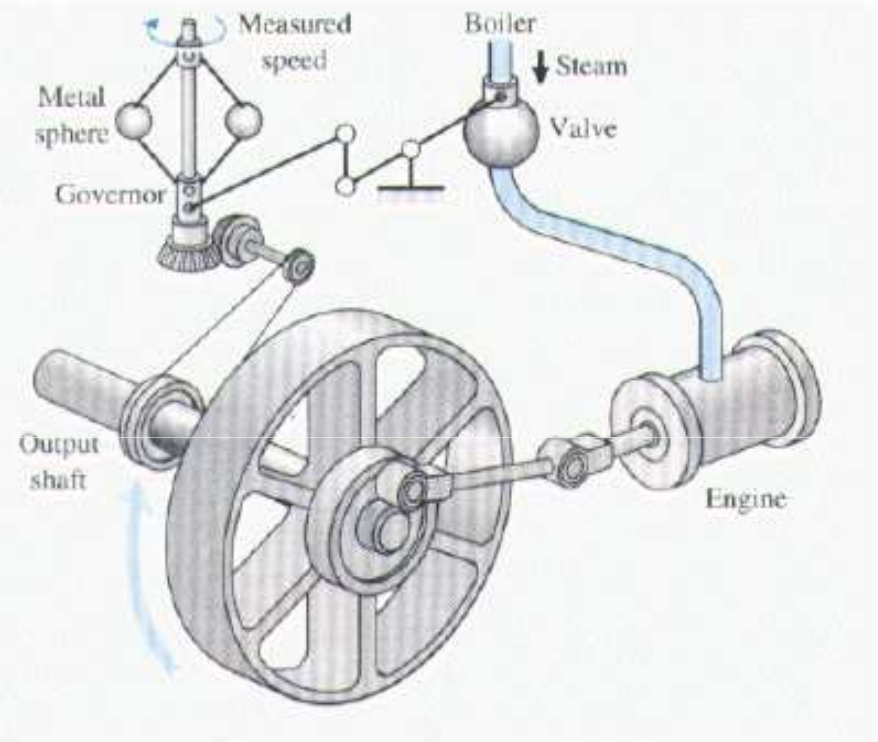
- Otro problema asociado a la máquina de vapor era el de la regulación de la presión de vapor en la caldera, persiguiendo que el vapor que movía la máquina estuviera a una presión constante.
- En 1674, el físico francés Denis Papin se percata de que la temperatura de ebullición del agua y otros líquidos depende de la presión a que están sometidos. Cuando las presiones son superiores a la atmosférica, las temperaturas correspondientes a los puntos de ebullición aumentan. Papin aprovecha su descubrimiento y comercializa en 1681 la primera olla a presión. En esta olla metálica herméticamente cerrada, equipada con una válvula de sobrepresión segura inventada por él mismo, la presión del vapor aumenta durante la cocción. Estos valores superiores permiten una cocción más rápida.
- En el año 1707, Papin usó esta válvula de sobrepresión como dispositivo de regulación de su máquina de vapor de alta presión destinada al bombeo de agua para las fuentes de Kassel. A partir de entonces, este dispositivo de regulación de la presión de vapor fue un dispositivo estándar en las máquinas de vapor.

Reguladores centrífugos.



- La máquina de vapor alcanzó su madurez en 1783 con la venta del primer prototipo de máquina de vapor del escocés James Watt. Dicha máquina, ya adecuada para su uso industrial, fue diseñada mucho antes del primer enunciado de la Primera Ley de la Termodinámica, que data de 1842.
- Tres novedades esenciales en el diseño de la máquina de vapor de Watt fueron las que definitivamente introdujeron la máquina de vapor en la industria de la época. Dichas mejoras fueron el diseño de "doble acción" que permitió mejorar la eficiencia energética de la máquina de vapor, el "engranaje planetario" (y posteriormente la biela) para transformar el movimiento oscilante en movimiento rotatorio, y el "péndulo cónico" o centrífugo como regulador de la velocidad de salida.

Reguladores centrífugos.

