

CONTROL DE LA VELOCIDAD DE MOTORES Y MAQUINAS

Marco Antonio Pérez Cisneros^{*}, Mark Readman⁺ y Peter Wellstead⁺

^{*}División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

⁺Control Systems Principles

RESUMEN: Este artículo pertenece a la serie de notas de aplicación en modelado y control de sistemas que han sido creadas por “Control Systems Principles” para ilustrar los principios básicos de la teoría de control. Dichos fundamentos incluyen algunos sistemas genéricos y métodos que son comunes en muchas áreas del desarrollo tecnológico y la industria. Estas notas de aplicación buscan explicar dichos sistemas y sus principios de una manera clara y fácil de entender. Por tanto las notas describen primero las características mas importantes de un sistema, como funciona y finalmente como puede ser controlado. Diferentes sistemas en tiempo real, diseñados por algunos colegas de ‘Control Systems Principles’, son utilizados para demostrar la viabilidad de los algoritmos de control. Dichos sistemas son actualmente manufacturados por “TQ Education & Training Ltd” bajo la línea CE. En particular esta nota describe uno de los problemas mas importantes en la historia de la teoría de control: regulación de la velocidad en maquinas y motores.

1. ¿Por qué el control de la velocidad de un motor o una maquina es tan importante?

1.1. Algo de historia

El control de velocidad de motores se asocia a los orígenes de la teoría de control. Hay muchos ejemplos en los tiempos antiguos [1] de dispositivos que incorporan la regulación por retroalimentación. La mayoría de libros de texto sobre teoría de control [ver 2] tienen alguna discusión sobre los orígenes de los mecanismos con retroalimentación. Sin embargo, para analizar los principios verdaderos del análisis modernos de los sistemas de control retroalimentado, tenemos que mirar al problema practico de regular la velocidad de una maquina mediante el gobernador centrífugo que se muestra en la figura 1.



Figura 1. El gobernador centrífugo de velocidad simple.

Al principio de la era de mecanización, la energía de las maquinas era provista por ruedas de agua y molinos de viento, pero el cambio realmente importante ocurrió cuando llegó el motor de vapor en la primera parte del siglo XVIII. El desarrollo del motor de vapor fue crucial para el éxito de la revolución industrial. Igualmente importante fue el desarrollo del regulador de pelota flotante (“fly-ball”) para gobernar la velocidad centrifuga en el ultimo tercio del siglo XVIII. Normalmente esta invención se acredita a James Watts, pero como sucede muy a menudo, dicha innovación fue construida sobre el trabajo de muchos ingenieros e inventores [3]. De hecho, había muchas formas de gobernar la velocidad antes del sistema de pelota flotante de Watt, pero la simplicidad y la eficacia de su diseño, combinadas con nuevos progresos en el motor de vapor, resultaron en un dispositivo centrifugo que podía regular la velocidad confiablemente. La operación se basa en una válvula de vapor conectada con un par de pesos que rotan. Cuando la velocidad del motor aumenta, la fuerza centrifuga en las pelotas aumenta, lo que levanta un collar en el eje del regulador. Dicho collar se conecta con una válvula de forma que el flujo de vapor se reduce en los cilindros del motor a medida que la velocidad aumenta. Dicho flujo también se disminuye a medida que la velocidad de la maquina se reduce. En la figura 1 se muestra una fotografía de un gobernador centrifugo muy simple que se ha instalado en nuestro taller de desarrollo. El gobernador centrifugo y el acoplamiento a la válvula de vapor resultan en un lazo negativo de control retroalimentado con el cual puede controlarse la velocidad del motor.

El gobernador centrifugo de la velocidad de Watt ofreció una solución confiable y practica a los dueños de fabricas y molinos para regular la velocidad de todas las maquinas rotatorias, extendiéndose desde ruedas de agua hasta los nuevos motores de vapor y otras maquinas industriales que requieren condiciones de velocidad constante. El desarrollo de dicho gobernador fue una excelente contribución de la revolución industrial. Sin embargo, su invención seguida por su análisis matemático representa el corazón de la teoría y práctica actual de la ingeniería de control. El control como campo de estudio nace precisamente de la revolución industrial, cuando un grupo de hombres inteligentes y su curiosidad científica mezclada con la energía comercial originaron un conducto entre los nuevos problemas prácticos de la ingeniería y las herramientas matemáticas de análisis [4]. Durante el siglo XVIII muchos científicos e ingenieros contribuyeron al mejoramiento del gobernador centrifugo con resultados excelentes y un análisis asombroso. No obstante, esta gente estaba fuera de los establecimientos educativos británicos, representados en esos tiempos por Oxford, Cambridge y Londres, por lo que hasta que el gobernador fue llevado a Cambridge hacia el fin del siglo XIX, su análisis dinámico ganó respeto científico y logro una publicidad en Gran Bretaña gracias a un artículo de Maxwell sobre gobernadores escrito para la sociedad real de Londres (‘On Governors’).

