

Manuel Domínguez González

Catedrático de Universidad
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

**LA AUTOMÁTICA:
DISCIPLINA CIENTÍFICA
TRANSVERSAL, OCULTA
Y TRANSFORMADORA**

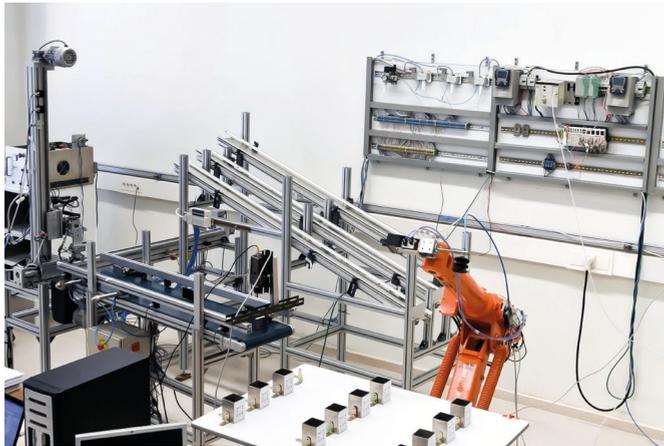
**Lección Inaugural del Curso Académico
2023-2024
Campus de León**



**universidad
de león**

MANUEL DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ
Catedrático de Universidad
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

**LA AUTOMÁTICA:
DISCIPLINA CIENTÍFICA TRANSVERSAL,
OCULTA Y TRANSFORMADORA**



MANUEL DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ
Catedrático de Universidad
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
Dpto. de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

**LA AUTOMÁTICA:
DISCIPLINA CIENTÍFICA TRANSVERSAL,
OCULTA Y TRANSFORMADORA**

LECCIÓN INAUGURAL
CURSO ACADÉMICO
2023-2024
CAMPUS DE LEÓN



**universidad
de león**



© Universidad de León
Servicio de Publicaciones
© Manuel Domínguez González

ISBN: 978-84-19682-16-1
Depósito legal: DL LE 285-2023

Diseño y maquetación digitales: David Aller Llamera
Fotografía de portadilla interior: célula de clasificación robotizada
Imprime: ~~Cariflex~~ ~~Gráficas~~ ~~CPA~~ ~~RAYN~~
Impreso en España / *Printed in Spain*
León, Septiembre 2023

CONTENIDO

1. Introducción	13
2. Orígenes de la Automática	17
1.1. Máquina de vapor de James Watt.....	33
1.2. Aportaciones de James C. Maxwell.....	36
3. Concepto de realimentación.....	41
3.1. H.S. Black y el amplificador realimentado	51
3.2. Harry Nyquist y el análisis frecuencial.....	57
4. Hacia la Automática Moderna	65
5. La Automática en España	75
5.1. Grupos temáticos del Comité Español de Automática	82
6. Modelado de sistemas.....	87
6.1. Modelado matemático.....	87
6.2. Modelado basado en datos.....	95
7. Digitalización de la industria.....	107
7.1. Demostradores en Industria 4.0.....	109
7.2. Maqueta de control de procesos de la Universidad de León	112

7.3. Célula electropneumática robotizada de la Universidad de León....	115
8. Laboratorios remotos	119
8.1. Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León.....	120
Referencias	125

A Nedy, Cris y Bea

Sr. Rector Magnífico

Autoridades

Miembros de la Comunidad Universitaria

Señoras y Señores

1. INTRODUCCIÓN

La Automática se suele definir como “la disciplina científica que trata de sustituir al operador humano, en sus tareas físicas o mentales, por sistemas artificiales”. Esta definición, probablemente, no es extraña para nadie en estos tiempos tecnológicos en los que estamos inmersos. Ahora bien, podríamos decir que la evolución de la Automática ha ido a la par con la historia de la humanidad, porque ya desde la Antigüedad el ser humano trataba de desarrollar artilugios mecánicos que desempeñaran determinadas funcionalidades que eran necesarias en el día a día, de forma automática. Algunos de estos sistemas básicos, que trataban de obtener aprovechamiento y manejo de las fuentes de energía de la época, ya quedaron descritos en una serie de tratados publicados por Herón de Alejandría (que en su obra hacía referencia a autores, desconocidos para nosotros hoy en día, anteriores a él). Podría decirse que ese conjunto de tratados constituye el principio de la Automática basada en la experimentación.

En los últimos 300 años, la Automática ha tenido un extraordinario desarrollo, especialmente a partir de la primera revolución industrial, basándose en lo que son sus dos pilares fundamentales: las ciencias, principalmente matemáticas y física, y las tecnologías. Ambos pilares se han impulsado y realimentado mutuamente para conseguir lo que denominamos, desde el punto de vista de la ingeniería, sistemas automáticos de control.

La automática es una disciplina transversal, que está presente en todos los ámbitos de nuestra sociedad. Desde la industria, propia-

mente dicha, hasta el espacio, desde la agricultura hasta la aviación, desde la robótica hasta la biotecnología, desde los transportes hasta la medicina, desde los computadores hasta los sistemas energéticos, desde la digitalización hasta la inteligencia artificial. Ámbitos tan dispares como los mencionados hacen uso de sistemas de control, la mayor parte de las veces sin que sepamos que están ahí presentes, por eso, la Automática fue denominada en el año 1999 por el Profesor Karl J Åström *"The hidden technology"* es decir, "la tecnología oculta". Tanto es el impacto de la Automática en el bienestar de la sociedad que podríamos decir que uno de los factores determinantes de la disminución de la pobreza extrema en el mundo (% de la población que vive con menos de 1,90\$ al día) ha sido esta disciplina. Hace unos 300 años, el 80% de una población de menos de 1000 millones de personas en el mundo estaba en una situación de pobreza extrema y, hoy en día, estamos por debajo del 8%, pero para una población de 8000 millones.

Merece también especial atención un breve comentario, fuera del campo propiamente dicho de la ingeniería, y del alcance de esta lección inaugural, que es el del ámbito humano. Los sistemas de control están presentes en innumerables funcionalidades del ser humano, algunas conocidas y seguramente otras muchas desconocidas, y que, además, le son vitales: el movimiento, la escritura, la navegación, las funciones fisiológicas, cardiovasculares, etc. implementan sistemas de control vitales y críticos. Cuando estos sistemas de control empiezan a fallar, producen situaciones adversas para el ser humano. La Automática se ha nutrido del conocimiento de muchos de estos sistemas de control y, a la vez, ha proporcionado soluciones "artificiales" para la mejora de las disfuncionalidades: corazones o páncreas artificiales, exoesqueletos, neurotecnologías para la asistencia y la rehabilitación, y un largo etc. constituyen un campo de investigación cada vez más importante y con más peso en la Automática.

El aspecto transformador de la Automática, que se pone de manifiesto a través de esta lección, también se ha observado en la Universidad de León. En el año 1982 se puso en marcha la especialidad de Electrónica, Regulación y Automatismos de la titulación universitaria de Ingeniero técnico Industrial. Un reducido número de personas, vinculadas a la Automática, comenzamos aquel proyecto que supuso la consolidación en León de una Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. Otra actividad importante, fue la creación del Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León en el año 1994, dentro del programa SPRINT de la Unión Europea liderado por la Diputación de León. Este centro de investigación, a través de sus proyectos de transferencia, acercó la Automática al sector productivo regional y facilitó la formación de doctores especializados en este campo.

Hoy en día, aquella inicial Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial se ha transformado en la Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial, con 6 titulaciones de Grado y 6 de Máster, con un claustro de 150 profesores y unos 2000 alumnos. En el caso particular del área de conocimiento de Ingeniería de Sistemas y Automática, el número de profesores es de 30, impartiendo del orden de 85 asignaturas y disponiendo de un importante número de laboratorios, tecnologías y proyectos de investigación y transferencia al sector productivo vinculados al ámbito de la Automática.

Finalmente, espero que esta lección inaugural sea clarificadora para ti, lector, y que te permita apreciar que la automática es una disciplina científica viva, que evoluciona a través de la historia hasta llegar a las soluciones para nuestra vida, de las que hoy disfrutamos, y que, como amigos de la Automática, no debemos ponernos límites, ya que *“el porvenir pertenece a los innovadores”* (André Gide).

2. ORÍGENES DE LA AUTOMÁTICA

Otto Mayr (1930), ingeniero alemán, obtiene su diplomatura por la *Technical University of Munich* en el año 1956. Después de una serie de años dedicados a la actividad profesional y docente en diferentes empresas y países, retorna a Alemania y se incorpora como investigador asociado en el *Deutsches Museum* de Munich, donde comenzó los estudios sobre el origen de los mecanismos de realimentación (principio básico del control), obteniendo por este trabajo el doctorado en la misma universidad de su diplomatura, trabajo que fue publicado en 1969.

Obtenido el doctorado, se incorporó al National Museum of History and Technology de la Smithsonian Institution en Washington (Estados Unidos) hasta 1983, año en el que retornó de nuevo a Munich como director general del *Deutsches Museum*, donde se retiró en 1992. Dedicó, por lo tanto, la mayor parte de su carrera profesional a la historia de la tecnología, realizando destacadas publicaciones y obteniendo importantes reconocimientos y premios. En su libro "The origins of feedback control" (Mayr, 1970) revela que tanto el concepto de control, como de sus aplicaciones eran bastante antiguas. Muestra una serie relacionada de invenciones que supusieron ejemplos básicos de los primeros sistemas de control y, además, lo hace con una profunda y sutil explicación de su relación con el ámbito social, económico y político (Bennett, 1979). En el libro "Autoridad, libertad y maquinaria automática en la primera modernidad europea" (Mayr, 1986), expresa dos cuestiones importantes:

1. La tecnología como actividad fundamental está íntimamente relacionada con las restantes actividades humanas y, en consecuencia, es una parte integral e indispensable de la cultura humana y no es, como se dice a menudo, una fuerza extraña, inhumana, desatada sobre la humanidad por algún agente externo.
2. La relación interactiva entre la tecnología y el resto de las manifestaciones de la vida y la cultura humanas se puede probar, incluso, en interacciones tan intrincadas y elusivas como las de las ideas políticas, sociales, económicas o religiosas dominantes en una sociedad determinada y en las preferencias y diseños contemporáneos del utillaje técnico.

Para demostrar estas aseveraciones, plantea el estudio de un problema histórico específico, escogiendo para ello el examen cronológico de los “mecanismos de realimentación” (fundamento básico de los sistemas de control), que ya existían en la antigüedad, eran conocidos y han sobrevivido a lo largo del tiempo, pero que, en la Europa de la Edad Media hasta el Barroco no se mencionaron. Reaparecieron con fuerza en el siglo XVIII en Gran Bretaña y, con bastante menos fuerza, en el continente y, según el autor, dicha ignorancia no era mantenida de forma inocente, sino que se había realizado de forma deliberada. Esto indicará y justificará, posteriormente, algunos aspectos del auge de la primera revolución industrial en Inglaterra.

Ahora bien, cómo podemos establecer los comienzos de los sistemas básicos que incorporan ideas de control. La mayoría de los autores toman como referencia el libro “Neumática” de Herón de Alejandría, ingeniero ingenioso y matemático, escrito aproximadamente en el año 60 A.C. (la cronología no es muy precisa). En este libro, ya se describe un número extenso de artilugios prácticos con implicaciones tecnológicas, que incorporaban principios básicos de automatismos mecánicos y de control como la realimentación. Además, Herón señala al

principio de su trabajo que incorporó a sus propios descubrimientos aquellos que había recibido de antiguos autores, lo cual justifica aún más la utilización previa de tecnologías e incorpora dudas e incertidumbres sobre la cronología.

El tratado de Neumática se publicó por primera vez traducido al italiano por Aleotti (Bologna, 1547). En 1575, apareció una versión en Latín de F. Commandine (Urbino, 1575): esta traducción, a través de la cual se ha hecho más ampliamente conocido el trabajo, fue reimpressa en Ámsterdam y en París (Greenwood y Woodcroft, 1851).

Si tomamos del citado libro los artilugios basados en lo que podríamos denominar de forma sencilla “sifones”, podemos observar una clara línea de evolución tecnológica unida al control. Así, el más sencillo de los sifones permitía la extracción de líquido de un recipiente, de manera no uniforme y condicionada por la altura a la que se encontraba la superficie del líquido en el recipiente. En la Figura 2.1 se puede observar este antiguo dispositivo:

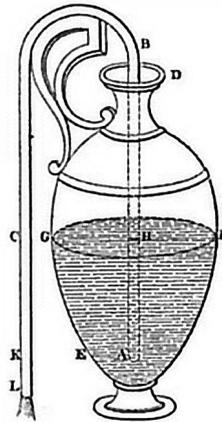


Figura 2.1. Sifón curvado (Greenwood y Woodcroft, 1851)

A partir de aquí, comienza la secuencia de evolución de este tipo de artilugios, en los que se fueron introduciendo innovaciones que tenían

por objeto conseguir caudales constantes o bien caudales constantes con velocidades que podían ser modificadas a demanda del usuario.

En la Figura 2.2, puede observarse esta evolución, en la que los “inventores” fueron incorporando de forma práctica pequeños sistemas que, al final, conseguían introducir efectos de “control” sobre el caudal extraído.

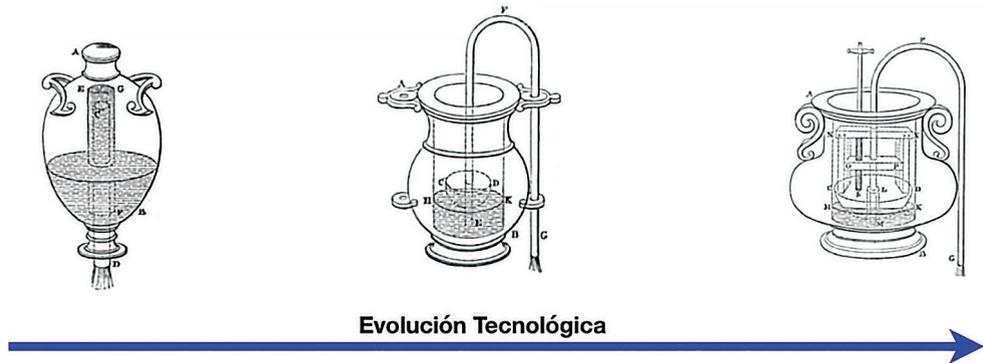


Figura 2.2. Evolución de los sifones (Greenwood y Woodcroft, 1851)

El mismo proceso ocurrió para otro tipo de aplicaciones. Por ejemplo, en la Figura 2.3, se puede observar un sistema de alimentación automática de la mecha de una lámpara de aceite, de manera que se consiguiera tener siempre una llama constante.

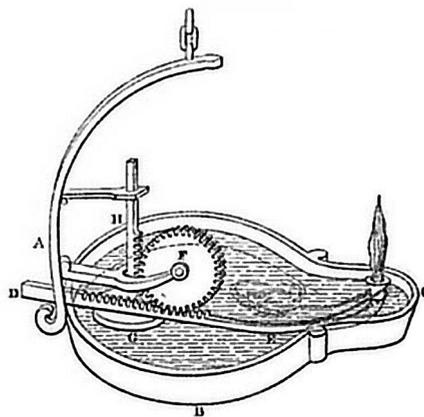


Figura 2.3. Lámpara ajustable (Greenwood y Woodcroft, 1851)

Esta evolución permitió, a su vez, el desarrollo de otros tipos de sistemas todavía más complejos, como una bomba hidráulica para la impulsión de líquidos que podemos observar en la Figura 2.4.

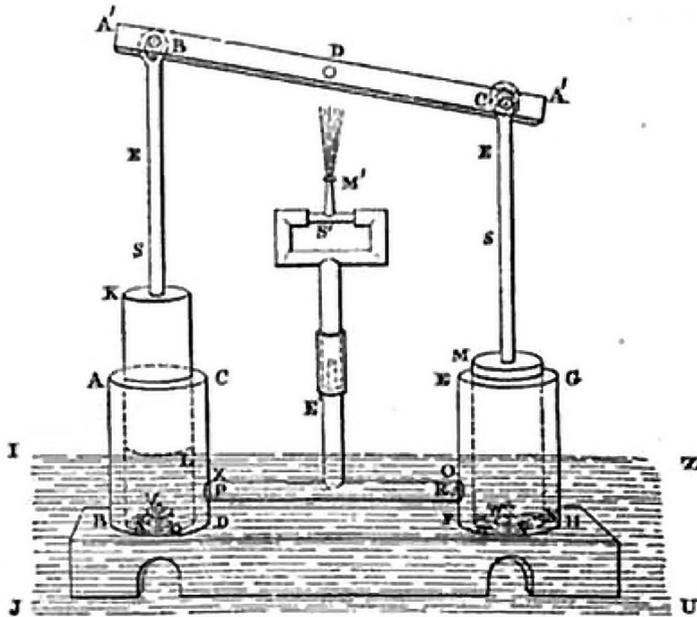


Figura 2.4. Bomba hidráulica para impulsión de líquidos (Greenwood y Woodcroft, 1851)

Dominar estas y otras tecnologías que figuran en el libro de Herón de Alejandría, permitió avanzar hacia otro tipo de sistemas más complejos, desarrollar "autómatas mecánicos" que se utilizaban en los templos y palacios e incluso sistemas de más envergadura, como podían ser los utilizados para la apertura y cierre de puertas en los templos. En la Figura 2.5 se puede ver un dibujo tomado del citado libro.

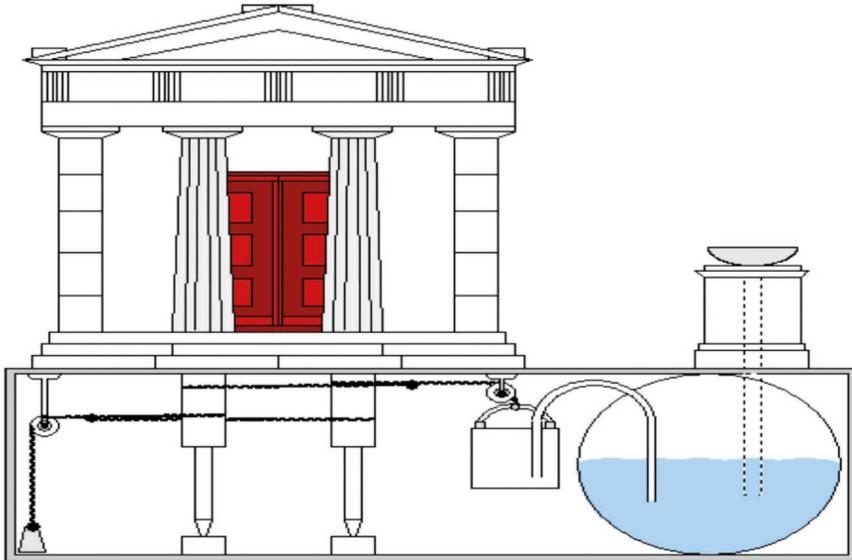


Figura 2.5. Sistema de apertura y cierre de puertas de un templo (Greenwood y Woodcroft, 1851)

Ahora bien, otra línea importante de evolución de las tecnologías, y en consecuencia relacionada con los sistemas de control, ha estado ligada a la medida real del tiempo, especialmente si tenemos en cuenta las implicaciones que esto ha tenido en cuanto a la organización de las sociedades.

Desde muy antiguo, el hombre abordó la medida del tiempo. Inicialmente, de forma limitada y no precisa, mediante relojes de sol. Estos relojes, como era obvio, fueron complementados, especialmente en las noches y en los días con ausencia del sol, con medidas del tiempo basadas en trasvase de agua entre vasijas denominadas *clepsidras*. Este tipo de instrumentos, además, no tenían capacidad de accionamiento, es decir no movían nada.

El primer reloj de agua conocido que trataba de corregir los problemas citados anteriormente, mediante una importante innovación tecnológica, fue el desarrollado por Ktesibios, un físico e inventor griego de la escuela de Alejandría (Circa, 270 A.C.) al que se le considera la primera gran figura de la antigua tradición ingenieril de dicha escuela. Su reloj de agua, representado en la Figura 2.6, incorporaba un sistema para que el caudal de agua que se vertía a un depósito fuera siempre constante. De esta manera, se obtenía una variación constante del nivel de agua en el depósito y esta variación permitía la “medida constante del tiempo”. Además, disponía de capacidad de accionamiento, mediante un sistema de sincronización de movimientos, de manera que podía tenerse indicada la medida del tiempo. En la figura podemos observar cómo, mediante un flotador de tipo cónico (G), incorporado en el sistema que permite el vertido del agua al depósito, se consiguen reducir, de forma importante, las fluctuaciones del caudal y obtener así una variación constante del nivel de agua en el depósito. Esta variación en el nivel indica, a su vez, la medida continua del tiempo. Además, el reloj de agua incorporaba, como innovación hasta esa época desconocida, un sistema de “sincronización” muy elemental que permitía, mediante el giro continuo y sincronizado, la representación de la medida del tiempo mediante algún tipo de artilugio o figura (Mayr, 1970). En su publicación, Otto Mayr amplía los detalles constructivos, tecnológicos y de funcionamiento, así como dudas respecto a la falta de información disponible para aclarar los ajustes del sistema, engranajes, útiles, etc. y, por supuesto, para la calibración del intervalo de referencia de la medida del tiempo, ya que se consideraba la “duodécima parte entre la salida y la puesta del sol” y esto necesitaría de ajustes continuos a lo largo del año. Ahora bien, aún con estas y otras consideraciones, lo cierto es que los relojes de agua eran cada vez más sofisticados y se extendieron ampliamente en la Roma clásica, como lo atestiguan documentos de Vitruvio y Herón de Alejandría.

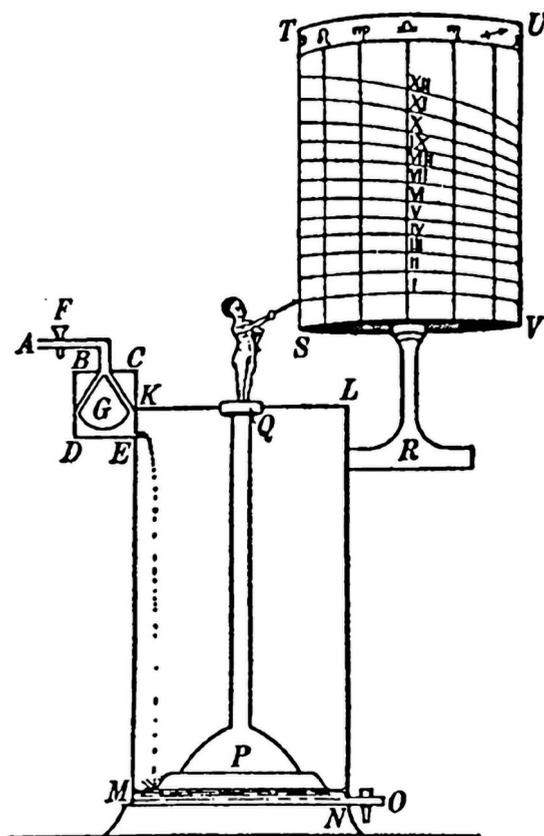


Figura 2.6. Reloj de agua de Ktesibios (Mayr, 1970)

El reloj de agua aportó un cambio decisivo en la medida del tiempo, incorporó mecanismos de accionamiento, de sincronización mediante engranajes básicos y de calibración, y contribuyó notablemente al conocimiento y desarrollo de sistemas de regulación (control) que permitieran tener medidas estables en grandes intervalos de tiempo. Parte de estos desarrollos tuvieron continuidad, con posterioridad, en mecanismos de autómatas y sistemas de representación del movimiento de planetas, del zodiaco, de calendarios, etc. basados en “trenes de engranajes complejos”. Estos se mantuvieron y evolucionaron en el tiempo, abriendo el camino a los relojes mecánicos.

Se tienen documentos de la existencia de relojes mecánicos entre los años 1300 y 1500 que basan su funcionamiento en pesas, que son las que aportan la energía necesaria para su movimiento. Al igual que ocurría en los basados en caudal de agua, estos relojes planteaban el problema de regular (controlar) el movimiento de aceleración de una pesa colgante y obtener un movimiento de velocidad constante para conseguir una medida del tiempo, también constante. De nuevo, una innovación tecnológica, mediante la denominada “Áncora de Verge y Foliot” permitió controlar la velocidad de caída de la pesa.

En 1657 Christian Huygens inventó el reloj de péndulo, que ya había sido anticipado por Galileo y que, con el áncora de péndulo, consiguió mantener un funcionamiento constante y un aumento importante en la precisión de la medida del tiempo.

Además de este tipo de innovaciones tecnológicas, dirigidas a permitir el control de variables de caudal y de velocidad en los diferentes relojes comentados, la incorporación de mecanismos de potencia basados en resortes permitió disponer de otros tipos de relojes con más autonomía de funcionamiento, flexibilidad y portabilidad. Pero esto, de nuevo, implicó el desarrollo de sistemas que permitieran, además, el control de la potencia del resorte.

Los sencillos ejemplos anteriores son una muestra que nos indica la importancia de los sistemas de control para conseguir avances tecnológicos y mejoras en las funcionalidades de los sistemas. Por supuesto que la revolución en el desarrollo de los relojes fue, y sigue siendo, muchísimo más amplia, con más aplicaciones y con muchas más innovaciones tecnológicas y de gran relevancia, tanto económica como social, hasta llegar a nuestros días, como fácilmente podemos observar y leer en multitud de documentos.

Existen también otros ámbitos, más vinculados ya a la producción industrial, en los que podemos observar líneas de evolución e innovación

unidas a los sistemas de control. En efecto, hacia el año 1620 Cornelius Drebbel, inventor y alquimista holandés, desarrolló un artilugio para el control de la temperatura en hornos e incubadoras. Es decir, el prototipo de lo que hoy en día conocemos como termostato. En la Figura 2.7, se puede ver su funcionamiento: mediante una ampolla (G) con alcohol y mercurio en la parte acodada (B) conseguía tener una medida de la temperatura del interior de la incubadora, de manera que, cuando la temperatura en el interior comenzaba a subir, se producía la expansión del vapor de alcohol, empujaba el mercurio y un mecanismo cerraba la salida de gases y provocaba la reducción de la combustión y que, por lo tanto, la temperatura bajase. En el caso contrario, cuando la temperatura bajaba, el mecanismo abría la salida de gases para facilitar la entrada de aire y aumentar la combustión. Conseguía, mediante este sistema, mantener un control continuo y constante de la temperatura a lo largo del tiempo. Había creado un sensor de temperatura (ampolla) y un accionamiento (mercurio-mecanismo) que en su conjunto funcionaban incorporando un efecto de realimentación negativa.

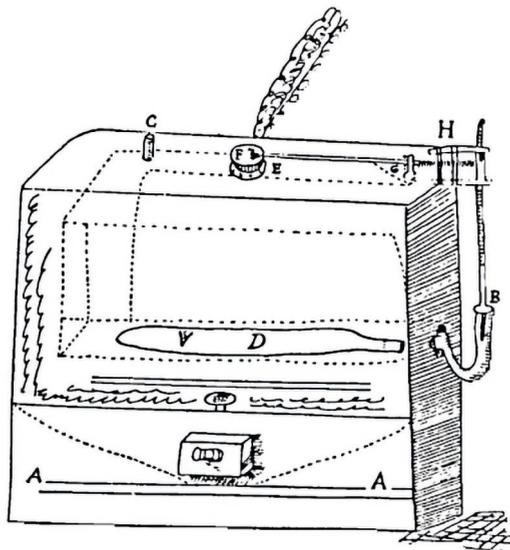


Figura 2.7. Incubadora de Cornelius Drebbel (Mayr, 1970)

Este tipo de sistemas se fueron ampliando y generalizando a hornos y calderas de producción de vapor para su utilización en la industria, de manera que, de nuevo, aparecieron los problemas de control. Así, con la invención de la máquina de vapor y su incorporación, como fuerza motriz, a los procesos productivos de fabricación de tejidos, surgieron nuevos problemas en el control de la presión del vapor en la caldera y de la velocidad de funcionamiento de la máquina.

