



# ***Evolución Histórica de la Ingeniería de Control***

***Ramón Piedrafita Moreno***

***Diciembre de 1999***



*“El propósito de este artículo es analizar los tres principales tipos de acción que se encuentran en los instrumentos actuales...”*

*J. G. Zieger y N.B. Nichols en su trabajo: Optimum Settings for Automatic Controls. Noviembre de 1942.*

# **Evolución histórica de la Ingeniería de Control.**

En este apartado se va a realizar una descripción de la evolución histórica y situación actual de la Ingeniería del Control tanto en sus ramas de la Regulación Automática como en la Informática Industrial, lo cual va a influir en los programas de las asignaturas que se desarrollarán en apartados posteriores. En esta presentación histórica se mostrarán algunos de los momentos que han tenido una significativa influencia en la evolución de las materias que son objeto del presente Proyecto Docente.

En este pequeño repaso de la evolución histórica de la Ingeniería de Control y regulación se ha dividido en una serie de apartados:

- Primeros ejemplos históricos de sistemas de control.
- La Revolución Industrial.
- El problema de la estabilidad.
- Control Clásico.
- Teoría Moderna de Control
- El computador en el control de procesos industriales.
- Autómatas en la historia.
- Automatismos industriales.
- Referencias históricas.

En el último apartado se expone los trabajos en forma de patentes, artículos y publicaciones más relevantes en la historia de la Ingeniería de Control.

## **1 Primeros ejemplos históricos de sistemas de control.**

En la Antigua Grecia hay que destacar la presencia de tres mecánicos: Ktesibios, Philon y Heron.

Ktesibios, en el siglo III antes de Cristo diseña un reloj de agua, conocido también como Clepsydra y también diseña un organo que funcionaba con agua. Las Clepsydras consistían en un mecanismo cuyo objetivo era que el nivel de un depósito de agua subiera con una velocidad constante. Para lo cual se utiliza un flotador que regulaba la entrada de agua a un depósito auxiliar de manera que el nivel de este se mantenía constante y por lo

tanto su caudal de salida al depósito principal. El documento más antiguo encontrado donde se menciona una Clepsydra es el registro de un procedimiento judicial donde se le nombra como una ayuda para asegurar que ambas partes dispongan del mismo tiempo para las alegaciones finales.

La idea de que un reloj de agua pudiera realizar una función automática se le ocurre al gran filósofo Platon. Los alumnos de la academia fundada por Platon en el 378 A.C. tenían ciertas dificultades para levantarse por la mañana, lo cual era fuente de discusiones todos los días. Por lo cual Platon diseña un sistema de alarma basándose en una Clepsydra. En el vaso de la Clepsydra se ubicó un flotador encima del cual se depositan unas bolas. Durante la noche se llenaba el vaso y al amanecer alcanzaba su máximo nivel y las bolas caían sobre un plato de cobre. Es de suponer que ante el ruido de las bolas los “despiertos” alumnos terminarían por levantarse.

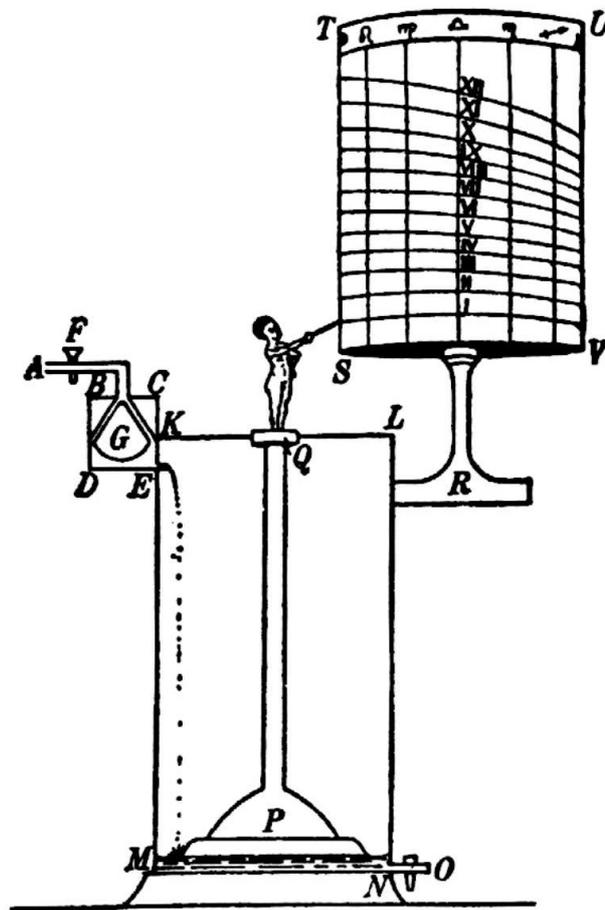
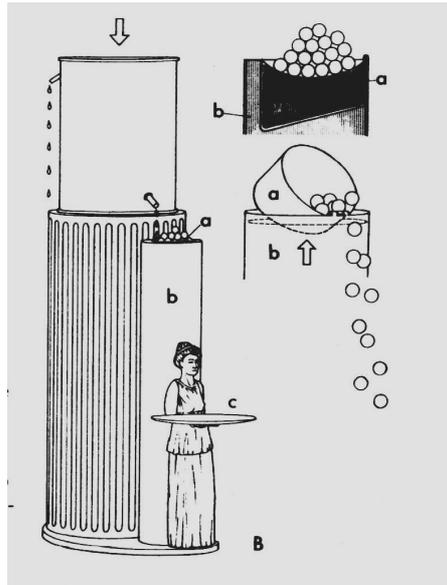
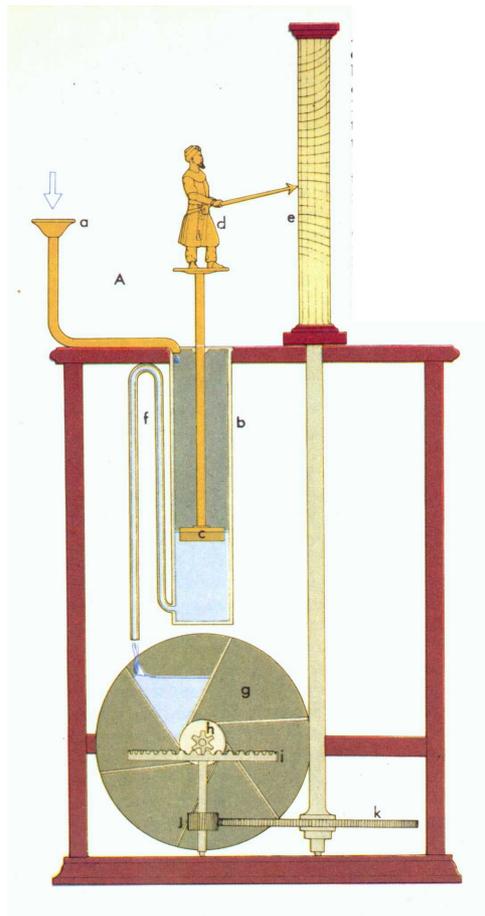


Figura 1. Reloj de Agua de Ktesibios, reconstruido por H. Diels [Otto 70].

En la Clepsydra de la Figura 2 el caudal suministrado al depósito *b* es constante por lo cual este tardará en llenarse un tiempo determinado y fijo al final del cual las bolas caen sobre la bandeja ejerciendo la función de alarma.



**Figura 2. Clepsydra alarma de Platon [Strandh 89].**



**Figura 3. Reloj de Agua [Strandh 89].**

Las Clepsydra de Platon suscitó un gran interés en la época y en el siglo siguiente se efectuaron gran cantidad de diseños de relojes de agua con dispositivos de señalización auditiva.

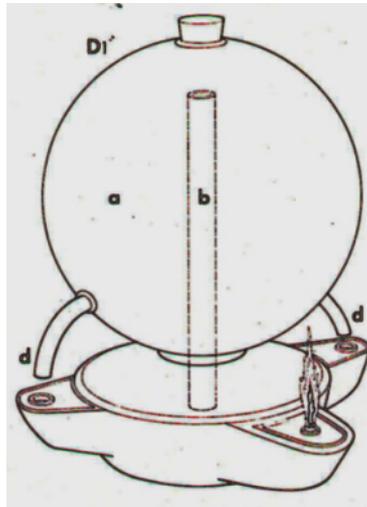


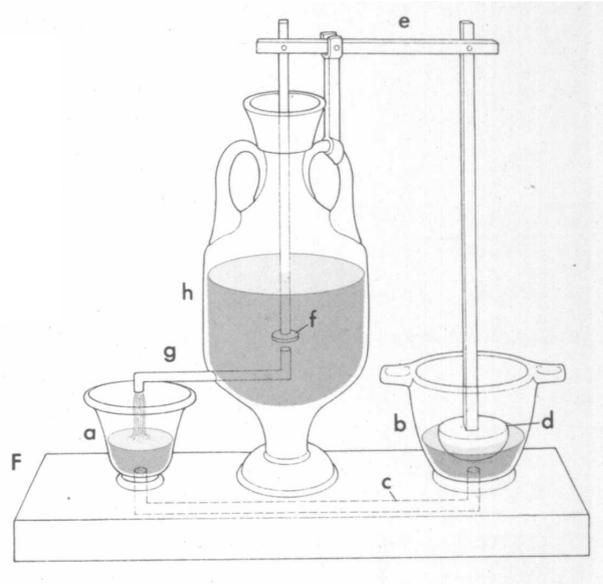
Figura 4. Lámpara de Philon [Strandh 89].

Philon de Bizancio, construyó un sistema de regulación de nivel de una lámpara de aceite. Al quemarse el aceite de la lámpara, el nivel del depósito de aceite bajaba haciendo que entrara aire en otro depósito de forma que éste suministraba más aceite al depósito de la lámpara.

En la Figura 4 se observa el ingenio de Philon. Cuando se consume el aceite del depósito de la base de la lámpara a través de *b* entra aire en el depósito el cual evacua aceite a través de *d*. En el instante en que el depósito se llene dejará de entrar aire en *a* y dejará de salir aceite por *d*. Con este sistema no se conseguía un nivel constante en el depósito pero se aseguraba la recarga de este cuando el aceite se iba consumiendo.

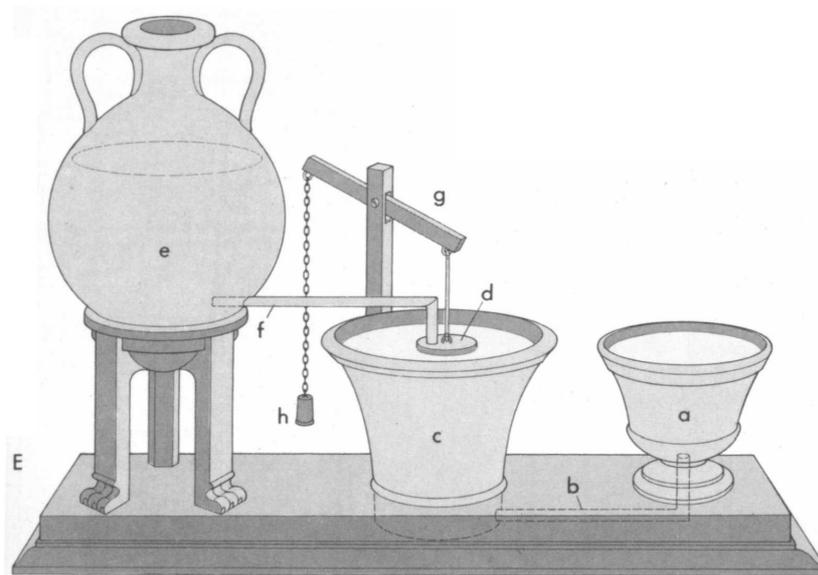
En el siglo I antes de Cristo, Herón de Alejandría escribe una Enciclopedia Técnica entre cuyos libros se encuentra “Pneumática” y “Autómata”. En el primero describe varios sistemas realimentados y en el segundo presenta complicados aparatos que ejecutan un programa fijo.

Unos de los primeros sistemas realimentados de la historia son los dispensadores de vino cuyo funcionamiento se describe en los libros de Herón. El que se observa en la Figura 5 se basaba en el principio de los vasos comunicantes, y conseguía que el volumen de vino suministrado fuera constante. La válvula *f* permanecía abierta hasta que el elemento sensor (el flotador) la cerraba por el efecto de los vasos comunicantes. Solo que subir o bajar el nivel del flotador para decidir el nivel del depósito *a*.



**Figura 5. Dispensador automático de vino [Strandh 89].**

El sistema de la Figura 6 también fue diseñado por Herón. El vino era servido desde un recipiente *a* que se comunicaba con otro recipiente *c* por medio de un vaso comunicante. De forma que cuando se cogía vino de *a* el nivel de *c* bajaba y el flotador *d* abría la válvula. Entonces el vino caía dentro de *c* procedente de un gran depósito *e* hasta que la altura de *a* y *c* hacía que el flotador volviera a tapar la válvula.



**Figura 6. Dispensador automático de vino [Strandh 89].**

Heron también construye un Odómetro, un instrumento dedicado a medir la distancia recorrida por un vehículo. El sistema utilizado era muy ingenioso y consistía en una transmisión que cada vez que daba una vuelta la rueda final caía una bola en un contenedor. Solo había que contar el número de bolas para conocer la distancia recorrida.

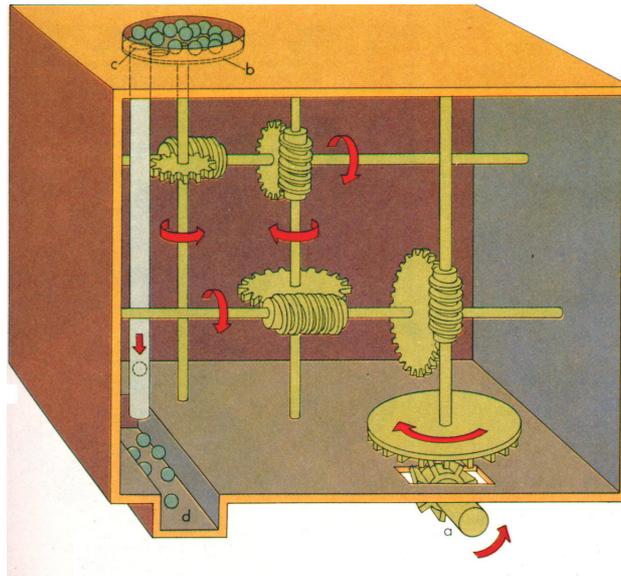


Figura 7. Odómetro de Herón [Strandh 89].

En la Edad Media se desarrollan importantes mejoras técnicas pero en el campo de los ingenios dotados con realimentación existen pocos desarrollos, solamente cabría resaltar la realización de un sistema de control de un molino de harina realizado por H.U. Lansperg hacia el 1200, de forma que la cantidad de grano suministrada al molino dependía de la fuerza del viento y la dureza del propio grano, permitiendo que el sistema funcionará en condiciones óptimas, no se pretendía moler a velocidad constante.

Este distribuidor de grano es considerado como uno de los reguladores de la historia. Su funcionamiento era muy sencillo e ingenioso. El grano llegaba a la rueda de molienda a través de un alimentador con una pendiente muy pequeña, de forma que el grano no se movía si el alimentador estaba en reposo.

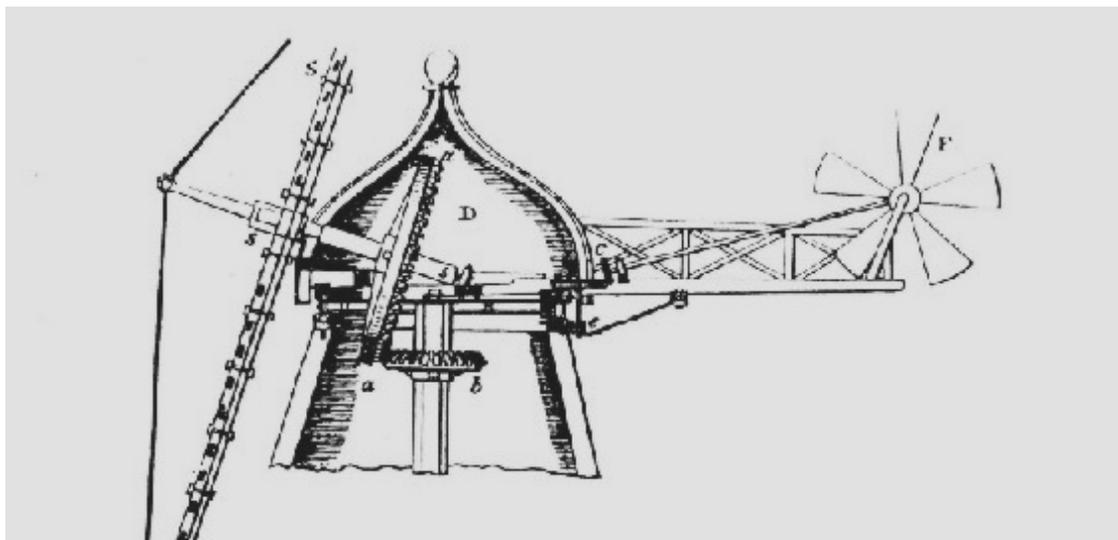


Figura 8. Sistema de orientación de las aspas de los molinos [Otto 70].

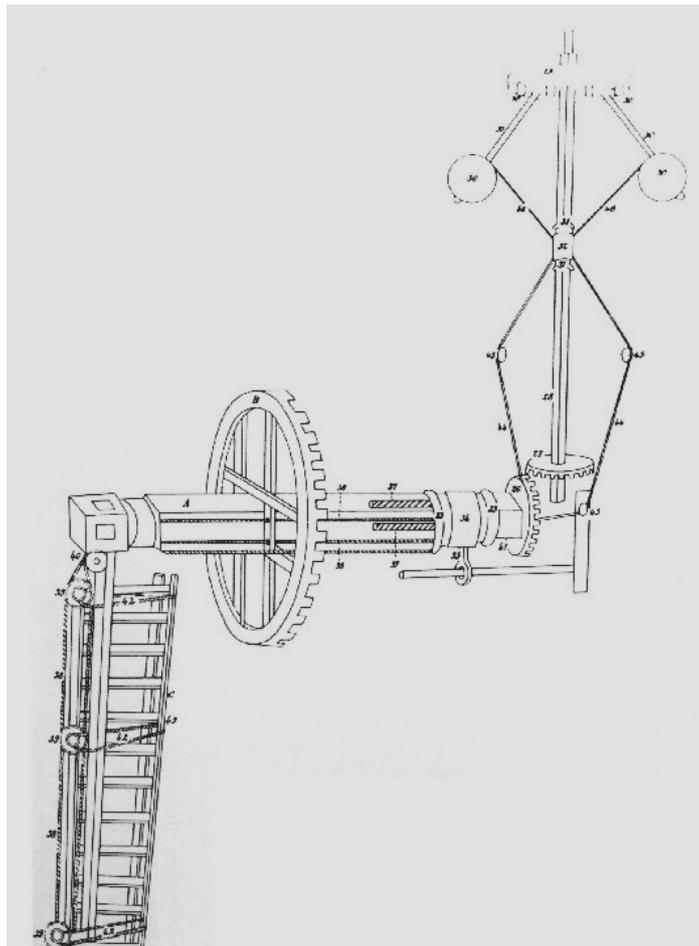
El eje de la rueda moledora tenía una serie de aristas que golpeaban el alimentador. A cada golpe caía una pequeña cantidad de grano de forma que cuanto mayor fuera la

velocidad del viento mayor era la cantidad de grano. Por el simple equilibrio de energía se produce el efecto de la realimentación.

En el siglo XVII se presentan diversos sistemas de regulación de temperatura, entre ellos los aplicados en el horno y la incubadora de Drebel. El principio utilizado en la regulación de temperatura es el siguiente, si la temperatura del horno sube se dilata el contenido de un depósito de alcohol de forma que se desplaza un juego de palancas que abre un orificio de salida de gases.

En el año 1745, E. Lee inventa un sistema para controlar automáticamente la orientación e inclinación de las aspas de los molinos de viento, de modo que se aprovechara mejor la dirección del viento. Se trataba del primer servomecanismo de posición. Fue patentado bajo el nombre de “Self-regulating Wind Machine”. En esta patente [Lee 1745] se describen dos mecanismos.

- El molinillo de cola, el cual no gira si no se encuentra en la dirección normal al viento, y por lo tanto no hace girar la cúpula del molino.
- Un variador automático del ángulo de ataque de las aspas. Con el que se podía regular la velocidad de giro de las aspas del molino.



**Figura 9. Regulador de Mead para Molinos de Viento [Otto 70].**

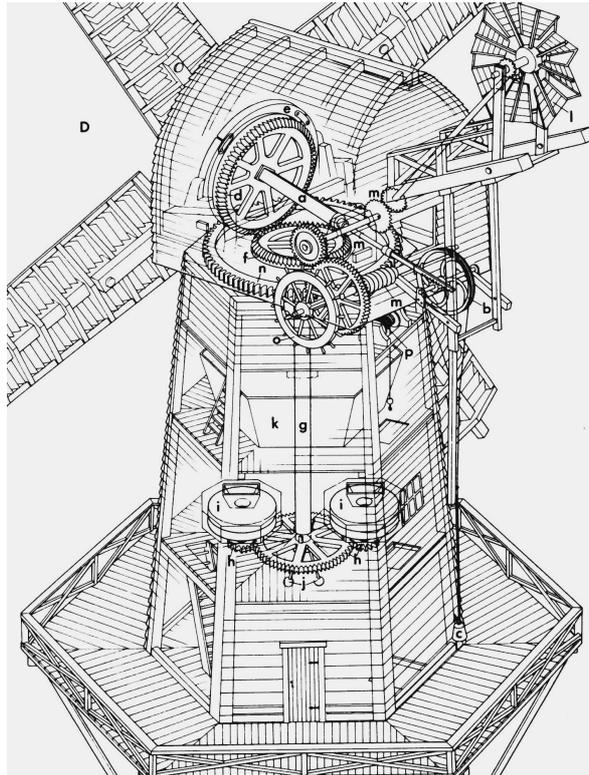


Figura 10. Molino de viento del siglo XIX totalmente Automatizado [Strandh 89].