En el siglo XVIII, el desarrollo industrial en la región central de Inglaterra atrajo la atención de otros países. Visitantes de la Europa continental incluyendo muchos científicos importantes de Francia y Alemania, evitaron el atrasado sureste de Inglaterra y viajaron directamente a los centros industriales tales como Birmingham y Manchester, donde fueron bienvenidos por los científicos e ingenieros disidentes. A través de esta ruta se extendió el conocimiento del gobernador centrifugo y su desarrollo practico. Su análisis fue extensamente estudiado, siendo el trabajo más conocido el del ruso Wischnegradski, aunque otros progresos técnicos importantes tuvieron lugar también en Alemania y Francia. Sin embargo, si ponemos de lado las cuestiones de que, donde y cuando, el hecho importante es que el gobernador de velocidad centrifugo para controlar la velocidad condujo a un paso teórico importante, demostrando que el comportamiento dinámico de un sistema esta asociado con las raíces de una ecuación polinomial que ahora denominamos como la ecuación característica del sistema. Las raíces de dicha ecuación se conocen como los polos de la función de transferencia del sistema, también como valores propios o valores Eigen. Estos conceptos residen en el corazón del análisis y diseño de sistemas de control lineales.

1.2. La importancia del control de la velocidad actualmente.

Para entender por que el control de la velocidad sigue siendo importante aun en nuestros días tenemos que brincar de la regulación de la velocidad de la maquina de vapor hasta el control en maquinas automotrices. El motor de gasolina y diesel para carros y grandes camiones de transporte de materiales son de las maquinas mas importantes de nuestra era. Para el ingeniero de control representan un sistema

muy interesante y un desafío a la teoría de control. En adición a la velocidad, el motor de gasolina tiene otros problemas de control como por ejemplo el control de tiempo para el encendido, el regulador de la mezcla aire-combustible y el numero creciente de reguladores para el control de emisiones y la eficiencia del motor que requieren estrategias de control mas complejas cada día. Los carros modernos son de hecho controlados por unidades de control electrónico (ECU, por sus siglas en ingles). Una de ellas se muestra en la figura 2. Por cierto que dicho modelo contiene mucho mas poder de computo que el que fue necesario para llevar al hombre a la luna en la década de los 60's.



Figura 2. Una unidad de control electrónico (ECU) – con permiso de ‘Lucas Industries’.

El control de maquinas diesel ha seguido una tendencia similar, con la conexión histórica de que hasta hace muy poco tiempo un gobernador centrifugo era todavía usado para limitar el máximo y controlar la mínima velocidad del motor diesel. La maquina moderna diesel tiene un ECU de complejidad similar al de la maquina de gasolina. Y toda esta complejidad para controlar maquinas. Esto explica por que el control de velocidad de motores es muy relevante hoy en día. Es precisamente este cúmulo de aplicaciones lo que resulto en el análisis teórico y diseño de sistemas de control. Más aun, el control de la velocidad de motores aun permanece en el corazón de muchos de los más sofisticados sistemas de control en el mundo, como vemos a continuación.

2. Un sistema estándar de control de velocidad para un motor.

Los elementos básicos del sistema de control de velocidad para un motor que son de la clase que resulta en el desarrollo de reguladores son:

- Una válvula con cual cambiar la cantidad de combustible alimentada al motor.
- Una maquina reciproca.
- Un eje de salida con un volante y carga para la maquina.

En un sistema estándar, especialmente uno que los estudiantes pudieran usar, una fuente segura de combustible es aire comprimido. Esto dará resultados similares a la maquina de vapor pero sin los extremos de la temperatura y el control de la energía calorífica. Un sistema de control de velocidad estándar que usa aire comprimido se muestra en la figura 3.

La válvula de entrada es una parte muy importante de este sistema. Recuerda que una válvula es un elemento no lineal con una zona muerta en su modelo matemático de entrada. Esto es importante por que la zona muerta de la válvula de entrada, normalmente ocasionada por la fricción estática, es una

característica muy importante para el diseño de gobernadores de velocidad centrífugos. Dicha zona muerta es siempre un problema de diseño por lo que para enfatizar nuestro diseño, una amplia zona muerta se incluye en el sistema estándar. La válvula de entrada de dicho sistema esta motorizada de manera que una entrada constante de control en la válvula causa un rango constante de cambio en la posición de la válvula. La función característica que relaciona el flujo del aire contra la posición de la válvula es también no lineal de tal forma que controlar la entrada de aire al sistema es un problema de control por si mismo.