Para el primero de los problemas, Denis Papin propuso en 1681, ante la *Royal Society* de Londres, una válvula de seguridad que, mediante un sistema de equilibrio mecánico entre la fuerza producida por la presión del vapor y un peso exterior, conseguía regular continuamente la presión del vapor en la caldera. Este funcionamiento puede verse en la Figura 2.8.

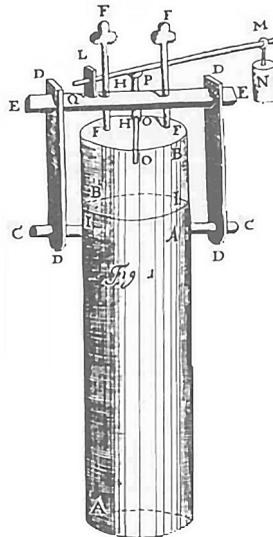


Figura 2.8. Válvula de vapor de Denis Papin (Mayr, 1970)

El segundo de los problemas, más complejo e interesante, también ocurría en el control de la velocidad de máquinas rotativas como los molinos movidos por aire o por agua.

El creciente desarrollo e implantación de molinos de viento en Inglaterra y en Escocia impulsó el crecimiento de una comunidad técnica e ingenieril con importantes conocimientos técnicos y prácticos en este campo. Esta formación permitiría que muchos de ellos pasarán a formar parte del grupo de importantes ingenieros mecánicos de Inglaterra de esa época.

En el siglo XVIII, ya se patentaron en Inglaterra diferentes sistemas que trataban de evitar la incidencia que los cambios de viento provocaban en el funcionamiento de las ruedas del molino y, por lo tanto, la obtención de un producto (harina) con muy baja calidad y homogeneidad, así como evitar desgastes excesivos en las ruedas. Todos los esfuerzos tecnológicos tenían como objetivo intentar conseguir un mejor control tanto de la velocidad de las aspas del molino como de su orientación. En definitiva, “regular la velocidad de funcionamiento del molino de viento” de forma continua a lo largo del tiempo. En 1745, Edmund Lee patentó un dispositivo de realimentación bajo el título: “*Self-regulating Wind Machine*” (patente británica N^o 615). Dos años después también consiguió, prácticamente con las mismas características, una nueva patente en Holanda. En estas patentes describe dos invenciones: una dirigida a mantener el molino en la dirección del viento y la otra a actuar, mediante mecanismos, sobre el ángulo de ataque de las aspas del molino. Ambas tenían como objetivo final el control de la velocidad de funcionamiento de los molinos de viento y, por consiguiente, la mejora en cuanto a la seguridad frente a cambios bruscos en el viento y el rendimiento. En cualquier caso, estos sistemas no constituían, todavía, auténticos sistemas de control, ya que en ningún momento se medía la velocidad del viento y, por lo tanto, no se podían diseñar mecanismos que actuaran en función de su valor.

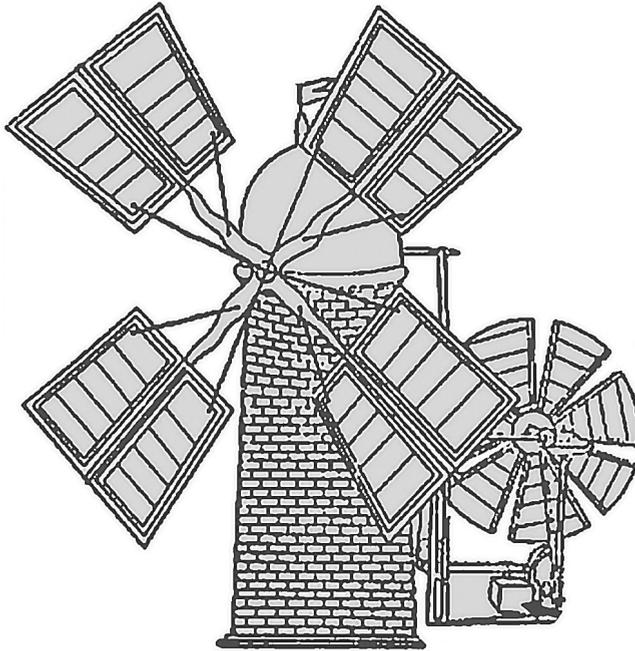


Figura 2.9. Sistema de orientación de las aspas de los molinos (Mayr, 1970)

Las dos invenciones de Edmund Lee reaparecen en una nueva patente inglesa (Nº. 1041 "*Smelting Furnace, etc.*") en el año 1775, que corresponde a John Barber. El objetivo de esta patente era utilizar aquellos mecanismos, pero ahora en un alto horno que funcionaba con un sistema de soplado de aire. Según algunos autores, Barber no tenía, probablemente, la intención de hacer suya dicha patente, sino que estaba usando "una serie de mecanismos que eran ya muy conocidos" y que fueron mejorados notablemente por él. Además, según Rex Wailes (*Rex Wailes The English Windmill*), propició su uso generalizado como consecuencia de su materialización, precisamente, mediante hierro fundido obtenido en altos hornos. Curiosamente esta generalización no se extendió a Europa continental, solamente tuvo éxito en el norte

y en el oeste de Alemania y en Dinamarca. En el resto del continente no fue aceptada (Clark, 1930).

Ahora bien, la necesidad de disponer de medidas de la velocidad en los molinos se hacía cada vez más necesaria ya que, a los problemas citados anteriormente, se unía la necesidad de poder controlar la separación entre las ruedas de moler. En efecto, cuando la velocidad aumentaba, también lo hacía el caudal de grano y se introducía más grano entre las piedras, estas tendían a separarse y esto provocaba que el grano no se moliera adecuadamente. Se hacía necesario disponer de algún sistema que midiera la velocidad de rotación y, en función de esta, generara una fuerza de reacción proporcional que presionara las ruedas para aproximarlas (Burne et al., 1943). Entre los años 1785 y 1789, se constatan las 3 primeras patentes en Inglaterra que abordan este problema que se identifica con el termino *lift-tenters*. La primera de ellas corresponde a Robert Hilton (patente británica N^o 1484). En ella propone, para la medida de la velocidad, un ventilador centrífugo cuyo caudal de aire desplaza un deflector, y este, a su vez, mueve una serie de mecanismos que actúan sobre la rueda de moler superior, para aproximarla o separarla de la rueda inferior en función de la velocidad. Ahora bien, a medida que aumentaba la velocidad, también aumentaba la presión en las ruedas y, por lo tanto, la fricción era mayor, con lo cual disminuía la velocidad. Este método solo era operativo en pequeños rangos de funcionamiento. Esta patente fue superada ampliamente por la desarrollada en el año 1787 por Thomas Mead (*British Patent N^o 1628*). En esta, la medida de la velocidad se realizaba mediante péndulos centrífugos que accionaban los correspondientes mecanismos de aproximación de las ruedas de moler. Además, incorporaba un nuevo sistema mecánico de transmisión automática y un regulador de velocidad que, a partir de la posición del péndulo centrífugo, actuaba sobre el área de vela del molino, consiguiéndose así una velocidad de funcionamiento constante que evita

las fluctuaciones en el funcionamiento del molino. En la especificación de la patente correspondiente al regulador de velocidad se indica que el sistema es: *“un regulador sobre un nuevo principio para el viento y otros molinos, para el mejor y más regular enrollado y despliegue de las velas en molinos de viento sin la asistencia constante de un hombre”* (Mayr, 1970). El sistema está representado en la Figura 2.10.

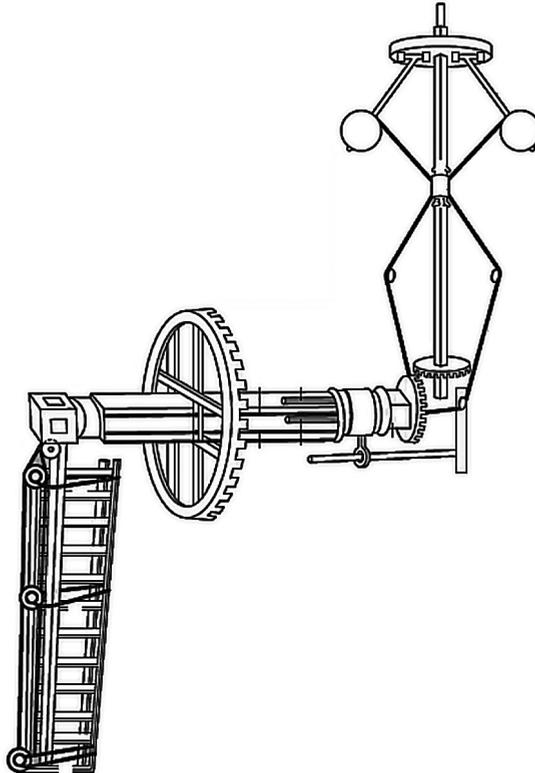


Figura 2.10. Regulador de velocidad patentado por Thomas Mead en 1787 (Mayr, 1970)

Desde el punto de vista tecnológico, estos sistemas provocaron avances importantes, sobre todo en el conocimiento de la época. Aunque, según diversos autores, su uso no se popularizó ni extendió de forma general, debido fundamentalmente a la complejidad de su funcionamiento y, por supuesto, de su mantenimiento. Solamente hay

que pensar en cómo podían estar fabricadas, y con qué materiales, las velas en aquellos tiempos para que fueran capaces de soportar, permanentemente, los continuos procesos de enrollado y desenrollado forzado por el sistema de regulación de velocidad.

Ahora bien, es importante destacar que los constructores de molinos británicos eran multidisciplinares, trabajaban el hierro, la madera y la mecánica, luchaban contra los problemas del viento, de las ruedas hidráulicas y de la dinámica. Impulsaron una importante actividad en cuanto al desarrollo de artilugios mecánicos que eran incorporados en sus molinos y que, además, lo hacían de manera muy experimental, práctica y evolucionada en cada una de sus construcciones. Eran muy artesanales, nada convencionales, emprendedores y dispuestos en todo momento a la experimentación, pero su actividad, en términos de hoy en día, no era muy metodológica. James Watt, importante referente que se comentará más adelante, expresó acerca de ellos:

“No hay fin de constructores de molinos una vez que se les da permiso para que se pongan a trabajar en lo que ellos llaman maquinaria: han multiplicado ruedas sobre ruedas hasta que ahora tiene casi tantos como un planetario”

James Watt,
carta a Matthew Boulton, Birmingham, Sept. 5, 1783 (Muirhead, 1854)

Pero lo cierto es que fueron impulsores de importantes avances mecánicos, incorporaron sistemas que tenían como base los péndulos centrífugos y que, con estos sistemas, empezaron a incorporar, de forma práctica, el concepto de realimentación. También se tienen referencias prácticas, a través del amplio conjunto de construcciones que realizaron, de que muchos de sus inventos nunca fueron patentados, debido fundamentalmente a la poca tradición y conocimiento, en aquella época, en cuanto a patentes y publicaciones. Eso sí, según Otto Mayr (Mayr, 1970) se puede considerar que representan el vín-

culo entre el artesano tradicional avanzado y el ingeniero formado científicamente.

Finalmente, y en relación con lo citado sobre los sistemas utilizados en los molinos, merece la pena destacar el comentario indicado en la patente de Mead de 1787 respecto de la idea de funcionamiento que aportaban dichos sistemas: “*sin la asistencia constante de un hombre*”. Esto ya estaba poniendo de manifiesto, en aquella fecha, una pauta importante en cuanto a cómo abordar los nuevos retos tecnológicos de la época en los sistemas básicos de producción que se disponían.

2.1. Máquina de vapor de James Watt

Como se ha expuesto, la utilización de mecanismos muy básicos de control, basados en péndulos centrífugos, estuvo focalizada en el campo de los molinos de viento e hidráulicos. Otro campo en el que también se podría analizar más extensamente su aplicación es, como se indicó en párrafos previos, el de la relojería. Existen diversidad de aplicaciones para regular tanto la potencia aportada a los mecanismos de medida del tiempo a partir de pesas, resortes, péndulos, etc. como a la velocidad de funcionamiento.

Ahora bien, el verdadero impacto, desarrollo e implicación científica fue debido a su aplicación en las máquinas de vapor como consecuencia del desarrollo de estas en los comienzos de la denominada *Revolución Industrial* o *Primera Revolución Industrial*, en la segunda mitad del siglo XVIII. En dicha revolución, se produjeron importantes transformaciones económicas, sociales y tecnológicas, primero en Gran Bretaña y unas décadas después en Europa occidental y América anglosajona. Una de esas transformaciones consistió en la incorporación, en los procesos productivos de fabricación de telas, de la máquina de vapor como fuerza motriz. Ante los problemas de funcionamiento que tenían, los ingenieros empezaron a

intentar incorporarles nuevos sistemas de control. Esta aplicación es considerada como “*el inicio del control automático realimentado*” como disciplina científica.

En efecto, Stuart Bennett en (Bennett, 1979, 1996) hace un completo estudio de estos comienzos. Quizás, uno de los aspectos más relevante sea la carta escrita el 28 de mayo de 1788 por Matthew Boulton (1728-1809), empresario metalúrgico, a su socio James Watt (1736-1819), ingeniero mecánico extraordinario con experiencia en máquinas de vapor atmosféricas para bombeo de agua. En la carta, le describe el sistema “*lift-tenters*” que había visto que se estaba usando en los molinos para controlar el espacio entre las ruedas de moler. Pensaba que este sistema podría ayudar a solucionar los problemas que tenían para mantener la velocidad de rotación de las nuevas máquinas de vapor estáticas con las que trabajaban. En noviembre de 1788 Watt tenía un diseño en planos denominado “*Centrifugal Speed Regulator*”, es decir un regulador de velocidad centrífugo, que fue llevado a desarrollar en taller por su asistente John Southern e incorporado a una máquina de vapor a principios de 1789. Este dispositivo trabajaba en función de la diferencia entre la velocidad deseada en la máquina y la velocidad real de la máquina. Esta diferencia, error, es la que actuaba sobre la válvula de admisión de vapor, de manera que regulaba la cantidad de vapor suministrado y, por lo tanto, reducía las variaciones en la velocidad de rotación producidas por cambios en las cargas, desajustes, pérdidas de presión, etc. Cuando la velocidad tendía a incrementarse, las bolas del regulador se separaban haciendo que el sistema mecánico que llevaba asociado cerrara el paso de vapor y la velocidad de la maquina disminuyera. En el caso contrario, cuando la velocidad tendía a decrecer, las bolas se aproximaban, el sistema mecánico abría la válvula de admisión de vapor y la velocidad se recuperaba.

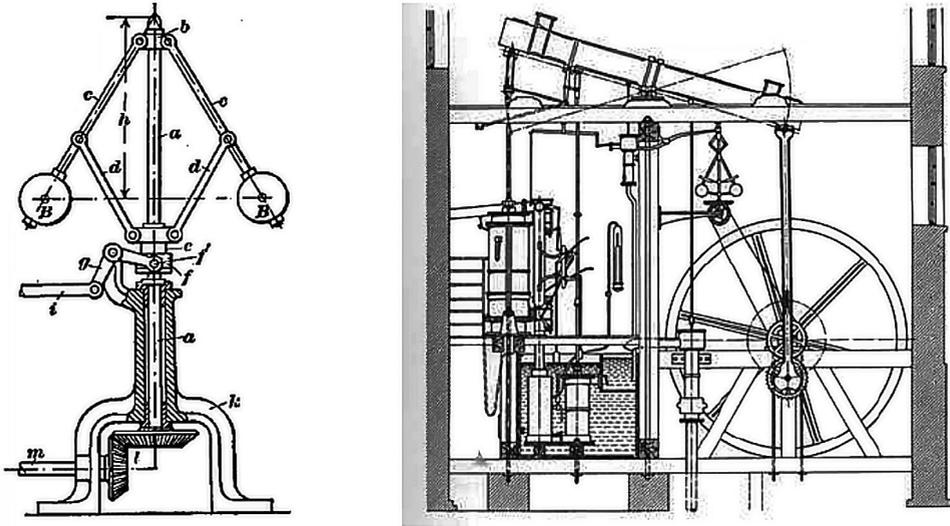


Figura 2.11. “Centrifugal Speed Regulator” y máquina de vapor estática de James Watt (Strandh, 1989)

Watt no era partidario de patentar este sistema ya que era una modificación basada en la patente de Mead para los molinos, pero, no solo por esto sino porque, en general, su filosofía era, “que cuando no se disponía de fortuna independiente, se debía mantener en secreto los desarrollos con el fin de explotarlos comercialmente”. Esta idea ya se la había manifestado por carta, en relación con un trabajo anterior, a *Jean Hyacinthe Magellan*, quien estaba escribiendo un tratado a cerca de la historia de los descubrimientos sobre el calor, motivo por el que se había puesto en contacto con él (Miller, 2019).

Durante algún tiempo, *Boulton and Watt*, desarrollaron máquinas estáticas de vapor y trataron de ocultar sus innovaciones en las máquinas que vendían, especialmente el regulador de Watt, que no exponían ni comentaban y que, además, imponían a sus compradores que no lo mostraran. Cuando otros fabricantes empezaron a incorporarlo a sus máquinas, hubo rumores de que este sistema ya había sido utilizado anteriormente y que Watt tenía razón al no haberlo patentado. Lo cierto es que la innovadora aplicación del péndulo centrífugo en

máquinas estáticas de vapor que realizó James Watt fue una auténtica innovación que revolucionó notablemente el desarrollo de dichas máquinas, su funcionamiento y su implementación en los sistemas productivos. Aun no habiendo sido patentado por él, el reconocimiento hacia su persona ha sido, sin duda, extraordinario y representativo del comienzo de una nueva época, de la revolución industrial, en la aplicación de los sistemas de control por realimentación en la industria. Su gran importancia, además, se justifica por el hecho de que en el año 1868 había en Inglaterra del orden de 75.000 reguladores de velocidad implementados en máquinas de vapor (Mayr, 1970).

En su continua expansión, diferentes variantes sobre reguladores de velocidad fueron desarrollándose para corregir y mejorar el funcionamiento de las máquinas de vapor. En efecto, en las primeras implementaciones, sus resultados fueron muy buenos, fundamentalmente porque las máquinas que tenían más inercia, debido a problemas mecánicos y de gran rozamiento, veían solventados sus problemas por la acción del control. Cuando las máquinas alcanzaron diseños óptimos y fueron mejorando su rendimiento, se empezaron a observar las limitaciones que tenían este tipo de reguladores: un error en régimen permanente debido a la acción de control proporcional que aplica y baja capacidad de aportar potencia para actuar sobre la válvula de admisión de vapor. Para mejorar su funcionamiento y, además, hacerlo en rangos de velocidades más amplios y con mecanismos más pequeños, diferentes tipos de reguladores fueron desarrollándose a lo largo de los años por los siguientes autores (Kang, 2016), Werner y C. William Siemens (1846), Charles Porter (1858), Thomas Pickering (1862), León Foucault (1862), y William Hartnel (1872).

2.2. Aportaciones de James C. Maxwell

En los primeros años del siglo XIX, una vez generalizado el uso de las máquinas de vapor en la industria, se empezaron a detectar proble-

mas de inestabilidad en su funcionamiento. En general se observaba que la velocidad de las máquinas variaba cíclicamente. El mismo problema también fue detectado al regular la velocidad de los telescopios astronómicos que eran accionados por mecanismos de relojería.

Hasta ahora, prácticamente todos los avances realizados habían sido hechos con trabajos desarrollados de forma empírica y sin una metodología que permitiera la sistematización de los estudios correspondientes, pero esta tendencia ya estaba cambiando. En el caso de los telescopios astronómicos, fue George B. Airy (1840) quien abordó sus problemas de inestabilidad mediante la teoría de la mecánica celeste. Su trabajo era complejo, difícil de seguir y con poca información de cómo llegaba a los resultados, por lo que, prácticamente, permaneció en secreto y no pudo ser utilizado y trasladado al campo de las máquinas de vapor (Airy, 1840). J.V. Poncelet (1788-1867) también estudió, en 1826 y 1836, las condiciones para una operación estable mediante la descripción con ecuaciones diferenciales.

En el caso de las máquinas de vapor, los problemas de inestabilidad e inexactitud eran ampliamente conocidos en aquella época y no se tenían indicios para que pudieran ser resueltos, ni por enfoques teóricos, ni prácticos. El problema atrajo la atención de un gran número de importantes científicos e ingenieros (Mayr, 1970) Fue James Clerk Maxwell (1831–1879), matemático y físico escocés, famoso por la formulación de la teoría del electromagnetismo y con importantes estudios y aportaciones en termodinámica y óptica, quien abordó el estudio de la dinámica de los reguladores de velocidad. Este lo hizo, no por su utilidad y aplicación práctica en las máquinas de vapor, sino por el interés que tenía en los estudios sobre la estabilidad de los sistemas. Además, lo hizo, podría decirse, aparte de su carrera científica. En efecto, en 1868, publicó su, ahora famoso, artículo titulado "*On Governors*", "*Sobre los Reguladores*". En él, define la estabilidad de funcionamiento de las máquinas que incorporan un regulador de velocidad:

“The motion of a machine with its governor consists in general of a uniform motion, combined with a disturbance that may be expressed as the sum of several component motions.”

También definió estas componentes de la perturbación, que pueden ser de 4 tipos diferentes:

1. perturbación que aumenta continuamente.
2. perturbación que disminuye continuamente.
3. ser una oscilación que aumenta su amplitud continuamente.
4. ser una oscilación que disminuye su amplitud continuamente.

Y expresó: la segunda y la cuarta son admisibles en un “buen” regulador y son matemáticamente equivalentes a que todas las raíces de la ecuación característica, en el campo complejo, tengan parte real negativa. Además, Maxwell clasificó los reguladores en 2 grupos:

1. Reguladores moderadores, que solo implementan acción proporcional sobre la válvula que actúan.
2. Reguladores genuinos, que implementan acción proporcional e integral sobre la válvula que actúan.

Estudió diferentes reguladores existentes y modeló la ecuación diferencial de movimiento de cada uno de ellos. Además, expresó que el comportamiento de un sistema de control, en un punto de funcionamiento, se puede aproximar por una ecuación diferencial lineal. De esta forma, su estabilidad se puede analizar mediante las raíces de la ecuación algebraica asociada. Planteó investigar la estabilidad de los sistemas dinámicos mediante el estudio de la posición de las raíces de su ecuación característica. Mostró que, para sistemas de segundo, tercer y cuarto orden, su condición de estabilidad se podía determinar examinando los coeficientes de la ecuación diferencial, pero no fue capaz de encontrar una solución general. Unos años antes, C. Hermite

ya había publicado un trabajo relacionado (Hermite, 1856), pero en esta época aún no era muy conocido.

El problema formulado por Maxwell fue retomado por Edward J. Routh (1831-1907), pues ambos habían sido condiscípulos en Cambridge, y Routh había relegado a Maxwell del primer puesto de su promoción en el examen final. Routh publicó los primeros resultados en 1874 y en 1877 escribió un tratado sobre “Estabilidad del movimiento”, basándose en los trabajos previos de Agustin-Louis Cauchy (1789-1857) y Charles Sturm (1803-1855), donde expuso lo que ahora conocemos como los criterios de estabilidad de Routh-Hurwitz.

Por otro lado, de forma totalmente independiente, A. Hurwitz (1895), matemático suizo, utilizando las técnicas clásicas de Cauchy y Hermite, resolvía asimismo el problema en términos de un conjunto de determinantes. Estos trabajos contienen la semilla del uso apropiado de la teoría de variable compleja para la investigación de la estabilidad en los sistemas de control (Bennett, 1996).

Las aportaciones de Maxwell en su artículo “*On governors*” no parecieron relevantes en aquella época, probablemente por desconocimiento y, también, por incomprensibilidad, ya que la dinámica compleja de los reguladores la describió usando solo texto, sin figuras que indicaran el funcionamiento y sin diagramas del cuerpo libre para obtener las ecuaciones del movimiento. Esta falta de información se debió, probablemente, a la falta de las adecuadas tecnologías de impresión en aquella época. Así, dicho artículo quedó sin visibilidad hasta que, ochenta años más tarde (en 1948), Norbert Wiener, un profesor del MIT, llamó la atención sobre el mismo. A partir de entonces, ha sido reconocido como el primer artículo realmente significativo sobre la teoría del control (Kang, 2016; Mayr, 1971).

3. CONCEPTO DE REALIMENTACIÓN

La relación cronológica de los sistemas presentados, hasta ahora, en esta lección inaugural, nos indican un conjunto de desarrollos muy experimentales, prueba y error, en los comienzos y más basados en el diseño de ingeniería a partir del regulador de Watt. Ahora bien, con las aportaciones de la dinámica, de las ecuaciones, etc. se abrió una nueva forma de estudio de los sistemas de control.

Su base está en el concepto de realimentación. El término proviene del inglés *feedback*, que expresa el proceso por el cual se retorna energía/información desde la salida de un sistema hacia su entrada. El término fue introducido en los años 20 por los ingenieros que trabajaban en equipos de radio, para referirse al problema que les ocurría cuando la salida de audio de un amplificador se les introducía de forma parásita en la entrada y la reforzaba. La RAE la define como: *“retorno de parte de la energía o de la información de salida de un circuito o un sistema a su entrada”*. Norbert Wiener (1894-1964), matemático y filósofo estadounidense conocido como el fundador de la cibernética, estableció definitivamente el término en su libro *“Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas”*, publicado en 1948, expresando que la realimentación *“es un método de controlar un sistema reinsertando en él los resultados de su comportamiento anterior”*.

La realimentación está presente en todos los ámbitos de la vida, en multitud de los sistemas de control que permiten a un ser humano “vivir”, pues sin ellos no sería posible:

La realimentación es una característica central de la vida. El proceso de realimentación gobierna el modo en que crecemos, respondemos al estrés y los retos y regulamos factores como la temperatura corporal, la presión sanguínea o el nivel de colesterol. Sus mecanismos operan a todos los niveles, desde la interacción de las proteínas en las células a la interacción de los organismos en ecosistemas complejos.

M. B. Hoagland and B. Dodson,
The Way Life Works. (Hoagland y Dodson, 1995)

Este concepto, que es inherente al ser humano, puede explicarse con algunos ejemplos sencillos de nuestra vida cotidiana: desplazarnos, conducir, coger objetos, dibujar, escribir, etc. Veamos, a través del sencillo ejemplo mostrado en la Figura 3.1, cómo se explica el concepto de realimentación, en este caso, negativa. En dicha figura, se representa el “control manual” para mantener un nivel $h(t)$ de llenado de un depósito. Para ello el operador observa en todo momento cuál es el nivel de líquido que tiene en el depósito. A continuación, calcula cuál es la diferencia con el nivel que debe tener y, en función de esta diferencia, positiva o negativa, actúa sobre la válvula de cierre/apertura del caudal de entrada al depósito. El operador está realizando un proceso de realimentación negativa a través de la vista y de su cerebro, que es el que establece la comparación entre la variable de salida $h(t)$ y su referencia.