Este segundo mecanismo no se llegó a realizar debido a su complicación constructiva. El ingenio de Lee se implantó rápidamente en Inglaterra y en el norte de Alemania.

Cuando el grano de trigo es molido, la calidad de la harina producida depende fuertemente de dos factores: de la distancia entre las dos ruedas, la móvil y la fija, y de la velocidad de rotación de la primera.

En las últimas décadas del siglo XVII, se dedican muchos esfuerzos investigadores a desarrollar dispositivos que consigan controlar estos dos factores. En 1787, Thomas Mead patenta un diseño que combinaba la solución de los dos problemas. El invento [Mead 1787] disponía de un regulador que aseguraba que la presión ejercida entre las piedras del molino fuera proporcional a la velocidad de rotación. Este se combinaba con otro ingenio que variaba el ángulo de ataque de las aspas del molino, de forma que se controlaba la velocidad del molino.

Este ingenio resulta particularmente interesante dado que Mead utiliza como sensor de velocidad un péndulo rotativo precursor de los reguladores centrífugos.

## 2 La Revolución Industrial.

Los primeros antecedentes históricos de la máquina de vapor se remontan a la antigua Grecia. En el siglo II antes de Cristo Heron de Alejandría construyó la primera turbina de vapor conocida, la conocida como Aelopila de Heron.

Este y otros inventos, como la bomba de aire de Ktesibio, solo conocieron aplicaciones lúdicas. En el renacimiento se encontraron nuevas aplicaciones técnicas del

vapor. Hacia 1660 el marqués de Worcester diseñó un “motor conducido por agua”, la semilla de la máquina de vapor. Tiempo después, el francés Denis Papin diseñaría una máquina de vapor donde la presión atmosférica jugaba un papel decisivo.



*Figura 11. Aelopila de Heron [Standh 89].*

En el siglo XVII se empezaron a desarrollar las primeras máquinas de vapor. Al calentar agua para producir vapor, este alcanza un volumen 2700 veces superior a la misma masa de agua líquida. Esta propiedad expansiva del vapor constituye el fundamento de la máquina que lleva su nombre, un ingenio que revolucionaría la sociedad occidental.

Las primeras máquinas de vapor chocaron con la falta de profesionales, de técnicas de construcción y de materiales apropiados. Se utilizaban para bombear agua en principescas fuentes y para achicar las inundadas minas de carbón inglesas. En 1712 un quincallero llamado Thomas Newcomen y el ingeniero militar Thomas Savery construyeron la primera máquina de vapor atmosférica de pistón. Utilizaba un pistón de simple efecto: una de las caras del émbolo estaba expuesta al exterior, a la presión atmosférica y la otra cara era la pared deslizante de un cilindro. En él se introducía vapor que hacía avanzar el émbolo. Al final del recorrido el cilindro se enfriaba por medio de un chorro de agua y por lo tanto el vapor condensaba, ocupando un volumen 2700 veces inferior. El vacío creado, “el poder de la nada” como fue llamado, no contrarrestaba la presión atmosférica de la otra cara del émbolo y por ello la pared móvil del cilindro retrocedía. Era este movimiento el que permitía elevar agua de una mina por medio de una bomba de pistón. Pero su rendimiento era muy pobre, tan solo el 0.5% de la energía del combustible utilizado.

La máquina recibió muchas críticas por su elevado consumo de carbón y por el fuerte desgaste de sus componentes. Para hacerla funcionar, se decía, eran necesarias dos minas, una de carbón y otra de hierro. A pesar de ello, en 1760 había más de 100 máquinas trabajando.

El ingeniero James Watt introdujo una modificación en la máquina: una cámara aparte, el condensador, encargada de enfriar el vapor. También introdujo el cilindro de doble efecto, que aceptaba vapor alternativamente a ambos lados del émbolo. El resultado fue que se aumentó el rendimiento de la máquina hasta el 4%.

Watt se asoció con el industrial de Birmingham Matthew Boulton para fabricar a gran escala y arrendar máquinas de vapor [Dickinson 27]. La primera gran máquina de vapor con mecánica rotativa fue instalada por Boulton y Watt en 1786 en el Molino de Albion en Londres. La maquinaria del molino fue diseñada y construida por el escocés Meikle que después se dedicaría a instalar reguladores centrífugos en los molinos de piedra. Se debe remarcar que la invención de los reguladores centrífugos se le ha atribuido desde siempre a Meikle, el cual era el líder en el diseño e implantación de molinos, pero se reconoce que Meikle basó los diseños de sus reguladores centrífugos en el ingenio patentado por Mead en 1787.

En este contexto, en 1788 Boulton envía una carta a Watt donde le informa que ha visitado las instalaciones de Albion y ha observado los molinos en operación con los reguladores centrífugos, describiendo también su forma de trabajo. Watt sugiere inmediatamente la posibilidad de aplicar el mismo principio para controlar la velocidad de las máquinas de vapor, y es probable que antes de final de año tuviera diseñado su primer regulador centrífugo.

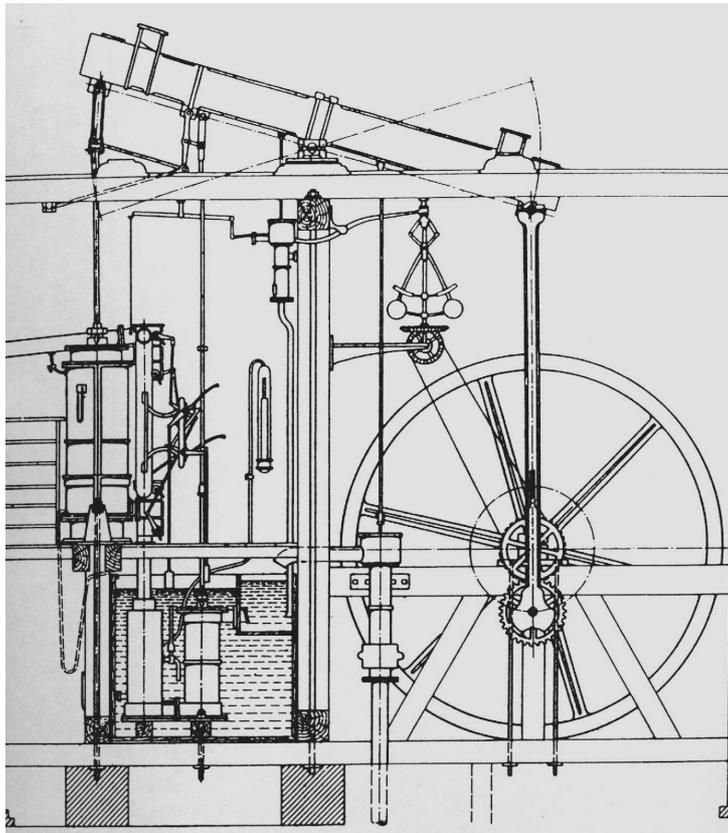
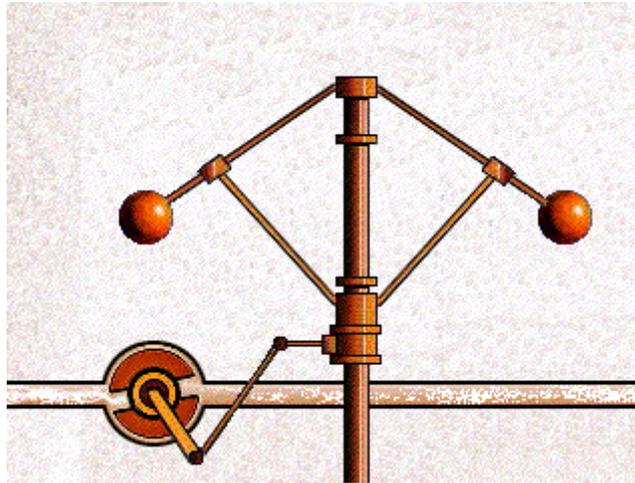


Figura 12. Máquina de Vapor con regulador de Watt [Standh 89].

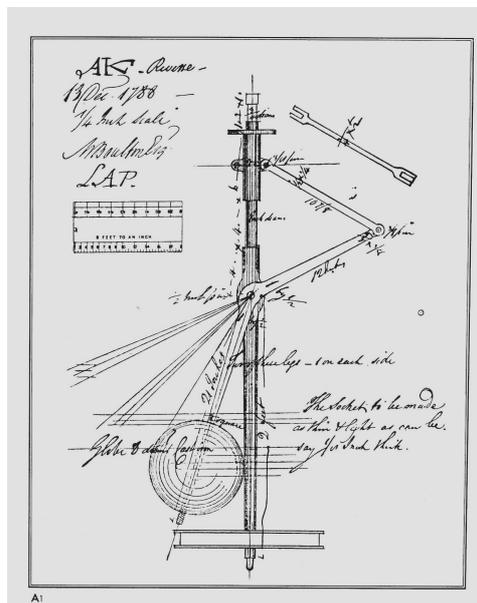
Boulton y Watt hicieron lo posible para que el diseño de su regulador permaneciera secreto el máximo tiempo posible. Cuando la patente de Watt caduca en 1800, su regulador

centrífugo se había convertido en una parte estándar del equipamiento de los ingenios de vapor de la época.



**Figura 13. Regulador de Watt.**

Este regulador mecánico por medio de un sistema de palanca regulaba la cantidad de vapor suministrada por la caldera a la turbina de la máquina de vapor. Este invento resultará ser de gran importancia en el desarrollo histórico de la Regulación Automática, dado que incorpora el sensor y el actuador en un único ingenio, sin disponer de un amplificador de potencia que aislará el sensor del actuador. [Auslander 71]



**Figura 14. Regulador de Watt [Standh 89].**

No se puede afirmar que estos ejemplos aislados supongan la existencia de algún tipo de Ingeniería o Teoría de Control Automático, dado que ni siquiera existían las herramientas matemáticas necesarias para ello.

Los primeros reguladores de Watt funcionaron satisfactoriamente debido fundamentalmente al considerable rozamiento que presentaban sus mecanismos, haciendo

el sistema de por sí estable. Sobre 1868 existían unos 75000 reguladores de Watt operando en Inglaterra.

Los reguladores de Watt suministraban una acción de tipo proporcional y el control de velocidad solo era exacto con una determinada carga mecánica. Además solamente podían operar en un reducido rango de velocidades y necesitaban un continuo y costoso mantenimiento. Se les denominaban moderadores, no controladores.

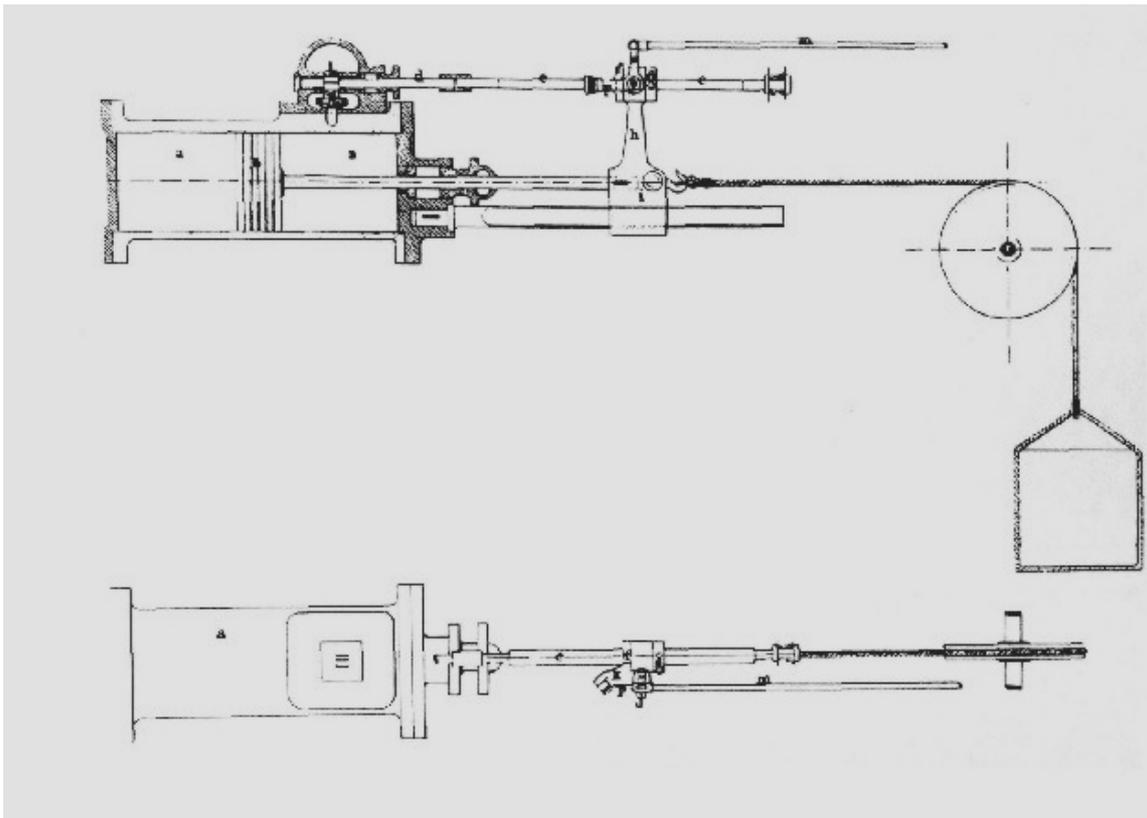
En los primeros 70 años del siglo XIX, una vez caducada la patente de Watt, se realizaron grandes esfuerzos por mejorar el diseño de los reguladores, muchos de ellos con el objetivo de reducir el offset presente en el ingenio de Watt. Ejemplos de estos ingenios son los reguladores (Governors) patentados por Willians Siemens en 1846 y 1853, que sustituyeron la acción proporcional por acción integral.

A lo largo del siglo XIX se siguen desarrollando reguladores de temperatura, como el de Ure (1830), y reguladores de velocidad para turbinas de agua diseñados por Woodward en 1870. En este ingenio se usaba el regulador centrífugo solo para accionar un embrague que controlaba la transmisión de potencia a la admisión. Se aíslan sensor y accionador incorporando en medio un amplificador de Potencia. Por lo tanto los servomecanismos adoptan la estructura funcional que se mantiene hasta el presente. Mientras en los reguladores de Mead y Watt el control era proporcional, en este ingenio el control pasa a ser integral.

Los amplificadores de potencia mecánicos, conocidos en el contexto del control como servomotores, siguen desempeñando una función fundamental en los sistemas de control. En la década de los 1860 M.J. Farcot diseña un regulador centrífugo de alta sensibilidad cuya señal de salida era suficiente para comandar un pequeño cilindro de doble pistón que inyectaba vapor a una de las dos caras del pistón de otro cilindro de potencia de diámetro mucho mayor. El factor de amplificación era proporcional a la relación de áreas de los cilindros. Farcot en su patente [Farcot 1868] hace una comparación entre su invento, el servomotor y el jinete de un caballo:

*“el jinete puede dirigir los músculos del caballo con pequeños movimientos de sus manos, busca que sus pequeñas intenciones se transformen en grandes fuerzas”*

Farcot denominó su patente como “Servomoteur, ou moteur asservi” y de aquí se origina el término servomotor.



*Figura 15. Servomotor de Farkot (1873) [Bennet 79].*

Los sistemas mecánicos se desarrollan hasta 1900, entonces son superados por sistemas hidráulicos. Los motores eléctricos y el desarrollo de la electrónica adquieren gran relevancia durante la segunda guerra mundial, desempeñando un gran papel en el desarrollo de la teoría clásica de control.

### **3 El problema de la estabilidad.**

Al mismo tiempo que Watt se dedicaba a perfeccionar su regulador de bolas, Laplace y Fourier desarrollaban los métodos de Transformación Matemática, tan utilizados y asumidos en la Ingeniería Eléctrica y por supuesto en la actual Ingeniería de Control.

Cauchy (1789-1857), con su teoría de la variable compleja, completo las bases matemáticas necesarias para la Ingeniería de Control. Pero hasta 75 años después de la muerte de Cauchy, no surgió lo que se podría denominar la Teoría de Control.

Como se ha comentado anteriormente los primeros reguladores de Watt tenían un buen comportamiento debido al gran rozamiento existente entre sus miembros. A mediados del siglo XIX cambian las técnicas de diseño de las máquinas y se mejoran los procesos de fabricación, entonces se empezó a observar que la velocidad de las máquinas variaba cíclicamente con el tiempo, con comportamientos no muy estables. Este problema era bastante grave y atrajo a un gran número de importantes científicos e ingenieros.

Entre los primeros científicos interesados en el tema, se puede señalar a G.B. Airy, el cual en 1840 y 1851 publica sus trabajos relativos a la regulación de velocidad de telescopios [Airy 1840]. Su interés se debió a la necesidad de mantener el telescopio girando lentamente a una velocidad uniforme durante las observaciones astronómicas. La

principal aportación de sus trabajos el estudio de la influencia del amortiguamiento en la estabilidad.

El problema fue resuelto por Maxwell y por el ingeniero ruso Vischnegradsky. Este ingeniero publicó sus resultados [Vyschne 1876] en términos de una regla de diseño que relacionaba los parámetros de ingeniería del sistema con su estabilidad. El análisis de Vischnegradsky demostraba que los cambios de diseño de la máquina que habían tenido lugar desde la época de Watt, habían disminuido el rozamiento entre sus componentes y esto conllevaba inevitablemente el fenómeno de oscilaciones en la regulación de la velocidad. Vischnegradsky también demostró la incapacidad de un regulador proporcional para establecer un correcto comportamiento de un sistema de tercer orden.

El trabajo que presenta Maxwell en 1868: “On Governors” [Thaler 74], puede considerarse como el origen de la Teoría de Control. En él presenta su criterio de estabilidad para sistemas lineales dinámicos e invariantes. En este trabajo Maxwell establece una diferenciación entre *Regulators* ó *Moderators* (los conocidos actualmente como reguladores proporcionales) y *Governors* (reguladores con acción integral)

La contribución importante de Maxwell estuvo en demostrar que el comportamiento de un sistema de control automático en la vecindad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial lineal y por lo tanto la estabilidad se podía así discutir en términos de las raíces de la ecuación algebraica asociada.

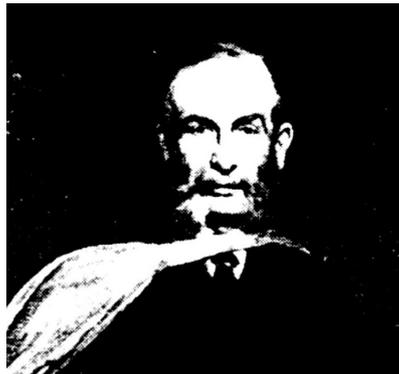


Figura 16. Routh.

Maxwell plantea de esta forma el problema general de estudiar la estabilidad de un sistema dinámico en función de la localización de las raíces de su ecuación característica. Hermite había publicado un trabajo sobre el mismo problema unos años antes pero no era muy conocido.

Routh resuelve este problema en 1877 en su trabajo “ A treatise on the stability of a given state of motion”, con el que obtiene el premio Adams. En este trabajo presenta por primera vez su conocido criterio de estabilidad.

Para Routh esto representó la finalización de una notable rivalidad que había mantenido con Maxwell durante años; habían sido condiscípulos en Cambridge y Routh había relegado a Maxwell del primer puesto en el examen final. J.G. Truxal en su libro “Introductory system engineering” describe que al comenzar Routh la exposición de su trabajo en el Premio Adams lo hizo con estas palabras: “Ha venido recientemente a mi atención que mi buen amigo James Clerk Maxwell ha tenido dificultades con un problema relativamente trivial...”. Lo que no le faltaba a Routh era ironía en sus palabras.

Hurwitz en 1885, de una forma independiente y utilizando las técnicas de Cauchy y Hermite resuelve el mismo problema en términos de un conjunto de determinantes. Bompiani demostraría en 1911 la equivalencia de los criterios de Routh y Hurwitz [Bompiani 11].



*Figura 17. Hurwitz.*

En 1889, Liapunov presenta sus trabajos sobre estabilidad, los cuales servirán de base a la teoría moderna de control. Es importante resaltar la aportación de Heaviside, aplicando el análisis impulsional en el estudio de los sistemas dinámicos. Heaviside es el primero que aplica el cálculo operacional a un amplio espectro de problemas de Ingeniería Eléctrica.



*Figura 18. Liapunov.*

La importancia del control automático durante el final del siglo XIX y comienzos del XX se pone de manifiesto con la concesión en 1912 del Premio Nobel de Física al sueco Dalen por su desarrollo de reguladores automáticos que se utilizan conjuntamente con los acumuladores de gas para balizas luminosas.

A finales del siglo XIX se encuentran asentadas las bases necesarias para el desarrollo de Teoría de Control Automático, llevado a cabo durante este siglo XX.

## **4 Control clásico.**

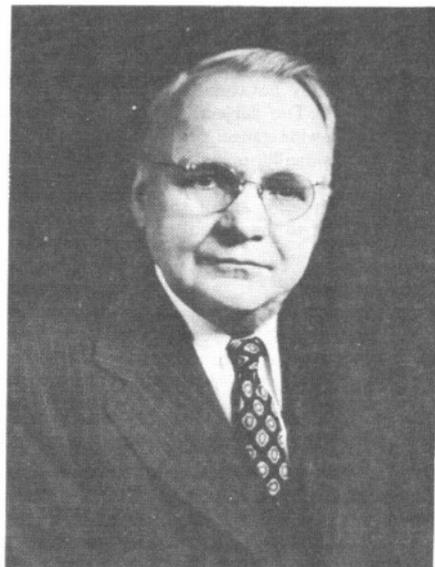
Hasta bien entrado el siglo XX las únicas herramientas analíticas que poseía el especialista en control eran la utilización de ecuaciones diferenciales ordinarias junto con criterios algebraicos para determinar la posición de las raíces de la ecuación característica asociada. Aplicando el criterio de Routh y Hurwitz el ingeniero determinaba la estabilidad o no de los sistemas, pero para esto se debía obtener el modelo matemático operando

mediante ecuaciones diferenciales. Esto suponía un arduo trabajo. Además ahí que destacar que el criterio de Routh y Hurwitz no ofrece información de cómo mejorar la estabilidad del sistema.