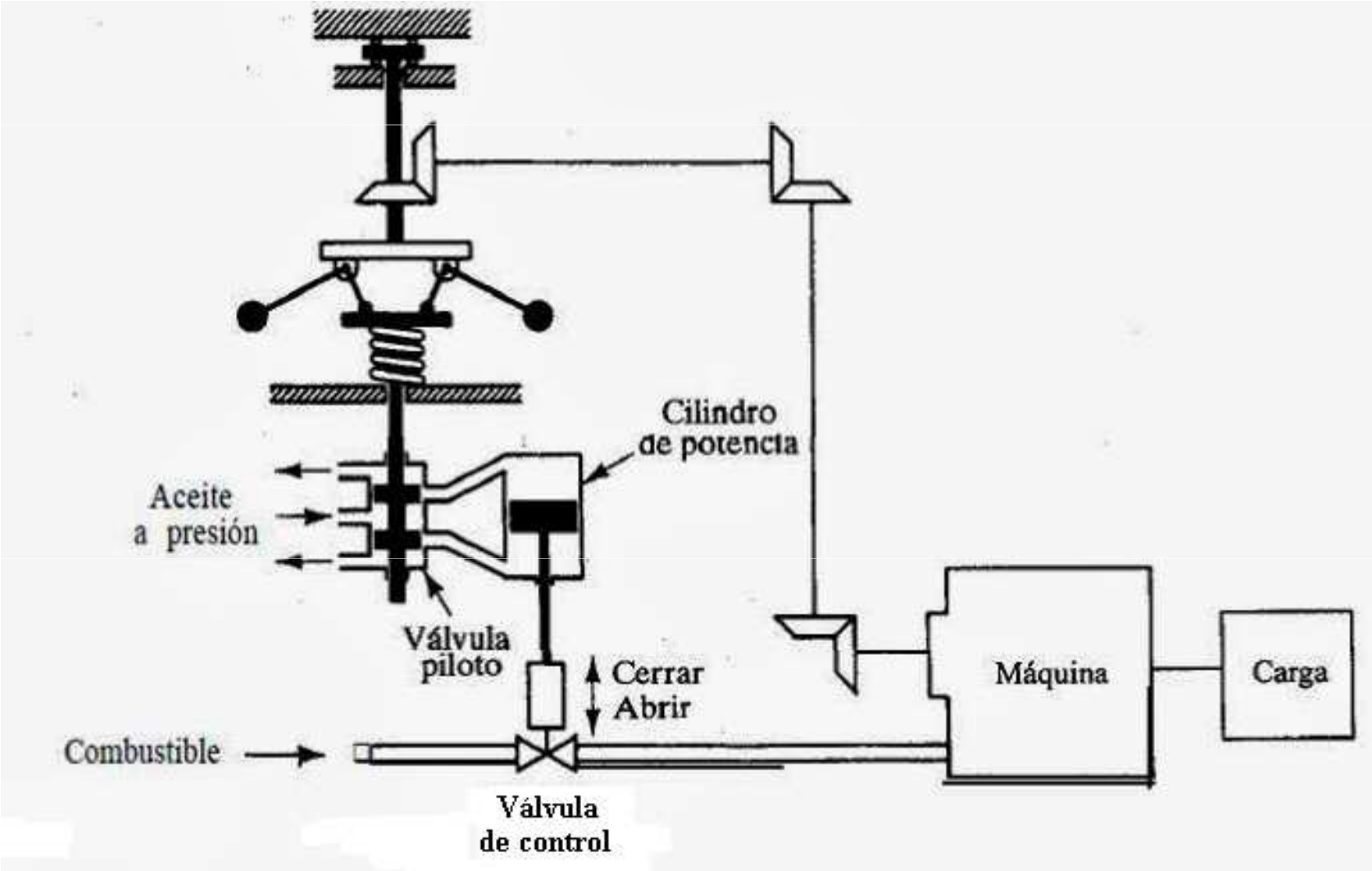


Un problema asociado a la máquina de vapor rotatoria era la regulación de la velocidad de revolución.