En términos de variables tenemos:

- **Variable de referencia**, (*setpoint* o punto de consigna), que es el nivel deseado, es decir, el nivel que queremos mantener en el depósito.
- **Variable a controlar**, es la variable $h(t)$ que es la que está viendo el operador y es la que se está realimentando.
- **Variable de error**, es la **diferencia** entre la variable de referencia y la variable a controlar. En nuestro ejemplo, y dado que no hay ningún sistema más, esta es la variable que fija la actuación manual sobre la válvula que abre o cierra el caudal de agua al depósito.

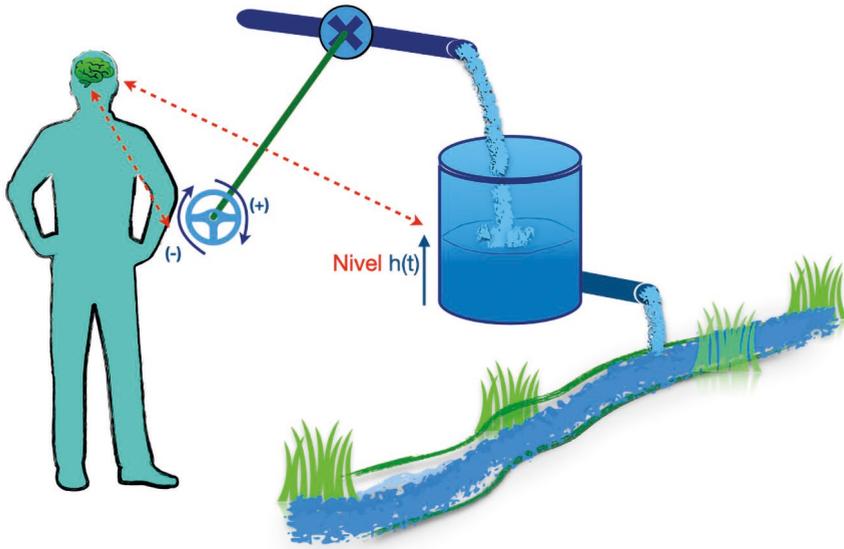


Figura 3.1. Representación del sistema de control manual del llenado de un depósito

Es habitual en sistemas de control realizar representaciones externas de los sistemas mediante diagramas de bloques o cajas negras que nos permiten representar relaciones causa-efecto, es decir la relación entre una variable de entrada y una variable de salida.

Así tendríamos para el ejemplo la siguiente representación:

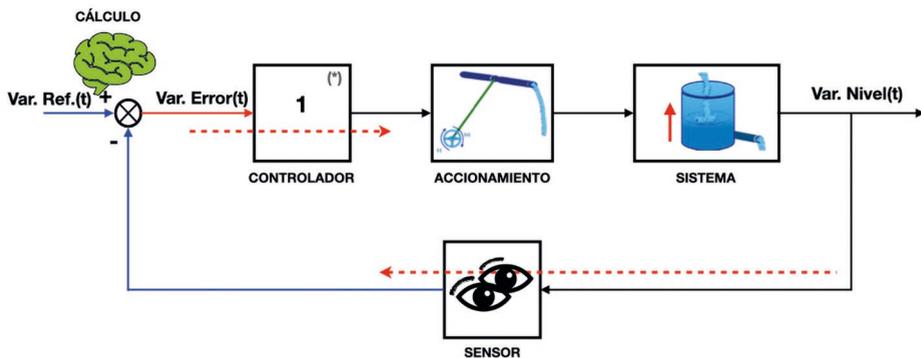


Figura 3.2. Diagrama de bloques. Relaciones causa-efecto del sistema de control manual del llenado de un depósito.

En dicha figura, se puede observar gráficamente el efecto de *realimentación*, por medio de la visión del operador, de la variable nivel que se resta (*negativa*) de la variable de referencia para obtener la variable de error que, en función de su signo, indicará la actuación a realizar, abrir/cerrar la válvula.

De la misma forma, tenemos la representación correspondiente de la máquina de vapor estática, antes de la implementación del regulador de Watt. El control de la velocidad solo era posible por la acción de un operador que estaba, en todo momento, analizando la velocidad de la rueda motriz y estableciendo la correspondiente realimentación negativa, para evitar la aceleración o el frenado de la máquina y, por lo tanto, de todo el proceso industrial que arrastra y el consiguiente mal funcionamiento.

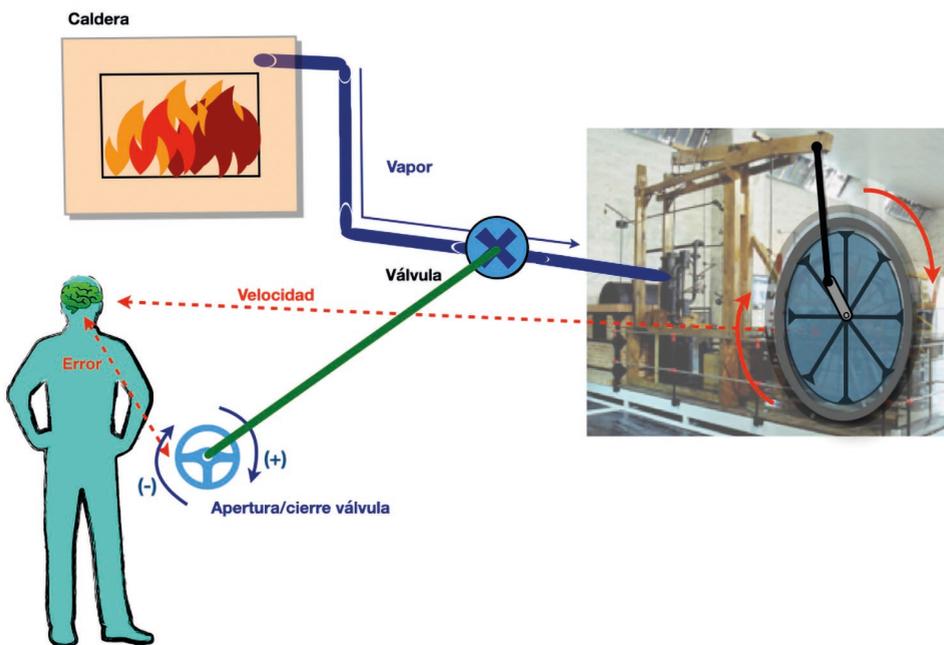


Figura 3.3. Representación del sistema de control de velocidad manual de la máquina de vapor estática

En el siguiente diagrama de bloques se pueden observar los diferentes sistemas, así como el correspondiente lazo de realimentación negativa.

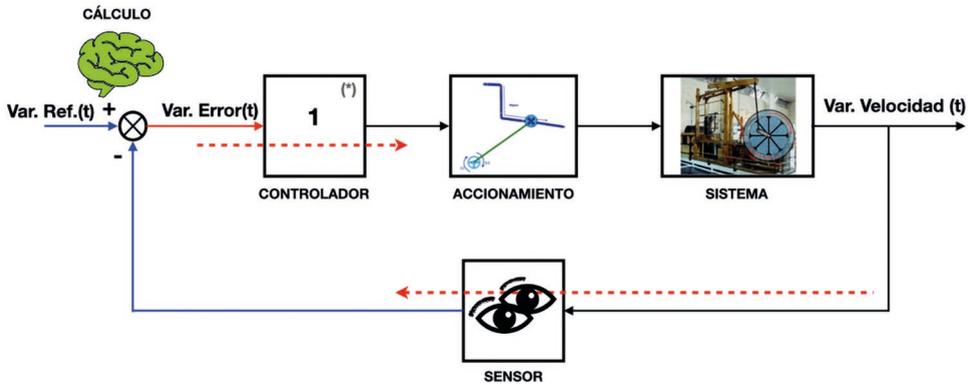


Figura 3.4. Diagrama de bloques. Relaciones causa-efecto del sistema de control manual del llenado de un depósito

El desarrollo experimental realizado por James Watt para la implementación de su regulador de Watt en máquinas de vapor también incorporaba un efecto de realimentación negativa. En efecto, la velocidad de la máquina era realimentada (“medida”), por un conjunto de engranajes, hacia el sistema centrífugo, constituido por dos bolas que giraban, y se desplazaban, hacia arriba o hacia abajo, en función de los incrementos o decrementos de la velocidad. Este desplazamiento movía un sistema mecánico de palancas que constituía el accionamiento (apertura/cierre) de la válvula de entrada de vapor a la máquina, a través de un pistón, con 2 posiciones alternativas de entrada de vapor. Este cilindro movía un conjunto de biela y manivela que transformaba el movimiento lineal del pistón en movimiento de rotación de la rueda de la máquina de vapor. En la Figura 3.5 se ha representado en color azul, sobre un dibujo antiguo del año 1900 del regulador de Watt, el efecto producido por los incrementos/decrementos de la velocidad $\Delta\omega(t)$. Igualmente, en rojo, los desplazamientos del sistema mecánico de palancas para provocar el cierre/apertura de la válvula de vapor.

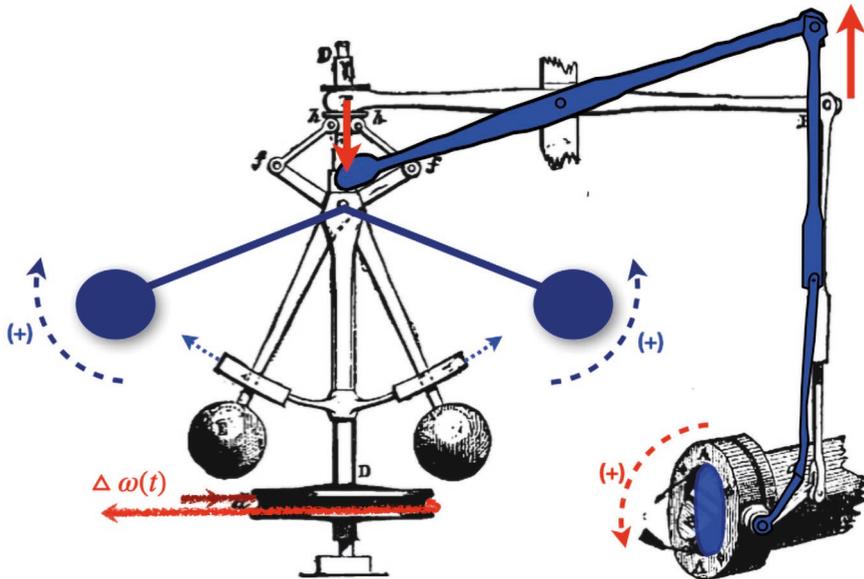


Figura 3.5. Efecto producido por los incrementos de velocidad en el regulador Watt (Routledge, 1900)

Con su sistema, James Watt incorporó no solo el concepto de realimentación negativa, desconocido en aquella época, sino también su vinculación con el sistema de accionamiento sobre la máquina para transmitir los cambios necesarios en cada momento, todo en un mismo conjunto, como puede observarse en la Figura 3.6. Además, sustituyó al operador humano de un trabajo tedioso y peligroso, y dio lugar a la implementación un novedoso sistema **automático** de control aplicado en la producción industrial. Este sistema supuso, sin duda alguna, el gran impulso a la primera revolución industrial. Con este y otra serie de desarrollos e inventos contribuyó, de forma notable, al impulso, mejora y desarrollo de la máquina de vapor.

La utilización del vapor en la propulsión de los barcos abrió también nuevas aplicaciones, ya que, con el aumento de su tamaño, fue necesario el desarrollo de nuevos sistemas motrices basados en energía de vapor, hidráulicos y neumáticos. En los Estados Unidos,

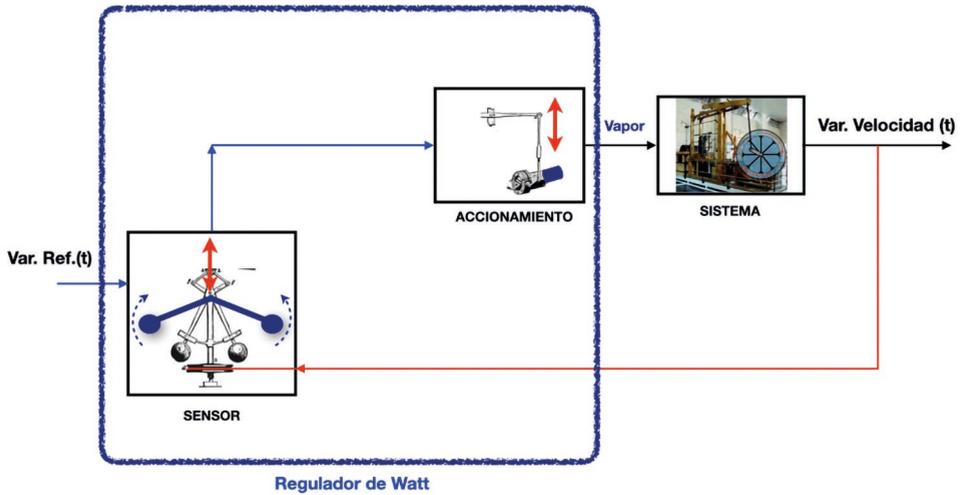


Figura 3.6. Diagrama de bloques de Sistema con regulador de Watt

Gran Bretaña y Francia, los ingenieros comenzaron a trabajar en el diseño de sistemas de dirección asistida para ayudar al timonel; en los barcos grandes, las fuerzas hidrodinámicas en el timón eran tales que se requerían grandes relaciones de transmisión entre el timón y la rueda de dirección del timón y, por lo tanto, mover el timón costaba mucho y, además, llevaba mucho tiempo y perjudicaba notablemente la maniobrabilidad del barco. El primer sistema de dirección asistida, diseñado por Frederick Sickels en los EE. UU., fue patentado en 1853. Era un sistema en circuito abierto, es decir no incorporaba realimentación negativa. En el año 1866, J. McFarlane Gray patentó el primer sistema de control de dirección asistida, con realimentación, para el transatlántico de vapor Great Eastern que tenía un desplazamiento de 32.160 Tn. En Francia, casi al mismo tiempo, Jean Joseph Léon Farcot diseñó un sistema de dirección asistida para barcos y otros sistemas de control de posición en bucle cerrado, es decir que incorporaban realimentación negativa. El sistema usaba la posición de la rueda del timón para dirigir la cantidad correcta de vapor a un pistón que controlaba y accionaba el timón. Sugirió nombrar sus dispositivos como “servomotor” o “motor asservi”. Términos que siguen siendo

utilizados hoy en día como “servomecanismos”, “servomotores” y, de forma generalizada, “servosistemas” (Bennett, 1996).

El concepto de realimentación negativa para los sistemas de control se fue haciendo cada vez más necesario. La resolución de problemas en los sistemas que se diseñaban disponía de pocas bases matemáticas, se realizaba prácticamente de forma muy experimental, a excepción del manejo de las ecuaciones diferenciales para los sistemas mecánicos y su dinámica. Con el desarrollo de la electricidad, las aplicaciones de los sistemas de control ampliaron su campo de utilización a este ámbito y se nutrieron de los nuevos conocimientos teóricos que aportaba. La electricidad también proporcionó herramientas adicionales para la medición, transmisión y manipulación de señales, así como para la actuación, que los ingenieros comenzaron a utilizar. Aportó al control elementos básicos y significativos que han tenido una amplísima repercusión y utilización y que, hoy en día, se siguen utilizando, como son: el relé eléctrico, que permitía, y permite, manejar y controlar variables eléctricas de mayor potencia; y el electroimán con solenoide polarizado y resorte, que permitía, y permite, acciones de control proporcional básicas. Estas técnicas y tecnologías hicieron que en los primeros años del siglo XX se produjera la aplicación rápida y generalizada de controladores con realimentación para: regulación de voltaje, corriente y frecuencia; control de calderas para generación de vapor; control de velocidad de motores eléctricos; dirección y estabilización automática de barcos y aeronaves; y temperatura, presión y control de flujo en las industrias de procesos. También trajo como consecuencia el desarrollo de sistemas de medición e indicación y de registradores, que se hicieron cada vez más necesarios en los sistemas de control.

Ahora bien, la mayoría de las aplicaciones hasta esta época tenían como objetivo el desarrollo de sistemas simples de regulación, que mantuvieran un cierto nivel de control sobre alguna variable. Esto se

hacía sin un conocimiento y comprensión tanto de la dinámica del sistema a controlar como del conjunto de dispositivos de medición y accionamiento utilizados. El aumento en cuanto a la complejidad de los sistemas manejados era evidente. El diseño, por parte de Elmer Sperry en 1911, de un estabilizador para los barcos de la armada americana, que se basaba en un sensor giroscópico para hacer frente a las perturbaciones provocadas por las condiciones del mar, no se generalizó ya que era muy caro y complejo de instalar y mantener. Otro ejemplo de la época son las calderas de vapor utilizadas por las empresas suministradoras de electricidad. El control de la caldera es, por supuesto, un problema multivariable en el que tanto el nivel del agua como la presión del vapor deben controlarse y, para lograr una combustión eficiente, también debe controlarse el tiro hacia la caldera. Durante la década de 1920, varias empresas de instrumentos desarrollaron sistemas completos de control de calderas.

Con todo ello, además de ponerse de manifiesto la complejidad y diversidad de ámbitos de aplicación de los sistemas de control, también se vio que era necesario disponer de bases teóricas y metodológicas que permitieran comprender las dinámicas de comportamiento de los sistemas, abordar su análisis, su diseño y, por supuesto, su implementación tecnológica. Como ya se ha expresado, las únicas herramientas de análisis disponibles eran las ecuaciones diferenciales y el análisis de estabilidad, absoluta, mediante el método, prácticamente poco conocido y muy laborioso, de Routh-Hurwitz.

Además, desde el punto de vista de las funcionalidades, la implementación de sistemas de control no tenía una sistematización adecuada. Las aplicaciones que daban buenos resultados en un determinado campo y con unas determinadas condiciones, no funcionaban correctamente cuando el ámbito de actuación era otro o, incluso, con otras condiciones y cambios de equipos, lo que provocaba en muchas ocasiones importantes problemas de estabilidad. Elmer Sperry obser-

vó cómo los operadores humanos manejaban los sistemas de control con otras estrategias ya que, en su operación, hacían uso de la información que les proporcionaban los instrumentos, usaban estrategias de anticipación, de reducción de la potencia a medida que la variable controlada se acercaba al punto de ajuste y pequeñas modificaciones para corregir los errores que se producían. Sperry trató de incorporar estas ideas en sus dispositivos.

En 1922, Nicholas Minorsky (1885-1970) presentó un análisis claro del control involucrado en los sistemas de control de posición y formuló una ley de control que se conoce hoy en día como de tres términos o PID (Minorsky, 1922). Llegó a su ley observando la forma en que un timonel dirigía un barco. Para ello estudio el problema de la estabilidad direccional de los barcos, ya que la necesidad de dirigirlos automáticamente era cada vez más importante y necesaria. En efecto, la construcción de barcos más grandes, con mayores requerimientos de funcionamiento y con costes elevados por el incremento en el consumo de combustible como consecuencia de los desvíos en el rumbo de navegación (guiñada), hacía necesario el que dispusieran de un sistema de control automático de guiado más preciso, que evitara el guiado manual y sus limitaciones inherentes debido a la baja sensibilidad del ojo humano en la detección de movimientos angulares lentos y, por supuesto, en la navegación nocturna, a la fatiga, etc. Estableció cómo los timoneles eficientes mantenían el barco con precisión en su rumbo, al ejercer acciones y correcciones variables sobre la dirección del timón en función de la dinámica temporal del movimiento (velocidad angular instantánea de guiñada) y adecuadamente sincronizadas con las reacciones del timón. Es decir, estaban incorporando diferentes acciones de control en el sistema de guiado para que, de alguna forma, fueran anticipativas y corrigieran los errores.

Minorsky expresaba, en el año 1922, que “para los buques mercantes, un dispositivo de dirección automático preciso y fiable se

convierte en una verdadera propuesta de ahorro de dinero, lo que justifica en gran medida su uso. En los acorazados, por su uso, la ausencia o reducción de guiñada en acción significa una mejor eficiencia en los disparos, una mayor velocidad de maniobra y también un mayor radio de crucero. En el caso de los dirigibles, especialmente para viajes de larga distancia, la estabilidad direccional también es importante porque el comportamiento de los instrumentos que indican la dirección es entonces más satisfactorio, lo que conduce a una estabilización aún mejor, de modo que la certeza y la seguridad de la navegación aérea se incrementa en un grado adicionalmente mayor". Hoy en día, son innumerables las aplicaciones que hacen uso de sistemas de control de guiado automático: barcos, aviones, vehículos, drones, robots, misiles, etc.

Los trabajos de Minorsky no fueron ampliamente conocidos hasta finales de la década de 1930. Dejó planteados los problemas asociados a la instrumentación utilizada para conocer el rumbo y el problema de los retardos, debidos tanto a los sistemas mecánicos como a los electromagnéticos, en las señales manejadas hacia los accionamientos (timón). Se estaba ya poniendo de manifiesto un nuevo problema: la carencia de dispositivos de amplificación, lineales y estables, adecuados para convertir las señales de baja potencia obtenidas de los instrumentos de medición a un nivel de potencia adecuado para operar un accionamiento de un sistema de control (Minorsky, 1922).

3.1. H.S. Black y el amplificador realimentado

Otro de los hitos en la evolución de la automática fue la incorporación del concepto de realimentación en el ámbito de la amplificación mediante circuitos electrónicos. En efecto, la carencia de sistemas de amplificación indicada en el apartado anterior para las señales de instrumentación también se puso de manifiesto con los sistemas de accionamiento. El desarrollo, a principios del siglo XXI, de válvulas

lineales y de corredera, de diferentes tipos, para ser utilizadas como accionamiento, aportaba soluciones a los sistemas automáticos de control que se diseñaban, pero también necesitaban de amplificación.

Por otro lado, en 1920, el problema de la amplificación estaba demostrando ser un serio obstáculo para el desarrollo de la telefonía de larga distancia. Las mejoras en el diseño de los cables y el uso de impedancias de carga habían ampliado la distancia sobre la que las transmisiones telefónicas podían tener lugar sin amplificación. Sin embargo, el servicio transcontinental en los EE. UU. sí que dependía de dicha amplificación.

En realidad, la revolución en las tecnologías de las comunicaciones y del procesamiento de información había comenzado unos años antes con la modificación tecnológica propuesta por Lee de Forest. Este añadió un tercer electrodo extra, en forma de rejilla entre cátodo y ánodo, a la válvula termoiónica de vacío de Fleming. La aplicación de tensiones variables respecto del cátodo a la rejilla hacía variar la corriente de electrones que van del cátodo al ánodo, de manera que una señal eléctrica débil, introducida a través de la rejilla, apareciese en el ánodo considerablemente amplificada. Creó así, en 1906, la válvula amplificadora denominada triodo, primer dispositivo amplificador y origen del posterior desarrollo de la Electrónica basada en las válvulas de vacío. Esta invención eliminó el principal obstáculo para el desarrollo de la telefonía a gran distancia, que era la atenuación de la señal en el cable de transmisión, al ser posible la construcción de amplificadores, basados en triodos, tanto de audiofrecuencia como de radiofrecuencia. Además de las aplicaciones en complejos circuitos de radio, que dieron lugar al desarrollo de la radio, también se empezó a utilizar como relé telefónico.

Los amplificadores telefónicos, basados en la amplificación electrónica de la señal, comenzaron a utilizarse alrededor de 1920, pero la distorsión que introducían limitó el número de ellos que se podían

utilizar en serie. Cada amplificador introducía no linealidades que provocaban distorsiones totales en las líneas no aceptables, ya que no se mantenía la inteligibilidad de las señales de audio transmitidas. La expansión del tráfico en la red también estaba causando problemas, ya que requería un aumento en el ancho de banda de las líneas con el consiguiente aumento de la pérdida de transmisión.

Harold Stephen Black (1898-1983), ingeniero eléctrico estadounidense, comenzó a investigar en estos problemas a principios de la década de 1920. Inicialmente, trabajó con Mervin Joe Kelly (1894-1971), físico estadounidense, en la mejora de los tubos de vacío y componentes de los amplificadores electrónicos para reducir las distorsiones e inestabilidades que provocaban. Las mejoras introducidas en los tubos de vacío fueron muy notables y consiguieron alargar la vida de los tubos empleados en los repetidores telefónicos, pero la distorsión seguía sin reducirse.

Black decidió abordar el problema desde otro punto de vista. Se dio cuenta de que, si parte de la amplificación de un amplificador de alta ganancia, no lineal, se sacrificaba al devolver parte de la señal de salida con la fase invertida hacia la entrada, la distorsión debido al ruido y la deriva de los componentes podría reducirse. Estaba incorporando el concepto de realimentación negativa en los amplificadores electrónicos. El 2 de agosto de 1927, consiguió tener un diseño de un circuito para un amplificador con realimentación negativa. Ese día, a primera hora de la mañana, cuando iba a trabajar desde Nueva Jersey a la ciudad de Nueva York, en un ferry cruzando el río Hudson le surgió la idea. Como no tenía donde escribirla la plasmó en una página de *The New York Times* donde se veía la fecha. Dibujó un diagrama canónico de un amplificador con realimentación negativa y las ecuaciones básicas para describirlo, y luego firmó la página. Cuando llegó a los laboratorios solicitó que fuera revisado por otro ingeniero y que le confirmara que lo entendía. Algunos autores consideran que Black

ya llevaba trabajando tiempo sobre su idea y que solo necesitaba llegar a la solución matemática del problema (Mindell, 2002). La página del periódico se conserva guardada como un tesoro en los archivos de los Laboratorios Bell.

Después de un extenso trabajo de pruebas y desarrollo, que comenzó con un prototipo de amplificador repetidor de 3 etapas amplificadoras con realimentación negativa para validar su concepto, desarrolló los circuitos para el acoplamiento de las impedancias de entrada y de salida de un amplificador con una línea de transmisión. A finales de diciembre de 1927, uno de los amplificadores con realimentación de Black logró una reducción de distorsión de alrededor de 100 000 a 1 con un rango de frecuencia que se extendía de 4 a 45 kHz.

En enero de 1928, AT&T (American Telephone and Telegraph), compañía fundada por Alexander Graham Bell, comenzó a desarrollar un sistema de transporte de nueve canales para la telefonía transcontinental. Iba a ser la primera aplicación importante del amplificador de realimentación de Black. Fue diseñado para utilizar amplificadores repetidores a intervalos de 25 millas. Las pruebas de campo del sistema se realizaron en las cercanías de Morristown, Nueva Jersey, a partir de 1930. Al conectar 68 pares de conductores de cable en serie, los ingenieros pudieron simular la transmisión de voz a una distancia total de más de 7000 millas con 306 repetidores en cada dirección. Black recordó años más tarde que la calidad del habla era excelente a pesar de que la atenuación total en cada dirección era muy importante. Después de los ensayos prácticos el amplificador comenzó a usarse, de forma generalizada, en la AT&T a partir de 1931.

En enero de 1934, Black publicó en la revista *Electrical Engineering* el artículo "*Stabilized Feedback Amplifiers*", correspondiente al trabajo que había presentado en la Convención de Invierno del American Institute of Electrical Engineers (AIEE) (Black, 1934). En él, explicaba las mejoras que aportaba el uso de la realimentación negativa y, además,

incluía ventajas adicionales en la reducción del retardo, la distorsión del retardo, la reducción de las perturbaciones debidas al ruido de los circuitos y varias otras. Incluyó diagramas de circuitos, ecuaciones y gráficos para ilustrar la aplicación del principio de la realimentación. En la Figura 3.7 se puede ver el esquema original del amplificador realimentado.