Desde el punto de vista teórico, la Ingeniería de Control se empieza a consolidar cuando se produce el traslado y aplicación de los conocimientos adquiridos en los problemas de amplificación de señales a los problemas de control industrial.

Estos estudios desembocan en la llamada Teoría Clásica de Control, en la cual se utilizaban como herramientas matemáticas los métodos de Transformación de Laplace y Fourier y la descripción externa de los sistemas.

Dos trabajos de singular importancia son los desarrollados por Minorsky y Hazen. En el trabajo de Minorsky “Directional Stability of Automatic Steered Bodies” [Thaler 74] de 1922, se reconoce la no-linealidad de los sistemas y aplica la linealización mediante el desarrollo en serie de Taylor a sistemas no-lineales correspondientes al movimiento angular de un buque. Estudia la estabilidad y los efectos de los retrasos de la información sobre las salidas de los Sistemas.



*Figura 19. Harry Nyquist.*

Hazen en su publicación “Theory of Servomechanism” (1934) [Thaler 74], analiza el funcionamiento de los servomecánismos utilizando en su análisis entradas típicas de escalón y rampa. Aparte de proponer un marco conceptual, Hazen utiliza herramientas matemáticas como el cálculo operacional de Heaviside. En sus trabajos estudia el diseño de servomecánismos para posicionar ejes.

### ***El desarrollo de las técnicas frecuenciales.***

El estudio de los servomecánismos y los reguladores en el dominio frecuencial se realiza al obtenerse resultados sobre el diseño de amplificadores de señal realimentados. Destacan los trabajos de Nyquist (1932), Black (1934) y Bode (1940).

El suceso que realmente marca época en el desarrollo de los métodos de respuesta en frecuencia es la aparición de trabajo clásico de Nyquist sobre la estabilidad de

amplificadores realimentados. Nyquist presenta en este trabajo “Regeneration Theory” [Thaler 74], su celebre criterio de estabilidad. Su investigación surge de los problemas que presentaba la atenuación y distorsión de la señal en la telefonía a grandes distancias.

En 1915 la Bell System había finalizado un enlace telefónico experimental entre New York y San Francisco. Este enlace utilizó una línea aérea de cobre que pesaba 500 Kg/milla y fue cargado inductivamente para tener una frecuencia de corte de 1000 Hz. La atenuación de la señal a lo largo de las 3000 millas era de 60 dB, se redujo a 18dB utilizando seis amplificadores con una ganancia total de 42 dB.

Sin embargo el cambio a operaciones mediante cable, planteó serios problemas técnicos. Debido a la escasa sección de los cables la atenuación era grande y se requerían muchos amplificadores repetidores. Esto suponía que la señal al pasar por múltiples etapas amplificadoras, cada una con sus no-linealidades, se iba distorsionando. Para mantener la inteligibilidad de la señal de audio transmitida en distancias intercontinentales se requería una linealidad efectiva del amplificador muy lejos de la que la tecnología era capaz de dar ( una distorsión del orden del 0.005%).

Esta dificultad sólo se pudo vencer con el magnífico invento desarrollado por H. Black de los laboratorios Bell quien propuso la idea de un *amplificador realimentado*, en su trabajo “Stabilized Feedback Amplifiers” [Thaler 74] en 1934. El descubrimiento importante de Black fue que la elevada ganancia en un dispositivo amplificador no lineal y cuyos parámetros eran variables con el tiempo se podía negociar para conseguir una reducción en la distorsión no lineal de manera que el sistema se comportase como una ganancia lineal, estable y precisa. Black utiliza el criterio de Nyquist y llega a interpretar una serie de fenómenos que se producen en los sistemas realimentados.

El mecanismo era simplemente utilizar componentes pasivos lineales apropiados de gran precisión en el lazo de realimentación de un amplificador no lineal de elevada ganancia. Hacia 1932 Black y su equipo podían construir amplificadores que funcionaban razonablemente bien. Sin embargo presentaban una tendencia a inestabilizarse. Algunos lo hacían cuando aumentaba la ganancia del lazo del amplificador realimentado, lo cual se podía esperar, pero otros manifestaban estas características cuando la ganancia se disminuía y esto si que era completamente inesperado.

La situación era muy parecida a la asociada con los reguladores de velocidad del siglo XIX, que presentaban oscilaciones en la velocidad y cuya conducta no se podía explicar con las herramientas de análisis disponibles.

Los amplificadores realimentados de la época podían contener del orden de 50 elementos independientes almacenadores de energía (tales como condensadores, autoinducciones, etc.). Su descripción en términos de un conjunto de ecuaciones diferenciales, como en el análisis clásico de los sistemas de control automático de origen mecánico era casi una tarea imposible a la vista de las rudimentarias facilidades disponibles en esos años para la solución por computador de tales ecuaciones.

El famoso trabajo de Nyquist resolvió este misterio, abrió totalmente nuevas perspectivas en la teoría de los mecanismos realimentados y por lo tanto comenzó una nueva era en el Control Automático. Antes de 1932 el enfoque basado en las ecuaciones diferenciales había sido la gran herramienta del ingeniero del control; en la década que siguió a la contribución de Nyquist estas técnicas fueron casi completamente reemplazadas

por métodos basados en la teoría de variable compleja los cuales fueron la consecuencia natural y directa de su nuevo planteamiento.

La solución del problema de la estabilidad de un sistema realimentado propuesta por Nyquist se basaba en la forma de la respuesta en frecuencia de la ganancia en lazo abierto y esto era de un valor práctico inmenso ya que se formulaba en términos de una cantidad (la ganancia) que era directamente medible. Este enlace directo con medidas experimentales era un desarrollo completamente nuevo en trabajos dinámicos de tipo aplicado.

La aplicación del criterio de estabilidad de Nyquist no dependía de la disponibilidad de un modelo del sistema en la forma de una ecuación diferencial. Más aún, el contorno del lugar de Nyquist daba una indicación inmediata de cómo se podía mejorar la conducta de un sistema realimentado que estaba muy poco amortiguado o que incluso era inestable simplemente modificando de una manera apropiada su característica de ganancia en lazo abierto en función de la frecuencia.

Con la perspectiva de hoy día puede resultarnos demasiado fácil subestimar la magnitud de la invención de Black y el logro teórico de Nyquist, sin embargo las cosas parecían muy diferentes en su tiempo. La concesión de una patente a Black por su amplificador tardó más de 9 años. La oficina de patentes de EEUU citaba trabajos técnicos que decían que la salida de un amplificador no se podía conectar a la entrada y permanecer estable a menos que la ganancia del lazo fuese menor que uno. La oficina de patentes británica, en palabras de Black, trató la aplicación “como si se tratase de una máquina de movimiento continuo”.

El trabajo de Nyquist dejaba sin resolver como estaban relacionadas la amplitud y la fase en función de la frecuencia de la función de transferencia de la ganancia en lazo abierto. En otro de los trabajos clásicos que están en los fundamentos de la Teoría del Control, H. W. Bode realizó este análisis, extendiendo resultados previos de Lee y Wiener.

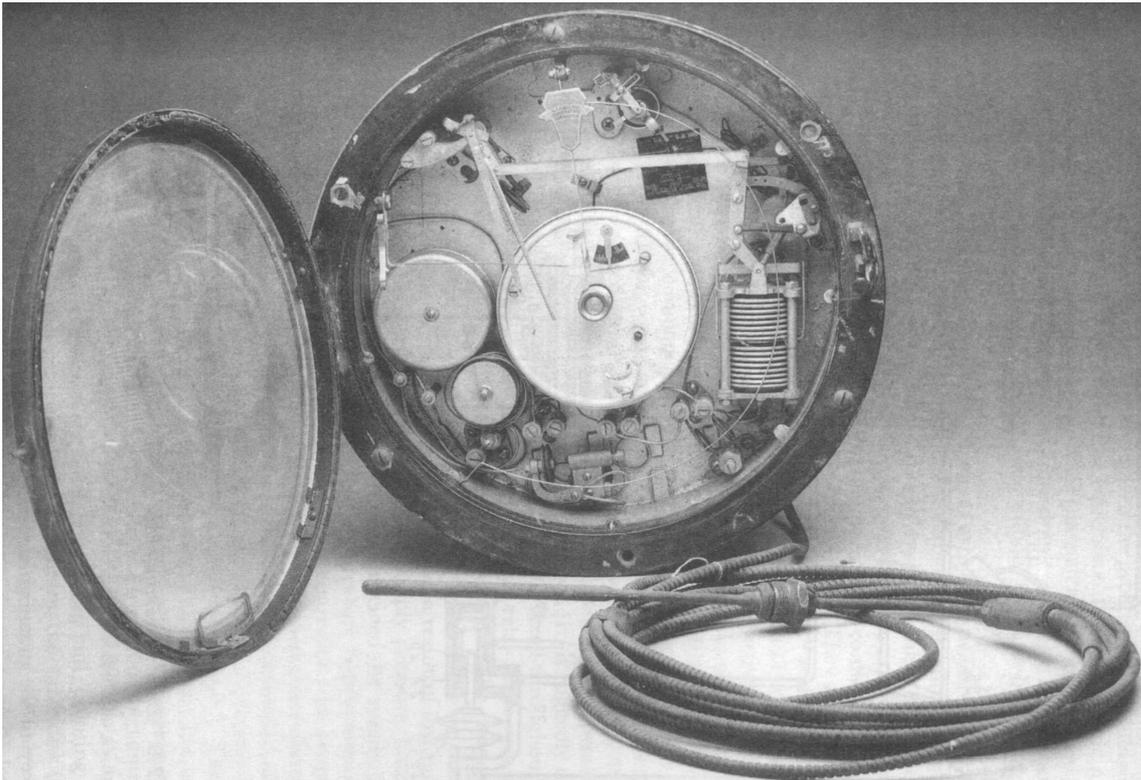
En el trabajo de Bode “Relations Between Attenuation and phase in Feedback Amplifier Design” [Thaler 74] de 1940, se presenta la definición de margen de fase y margen de ganancia y la definición de los diagramas logarítmicos de Bode.

Bode demostró que dada cualquier función de respuesta en frecuencia  $A(\omega)$  siendo  $A$  la amplitud de la ganancia en lazo abierto se le puede asociar una función  $\Phi(\omega)$  siendo la fase mínima de dicha función de respuesta en frecuencia. De esta forma fue capaz de dar reglas para obtener la forma óptima de la ganancia del lazo en función de la frecuencia para un amplificador realimentado.

En la industria de los procesos químicos la introducción del control por realimentación tendió en un principio a desarrollarse de forma aislada de los desarrollos mecánicos y eléctricos. En estos procesos la evolución de la variable controlada era tan lenta ( y lo sigue siendo) que el control se hacía mediante realimentación manual. Los primeros pasos que se dan para controlar estos procesos son la incorporación de instrumentos para supervisar la operación y registradores de plumilla. El desarrollo natural fue utilizar el movimiento de la plumilla del registrador para efectuar una acción de realimentación sobre las válvulas de control en la planta utilizando líneas de transmisión, amplificadores y transductores neumáticos.

Los primeros controladores de temperatura, ofrecían una acción de control de tipo on-off por medio de un simple mecanismo conmutador o relé que pronto se reveló

insuficiente para las exigencias planteadas en los procesos industriales, como por ejemplo en la industria láctea, el proceso de pasteurización de la leche. El siguiente desarrollo fueron los primeros reguladores con acción proporcional. En estos reguladores se manifestaba claramente el dilema de la automática: precisión frente estabilidad, si se desea un error estacionario pequeño, se debía aumentar la ganancia del regulador, o lo que es lo mismo disminuir la banda proporcional. Pero esto conllevaba que el proceso era sometido a fuertes oscilaciones en el transitorio. Y si se aumentaba la banda proporcional, disminuían las oscilaciones pero en caso de cambios en la carga aparecía un error estacionario apreciable. El máximo valor recomendado entonces para la banda proporcional era del cinco por ciento.



*Figura 20. Foxboro Stabilog [Bennett 93].*

Durante los años 30 se desarrollaron completamente estos reguladores neumáticos y se transfirió a este campo del control la idea de utilizar el término de acción integral que se venía empleando desde tiempo en los sistemas mecánicos. El primer regulador de temperatura con acción proporcional integral fue el *Foxboro Stabilog* patentado por Mason en 1931. En este regulador neumático, se incorporaba amplificación lineal, basada en el principio de la realimentación negativa (al igual que Black en los amplificadores de señal realimentados) y acción integral (reset). Hay que hacer constar que en un principio el *Stabilog* no tuvo mucho éxito comercial, debido entre otras cosas a su precio y a que no era comprendido su funcionamiento.

A finales de los años 30 se introdujo la acción derivativa en estos controladores neumáticos dando lugar así al regulador PID de 3 términos (Proporcional, Integral y Derivativo).

En 1942 Ziegler y Nichols, ingenieros de Taylor Instruments hicieron un estudio importante que condujo a fórmulas empíricas para sintonizar el regulador PID al proceso.

Este estudio “ Optimum Settings for Automatic Controllers” [Thaler 74] fue presentado en el “ASME Winter Anual Meeting”. Los coeficientes de las distintas acciones proporcional, integral y derivada, se podían determinar de valores medidos experimentalmente del proceso que se deseaba controlar. La importancia de estas reglas de ajuste óptimo de controladores es enorme, siguen siendo vigentes y profusamente usadas en el ámbito del control de procesos industriales.

El trabajo de Ziegler y Nichols es pionero en el desarrollo de la idea de control óptimo, aunque su criterio de optimización, que consiste en minimizar la superficie de error absoluto, no se puede tratar analíticamente.

Un paso crucial en la transferencia de las técnicas utilizadas en el análisis de los amplificadores realimentados de los sistemas de telefonía a otras clases de sistemas fue realizada por H. Harris del MIT en su trabajo “The analysis and design of servomechanics” [Harris 42], en el cual introduce el uso de funciones de transferencia en el análisis de un sistema realimentado general. Esto permitió que un servomecanismo mecánico o un sistema de control de un proceso químico se representasen mediante diagramas de bloques y utilizasen las técnicas del dominio frecuencial.

### ***Avances durante la Segunda Guerra Mundial.***

Un gran estímulo para el desarrollo de la técnica lo constituyen las guerras. La Segunda Guerra Mundial supuso un gran impulso al desarrollo teórico y mucho más al desarrollo práctico, dada la fuerte necesidad de sistemas de control que funcionarían como los servos de los radares y el posicionamiento de cañones.

La Segunda Guerra Mundial creó una necesidad urgente para diseñar servomecanismos de altas prestaciones y condujo a grandes avances en la forma de construir sistemas de control realimentados. Las exigencias de la guerra enfocaron la atención sobre un problema importante: el llamado *problema de control de tiro*, proporcionando una cadena automática de órdenes entre la detección del blanco, el apuntamiento del arma y el disparo. Este problema tiene tres etapas:

- a) Detección y seguimiento del blanco.
- b) Predicción.
- c) Colocación del cañón en posición de disparo.

Evento.	Fecha.	Autores.	Título o Descripción.
1	13 de mayo de 1942	Hartee, D. Porter A.	El analizador diferencial y su aplicación a los servomecanismos.
2	12 de junio de 1942	Bedford, L. H. Taylor, L.K.	Desarrollo de un servomotor en Cossors desarrollo de un servomecanismo en Ferranti's.
3	24 de julio de 1942	Jofeh, L.	Métodos de teoría de circuitos en el análisis de servomecanismos.
4	29 de enero de 1943	Inglis C.C. Tustin Barnett, P.S.	Estabilización del control de tiro en tanques. Sistema de control gyro-eléctrico. Breve descripción de un sistema de estabilización hidráulico.
5	19 de febrero de 1943	Ashdown, G.L.	Sistema de control remoto electro-hidráulico.
6	19 de marzo de 1943	Robinson, B.W.	Algunos servomecanismos aplicados a la aviación.
7	25 de junio de 1943	Daniell, P.J.	La interpretación y el uso de los diagramas de Nyquist con referencias particularizadas a los servomecanismos.
8	23 de julio de 1943		Simposio sobre las técnicas de test de servomecanismos.
9	27 de agosto de 1943	Jofeh,L.	Modelos eléctricos en el diseño de servomecanismos.
10	17 de septiembre de 1943	Hamon, B.V.	Servomecanismos desarrollados en Australia.
11	26 de noviembre de 1943	Hayes, K.A. Hyde, A.D.	Utilización de servos en el control de tiro. Nuevo método de análisis de servomecanismos.
12	7 de enero de 1944	Marchant, E.W.	Laboratorio de la Universidad de Oxford dedicado al análisis de pequeños servomecanismos.
13	4 de febrero de 1944	Craik, K.J.W.	Algunas características del operador humano en los sistemas de control.
14	3 de marzo de 1944	North, J.D.	Sistema electro-hidráulico utilizado en las torretas de tiro de Boulton-Paul.
15	24 de marzo de 1944	Brown, G.S.	Actividades del laboratorio de servomecanismos del MIT.
16	4 de mayo de 1944	Van Leeuwen, J.J.S.	Aspectos generales sobre la estabilidad.
17	9 de junio de 1944	Hartree, D.R.	El analizador diferencial y su aplicación a los problemas de control.
18	7 de julio	Porter A.	Estudio de las prestaciones de un sistema de control de tiro.
19	10 de noviembre de 1944	Donald, M.B Callender, A. Foster, E.W.	Control y medida en la industria química. Problemas de control industrial. Servos industriales eléctricos.
20	Desconocida	Caldwell, S.H.	Desarrollo de los sistemas de control de tiro en los Estados Unidos.
21	9 de febrero de 1945	Hayes, K.A. Holland G.E.	Especificaciones de un Servomecanismo. Control remoto de reflectores G.E. 1939.
22	23 de marzo de 1945	Ludbrook, L.C.	Control de velocidad de reflectores.
23	24 de agosto de 1945	Sudworth, J.	Sistemas de control de las bombas volantes alemanas V1 y V2.

**Tabla 1. Principales aportaciones del Servopanel.**

En el comienzo de la guerra, aunque cada etapa requería algunos operadores, cada uno efectuando operaciones de seguimiento manual, había una considerable controversia en cuanto al valor operacional del control automático. Esto no es sorprendente ya que los

predictores que estaban en uso tenían un error medio de 2-3 grados que eran del mismo orden que el error medio de un operador de batería bien entrenado que efectuase un seguimiento manual. Cuando la guerra progresó, aumentó la velocidad de los blancos, el personal entrenado comenzó a escasear y la aparición de los radares de seguimiento mejoró notablemente la capacidad de predicción: era pues el momento para que el control automático se hiciese notar.

Con el objetivo fundamental de investigar y avanzar en los problemas de control del radar y de control de tiro, en marzo de 1942, de una manera informal se constituyó un grupo que posteriormente sería denominado el “Servo-Panel”. Su principal función consistió en organizar encuentros, proporcionar información y servir de nexo de comunicación entre diferentes grupos de investigación.

El gobierno americano al intentar desarrollar los sistemas de control automático de tiro se enfrentó con el problema de que aunque había una considerable experiencia en temas de control, ésta se encontraba dispersa entre muchas ramas de la ingeniería y faltaba el atributo unificador de una terminología en común. La reacción no se hizo esperar, con la formación en 1940 bajo la dirección del Dr. Vannevar Bush del Comité de Investigación de Defensa Nacional (NDRC).

Entre los muchos comités del NDRC estaba el de *Control de Tiro* que bajo el liderazgo de Warren Weaver coordinó el trabajo de los servicios, laboratorios industriales y universidades. El comité era responsable de la dirección de la investigación y de la circulación de informes reservados a los grupos apropiados.

Los informes de Brown, Harris, Hall, Wiener, Phillips y Weis entre otros, fueron emitidos bajo los auspicios del NDRC y su contenido no fue conocido hasta finales de los años 40. Los siguientes trabajos han sido recogidos en la colección [Thaler 74]:

- Brown, G.S., and A.C. Hall: *Dynamic Behavior and Design of Servomechanism*. [Brown 46].
- Harris, H. JR: *The frequency Response of Automatic Control*. [Harris 46].
- Hall, A.C: *Aplication of Circuit Theory to the Design of Servomechanisms*. [Hall 46].
- Weiss, H.K.: *Constant Speed Control Theory*. [Weiss 39].

### ***Albores de la era espacial.***

Desde siempre los procesos más complejos comandados por computador han sido las aplicaciones de control de vuelo aerospaciales. Sin disponer de las tecnologías del control automático y los computadores, hubiera sido imposible que el hombre hubiera viajado al espacio. Los pioneros en esta aplicación fueron, además de otros, el Ruso Constantin E. Tsiolkovsky (1857-1935), y el alemán Hermann Ganswindt (1856-1934) que criticaron a los astrónomos y matemáticos de la época que aseguraban que nunca jamás el ser humano poseería los medios para conseguir el control, la precisión y la velocidad necesaria para los vuelos en el espacio.

Uno de los primeros trabajos en este campo se debe al alemán Hermann Orberth, que en su artículo “Die Rakete zu den Planetenräumen” (Cohetes en el espacio interplanetario)

publicado en 1923, afirma que para poder efectuar vuelos en el espacio, el hombre debe acceder a técnicas de control automático mucho más sofisticadas que las disponibles entonces. En su trabajo de 1929 “Wege zur Raumschiffahrt” (Métodos para volar en el espacio) predice que el desarrollo de cohetes que dispongan de la suficiente fuerza propulsiva llevará largo tiempo y lo mismo sucederá con la necesaria tecnología de control automático. Asimismo un elemento fundamental en la navegación espacial será la precisión a la hora de maniobrar dado que las velocidades y las distancias implicadas son enormes (evidentemente astronómicas). Para colocar un satélite orbitando sobre la tierra es necesaria una velocidad mínima de 7,904 kilómetros por segundo. Para poder escapar de la tierra y navegar por el espacio interestelar es necesaria una velocidad mínima de 11,178 Km./seg. conocida como la velocidad de escape. Estas velocidades resultaban difíciles de imaginar para la época cuando un coche que circulaba a 100 Km./hora necesitaba cinco minutos para recorrer la distancia de ocho kilómetros. En otras palabras el cohete debía ir a una velocidad trescientas veces superior a la del coche.