En 1788, Watt completó el diseño del "regulador de bolas voladoras" (péndulo centrífugo o péndulo cónico) para la regulación de la velocidad de la máquina de vapor rotatoria.

El dispositivo empleaba dos esferas metálicas pivotadas que eran desplazadas hacia fuera debido a la fuerza centrífuga. Cuando la velocidad de rotación se incrementaba, los pesos se separaban del eje de giro, accionando un mecanismo ("sistema de varillas en paralelogramo") que estrangulaba la válvula de flujo de vapor, lo que ralentizaba el funcionamiento de la máquina. De esta forma, se garantizaba de forma automática una velocidad constante de giro

Aplicación del regulador de Watt



- **Sistema:** conjunto ordenado de componentes físicos, unidos o relacionados de tal manera que forman una entidad o un todo y/o actúan como una unidad completa.
- **Control:** la palabra control usualmente se la toma en el sentido de "Regular", "Dirigir" o "Mandar".
- **Sistema de Control:** ordenamiento de componentes físicos unidos o relacionados de tal manera que regulan, dirigen o mandan al mismo sistema o a otros.
- **Entrada de un Sistema de Control:** es el estímulo, la excitación o el mando aplicado a un sistema de control. Generalmente desde una fuente externa de energía.
- **Salida de un Sistema de Control:** es la respuesta real que se obtiene de un sistema de control.

- **Variable controlada**

  Cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente es la salida del sistema de control, puede ser un flujo, una temperatura, una presión, una velocidad, una viscosidad, una tensión o corriente, un desplazamiento, etc.

- **Variable manipulada**

  Cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Puede ser de igual naturaleza que la variable controlada (flujo, temperatura, etc.).

- **Planta**

  Es una parte de un equipo o conjunto de partes de una máquina. Una Planta es cualquier objeto físico a controlar (dispositivo mecánico, horno de calefacción, reactor químico, motor eléctrico, etc.).

- **Proceso**

  Es una operación o desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinado; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o producto determinado.

- **Perturbación**

  Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la Perturbación se genera dentro del sistema se denomina "interna". En tanto que una perturbación "externa", se produce fuera del sistema y contribuye una entrada.