El diseño de la maquina se basa en una maquina de vapor de cuatro cilindros con una carga inercial en la forma de un volante y una carga variable en la forma de un generador eléctrico. Para variar la carga eléctrica se emplea un regulador de voltaje. El apéndice muestra un esquemático mas detallado del sistema estándar de control de velocidad para el motor.

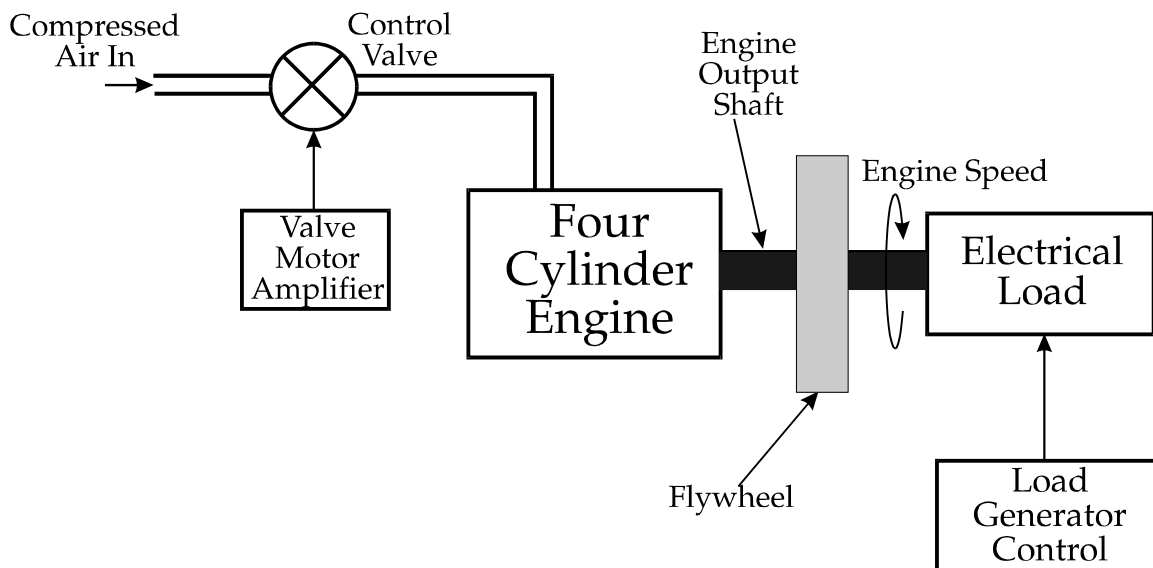


Figura 3. Sistema estándar de control de velocidad para el motor

3. Modelado.

Los componentes del sistema estándar de control de velocidad para el motor son la válvula de control del aire, la maquina y la carga. La válvula de control de aire tiene dos partes, el motor de control y la válvula. El motor controla la cantidad de cambio en la posición de la válvula $\dot{y}(t)$ que es proporcional a la señal de entrada al motor $u(t)$, de tal forma que puede modelarse como un integrador con ganancia g_m . La presión de salida de la válvula $P(t)$ es proporcional a la posición de la válvula $y(t)$, por lo que puede ser modelado como una ganancia g_v .

$$\frac{dy(t)}{dt} = g_m u(t), \quad P(t) = g_v y(t) \quad (1)$$

El torque del motor $\tau_e(t)$ es proporcional a la presión del aire

$$\tau_e(t) = g_e P(t) \quad (2)$$

El torque del motor se usa para afrontar la carga de la maquina, las perdidas por fricción y para acelerar la inercia I del volante. Si la velocidad de la maquina es ω entonces podemos escribir lo siguiente:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Rate of change of} \\ \text{Flywheel Momentum} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Engine} \\ \text{Torque} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Frictional} \\ \text{Torque} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Load} \\ \text{Torque} \end{array} \right)$$

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} = \tau_e - \tau_f - \tau_l \quad (3)$$

El torque requerido para vencer la fricción es $\tau_f = b\omega(t)$, donde b es el coeficiente de fricción. El torque ocasionado por la carga τ_l es proporcional a la demanda de voltaje de la carga $d_l(t)$ de forma que $\tau_l = g_l d_l(t)$. Combinando esas ecuaciones podemos concluir