La falta de oxígeno en el espacio exterior conllevaba la imposibilidad de realizar la combustión en las turbinas de los cohetes. Robert H. Goddard publica en 1919 el primer trabajo “A Method of Reaching Extreme Altitudes” donde se describen cohetes cuya combustión se basaba en oxígeno líquido.

Las mayores contribuciones al campo de la navegación espacial que posibilitaron que el hombre llegara a la luna en 1969 se realizaron en la base alemana de Peenemünde situada en la isla de Usedom del mar Báltico. La base fue construida entre 1936 y 1940. Las investigaciones y desarrollos realizados ahí constituyen uno de los capítulos más excitantes de la historia de la ciencia y la técnica.

Las primeras unidades desarrolladas para el ejército alemán, las denominadas A1 y A2, fueron destinadas principalmente al ensayo de sistemas de propulsión y control de cohetes. Una vez se dispuso de unidades en funcionamiento, enseguida se observó que el principal problema a solucionar era mantener el sistema estable. Según palabras de Willy Ley [Willy 44] los conocimientos que se poseían entonces sobre la estabilidad de los cohetes “*se podían escribir en una postal, dejando alguna parte en blanco*”.

Para el desarrollo del tercer ingenio, la A3, la marina Alemana envió a un reconocido especialista en el problema de estabilización y alineamiento de las torretas de tiro, el clásico problema del control de la segunda guerra mundial. Sin embargo este ingenio no se terminó de construir dado que el mecanismo de control se reveló inadecuado. Después de lo cual se desarrolla un nuevo sistema de control bastante avanzado para la época. Este sistema utilizaba giróscopos y acelerómetros como elementos sensores y disponía de servomotores eléctricos que podían efectuar pequeños y precisos movimientos, contruidos en molibdeno, un material resistente a altas temperaturas, y encargados de controlar el suministro de gas a las turbinas del cohete.

Para estudiar la dinámica del sistema se construyó un simulador mecánico, cuyo diseño se basó en los registros obtenidos de los vuelos de los primeros ensayos mediante radiotelegrafía (otro desarrollo pionero). En este momento, Willy Ley hubiera necesitado al menos doce docenas de postales.

Esta concentración de esfuerzos en resolver los problemas de control y estabilidad condujo al desarrollo de la unidad A4, que Goebbels después denominaría V2-V de Vergeltungswaffe (misil de justo castigo o pena merecida). Ya en las primeras pruebas

efectuadas por este misil se le equipó con un potente equipo de radio con el objetivo de realizar medidas mediante telemetría y también disponía de un sistema de radiocontrol en fase de pruebas. En 1943 un misil A4 se estrelló en la zona de Borholm en Dinamarca, siendo recuperados sus restos por agentes de aquel país que se encargaron de enviar fotografías y dibujos a Inglaterra vía Estocolmo. En el verano de 1944 otro misil se estrelló al sur de Suecia, este fue entregado a los aliados, los cuales se alarmaron ante lo que se veía venir. Los aliados concluyeron erróneamente que estos ingenios estaban guiados por radio. Nada más lejos de la realidad, las pruebas realizadas por los investigadores alemanes afirmaban que les era imposible controlar los misiles con la debida precisión. Los ingenios eran alineados hacia su objetivo (primero fue París y después Londres), pero una vez habían sido lanzados era imposible modificar la trayectoria del misil.

Durante las últimas fases de la segunda guerra mundial en la base de Peenemünde se llegaron a realizar proyectos sobre misiles transatlánticos (la unidad A6)...Incluso la Gestapo llegó a arrestar a Wernher von Braun por haber hablado abiertamente de la posibilidad de enviar objetos al espacio. Fue liberado gracias a la mediación del director de la base de Peenemünde, que explicó a altos oficiales de la Gestapo que las ideas de von Braun contribuían a la creación de nuevos y más potentes *misiles de justo castigo*. Cuando Alemania esta ya prácticamente derrotada, en mayo de 1945, la base de Peenemünde junto con todo su arsenal de cohetes cayó en manos de los aliados, y en Julio de ese mismo año trescientos vagones de tren cargados de cohetes A4 llegaron a una base de Nuevo Méjico. También se traslado allí todo el equipo científico alemán que continuó con su labor de investigación.

El resto de la historia es de sobra conocida por todos nosotros. *¿Llegará alguno de nuestros hijos al Planeta Rojo?*

### **Los años clásicos: 1945-1955**

Desde el punto de vista del desarrollo de las técnicas de diseño de control automático, el principal resultado de este gran esfuerzo y experiencia fue extender rápidamente la utilización de las ideas de respuesta en frecuencia a todos los campos y producir así una teoría unificada y coherente para los sistemas realimentados con un único lazo.

Coincidiendo con la segunda guerra mundial, el matemático Wiener desarrolla la *teoría estocástica clásica*, la cual tuvo su inicio en el estudio del problema de automatización de un cañón aéreo. En este trabajo se da un enfoque radicalmente distinto del estudio del problema del control, y supone el inicio de la conocida como teoría estocástica clásica. Las aportaciones de Wiener consisten en considerar la presencia de ruidos en las señales, e introduce también el concepto de control óptimo, cuyo objetivo consiste en minimizar un determinado criterio que define la calidad del control, en este caso minimiza la superficie de error cuadrático [Wiener 49].

Wiener también establece la relación entre estos ingenios autogobernados y determinados procesos que suceden en los seres vivos. Todo ello, conduce a la formulación de lo que se denominaría *cibernética* en su trabajo "Cybernetics" de 1948 publicado por el MIT press [Wiener 48].

A finales de la década de los cuarenta, surgen otras dos vías de desarrollo de la teoría de control: el Método del modelo de Truxal [Truxal 54] y el método del lugar de las Raíces,

de Evans. Se presentan también aportaciones como la extensión de los métodos frecuenciales a sistemas no-lineales y a sistemas estocásticos.

El método del modelo es una adaptación del método de Guillemin desarrollado inicialmente para el diseño de redes pasivas. Partiendo de las especificaciones deseadas se obtiene la función de transferencia que debe seguir el sistema de control. El cálculo de la función de transferencia del regulador se realiza fácilmente por medio de operaciones algebraicas. Este método resultaba atractivo dado que no utiliza la técnica de prueba y error. Pero se manifestaban en él algunas dificultades prácticas como podían ser la complejidad de los correctores que se obtienen, que dejaban de tener la estructura clásica PID.

Los trabajos de Evans:

“Graphical Analysis of Control Systems” [Evans 48].

“Control System Synthesis by Root Locus Method” [Evans 50].

ambos recogidos en [Thaler 74], constituyen la última gran contribución a la teoría clásica de control. En palabras del propio autor “el lugar de las raíces determina todas las raíces de la ecuación diferencial de un sistema de control por medio de una representación gráfica, la cual permite una síntesis rápida de la respuesta transitoria o frecuencial deseada”.

El método de Evans cuenta con el handicap de no poder abordar el análisis de sistemas con retraso puro y la difícil estimación de la respuesta temporal de sistemas con distribuciones dispersas de polos y ceros. A su favor, aporta un método gráfico de estimar la influencia de variaciones en los parámetros del sistema o del regulador sobre la estabilidad y el comportamiento dinámico de los sistemas.

### ***Primeros pasos del control por computador.***

Como la rotación de un radar de seguimiento solamente ilumina a su blanco de forma intermitente, muchos de los sistemas de control de tiro desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial tuvieron que diseñarse para tratar con datos que estaban disponibles de forma pulsada o muestreada.

Los computadores desarrollando funciones de control de procesos son elementos que trabajan por ciclos. No trabajan en tiempo continuo sino en tiempo discreto. El computador necesita un tiempo para adquirir las entradas (mando y realimentaciones), calcular las acciones, y para volcar las acciones sobre el sistema, que consiste en un proceso de conversión digital-analógico. Este ciclo se ejecuta cada cierto intervalo de tiempo o período de muestreo por lo que los computadores trabajan en tiempo discreto. Por lo tanto la teoría de los sistemas continuos desarrollada hasta entonces era inservible.

Las bases para un tratamiento efectivo de los sistemas muestreados fueron establecidas por Hurewicz, quien desarrolló una extensión apropiada del criterio de estabilidad de Nyquist para este tipo de sistemas. El posterior desarrollo de las técnicas de cálculo digital iba pronto a conducir a un campo de investigación muy activo sobre tales sistemas discretos. Shanon en 1948 estudia los procesos de muestreo y reconstrucción de señales con presencia de ruido [Shanon 48].

Los sistemas de control digital que operan sobre plantas de naturaleza continua, requieren técnicas de análisis que permitan que ambas clases de sistemas, continuos y discretos, así como sus interconexiones a través de interfaces adecuadas se puedan ver desde un punto de vista unificado. Este trabajo lo desarrolló Linvilí en el dominio transformado.

La teoría de sistemas muestreados es llevada a cabo, entre otros, por Balkar, Ragazzini, Zadeh y Salzer. El impulso definitivo para el estudio de esta clase de sistemas se debe al grupo del Prof. Ragazzini en la Universidad de Columbia en la década de los 50. Entre sus integrantes figuraban investigadores de la talla de Zadeh, Kalman, Jury, Frandlin, Bertram, Bergen, Friedland, Slansky y Kranck entre otros.

Salzer en 1954 introduce la transformada  $Z$ , la cual permite que los resultados obtenidos en el estudio de los sistemas continuos se puedan aplicar a los sistemas discretizados en el tiempo. Esto hace que se desarrollen los estudios que pretenden trasladar al campo discreto los resultados obtenidos para el campo continuo.

A finales de la década de los cincuenta, los trabajos de Jury en 1958, "Sampled data control Systems" con su criterio de estabilidad, los de Ragazzini y Franklin también en 1958 con idéntico título al de Jury, y el trabajo de Tou de 1959 "Digital and Sampled Data Control Systems" terminan por definir y establecer la teoría clásica de los sistemas muestreados.

## **5 Teoría moderna de control.**

A partir del año 1955, se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de las computadoras digitales, que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo.

Aparece un nuevo método de diseño de control, conocido a partir de entonces como teoría de control moderna. Se basaba en representar los sistemas en variables de estado o representación interna y trabajando casi exclusivamente en el dominio del tiempo.

La primera formulación en términos de estado, función de transición y de lectura, se hizo en el marco de la teoría de máquinas discretas formulada por Turing, en 1936.

Los investigadores de la Unión Soviética son los primeros que utilizan el método de descripción interna en el estudio de los sistemas continuos. Destacan los trabajos de Aizerman, Lerner, Lurie, Pontryagin, La Salle, Popov, Minorsky, Kabala y Bellman.

La teoría de control moderna esta basada en el concepto de estabilidad de Liapunov presentado a finales del siglo XIX. Los trabajos desarrollados por Lurie sobre servomecanismos de posicionamiento de torretas de tanques dieron lugar al concepto de estabilidad absoluta, generalizada después por Popov con el concepto de hiperestabilidad, que considera no linealidades en la realimentación.

Los criterios de controlabilidad y observabilidad de sistemas dinámicos lineales, se deben a Kalman, aunque la noción de controlabilidad fue utilizada anteriormente por Pontryagin.

Los métodos de control óptimo se basan en los trabajos de físicos de los siglos XVII a XIX, entre los que destaca Euler, con su cálculo de variaciones. En el desarrollo de estos métodos se deben destacar los trabajos de Pontryagin, La Salle, Bellman y Kalman.

Kalman efectúa la resolución de los problemas de control óptimo cuadrático y lineal cuadrático gaussiano.

Zadeh generaliza los resultados de teoría de circuitos a sistemas en el espacio de estados y Luenberger en 1966 lo hace en lo que concierne al diseño de observadores.

En el control algebraico, basado en la utilización de matrices polinomiales y racionales, hay que hacer mención de los trabajos de Kalman, Rosebrock y Wolowich. Son métodos que utilizan la descripción externa. Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se presenta el enfoque geométrico del problema de control, que utiliza métodos del álgebra lineal. En paralelo se desarrollan los métodos de identificación de sistemas, por mínimos cuadrados y de máxima verosimilitud, este último fue desarrollado por Fisher en 1912 y aplicado en sistemas industriales por Åström y Bohlin en 1965.

También se desarrollan las técnicas de control adaptativo. Desde un punto de vista conceptual, las técnicas adaptativas aparecen cuando se transvasan a la máquina comportamientos inherentes al hombre: La adaptación, no en términos de decisiones (conseguida con la realimentación simple), sino en término de estructuras para la decisión.

Las Estructuras de Control adaptativas que han tenido mayor impacto técnico son:

- Sistemas Auto-Ajustables.
- Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia (S.A.M.R.).

El concepto de regulador autoajustable fue propuesto inicialmente por Kalman, utilizando un método de identificación de mínimos cuadrados recursivos en su artículo "Design of a self-optimizing control system" [Kalman 58], otro sistema, basado en la minimización de la varianza de salida es desarrollado por Peterka en 1970, y por Åström y Witenmark en [Åström 73]. Se consideraba el problema en un entorno estocástico.

La técnica de los sistemas autoajustables se basa en que si se dispone de un método válido de diseño de reguladores que parte del conocimiento del modelo del proceso, para realizar un control que se adapte a los cambios en el proceso basta con acoplar ese método de diseño de reguladores con un procedimiento de identificación en línea. Para ello se supone, evidentemente, que existe una separación entre las tareas de identificación y control. Se dispondrá de un "calculador" que en paralelo al control se encarga de calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador. Este "calculador" consiste en un estimador recursivo de los parámetros del sistema o proceso controlado. Los resultados del estimador servirán para calcular los valores óptimos de los coeficientes del regulador.

El principal inconveniente de esta aproximación es que la estabilidad no llega a asegurarse en el caso general.

Los sistemas adaptativos con modelo de referencia (SAMR) fueron propuestos por los investigadores del M.I.T. Whitaker, Narmon y Kezer en 1958 al estudiar los servomecanismos con ganancia variable en la publicación "Desing of a Model Reference Adaptive System for Aírcraft" [Whitaker 58].

Los Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia se basan en otro concepto muy simple: se desea que el comportamiento del proceso sea “idéntico” al de un modelo que se da como referencia. Si existe diferencia entre las salidas del proceso y del modelo un mecanismo de adaptación intenta minimizarla con el ajuste de los parámetros del regulador, o añadiendo una variación en la acción sobre el sistema físico.

Esta aproximación alcanzó un primer paso hacia su madurez teórica con el trabajo de Parks “Model Reference adaptative methods. Redesign using Liapunov’s second method” [Parks 76]. De esta forma se pudo garantizar la estabilidad global del sistema adaptativo. Posteriormente, Landau en su trabajo. “Adaptative Control. The model reference approach” [Landau 79] utiliza la teoría de la hiperestabilidad de Popov en el diseño de SAMR.

A pesar de las diferencias aparentes entre las dos aproximaciones, SAMR y SAA, se han publicado últimamente gran cantidad de trabajos orientados a mostrar sus semejanzas. Quizás se pueda comenzar a hablar de una teoría unificada de los sistemas adaptativos.

En principio se llegó a pensar que la teoría de control moderna conduciría a un método de diseño de sistemas de control bien definido, sencillo y que pudiera ser mecanizado.

Pero se tuvo que admitir que la bondad del diseño dependía de la bondad del modelo y de las especificaciones que se emplean para desarrollarlos.

Se han llegado a desarrollar métodos mecanizados de diseño en el dominio de la frecuencia que son equivalentes a los métodos de diseño de variable de estado cuando la estructura del control es coincidente.

## 6 El computador en el control de procesos industriales

La aplicación del computador en el control de procesos supone un salto tecnológico enorme que se traduce en la implantación de nuevos sistemas de control en el entorno Industria y posibilita el desarrollo de la navegación espacial. Desde el punto de vista de la aplicación de las teorías de control automático el computador no está limitado a emular el cálculo realizado en los reguladores analógicos. El computador permite la implantación de avanzados algoritmos de control mucho más complejos como pueden ser el control óptimo o el control adaptativo. El objetivo en un principio era sustituir y mejorar los reguladores analógicos, pero este objetivo se fue ampliando dada las capacidades de los computadores en realizar un control integral de las plantas de fabricación, englobando también la gestión de la producción.

### *Aplicaciones del Computador.*

Las principales aplicaciones industriales del computador son:

- **Adquisición de datos.** Consiste en la recogida, tratamiento y almacenamiento de los datos.
- **Supervisión.** En esta función el computador no efectúa directamente el control de proceso. Se conecta a los controladores del proceso (autómatas, reguladores PID...) por medio de un sistema de comunicación serie o por una red de comunicaciones industrial. La principal función es la ayuda al operador de

planta. El computador suministra al computador unas informaciones elaboradas como pueden ser alarmas, tratamiento de fallos, procedimientos de rearme.

- **Control secuencial.** En esta función el computador suele tomar la forma de autómatas programables, en el cual se ejecutan programas de control de sistemas secuenciales.
- **Control analógico digital.** Es una forma de control que se utilizaba con los primeros computadores en la cual el computador se encargaba de elaborar la consigna de los bucles analógicos.
- **Control digital directo.** El computador ejecuta directamente el control del proceso continuo. Toma la forma de regulador industrial o de computador industrial con tarjetas de interface con el proceso.
- **Análisis de datos.** Función clásica de los computadores de gestión en el que se analizan los datos de producción por medio de herramientas de ofimática.

Las ventajas del uso del computador en el control de procesos son múltiples, entre ellas se podría nombrar una mayor eficacia de las operaciones, mayor seguridad y una reducción drástica de las operaciones manuales.

#### ***Evolución histórica de la tecnología del control por computador aplicada al control de sistemas continuos.***

El desarrollo de la tecnología del computador aplicada al control de procesos industriales, recibió a finales de los años cincuenta un gran impulso debido a que existían industrias como las refinerías de petrolíferas donde los procesos a controlar en este tipo de plantas son complicados. Los sistemas de control disponibles estaban bastante limitados, implicando en el proceso de fabricación a gran cantidad de mano de obra, como sucedía en la Industria de producción de papel. La calidad de la producción dependía en muchos casos de la experiencia del operario y de su rapidez de reacción ante situaciones anómalas. Era por decirlo un control semiautomático y semimanual. Los operarios eran quienes decidían cuales eran las referencias de mando más adecuadas para el sistema de control analógico.

El primer trabajo sobre la aplicación del computador al control Industrial aparece en un artículo realizado por Brown y Campbell en el año 1950.

Brown, G.S., Campbell, D.P.: *Instrument engineering: its growth and promise in process-control problem* [Brown 50].

En dicho artículo aparece un computador controlando un sistema mediante bucle de realimentación y prealimentación. Los autores asumen que los elementos de cálculo y control del sistema deben ser computadores de cálculo analógicos, pero sugieren el posible uso de un computador digital.

Las primeras aplicaciones de los computadores digitales al control industrial se realiza a finales de los años 50. La iniciativa no parte como cabría suponer de la industria del control y manufactura, sino de los fabricantes de computadoras y de sistemas electrónicos que buscaban nuevos mercados para dar salida a productos que no se habían terminado de adaptar a las aplicaciones militares.

La primera instalación industrial de un computador la realiza la compañía de suministro eléctrico “Louisiana Power and Light” que instaló en septiembre de 1958 un ordenador Daystrom para monitorizar la planta de producción de energía en Sterling, Louisiana. Pero este no era un sistema de control industrial. Su función era supervisar el correcto funcionamiento de la instalación.

El primer computador dedicado a control industrial se instaló en la refinería de Port Arthur, en Texas. La compañía Texaco Company instaló un RW-300 de la casa Ramo-Wooldridge. La refinería comenzó a funcionar controlada en bucle cerrado por computador el 15 de Marzo de 1959.

En los años 1957-1958 la compañía química Monsanto en cooperación con Ramo-Wooldridge estudian la posibilidad de instalar control por computador. En octubre de 1958 deciden implantar un sistema de control en la planta de la ciudad de Luling, dedicada a la producción de amoniaco. Comenzó a funcionar el 20 de enero de 1960, pero tenían grandes problemas con el ruido que se introducía en las realimentaciones. Este sistema como otros muchos basados en el ordenador RW- 300 no realizaban un control digital directo sobre las plantas, sino que eran sistemas supervisores dedicados a calcular las referencias óptimas de los reguladores analógicos. Este sistema se denomina control analógico-digital (DAC) o control supervisor. Se debe observar que este esquema de control fue protegido por una patente (EXNER Patent), lo cual ha limitado su aplicación.

En 1961 la Monsanto comienza a diseñar un control digital directo (DCC) para una planta en Texas city y un sistema de control jerarquizado para el complejo petroquímico de Chocolate Bayou. En el control digital directo el computador controla directamente el proceso, tomando medidas del proceso y calculando la acción a aplicar.

El primer control digital directo se instala en la planta de amoniaco y soda de la compañía Imperial Chemical Industries en Fleetwood (Reino Unido), mediante un ordenador Ferranti Argus 200. Comenzó a funcionar en noviembre de 1962.

El sistema disponía de 120 bucles de control y efectuaba la medida de 256 variables. Actualmente se utilizan 98 bucles y 224 medidas en esta instalación de Fleetwood. En la instalación se sustituyeron los antiguos reguladores analógicos por el computador digital que realizaba sus mismas funciones.

Los computadores utilizados en los primeros años 60 combinaban memorias magnéticas y el programa se almacenaba en programadores cíclicos rotativos. En estas primeras aplicaciones la solución de determinados problemas suponía un incremento en el coste del sistema. Esto llevo a que en un mismo computador se implementarán las dos tareas principales supervisión y control digital directo.

Las dos tareas funcionaban a una escala de tiempo muy diferente. La tarea del control digital directo tenía que tener prioridad sobre la supervisión. El desarrollo del programa se realizaba por personal muy especializado y el lenguaje era puro código máquina. Además aparecían problemas debido al aumento de la cantidad de código, en cambio la capacidad de memoria de los ordenadores era bastante limitada. Lo cual conllevaba que se tenia que descargar parte de la memoria del ordenador para cargar el código de la otra tarea.