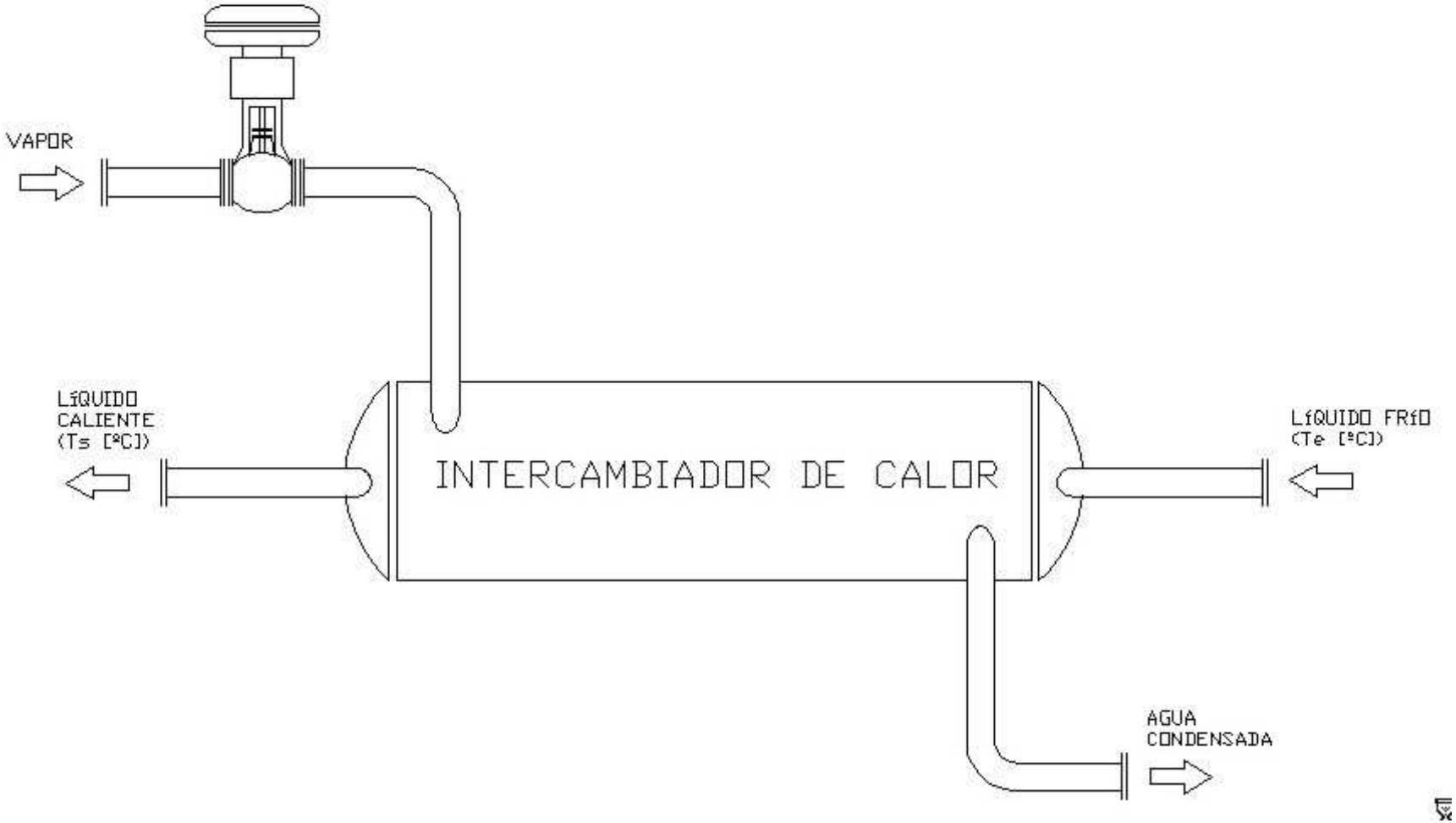
- **Control realimentado**

  Es una operación que en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y su entrada de referencia y lo continua haciendo en base a esa diferencia.

- **Respuesta transitoria**

  Es el comportamiento de un sistema inmediatamente después de una cambio repentino de su señal de entrada.