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} + b\omega(t) = g_e g_v y(t) - g_l d_l(t) \quad (4)$$

Las ecuaciones (1) y (4) son las ecuaciones diferenciales del modelo de un sistema estándar de control de velocidad de motor. En forma de función de transferencia podemos expresar esta relación como:

$$y(s) = \frac{g_m u(s)}{s} \quad (5)$$

$$\omega(s) = \frac{g_e g_v y(s)}{b + Is} - \frac{g_l d(s)}{b + Is}$$

Ya que la válvula de entrada tiene una zona muerta, la ganancia g_m es no lineal con una grafica característica que se muestra en la figura 4. La ganancia del flujo de aire g_v es también no lineal pero con una ecuación característica suave, usualmente utilizando potencias. En la operación normal, la característica de la válvula es localmente lineal alrededor de la velocidad de operación normal de la maquina, y la zona muerta se compensa como se describe abajo en la sección 4.1.

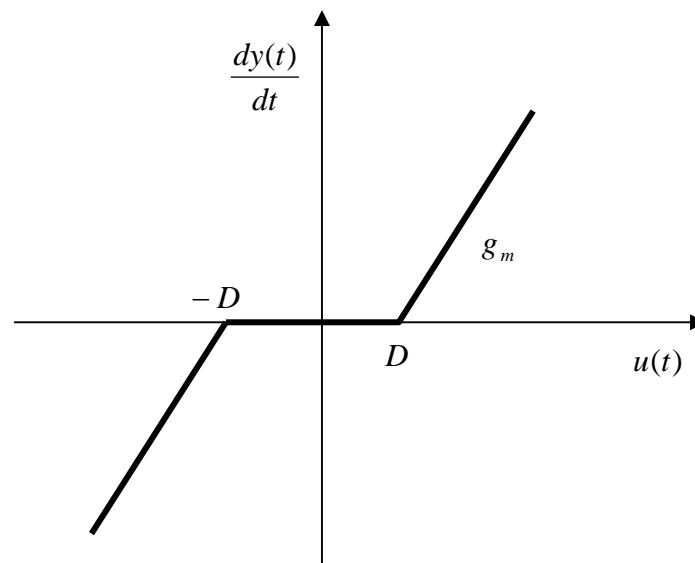


Figura 4. Grafica característica de la zona muerta.

4. Problemas de control de un sistema estándar de control de velocidad de motor.

El problema estándar del control de motor como se muestra en la figura 3 tiene dos componentes principales que pueden también encontrarse en muchas situaciones de control, por ejemplo:

La necesidad de controlar un actuador de entrada no lineal (como la válvula de control de flujo de aire).

- El requerimiento para regular la velocidad de la maquina cuando la carga en el eje de salida cambia.

La solución a estos problemas de control requiere algunas técnicas estándar de control, como son:

- Compensación de la zona muerta en el actuador. Se utiliza un lazo local de retroalimentación junto con algún otro mecanismo de compensación para reducir la zona muerta y dar paso al control directo de la posición de las válvulas.
- EL uso de control en cascada. Un lazo interno de retroalimentación ofrece control sobre la posición de la válvula de flujo de aire y un lazo externo de retroalimentación ejerce la regulación de velocidad.
- El uso de predicción de la demanda local. Cuando se tiene una señal proporcional a la carga entonces dicha señal (la demanda de voltaje de carga en este caso) puede ser alimentada al sistema de control para anticipar cambios en la carga.

4.1. Compensación de la zona muerta

La típica representación de la zona muerta del actuador se muestra en la figura 4. Para señales de entrada mas pequeñas que el ancho de la zona muerta, D , la salida del actuador es cero y no existe ninguna señal enviada al sistema. Esto puede ser compensado en muchas formas. Si se registra la posición del actuador (como en el sistema estándar de control de la velocidad) una ganancia alta de retroalimentación en el actuador puede reducir la zona muerta efectiva por un factor igual a dicha ganancia de retroalimentación. Un procedimiento muy común es usar una técnica conocida como ‘dither’ en la cual una señal periódica se agrega a la señal de entrada del actuador. La frecuencia de dicha señal debe ser mayor que el ancho de banda de la dinámica del sistema y su amplitud deberá ser aproximadamente D . El resultado es una ganancia característica efectiva como se muestra en la figura 5.