La mejora de los sistemas de control por computador condujo a sistemas que ejecutaban el control digital directo en un ordenador y en el mismo o en otro ordenador se ejecutaba un programa encargado de elaborar las consignas.

A finales de los años sesenta y principios de los setenta se desarrollan los Minicomputadores que encuentran gran aplicación en el control de procesos industriales. En pocos años el número de ordenadores dedicados a control de procesos pasa de 5000 en 1970 a 50000 en 1975.

Estos Minicomputadores disponían de una memoria de hasta 124 Kbytes, disco duro y de unidad de disco flexible para almacenamiento.

### ***Un computador para un solo proceso.***

En la década de lo sesenta la complejidad y prestaciones de los sistemas de control se incrementan gracias al empleo de circuitos integrados y en particular los microprocesadores.

El desarrollo en la década de los 70 del microprocesador permite que llegue a ser rentable el dedicar un computador para el control de un solo proceso. Aplicaciones del ordenador al control de procesos que antes no eran rentables instalarlas, dado que el control analógico era mucho más barato, se vuelven competitivas. Incluso esta reducción de costes permite que se empiecen a desarrollar sistemas de control por computador encargados de controlar una sola máquina eléctrica.

Además de la razón económica, una de las razones que impedía que se implantará los controles digitales sobre máquinas eléctricas era la excesiva rapidez de los accionamientos electromecánicos, con constantes de tiempo en muchos casos bastante inferiores al segundo (comparemos con los procesos químicos). Esto hacia imposible que un computador calculará el algoritmo de control en el período de muestreo marcado por el diseño del controlador.

Los primeros controles digitales se implantan sobre máquinas de corriente continua, que presentan un modelo matemático muy sencillo de tratar. Los esfuerzos se vuelcan en el desarrollo de controles digitales sobre motores síncronos y asíncronos que permitieran obtener a los accionamientos prestaciones de precisión y dinámica de par comparables a los de continua, con el objeto de utilizar un motor mucho más barato (asíncrono) que no presentará los problemas de los motores de continua.

Los primeros controles digitales consistían en la simple emulación programada de los algoritmos de control clásicos, pero la aplicación de las modernas técnicas del control ha permitido desarrollar aplicaciones de control vectorial, las cuales, en accionamientos de motores asíncronos proporcionan una calidad en la respuesta dinámica superior a los accionamientos de motores de corriente continua. En el momento actual existe toda una amplia gama de microcontroladores especializados en el control de máquinas eléctricas.

### ***Control en tiempo real.***

Los requisitos del control de tiempo real se manifiestan en una de sus características principales: las restricciones temporales a que esta sometido. Estas son inherentes al funcionamiento de los sistemas de tiempo real. Para tareas periódicas de control, vienen impuestas por el período de muestreo con que se debe ejecutar el algoritmo de control. Para otro tipo de tareas periódicas como pueden ser tareas de tratamiento de datos, tareas gráficas o de supervisión, tareas de comunicación las restricciones temporales no son tan estrictas y muchas veces el diseñador de las aplicaciones dispone de un margen donde elegir.

Estas restricciones temporales también implican prioridad de ejecución, siendo comúnmente las tareas dedicadas al control las más frecuentes y por lo tanto las que se deben ejecutar con mayor prioridad, interrumpiendo en el caso de los sistemas monoprocesadores a todas las demás tareas. También pueden existir tareas de control que se ejecuten con períodos grandes como en las aplicaciones de control de variables lentas como la temperatura, existiendo algunas otras tareas con períodos de ejecución menor. Pero la tarea de control es la más crítica dado que es la que actúa de interface con el proceso y debe *garantizar* su correcto funcionamiento.

Para las tareas activada como respuesta a eventos, las restricciones vienen impuestas por los márgenes de seguridad y buen funcionamiento del proceso a controlar. Por ejemplo las acciones que se deben producir ante la aparición de una parada de emergencia, deberán producirse en un tiempo mínimo que intente garantizar al máximo la seguridad de los operarios en primer lugar y del proceso controlado en segundo lugar.

Las aplicaciones de control militar, misiles, sistemas de tiro, sistemas anti-misiles se pueden considerar igual o más críticas que algunas aplicaciones industriales (no olvidemos las centrales nucleares). Por lo cual se establece también la necesidad de que los sistemas de control de tiempo real incorporen mecanismos que garanticen una alta tolerancia a fallos.

Se puede establecer una nueva clasificación entre sistemas de tiempo real críticos y acrílicos. Los sistemas de tiempo real críticos son aquellos en que los plazos de respuesta de todas las tareas deben respetarse bajo cualquier circunstancia. En estos sistemas el incumplimiento de un plazo de respuesta, podría acarrear un mal funcionamiento o un accidente en el proceso o aplicación militar controlada. En los sistemas de tiempo real acrílicos se puede incumplir ocasionalmente el plazo de respuesta de alguna tarea.

Hilando más fino, en un sistema de tiempo real se debe distinguir entre tareas críticas (control, emergencia...) y acrílicas (representación gráfica, tratamiento de datos)

### ***Hardware y software de los sistemas de tiempo real.***

Todo estas consideraciones conllevan que el hardware y el software de los sistemas de tiempo real deban cumplir una serie de condiciones. En el hardware conduce al desarrollo de los elementos adecuados que sirvan de interface con el proceso y de gestión de las restricciones temporales. Así se van desarrollando periféricos especializados como tarjetas de adquisición de datos con conversores analógico/digitales y digitales/analógicos. Tarjetas con relojes de alta precisión que unidos a sistemas de interrupciones evolucionados permiten atender correctamente los requisitos temporales de las aplicaciones de control en tiempo real.

En los años 70 se desarrollan nuevos sistemas de computación repartidos que podían adoptar estructuras centralizadas o distribuidas. En los sistemas centralizados las decisiones del control las toma el computador central, pero alrededor de él se acoplan una serie de periféricos, algunos de ellos especializados capaces de realizar determinadas tareas. Estos periféricos intercambian datos con y reciben ordenes del ordenador central por medio de una red de comunicaciones.

Los sistemas descentralizados o distribuidos consisten en un conjunto de unidades de control que pueden tomar decisiones autónomas, intercomunicándose por medio de una red de comunicaciones.

Desde el punto de vista del software los lenguajes y también las metodologías de desarrollo de las aplicaciones deben suministrar las herramientas y mecanismos necesarios para que los sistemas de control de tiempo real cumplan todas las características de restricciones temporales, tolerancia a fallos y seguridad de funcionamiento.

Los primeros programadores utilizaban directamente el lenguaje ensamblador, dado que permitían un uso eficiente de los muy limitados recursos disponibles entonces. Visto desde la perspectiva de los medios actuales su empleo hace costosa la programación y prácticamente imposible la modificación. Además es un lenguaje demasiado dependiente de la máquina en concreto.

Los siguientes pasos consistieron en añadir extensiones a los lenguajes de programación clásicos de los años 70 como el Fortran (Process Fortran), el Basic y el Algol. Estos cuentan con la ventaja de poseer un nivel de abstracción más alto, pero dependen del sistema operativo para las funciones de concurrencia y temporización, además suele ser necesario realizar algunas funciones en ensamblador. A estos lenguajes se le añade una serie de funciones y mecanismos:

- Funciones para ejecución en tiempo real ( run time system, tareas...)
- Bibliotecas de funciones software que dan al programador un cierto nivel de comodidad a la hora de trabajar con la interface del proceso o con el control del tiempo de ejecución.
- Compiladores que generen un código eficaz.

El camino andado ha conducido al desarrollo de los lenguajes concurrentes (Modula-2, Occam, Ada). En estos, las funciones que posibilitan la gestión de la concurrencia y de las restricciones temporales forma parte del propio lenguaje. Además permiten el acceso a recursos de bajo nivel evitando el uso del ensamblador.

El lenguaje Modula-2 es un descendiente del Modula y del Pascal. Las funciones de concurrencia y restricciones temporales se realizan en un módulo específico denominado núcleo. Es un lenguaje que se muestra adecuado para el desarrollo de aplicaciones de tamaño pequeño a medio. El lenguaje Occam es un lenguaje asociado a la plataforma Transputer. No es adecuado para el desarrollo de grandes aplicaciones.

Estos dos lenguajes están prácticamente abandonados, en el caso del Occam al dejarse de fabricar el transputer. El lenguaje que se ha convertido en un estándar para el desarrollo de sistemas de tiempo es el lenguaje ADA.

Su nombre rinde honor a Lady Ada de Lovelace, la cual fue colaboradora de Charles Babbage. El ADA, cuyo primer estándar se definió en 1983, se diseñó y desarrolló por encargo del Departamento de defensa de los Estados Unidos, orientado a la programación y desarrollo de sistemas empujados. ADA integra la noción de tipo abstracto y un mecanismo que permite expresar la cooperación y comunicación entre procesos. Sus principales características son:

- Soporta tecnologías de software avanzadas.
- Incluye concurrencia, tiempo real, acceso a recursos de bajo nivel y un potente tratamiento de excepciones.

- Transportabilidad, legibilidad, eficiencia, seguridad.

ADA es un lenguaje definido para el desarrollo y programación de aplicaciones complejas como pueden ser las aplicaciones de control de ingenios militares. El ADA se ha convertido en una de las opciones disponibles para el desarrollo de sistemas de tiempo real en el ámbito industrial, sobre todo en Europa. Las limitaciones detectadas en el estándar del año 83 fueron corregidas en el estándar del 95. El ADA 95 permite la programación orientada a objetos, presenta mejoras en el tratamiento de la concurrencia y tiempo real. También se definieron anexos especializados en aplicaciones distribuidas, sistemas de información...

## 7 **Autómatas en la historia.**

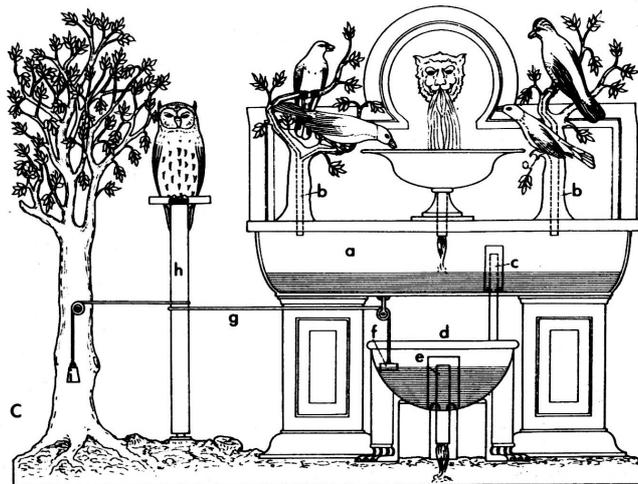
Antiguamente, se creaban artefactos capaces de realizar tareas diarias y comunes para los hombres, o bien, para facilitarles las labores cotidianas; se daban cuenta de que había tareas repetitivas que se podían igualar con un complejo sistema, y es así como se comienza a crear máquinas capaces de repetir las mismas labores que el hombre realizaba.

Pero no todos estos artefactos tenían una utilidad, algunas máquinas solamente servían para entretener a sus dueños, y no hacían nada más que realizar movimientos repetitivos ó emitir sonidos. Cabe mencionar que los árabes fueron unos maestros en la construcción de autómatas y en la precisión de sus cálculos, y como ejemplo de ello, se puede mencionar que inventaron el reloj mecánico, así como sus grandes aportaciones a la astrología. También los ingenieros griegos aportaron grandes conocimientos a los autómatas, aunque su interés era más bien hacia el saber humano más que hacia las aplicaciones prácticas.

Los primeros autómatas que aparecen en la historia son ingenios mecánicos más o menos complicados que desarrollaban un programa fijo, que no empleaban necesariamente la noción de realimentación.

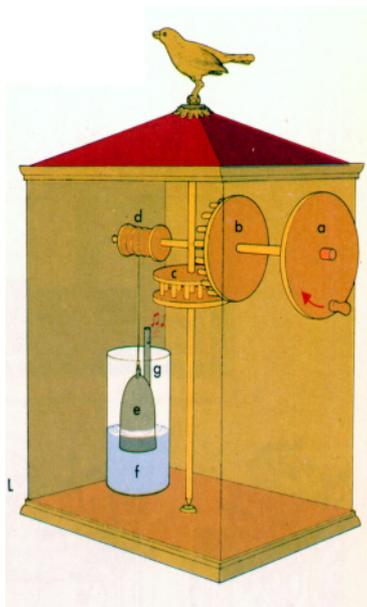
Los primeros ejemplos de autómatas se registran en la antigua Etiopía. En el año 1500 a. C., Amenhotep, hermano de Hapu, construye una estatua de Memon, el rey de Etiopía, que emite sonidos cuando la iluminan los rayos del sol al amanecer.

King-su Tse, en China, en el 500 a. C. inventa una urraca voladora de madera y bambú y un caballo de madera que saltaba. Entre el 400 y 397 a. C., Archytar de Tarento construye un pichón de madera suspendido de un pivote, el cual rotaba con un surtidor de agua o vapor, simulando el vuelo. Archytar es el inventor del tornillo y la polea. En el año 206 a. C., fué encontrado el tesoro de Chin Shih Hueng Ti consistente en una orquesta mecánica de muñecos, encontrada por el primer emperador Han.



**Figura 21 Pájaros de Herón [Standh 89].**

En el año 62 Heron de Alejandría describe múltiples aparatos en su libro “Autómata”. Entre ellos aves que vuelan, gorjean y beben. Todos ellos fueron diseñados como juguetes, sin mayor interés por encontrarles aplicación. Sin embargo, describe algunos como un molino de viento para accionar un órgano o un precursor de la turbina de vapor.



**Figura 22. Caja mágica de Heron [Standh 89].**

También se diseñan ingeniosos mecanismos como la máquina de fuego que abría puertas de los templos o altares mágicos como el de la Figura 23 donde las figuras apagaban el fuego de la llama.

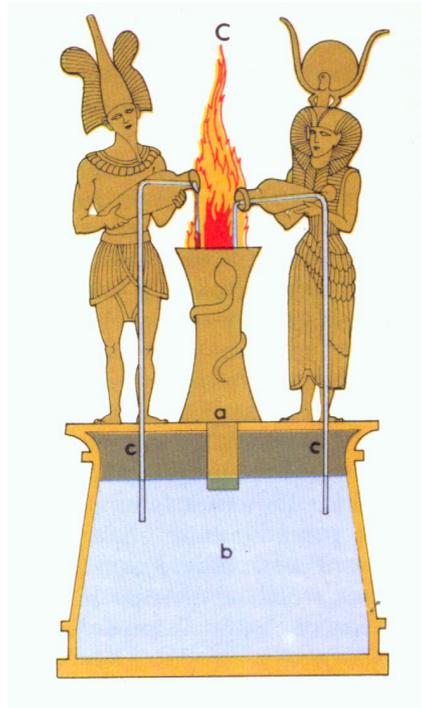


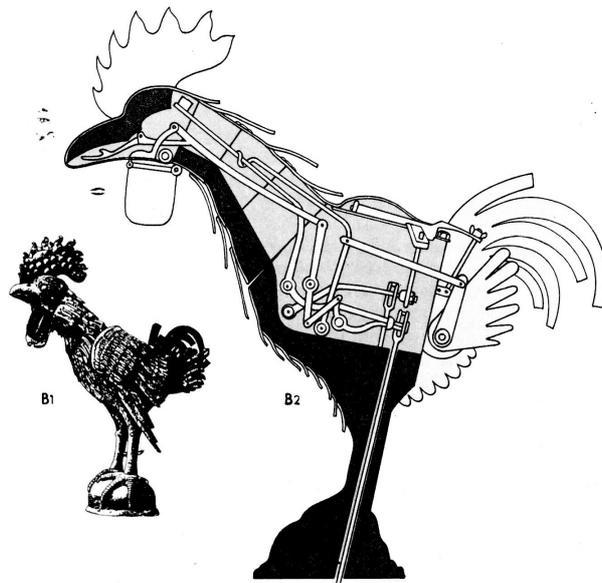
Figura 23. Altar mágico [Standh 89].

En Roma existía la costumbre de hacer funcionar juguetes automáticos para deleitar a los huéspedes. Trimalco ofreció en su famoso banquete, pasteles y frutas que arrojaban un chorro de perfume cuando se hacía una ligera presión sobre un priapo de pasta, en cuyo regazo estaban colocados pasteles y frutas.

La cultura árabe, heredó y difundió los conocimientos griegos, utilizándolos no sólo para realizar mecanismos destinados a la diversión, sino que les dieron una aplicación práctica, introduciéndolos en la vida cotidiana de la realeza. Ejemplos de estos son diversos sistemas dispensadores automáticos de agua para beber o lavarse.

También de este período son otros autómatas, de los que hasta nuestros días sólo han llegado referencias no suficientemente documentadas, como el hombre de hierro de Alberto Magno (1204-1282) o la cabeza parlante de Roger Bacon (1214-1294). En el año 1235, Villard d'Honnecourt escribe un libro con bocetos que incluyen secciones de dispositivos mecánicos, como un ángel autómatas, e indicaciones para la construcción de figuras humanas y animales.

Otro ejemplo relevante de la época fue el Gallo de Estrasburgo que que funcionó desde 1352 hasta 1789. Este es el autómatas más antiguo que se conserva en la actualidad, formaba parte del reloj de la catedral de Estrasburgo y al dar las horas movía el pico y las alas.



*Figura 24. Gallo de Estrasburgo [Standh 89].*

Durante los siglos XV y XVI algunos de los más relevantes representantes del renacimiento se interesan también por los ingenios descritos y desarrollados por los griegos. Es conocido el León Mecánico construido por Leonardo da Vinci (1452-1519) para el rey Luis XII de Francia, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del rey. En España es conocido el hombre de palo construido por Juanelo Turiano en el siglo XVI para el emperador Carlos V. Este autómata con forma de moje, andaba y movía la cabeza, ojos boca y brazos.

Durante los siglos XVII y XVIII se crearon ingenios mecánicos que tenían alguna de las características de los robots actuales. Estos dispositivos fueron creados en su mayoría por artesanos del gremio de la relojería. Su misión principal era la de entretener a las gentes de la corte y servir de atracción a las ferias. Estos autómatas representaban figuras humanas, animales o pueblos enteros. Así, en 1649, cuando Luis XIV era niño, un artesano llamado Camus (1576-1626) construyó para él un coche en miniatura con sus caballos, sus lacayos y una dama dentro y todas las figuras se podían mover perfectamente. Salomón de Camus también construyó fuentes ornamentales y jardines placenteros, pájaros cantarines e imitaciones de los efectos de la naturaleza.

Según P. Labat, el general de Gennes construyó en 1688 un pavo real que caminaba y comía. Este ingenio pudo servir de inspiración a Jacques de Vaucanson (1709-1782) para construir su increíble pato mecánico que fue la admiración de toda Europa. Según Sir David Brewster en un escrito de 1868, describe este pato diciendo que es “la pieza mecánica más maravillosa que se haya hecho”. El pato alargaba su cuello para tomar el grano de la mano y luego lo tragaba y lo digería. Podía beber, chapotear y graznar, y también imitaba los gestos que hace un pato cuando traga con precipitación. Los alimentos los digería por disolución y se conducía por unos tubos hacia el ano, donde había un esfínter que permitía evacuarlos.

Vaucanson también construyó varios muñecos animados, entre los que destaca un flautista capaz de tocar melodías. El ingenio consistía en un complejo mecanismo de aire que causaba el movimiento de dedos y labios, como el funcionamiento normal de una

Ramón Piedrafita Moreno.

flauta. Por instigación de Luis XV, intento construir un modelo con corazón, venas y arterias, pero murió antes de poder terminar esta tarea.

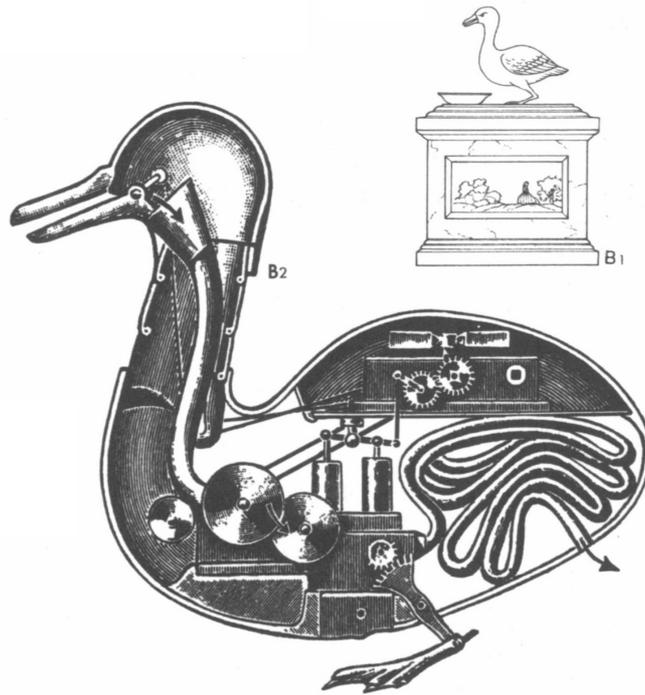


Figura 25. Pato de Vaucanson [Standh 89].

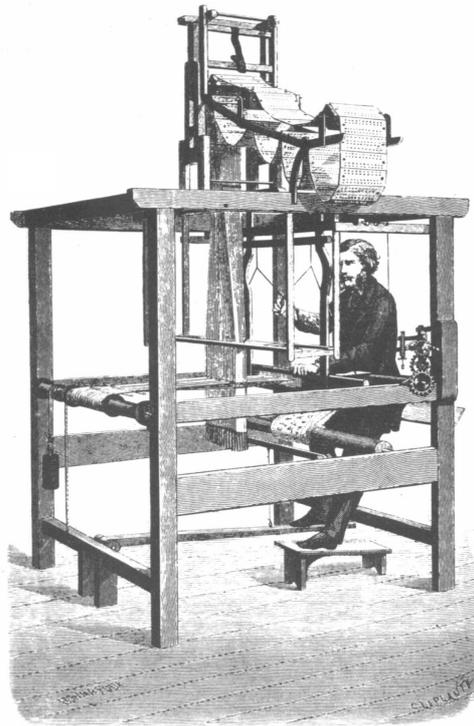
También construyó muchos objetos útiles para la industria como una silla para los tejedores, pero eso suscitó el disgusto de los fabricantes de seda franceses, quienes lo amenazaron de muerte.