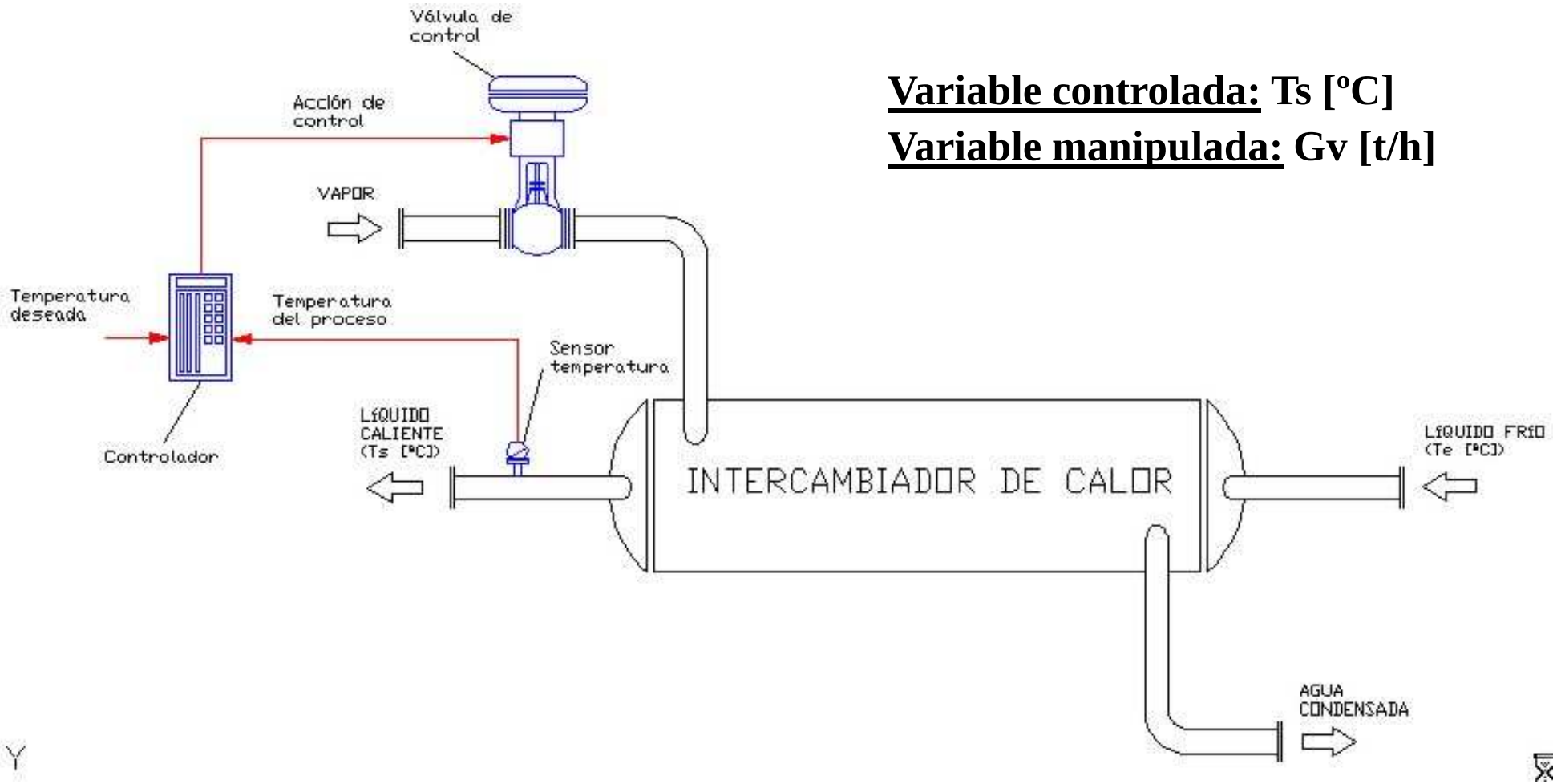
Ejemplo: Intercambiador de calor (ICQ)



Ejemplo: Intercambiador de calor – control propuesto

Variable controlada: Ts [ºC]

Variable manipulada: Gv [t/h]



Algunos conceptos

- **<u>Controlar un proceso:</u>** significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado.
- **<u>Formas de la Entrada/Salida:</u>** Las entradas pueden ser variables físicas o cantidades abstractas como valores de referencias, ajustes o valores deseados para la salida del sistema de control.

Componentes básicos de un sistema de control

Elemento primario de medición

Conocido como “sensor”, es el elemento que se encarga de medir o sensar la variable a controlar.

Elemento secundario

Conocido como “transmisor”, es el encargado de unificar, convertir y amplificar señales de medición para que puedan ser interpretadas por el controlador.

Controlador

Es el cerebro del sistema de control, es el elemento que toma decisiones en el sistema en base a la medición de la variable controlada.

Elemento final de control

Es el elemento que actúa directamente sobre la variable que se manipula. Puede ser un motor eléctrico, una bomba, transportadores mecánicos, servo actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos. Por lo general se trata de una válvula de control.

Operaciones básicas de un sistema de control

Medición	Medición de la variable controlada, generalmente se realiza por medio de la combinación del Sensor/Transmisor.
Decisión	En base a la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable controlada en el valor deseado.
Acción	Como resultado de la decisión del controlador, se efectúa una acción correctiva en el sistema a través del elemento final de control.

Terminologías

Entrada	• Señal de entrada. • Referencia. • Orden. • Valor deseado (VD). • Set Point (SP). • Consigna.
Salida	• Señal de salida. • Respuesta. • Variable controlada.

Lazo cerrado	• Realimentado. • Retroalimentado. • Servosistema. • Bucle cerrado. • Rizo cerrado. • Malla cerrada.

Sistemas de Control en Lazo Cerrado

También denominados **“Sistemas de Control Realimentados”**. Son los sistemas más elementales de control por comparación, donde se alimenta al controlador con la señal de error actuante (diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado.

