

## *Análisis sobre la Historia de las Innovaciones en los Sistemas de Control Realimentado*

Darío Weitz

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario - Cátedra de Teoría de Control  
Departamento Ingeniería en Sistemas de Información  
Zeballos 1341, (2000) Rosario – Argentina - (+54) - (341) - 4480102 / 4480158 / 4482404 - darweitz@yahoo.com.ar

**Resumen** - Una encuesta realizada por la revista *In Tech* sitúa a J. Watt, J. Ziegler y N. Nichols entre los 50 individuos más influyentes en la evolución del control automático. En esa lista no se incluye a H. Black, H. Nyquist y H. Bode. En este trabajo se analizan las contribuciones realizadas por Watt –incorporación de un regulador centrífugo a la máquina de vapor–, Ziegler y Nichols –reglas para la sintonización de controladores PID– y Black, Nyquist y Bode –amplificador de realimentación negativa y criterios de estabilidad absoluta–. Se concluye que los aportes de los tres últimos fueron trascendentes porque permitieron el diseño de sistemas que extendieron la utilización de sistemas de control automático y sentaron las bases para la formalización definitiva de la teoría de control clásica.

**Palabras clave:** control automático, sistemas realimentados, historia de la tecnología

### *Analysis of the history of innovations in feedback control systems*

**Abstract** - A survey conducted by *In Tech Magazine* includes J. Watt, J. Ziegler y N. Nichols among the 50 most influential individuals in the development of automatic control. H. Black, H. Nyquist y H. Bode are not included in such list. This paper discusses the contributions made by Watt –attaching a centrifugal governor to the steam machine–, Ziegler and Nichols –rules for PID tuning–, and Black, Nyquist and Bode –negative feedback amplifier and absolute stability criteria–. We conclude that the contributions of the three latter were more important because they enabled the design of systems that spread the use of automatic control systems and laid the groundwork for the ultimate formalization of classical control theory.

**Keywords:** automatic control, feedback systems, history of technology

## INTRODUCCIÓN

La revista *In Tech*, publicación periódica de la International Society of Automation (ISA), publicó una nota titulada “From the plant to academia, *In Tech*’s 50 most influential innovators” (Strothman, 2003). Los contenidos de la nota se originaron en una encuesta organizada por los editores de la revista quienes consultaron a más de 80 expertos en diversas disciplinas relacionadas con instrumentación y

control para que los mismos opinen respecto a quiénes consideraban las personas que más habían influido en la evolución del proceso de automatización, en las tecnologías de control y en instrumentación.

Con los resultados de las encuestas individuales los editores de la revista conformaron una lista de los “50 individuos más influyentes” y los agruparon en cinco categorías: Tecnólogos; Tecnólogos y algo más (Technologists and more); Emprendedores; Tecnólogos y Academia; Académicos.

La categoría de tecnólogos está liderada por James Watt y le siguen John Ziegler y Nathaniel Nichols. También integran esa lista Grace Hopper, inventora del primer compilador, Orville y Wilbur Wright, constructores del primer avión que se pudo controlar en el aire, Charles Stark Draper, el fundador de la navegación inercial, Werhner Von Braun, desarrollador del cohete V2 y estratega del proyecto espacial norteamericano. En la lista están incluidos Richard Morley, considerado el “padre” del controlador programable, y Lofty Zadeh, creador del control mediante lógica difusa.

La categoría Tecnólogos y algo más está integrada principalmente por directores ejecutivos de ISA. Más interesante es la lista de los emprendedores: los hermanos William y Werner Siemens, Edward Brown, George Taylor y Mark Honeywell, fundadores de Siemens AG, Brown Instrument Co, Taylor Instrument Co. y Honeywell Heating Specialty Co. respectivamente.

Las dos categorías que incluyen académicos están enfocadas en quienes contribuyeron de manera significativa a la difusión del conocimiento a través de la publicación de artículos y libros referidos a teoría de control, sistemas automáticos e instrumentación de procesos. Francis Shinskey, Béla Lipták, Karl Aström, Cecil Smith y Paul Murril contribuyeron al avance del control en columnas de destilación, implementación de controladores PID, selección apropiada del modo de control y modelado matemático de sistemas físicos.