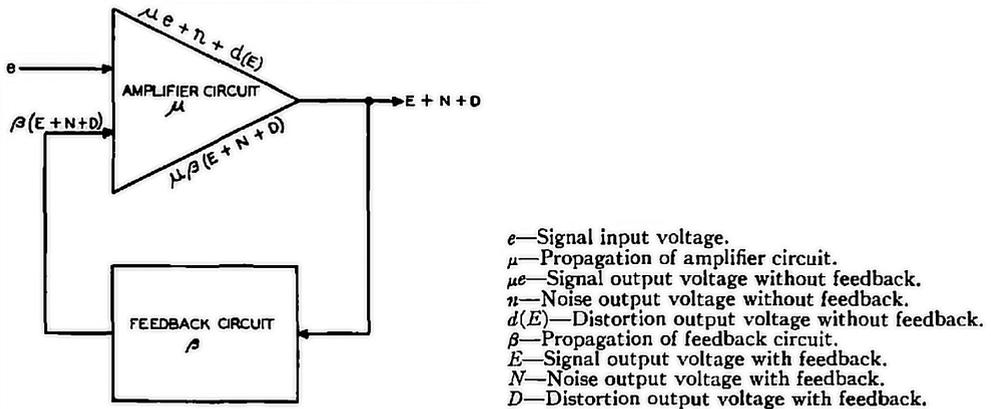


Figura 3.7. El amplificador realimentado de H. S. Black (Black, 1934)

El procedimiento para conseguir patentar la invención de Black fue muy largo y complejo. En diciembre de 1937 se emitió el certificado de la patente que se había solicitado en agosto de 1928. Se atribuyó el retraso a las dudas que tenía la oficina de patentes acerca de su funcionamiento basado en un nuevo concepto (la realimentación) y al elevado número de reivindicaciones. Cuando finalmente se emitió, la patente incluía 42 páginas de texto, 9 páginas con 126 reivindicaciones y 33 páginas de figuras. Según Black, la extraordinaria longitud se debió a que la invención era “un campo nuevo cuyo principio no se entendía”. Además, también había anticipado que el principio “podría trasladarse y aplicarse por analogía a la síntesis y el análisis de otros tipos de amplificadores, para todo tipo de sistemas de control mecánicos, acústicos, químicos, hidráulicos o lo que sea”.

Black trabajó en los laboratorios Bell durante 40 años realizando, desde muy joven, extraordinarias innovaciones que plasmó en numerosas patentes: 62 en U.S.A y 271 en otros 32 países. No obstante, tardó años en obtener el reconocimiento internacional que se merecía. Uno de los premios más importantes fue la Medalla Lamme del IEEE que se le concedió en 1957 con la siguiente cita:

“Muy pocos hombres han tenido la fortuna de influir de forma tan profunda sobre un campo completo de la industria como lo ha hecho Harold S. Black”.

En el 50 aniversario de su invención expresó:

“me complace observar que los amplificadores de realimentación negativa y el principio de realimentación han encontrado muchas aplicaciones nuevas para todos los tipos y formas de sistemas de comunicación: en tierra, bajo el agua, en el aire, a través de satélites, en el espacio ultraterrestre. Igualmente, importante es la aplicación de realimentación negativa a un número cada vez mayor de campos no relacionados, incluidos, aunque no limitados a, la biotecnología; la bioingeniería; la cibernética; las computadoras; las extremidades artificiales para discapacitados; la mayoría de los equipos e instrumentos utilizados actualmente por enfermeras, médicos y cirujanos; y nuevos productos de consumo”.

Este comentario pone de manifiesto la extraordinaria repercusión que tuvo, y sigue teniendo, la invención de Black y su enorme influencia en el desarrollo de los sistemas de control. En su autobiografía, que comenzó a escribir en el año 1981 con el título tentativo *“Before the Ferry Docket”*, pero que no pudo completar, al morir el 11 de diciembre de 1983, incluyó la siguiente frase:

“No es una exageración decir que, sin la invención del amplificador con realimentación negativa de Black, combinado con su investigación y desarrollo continuado de nuevos conceptos sobre la realimentación, nuestras exóticas comunicaciones de hoy día no serían posibles”.

3.2. Harry Nyquist y el análisis frecuencial

En 1932, los sistemas basados en la realimentación, como se ha indicado anteriormente, ya se utilizaban ampliamente en aplicaciones como la generación y transmisión de energía, la dirección de barcos, los pilotos automáticos y control de procesos. Las herramientas matemáticas disponibles para su estudio eran muy limitadas. Se disponía de los métodos operacionales para resolver ecuaciones diferenciales de O. Heaviside (1899), análisis de Fourier para estudiar dinámicas en sistemas de comunicaciones y técnicas de transformaciones integrales y su aplicación a problemas prácticos, que se basaban en los trabajos de T. J. Bromwich (1916), J. R. Carson (1926), G. A. Campbell y R. M. Foster.

En los sistemas de control, las investigaciones teóricas normalmente consistían en análisis de estabilidad. A partir de la descripción externa de sus diferentes subsistemas se obtenían sus ecuaciones diferenciales. Una vez linealizadas se estudiaban las raíces de la ecuación característica mediante el método de Routh-Hurwitz.

Este enfoque se puede seguir en el primer libro de texto sobre control de turbinas, *"Regulation of Prime Movers"*, publicado en 1905 por M. Tolle, tal vez el más importante de los primeros textos de ingeniería de control. Tolle adoptó el enfoque de A.B. Stodola, ingeniero y físico eslovaco, profesor en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, para el modelado, obteniendo una ecuación diferencial simple y lineal para cada componente de un sistema de control. Stodola extendió el análisis de tercer orden, original de Vyschnegradsky de una máquina de vapor gobernada directamente, a una turbina hidráulica de orden superior, séptimo orden, con control centrífugo servoasistido. Merece la pena remarcar aquí, que fue la petición de Stodola a Adolf Hurwitz, para que le ayudara en la resolución, la que dio lugar a que Hurwitz resolviera el mismo problema matemático, el estudio de la

estabilidad general de un sistema a partir de los coeficientes de la ecuación característica en términos de un conjunto de determinantes, independientemente de Routh, llegando a la formulación de Hurwitz que daría lugar, después, al conocido como criterio Routh-Hurwitz en 1894 (Andronov, 1978; Bissell, 1989).

La misma metodología se puede observar en los análisis de un piloto automático para la dirección de buques de Minorsky (Minorsky, 1922). Este presentó una taxonomía de controladores y recomendó el uso del control PID para la dirección de los barcos. Minorsky construyó un piloto automático que fue probado en el barco de la marina de los estados Unidos *New México*, que estaba equipado con un sistema de dirección electrohidráulico Waterbury que permitía una acción de control continua, pero no condujo a un producto final, ya que la marina americana no quería utilizarlo en sus barcos y, finalmente, vendió sus patentes a Bendix Corporation. Su método de diseño basado en un modelo lineal simplificado es lo que hoy se conoce como asignación de polos. Sus contribuciones aportaron ideas que actualmente se utilizan en el diseño de autopilotos. En ambos ejemplos, cuando se tenían problemas de estabilidad, el análisis no daba directrices para que un sistema inestable se pudiera hacer estable (Minorsky, 1922).

Ahora bien, frente al hecho de no disponer de herramientas matemáticas más avanzadas, lo que marcaría un hito de extraordinaria relevancia en el avance del estudio científico de los sistemas de control fueron, sin ninguna duda, las aportaciones de Harry Nyquist. En efecto, Nyquist, físico e ingeniero sueco-estadounidense, realizó su doctorado en la Universidad de Yale y, una vez finalizado, se incorporó a los Laboratorios Bell donde trabajó con Black en el desarrollo del amplificador realimentado práctico y en la comprensión de su comportamiento.

La situación que se tenía entonces era similar a la ocurrida con el regulador de Watt y con las turbinas de agua. Se disponía de desa-

rrillos prácticos de reguladores que se implementaban en sistemas reales de control y que, en determinadas circunstancias, se hacían inestables. En ambas situaciones, tanto los estudios de Maxwell como los de Stodola trataban de explicar los problemas de inestabilidad por métodos matemáticos basados en la descripción de la dinámica del movimiento en el “dominio del tiempo”, estudiando las raíces de la ecuación característica.

En el caso de los amplificadores realimentados, estaba ocurriendo lo mismo. Black había propuesto la aplicación de la realimentación en amplificación. Había probado y testado su idea en sistemas reales de transmisión de voz en líneas telefónicas, que habían mejorado notablemente sus prestaciones, conseguía transmisiones de conversaciones a largas distancias, pero en determinadas circunstancias los amplificadores se hacían inestables. El problema era que no se sabía a qué se debía, pues no se conocía el funcionamiento profundo de la realimentación. Unas veces la inestabilidad se producía cuando se aumentaba la ganancia del lazo de realimentación y otras cuando se disminuía. No se tenía un conocimiento científico y metodológico que permitiera el diseño adecuado de los amplificadores, que estaban constituidos por más de 50 componentes: válvulas, resistencias, inductancias, autoinductancias, etc., con parámetros variables en el tiempo y no muy precisos. La realimentación permitía que los diseños de los amplificadores, desarrollados con componentes más precisos, mejoraran su respuesta, tuvieran una característica más linealidad entre la entrada y la salida, que no dependía de las no linealidades de los tubos de vacío, menos distorsión, mejoraran las impedancias de entrada y de salida, etc. Ahora bien, dicha realimentación estaba ocultando la problemática interna del amplificador, ya que proporcionaba buenas prestaciones en cuanto a la relación causa-efecto entre su entrada y su salida, sin conocerse qué estaba ocurriendo en su interior,

es decir el porqué de la inestabilidad. En esta situación, las herramientas matemáticas de análisis disponibles no aportaban nada más.

Sin embargo, Nyquist abordó el estudio del comportamiento de los amplificadores realimentados desde un punto de vista completamente diferente, utilizando el dominio de la frecuencia, más concretamente la respuesta frecuencial de los sistemas, para abordar tanto el análisis como el diseño, representando un cambio de paradigma al abordar el problema de analizar un sistema de retroalimentación de una manera totalmente diferente.

El trabajo de Nyquist fue, inicialmente, presentado en el artículo "*Regeneration Theory*". (Nyquist, 1932) publicado en el Bell System Technical Journal en 1932. El documento de Nyquist contenía el denominado criterio de Nyquist. Este criterio especificaba las condiciones necesarias para garantizar la estabilidad en los circuitos de realimentación. Además, al contrario que el criterio de Routh-Hurwitz, que solo daba información acerca de la estabilidad absoluta, el criterio de Nyquist proporcionaba información sobre la estabilidad relativa, es decir cuál es el grado de estabilidad que tiene un sistema estable y, si es inestable, cuánto le falta para alcanzar la estabilidad. Para ello, utilizó la teoría de variable compleja y el principio del argumento. Definió un recorrido cerrado, conocido ahora como camino de Nyquist, que cubría todo el semiplano complejo de parte real positiva para buscar las raíces del sistema en cadena cerrada (realimentado) que causan la inestabilidad. Los datos de partida son los ceros y polos de sistema en cadena abierta, y la representación gráfica obtenida, por la transformación del camino de Nyquist, un diagrama polar que indica la estabilidad/inestabilidad, en función del número de rodeos al punto crítico $(-1+0j)$ del plano complejo. Además, en este gráfico se puede ver el grado de estabilidad/inestabilidad.

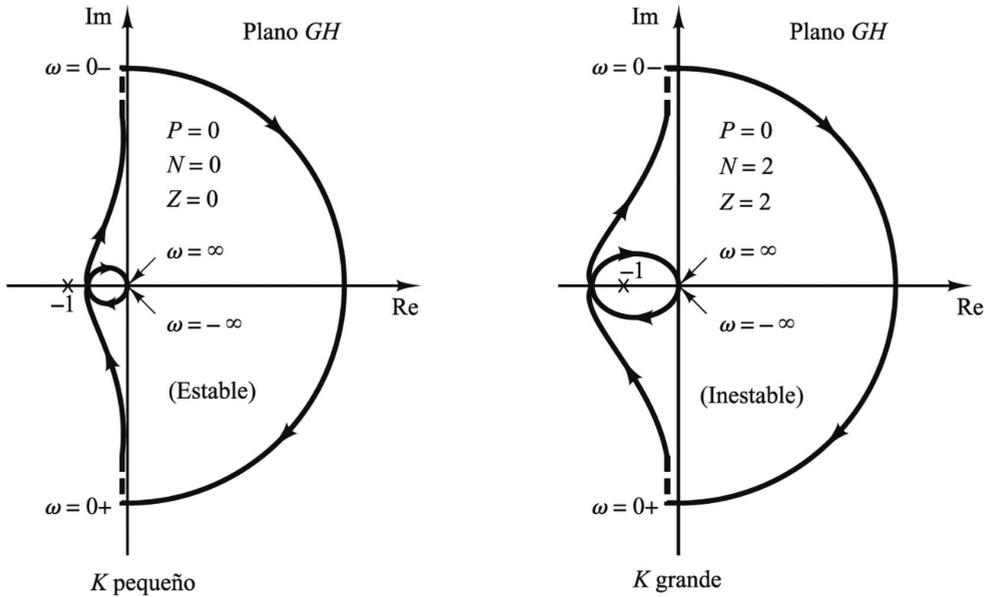


Figura 3.8. Análisis gráfico de la estabilidad con el camino de Nyquist (Ogata, 2010)

La confirmación de la teoría de Nyquist sobre circuitos experimentales fue publicada en octubre de 1934 en el artículo *“Regeneration theory and experiment”* por tres de sus colegas en AT&T, Eugene Peterson, Lawrence A. Ware y John Kreer. En el artículo señalaron que el criterio de estabilidad de Nyquist se había presentado de una forma conveniente y no se limitaba a ninguna configuración de circuito en particular. Diseñaron un circuito con válvulas en el que probaron las diferentes situaciones de estabilidad e inestabilidad mediante el Criterio de Nyquist con señales alternas de 0,5 a 1200 khz. Comprobaron que los resultados experimentales estaban de acuerdo con la propuesta teórica realizada por Nyquist.

Los trabajos de Nyquist abrieron el campo de la investigación basada en la respuesta frecuencial, pero no fue el único en investigar los problemas de estabilidad ya que había cuestiones no resueltas relacionadas con amplitud y la fase en función de la frecuencia de

la función de transferencia en lazo abierto. Hendrik Bode investigó la relación entre la atenuación y la fase e introdujo los conceptos de ganancia y margen de fase y la noción de fase mínima en las respuestas frecuenciales, que publicó en uno de los trabajos más clásicos de la teoría de control (Bode, 1940), basado en los trabajos previos que habían desarrollado Lee y Wiener (Lee y Wiener, 1932). Bode también desarrolló herramientas gráficas para diseñar amplificadores de realimentación, que se conocen como los Diagramas de Bode que son usados actualmente en el diseño de sistemas realimentados de control. El método de diseño de Bode fue el primer ejemplo de control robusto. Sus resultados se basaron en la teoría de las variables complejas y los expresó en el libro seminal (Aström y Kumar, 2014; Bode, 1945).

En Alemania, Heinrich Georg Barkhausen, que estaba estudiando circuitos osciladores dio con la fórmula para la autoexcitación, $|KGH(j\omega)| = 1$. Este fue el mismo criterio ($\mu\beta = 1$) que utilizaron los ingenieros de los Laboratorios Bell y otros en Estados Unidos. De hecho, este criterio se utilizó bastante en Alemania para determinar la estabilidad para amplificadores realimentados tanto positiva como negativamente.

K. Küpfmüller contribuyó, de forma importante, a los métodos basados en la respuesta frecuencial al establecer las relaciones de esta con la respuesta transitoria, en el dominio del tiempo, y con la estabilidad en lazo cerrado. Su aproximación a la estabilidad se basaba en la representación del comportamiento dinámico en la forma de una ecuación integral, y dio un criterio aproximado de estabilidad basado en la respuesta transitoria.

F. Strecker, en un libro de 1950, afirmaba haber descubierto el método de la respuesta en frecuencia y un criterio equivalente al de Nyquist en un coloquio del Laboratorio Central de Siemens, sito en Halske en 1930. La publicación de este trabajo en la literatura no se produjo hasta después de la Segunda Guerra Mundial, por razones obvias.

A. V. Mikhailov propuso, en 1938, un método de respuesta en frecuencia que es similar al de Nyquist. Su razonamiento se basa en la obtención de un polinomio característico $p(s)$ a partir de las ecuaciones diferenciales del sistema, y en la representación de $p(j\omega)$ en el plano complejo. El gran mérito del método de Nyquist frente al de Mikhailov radica en el hecho de que no se necesitaba de ningún conocimiento sobre las ecuaciones diferenciales del sistema. Cremer en 1947 y Leonhard en 1940, también propusieron métodos equivalentes al de Mikhailov (Mulero Martínez, 2012).

A pesar de que el trabajo de Nyquist se centró fuertemente en los amplificadores realimentados, se hizo evidente varios años más tarde que el resultado podría aplicarse realmente a todos los sistemas de control. Dio lugar al comienzo de una nueva era en los Sistemas de Control Automáticos y a su estudio mediante técnicas basadas en la respuesta frecuencial. En el desarrollo de este campo tuvieron una gran influencia los Laboratorios Bell, con científicos como Bode, Shannon y Nyquist e ingenieros como Black, era un terreno muy fértil para el desarrollo tecnológico y la investigación básica. El laboratorio ha tenido 13 premios Nobel. La visión de las personalidades y el entorno de investigación de los Laboratorios Bell se presentó en el libro de Mindell (Mindell, 2002).

En 1960, el Instituto de Ingenieros de Radio (IRE) de los Estados Unidos otorgó su Medalla de Honor a Harry Nyquist por *“sus contribuciones fundamentales a una comprensión cuantitativa del ruido térmico, la transmisión de datos y la retroalimentación negativa”*. Es recordado especialmente por lo que se conoció como el criterio de Nyquist para determinar la estabilidad de los amplificadores. Uno de sus colegas recordó que Nyquist:

“tenía una habilidad casi extraña para encontrar la forma más directa y sencilla de resolver un problema”.

H. Nyquist.
Regeneration theory (Nyquist, 1932)

4. HACIA LA AUTOMÁTICA MODERNA

Los avances en el conocimiento explicados en los apartados anteriores permitieron sentar las bases científicas, metodológicas y tecnológicas para el desarrollo de la Automática. Con unas bases matemáticas ya más consistentes, se consiguió avanzar tanto en el análisis como en el diseño de los sistemas de control, pudiéndose aplicar, de forma generalizada, los estudios basados en ecuaciones diferenciales, transformada de Laplace y respuesta frecuencial, que permitían, también, estudiar la estabilidad relativa. Esto fue reforzado por los trabajos de Bode a partir de los estudios de estabilidad de Nyquist.

Ahora bien, los estudios y trabajos desarrollados eran aislados, sin ninguna sistematización y fundamentalmente dirigidos a su propio ámbito de aplicación. Fue Ed S. Smith, de la Builders Iron Foundry Company junto con un grupo de ingenieros y físicos de dicha compañía quienes comenzaron a sistematizar la comprensión teórica de los sistemas de control que utilizaban, establecieron una terminología común y trataron de desarrollar métodos de diseño. Convencieron, en 1936, a la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos para que formara un Comité específico de Instrumentos Industriales y Reguladores con el fin de estandarizar los trabajos. Se convirtieron así en el primer gran organismo profesional en formar una sección específica para tratar los sistemas de control automático. En 1940 ya se podían implementar en la industria controladores que utilizaban acciones de control PID ajustables. En 1942, J.G. Ziegler y N.B. Nichols, de la Compañía Taylor Instrument, publicaron artículos en los que describían y

expresaban reglas para los ajustes óptimos en las acciones de control PI y PID, que se mantienen hasta nuestros días y son conocidas como reglas de ajuste de Ziegler-Nichols. Estos trabajos fueron extendidos a mediados de la década de 1950 por Geraldine Coon (Taylor Instrument) (Smith, 1944; Ziegler y Nichols, 1993).

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Massachusetts Institute of Technology (MIT) Harold L. Hazen y Gordon S. Brown, trabajaron las técnicas en el dominio del tiempo, métodos operacionales y funciones de transferencia. También comenzaron a desarrollar el uso de diagramas de bloques, que siguen siendo ampliamente usados hoy en día. Estos permiten establecer relaciones causa-efecto de los diferentes subsistemas de un sistema de control, mediante cajas, para representar sus relaciones funcionales mediante funciones de transferencia en el dominio de Laplace y facilitar la operativa del conjunto mediante ecuaciones algebraicas y no mediante ecuaciones diferenciales. Además, la función de transferencia de un sistema podía determinarse experimentalmente, mediante la obtención de su respuesta frecuencial ante una excitación senoidal de amplitud constante y frecuencia variable. De esta manera, era posible obtener funciones de transferencia de sistemas cuyo modelado físico era complejo. Los diagramas de bloques y las funciones de transferencia permitieron una representación compacta de sistemas complejos y, además, pusieron de manifiesto que sistemas de control diferentes y de diferentes ámbitos de aplicación, tenían estructuras similares.

Otra importante aportación que hicieron fue la incorporación de técnicas de simulación en los sistemas de control mediante el uso de analizadores diferenciales. Estos permitían la resolución de ecuaciones diferenciales por integradores. Esta línea se ha ido haciendo cada vez más necesaria a medida que aumentaba la complejidad de los sistemas (Hazen, 1934a, 1934b).

La Segunda Guerra Mundial puso de manifiesto el problema de abordar otro tipo de sistemas de control más complejos, además de la necesaria interdisciplinaria de los ingenieros de control: mecánicos, eléctricos, electrónicos. También puso de manifiesto que los sistemas no se podían diseñar basándose solo en un enfoque, o en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, sino que se debían basar en una combinación que utilizara las mejores características de ambos. Un ejemplo claro de esto fueron los sistemas de control de posición de la artillería antiaérea. Este es un problema complejo que implica la detección de la posición del avión, el cálculo de su posición futura y el control preciso del movimiento de un cañón pesado por medio de un accionamiento. El diseño implicaba la integración de sistemas que estaban fabricados por grupos diferentes. Conseguir que el conjunto funcionara de manera óptima llevó a la profundización en el estudio del ancho de banda, el ruido, perturbaciones y las no linealidades en los sistemas.

El control de la posición de un cañón antiaéreo fue abordado también por Norbert Wiener (1894-1964), excelente matemático que a los dieciséis años obtuvo su grado en Matemáticas por la Universidad de Harvard y a los diecinueve presentó su tesis doctoral también en esta misma Universidad. Trabajando en el MIT, propuso abordar el problema de predecir la posición futura de un avión. Su propuesta se basó en el trabajo que había hecho en la década de 1920 sobre el análisis armónico generalizado (Lee y Wiener, 1932). Trabajó con Julian Bigelow en la implementación de su sistema de predicción, y lograron desarrollar un sistema electrónico para la misma. Wiener se sintió decepcionado de que al final su sistema solo fuera capaz de lograr una mejora marginal (menos del 10%). Wiener describió el trabajo realizado en el informe: *"The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Applications"* (Wiener, 1942), conocido como "el peligro amarillo" debido al uso de sus cubiertas amarillas

y la enorme dificultad de sus matemáticas. Finalmente, se publicó en la literatura abierta en 1949. La teoría matemática desarrollada por Wiener para predecir eventos futuros mediante la extrapolación de la información incompleta del pasado fue la base de la estadística moderna. Posteriormente, junto con Julian Bigelow, construyó una máquina antiaérea que utilizaba como detector de la posición un radar (Bennett, 1994; Mindell, 1995). El radar permitía realimentar continuamente la posición del objetivo en el sistema de control, que a su vez continuaba posicionando el cañón con las sucesivas informaciones del radar. Estaban introduciendo el concepto de realimentación y control en tiempo real. Los problemas de control de la posición en sistemas antiaéreos, intentando predecir las posiciones futuras del avión, también fueron estudiados, de forma independiente, por Kolmogorov (Kolmogorov, 1941).

Según Åström y Kumar (Åström y Kumar, 2014), otros autores como Newton, Gould y Kaiser (Newton et al., 1957) utilizaron la teoría de predicción de Wiener para diseñar sistemas de control que minimizaran la fluctuación cuadrática media y enfocaban el problema desde el punto de vista de un sistema “*feedforward*” mucho más fácil de resolver.

La conferencia “*Automatic Control*” celebrada en julio de 1951 en Cranfield, Inglaterra, y el “*Frequency Response Symposium*” celebrado en diciembre de 1953 en Nueva York marcaron los comienzos del período de transición que condujo a la teoría moderna del control. Arnold Tustin presidió el comité organizador y se presentaron 33 documentos, 16 de los cuales trataban sobre problemas de ruido, no linealidad o sistemas de muestreo. También hubo sesiones sobre computación analógica y el análisis del comportamiento de los sistemas económicos.

A medida que los sistemas evolucionaban, se observó la debilidad en las hipótesis de diseño que consideraban que los sistemas eran

lineales y deterministas, dándose cuenta de la influencia que tenían estas consideraciones cuando se trataban sistemas más realistas, es decir, con no linealidades, con mediciones reales con errores, variaciones y ruido. Además, en los sistemas reales, tanto el proceso como el entorno están sujetos a incertidumbres.

La Automática moderna comenzaba a abordar las técnicas de diseño de controladores que corrigieran el comportamiento no lineal, no determinista y las incertidumbres de los sistemas. Se pasó del diseño de controladores que tenían como objetivo la estabilidad a controladores que garantizaran el mejor funcionamiento ante situaciones complejas y cambiantes de los sistemas.

Ziegler y Nichols ya habían mostrado cómo elegir los parámetros de un determinado tipo de controlador para obtener un rendimiento “óptimo” de una determinada estructura de control (PI, PID). A través de sucesivos trabajos (Graham y Lathrop, 1953; Schultz y Rideout, 1961), se abordaron la estandarización y los índices de rendimiento IAE, ISE, ITAE e ITSE de manera que se pudieran tener métricas comparativas.

Otro hito importante y representativo de la evolución de la automática hacia lo que se denomina la automática moderna lo constituyó la incorporación de los computadores en los sistemas de control. En efecto, la evolución tecnológica de la electrónica permitió el desarrollo de componentes más precisos y fiables. En el caso de los amplificadores operacionales, estos facilitaron el desarrollo de los ordenadores analógicos. Estos eran rápidos, realizaban operaciones repetitivas con las que se podían visualizar los efectos producidos por los cambios en los parámetros. Además, dado su bajo peso podían embarcarse en equipos aéreos. Otra línea importante de aplicación fue su utilización en la simulación analógica de sistemas de ecuaciones diferenciales. Se convirtieron, así, en una herramienta imprescindible en las universidades y centros de investigación.

Con el desarrollo de la electrónica digital, surgieron también los computadores modernos. El considerado primer computador digital fue el ENIAC, acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer* (Computador e Integrador Numérico Electrónico). Desarrollado a mediados de la década de 1940 por Mauchly y Eckert de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Moore de la Universidad de Pensilvania. Mauchly y Eckert dejaron la universidad y formaron la empresa Univac. El primer ordenador Univac 701 apareció en 1951. Un año después, IBM anunció el IBM 701. En 1944, el Laboratorio de Servomecanismos del MIT desarrolló para la Marina de los EE. UU. un ordenador para simulación mediante computación digital, denominado "Whirlwind".

En 1958, Rudolf Emil Kalman, ingeniero eléctrico, matemático e inventor estadounidense de origen húngaro, describe en (Kalman, 1958) un intento de implementar un sistema de control adaptativo sobre un ordenador digital. Este trabajo representó un nuevo concepto en el desarrollo de los sistemas de control automático basado en computadores digitales. Posteriormente Kalman fue más conocido por su coinvencción del famoso filtro de Kalman, algoritmo matemático que se utiliza ampliamente en el procesamiento de señales, sistemas de control y en guiado, navegación y control de vehículos, especialmente en naves espaciales.