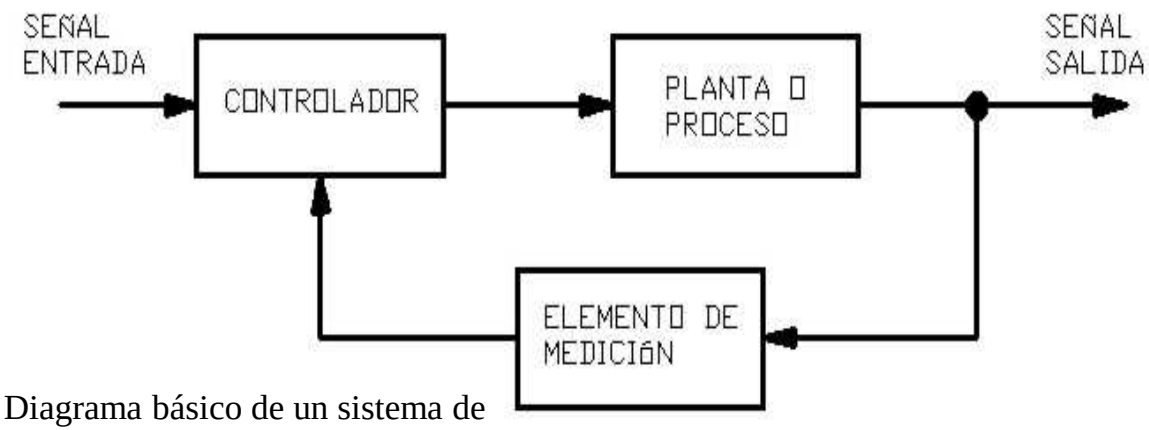


Diagrama básico de un sistema de control en lazo cerrado

En estos sistemas se compara lo que estamos obteniendo (salida), con lo que necesitamos (entrada) y usa cualquier diferencia a fin de poner en correspondencia la entrada con la salida.

Sistemas de Control en Lazo Abierto

Son sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En este caso no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada.

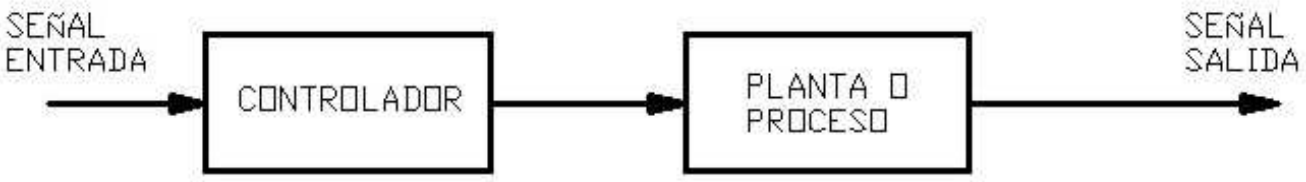


Diagrama básico de un sistema de control en lazo abierto

En estos sistemas no existe la acción de comparación con la señal de entrada.

Lazo Cerrado vs. Lazo Abierto

LAZO CERRADO

- La respuesta es relativamente insensible a perturbaciones externas e internas.
- Es posible utilizar componentes relativamente inexactos y lograr exactitud en una determinada planta.
- En un sistema en lazo cerrado, la estabilidad constituye siempre un problema de importancia, debido a la tendencia de sobre corregir errores.
- Los sistemas en lazo cerrado tienen ventajas si se presentan perturbaciones previsibles y/o variaciones imprevisibles de los componentes del sistema.

LAZO ABIERTO

- La exactitud depende del grado de calibración.
- En presencia de perturbaciones, el sistema no cumple su función asignada.
- Se utiliza si la relación entre la entrada y la salida es conocida y si no se presentan perturbaciones externas ni internas.
- Cualquier sistema que funcione sobre una base de tiempos, es de lazo abierto (centrífuga, calentadores s/termostatos, semáforos, lavarropas, etc.).
- La estabilidad es más fácil lograr en un sistema de lazo abierto, ya que no constituye un problema importante.