Listas como las publicadas por la revista In Tech son obviamente controvertidas; además los editores no explicitan cuáles fueron los criterios utilizados para conformar la lista definitiva. Para quienes desde hace varios años enseñamos contenidos relacionados con Teoría de Control en carreras de grado universitarias llama la atención la ausencia de algunos personajes cuyas contribuciones produjeron un aceleramiento notable en los desarrollos tecnológicos del sector. En particular nos referimos a Harold Black, Harry Nyquist y Hendrik Bode.

El objetivo del presente trabajo es detallar las contribuciones realizadas en el campo del control automático por Watt, Ziegler y Nichols, Black, Nyquist y Bode y analizar el grado de influencia de las mismas en la historia de las tecnologías de control realimentado.

## JAMES WATTY EL REGULADOR CENTRÍFUGO

James Watt, quien encabeza la lista de tecnólogos innovadores, nació en 1736 en Greenock, Escocia, y falleció en Birmingham, Inglaterra, en 1819. Se le acredita erróneamente haber inventado la máquina de vapor, y como resultado de la misma colocar a Inglaterra a la cabeza de la Revolución Industrial. Los datos biográficos indican que debido a su delicado estado de salud no tuvo una educación inicial formal, lo cual potenció su espíritu autodidacta y su primer trabajo fue como fabricante y vendedor de instrumentos matemáticos (reglas, escuadras, compases).

La máquina de vapor había sido inventada en 1698 y se la utilizaba principalmente para el drenaje de las minas de carbón y estaño. Watt recibió en 1764 una máquina de vapor Newcomen para reparar. Durante la reparación observó que ese tipo de máquinas desaprovechaban una importante cantidad de calor latente que podía ser transformado en trabajo mecánico. Desarrolló una cámara de condensación separada del cilindro, lo que se tradujo en un aumento significativo en la eficiencia de la máquina. Watt patentó su invención y se asoció en 1775 a Mathew Boulton, propietario de un taller metalúrgico en Birmingham, para fabricar equipos de vapor con el nuevo diseño. Desarrollaron una fructífera sociedad durante la cual Watt introdujo mejoras adicionales tales como el movimiento rotativo y la máquina de doble acción.

Hobsbawm (1971) indica como causas de la Revolución Industrial a la combinación en cantidades importantes de un conjunto de elementos indispensables para tal proceso: crecimiento de la población, expansión del comercio (interior y exterior), acumulación de capital, clima político y social adecuado y disponibilidad de materias primas. Weitz (2013) muestra que a mediados del siglo XVIII Inglaterra disponía de tales elementos y justifica el por qué se adelantó a sus rivales europeos en la consolidación de la Revolución Industrial. Boulton y Watt se vieron favorecidos por el clima intelectual imperante en Inglaterra, el cual estimulaba la libre expresión de nuevas ideas y el intercambio de ideas científicas y tecnológicas. Paradójicamente las patentes relacionadas con las mejoras introducidas por

Watt demoraron el desarrollo de máquinas de vapor más eficientes, tal como la inventada por Jonathan Hornblower.

La contribución de Watt al campo del control automático fue la incorporación de un regulador centrífugo a su máquina de vapor. El diseño de Watt (Fig. 1) incluía un péndulo con dos esferas metálicas suspendidas por dos brazos articulados acoplado sobre la válvula de admisión del vapor de forma tal que un aumento en la velocidad de la máquina producía un incremento de la velocidad centrífuga, el alejamiento de las esferas del eje de rotación y el correspondiente cierre de la válvula de admisión. El objetivo del regulador centrífugo era mantener una velocidad constante de la máquina de vapor, independiente de las condiciones de carga.

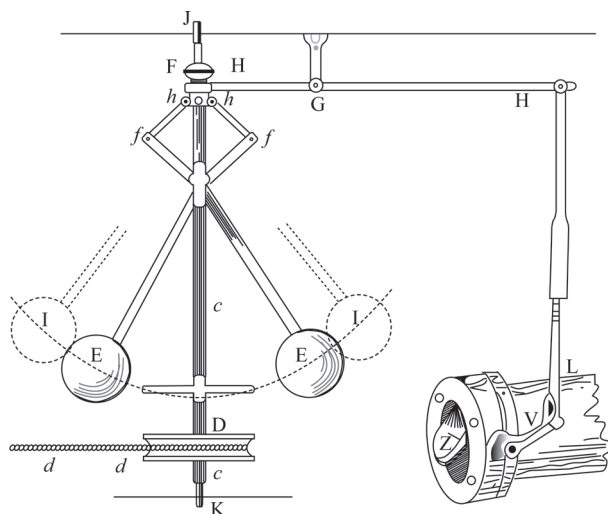


Fig. 1 - Regulador centrífugo de Watt

<http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/Xitami/webpages/reguwatt.html>