El relojero suizo Pierre Jaquet Droz (1721-1790) y sus hijos Henri-Louis y Jaquet construyeron diversos muñecos capaces de escribir (1770), dibujar (1772) y tocar diversas melodías en un órgano (1773). Estos se conservan en el museo de arte e Historia de Neuchâtel, Suiza.

Los Maillardet (Henri, Jean-David, Julien-Auguste, Jacques-Rodolphe) entre finales del siglo XVIII y principios del XIX, construyen un escritor-dibujante, con la forma de un chico arrodillado con un lápiz en su mano, escribe en inglés y en francés y dibuja paisajes. Construyen un mecanismo “mágico” que responde preguntas y un pájaro que canta en una caja.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se desarrollaron algunas ingeniosas invenciones mecánicas, utilizadas fundamentalmente en la industria textil, entre las que destacan la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785) y el telar de Jacquard (1801).

Jacquard basándose en los trabajos de Bouchon (1725), Falcon (1728) y del propio Vaucanson (1745), fue el primero en aplicar las tarjetas perforadas como soporte de un programa de trabajo, es decir, eligiendo un conjunto de tarjetas, se definía el tipo de tejido que se desea realizar. Estas máquinas constituyeron los primeros precedentes históricos de las máquinas de control numérico.



*Figura 26 Telar de Jacquard [Standh 89].*

Algo más tarde que en la industria textil, se incorporan los automatismos en las industrias mineras y metalúrgicas. El primer automatismo que supuso un gran impacto social, lo realiza Potter a principios del siglo XVIII, automatizando el funcionamiento de una máquina de vapor del tipo Newcomen.

A diferencia de los autómatas androides los automatismos dedicados a controlar máquinas industriales incorporan el concepto de realimentación. El ingeniero diseñador tenía una doble labor: realizar el proceso de diseño mecánico y también desarrollar el automatismo, que en muchos casos era parte integrante de la mecánica de la máquina.

A partir de aquí el desarrollo de los automatismos es impresionante, en muchas máquinas se utilizan elementos mecánicos como podían ser los programadores cíclicos (organillos) en los cuales se definía la secuencia de operaciones.

## **8 Automatismos industriales.**

Los actuales sistemas de automatización industrial pueden considerarse como herederos de los autómatas mecánicos del pasado. La definición de autómata que aparece en la real academia índica que un autómata es una “máquina que imita la figura y los movimientos de un ser animado”.

La realización física de los automatismos ha dependido continuamente del desarrollo de la tecnología implementándose en primer lugar mediante tecnologías cableadas como la neumática, circuitos de relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas. En las dos últimas décadas se han abandonado las tecnologías cableadas sustituidas por los autómatas programables.

Los sistemas de automatización industrial han recibido un gran impulso en este siglo XX sobre todo por parte de la industria del automóvil. El término automatización fue acuñado en 1947 por Delmar S. Halder de la compañía automovilística Ford en Detroit. Halder opina que la *automatización* debería ser un concepto global que abarque todos los diseños y dispositivos realizados para conseguir una plena automatización de la producción. Inicialmente Halder desarrolló su campaña dentro de Ford, pero se extendió por sí sola al resto de la industria americana, estableciéndose un debate sobre su aplicación en la industria y las consecuencias sociales que esto conllevaría. Se vertieron opiniones, no sin falta de razón, de que el objetivo final era sacar al ser humano fuera del proceso productivo, prediciendo que una gran cantidad de personas se quedaría sin trabajo.

También se vertieron opiniones favorables dentro del campo tecnológico e industrial, donde muchos consideraban la automatización como un concepto nuevo y revolucionario. La ciencia de la automatización (“Automatology”) haría comenzar una nueva era. La automatización supondría “la segunda revolución industrial”.

La formalización del tratamiento de los automatismos es muy reciente. Históricamente se puede decir que el tratamiento de los automatismos lógicos se ha basado en el álgebra de Boole y en la teoría de autómatas finitos. No fue hasta la década de los sesenta que se dispuso de herramientas como las redes de Petri, para el diseño y análisis de automatismos secuenciales y concurrentes.

### ***Tecnologías cableadas.***

Las primeras tecnologías disponibles para implementar controladores de sistemas de eventos discretos, se basaban en la aplicación de tecnologías cableadas, lo que se denominaba automatismos cableados. Se utilizaban principalmente las tecnologías neumática y electromecánica.

La tecnología neumática adquiere especial relevancia en la implementación cableada de automatismos, además cuenta con la ventaja de que es homogénea con numerosas máquinas de producción equipadas con cilindros neumáticos. Se debe resaltar que aunque sea una tecnología cableada, el mando neumático utiliza secuenciadores modulares que suprimen una parte del cableado. En la actualidad en muchas máquinas neumáticas industriales el sistema de control que sigue en activo está integrado por circuitos neumáticos. Los nuevos productos desarrollados incorporan como sistema de mando, en el caso de algunas máquinas pequeñas, circuitos de relés electromagnéticos, pero la mayoría está comandada por autómatas programables.

Los relés electromagnéticos disponen de contactos accionados por una bobina electromagnética. La puesta en tensión de la bobina hace que los contactos conmuten debido a la fuerza electromagnética creada. Los relés electromagnéticos pueden efectuar conmutaciones de grandes corrientes. Continúan siendo interesantes para automatismos muy sencillos. Aunque han sido prácticamente sustituidos por autómatas programables, se siguen utilizando alrededor de ellos en particular para realizar los circuitos de seguridad.

### ***El desarrollo de los autómatas programables.***

En las instalaciones de las fábricas de Automóviles se instalaban grandes armarios en paralelo con las líneas de producción. Dentro de estos armarios se construía mediante circuitos de relés electromagnéticos la inteligencia que controlaba el proceso de

fabricación. Esta tecnología funcionaba y por supuesto se fabricaban coches pero también poseía una gran problemática.

- La tecnología cableada no era muy adecuada para implementar sistemas de control complejos.
- Los elementos que la forman eran electromecánicos ( en el caso de los relés), lo cual implica un número no ilimitado de maniobras (rompen) y la necesidad de implantar logísticas de mantenimiento preventivo.
- Ofrecían una gran dificultad para la búsqueda de averías (un cable que no hace contacto sigue estando visualmente junto al tornillo). Para facilitar la localización de averías se instalaban contactores y relés que señalarán los fallos.
- A veces se debían realizar conexiones entre cientos o miles de relés, lo que implicaba un enorme esfuerzo de diseño y mantenimiento.
- Cuando se cambiaba el proceso de producción cambiaba también el sistema de control.

Los tiempos de parada ante cualquier avería eran apreciables. Si saltaba una parada de emergencia, se tenía que reiniciar manualmente el sistema, dado que se perdía el estado de la producción.

A finales de los años cincuenta los fabricantes de automóviles necesitaban nuevas y mejores herramientas de control de la producción. Los “nuevos controladores” debían ser fácilmente programables por ingenieros de planta o personal de mantenimiento. El tiempo de vida debía ser largo y los cambios en el programa tenían que realizarse de forma sencilla. Finalmente se imponía que trabajaran sin problemas en entornos industriales adversos. La solución fue el empleo de una técnica de programación familiar y reemplazar los relés mecánicos por relés de estado sólido.

Los autómatas programables se introducen por primera vez en la industria en 1960 aproximadamente. Bedford Associates propuso un sistema de control denominado Controlador Digital Modular (Modicon, Modular Digital Controller) al fabricante de automóviles General Motors.

Otras compañías propusieron a la vez esquemas basados en ordenador, uno de los cuales estaba basado en el PDP-8. El MODICON 084 resultó ser el primer PLC del mundo en ser producido comercialmente.

A mediados de los 70 las tecnologías dominantes de los PLC eran máquinas de estado secuenciales y CPU's basadas en desplazamiento de bit. Los microprocesadores convencionales incorporaron la potencia necesaria para resolver de forma rápida y completa la lógica de los pequeños PLC's. Por cada modelo de microprocesador había un modelo de PLC basado en el mismo.

Las funciones de comunicación comenzaron a integrarse en los autómatas a partir del año 1973. El primer bus de comunicaciones fue el Modbus de Modicon. El PLC podía ahora establecer comunicación e intercambiar informaciones con otros PLC's.

La implantación de los sistemas de comunicación permitió aplicar herramientas de gestión de producción que se ejecutaban en miniordenadores enviando ordenes de

producción a los autómatas de la planta. En las plantas se suele dedicar un autómata programable a ejecutar la función de gestión. Este autómata recibe las ordenes de producción y se encarga de comunicarlas a los autómatas programables dedicados a control. A su vez estos los autómatas de control envían el estado de la producción al autómata de gestión.

En los 80 se produjo un intento de estandarización de las comunicaciones con el protocolo MAP (Manufacturing Automation Protocol) de General Motors. También fue un tiempo en el que se redujeron las dimensiones del PLC y se pasó a programar con programación simbólica a través de ordenadores personales en vez de los clásicos terminales de programación. Hoy día el PLC más pequeño es del tamaño de un simple relé.

En la década de los noventa se ha producido una gradual reducción en el número de nuevos protocolos, y en la modernización de las capas físicas de los protocolos más populares que sobrevivieron a los 80.

### ***Análisis y formalización de los automatismos lógicos industriales.***

Realizando el análisis de las máquinas automatizadas desde el punto de vista de la ingeniería de sistemas, en un primer nivel de abstracción se puede observar que son máquinas que pueden estar en un número finito de situaciones que denominaremos estados y que muchas de ellas responden a la definición de sistema de eventos discretos. Recordando su definición:

*Los sistemas de eventos discretos son sistemas en los que el tiempo y los estados son continuos. El estado del sistema puede variar instantáneamente en instantes separados de tiempo. Un evento es un suceso instantáneo que puede cambiar el estado del sistema. En un intervalo de tiempo finito no puede haber un número infinito de cambios de estado.*

Los primeros trabajos dedicados al análisis de estos sistemas no aparecen hasta 1938 cuando Shannon desarrolla el primer análisis simbólico de las propiedades de los circuitos de conmutación utilizando como herramienta el álgebra de Boole. Esta fue desarrollada por el pensador y matemático G.Boole en su trabajo "The Mathematical Analysis of Logic" con el objetivo simular y formalizar las leyes del pensamiento

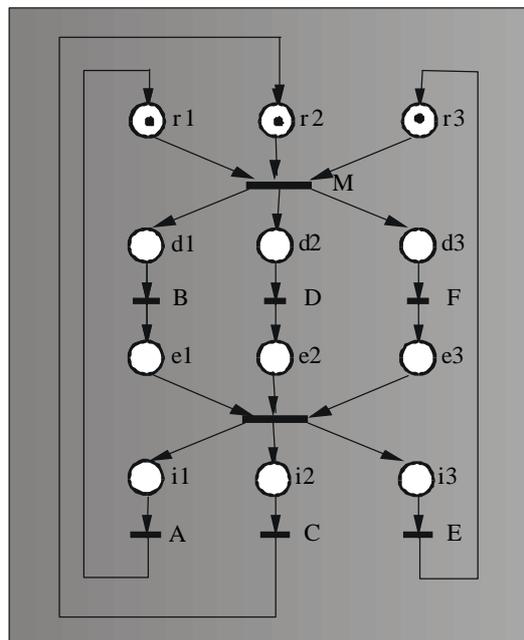
El álgebra de Boole constituye el método principal para efectuar el análisis y síntesis de circuitos lógicos sin memoria, es decir, que no poseen memoria. En estos circuitos las salidas en un instante determinado dependen exclusivamente del valor de las entradas en ese instante. Por lo cual en un principio solo sirven para realizar automatismos combinatorios. Otra herramienta disponible para la descripción de automatismos combinatorios son los programas de decisiones binarias desarrollados por C.Y. Lee en 1959.

Los automatismos provistos de una cierta capacidad de memoria, los sistemas secuenciales, se empezaron a estudiar a partir de los años 40. El primer método formal orientado a la síntesis de sistemas secuenciales se debe a Huffman. Se trata de un método cartesiano, el cual atrajo el interés de un gran número de investigadores, dedicados al estudio de las cuatro fases de que consta. La idea básica de este método es construir un sistema secuencial a partir de uno combinatorio realimentado. Pero se encuentra con un gran escollo tecnológico que fácilmente se comprenden al observar que los circuitos combinatorios se modelan mediante Álgebra de Boole, y esta no recoge más que

situaciones estáticas. El álgebra de Boole no puede modelar la “dinámica” de los sistemas secuenciales.

El problema se planteaba en términos de eliminación de las aleatoriedades presentes en los circuitos desarrollados por el método de Huffman. La búsqueda de una solución implica el desarrollo de numerosos trabajos. Unger fue el primero que demostró la imposibilidad de la eliminación de aleatoriedades por métodos puramente lógicos.

En estos años también se investigan y desarrollan métodos de minimización de la realización de los Automatismos combinatorios y secuenciales. El desarrollo tecnológico de las últimas décadas hace que la minimización de la realización vaya perdiendo interés en favor de una modularidad que facilite las modificaciones, el análisis, la puesta en marcha y el test.



*Figura 27. Red de Petri.*

La complejidad que van adquiriendo algunas aplicaciones, sobre todo las desarrolladas en la industria del automóvil hacen que los diseñadores sean incapaces de dominar completamente el problema, por lo que en el proceso de implantación de los automatismos se invertía gran cantidad de tiempo en realizar verificaciones que permitan la detección de errores. La inaplicabilidad del método de Huffman hacía que la mayor parte de los desarrollos industriales se basaran en la experiencia e intuición del ingeniero, lo cual se mostraba insuficiente para abordar los sistemas complejos y concurrentes.

El ingeniero carecía de herramientas que le permitieran obtener un modelo del sistema y analizar su comportamiento. Se podría decir que estaban en la misma situación que los ingenieros de control de los años veinte antes de que Nyquist escribiera su artículo, aunque algunos opinen que el paralelismo se debe hacer con Maxwell.

Todo esto conlleva que se aumente progresivamente el uso de las redes de Petri, herramienta matemática propuesta por Carl Adam Petri en 1962 [Petri 62]. Las redes de Petri suministran un método de análisis y síntesis de automatismos secuenciales y concurrentes. La potencia de la herramienta es enorme y se aplica en el análisis y modelado

de sistemas no solo en el campo de la automática, sino también en el de la informática, las comunicaciones...

Las redes de Petri consiguen que los ámbitos Universitario e Industrial pasen a utilizar un lenguaje común para diseñar y analizar automatismos. Al contrario que el método de Huffman, el cual no tuvo aceptación en el campo industrial, debido principalmente a su difícil manipulación. Este mismo año tuvimos el honor de asistir a la investidura del profesor Petri como Doctor Honoris Causa por la Universidad de Zaragoza.

En la actualidad los métodos basados en la experiencia e intuición han sido prácticamente abandonados, la gran mayoría de los programadores de autómatas utilizan como herramienta de análisis y diseño las redes de Petri.

## 9 Referencias históricas.

Presentamos a continuación una serie de referencias, donde se incluyen los trabajos y artículos y libros más relevantes desde el punto de vista histórico de la Ingeniería de Control.

### ***Libros y artículos sobre historia de la Ingeniería de Control .***

- [Auslander 71] Auslander D.E.: *Evolutions in Automatic Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. ASME Transactions. Marzo, 1969.
- [Alistair 79] Alistair G.J. MacFarlane Editor: *Frequency-Response Methods in Control Systems* . Editorial IEEE press, New York, 1979.
- [Bennett 79] Stuart Bennett: *A history of control engineering: 1800-1930*. Editorial Peter Peregrinus, Londres 1979.
- [Bennett 93] Stuart Bennett: *A history of control engineering: 1930-1955*. Editorial Peter Peregrinus, Londres 1993.
- [Dickinson 27] H. W. Dickinson and R. Jenkins: *James Watt and the steam engine*. Oxford University Press, 1927.
- [Dormido 95b] Sebastián Dormido Bencomo: *Control Automático: Evolución Histórica*. Curso de Verano de Control de Procesos: de la Teoría a la práctica. Dpto. de Informática y Automática. UNED, Julio, 1995.
- [Otto 70] Otto Mayr: *The origins of Feedback Control*. Editorial M.I.T. Press 1970.
- [Standh 89] Sigvard Strandh: *The History of The Machine*. Bracken Books.1989.
- [Thaler 74] George J. Thaler Editor: *Automatic control : Classical Linear Theory*. Editorial Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson and ross, cop. 1974.

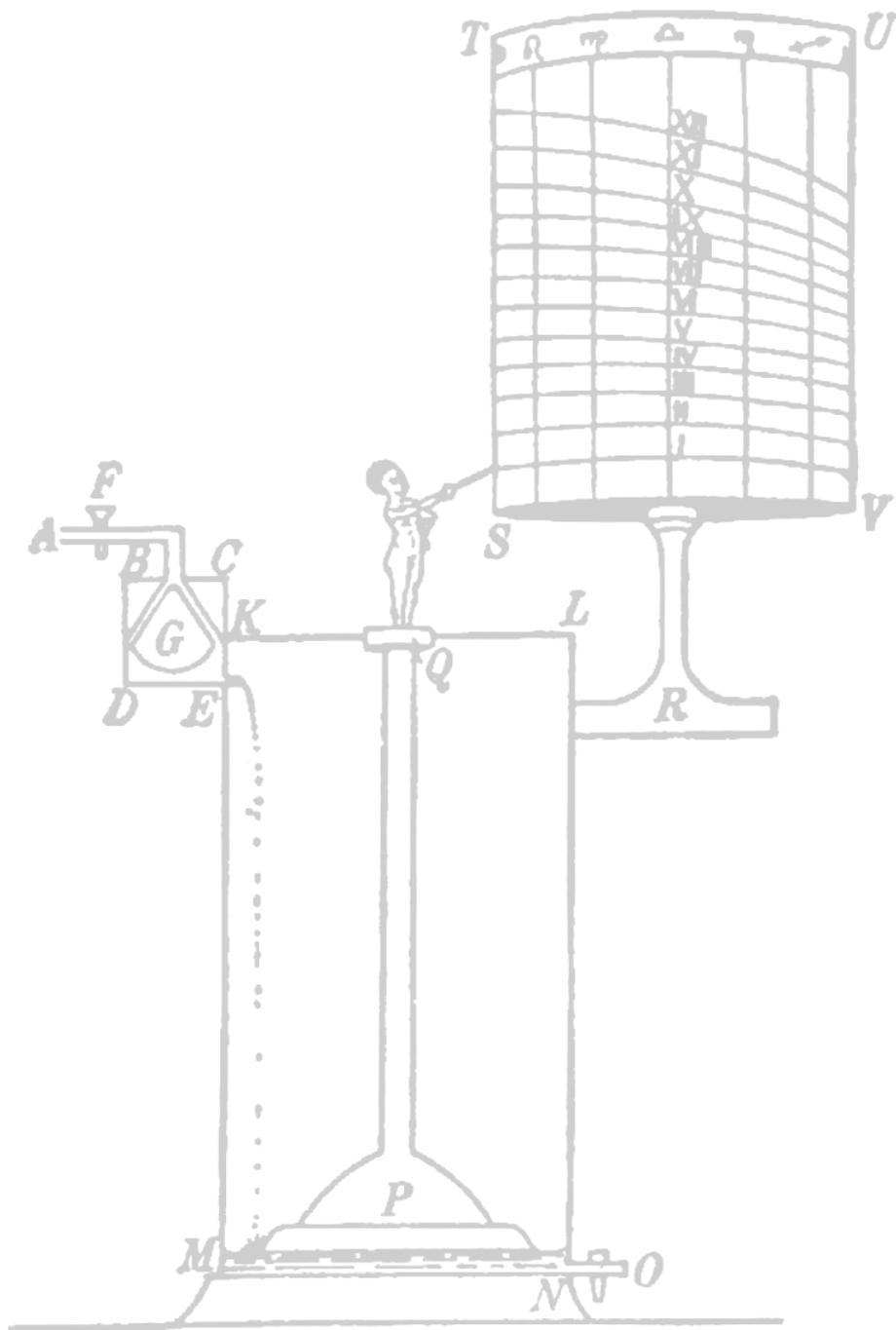
### ***Aportaciones relevantes en la historia a la teoría y práctica de la Ingeniería de Control .***

- [Lee 1745] British patent 615,1745, Edmund Lee: *Self-regulating wind machine*. Otto Mayr: origins pp 93-99

- [Mead 1787] British patent 1628,1787, Thomas Mead: *Regulator for wind and other mills*.
- [Airy 1840] G. B. Airy: *On the regulator of the clockwork for effecting uniform movement of equatoreals*. Mem. Roy. Astron. Soc. vol. 11, pp. 249-267, 1840.
- [Farcot 1868] British patent 2476,1868, Joseph Farcot; FARCOT, J.L.L.: *Le Servo-moteur ou moteur asservi*. Baudy, París, 1873
- [Maxwell 1868] J.C. Maxwell: *On Governors*. Proc. Roy. Soc. London, vol. 16, pp. 270-283, 1868.
- [Vyschne 1876] J. A. Vyschnegradsky. *Sur la theorie generale des regulateurs*. Comptes Rendus, vol. 83, pp. 318-321, 1876.
- [Routh 1877] Routh, E. J.: *A treatise on the stability of a given state of motion*. Macmillan, London,1877.
- [Hurwitz 1885] A. Hurwitz: *Über die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reellen Teilen besitzt*. Math. Annalen, pp. 273-284, 1885.
- [Heaviside 1899] O. Heaviside: *Electromagnetic Theory*. London, 1899.
- [Liapunov 07] A. M. Liapunov: *Probleme generale de la stabilite du mouvement*. Annales de la Faculte des Sciences de Toulouse, 1907.
- [Bompiani 11] Bompiani, E: *Sulle condizioni sotto le quali un equazione a coefficienti reale ammette solo radici con parte reale negativa*. Giornale di Matematica,1911, 49, pp. 33-39.
- [Minorsky 22] Minorsky: *Directional Stability of Automatic Steered Bodies*. J. Am.Soc Naval Eng.,1922,34, p.284
- [Nyquist 32] H. Nyquist: *Regeneration theory*. Bell Syst. Tech. J., vol. 11, pp. 126-147,1932.
- [Hazen 34] Hazen, H.L.: *Theory of Servomechanisms*. JFL, 1934,218,pp. 283-331
- [Black 34] H.S. Black: *Stabilized feedback amplifiers*. Bell Syst. Tech. J., vol. 13, pp. 1-18, 1934.
- [Weiss 39] Weiss, H.K.: *Constant Speed Control Theory*. J. Aeron. Sci, 1939, 6(4), pp. 147-152.
- [Bode 40] H. W. Bode: *Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design*. Bell Syst. Tech. J., vol. 19, PP. 421-454, 1940.
- [Ziegler 42] J.G. Ziegler, N.B. Nichols: *Optimum settings for automatic controllers*. ASME, 1942, 64, pp 759-768.
- [Harris 42] H.J. Harris: *The analysis and design of servomechanisms*. OSRD Rep, 454, 1942.
- [Willy 44] Willy Ley: *Rakete und Raumschiffart*. Berlin, 1944