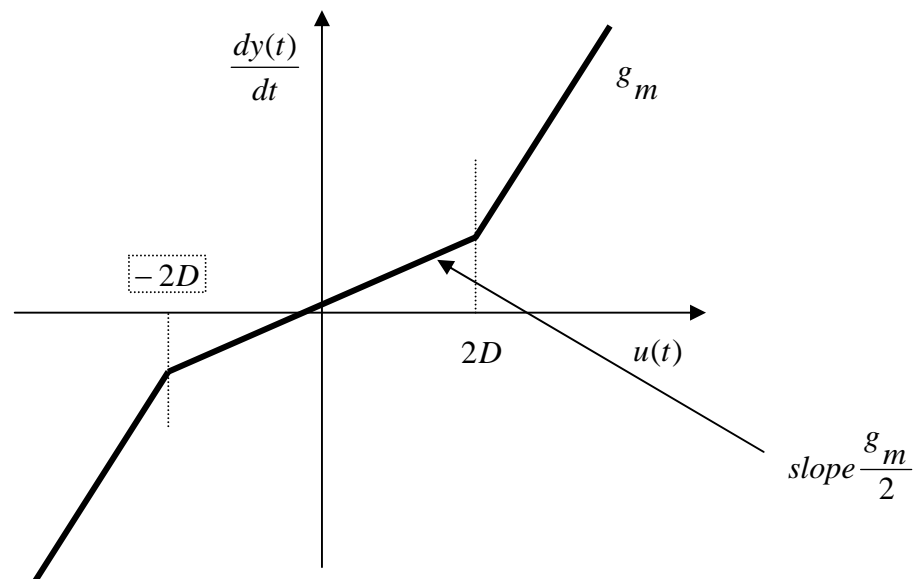


Figura 5. Compensación de la zona muerta utilizando una señal ‘Dither’.

El problema ocasionado por la zona muerta es que cuando la señal de control cae dentro de la banda de la zona muerta, no se aplica ninguna señal de control al sistema. Esto deriva en un error de seguimiento

proporcional al tamaño de la zona muerta. La ventaja de la técnica ‘dither’ es que la zona muerta de la válvula de la figura 4 se reemplaza por una ganancia no-cero $\frac{g_m}{2}$. En este caso siempre existe una señal de control correctiva que puede ser proporcionada al sistema y el error de seguimiento puede ser controlado por métodos estándar. Existen otros métodos de compensación de la zona muerta (ver el artículo sobre Sistemas Servo de esta serie).

4.2. Control en cascada.

El sistema de control de la velocidad es un ejemplo de un proceso en el cual debemos controlar primero el actuador antes que el sistema principal sea controlado (el motor en este caso). Esto es algo muy común en la industria y genera lo que se conoce como control en cascada. La figura 6 ilustra un sistema de control en cascada para el sistema de control de la velocidad. El sistema en cascada consiste de un lazo interno (o controlador esclavo) que controla la posición de la válvula $y(t)$ con respecto de la posición de referencia de la válvula $y_r(t)$. El lazo externo (o controlador principal) controla la velocidad del motor $\omega(t)$. El lazo externo se denomina maestro por que provee la posición de referencia de la válvula que debe seguir el lazo esclavo interno.

Los sistemas de control en cascada son ampliamente usados en sistemas industriales donde es muy importante ir paso a paso en un sistema complejo. La idea es empezar con la mayoría de los bloques internos de un sistema, ejercer control a ese nivel y luego trabajar hacia el siguiente nivel de control. En el sistema de control de la velocidad del motor, el procedimiento es cerrar el lazo de control de la posición de la válvula utilizando compensación no lineal, por ejemplo ‘dither’ y obtener un control exacto de la posición de la válvula. La posición de referencia de la válvula se convierte en la entrada del sistema para diseñar el controlador maestro. Dicho controlador deberá utilizar un control de tres términos como se ha descrito en el artículo técnico de Elke (puedes también encontrarlo en www.control-systems-principles.co.uk).