Boulton, durante uno de sus viajes a Londres, observó en un molino de viento un regulador centrífugo inventado por Thomas Mead en 1787. Mead había diseñado un regulador de velocidad en base a un péndulo centrífugo que permitía sentir la velocidad del viento para ejercer una fuerza correctiva que intentaba mantener las muelas del molino con una separación constante y así conseguir una presión constante sobre el grano a moler. Boulton y Watt adaptaron la idea a la máquina de vapor en 1788 y no intentaron patentarlo para evitar un conflicto

con Mead. Infructuosamente trataron de mantener el diseño en secreto, pero fue copiado por primera vez en 1793 y se dispersó por toda Inglaterra en los siguientes diez años (Bissell, 2009).

## JOHN ZIEGLER, NATHANIEL NICHOLS Y LA SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

Ziegler y Nichols (Z-N) publicaron en 1942 un paper titulado "Optimum settings for automatic controllers" en el cual propusieron reglas sencillas para establecer en forma directa valores para los parámetros de un controlador PID que brindaran márgenes de ganancia y de fase satisfactorios. Este proceso de selección de valores para los parámetros de los diferentes tipos de control se denomina sintonización del controlador.

Ziegler y Nichols propusieron un método de sintonización de lazo abierto que fue denominado método de la curva de reacción del proceso, y un segundo método basado en una prueba de lazo cerrado denominado método de la ganancia última.

El primer método se aplica a plantas que no poseen integradores ni polos complejos conjugados dominantes y cuya respuesta a un escalón unitario se asemeja a una curva sigmoidea sin overshoot. Durante el ensayo de sintonización se abre el lazo de control entre el controlador y el actuador, se asume que no ingresan perturbaciones al sistema y se manipula el actuador para obtener una entrada escalón. La curva con forma de S se denomina curva de reacción (Fig. 2) y se caracteriza por dos parámetros: el atraso  $L$  y la constante de tiempo  $T$ , los cuales se calculan tras dibujar una recta tangente al punto de inflexión de la curva y determinar los valores de intersección de la tangente con la abscisa tiempo y con el valor de la respuesta en estado estacionario.

El método de la curva de reacción esencialmente asume que el modelo de la planta tiene una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto. El criterio de desempeño postulado por Z-N para la obtención de los mejores valores de los parámetros de un controlador PID se basa en aquella respuesta que muestra una razón de asentamiento (decay ratio) de un cuarto y mínima área bajo la curva de respuesta. La Tabla 1 muestra los valores sugeridos por Z-N para sintonizar controladores  $P$ ,  $PI$  y  $PID$  según el método de la curva de reacción.

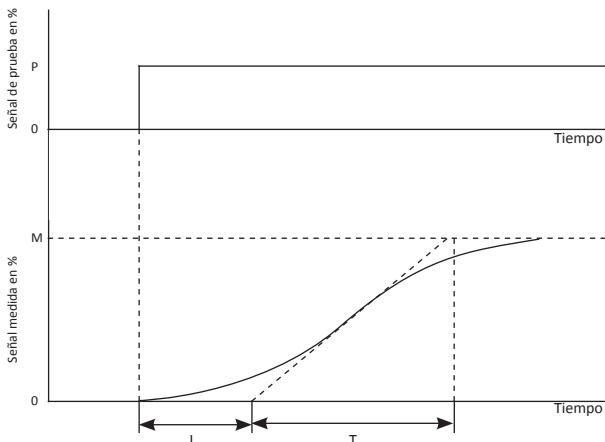


Fig. 2 - Curva de reacción del proceso

Tipo de Control	Kc	Ti	Td
Proporcional	P/RL		
Proporcional – Integral (PI)	0,9 P/RL	3,33 L	
Prop. – Integ. – Derivativo (PID)	1,2 P/RL	2 L	0,5 L

Tabla 1 - Valores de Z-N para el método de la curva de reacción ( $R = M/T$ )