A medida que los ordenadores se hicieron más potentes y fiables, se fueron incorporando a los sistemas de control, surge así el denominado Control Digital Directo. En 1962, la empresa Imperial Chemical Industries (ICI) utilizó en Inglaterra un ordenador Ferranti Argus para controlar una planta de ceniza de sosa, siendo el computador el encargado del control directo sobre los actuadores. La información del proceso provenía de 224 sensores y el ordenador controlaba 129 válvulas directamente. Las funcionalidades del sistema de control crecieron de forma notable, se facilitaban las tareas de operación

mediante pantallas y la reconfiguración de todo el sistema se podía realizar mediante lenguaje de programación.

Desde este tipo de sistemas se evolucionó, siguiendo el crecimiento tecnológico, hacia los sistemas de control distribuidos (habitualmente denominados DCS, de sus siglas en inglés). En 1975, Honeywell y Yokogawa introdujeron los sistemas de control distribuido TDC 2000 y CENTUM. Estos sistemas permitían el control digital directo mediante unidades distribuidas funcional y espacialmente. Los sistemas tienen unidades estandarizadas para la interacción con el proceso, con señales analógicas y digitales e interfaces hombre-máquina. Varios fabricantes siguieron esta línea, y los DCS se convirtieron en el estándar para los sistemas de control de procesos. Según (Aström y Kumar, 2014), en 1962 ya había 159 DCS, que aumentaron a 5.000 en 1970 y a un millón de sistemas en 1980.

Un desarrollo similar se produjo en los sistemas de automatización, basados en relés para realización de secuencias de arranque, parada y enclavamientos de seguridad, en la industria manufacturera. General Motors planteó la sustitución de este tipo de sistemas por un controlador estándar. Bedford Associates y Modicon consiguieron una implementación exitosa de un sistema de este tipo. En esta línea en 1971, Allen Bradley desarrolló un dispositivo denominado Controlador de Lógica Programable (PLC) que se caracterizaba por tener un ciclo continuo de trabajo en el cual las variables son leídas cíclicamente y las órdenes son ejecutadas en función del programa desarrollado. Los PLC se programaron en una etapa temprana usando un lenguaje gráfico llamado diagramas de escalera (LD), que emula en su lógica de programación los diagramas de contactos eléctricos. Más tarde, se estandarizaron varias formas de programación: diagramas de bloques de funciones (FBD), gráficos de funciones secuenciales (SFC) y texto estructurado (ST). Los PLC se desarrollaron rápidamente y se convirtieron en una herramienta estándar para la automatización. Hoy en

día, son sistemas con grandes funcionalidades de operación, periféricas distribuidas para el manejo de un elevado número de variables, potentes capacidades de control y una gran variedad de protocolos industriales de comunicaciones.

Estas líneas de evolución tecnológica citadas anteriormente han propiciado el desarrollo de innumerables aplicaciones de los sistemas de control, con un fuerte crecimiento y expansión de las técnicas propias del control. Además, la implementación de sistemas de control basados en computador provocó el desarrollo de nuevas ideas desde el campo de las matemáticas. Así, la consideración de sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas hizo que se evolucionase desde la descripción externa de los sistemas, mediante conjuntos de ecuaciones diferenciales, a la denominada descripción interna de los mismos, basada en el concepto de variables de estado. Surgen nuevos conceptos como controlabilidad, observabilidad, muestreo, etc. que constituyen nuevos planteamientos en los sistemas de control, dando lugar a la denominada Teoría Moderna de Control.

Otro sector ampliamente influenciado por las nuevas teorías del control fue el aeroespacial. El lanzamiento del cohete Sputnik en 1957 supuso el inicio de un gran salto en la Automática. Fue necesario resolver nuevos retos: orientación, control, estimación de trayectorias, posicionamiento de satélites, optimización de trayectorias, control del cohete en el lanzamiento, navegación y reingreso, etc. También hubo que resolver los problemas asociados a los sistemas de control que garantizarían la vida y supervivencia de los tripulantes en largas, cambiantes y extremas condiciones. Igualmente, se podría decir de la evolución en la amplia gama de dispositivos tecnológicos asociados a los sistemas de control: sensores de posición, de velocidad, de orientación, acelerómetros, giroscopios, comunicaciones, baterías, células fotovoltaicas, etc. Y finalmente, el complejísimo reto del diseño de los vehículos y sondas de exploración espacial, con sus sistemas de

control y navegación, que les han permitido, y les permiten, recorrer kilómetros a lo largo de la superficie Lunar y de la Marte, enviando a la Tierra valiosísima información.

En esta evolución de la Automática hasta nuestros días, faltan innumerables ámbitos en los cuales las aportaciones científicas, retos y transformaciones han sido extraordinarias. Sería excesivamente largo y prolijo explicarlas en un documento de estas características.

5. LA AUTOMÁTICA EN ESPAÑA

El origen de la Automática en España tiene que ser explicado a través de dos excelentes trabajos de recopilación llevados a cabo por los Profesores Javier Aracil Santonja y Sebastián Dormido Bencomo, Catedráticos del área de Ingeniería de Sistemas y Automática de las Universidades de Sevilla y UNED respectivamente, que fueron publicados en la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI) del Comité Español de Automática (CEA) (Aracil, 2009; Dormido, 2007).

El Profesor Aracil expresa que el comienzo de la Automática en España estuvo fuertemente vinculado a la figura pionera del ingeniero, matemático e inventor, de finales del siglo XIX, Leonardo Torres Quevedo (1852-1936). El cual, en el año 1910, cambia de nombre del laboratorio de Mecánica Aplicada, que tenía en la Escuela Técnica Superior de Industriales de Madrid, y lo transforma en el primer laboratorio de Automática. Desarrolla máquinas analógicas de cálculo automático, que incorporan integradores, lo cual permite la resolución de ecuaciones diferenciales. Además de otra serie de inventos y desarrollos de relevancia, en campos muy diferentes de la ingeniería (construcción, naval, aeronáutica, etc.), publica, en el año 1914, en la Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales "*Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones*", donde expone importantes ideas sobre autómatas y la estructura de realimentación (Torres Quevedo, 1914). A él se le debe la paternidad del término en español **Automática**. Según él "*la*

automática es la encargada de la construcción de autómatas, máquinas que son capaces de relacionarse con el entorno que las rodea". Para ello, deben estar dotadas de "sentidos", es decir, instrumentos, aparatos de medida o sensores. También deben tener "miembros" mediante los que actuar y, por último, deben tener "discernimiento", de modo que, a partir de las impresiones que reciben, decidan las actuaciones adecuadas. Cada una de estas funciones: medir, decidir y actuar, presentan problemas tecnológicos específicos, que Torres Quevedo intentó resolver con la tecnología disponible en aquella época, que era mecánica o, a lo sumo, electromecánica, lo cual le resultó inviable para sus propósitos. Ahora bien, las ideas que manejaba correspondían a conceptos de automática y realimentación que eran muy avanzados para la época, pero que no tuvieron continuidad con una escuela de investigadores.

Otra persona de relevancia y pionera fue Esteban Terradas, Ingeniero industrial, Ingeniero de Caminos y Doctor en Ciencias Físicas y Ciencias Exactas, responsable de que Albert Einstein viniera a España en el año 1924. Fue uno de los introductores de la electrónica en España. Promovió el Instituto Nacional de Electrónica en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), junto con su colaborador Antonio Colino, Doctor Ingeniero Industrial y profesor Titular de Electrónica en la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid, que escribió en el año 1950 el libro *Teoría de los Servomecanismos*, joya bibliográfica que desarrolla los contenidos de los sistemas realimentados de control. Este libro ha pasado a formar parte de la publicación *Historic Control Textbooks* de la *International Federation of Automatic Control* (IFAC), que recoge los primeros libros en el mundo sobre Control Automático (Colino López, 1950; Gertler, 2006).

La teoría de los servomecanismos era la asignatura que se encargaba de la docencia del Control Automático y estaba incorporada en la Cátedra de Electrónica de las Escuelas de Ingenieros Industriales. Esta Cátedra, que en la Escuela de Ingenieros de Madrid en los años

50 ocupaba el Profesor Eugenio Andrés Puente, se divide en dos en los años 60: Cátedra de Electrónica y Cátedra de Servomecanismos. En la primavera de 1965, por oposición, se cubren las cátedras de Servomecanismos de Barcelona y Madrid por los profesores Gabriel Ferraté y Juan Peracaula respectivamente. En los años 70, como consecuencia del traslado a Barcelona del profesor Peracaula, el Profesor Andrés Puente se incorpora a la cátedra de Servomecanismos de Madrid. Quedan así constituidos los dos núcleos que comenzarán a consolidar la automática moderna en España. A partir de estos dos grupos se va a potenciar la expansión de la Automática en España, el desarrollo de laboratorios, la transferencia de conocimientos al sector productivo y la formación de jóvenes profesores e investigadores, que irán cubriendo los diferentes puestos que van surgiendo en la universidad española y en los nuevos centros de investigación.

El otro punto de desarrollo de la Automática tiene como origen al Prof. José García Santesmases, Físico, Ingeniero y Catedrático de Física Industrial en la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense de Madrid, quien había puesto en marcha la especialidad de Electricidad y Electrónica. En 1952 crea el Instituto de Electricidad y Automática (IEA) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), donde comienza a desarrollar su actividad investigadora en el campo de la Automática y la formación de investigadores, tan necesaria en este campo. Destaca fundamentalmente en aquella época, año 1954, el diseño y desarrollo de un Computador Analógico constituido por 16 amplificadores operacionales, un multiplicador-divisor a integraciones periódicas, otro basado en la diferencia de cuadrados y un generador de funciones que empleaba diodos para generar curvas por aproximación de tramos rectos. En el año 1956, desarrolló una unidad aritmética de un computador digital que permitía sumar dos números de 8 cifras decimales en un tiempo inferior al milisegundo. Este centro, además, desarrolló una importante labor de difusión y

atracción de investigadores en el campo de la Automática. Merece destacar el Congreso Internacional de Automática celebrado en el año 1958 bajo los auspicios del Instituto Nacional de Industria (INI). Como indica el profesor Dormido, participaron 400 delegados de 19 países, presentando 57 comunicaciones, de las cuales 10 eran de investigadores españoles del campo de la Automática, entre los que figuraban Gabriel Ferraté, Vicente Aleixandre, González Ibeas y Alique Page, entre otros, que luego serían el germen de importantes grupos de investigación en España. Este congreso dio un toque de atención en nuestro país sobre el impacto de la Automática y facilitó la preparación del *“International Congress for Information Processing”* que tuvo lugar en París al año siguiente (1959) y en el que el Profesor Santesmases ostentó la Vicepresidencia del congreso. Patrocinado por la UNESCO, congregó a 2000 participantes procedentes de 37 países y durante su celebración se propuso la creación de la *“International Federation for Information Processing”* (IFIP), que se constituyó al año siguiente con 13 países miembros, entre ellos España. En los 25 años siguientes, el CSIC a través del IEA ostentaría la representación española en la IFIP que posteriormente sería traspasada a la FESI (Federación Española de Sociedades de Informática) (Dormido, 2007).

En año 1971, el CSIC a propuesta del entonces “Patronato Juan de la Cierva”, creaba el Instituto de Automática Industrial (IAI) fuera de Madrid, en Arganda del Rey. Centro que desarrolló una importante labor investigadora y de desarrollo en Automática. Posteriormente, en el año 2010, se transformaría en el Centro de Automática y Robótica del CSIC (CAR).

En el año 1975, el Profesor Sebastián Dormido Bencomo accede a una plaza de Prof. Agregado de Física Industrial (Automática) en el Departamento de Informática y Automática que dirigía el Prof. Santesmases. En el año 1982, el profesor Dormido obtiene la Cátedra de Automática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia

(UNED) donde desarrolla una excelente trayectoria investigadora, de formación de doctores y de innovación en las metodologías docentes para formación en Automática. Destaca, especialmente, el desarrollo de los denominados “Laboratorios Remotos de Automática” y las “redes colaborativas” de este tipo de laboratorios. Esta línea proveniente de las facultades de Físicas, al igual que la de las escuelas de Ingenieros Industriales, fue la base que sirvió para dotar de profesores e investigadores a numerosos centros de la universidad española, que dieron lugar a la creación de importantes grupos de investigación en Automática en las facultades de Físicas, destacando a modo de ejemplo, los de la Universidad Autónoma de Barcelona, con el profesor José González Ibeas, la Universidad de Valladolid, con el profesor Vicente Aleixandre Campos, y la Universidad de Bilbao, con el profesor Mariano Mellado Rodríguez.

En el año 1968 se constituyó la asociación científica Comité Español de Automática (CEA) para impulsar el desarrollo, la investigación y las enseñanzas universitarias de la automática, comprendiendo, entre otros, los aspectos relativos a automatización, control, robótica, visión artificial, inteligencia artificial, etc. Agrupa, a nivel estatal, a investigadores, profesores y profesionales en la materia. En su página web, <https://www.ceautomatica.es/>, se pueden leer sus objetivos principales:

- Promover el estudio, aplicación y mejora de las técnicas de la Automática, la colaboración y coordinación de las actividades españolas de la especialidad, la cooperación entre la Universidad y la Industria en las actividades propias de la Automática, las relaciones internacionales y la colaboración entre sus asociados.
- Actuar como canal de comunicación entre las diferentes Administraciones y el colectivo que representa, para todas las cuestiones que le atañen.

- Organizar y desarrollar cursos, conferencias, congresos, reuniones de estudios, comisiones de trabajo y elaboración de normas.
- Editar y divulgar publicaciones, normas, informes y monografías.
- Fomentar la creación de laboratorios y centros de enseñanza y la divulgación de las técnicas de la Automática.

El comité celebra anualmente, desde 1977, las Jornadas de Automática, que reúnen a investigadores y expertos de empresas para presentar los últimos avances en Automática.

Hasta aquellas fechas, las dos líneas de crecimiento de la Automática en España, la de las Escuelas de Ingeniería Industrial y la de las Facultades de Ciencias Físicas, lo estaban haciendo de forma separada y con colaboraciones puntuales que estaban basadas fundamentalmente en las relaciones personales. Esto no fortalecía el desarrollo de este campo. No tenía ningún sentido, y menos, en una disciplina tan transversal, colaborativa e integradora como lo es la Automática. Es aquí donde el Profesor Dormido, con su saber y humanismo, desarrolla una intensa labor de trabajo y convencimiento, para conseguir la integración de ambas líneas y constituir lo que es, hoy en día, una única comunidad de la Automática en España y, además, una gran familia. Estos esfuerzos ya habían comenzado antes de que él accediera a la presidencia del Comité Español de Automática (CEA), pero desde esta posición los reforzó aún más. Además, impulsó, animó y apoyó, de forma muy trascendental, la formación de grupos de investigación jóvenes en las universidades pequeñas y de la periferia, a los que también ayudó en su proyección internacional.

En los años 90, la comunidad de Automática española ya desarrollaba actividades internacionales reconocidas, participaba en congresos, proyectos, comités técnicos, publicaciones, etc. Estas actividades, junto con el trabajo de los profesores Ferraté, Albertos, Dormido, Aracil,

Camacho, de la Puente, Basáñez, Ollero y, por supuesto, muchos más que participaron muy activamente en las estructuras de la *International Federation of Automatic Control* (IFAC), consiguieron para España, en el año 1992, el XV IFAC WORLD CONGRESS, que se celebraría en Barcelona del 21 al 26 de Julio de 2002 (B'02). En el año 1999, el Profesor Pedro Albertos, Catedrático del área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Valencia, accede a la presidencia de la IFAC, máximo organismo mundial en el campo de la Automática.

La organización del congreso mundial de IFAC B'02 supuso un gran desafío para toda la comunidad de Automática de España. Los trabajos recibidos fueron 2.509, incluyendo 72 propuestas de sesiones invitadas y 11 propuestas de paneles de discusión, de 68 países. Después del proceso de revisión se seleccionaron 1.757 ponencias, 7 conferencias plenarias, 51 propuestas de sesiones invitadas y 7 propuestas de paneles de discusión, procedentes de 63 países. El congreso fue un éxito científico y organizativo, con múltiples actividades, visitas técnicas y sesiones plenarias de altísimo nivel. Finalmente, hay que indicar que el congreso mundial de IFAC consiguió una importante cohesión y proyección internacional de los grupos de investigación en Automática de España.

En el año 2004, CEA fundó la Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI) como medio de difusión científica, hacia la comunidad Iberoamericana de Automática, de las actividades investigadoras en este campo. RIAI engloba el amplio campo de la Teoría de Control, la Ingeniería de Sistemas, la Automatización, la Robótica, la Regulación Automática y las diferentes tecnologías empleadas en la realización de los sistemas de control, en particular los basados en computadores y redes de comunicaciones. RIAI tiene el Sello de Calidad de la FECYT y está incluida en SCOPUS, ISI Web of Knowledge y JCR.

En el año 2018, tuvo lugar en España otro gran evento de Automática, de ámbito mundial, la *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018)*, que se celebró en Madrid del 1 al 5 de octubre de 2018, organizado por el Grupo de Robótica (Robotics Lab) del área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, liderado por los Profesores Salichs, Balaguer y Moreno. Esta edición de IROS 2018 fue la número 30 y recibió un número récord de artículos, con 2.704 presentaciones (un aumento del 25 % con respecto a IROS 2017). Los organizadores aprobaron 1.254 documentos para presentaciones orales, una tasa de aceptación del 46,4 %. El número de talleres y tutoriales también fue un récord, con 99 presentaciones y 56 propuestas aceptadas (57%). Incluyendo trabajos, talleres y tutoriales, sesiones especiales y resultados de última hora, el número de presentaciones ascendió a 3.010. Los documentos aceptados representaban a 62 países, con un 26 % de origen en los Estados Unidos, un 11 % de Alemania, un 10 % de Japón, un 6 % del Reino Unido y un 5 % de España, Francia e Italia. La organización de un evento de esta magnitud ratificó la proyección internacional de la robótica en España y puso de manifiesto el potencial investigador de los grupos de investigación españoles en este complejo y dinámico campo de la Automática como es el de la Robótica.

5.1. Grupos temáticos del Comité Español de Automática

El Comité Español de Automática organiza su actividad en forma de grupos temáticos. A continuación, se presentan dichos grupos.

Grupo Temático de Automática en el Sector Marino (AUTOMAR)

El Grupo Temático de Automática en el Sector Marino (AUTOMAR) se constituyó en el año 2002 y tiene por objetivo prioritario agrupar y coordinar los esfuerzos de los numerosos investigadores y desarrolladores de nuestro país que trabajan en el sector marino, en áreas

como: robótica marina, ingeniería de control, inteligencia artificial, modelado, etc. Se pretende desde el grupo mejorar la transferencia de los resultados de la investigación a la industria, aumentar la participación de investigadores españoles en asociaciones internacionales y programas europeos, así como conseguir un mayor reconocimiento por parte de la administración y la sociedad.

Grupo Temático de Bioingeniería

El Grupo Temático de Bioingeniería tiene por objetivo unir los esfuerzos de los distintos grupos y centros españoles dedicados a la investigación y el desarrollo en el área de la Bioingeniería. Entre las definiciones más aceptadas de Bioingeniería podemos citar la propuesta en 1972 por el *Committee of the Engineer's Joint Council* de los Estados Unidos:

“La Bioingeniería es la aplicación conjunta de los conocimientos de la ciencia ingenieril y la médica, tal que a través de ambas pueden ser plenamente utilizados para el beneficio del hombre”. El enfoque multidisciplinar de este grupo temático engloba aspectos como la captura y el procesamiento de señales e imágenes biológicas y asociadas, el procesamiento y el análisis, remoto e in situ, de la información y la actuación sobre el propio organismo mediante dispositivos implantados o externos, con el objetivo final de la salud y el bienestar humanos. Todo ello considerando las normas éticas y morales que rigen el cuidado y mejora de la calidad de vida de las personas.

Grupo Temático de Control Inteligente

El objetivo del Grupo Temático de Control Inteligente es integrar las técnicas de la Inteligencia Artificial en la Automática. Organiza regularmente reuniones como el Simposio anual CEA de Control Inteligente. Además, otorga premios anuales a los estudiantes e investigadores más destacados en este campo, como el Premio Nacional

IDOM a la mejor Tesis Doctoral en Control Inteligente, el Premio al mejor TFM/TFG en Control Inteligente o el Premio IKERLAN 2022 al mejor Trabajo en Control Inteligente presentado a las Jornadas de Automática.

Grupo Temático de Educación en Automática

El Grupo Temático de Educación en Automática tiene como objetivo principal de trabajo el desarrollo de nuevas metodologías docentes para la formación, tanto de estudiantes como de profesionales, en las diferentes disciplinas de la Automática. Varios grupos de investigación integrantes de CEA han venido trabajando, desde hace años, en el desarrollo de nuevas metodologías docentes para formación en Automática basadas en laboratorios remotos. En este sentido el primer proyecto aglutinador fue Automatl@b, dirigido por el Profesor Sebastián Dormido de la UNED, y en el que participaban 7 grupos de investigación de diferentes universidades españolas, entre ellas la Universidad de León. La evolución de Automatl@b es hoy el proyecto UNILabs: <https://unilabs.dia.uned.es/>. El grupo organiza regularmente seminarios y reuniones como el Seminario de Educación en Automática, el Seminario online “CEA Webinars” o la reunión del GT de Educación en Automática en las JJAA. Además, otorga cada año el premio PRODEL de Educación en Automática.

Grupo Temático de Ingeniería de Control

La Ingeniería de Control se preocupó desde sus orígenes de la automatización y del control automático de sistemas complejos, sin intervención humana directa. El grupo de Ingeniería de Control abarca campos como el Control de Procesos, el Control de Sistemas Electromecánicos o la Supervisión y el ajuste de Controladores. Dentro de este grupo se estudian teorías y técnicas entre las que podemos destacar: Control Óptimo, Control Predictivo, Control Robusto, Control

No Lineal y Control de Sistemas, entre otros. Todo ello, con trabajos y aplicaciones muy diversas (investigación básica, investigación aplicada, militares, industriales, comerciales, etc.).

Grupo Temático de Modelado, simulación y optimización

Toda experimentación y trabajo científico tiene en la comprensión de la realidad que nos rodea su objetivo primario. Consecuentemente, la formulación de hipótesis y modelos (versiones simplificadas de la realidad) es la piedra angular en todas las disciplinas científicas. En Automática esto no es una excepción. El Grupo de Modelado, Simulación y Optimización trabaja en esta línea de forma transversal, en todas sus categorías, desde el control de procesos industriales a la bioingeniería pasando por la robótica o la visión por computador, entre otras.

Grupo Temático de Robótica

El Grupo Temático de Robótica agrupa y coordina los esfuerzos de los numerosos investigadores y desarrolladores de nuestro país que trabajan en Robótica y temáticas afines. El grupo potencia la colaboración, el intercambio de experiencias y conocimientos, la elaboración de inventarios, y la proyección nacional e internacional. Organiza anualmente las Jornadas Nacionales de Robótica y otorga premios como el Premio ROBOTNIK al mejor artículo del Grupo Temático de Robótica en las Jornadas de Automática, el Premio GTRob a la mejor Tesis Doctoral en Robótica o el Premio INFAIMON a los ganadores del concurso CEABOT.

Grupo Temático de Computadores y Control

El objetivo del Grupo Temático de Computadores y Control es coordinar y promover las actividades técnicas relacionadas con las sinergias que existen entre la Ingeniería de los Computadores y el

Control. Sin limitar las disciplinas que puedan tener relación con este grupo temático, se ofrece un marco de actuación en el desarrollo de sistemas empotrados, sistemas ciber-físicos, arquitecturas software y hardware, ingeniería de software dirigida por modelos, verificación, validación, certificación, ciberseguridad, tiempo real, tratamiento masivo de datos, sistemas distribuidos y computación en la nube. Es de especial interés la aplicación de estas técnicas en el campo de la automatización y el control en áreas como: aeroespacial, transporte, energía, industria 4.0, sanidad e infraestructuras inteligentes, entre otras.

Grupo Temático de Visión por Computador

El Grupo Temático de Visión por Computador coordina las actividades que se desarrollan en los campos de procesado, análisis e interpretación de imágenes, fundamentalmente aplicadas a las áreas de percepción y reconocimiento de escenas, guiado de robots, imagen médica e inspección visual automatizada. Como el resto de los grupos, tiene por objetivo prioritario agrupar y coordinar los esfuerzos de los numerosos investigadores y desarrolladores de nuestro país que trabajan dichas áreas.

6. MODELADO DE SISTEMAS

6.1. Modelado matemático

La utilización de modelos matemáticos, que permitan analizar y estudiar el comportamiento de los sistemas, es una técnica muy habitual y necesaria en muchos campos de la ciencia. En el ámbito de la Automática, es muy importante la obtención de modelos que representen la dinámica de comportamiento de los sistemas para, a partir de ellos, poder realizar simulaciones de validación, estrategias de control, predicciones de funcionamiento, detección de anomalías y de fallos, supervisión de los procesos y sistemas, etc.

La obtención clásica de modelos ha estado basada en el enfoque analítico. Este enfoque permite obtener conjuntos de ecuaciones algebraicas, diferenciales o en derivadas parciales, a partir de los principios físicos involucrados en el sistema y, por lo tanto, disponer de una representación matemática del comportamiento de dicho sistema. Cuanto más preciso tenga que ser el modelo, mayor será la complejidad en el sistema de ecuaciones (Habib et al., 2021). La descripción causal de los sistemas ayuda en la obtención de modelos basados en la relación causa efecto, o lo que es lo mismo la relación entre una variable de entrada y una variable de salida. Además, esta metodología permite dividir un sistema más complejo en subsistemas más simples y funcionales para los que podemos obtener una ecuación matemática, más sencilla y resoluble, que describe su comportamiento en cuanto a dicha relación causa efecto. El incremento en cuanto a la complejidad de los sistemas y, por lo tanto, del número de

variables implicadas y correlacionadas, hizo que su descripción tuviera que expresarse mediante relaciones causales de múltiples entradas con múltiples salidas. Abordar el modelado de este tipo de sistemas lleva a la utilización de matrices y a la descripción interna de los sistemas mediante variables de estado. Los métodos computacionales modernos han permitido el manejo y la resolución de modelos mucho más complejos y precisos en los sistemas de control (Ljung et al., 2020; Pilonetto et al., 2014). Por otro lado, la fuerte expansión tecnológica de estos últimos años ha permitido disponer de más información de los sistemas, que también puede ser utilizada para el modelado.

En las siguientes páginas, se muestran ejemplos de la aplicación del modelado matemático en el campo de la Automática.

Ejemplo 1: modelado clásico de un sistema de suspensión

En este ejemplo se muestra el modelado clásico de un sistema de suspensión de una rueda, que está constituido por un amortiguador y un muelle. El modelo se basa en la ecuación diferencial que representa la dinámica de comportamiento del sistema. A partir del modelo se puede obtener el diagrama de bloques con las funciones de transferencia de cada uno de los subsistemas implicados, la representación de los lazos de realimentación y la función de transferencia total del sistema. El modelo nos permite realizar la simulación del sistema de suspensión, obtener las correspondientes respuestas de este ante diferentes situaciones y modificar los ajustes de los parámetros. En la Figura 6.1 se puede apreciar el primer paso del proceso de modelado del sistema de suspensión mediante la definición de la ecuación diferencial que define su comportamiento. En la Figura 6.2 se define el lazo de control a partir del estudio de la ecuación diferencial en forma de funciones de transferencia, mientras que en la Figura 6.3 se analiza la respuesta del sistema de suspensión para diferentes parámetros del muelle, amortiguador y masa.