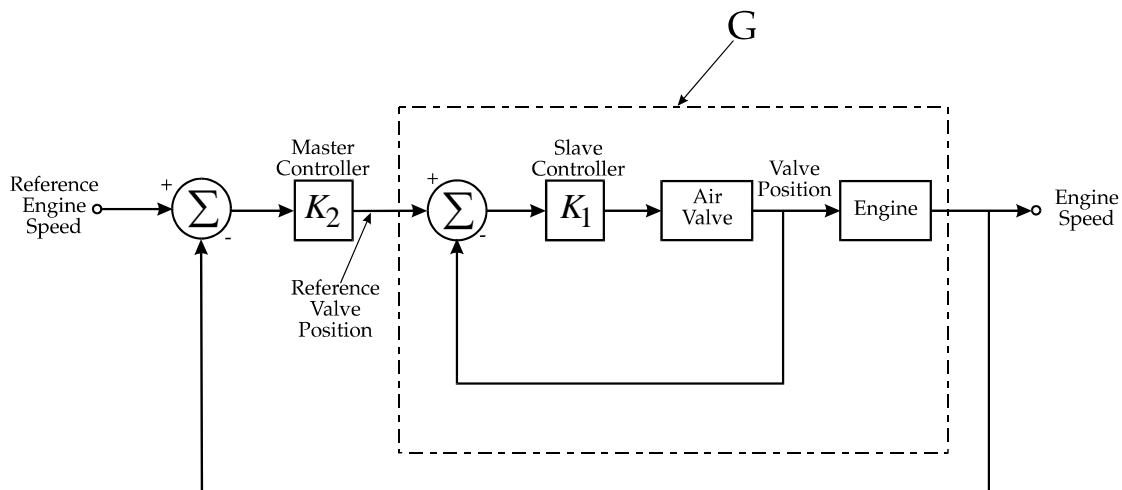


Figura 6. Estructura de control en cascada para el sistema estándar de control de velocidad del motor.

4.3. Control hacia delante.

Una carga externa influenciara la calidad de control cuando esta cambie. Un buen controlador de retroalimentación con acción integral puede compensar por estas perturbaciones externas. Sin embargo, si dicha perturbación puede medirse, un mejor control puede aplicarse utilizando dicha medición en el sistema de control. Esto se conoce como un **sistema de control hacia delante**. En el sistema estándar de control de la velocidad del motor, puede medirse la señal de perturbación $d_l(t)$. Dicho valor es usado

para asistir la acción del controlador retroalimentado. La señal $d_r(t)$ se pasa a través del controlador hacia delante $F(s)$ y se suma (o se resta como sea apropiado) de la salida del controlador retroalimentado. Mediante una adecuada selección de $F(s)$ la señal hacia delante compensara exactamente la influencia de dicha perturbación.

5. Un sistema estándar de control de la velocidad de un motor

La figura 7 muestra una versión comercial del problema de control de la velocidad del motor manufacturado por TQ Education LTD. Dicho sistema utiliza aire comprimido para manejar el sistema y un modelo a escala de una maquina de vapor. Todos los aspectos de este sistema siguen el modelo estandar descrito en la seccion 2 de estas notas de aplicación. Usaremos un modelo de este aparato para ilustrar los experimentos de control (en siguientes notas de aplicación usaremos un sistema real para comparar los resultados).



Figura 7. El TQ CE107, sistema estándar de control de la velocidad de un motor.

6. Ejemplos de control para el sistema estándar de control de la velocidad del motor.

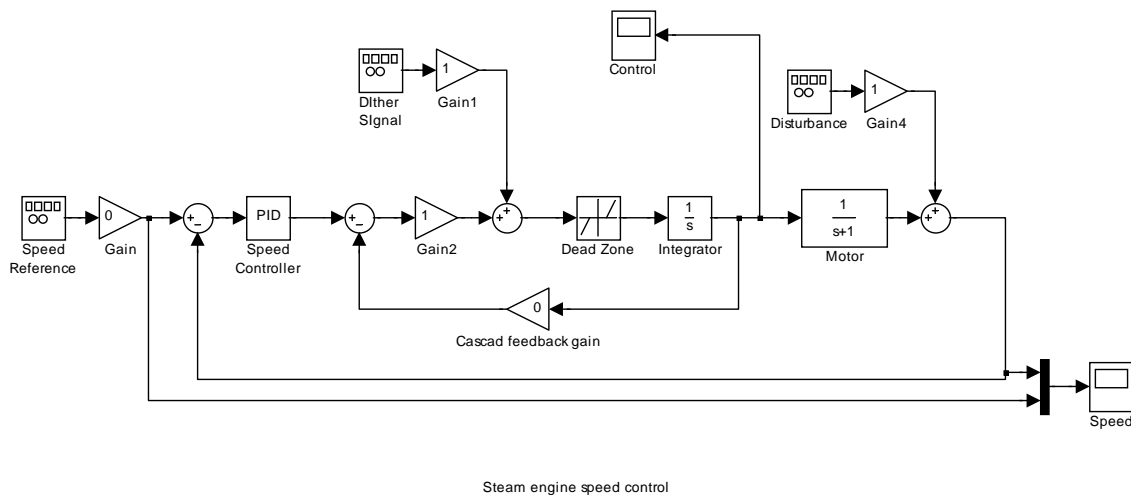


Figura 8. Simulación del sistema estándar de control de la velocidad de un motor.