El método de sintonización basado en una prueba de lazo cerrado consiste en anular las acciones integral y derivativa manteniendo activa únicamente la acción proporcional. Se ajusta la ganancia proporcional a un valor bajo y se le da al sistema un cambio escalón en el set point y se permite el ingreso de pequeñas perturbaciones. Se registra la respuesta del sistema y se va aumentando paulatinamente la ganancia proporcional hasta que el sistema exhibe una oscilación sostenida que no crece ni decrece con el transcurso del tiempo. En ese momento se registra la ganancia última  $K_{cu}$  y el correspondiente período de oscilación  $P_u$ . La Tabla 2 muestra los valores sugeridos por Z-N para sintonizar controladores P, PI y PID según el método de la ganancia última utilizando también como medida de desempeño una razón de asentamiento de un cuarto.

El valor de  $0.5 K_{cu}$  para el ajuste de un controlador con sólo acción proporcional implica establecer

un margen de ganancia de 2; el agregado de acción integral incorpora un mayor retardo de fase en todas las frecuencias, motivo por el cual se requiere un menor valor de  $K_{cu}$  para mantener aproximadamente el mismo margen de ganancia; el agregado de la acción derivativa incorpora adelanto de fase, motivo por el cual se puede utilizar un mayor valor de  $K_{cu}$ .

Tipo de Control	Kc	Ti	Td
Proporcional	$0,5 K_{cu}$		
Proporcional – Integral (PI)	$0,45 K_{cu}$	$P_u/1.2$	
Prop. – Integ. – Derivativo (PID)	$0,6 K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$

Tabla 2 - Valores de Z-N para el método de la ganancia última

La simplicidad de las reglas de sintonización de Z-N transformaron al algoritmo PID en la estrategia de control realimentado más utilizada en aplicaciones industriales. Una encuesta realizada en industrias de refinación, químicas y petroquímicas, y en papel y pulpa mostró que el 97% de más de 11.000 controladores utilizaban la estructura PID en tareas de regulación de procesos (Aström y Hägglund, 2001). Durante muchos años la sintonización se realizó en forma manual y se requerían varios ensayos iterativos hasta obtener un rendimiento aceptable en lazo cerrado. Con la incorporación del microprocesador al lazo de control las técnicas de sintonización se programaron para ser ejecutadas de manera automática. Todos los controladores que en la actualidad salen al mercado incorporan funciones de autosintonización, de modo tal que un operador de planta puede ejecutar las tareas de sintonización sin necesidad de conocer los fundamentos teóricos de los métodos o los parámetros de las ecuaciones empíricas.

Las reglas de sintonización de Z-N tienen varias limitaciones: utilizan información insuficiente del proceso; los criterios de diseño resultan en sistemas de lazo cerrado de baja robustez; están diseñadas esencialmente para lazos de control que funcionan como regulador; los ensayos en lazo cerrado se de-

ben realizar con sumo cuidado para evitar que el sistema entre en condición de inestabilidad. Se han propuesto una innumerable cantidad de alternativas, variaciones y mejoras, entre las cuales sobresalen el método de Cohen y Coon (1953) con su índice de autoregulación (para sintonización en lazo abierto), el método de Shinskey (1996) para sintonizar minimizando el criterio IAE, y la propuesta de sintonización de Aström y Hägglund (2004) para maximizar la ganancia integral sujeto a restricciones de robustez en sistemas que presentan una respuesta esencialmente monótona a una entrada escalón.

Han transcurrido más de 70 años desde la publicación del trabajo original de Ziegler y Nichols, y pese a que la mayoría de los fabricantes de controladores no explicitan las reglas de sintonía que incluyen en sus dispositivos, es indudable que los resultados originales de Z-N están de algún modo presentes en el dispositivo de control más utilizado en la industria de procesos.

### BLACK, NYQUIST, BODE Y LA ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

El 2 de agosto de 1927 un joven ingeniero de Bell Labs (unidad de AT&T dedicada a investigación y desarrollo en telefonía) llamado Harold Black tuvo lo que se dio en llamar una “chispa de inspiración” durante el viaje que realizaba habitualmente para llegar a su trabajo en el Lackawanna Ferry sobre el río Hudson. La compañía telefónica más importante del mundo tenía serios inconvenientes con la distorsión y la inestabilidad de los amplificadores de tubos al vacío cuando los mismos se conectaban en tándem para proveer un servicio de telefonía de larga distancia. AT&T necesitaba resolver el problema para poder expandir el número de líneas telefónicas intercontinentales que prometían ser muy redituables. Black utilizó realimentación negativa para reducir la amplificación de un dispositivo de alta ganancia (Fig. 3). Encontró que un esquema de realimentación negativa correctamente diseñado podía reducir la distorsión y el ruido, mientras se garantizaba la estabilidad haciendo la ganancia dependiente de una red de realimentación negativa en vez hacerla depender de elementos activos problemáticos, tal como eran los tubos de vacío (Black, 1934). Escribió la fundamentación matemática del