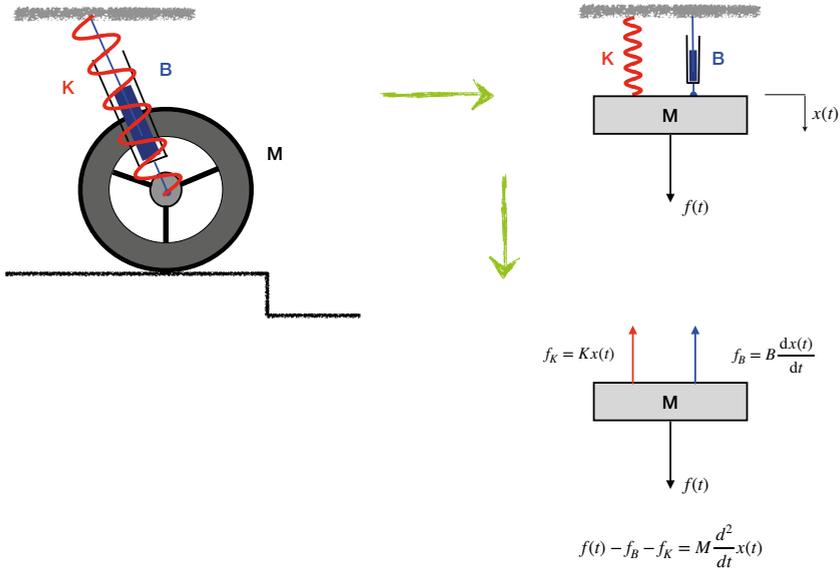


Figura 6.1. Sistema de ecuaciones de un sistema de suspensión

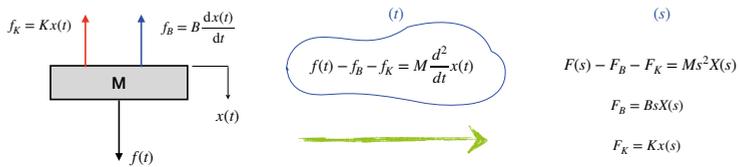


DIAGRAMA DE BLOQUES

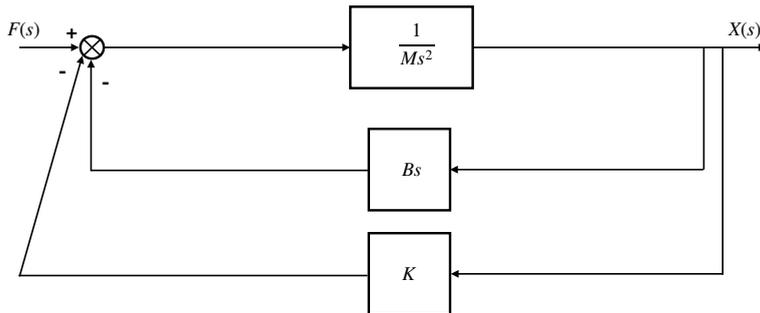


Figura 6.2. Representación en funciones de transferencia del sistema de suspensión

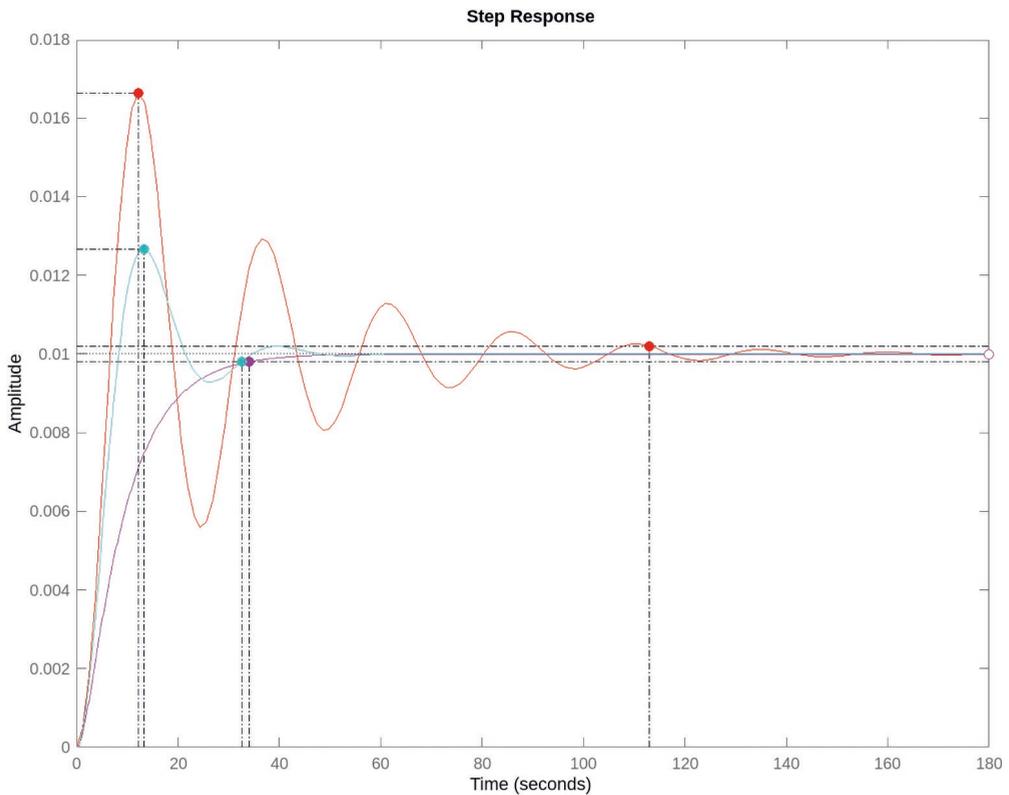


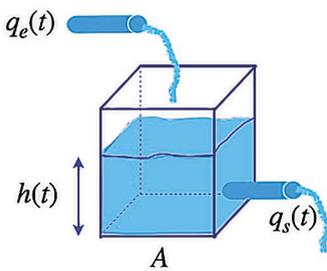
Figura 6.3. Respuestas del sistema de suspensión ante diferentes parámetros

Ejemplo 2: modelado del nivel de un depósito

A continuación, se trata un problema de mayor complejidad, el estudio del comportamiento del nivel de un depósito. La evolución de este nivel se ve influida tanto por un caudal de entrada como por un caudal de salida del depósito. Dado que la relación matemática existente entre el caudal y el nivel no es de carácter lineal, se necesita de una linealización de la expresión resultante en torno al punto de funcionamiento del sistema. A partir del modelo linealizado, se puede obtener el diagrama de bloques con las funciones de transferencia de cada uno de los subsistemas implicados, la representación de los

lazos de realimentación y la función de transferencia total del sistema, trabajando a partir de este momento de manera análoga a la descrita en el ejemplo anterior.

En la Figura 6.4 se observa el paso inicial de obtención de las funciones matemáticas del sistema en el dominio del tiempo, así como su linealización alrededor del punto de trabajo, y las funciones de transferencia correspondientes en el dominio de Laplace. A continuación, en la Figura 6.5, aparece cómo sería el lazo de control del nivel del tanque con los elementos reales que lo forman. Por último, en la Figura 6.6, tenemos el mismo lazo de control, pero con las funciones de transferencia del sistema calculadas previamente.



Ecuaciones

$$q_e(t) - q_s(t) = A \frac{dh(t)}{dt}$$

$$q_s(t) = \sqrt{2gh(t)}$$

Linealizamos para pto. Funcionamiento $h_0(t)$

$$q_s(t) = K_1 h(t)$$

Transformadas de Laplace:

$$Q_e(s) - Q_s(s) = AsH(s)$$

$$Q_s(s) = K_1 H(s)$$

Función de transferencia

$$\frac{H(s)}{Q_e(s)} = \frac{1/K_1}{1 + (A/K_1)s}$$

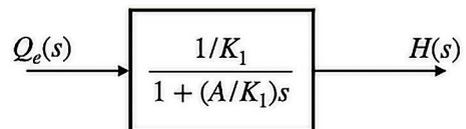


Figura 6.4. Obtención de la función de transferencia a partir de las ecuaciones del sistema

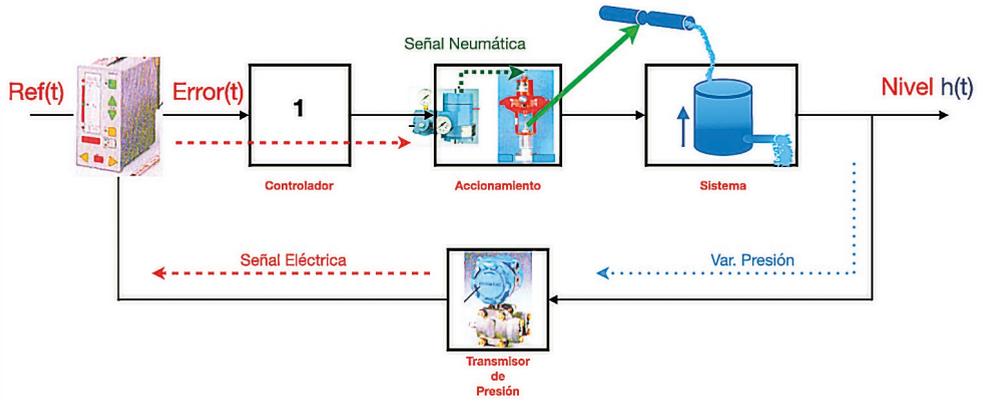


Figura 6.5. Lazo del control de nivel de un tanque

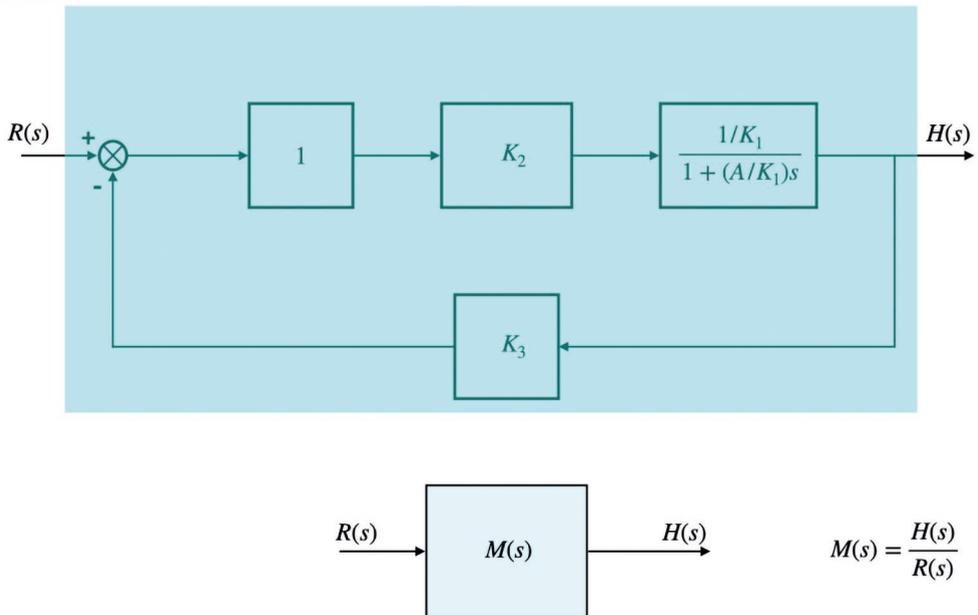


Figura 6.6. Implementación de las funciones de transferencias al lazo de control de nivel de un tanque

Ejemplo 3: modelado del nivel en un sistema real de cuatro tanques disponible en los laboratorios de la Escuela de Ingenierías

Finalmente, se estudiará el comportamiento de un sistema real basado en el problema cuatro depósitos, planteado por Karl Henrik Johansson (Johansson, 2000). El problema de control que plantea este sistema es complejo debido a la aparición de no linealidades y a la interacción entre las variables que intervienen. Además, tiene una complejidad adicional, como consecuencia de que se ha construido incorporando instrumentación industrial que introduce nuevas no linealidades, errores o ruido en las medidas, entre otras circunstancias desfavorables. Las variables implicadas están íntimamente relacionadas entre sí, influyendo las unas en las otras, y las ecuaciones diferenciales que permiten modelar el proceso conforman un sistema no lineal, cuya resolución no es tan directa como en los casos anteriormente tratados. Se vuelve necesaria la expresión de dicho sistema en forma matricial para estudiar las variables de estado del mismo. La forma de abordar la resolución de un problema relativamente complejo, como es la maqueta de cuatro tanques, deja de manifiesto el creciente interés en las técnicas de modelado basado en datos que trataremos a continuación. En la Figura 6.7, se observa el sistema físico junto con su esquema de funcionamiento básico, mientras que en la Figura 6.8 y Figura 6.9 se puede apreciar el sistema de ecuaciones diferenciales y su expresión en variables de estado, respectivamente.

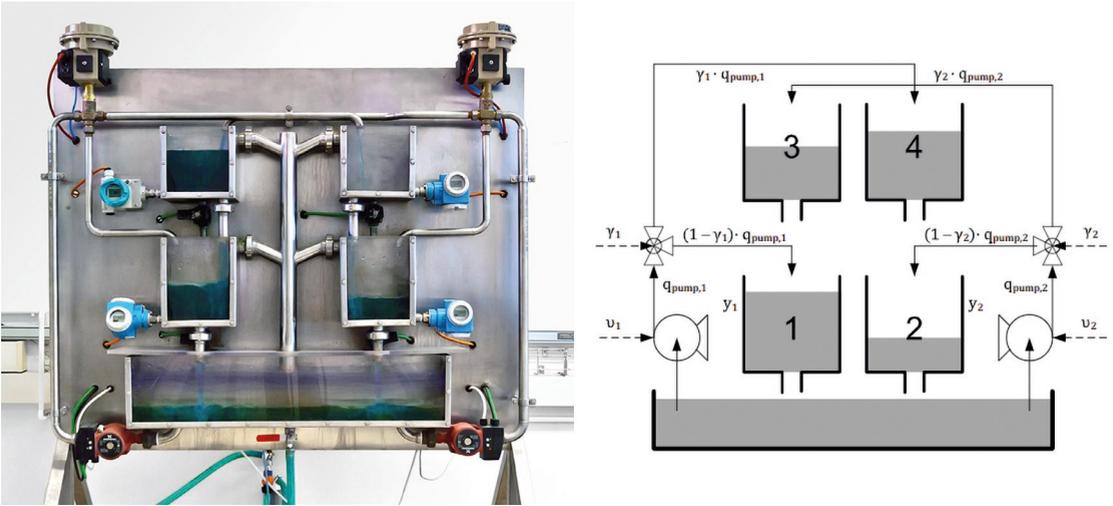


Figura 6.7. Sistema industrial compuesta por un proceso de 4 tanques

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_1} v_1$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_2} v_2$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_3} v_2$$

Figura 6.8. Ecuaciones del sistema de 4 tanques

$$\frac{dx}{dt} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_3} \\ \frac{\gamma_1 k_1}{A_4} & 0 \end{pmatrix} u$$

$$y = \begin{pmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{pmatrix} x \quad T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}} \quad i = 1, \dots, 4$$

Figura 6.9. Representación en variables de estado del sistema de 4 tanques

6.2. Modelado basado en datos

Las tecnologías utilizadas para la implementación de los sistemas de control aportan, como mínimo, comunicaciones y memoria para almacenamiento de un número creciente de variables. Este incremento en el volumen de información disponible, así como el elevado número de algoritmos disponibles basados en técnicas de *machine learning*¹ y *deep learning*², está permitiendo el desarrollo de nuevas líneas de investigación para la obtención de modelos de los sistemas basados en datos. Este tipo de modelado está permitiendo abordar nuevos retos de la Automática, como son los sensores virtuales³, los gemelos digitales⁴ en la industria y los laboratorios remotos interactivos para la formación.

1 Se conocen como técnicas de machine learning o aprendizaje automático a aquellos algoritmos que permiten a un computador aprender a realizar una tarea a partir de los datos, sin haber sido programado explícitamente para ello.

2 Subconjunto del machine learning, basado en redes neuronales con múltiples capas, también conocidas como redes neuronales profundas. Las redes neuronales son técnicas de aprendizaje automático basadas en la interconexión de múltiples unidades, cada una de las cuales define una función, de acuerdo a diversas arquitecturas. Las redes neuronales profundas muestran una capacidad para extraer progresivamente características de más alto nivel que les ha permitido ofrecer los mejores resultados hasta el momento en diversos ámbitos.

3 Estimaciones de variables difícilmente medibles a partir del procesamiento de otros datos disponibles mediante un determinado modelo computacional.

4 Modelo virtual diseñado para reflejar un sistema físico de la forma más realista posible.

Dada la complejidad de este tipo de metodologías, se desarrollan a continuación, de forma resumida, una serie de ejemplos prácticos reales que ilustran su evolución y potencialidad.

Ejemplo 1: modelado del caudal en un sistema real disponible en los laboratorios de la Escuela de Ingenierías

En este primer ejemplo se muestra el método utilizado para implementar un sensor virtual de caudal, empleando una red neuronal recurrente⁵, para una planta piloto industrial. Esta planta industrial es un sistema real disponible en los laboratorios de la Escuela de Ingenierías. El desempeño del lazo de control del caudal de la planta es similar cuando se emplea el caudalímetro real y cuando se emplea el sensor virtual. En la Figura 6.10 se muestra el proceso de diseño del sensor virtual de caudal; en la Figura 6.11 se puede ver la incorporación del sensor a un lazo de control real; y en la Figura 6.12 se puede ver la comparación entre el desempeño del sensor de caudal real y el sensor virtual diseñado.

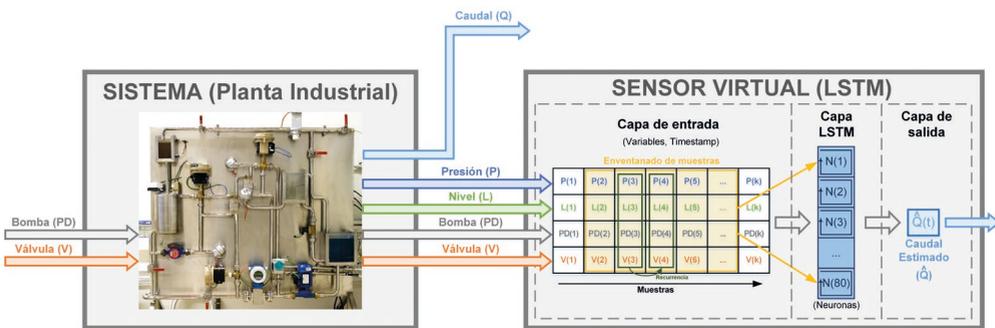


Figura 6.10. Sensor virtual de caudal de un proceso industrial

5 Las redes neuronales recurrentes hacen uso de ciclos en su arquitectura que les permiten memorizar la evolución de las variables, siendo muy útiles para el modelado del comportamiento dinámico.

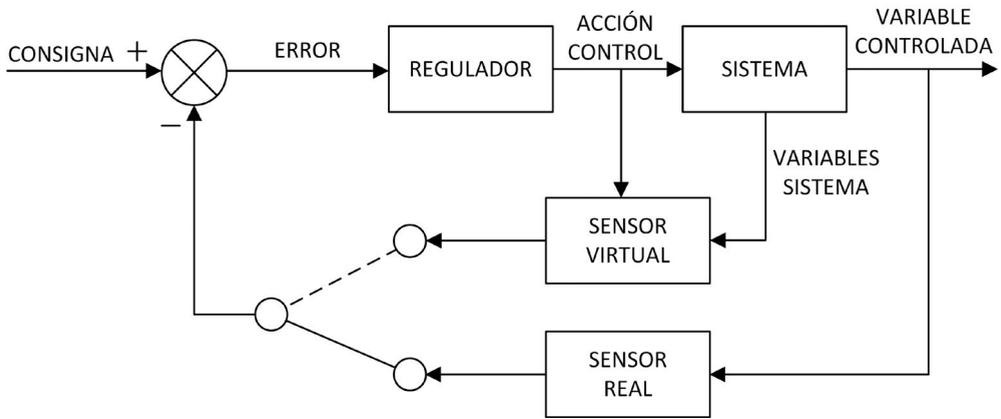


Figura 6.11. Lazo de control con el sensor virtual y real

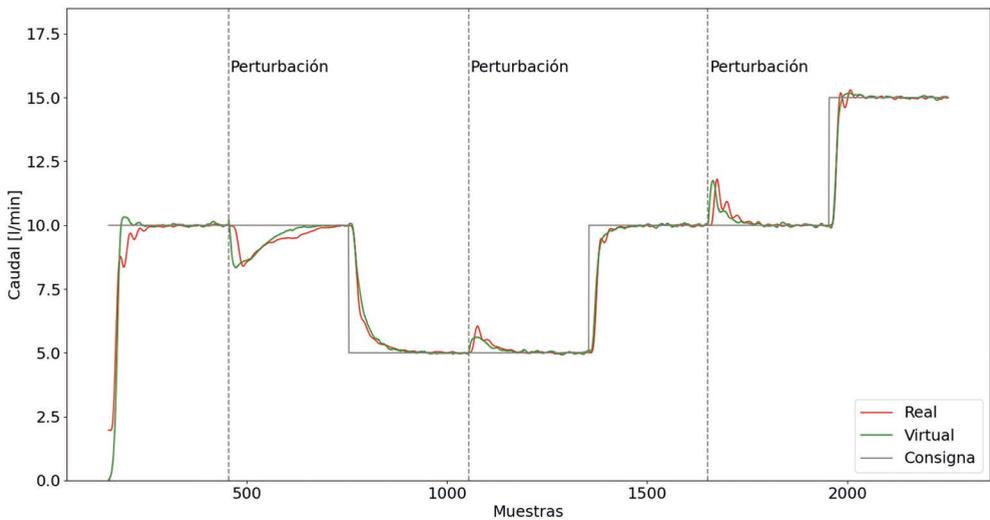


Figura 6.12. Resultado del sensor virtual de caudal y el real respecto a una consigna

Ejemplo 2: modelado de la producción de frío y eficiencia en las enfriadoras del Hospital de León

Este ejemplo presenta la metodología para el desarrollo de un sensor virtual que estime la potencia de frío que generan las enfriadoras, la cual es difícil y costoso medir utilizando un sensor convencional. La estimación de la producción de frío permite conocer la eficiencia de la máquina en cada instante. Normalmente, este tipo de máquinas enfriadoras constan de uno o varios circuitos independientes para adaptarse a la demanda de frío de la instalación, por lo que la operación de las mismas difiere a lo largo del tiempo.

En la siguiente figura se muestra una enfriadora condensada por aire localizada en el Hospital de León, la cual se ha empleado para verificar el sensor virtual. Esta enfriadora consta de tres circuitos refrigerantes similares e independientes.



Figura 6.13. Equipo de producción de frío del Hospital de León

El sensor virtual propuesto hace uso de variables internas, tales como las variables termodinámicas del gas refrigerante (presión y temperatura) de los diferentes circuitos, así como la potencia eléctrica demandada. Además, el sensor virtual puede utilizar observaciones pasadas con el fin de considerar los patrones temporales que existen

en la demanda. En la siguiente figura se puede observar un esquema de la metodología seguida para desarrollar el sensor virtual.

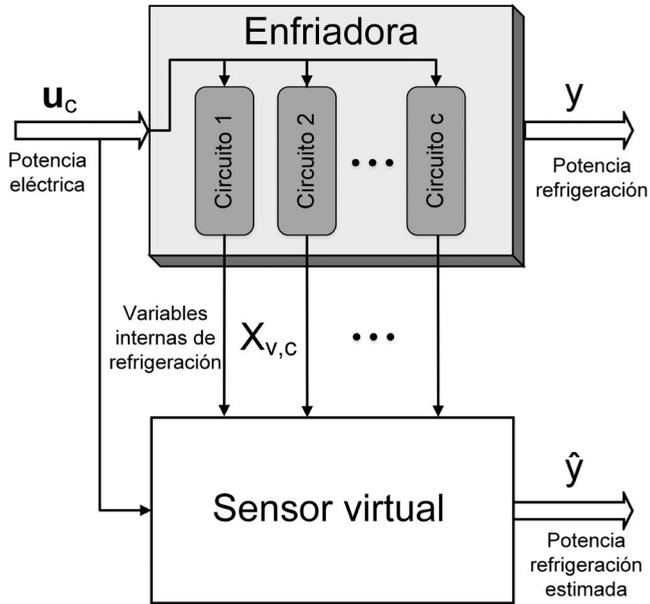


Figura 6.14. Metodología para la construcción del sensor virtual

Para proceder al modelado del sistema y estimar la producción de frío y eficiencia de la enfriadora, se capturan datos de la misma durante un periodo de tiempo. Estos datos son preprocesados antes de entrenar diferentes métodos de aprendizaje automático y profundo. De todos ellos, se selecciona el método más sencillo que proporciona estimaciones con mayor precisión. Las redes convolucionales⁶ y las redes recurrentes destacan por los bajos errores que presentan (inferiores a 3.5%) para todo tipo de enfriadoras (condensadas por aire-agua; uno o más circuitos refrigerantes). En la figura siguiente, se puede observar el resultado proporcionado por el sensor virtual construido con una red profunda convolucional y compararlo con los datos reales obtenidos con un sensor portátil.

⁶ Las redes neuronales convolucionales son aquellas que incluyen la operación convolución en al menos una de sus capas.

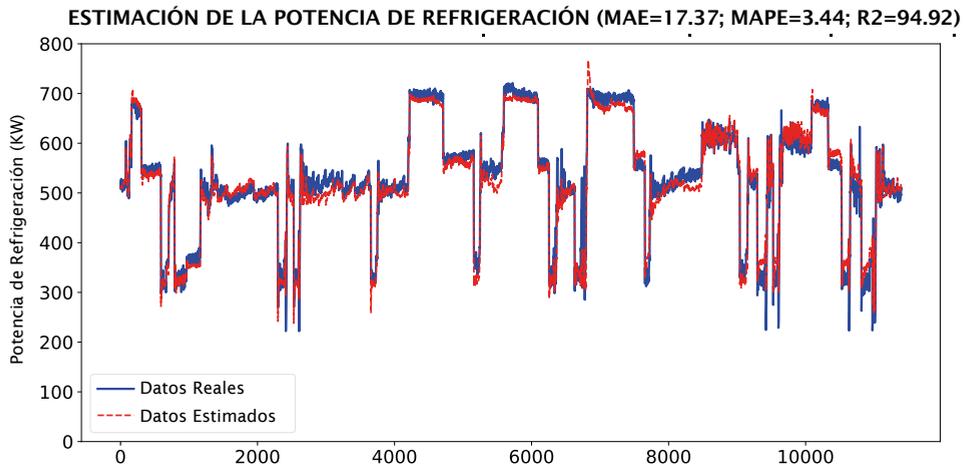


Figura 6.15. Comparación de la potencia de enfriamiento real y estimada

Ejemplo 3: modelado de la evaporación de agua en las torres de refrigeración del hospital de león

En este ejemplo, se puede observar un método de modelado basado en datos, para desarrollar un sensor virtual con técnicas de *deep learning* que estima la evaporación en torres de refrigeración en sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado). Este método se aplicó en el Complejo Asistencial Universitario de León (Hospital de León). La información proporcionada por este sensor permite monitorizar y administrar el consumo de agua en diferentes escenarios y ayudar a planificar estrategias de operación eficientes que reduzcan su consumo. El sensor se basa en una red neuronal generativa adversaria⁷ (GAN), cuyo generador incluye una capa recurrente que modela la información temporal aprendiendo de estados previos y una capa densa

⁷ Las redes neuronales generativas adversarias tienen dos partes. Una de ellas aprende a generar nuevos ejemplos realistas de las entradas y la otra aprende a diferenciar estos ejemplos sintéticos de los datos reales. Mediante este proceso competitivo, permiten modelar de forma efectiva la distribución de los datos.

que modela las fluctuaciones de las condiciones. El método propuesto no solo estima el valor de evaporación, sino que también produce una distribución de probabilidad completa, considerando cualquier escenario operativo, por lo que es posible conocer el intervalo de confianza en el que se encuentra dicha estimación. En la Figura 6.16 se puede ver una imagen de los equipos HVAC del Hospital de León; en la Figura 6.17 se muestra el diseño del sensor virtual elaborado; y en la Figura 6.18 la estimación de la evaporación de agua en el equipo mencionado con dicho sensor virtual.