- [Brown 46] Brown, G.S., and A.C. Hall: *Dynamic Behavior and Design of Servomechanism*. ASME, pp. 503-524, 1946.
- [Hall 46] Hall, A.C.: *Application of circuit theory to the desing of servomechanism*. JFI, 242(4), pp. 279-307, 1946.
- [Harris 46] Harris, H. Jr: *The frecuency Response of Automatic Control*. AIEE, 65,pp. 539-46, 1946.
- [Evans 48] Evans, W. R.: *Graphical Analysis of Control Systems*. Trans AIEE, 67, pp. 547-551, 1948.
- [Shanon 48] Shanon, C. E.: *The mathematical theory of communication*. Bell Syst. Tech. J., 27, Julio y Octubre de 1948.
- [Wiener 48] N. Wiener: *Cybernetics*. Cambridge, MA, MIT Press, 1948.
- [Wiener 49] N. Wiener: *Extrapolation. Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*. Cambridge, MA, MIT Press, 1949.
- [Aizermann 49] M. A. Aizermann: *On a problem concerning the stability in the large of dynamic systems*. Usp. Mat. Nauk., vol. 4, pp. 187-188, 1949.
- [Brown 50] Brown, G.S., Campbell, D.P.: *Instrument engineering: its growth and promise in process-control problem*. Mechanical Engineering, 72(2): 124, 1950.
- [Evans 50] Evans, W. R.: *Control System Synthesis by Root Locus Method*. Trans AIEE, 69, pp.1-4, 1950
- [Truxal 54] Truxal, J.G.: *Feedback theory and control system synthesis*. McGraw Hill, New York, 1954.
- [Bellman 57] R. Bellman: *Dynamic Programnrning*. Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1957.
- [Kalman 58] R. E. Kalman: *Design of a self-optimizing control system*. Trans. ASME, 80, 468-478, 1958.
- [Whitaker 58] Whitaker H.P, J. Yamron y A. Kezer: *Desing of a Model Reference Adaptive System for Aircraft*. R-164, Instrumnetation laboratory, MIT, Cambridge, USA, 1958.
- [Kalman 60] R. E. Kalman: *Contributions to the theory of optimal control*, Bol. Soc. Math. Mexicana, vol. 5, pp. 102-119, 1960.
- [Kalman 60] R. E. Kalman: *On the general theory of control Systems*. Proceedings of the First IFAC Confress in Moscow, vol. 1. London: Butterworth, pp. 481-492, 1960.
- [Kalman 61] R. E. Kalman and R. S. Bucy: *New results in linear filtering and prediction theory*. Trans. ASME J. Basic Ing., voj. 83, ser. D, pp. 95-108, 1961.
- [Popov 61] V. M. Popov: *On the absolute stability of non linear control systems*. Avtomat. Telemekh., vol. 22, p. 8, 1961.

- [Petri 62] Petri, C. A.: *Kommunikation mit Automaten*, Universidad de Bonn, 1962.
- [Pontryagin 63] L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze and Y.F. Mischensko: *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York: Interscience, 1963.
- [Åström 73] Åström, K.J., B. Wittenmark: *On Self-Tuning Regulators*. *Automática*, vol 9, pp. 185-189, 1973.
- [Parks 76] Parks, P.C.: *Model Reference adaptive methods. Redesign using Liapunov's second method*. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol AC-11, pp. 362-367. 1976.
- [Landau 79] Landau: *Adaptive Control. The model reference approach*. Marcel Dekker, 1979



*“Constantemente hay un feed-back. Pero cuando usas el poder militar, de lo que debes hacer caso es del efecto real de tu acción”.*

*Wesley Clark. Comandante Supremo de las fuerzas aliadas en Europa. Octubre de 1999.*

## Control Industrial.

En este apartado haremos referencia a la situación actual de la tecnología de los sistemas de control por computador aplicada al control de sistemas continuos y de sistemas de eventos discretos. Se abordará en detalle algunas implementaciones industriales muy difundidas como pueden ser los reguladores industriales, los autómatas programables, y los microprocesadores especializados en el control de máquinas eléctricas (justificado por el encuadre de las asignaturas objeto del proyecto docente dentro de la Especialidad de Electrónica Industrial). Asimismo se tratarán tecnologías recientes en fase de expansión como pueden ser los buses de campo y la incorporación de Ethernet e Internet al mundo de la Automatización e Informática Industrial. Por último se dedica un apartado a analizar la nueva tendencia existente en el control industrial: el control basado en la plataforma PC.

En el momento presente se puede afirmar que la casi totalidad de los procesos industriales están controlados mediante computador. Igualmente sucede con los procesos de fabricación en los que están implicados sistemas de eventos discretos. Los sistemas de control cableados o analógicos, apenas son instalados en la actualidad. No obstante, los controles analógicos siguen funcionando en muchas industrias de nuestro entorno, y seguirán haciéndolo mientras sea más caro acometer el proceso de sustitución que supone la parada de la máquina durante algunos días.

Los avances en el desarrollo de herramientas software ha contribuido a la reducción del coste del proyecto e implantación de los sistemas basados en control por computador. En la última década se ha desarrollado mucho la tecnología de control aplicada a la Robótica y de sistemas de control jerarquizado mediante redes de autómatas y ordenadores.

En el control de procesos continuos actualmente se puede encontrar multitud de formas tecnológicas:

- Reguladores PID Industriales.
- Autómatas programables con funciones de regulación incorporadas en su lenguaje tales como los Simatic S7 de Siemens y los TSX Micro de Telemecánica.
- Autómatas programables con CPU's orientadas al control de procesos, tales como los autómatas Premium PMX y los autómatas Quantum de Modicon.
- Computadores industriales dotados de tarjetas de adquisición de datos, con aplicaciones de control desarrolladas en lenguajes de alto nivel como el ADA.
- Computadores industriales dotados de tarjetas de adquisición de datos, con aplicaciones dedicadas al control, configurables por el usuario, tal como Labview de National Instruments.

*Ramón Piedrafita Moreno.*

- Sistemas distribuidos de control de última tecnología como Web Plant de Fisher Rosemount, que integran buses de campo orientados al control de procesos industriales tales como Fieldbus.
- Sistemas de supervisión y adquisición de datos con funciones de regulación incorporadas, tales como Fix D'Macs de Intellution, Wincc de Siemens y Lookout de National Instruments.

En el control de sistemas de eventos discretos también se pueden encontrar varias formas tecnológicas:

- Autómatas programables clásicos
- Autómatas programables distribuidos
- Control basado en PC.

## **1 Reguladores industriales**

Los reguladores industriales son computadores de propósito específico dedicados al control de procesos continuos. Los últimos reguladores industriales que han salido al mercado disponen de toda una gama de funcionalidades.

Como función de regulación principal incorpora la clásica PID, pero también incorporan la función Modelo de Referencia que obtiene mejores resultados en el caso de sistemas con excesivo retraso. También se encuentran funciones de regulación simples como es el control on-off de dos estados y de tres estados. Incorporan la posibilidad de control de ratio, control selectivo, control de gama partida y la función calor/frío.

Disponen de funciones auxiliares sobre la medida, como puede ser el filtrado, la extracción de la raíz cuadrada (sensores de caudal), generadores de función para linealizar la señal de sensor.. Incorporan el control de campo con funciones de ajuste de la rama feed forward y la posibilidad de actuar con salidas todo o nada en función PWM y en función SERVO.

Por supuesto, permiten el lanzamiento de la función autoajuste fuera de línea, en la cual el regulador lanza un ensayo sobre el proceso, para identificarlo y a continuación calcular los parámetros del PID. También hay reguladores que incorporan la identificación en línea. En definitiva, toda una serie de funcionalidades que ayudan al operario de los procesos industriales a configurar rápidamente la aplicación.

## **2 Autómatas programables**

Los autómatas programables ya no se pueden definir solamente como los controladores de máquinas secuenciales, que ejecutan un programa en lenguaje de estados. En la última década en el campo de la Automatización Industrial se ha incorporando toda una gama de nuevas funcionalidades, que han superado el tradicional concepto de controlador secuencial, para pasar a realizar funciones especializadas como regulación de procesos continuos, comunicación mediante redes industriales, incorporar novedosos sistemas de cableado distribuido mediante los buses de campo. En el mercado se dispone de módulos especializados en pesaje, control de ejes, identificadores de productos...

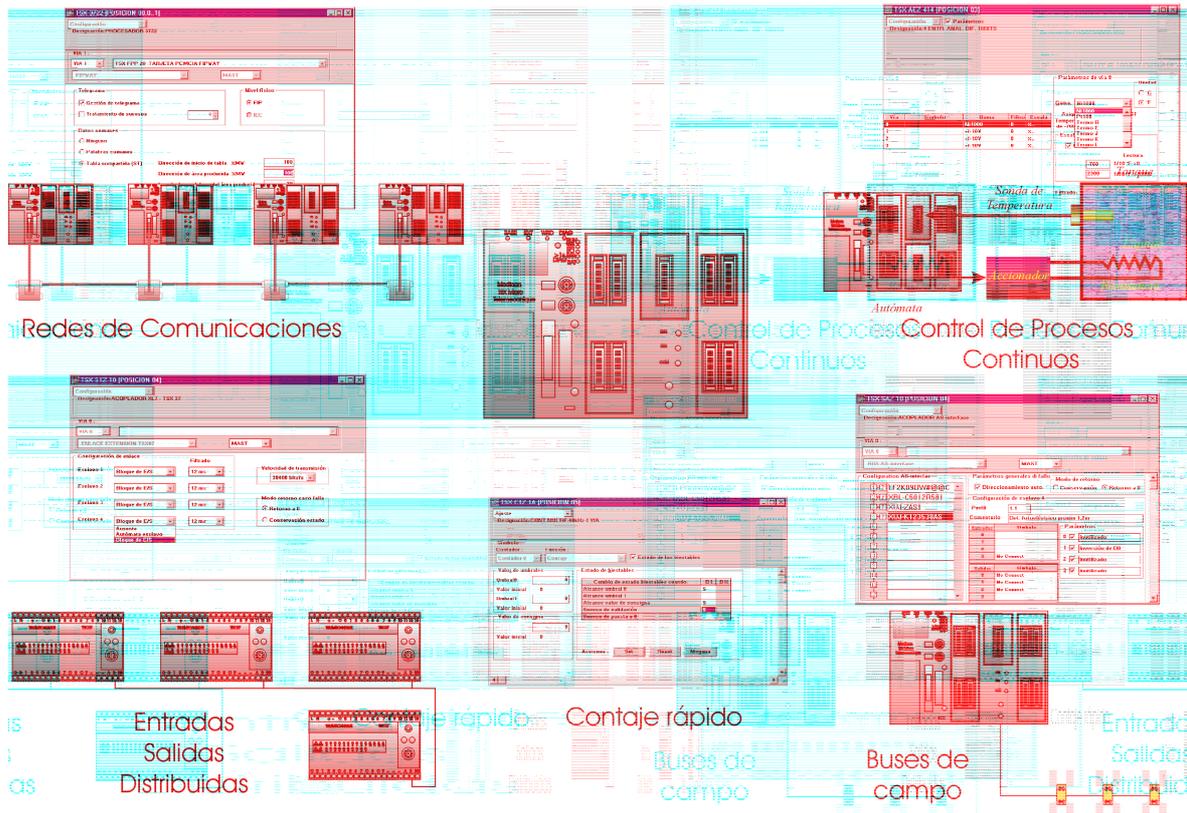


Figura 28. Nuevas funciones de los autómatas programables

No solo se han producido avances en los lenguajes de programación sino también en los sistemas de ejecución de los programas. Un programa de aplicación de autómatas se estructura en tareas. Estas tareas pueden ser del tipo:

- Tarea maestra.

La tarea maestra siempre está presente y puede ser cíclica o periódica. En ella se efectúa el tratamiento de la mayor parte del programa de aplicación. La tarea maestra está organizada según lo descrito anteriormente: lectura de entradas, ejecución del programa de aplicación y escritura de las salidas. En esta tarea es donde se programa el clásico tratamiento secuencial.

- Tarea rápida.

La tarea rápida se programa opcionalmente. Su ejecución es más prioritaria que la tarea maestra, y es periódica, dado que si fuera cíclica impediría la ejecución de la tarea maestra de menor prioridad. Los programas asociados a esta tarea deben ser de corta duración para no retardar la ejecución de la tarea maestra.

- Tareas de eventos.

Tratamientos de eventos, ejecutados por el sistema al aparecer un evento en un módulo de entradas, en un contaje rápido... Estos tratamientos se programan opcionalmente y son utilizados en aplicaciones que necesitan tiempos de respuestas muy cortos para actuar sobre las salidas.

- Tareas auxiliares.

En algunos modelos de autómatas existen las llamadas tareas auxiliares que se ejecutan con prioridad más baja que la tarea maestra. Son tareas destinadas a los tratamientos más lentos como son la medida, la regulación, el diálogo operador, la ayuda al diagnóstico.

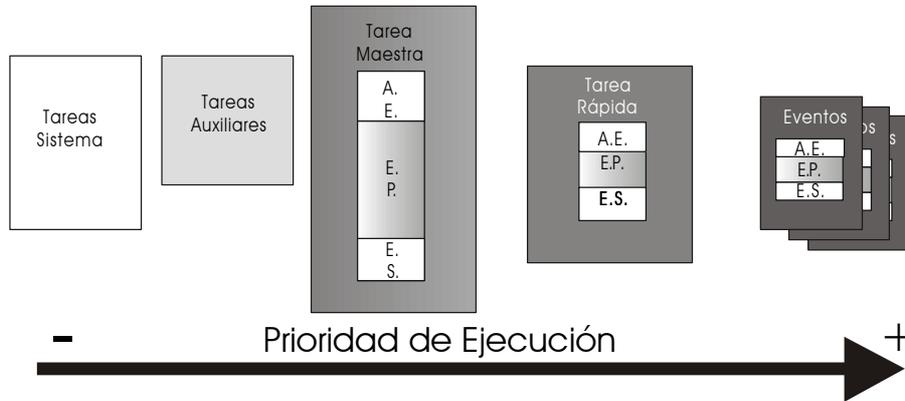


Figura 29 Ejecución de tareas en un autómata programable.

La prioridad de ejecución de las tareas es, de mayor a menor:

- Tareas de eventos.
- Tarea rápida.
- Tarea maestra.
- Tareas auxiliares.
- Operaciones de sistema.

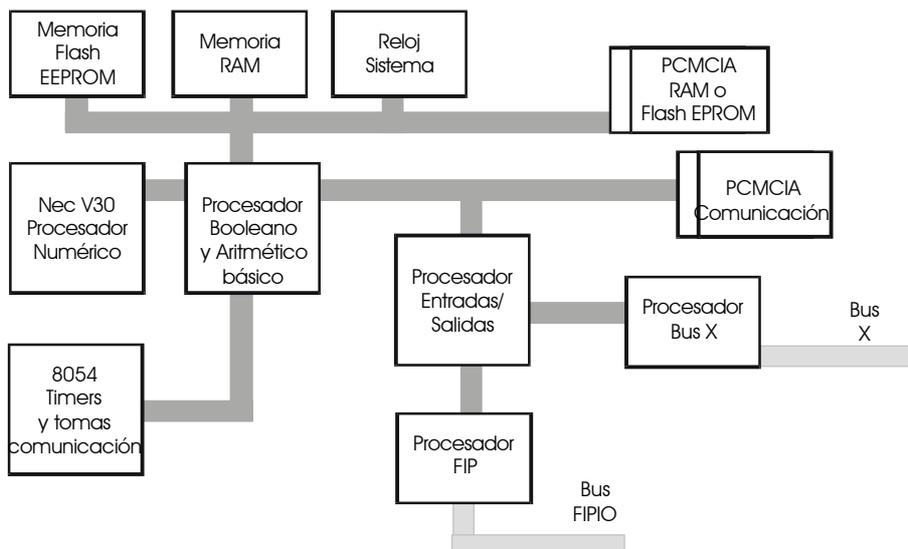


Figura 30. Estructura unidad central del autómata Premium.

La evolución en el hardware de los autómatas también ha sido notable. La estructura interna ha pasado de ser monoprocesador a multiprocesador con procesadores especializados en tareas específicas de comunicación, de cálculo booleano, de control de

entradas/salidas.... En las gamas altas, con el objeto de mejorar la seguridad de funcionamiento, se pueden encontrar modelos con doble unidad central, donde la segunda unidad garantiza la continuidad del control en el caso de que falle la unidad maestra.

La arquitectura ha evolucionado desde los primeros autómatas Compactos, pasando por autómatas semicompactos con rack para conectar tarjetas, llegando a autómatas multirack que pueden distribuir sus módulos de entrada/salida no solamente en el rack de la unidad central sino en racks remotos. Los sistemas de cableado tradicionales hilo a hilo van siendo sustituidos por módulos de entrada/salida distribuidas o por buses de campo como el AS-i Interface que permiten la conexión directa de captadores y accionadores.

### ***Lenguajes de programación de autómatas.***

Junto con la evolución hardware de los autómatas se ha producido una evolución paralela de sus sistemas de programación. Los primeros lenguajes desarrollados fueron la lista de instrucciones y el lenguaje de contactos. El lenguaje de lista de instrucciones se puede considerar una herencia de la arcaica programación en ensamblador a la que se le añadieron paulatinamente instrucciones de lectura de entradas y escritura de salidas digitales, instrucciones de manejo de bloques funcionales. Aunque parezca extraño, es un lenguaje que ha tomado una posición que precisamente no se puede calificar de minoritaria en el mercado, sino todo lo contrario. Marcas como Siemens lo siguen suministrando como opción principal y existe un gran número de programadores que lo utilizan e incluso lo prefieren. Sus partidarios dicen que permite un mayor control de la máquina, sus detractores opinan que ese mayor control se refiere al autómata, no a la máquina o proceso controlado. En definitiva, aleja al programador del problema real.

El lenguaje de contactos imita el funcionamiento de los circuitos basados en relés eléctricos. Tiene la ventaja de que es un lenguaje fácil de asimilar por el operador en planta, además de que resulta muy fácil depurar el funcionamiento de los programas. Sin embargo no resulta adecuado para el desarrollo de grandes aplicaciones. El lenguaje de contactos se debe considerar el más universal de todos, dado que lo incorporan prácticamente todos los fabricantes de autómatas.

Una de las primeras implementaciones industriales de las redes de Petri es el lenguaje de programación de autómatas Grafcet. El Grafcet un lenguaje gráfico que permite realizar la implementación programada de redes de Petri binarias que no posean arcos inhibidores. El Grafcet ha contado con un gran apoyo por parte del gobierno y de los fabricantes franceses entre ellos Telemecánica.

Un Grafcet es un diagrama funcional cuyo objetivo es describir de forma gráfica el comportamiento de un automatismo secuencial. Un Grafcet esta definido por una serie de elementos gráficos (etapas y transiciones) y unas reglas de evolución que reflejan la dinámica del comportamiento del sistema. El Grafcet se desarrolló en las décadas de los setenta y ochenta siendo en esta última cuando se incorpora el concepto de macroetapa.

Estos tres lenguajes junto con el texto estructurado, de sintaxis similar al Pascal, y el Diagrama de bloques funcionales han sido estandarizados en la norma IEC 61131 que intenta unificar el sistema de programación de todos los autómatas en un único estándar internacional. En el año 1979 la Comisión Internacional Electrotecnia (IEC) designa al Comité de Investigación 65A para la definición de una norma específica referente a los autómatas programables industriales. El objetivo de este comité era responder a la complejidad creciente de los sistemas de control y a la diversidad de autómatas

*Ramón Piedrafita Moreno.*

incompatibles entre sí, de forma que se convergiera a un único estándar de programación y desarrollo de aplicaciones de autómatas programables. De dicho comité se definió la norma 61131 cuyos diversos apartados son:

- IEC 61131-1 (1992-10).  
Autómatas programables. Parte 1: Información general.
- IEC 61131-2 (1992-10).  
Autómatas programables. Parte 2: Especificaciones y ensayos de los equipos.
- IEC 61131-3 (1993-03).  
Autómatas programables. Parte 3: lenguajes de programación.
- IEC/TR3 61131-4 (1995-03).  
Autómatas programables. Parte 4: Guías del usuario.

Todas estas normas se encuentran actualmente en revisión.

Además se están definiendo las siguientes:

- IEC 61131-5 Ed. 1.0.  
Autómatas programables. Parte 5: Comunicaciones.
- IEC 61131-6 Ed. 1.0.  
Autómatas programables. Parte 6: Comunicaciones vía buses de campo.
- IEC 61131-7 Ed. 1.0.  
Autómatas programables. Parte 7: Programación del control Fuzzy.
- IEC 61131-8 TRTR Ed. 1.0.  
Guías para la aplicación e implementación de lenguajes para autómatas programables.

La norma define los lenguajes de programación de autómatas:

- Gráfico secuencial de funciones (Grafcet).
- Lista de instrucciones.
- Texto estructurado.
- Diagrama de contactos.
- Diagrama de funciones.