procedimiento en una hoja en blanco que traía ese día el ejemplar del New York Times que habitualmente leía en el ferry mientras se dirigía a su trabajo. Con la sensación de urgencia que da el temor a perder la inspiración, Black detalló en la hoja del diario los principios de funcionamiento del primer amplificador de realimentación negativa estable. Ya en su oficina junto a sus colaboradores comenzó una compleja y extensa tarea para formalizar el invento, incluyendo una aplicación para una patente aceptada por la oficina de patentes de los Estados Unidos en diciembre de 1937 (Kline, 1993).

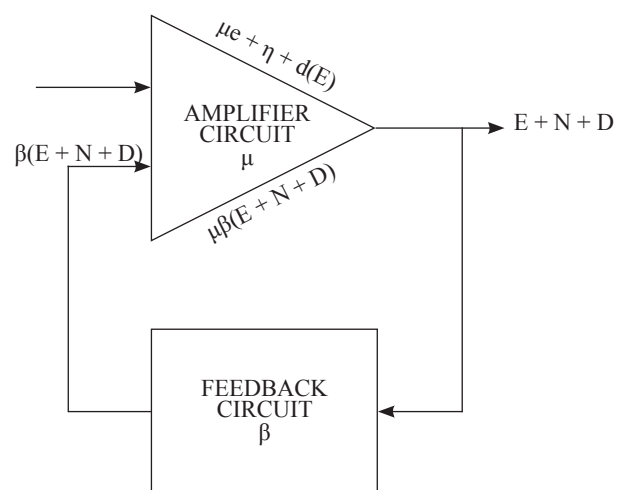


Fig. 3 - Sistema amplificador con realimentación (Black, *Stabilized feedback amplifiers*, Bell Syst. Tech. J. 13, 1-18, 1934)

Harry Nyquist nació en Suecia en 1889 y emigró a los Estados Unidos en 1907. Trabajó intensamente para poder costearse los estudios de grado y posgrado hasta obtener un doctorado en física en la Universidad de Yale en 1917. Comenzó a trabajar para AT&T, también en el departamento de investigación y desarrollo. En mayo de 1928 Nyquist y varios ingenieros de comunicaciones se reunieron con Black para discutir la utilización del amplificador de realimentación negativa en un nuevo sistema de telefonía de larga distancia por cable. Nyquist no quedó conforme con el procedimiento de diseño desarrollado por Black y comenzó a estudiar el tema utilizando herramientas matemáticas de la teoría de variables complejas (incluyendo el

principio del argumento de Cauchy). El resultado final fue el criterio del encierro en el dominio de la frecuencia que permitía determinar bajo qué condiciones un amplificador con realimentación negativa era estable. Nyquist publicó sus resultados en 1932 (Nyquist, 1932), una contribución extremadamente valiosa porque si bien el amplificador de realimentación negativa prometía revolucionar el campo de las comunicaciones, los cálculos para mejorar su rendimiento garantizando la estabilidad del sistema eran muy arduos para las herramientas de cálculo de la época, mientras que la propuesta de Nyquist establecía reglas de diseño accesibles para el cálculo de un sistema con cientos de amplificadores en tándem.

La tarea fue continuada por Hendrik Bode, matemático de la Ohio State University (1926) y doctor en física por la Universidad de Columbia (1935). Bode lideró un grupo de matemáticos de Bell Labs, y su tarea resultó en la publicación en 1940 del paper "Relations Between Attenuation and Phase in Feedback Amplifier Design" y de su libro de 1945 "Network Analysis and Feedback Amplifier Design" donde se muestran por primera vez a las actualmente populares Trazas de Bode y se introducen los conceptos de márgenes de ganancia y de fase. A partir de los aportes de Bode la tarea de diseñar sistemas de control realimentados con ganancia y respuesta en frecuencia deseados y estabilidad garantizada extendió la utilización de sistemas de control automático en campos no previstos por los inventores originales. Así Bode comenzó en 1935 a trabajar en Fire Control Systems donde sus trazas permitieron perfeccionar el armamento antiaéreo con que los norteamericanos combatieron durante la Segunda Guerra Mundial.