Figura 6.16. Equipos HVAC del Hospital de León

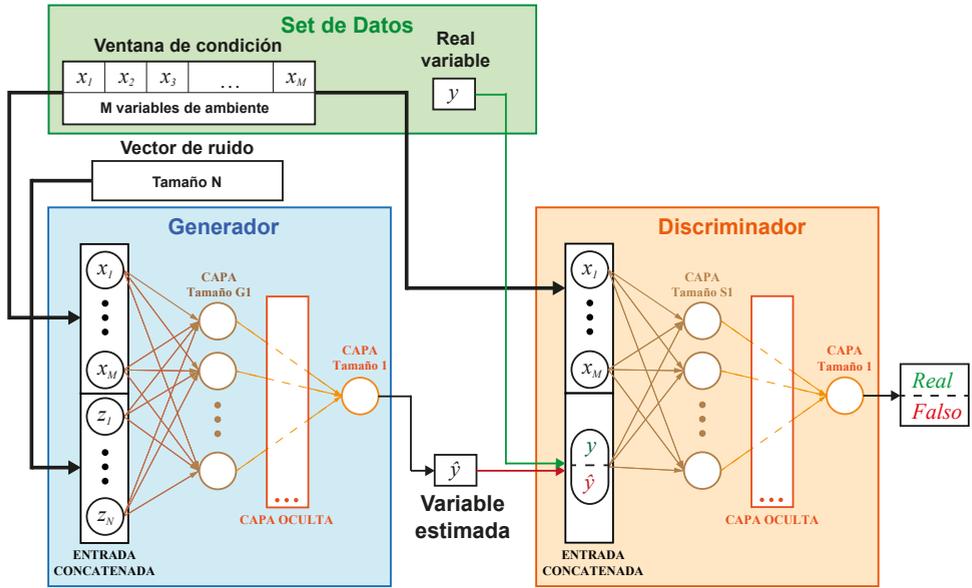


Figura 6.17. Sensor virtual basado en datos para un sistema HVAC del Hospital de León

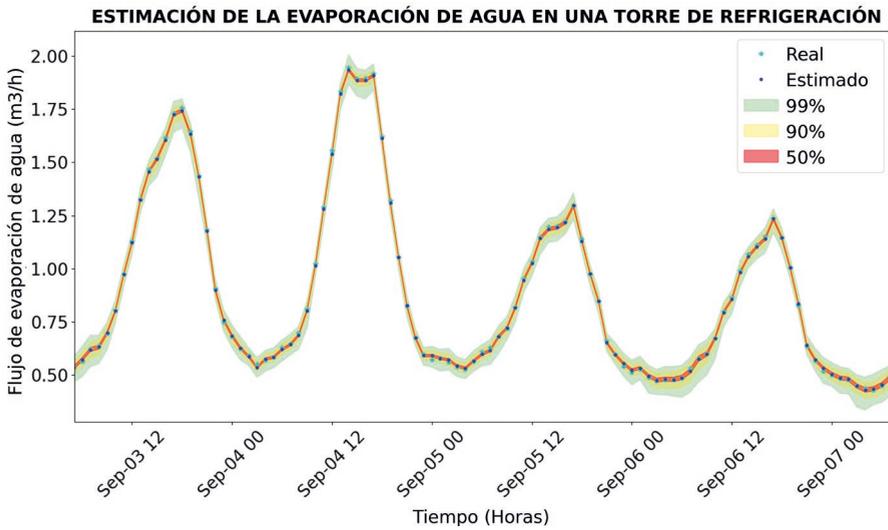


Figura 6.18. Estimación probabilística de la evaporación de agua en una torre de refrigeración del Hospital de León utilizando el sensor virtual

Ejemplo 4: modelado del consumo eléctrico en el sistema de submetering del Hospital de León

También para el Hospital Universitario de León, se desarrolló un método basado en técnicas de *deep learning*, en particular en autoencoders ⁸, para estimar el consumo eléctrico y analizar el comportamiento de las diferentes áreas del edificio, con la finalidad de mejorar su eficiencia energética. La visualización de pesos e información del espacio latente que proporciona el autoencoder nos permite obtener detalles precisos de la influencia de cada zona en el consumo total del edificio y su dependencia de factores ambientales externos, como la temperatura. En la Figura 6.19, se puede ver el propio equipamiento de submetering del Hospital de León; en la Figura 6.20, el esquema unifilar de este equipamiento; y en la Figura 6.21, la arquitectura del autoencoder empleado.



Figura 6.19. Equipamiento submetering del Hospital de León

⁸ Los autoencoders son un tipo de redes neuronales que buscan replicar la entrada en la salida mientras introducen restricciones en su parte central, para así conseguir aprender una representación simplificada de los datos.

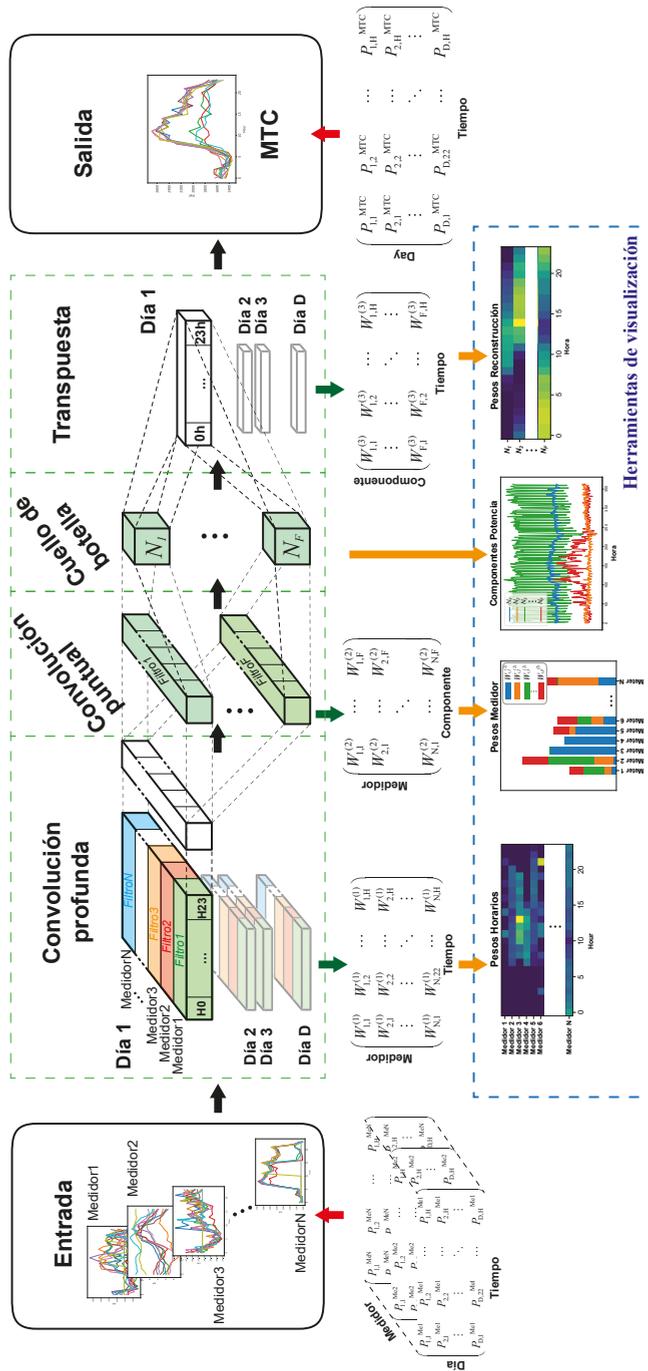


Figura 6.21. Arquitectura del autoencoder convolucional para submetering

7. DIGITALIZACIÓN DE LA INDUSTRIA

En los últimos años, se está produciendo un proceso de digitalización industrial, como consecuencia de la aparición de nuevas tecnologías como la computación en la nube, los sistemas ciberfísicos (CPS), la ciberseguridad, el internet de las cosas (IoT) o los gemelos digitales, el Big Data, etc. (Bigliardi et al., 2020), y su incorporación a los procesos productivos (ver Figura 7.1). La creciente implantación de las tecnologías habilitadoras en la industria conlleva una gran demanda de perfiles laborales altamente especializados (Fareri et al., 2020) que es difícil de satisfacer adecuadamente debido a la profunda brecha existente entre los conocimientos demandados y la oferta de las instituciones educativas (Azmi et al., 2018). Para cerrar esta brecha, la formación tecnológica debe incorporar actividades prácticas en entornos que representen la realidad industrial. Para ello, se han propuesto las *Learning Factories (LF)* (Abele et al., 2015) que son demostradores realistas para la educación, la formación y la investigación, que logran la convergencia entre la industria y el mundo académico.

Hay varios retos de investigación sobre cómo construir LFs en el contexto de la digitalización de la industria. Abarcan desde la aplicación concreta de las tecnologías habilitadoras en los demostradores hasta los métodos educativos asociados. Un entorno educativo sobre Industria 4.0 debe ser fiel a los procesos industriales reales ya que los entornos simplificados suelen ofrecer visiones limitadas en las que los estudiantes solo adquieren un conocimiento parcial de la realidad

industrial. Se debe hacer hincapié en cómo las tecnologías interactúan entre sí para dar una visión real de la realidad industrial. La selección del hardware y software adecuados tampoco es trivial. Aunque existen diferentes soluciones en el mercado, una visión educativa que integre todas ellas es crucial para desarrollar estos demostradores. Así, la clave está en ser capaz de prever las necesidades formativas, junto con la capacidad de dotar a los alumnos de las herramientas necesarias para complementar su formación teórica con el entorno práctico. Estos demostradores deben ofrecer una formación más innovadora e inmersiva, donde estudiantes y profesionales puedan realizar experiencias prácticas y puedan demostrar empíricamente conceptos teóricos en el marco de la Industria 4.0. En este sentido, las LF son diseños interdisciplinarios de ingeniería práctica con fuertes conexiones con la industria y con una parte didáctica que define qué se debe aprender y cómo. Los estudiantes pueden aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en situaciones industriales realistas utilizando estos entornos holísticos (Sallati et al., 2019). El hecho de que las LF proporcionen un entorno de producción orientado a la realidad como entorno de aprendizaje en el que solo se dispone de pequeñas abstracciones, permite devolver la capacidad de investigación académica a la industria, lo que se traduce en un beneficio mutuo para ambas partes (Vijayan et al., 2019).

A continuación, se proporcionan algunas directrices para implementar demostradores en Industria 4.0 que incorporan las tecnologías habilitadoras para desarrollar experiencias prácticas con los alumnos.

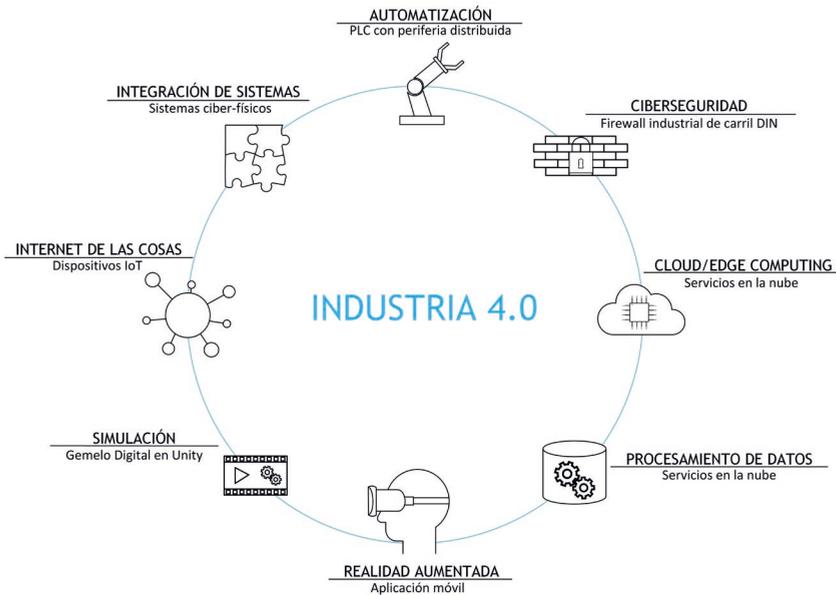


Figura 7.1. Tecnologías habilitadoras

7.1. Demostradores en Industria 4.0

Como se ha expuesto anteriormente, es esencial utilizar réplicas de sistemas industriales reales para formar a estudiantes y profesionales en el modelo de la Industria 4.0 (Baena et al., 2017; Coşkun et al., 2019). Sin embargo, el desarrollo de demostradores para la Industria 4.0 implica una selección e integración no trivial de tecnologías que deben equilibrar realismo, valor educativo, flexibilidad y escalabilidad. Por ello, es conveniente definir directrices para la selección y orientación de las tecnologías habilitadoras (Cañas et al., 2021). Estas tecnologías son (Fuertes et al., 2021): automatización, integración de sistemas, conectividad IoT, almacenamiento y computación en la nube, análisis de datos, simulación y ciberseguridad. Además, estas tecnologías no deben utilizarse de forma independiente, sino que deben establecerse

conexiones entre ellas para que el alumno entienda que el sistema es un todo, no la suma de tecnologías aisladas (Sallati et al., 2019).

Con respecto a la automatización, las arquitecturas de control distribuidas y descentralizadas son las implementaciones adecuadas en la Industria 4.0, con sistemas de control que se comunican a través de buses industriales estándar para aumentar la eficiencia, la velocidad y la repetibilidad (Meissner et al., 2017). Además, los sistemas de protección y seguridad son elementos fundamentales a tener en cuenta en un entorno automatizado.

Las necesidades de integración de sistemas han llevado a un esfuerzo por simplificar el desarrollo de nuevos enfoques de programación, en gran medida visuales. En estos enfoques, la interconexión de los distintos elementos de un sistema se organiza como flujos, compuestos por nodos (módulos con funcionalidades específicas, equivalentes a funciones en lenguajes de programación basados en texto), conectados entre sí mediante un enlace directo. En este sentido, están surgiendo diferentes herramientas de programación con capacidad para interconectar una gran variedad de dispositivos (hardware, APIs y servicios online) (Ray, 2017). Entre ellas, cabe destacar Node-RED, que está siendo impulsada por una amplia comunidad de usuarios que la utilizan como motor de interconexión de sistemas.

El carácter descentralizado de la generación de datos hace necesaria la aparición de nuevos métodos de procesamiento de estos. Por este motivo, uno de los pilares de la Industria 4.0 es el almacenamiento y la computación en la nube. En este sentido, han surgido diferentes alternativas para desarrollar servicios basados en la nube. Entre ellas, se pueden destacar IBM Cloud, Microsoft Azure, Amazon Web Services o Google Cloud (Derhamy et al., 2015). En cuanto a la conectividad necesaria para lograr la comunicación entre los sistemas físicos y las plataformas en la nube, se pueden utilizar protocolos ligeros como *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). MQTT es un protocolo IoT basado en una

filosofía editor/suscriptor, donde un elemento central (conocido como broker) se encarga de redirigir todos los datos generados bajo un tema determinado a los dispositivos suscritos al mismo, de forma que no son necesarias confirmaciones de escucha y se facilita la incorporación de nuevos dispositivos. OPC UA sería otra alternativa interesante, ya que es un estándar de comunicación orientado a la automatización que también incluye mecanismos de seguridad (Profanter et al., 2019).

Las simulaciones deben replicar las características funcionales del sistema. Estos modelos virtuales, conocidos como gemelos digitales, se pueden programar con herramientas específicas proporcionadas para fabricantes de sistemas de automatización (Guerra-Zubiaga et al., 2021), pero estas herramientas suelen ser complejas y caras, por lo que no están orientadas a la formación. Por ello, resulta más interesante utilizar motores gráficos abiertos, como Unity 3D o Unreal Engine, que, aunque generalmente se utilizan para el desarrollo de videojuegos, cada vez más incluyen más frameworks orientados a aplicaciones en ingeniería, marketing o arquitectura (Schluse y Rossmann, 2016). Además, estos motores permiten agilizar la programación de scripts, debido a la gran variedad de código reutilizable disponible.

Por último, la ciberseguridad es extremadamente importante en el contexto de la Industria 4.0. Es necesario utilizar mecanismos para proteger la infraestructura de ataques o accesos no autorizados. Para ello, un demostrador en Industria 4.0 tiene que segmentar la arquitectura de red y utilizar cortafuegos industriales. Un criterio para seleccionar un cortafuegos para la red industrial debe ser que soporte el filtrado a nivel de aplicación de los protocolos específicos utilizados en la red, una característica no demasiado extendida (Francia et al., 2016). Se pueden utilizar tanto soluciones comerciales, como Tofino Xenon o Stormshield SNI40 o soluciones ad-hoc. Otro objetivo importante es mejorar la protección del perímetro de la red. Para ello, conviene usar redes privadas virtuales (VPN) para el acceso externo (Lezzi et al., 2018).

A continuación, se describen los dos demostradores en Industria 4.0 que han sido desarrollados, por el grupo de investigación SUPPRESS de la Universidad de León, siguiendo estas directrices.

7.2. Maqueta de control de procesos de la Universidad de León

El demostrador incorpora las bases tecnológicas características de la Industria 4.0: conectividad con protocolos estándares, almacenamiento y procesamiento de datos en la nube, *machine learning*, gemelo digital (*digital twin*) y ciberseguridad industrial. En el proyecto, se toma como punto de partida una planta piloto industrial del grupo de investigación, que está ubicada en la Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial de la ULE, para transformarla en un sistema ciberfísico de la Industria 4.0. Este sistema incorpora autómatas



Figura 7.2. Maqueta de control de procesos

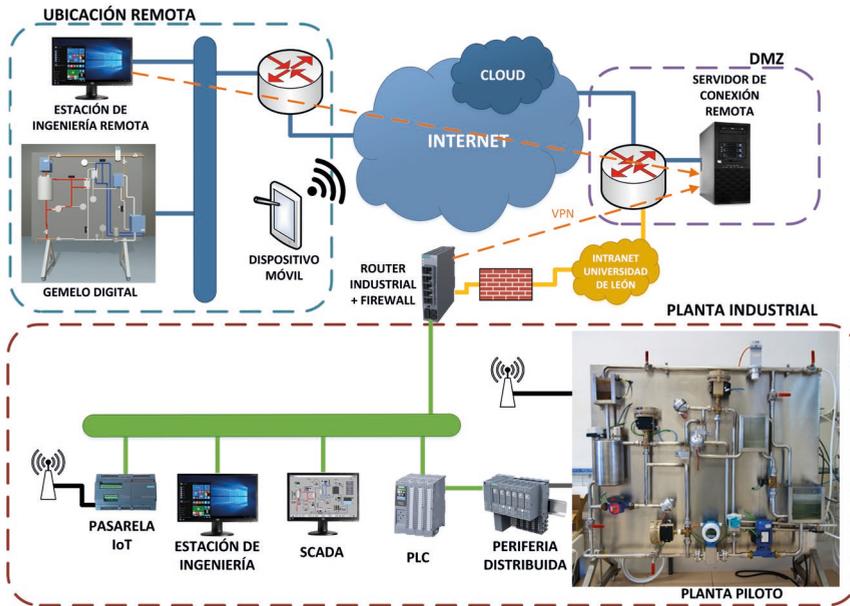


Figura 7.3. Arquitectura del Demostrador

programables de última generación, con comunicación PROFINET. La ciberseguridad industrial está reforzada mediante firewalls industriales. Todos los datos generados por el proceso se transfieren a la nube a través de pasarelas inteligentes IIoT. Además, incorpora la funcionalidad de operación remota, mediante un acceso seguro, así como el análisis inteligente de los datos generados y almacenados en la nube. Asimismo, el proceso industrial se ha reproducido de forma virtual mediante un gemelo digital (Fuertes et al., 2021).

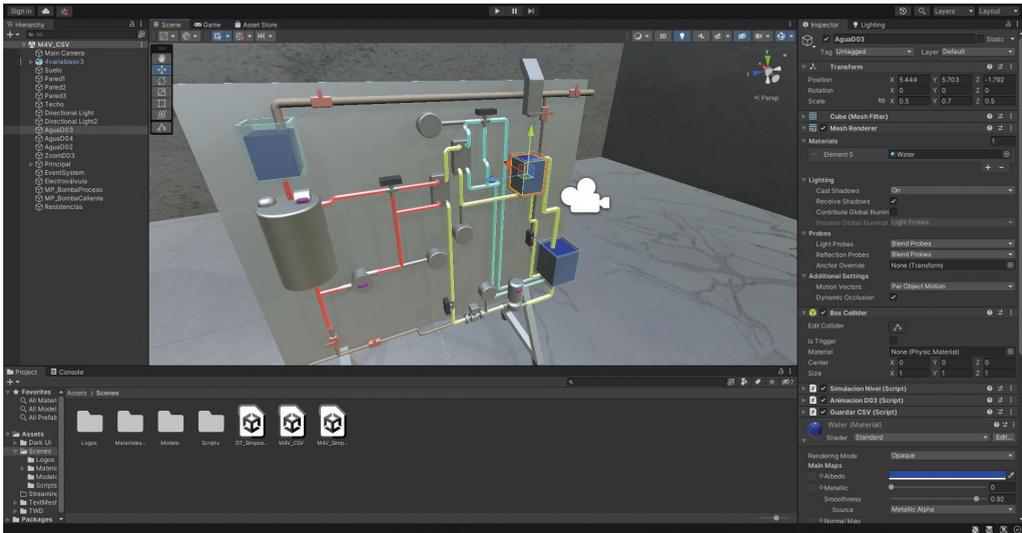


Figura 7.4. Herramienta Unity 3D

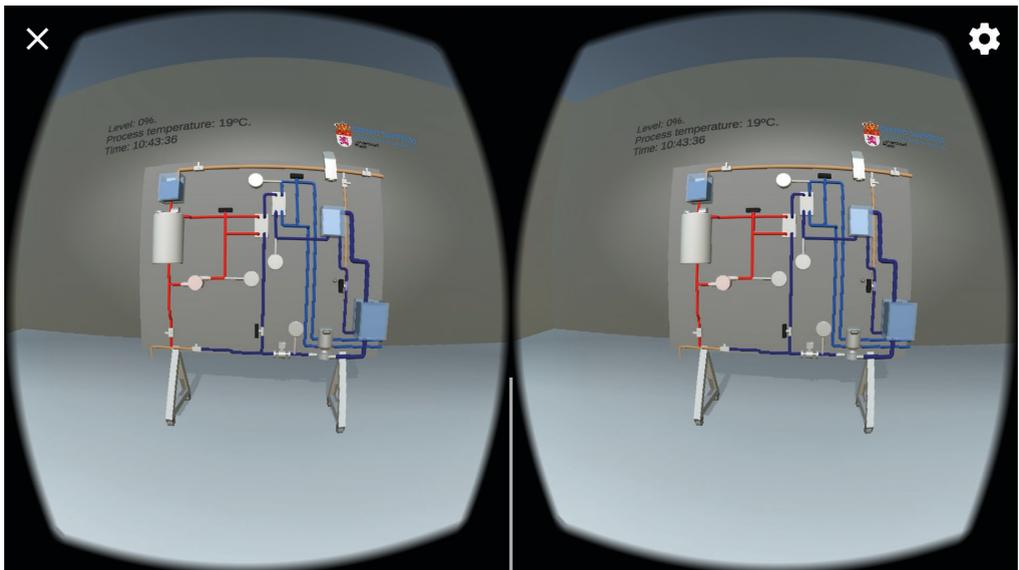


Figura 7.5. Aplicación VR del demostrador

7.3. Célula electroneumática robotizada de la Universidad de León

Este sistema también incorpora las bases tecnológicas características de la Industria 4.0: conectividad con protocolos estándares, almacenamiento y procesamiento de datos en la nube, *machine learning*, gemelo digital (*digital twin*), modelización de elementos robóticos y ciberseguridad industrial. Este proyecto tiene como punto de partida la célula electro-neumática robotizada ubicada en la Universidad de León que se ha transformado en un sistema ciberfísico utilizando diferentes herramientas: *Node-RED*, para la interconexión de sistemas; *IBM Cloud*, el cual proporcionará todos los servicios necesarios para realizar el almacenamiento de datos en la nube y el procesamiento de los mismos (*Big Data* y *Cloud Computing*); *Python*, para implementar funciones de visión artificial. A su vez, se ha desarrollado un gemelo digital que simula la célula, utilizando para ello el motor gráfico *Unity 3D*. En la Figura 7.7 se puede ver un esquema general de la arquitectura que presenta el demostrador (Fuertes et al., 2023).