Clasificación de los Sistemas de Control Realimentados

Sistemas reguladores

Estos sistemas mantienen constante la variable controlada a pesar de las perturbaciones que puedan tener. En estos sistemas, la entrada cambia con muy poca frecuencia (ejemplo: control de procesos).

Sistemas seguidores

Estos sistemas mantienen constante la variable controlada en correspondencia muy próxima con la variable de referencia, la cual es cambiada frecuentemente (ejemplo: sistemas de navegación).

Lazos de control típicos encontrados en el control de procesos

Caudal	Contribuye al conocimiento de los balances de masa y energía. Generalmente es de magnitud variable y ruidosa.
Presión	Por lo general representa la variable de referencia de la mayoría de los procesos.
Nivel	Es una variable indicativa de la acumulación de materia en un sistema.
Temperatura	Contribuye al conocimiento de balances de energía. Representa la variable de control en procesos de calentamientos y enfriamientos.
Composición	Contribuye al conocimiento de balances de materia. Representa una variable indicativa de la proporción de componentes en sistemas de mezclas.

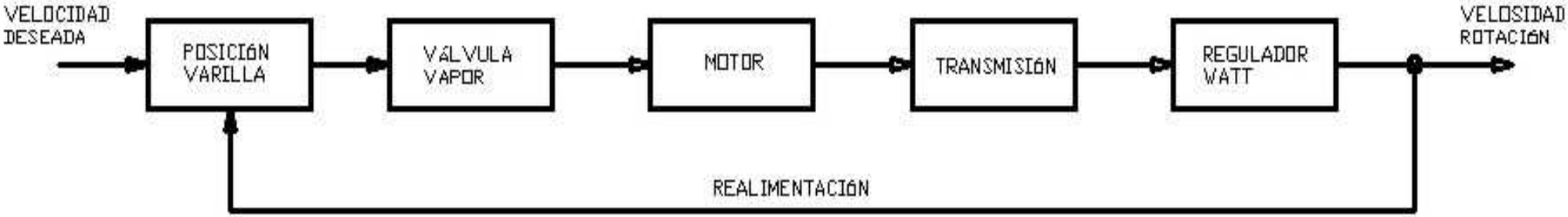
Característica de un sistema de control

Estabilidad	Un sistema de control es estable cuando la respuesta a un cambio en la entrada o ante la presencia de una perturbación, el sistema alcanza y mantiene un valor útil durante un periodo razonable.
Exactitud	Un sistema de control es exacto cuando es capaz de reducir cualquier error a un valor aceptable.
Rapidez	Un sistema de control es rápido en la respuesta cuando completa su respuesta a cierta señal de entrada en un tiempo aceptable.

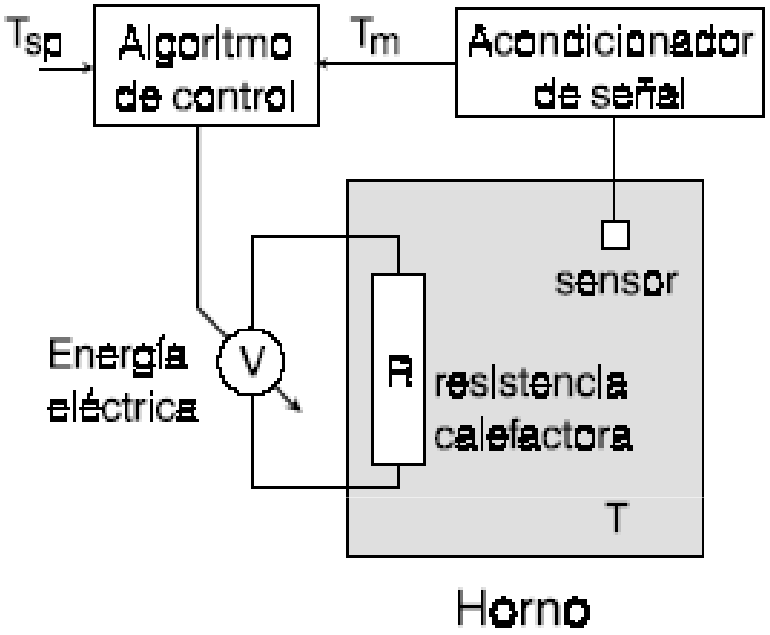
Ejemplos de sistemas de control

Diagrama de bloques de un sistema de control de temperatura en una casa.