La lista de instrucciones (IL o AWL) es un lenguaje de bajo nivel, similar al lenguaje ensamblador. Solo se permite programar una operación en cada línea. Este lenguaje es adecuado para pequeñas aplicaciones y para optimizar partes de una aplicación.

El texto estructurado (structured text o ST) es un lenguaje de alto nivel que posee una sintaxis parecida al Pascal. El ST puede ser empleado para realizar rápidamente sentencias complejas que manejen variables con un amplio rango de diferentes tipos de datos, incluyendo valores analógicos y digitales. También se especifica tipos de datos para el manejo de horas, fechas y temporizaciones, algo importante en procesos industriales. El lenguaje posee soporte para bucles iterativos, ejecuciones condicionales y funciones matemáticas

El diagrama de funciones (function block diagram o FBD) es un lenguaje gráfico que permite programar elementos que aparecen como bloques para ser cableados entre sí de forma análoga al esquema de un circuito. FBD es adecuado para muchas aplicaciones que involucren el flujo de información o datos entre componentes de control.

El estándar también define una nueva arquitectura para la organización e interacción de tareas en los autómatas programables.

En los lenguajes de programación de autómatas se han incorporado bibliotecas de funciones que desde siempre han estado disponibles en los lenguajes de programación de ordenadores. El programador puede utilizar las funciones matemáticas clásicas, funciones de manejo de tablas, funciones de conversión numérica, funciones de diálogo operador. Se abre la posibilidad de que las tareas de gestión y cálculo sobre los datos, normalmente asignadas a un computador, se programen en autómatas. Existen instalaciones donde un autómata, denominado de gestión, recibe las ordenes de producción las procesa y se las transmite a los autómatas de control, a la vez recoge datos de planta y convenientemente tratados se los envía al ordenador central.

Un paso más allá ha sido la incorporación de funciones orientadas a la gestión de la comunicación, al diálogo con los módulos de control de ejes, con módulos de pesaje, función de control PID programable, y módulos de control PID configurables.

Algunas casas han sacado al mercado Kits de desarrollo que permiten programar los autómatas en el clásico lenguaje C. Estos Kits añaden al lenguaje las funciones necesarias para tratar con los objetos de autómata (entrada/salida, memoria, sistema, constantes...). Hay que observar que puede ser una buena opción pero realmente no ha tenido una gran difusión, siendo en la práctica no muy utilizada.

Casi todos los fabricantes de autómatas han desarrollado los drivers para OPC (Ole for Process Control). Estos drivers permiten que aplicaciones de ofimática como Access o Excel se comuniquen de una forma sencilla con los autómatas programables. La comunicación se establece solamente con añadir un objeto tipo OLE a los documentos creados en el ordenador. Los objetos OLE se comunican con variables de memoria del autómata en procesos de lectura o escritura.

### **3 Microprocesadores especializados en control de máquinas eléctricas.**

Los microprocesadores son en estos momentos un elemento esencial en el desarrollo y mejora de los sistemas de control de las máquinas eléctricas. Están permitiendo el desplazamiento de los accionamientos de corriente continua por los de corriente alterna ofreciendo mejores prestaciones y a un precio muy similar.

*Ramón Piedrafita Moreno.*

Los microprocesadores especializados en el control de máquinas eléctricas disponen de convertidores analógicos digitales para leer magnitudes tales como corriente, tensión, posición y velocidad. La precisión de los convertidores A/D no debe de ser inferior a 10 bits y mejor si es de 12 y a velocidades de conversión de unos pocos microsegundos.

Muchos de estos micros disponen ya de salidas tipo PWM de forma que directamente actúan en la conmutación de los semiconductores. También disponen de interface serie para establecer comunicación con una estación PC y memoria Flash EEPROM, la cual sirve para salvaguardar el programa de aplicación de una forma sencilla, sin tener que recurrir a memorias no volátiles externas. La potencia y velocidad de cálculo de estos integrados hace posible que se implementen métodos de control avanzados de máquinas eléctricas tales como controles vectoriales o controles orientados a campo (FOC).

Existe una gran cantidad de fabricantes que ofrecen soluciones para este campo de aplicación. A continuación hacemos un pequeño comentario sobre los productos que ofrecen tres de ellos, que nosotros consideramos principales.

Texas Instruments es uno de los fabricantes que se está dedicando a la fabricación y diseño de microprocesadores orientados al control de máquinas eléctricas, principalmente en el mundo de los DSP con los TMS320C14. Con estos procesadores se pueden desarrollar accionamientos que aplican las teorías de control vectorial a la regulación de motores, que necesitan una gran capacidad de cálculo computacional para ser implementadas. Otros micros más modernos como el TMS 320x240 son específicos para el control de motores eléctricos (motores de inducción, reluctancia variable o motores síncronos de imanes permanentes).

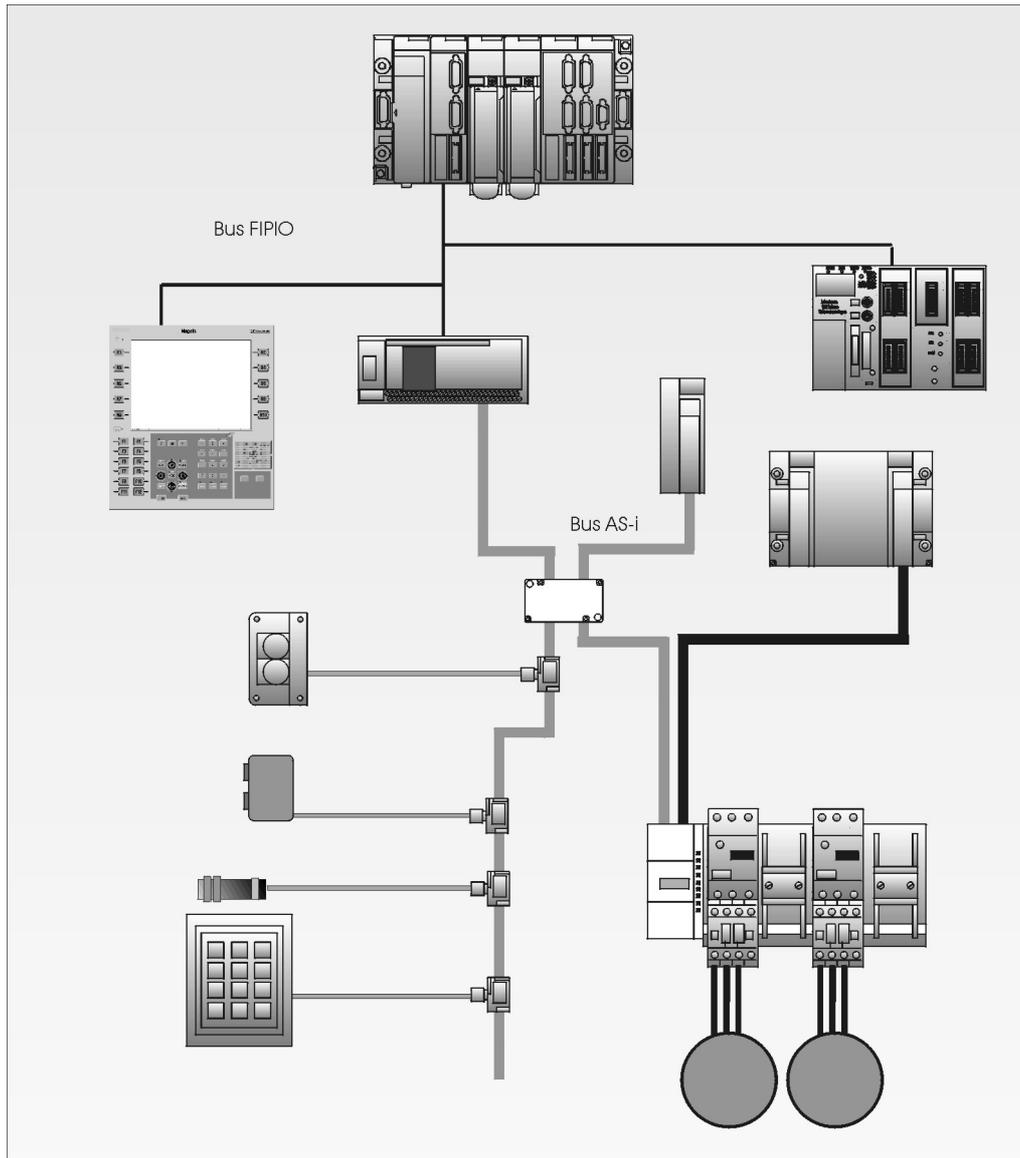
Analog Devices es el mayor fabricante de microprocesadores del tipo DSP. En los últimos años ha lanzado al mercado la familia ADMCxxx particularmente la gama ADMC3xy el ADMC401 son microcontroladores DSP para motores eléctricos. Estos micros de 16 bit, tienen convertidores A/D de 12 bits. Salidas del tipo PWM de 12 bits de precisión y trabajan de 20 a 26 MIPS. Tienen además un bloque específico para obtener la transformación de Park y de Clark imprescindible para el control vectorial.

Hitachi es el fabricante que tiene un mayor surtido de micros para el control de máquinas eléctricas destacan sus series SH1 y SH2 capaces de trabajar hasta 33 MIPS con 256kBytes de memoria Flash EEPROM y varios puertos de entrada salida.

## **4 Buses de campo.**

Desde finales de los años ochenta se han propuesto muchos sistemas de comunicación industrial, para conectar los captadores y actuadores a los controladores, que sustituyeran al tradicional cableado hilo a hilo, estos sistemas se denominan buses de campo.

En el mercado sólo han logrado imponerse los buses que han contando con el respaldo de grandes fabricantes de sistemas de Automatización y control, como pueden ser Profibus respaldado por Siemens, Device-Net respaldado por Allen Bradley, y el bus FIPIO, respaldado principalmente por el grupo Schneider. Como bus de campo de nivel de sensores y actuadores cuenta con una gran implantación el bus AS-i Interface, respaldado fuertemente por Siemens.



*Figura 31. Buses de Campo.*

Por último el bus “independiente” Interbus, del fabricante Phoenix Contact, tiene una fuerte implantación en la industria del automóvil, por ejemplo Fasa Renault lo ha adoptado como el bus de campo de sus fábricas.

Profibus, Interbus, FIPIO y Device Net son buses de célula, que permiten la conexión de dispositivos inteligentes: variadores de velocidad, sistemas de identificación, terminales de visualización, sistemas de programación. Por supuesto también permiten conectar módulos de entrada/Salida digitales y/o analógicos. Integran la función clásica de bus de campo (nivel de captadores y accionadores) y la función de Red de comunicación (nivel de célula).

AS-i Interface es un bus de campo que permite la conexión de captadores y accionadores de tipo todo o nada. En la primera versión de este bus solo permitía conectar 31 esclavos (un máximo de 124 entradas y de 124 salidas todo/nada). En la versión AS-i Interface 2.0 se pueden conectar módulos de entrada/salida analógica y el número de esclavos se amplía de 31 a 63.

*Ramón Piedrafita Moreno.*

El bus AS-i puede conectarse a la mayoría de los buses de célula mediante pasarelas. De esta forma el bus AS-i funciona como un sub-bus del bus de célula, pasando a funcionar como un módulo de entradas/salidas conectado al bus de célula.

Los fabricantes de autómatas disponen de módulos de comunicación que permiten configurar al autómata como maestro de diferentes buses de campo, o lo llevan incorporado en la Unidad Central. Por ejemplo, en los modelos superiores del autómata Premium, integran en la CPU el maestro del bus FIPIO, y se dispone de módulos que conectados en el rack del autómata permiten la conexión a buses de otros fabricantes como Profibus e Interbus.

Los buses de campo disponen de tarjetas que permiten que un computador industrial trabaje como maestro del bus. Estas tarjetas son suministradas por el fabricante del bus, pero también por desarrolladores independientes.

Los fabricantes de dispositivos de campo, tales como módulos de entrada/salida, variadores de velocidad, arrancadores, módulos de conteo rápido, realizan el diseño de los dispositivos de forma que puedan conectarse a buses de distintos fabricantes. Por ejemplo se puede adquirir un módulo de entradas/salidas Momentum, para conectarlo al bus FIPIO o al bus Interbus, solo habrá que cambiar la tarjeta de comunicaciones del módulo.

Los nuevos buses de campo integran también los servicios que antes solo suministraban las redes de comunicación. Por ejemplo Profibus-DP, integra los servicios clásicos de un bus de campo dedicado al nivel de datos de proceso, es decir, datos de entrada-/salida, y Profibus-FMS integra los servicios clásicos de una red de comunicaciones como son la comunicación entre estaciones, envío de programas, intercambio de variables..

## **5 Ethernet.**

En los dos últimos años existe una tendencia a integrar los sistemas de comunicación clásicos en las redes informáticas empresariales, en los sistemas de automatización industrial. Se pretende en definitiva que Ethernet se convierta en el estándar de la comunicación industrial, incluso en el ámbito de captadores y accionadores.

Empresas como Siemens con su Industrial Ethernet, Fisher Rosemount con su Web Plant o Modicon con su Transparent Factory, integran Ethernet en los sistemas de Automatización industrial. Estas propuestas pretenden dar una total transparencia a la comunicación y permitir la disponibilidad de los datos en tiempo real en los sistemas de comunicación industrial, teniendo como herramientas el protocolo TCP/IP y la incorporación de Internet al control industrial.

Fabricantes como Fisher-Rosemount, ABB, Foxboro y Rockwell Automation utilizan Ethernet para conectar controladores de planta y terminales de explotación en arquitectura centralizadas. En el nivel de campo, un pequeño grupo de fabricantes ha sacado al mercado tarjetas que permiten conectar los dispositivos de entrada/salida directamente a una red Ethernet o se conectan a un concentrador de entradas/salidas compatible con Ethernet.

Muchas de estas arquitecturas utilizan protocolos propios de los fabricantes, que en algunos casos están abiertos a la incorporación de productos de terceros, por medio del suministro de kit's de desarrollo hardware/software de los protocolos. Por ejemplo DeviceNet, emplea los niveles físicos y de transporte de Ethernet.

Asimismo los fabricantes de controladores y de dispositivos de entrada/salida han empezado a incorporar los protocolos TCP/IP y HTTP para incorporar las funcionalidades de Internet al control industrial. Autómatas como el Modicon Premium pueden funcionar como servidores de Internet. Permitiendo de esta forma, que funciones como programación y supervisión se realicen a través de Internet.

La combinación de los siguientes factores: bajo costo, alta difusión, disponibilidad en el mercado y los recursos dedicados a investigación y desarrollo nos hace predecir un desarrollo imparable Ethernet. Mediante Ethernet se pueden integrar PC's, dispositivos de campo, controladores, periféricos, dispositivos inteligentes que coexisten en la misma red.

En muchos buses de campo, se tienen dos niveles de bus, uno para la comunicación entre estaciones y otro para el nivel de entrada/salida. Cada uno con sus propias tareas y funciones dedicadas, y la comunicación se realiza por redes físicas diferentes. Mediante el protocolo TCP/IP se incorporan los dos niveles de bus sobre Ethernet. Los sistemas de control podrán incorporar la potencia de los dispositivos distribuidos inteligentes de entrada/salida, haciendo uso de una tecnología altamente extendida y de bajo costo.

## **6 Control basado en PC.**

Los beneficios y ventajas de los autómatas programables nunca han sido puestos en duda, pero de los que tampoco cabe ninguna duda es de la dependencia del usuario respecto al fabricante. Siemens en Europa y Allen Bradley en Norteamérica han hecho un buen negocio durante muchos años gracias a esta dependencia, sin olvidar a compañías como Onrom, Festo, Schneider Automation, Mitsubishi.

Fue en el sector de la industria del automóvil, uno de los sectores de mayor demanda en sistemas de control, donde primero fue adoptado el autómata. El norte de Estados Unidos, cuna de la industria automovilística americana, comprobó pronto los beneficios de estos nuevos sistemas y también padeció las consecuencias de la dependencia usuario-fabricante.

No es de extrañar que fuera también en esta industria y en este mismo lugar donde se comenzó a desarrollar la idea de buscar sistemas más abiertos y flexibles que liberaran al usuario del carácter propietario que los autómatas llevan asociado. A finales de los ochenta el PC era un elemento pasivo de los sistemas de control, pero ya se perfilaba como candidato a jugar un papel más importante.

Durante los últimos años de la década de los ochenta y primeros de los noventa, compañías como General Motors aprovechaban el paro de producción en verano para probar líneas de producción con los nuevos controladores, pero no fue hasta mediados de los noventa cuando dos grandes consumidores de sistemas de control se deciden a implementar la nueva tecnología en importantes líneas de fabricación. General Motors lo implantó en Windsor, Romulus y Warren, mientras Ford lo hacía en Michigan. Una de ellas contaba con 800 computadores industriales.

Los programadores de aplicaciones de supervisión y gestión de producción se han encontrado auténticos muros para la comunicación entre las aplicaciones de gestión y los controladores de planta. Los sistemas de comunicación no eran muy fiables y muchas veces se restringían a la comunicación serie RS-232. Por lo cual, algunas compañías pensaron que la plataforma PC ofrecía más posibilidades a la hora de integrar las funciones clave de

*Ramón Piedrafita Moreno.*

un proceso de producción: visualización, optimización y control, recolección de datos del área de producción de la planta, al igual que almacenamiento y análisis de datos

Las primeras aplicaciones desarrolladas consistían en PC's provistos de tarjetas de entradas/salidas digitales y/o analógicas. Las aplicaciones software se desarrollaban en lenguajes orientados al desarrollo de sistemas de control en tiempo real como el ADA, o lenguajes clásicos de programación como C. Constituían lo que se suele denominar sistemas empujados de control.

En los últimos años han salido al mercado nuevas opciones. Con el desarrollo de los buses de campo, se ha simplificado el cableado de las instalaciones automatizadas de forma que con un simple cable se establece comunicación con todas las estaciones y esclavos del bus. Los maestros del bus pueden ser autómatas programables, pero también pueden serlo PC's con tarjetas de comunicación incorporadas.

En el mercado se dispone de tarjetas que insertadas en el Bus del PC permiten que este sea una estación maestra de un bus industrial. Existen tarjetas para los buses Profibus, Interbus, AS-i... Para desarrollar el control desde el PC, se suministran los correspondientes drivers, para lenguajes de programación como Visual C++, Delphi, Visual Basic.

Por ejemplo la tarjeta CP 2413 permite configurar un PC como maestro de un Bus AS-i. Se pueden conectar hasta un total de cuatro tarjetas al PC, lo cual implica que el PC será maestro de hasta cuatro buses AS-i. El software suministrado incluye ejemplos de programación y las librerías necesarias para los lenguajes Borland C++ 3.1, Turbo C 1.0, Microsoft C 7.0...

Con este sistema de control se tiene la posibilidad de desarrollar aplicaciones de control en lenguajes de programación de ordenadores que directamente se comunican con los elementos conectados a un bus industrial: módulos de entrada/salida, variadores de velocidad, terminales de visualización y explotación.

Las aplicaciones industriales cuyo control esta basado en un PC que actúa de maestro de un bus de campo, en el aspecto hardware, sólo se diferencian con el control basado en autómatas/bus de campo en el maestro del bus.

También existen aplicaciones específicas como pueden ser Incontrol de Wonderware. Este software permite la realización de aplicaciones de control en tiempo real, programadas en lenguajes clásicos de autómatas, pero que se ejecutan en un PC con sistema operativo Windows NT. Permitiendo la conexión con múltiples buses como son DeviceNet, Profibus, ASI, Interbus, Ethernet...

Como una variante del control basado en PC, el grupo Schneider ha sacado al mercado autómatas programables integrados en una tarjeta de tipo AT. En el ordenador se inserta un autómata PCX Premium, el cual dispone de conexión para puerto de programación, bus X y bus FIPIO. De esta forma la instalación industrial es idéntica a la de una automatización convencional. El autómata integrado en el PC (programado en ladder, en Grafset, en list...) es el que controla las máquinas. Se suministran drivers que permiten comunicar las aplicaciones del PC con objetos de la memoria del autómata. En el PC puede ejecutarse una aplicación de monitorización y gestión de producción, que intercambia datos con la memoria de un autómata conectado en su bus AT.

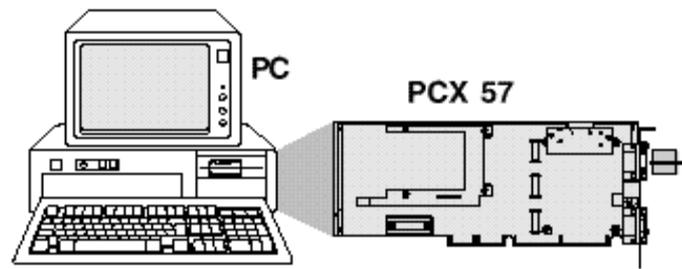


Figura 32. *Autómata integrado en una Tarjeta de PC.*

Si efectuamos la clásica pregunta comparativa: *¿qué sistema de control es mejor?. ¿Autómatas o PC's?* La respuesta no es ni mucho menos tajante, en un principio eran sistemas claramente diferenciados pero poco a poco tienden hacia una integración y fusión de las aplicaciones, siendo las diferencias en algunos casos mínimas. Existen aplicaciones sobre PC que se programan en lenguaje de autómatas, y autómatas cuyas funcionalidades son similares a los PC's. Existen Instalaciones industriales donde el sistema de cableado es el mismo (bus de campo) y sólo se diferencian en el maestro del bus (autómata o PC)

Pero en lo referido a la fiabilidad del control, consideramos que las técnicas de gestión de fallos integradas en los autómatas en forma hardware y software, paradas de emergencia y rearmes, están más desarrolladas que las que se incorporan en los controles basados en PC. En cambio el PC, además de la clásica función de control de los autómatas, integra otras funciones de producción como son la supervisión, el almacenamiento y análisis de datos, la gestión de materiales....

Por lo cual, y a la vista de los ejemplos expuestos, considero que son dos plataformas que se complementan, que en los últimos años han tendido a integrar aplicaciones y funcionalidades similares.