Figura 7.6. Célula de clasificación robotizada

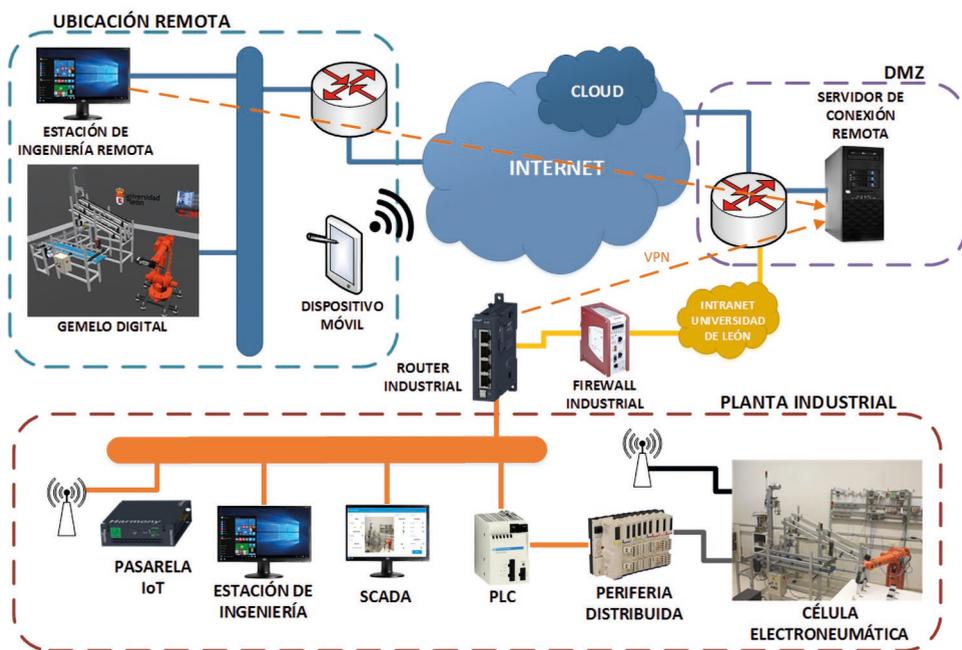


Figura 7.7. Arquitectura del Demostrador

En la zona de planta se localizan el conjunto de dispositivos y equipos que interactúan de forma más directa con el proceso industrial: la periferia descentralizada para adquisición de señales de la célula; el autómata programable, para el control y comunicación de otros dispositivos con el proceso; y, por último, la estación de ingeniería, la cual tiene una funcionalidad doble. Por un lado, dispone de los flujos de Node-RED configurados con el fin de interconectar los diferentes sistemas de la célula, mientras que, por otro lado, se encarga del envío y recibimiento de datos con la nube. El router/firewall Tofino Xenon es el dispositivo que conecta estos equipos y los aísla del resto de la red de la Universidad de León y del exterior, protegiendo el sistema de posibles accesos no autorizados. Todos los equipos mencionados se encuentran en la Escuela de Ingenierías de la Universidad de León. No obstante, la operación del sistema se puede llevar a cabo desde cualquier ubicación remota. IBM Cloud se comunica con la estación

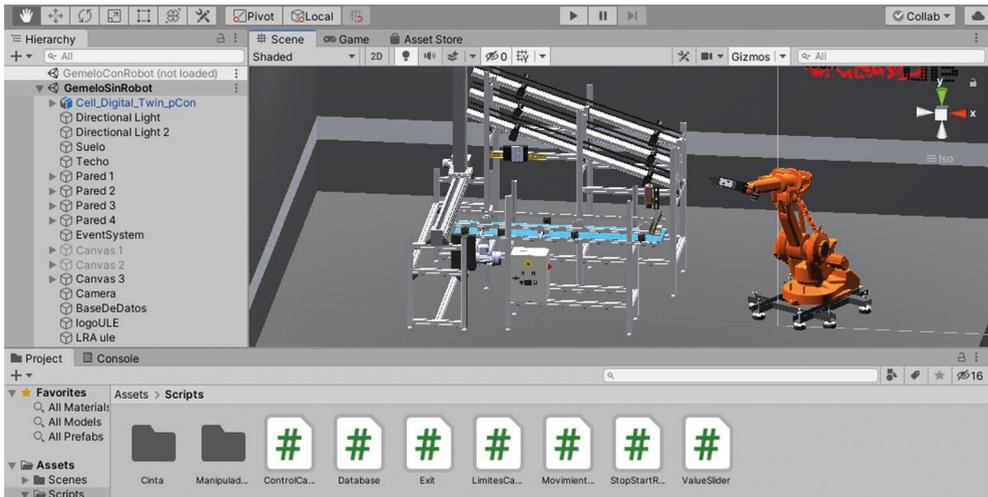


Figura 7.8. Entorno de desarrollo del gemelo digital

de ingeniería vía MQTT. La comunicación con la nube permite implementar funcionalidades de almacenamiento y procesamiento de datos en la nube, así como el acceso a un sistema de supervisión de la célula desde ubicaciones remotas.

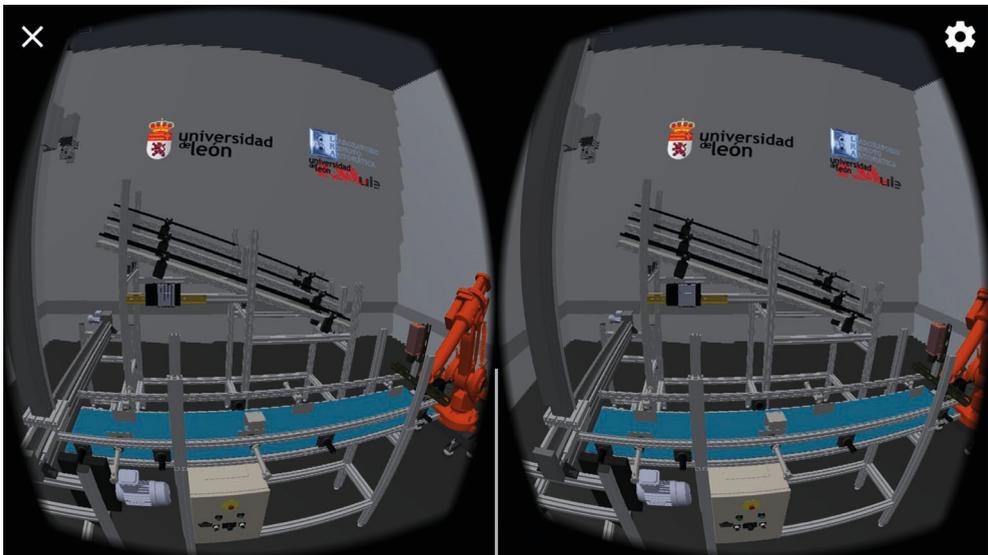


Figura 7.9. Gemelo digital de célula electropneumática robotizada

8. LABORATORIOS REMOTOS

Los laboratorios remotos son valiosas herramientas educativas que permiten a estudiantes y profesores interactuar con equipos reales a través de Internet, como si estuvieran físicamente delante del sistema. Cuando se desarrolla un laboratorio remoto, se encuentran muchas dificultades técnicas, principalmente con respecto a los enlaces entre los diferentes elementos como el sistema físico, la base de datos y los clientes. A continuación, se analizan los retos y enfoques para desarrollar laboratorios remotos que logren flexibilidad, escalabilidad y un elevado valor educativo.

Una experiencia de aprendizaje satisfactoria en la enseñanza de la ingeniería debe incluir la experimentación con sistemas reales para introducir prácticas y competencias profesionales, apoyar conceptos analíticos y aumentar la implicación de los estudiantes (Lindsay y Good, 2005). Los laboratorios remotos han demostrado ser herramientas educativas muy eficaces en ingeniería, con resultados comparables a los de los laboratorios tradicionales *in situ* (Nickerson et al., 2007). De hecho, proporcionan ventajas adicionales, como su flexibilidad, que resulta atractiva para los estudiantes. Los laboratorios remotos también permiten compartir el escaso equipamiento disponible. Se trata de una cuestión relevante, ya que la enseñanza de materias tecnológicas suele requerir el uso de equipos complejos y costosos. Como resultado, el desarrollo de laboratorios remotos en el campo del control automático ha avanzado significativamente en los últimos años (Guzmán et al., 2010; Leva y Donida, 2008; Vargas et al., 2010).

El campo de los laboratorios remotos ha alcanzado un cierto nivel de madurez. Hay dos objetivos principales que debe abordar cualquier

laboratorio remoto eficaz. Uno es la capacidad de conectar fácilmente sistemas físicos heterogéneos. El otro es aliviar la carga de trabajo de los administradores del sitio web, que en ocasiones son profesores y necesitan dedicar su tiempo a desarrollar contenidos educativos en lugar de realizar tareas como la gestión de usuarios, la configuración de nuevos sistemas, etc. Para proporcionar el nivel necesario de manejabilidad, los enfoques utilizan arquitecturas multinivel, centralizan algunos servicios básicos y utilizan interfaces estandarizadas para la comunicación.

Hay tres cuestiones clave que deben abordarse en el diseño de un laboratorio remoto. En primer lugar, es necesario diseñar la interfaz de comunicación con los sistemas de control de los recursos físicos. Esta interfaz debe permitir una fácil configuración de los equipos existentes y nuevos en la plataforma. En segundo lugar, hay que establecer la funcionalidad y estructura del servidor central, a veces también conocido como árbitro o broker. Este servidor, o conjunto de servidores, se encarga de la autenticación, la gestión de usuarios y sesiones, la asignación de recursos, etc. y, por tanto, es crucial en el funcionamiento del laboratorio. En tercer lugar, hay que diseñar una política de comunicación del lado del cliente, ya que esta elección influye en el desarrollo de los clientes.

8.1. Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León

En estos últimos años, se ha venido trabajando en estas tres cuestiones clave a través del desarrollo del Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León (LRA- ULE) (Domínguez et al., 2005). Se trata de un laboratorio orientado a la investigación y la educación con un enfoque en equipos industriales reales. El LRA-ULE permite a los estudiantes de asignaturas de ingeniería relacionadas con los sistemas de control trabajar tanto con simulación como con equipos didácticos o industriales. Además, esta plataforma es flexible y escalable, por lo que es posible añadir fácilmente nuevos sistemas de control de diferentes fabricantes. Se puede acceder al laboratorio a través de <https://lra.unileon.es/>.

LABORATORIO REMOTO DE AUTOMÁTICA **universidad de León**

SISTEMAS FÍSICOS

- MAQUETA 4 TANQUES
- MAQUETA 4 VARIABLES
- PLANTA PILOTO
- AUTÓMATAS PROGRAMABLES
- VARIADORES DE FRECUENCIA
- CÉLULA ELECTRONEUMÁTICA ROBOTIZADA
- PANEL DOMÓTICO
- EQUIPOS FEEDBACK
- GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
- GESTIÓN ENERGÉTICA EN EDIFICIOS
- CIBERSEGURIDAD EN SISTEMAS DE CONTROL INDUSTRIAL

CONTACTO

Escuela de Ingenierías. Campus de Vegazana s/n. 24007. León

+34 987 29 16 94 / 16 98 / 19 23

Ira@unileon.es

universidad de León **Escuela de Ingenierías**
INGENIERÍA INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA

GRUPO SUPPRESS
SUPERVISIÓN, CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

©2023 Grupo de Investigación SUPPRESS Funciona con Kahuna & WordPress.

Figura 8.1. Página web del Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León

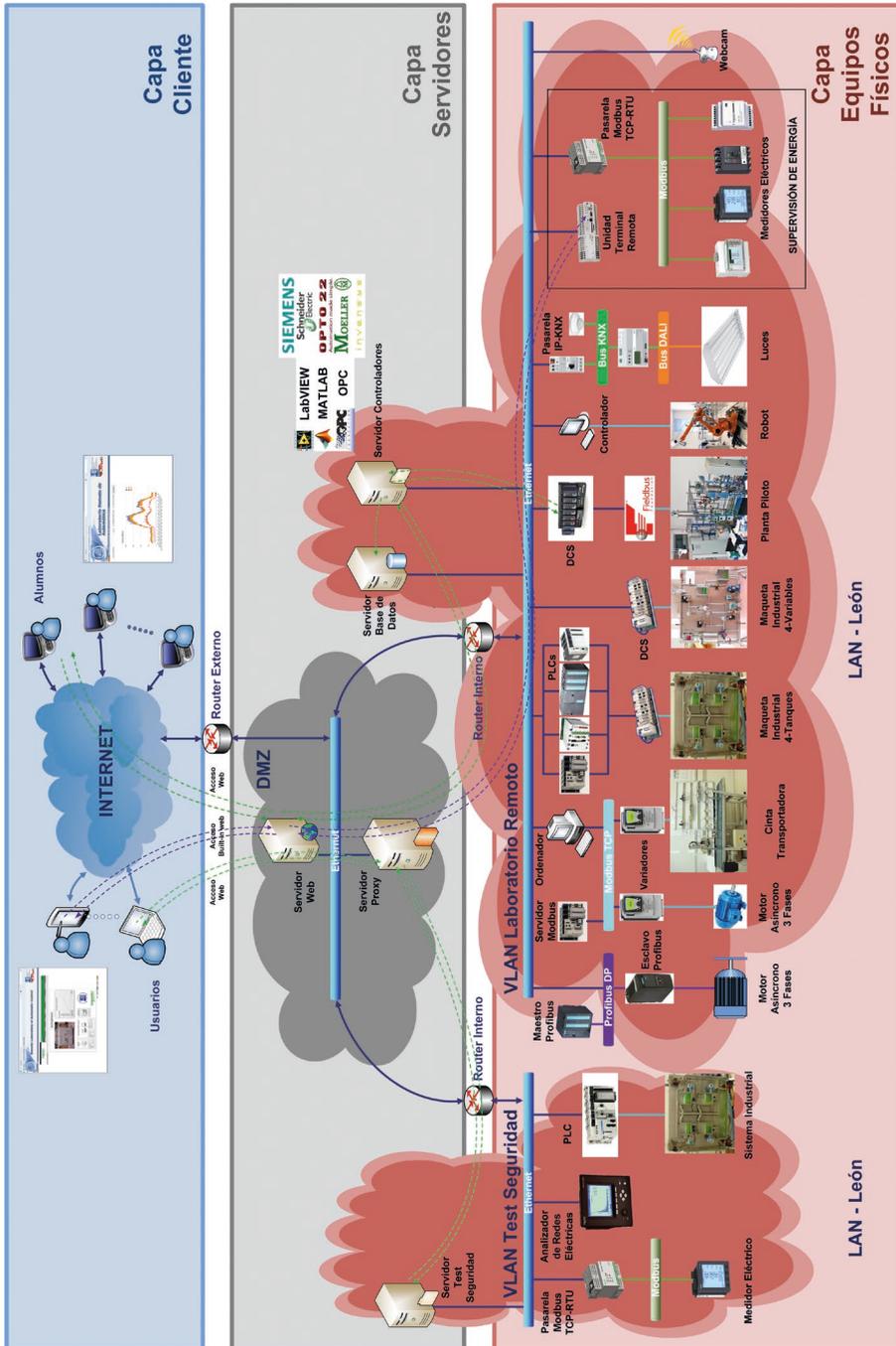


Figura 8.2. Arquitectura del Laboratorio Remoto de Automática de la Universidad de León.

El laboratorio es una plataforma tecnológica que permite el acceso remoto a sistemas físicos: plantas pilotos, maquetas industriales de procesos, robots, paneles domóticos, accionamientos eléctricos y neumáticos, sistemas de supervisión, etc. a través de Internet.

Desde el punto de vista académico, este tipo de sistemas se convierten en una potente herramienta no sólo para la docencia y aprendizaje prácticos, sino también en las exposiciones teóricas. Con una toma de red y un ordenador, estos sistemas permiten su utilización de forma continuada en las exposiciones teóricas, y además facilitan la interacción de los alumnos sobre sistemas reales a la vez que están recibiendo formación teórica. Alumnos, profesores, y usuarios en general pueden interactuar con los sistemas físicos del laboratorio realizando experiencias como, por citar algunos ejemplos, prácticas de control PID sobre plantas piloto con instrumentación industrial real, configuración y programación de autómatas programables, supervisión de procesos etc.

Está diseñado sobre una estructura de triple capa. Dicha estructura confiere al LRA-ULE un carácter abierto, flexible y no propietario, en el que los procesos de desarrollo, explotación, gestión e incorporación de nuevos equipos se realizan con una metodología sistematizada y optimizada. El conjunto de sistemas a los que da acceso el LRA se puede clasificar en 4 grupos:

- Plantas piloto y maquetas en las que se implementan procesos industriales reales.
- Tecnologías para la Automatización, Control y Supervisión.
- Equipos didácticos.
- Instalaciones industriales reales.

Desde el punto de vista del binomio enseñanza-aprendizaje se han definido los siguientes objetivos para el LRA-ULE:

- Ser una herramienta de alto valor añadido para el docente en sus clases teóricas al permitirle ilustrar, con realidades, conceptos del área de Automática.
- Definir claramente los enlaces entre los contenidos teóricos y su implementación tecnológica, estudiándolos mediante el acceso directo a equipos industriales reales.
- Favorecer la utilización compartida de recursos físicos muy costosos y el desarrollo de redes de laboratorios.
- Favorecer el aprendizaje activo y cooperativo de los estudiantes.
- Comparar las características técnicas de diferentes y costosas tecnologías.

Desde el punto de vista de la investigación, la plataforma tecnológica permite trabajar en las siguientes líneas de investigación:

- Supervisión remota de procesos industriales complejos.
- Desarrollo de herramientas avanzadas de supervisión basadas en técnicas de reducción de la dimensionalidad y machine learning.
- Supervisión energética de edificios e instalaciones industriales.
- Análisis inteligente de datos.
- Supervisión y seguridad en infraestructuras críticas.
- Control avanzado.
- Smart grid.

REFERENCIAS

- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihm, W., ElMaraghy, H., Hummel, V., y Ranz, F. (2015). *Learning factories for research, education, and training*. Hochschule Reutlingen.
- Airy, G. B. (1840). On the Regulator of the Clock-work for effecting uniform Movement of Equatoreals. *Memoirs of the Royal Astronomical Society*, 11, 249.
- Andronov, A. A. (1978). J. A. Vyshnegradskii and his role in the creation of automatic control. *Automation & Remote Control*.
- Aracil, J. (2009). Memorias de la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 4(1), 117-119.
- Aström, K. J., y Kumar, P. R. (2014). Control: A perspective. *Automatica*, 50(1), 3-43. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.10.012>
- Azmi, A. N., Kamin, Y., Noordin, M. K., y Nasir, A. N. M. (2018). Towards industrial revolution 4.0: Employers' expectations on fresh engineering graduates. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 267-272. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.28.22593>
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., y Retat, S. (2017). Learning factory: The path to industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73-80.
- Bennett, S. (1979). *A History of Control Engineering, 1800-1930*. IET.
- Bennett, S. (1994). Norbert Wiener and Control of Anti-Aircraft Guns. *IEEE Control Systems*, 14(6), 58-62.
- Bennett, S. (1996). A brief history of automatic control. *IEEE Control Systems Magazine*, 16(3), 17-25. <https://doi.org/10.1109/37.506394>
- Bigliardi, B., Bottani, E., y Casella, G. (2020). Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: A bibliographic analysis. *Procedia Manufacturing*, 42, 322-326. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.086>

- Bissell, C. C. (1989). Stodola, Hurwitz and the genesis of the stability criterion. *International Journal of Control*, 50(6), 2313-2332. <https://doi.org/10.1080/00207178908953500>
- Black, H. S. (1934). Stabilized Feedback Amplifiers. *Bell System Technical Journal*, 13(1), 1-18. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1934.tb00652.x>
- Bode, H. W. (1940). Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design. *The Bell System Technical Journal*, 19(3), 421-454. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1940.tb00839.x>
- Bode, H. W. (1945). *Network analysis and feedback amplifier design*. D. Van Nostrand Company.
- Burne, E. L., Russell, J., y Wailes, R. (1943). Windmill Sails. *Transactions of the Newcomen Society*, 24(1), 147-161. <https://doi.org/10.1179/tns.1943.017>
- Cañas, H., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., y Campuzano-Bolarín, F. (2021). Implementing Industry 4.0 principles. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107379. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107379>
- Clark, H. O. (1930). Notes on French Windmills. *Transactions of the New-comen Society* 9 (1928-29).
- Colino López, A. (1950). *Teoría de los servomecanismos*. 40-69. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5415447>
- Coşkun, S., Kayıkcı, Y., y Gençay, E. (2019). Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision. *Technologies*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/technologies7010010>
- Derhamy, H., Eliasson, J., Delsing, J., y Priller, P. (2015). A survey of commercial frameworks for the internet of things. *20th IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 1-8.
- Domínguez, M., Reguera, P., y Fuertes, J. J. (2005). Laboratorio Remoto para la Enseñanza de la Automática en la Universidad de León (España). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2), 36-45.
- Dormido, S. (2007). Memorias de la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 4(2), Article 2.
- Fareri, S., Fantoni, G., Chiarello, F., Coli, E., y Binda, A. (2020). Estimating Industry 4.0 impact on job profiles and skills using text mining. *Computers in Industry*, 118, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103222>

- Francia, G. A. I., Francia, X. P., y Pruitt, A. M. (2016). Towards an In-depth Understanding of Deep Packet Inspection Using a Suite of Industrial Control Systems Protocol Packets. *Journal of Cybersecurity Education, Research and Practice*, 2016(2).
- Fuertes, J. J., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J. R., González-Mateos, G., Alonso, S., y Morán, A. (2023). Guidelines to develop demonstration models on industry 4.0 for engineering training. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 0(0), 1-17. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2189308>
- Fuertes, J. J., Prada, M. A., Rodriguez-Ossorio, J. R., Gonzalez-Herbon, R., Perez, D., y Dominguez, M. (2021). Environment for Education on Industry 4.0. *IEEE Access*, 9, 144395-14440. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120517>
- Gertler, J. (2006). *Historic Control Textbooks* (1.ª ed.). Elsevier. <https://shop.elsevier.com/books/historic-control-textbooks/gertler/978-0-08-045346-0>
- Graham, D., y Lathrop, R. C. (1953). The synthesis of «optimum» transient response: Criteria and standard forms. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 72(5), 273-288. <https://doi.org/10.1109/TAI.1953.6371346>
- Greenwood, J. G., y Woodcroft, B. (1851). *The Pneumatics of Hero of Alexandria: From the Original Greek*. Taylor, Walton and Maberly.
- Guerra-Zubiaga, D., Kuts, V., Mahmood, K., Bondar, A., Nasajpour-Esfahani, N., y Otto, T. (2021). An approach to develop a digital twin for industry 4.0 systems: Manufacturing automation case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(9), 933-949. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1946857>
- Guzmán, J. L., Domínguez, M., Manuel Berenguel, J. J. F., Rodríguez, F., y Reguera, P. (2010). Entornos de experimentación para la enseñanza de conceptos básicos de modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1), 10-22. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2010.01.01>
- Habib, M. K., Ayankoso, S. A., y Nagata, F. (2021). Data-Driven Modeling: Concept, Techniques, Challenges and a Case Study. *2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1000-1007. <https://doi.org/10.1109/ICMA52036.2021.9512658>

- Hazen, H. L. (1934a). Design and test of a high performance servo-mechanism. *Journal of the Franklin Institute*, 218, 543-580.
- Hazen, H. L. (1934b). Theory of servo-mechanisms. *Journal of the Franklin Institute*, 218(3), 279-331. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(34\)90254-4](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(34)90254-4)
- Hermite, C. (1856). *Extrait d'une lettre de Mr. Ch. Hermite de Paris à Mr. Borchardt de Berlin sur le nombre des racines d'une équation algébrique comprises entre des limites données*. 1856(52), 39-51.
- Hoagland, M. B., y Dodson, B. (1995). *The Way Life Works*. Times Books.
- Johansson, K. H. (2000). The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 8(3), 456-465.
- Kalman, R. E. (1958). Design of a self-optimizing control system. *Transactions on the ASME*, 80, 468-478.
- Kang, C.-G. (2016). Origin of Stability Analysis: «On Governors» by J.C. Maxwell [Historical Perspectives]. *IEEE Control Systems Magazine*, 36(5), 77-88. <https://doi.org/10.1109/MCS.2016.2584358>
- Kolmogorov, A. N. (1941). Interpolation and extrapolation of stationary random sequences. *Moscow: Math*, 5.
- Lee, Y. W., y Wiener, N. (1932). Fundamental Theory of Servomechanisms. *Journal of Mathematics and Physics*, 11, 83-113.
- Leva, A., y Donida, F. (2008). Multifunctional Remote Laboratory for Education in Automatic Control: The CrAutoLab Experience. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(6), 2376-2385. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922590>
- Lezzi, M., Lazoi, M., y Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. *Computers in Industry*, 103, 97-110.
- Lindsay, E. D., y Good, M. C. (2005). Effects of laboratory access modes upon learning outcomes. *Education, IEEE Transactions on*, 48(4), 619-631. <https://doi.org/10.1109/TE.2005.852591>
- Ljung, L., Chen, T., y Mu, B. (2020). A shift in paradigm for system identification. *International Journal of Control*, 93(2), 173-180. <https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1578407>

- Mayr, O. (1970). The Origins of Feedback Control. *Scientific American*, 223(4), 110-119.
- Mayr, O. (1971). Maxwell and the Origins of Cybernetics. *Isis*, 62(4), 425-444. <https://doi.org/10.1086/350788>
- Mayr, O. (1986). *Autoridad, libertad y maquinaria automática en la primera modernidad europea*. Acantilado Barcelona.
- Meissner, H., Ilsen, R., y Aurich, J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165-169. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.113>
- Miller, D. P. (2019). *The Life and Legend of James Watt: Collaboration, Natural Philosophy, and the Improvement of the Steam Engine*. University of Pittsburgh Press.
- Mindell, D. A. (1995). Automation's Finest Hour: Bell Labs and Automatic Control in World War II. *IEEE Control Systems Magazine*, 15(6), 72-. <https://doi.org/10.1109/MCS.1995.476388>
- Mindell, D. A. (2002). *Between Human and Machine*. Johns Hopkins University Press. <https://doi.org/10.56021/9780801868955>
- Minorsky, N. (1922). Directional Stability of Automatically Steered Bodies. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 34(2), 280-309. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1922.tb04958.x>
- Muirhead, J. P. (1854). *The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt: Illustrated by His Correspondence and the Specifications of His Patents. Extracts from correspondence*. Murray.
- Mulero Martínez, J. I. (2012). Nyquist y la realimentación. *Universidad Politécnica de Cartagena*. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/2393>
- Newton, G. C., Gould, L. A., y Kaiser, J. F. (1957). *Analytical Design of Linear Feedback Controls*. Wiley.
- Nickerson, J. V., Corter, J. E., Esche, S. K., y Chassapis, C. (2007). A model for evaluating the effectiveness of remote engineering laboratories and simulations in education. *Computers and Education*, 49(3), 708-725. <https://doi.org/doi:10.1016/j.compedu.2005.11.019>
- Nyquist, H. (1932). Regeneration Theory. *Bell System Technical Journal*, 11(1), 126-147. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x>

- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.ª ed.). Pearson Educación.
- Pillonetto, G., Dinuzzo, F., Chen, T., De Nicolao, G., y Ljung, L. (2014). Kernel methods in system identification, machine learning and function estimation: A survey. *Automatica*, 50(3), 657-682. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.01.001>
- Profanter, S., Tekat, A., Dorofeev, K., Rickert, M., y Knoll, A. (2019). OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols. *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 955-962. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8755050>
- Ray, P. P. (2017). A Survey on Visual Programming Languages in Internet of Things. *Scientific Programming*, 2017, 1231430. <https://doi.org/10.1155/2017/1231430>
- Routledge, R. (1900). *Discoveries and Inventions of the Nineteenth Century*. G. Routledge and Sons.
- Sallati, C., Bertazzi, J. de A., y Schützer, K. (2019). Professional skills in the Product Development Process: The contribution of learning environments to professional skills in the Industry 4.0 scenario. *Procedia CIRP*, 84, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.214>
- Schluse, M., y Rossmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/syseng.2016.7753162>
- Schultz, W. C., y Rideout, V. C. (1961). Control system performance measures: Past, present, and future. *IRE Transactions on Automatic Control*, AC-6(1), 22-35. <https://doi.org/10.1109/TAC.1961.6429306>
- Smith, E. S. (1944). *Automatic Control Engineering* (1.ª ed.). McGraw-Hill Book Company, Inc. , New York and London. <https://www.abebooks.com/first-edition/Automatic-Control-Engineering-SINCLAIR-SMITH-New/167071774/bd>
- Strandh, S. (1989). *The History of the Machine*. Bracken Books.
- Torres Quevedo, L. (1914). Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, XII, 341-419.

- Vargas, H., Sánchez, J., Jara, C. A., Candelas, F., Reinoso, O., y Díez, J. L. (2010). Docencia en Automática: Aplicación de las TIC a la realización de actividades prácticas a través de Internet. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(1), 35-45. [http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70006-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70006-6)
- Vijayan, K. K., Mork, O. J., y Giske, L. A. L. (2019). Integration of a Case Study into Learning Factory for Future Research. *Procedia Manufacturing*, 31, 258-263. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.041>
- Wiener, N. (1942). *The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series, with Engineering Applications* (N.º 370). OSRD Office of Scientific Research and Development.
- Ziegler, J. G., y Nichols, N. B. (1993). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115(2B), 220-222. <https://doi.org/10.1115/1.2899060>

**Lección Inaugural del Curso Académico
2023-2024
Campus de León**



SERVICIO
DE PUBLICACIONES
UNIVERSIDAD DE LEÓN

ISBN: 978-84-19682-16-1



9 788419 682161