## CONCLUSIONES

El regulador centrífugo de Watt potenció el desarrollo de las máquinas de vapor y se dispersó por toda Europa al comienzo del siglo XIX. Con su popularización aparecieron los problemas del offset, de la sobrecorrección ante perturbaciones intensas y de la inestabilidad. Fue el momento de numerosos emprendedores quienes diseñaron ingeniosas soluciones técnicas para imitar a la acción integral y para evitar las fluctuaciones excesivas de las varia-

bles controladas. Como resultado de las mismas se verificaron importantes desarrollos tecnológicos en aplicaciones de sistemas realimentados en la industria naval, industria eléctrica, industria de procesos, en aplicaciones militares y en estabilizadores y giróscopos al comienzo del siglo XX.

El espíritu de la época fomentaba la práctica ingenieril por sobre el análisis teórico de los sistemas de control realimentados. Las contribuciones más importantes en el siglo XIX para el análisis de estabilidad fueron las de Edward Routh en 1875, ampliada en 1895 por Adolf Hurwitz en la versión final del criterio de estabilidad de Routh – Hurwitz. La Teoría de Control no acompañó los avances tecnológicos hasta que la industria del telégrafo y de la telefonía se encontró con limitaciones severas para su expansión comercial. Fue el momento de Black, Nyquist y Bode quienes, basados en rigurosas teorías matemáticas, inventaron métodos relativamente sencillos para determinar la estabilidad de sistemas realimentados a partir de datos experimentales y obtener conclusiones relativas a la respuesta transitoria (estabilidad relativa) a partir de los márgenes de ganancia y fase. Los aportes de los tres científicos del Bell Labs establecieron las bases de la Teoría de Control clásica. Las reglas de sintonización de Ziegler y Nichols, en particular el método de lazo cerrado con la determinación de la ganancia última y el período último, están implícitamente fundamentadas en los conceptos de respuesta en frecuencia establecidos por Bode y Nyquist.

Las tareas de ingeniería suelen implicar una combinación de ciencia y arte. La expansión del conocimiento científico se traduce en el paulatino desplazamiento del arte por la ciencia. Desde esta óptica consideramos que Harold Black, Harry Nyquist y Hendrik Bode no deberían estar ausentes en cualquier lista relacionada con los personajes más influyentes en el campo del control automático.

## REFERENCIAS

*Strothman, "From the plant to academia, In Tech's 50 most influential innovators", In Tech Magazine, 8, 2003.*

*Hobsbawm, "En torno a los orígenes de la revolución industrial". Siglo XXI Editores, Madrid, 1971.*

*Weitz, "Interacciones en el desarrollo histórico de los sistemas de control". Enviado para su publicación a la*

Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería, 2013.  
<http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/Xitami/webpages/reguwatt.html>

Ziegler and Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers". *Trans. A.S.M.E.* 64:759 – 768, 1942.

Bisell, "A History of Automatic Control", en "Springer Handbook of Automation", Chapter 4, S.F. Noy (ed.), 2009.

Aström and Hägglund, "The future of PID control". *Control Engineering Practice*, 9, 1163-1175, 2001.

Cohen and Coon, "Theoretical consideration of retarded control". *Trans. A.S.M.E.* 75:827-834, 1953.

Shinskey, "Process Control Systems. Application, Design and Tuning". 4° ed. McGraw-Hill, New York, 1996.

Aström and Hägglund, "Revisiting the Ziegler-Nichols step response for PID control". *Journal of Process Control*, 14, 635-650, 2004.

Black, "Stabilized feedback amplifiers". *Bell Syst. Tech. J.* 13, 1-18, 1934.

Kline, "Harold Black and the negative feedback amplifier". *IEEE Control Systems*, 82-85, 1993.

Nyquist, "Regeneration theory". *Bell Syst. Tech. J.* 11:126-147, 1932.

<http://www.springer.com/engineering/robotics/book/978-3-540-78830-0>

<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20DeltaV%20Documents/Articles/InTech/Leaders-of-the-Pack.pdf>