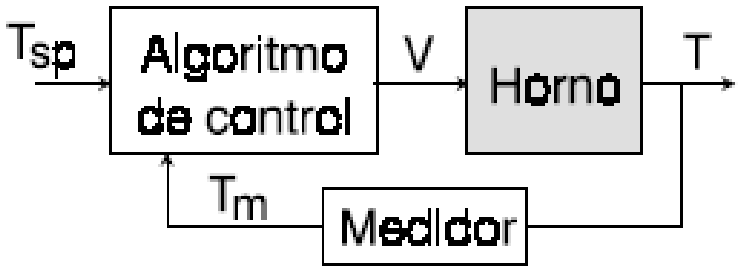
Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad de Watt.



Sistema de control de lazo cerrado de un horno

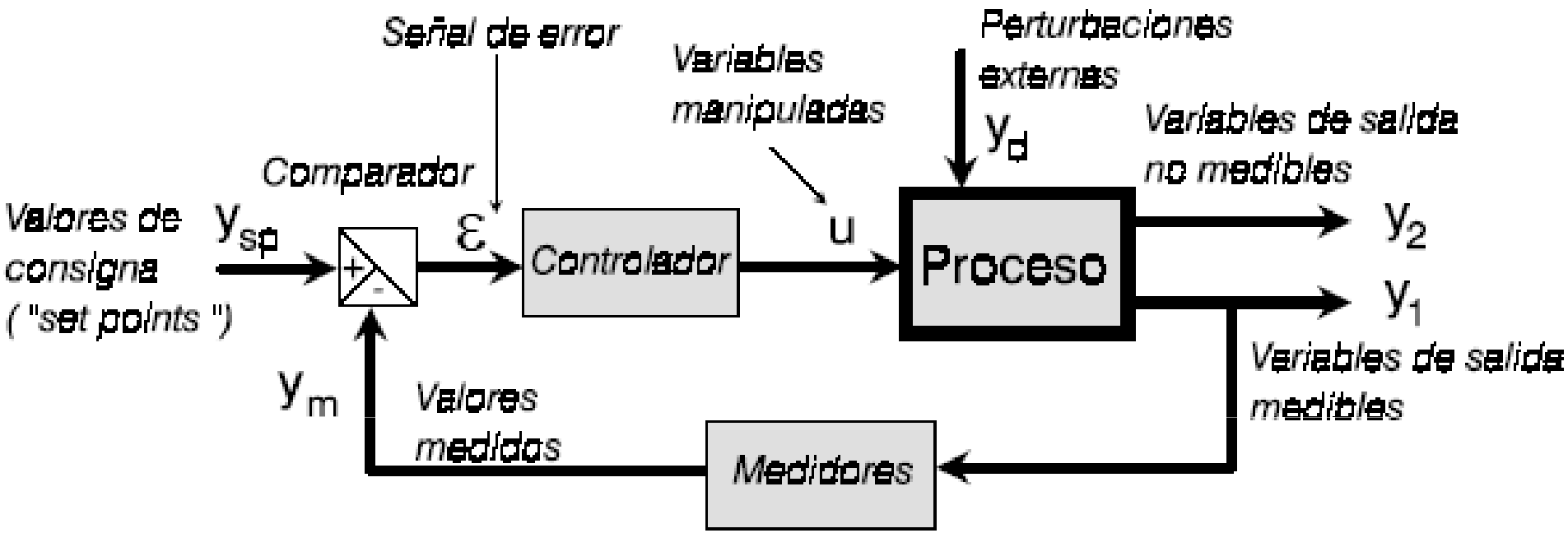


Esquema físico



Esquema de bloques

Sistema de control característico en lazo cerrado por realimentación de su salida



Gracias por su atención!!