En esta sección utilizamos simulación para demostrar la compensación de zona muerta utilizando la técnica ‘dither’ y compensación en cascada. La compensación hacia delante se utiliza para demostrar la anulación de perturbaciones en la carga. El modelo de simulación se muestra abajo donde la dinámica del motor se representa como un sistema de atraso de primer orden. El actuador incluye un integrador como se describe anteriormente. Las entradas son la referencia, el ‘dither’ y las señales de perturbación.

6.1. Compensación de la zona muerta.

En esta sección comparamos el control de velocidad de la maquina de vapor con y sin la compensación ‘dither’ aplicada al actuador. La señal ‘dither’ se inserta en el lazo de retroalimentación un poco antes de la entrada al actuador. La amplitud de la señal ‘dither’ deberá exceder la zona muerta y la frecuencia deberá ser mas grande que el ancho de banda del sistema. Debido a que el actuador contiene un integrador, solamente se requiere control proporcional para seguir un escalón de velocidad. Los resultados de la simulación de abajo comparan el control de la velocidad del eje con y sin la señal ‘dither’. La única diferencia entre esas señales es la presencia de la señal ‘dither’ en los trazos de abajo. La señal ‘dither’ tiene una amplitud de 1 volt y una frecuencia de 10Hz. Este valor se encuentra totalmente por arriba del ancho de banda de lazo cerrado del sistema. Nótese la mejora en el error en estado estable y la respuesta dinámica cuando la señal ‘dither’ se incorpora al sistema. También nótese que la señal ‘dither’ no tiene efectos visibles en la señal de control. Esto es importante. La señal ‘dither’ debe “linealizar” el sistema pero con el menor efecto posible sobre las variables bajo control. Una discusión orientada al control accesible sobre el uso de señales ‘dither’ se encuentra en la referencia [9].

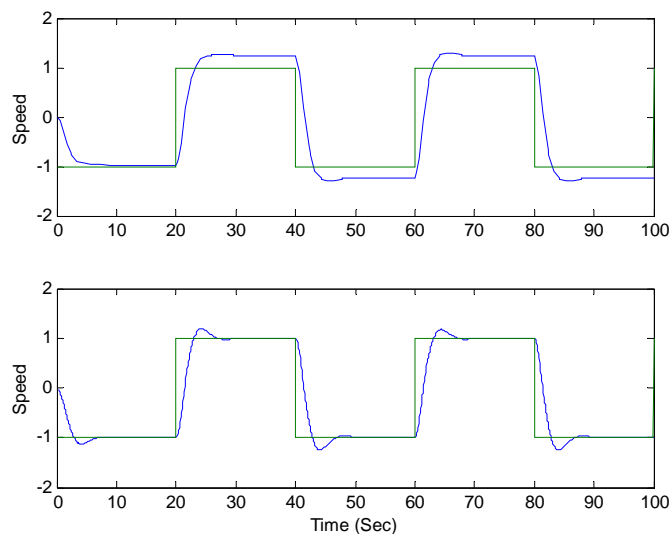


Figura 9. Compensación de la zona muerta utilizando una señal ‘Dither’.

6.2. Control en cascada.

En esta sección, la zona muerta se compensa mediante el uso de retroalimentación que puede tener un efector de linealización muy fuerte. Para demostrar esto en la simulación, la señal ‘dither’ se apaga reduciendo su ganancia a 0. Se introduce la retroalimentación con respecto del actuador. Esto tiene el

efecto de linealizar la dinámica del actuador pero también resulta en un sistema tipo 0^1 . Por lo tanto el controlador PID para la velocidad del eje puede incluir una acción integral para compensar dicho error en estado estable.

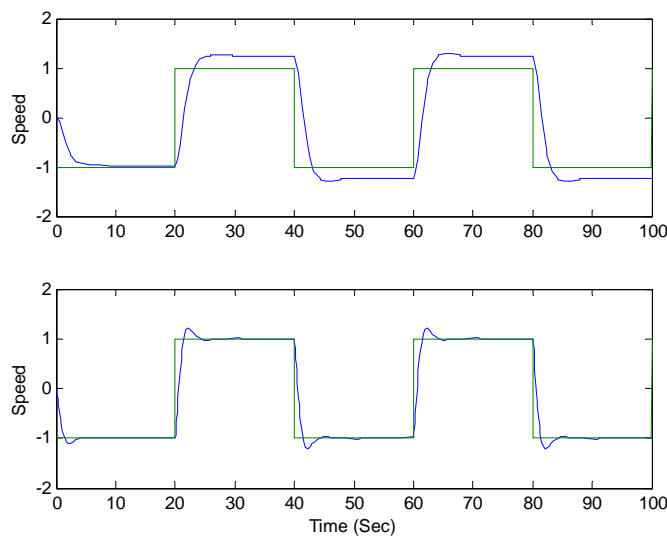


Figura 10. Compensación de la zona muerta utilizando control en cascada.

6.3. Alimentando la carga hacia delante.

Una solución para anular perturbaciones es el uso del control hacia delante. Con un control de este tipo se asume que una señal relacionada con la perturbación (idealmente proporcional a esta) está disponible. Por ejemplo con una máquina de vapor, un generador conectado a la salida pudiera proveer potencia eléctrica a una carga. Midiendo la corriente de la carga conforme la carga varía nos da una medición de la señal de perturbación. Esta señal puede ser usada para generar una señal de control para cancelar o reducir el efecto de dicha perturbación. En la simulación de abajo, una señal de perturbación triangular se inyecta al lazo de retroalimentación. El efecto del lazo hacia delante es evidente en la figura 12. Sin compensación, esta perturbación en la carga causa un error en estado estable muy grande (línea azul). Con la compensación hacia delante, este error se reduce claramente (línea roja).

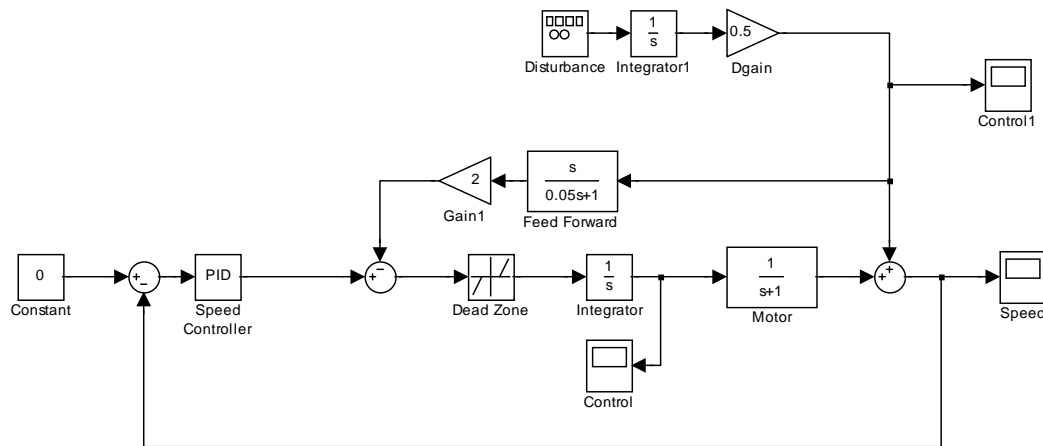
7. Palabras finales.

Esperamos que nuestra exposición acerca del control de la velocidad de un motor haya sido clara y entendible. Pedimos disculpas por adelantado por que no podemos contestar tus preguntas o dudas sobre detalles en el contenido de estas notas, a menos de que tengamos un acuerdo con tu organización. Para más información sobre controladores de la velocidad de maquinas y el sistema CE107 de control de velocidad manufacturado por TQ Ltd, consulta la pagina de Internet de TQ, utiliza las ligas de interés en nuestro sitio Web www.control-systems-principles.co.uk, o escribe directamente a TQ en el correo electrónico: info@tq.com.

La propia historia de los sistemas de control es muy rica en discusiones acerca del control de la velocidad en maquinas y motores. Por ejemplo, checa las referencias [1] y [3] para ver detalles de cómo los controladores de velocidad se desarrollaron en la revolución industrial. Entre los colegas de 'Control Systems Principles' hemos disfrutado mucho del libro de Jenny Uglow de la referencia [4] por que ofrece una fotografía de los complejos cambios sociales y científicos que ocurrieron durante ese tiempo y ofrece

¹ El tipo del sistema no dice cuantos integradores existen en el lazo cerrado. Un sistema tipo '0' no tiene integradores, un sistema tipo '1' tiene uno y así sucesivamente. El tipo de un sistema servo es muy importante por que le dice al diseñador con cual señal de entrada puede obtener error cero en la respuesta de estado estable.

un buen análisis de la atmósfera que dio inicio al control de maquinas. Para los miembros de la IEEE, existe un fascículo especial de "Control Systems Magazine" sobre este tema. También recomendamos los sitios Web en [6,7] y las páginas Web de museos industriales en general. El museo de ciencia e industria de la ciudad de Manchester [8] es especialmente recomendable.



Steam engine speed control: Feed Forward Disturbance Rejection

Figura 11. Simulación de un esquema de control hacia adelante.

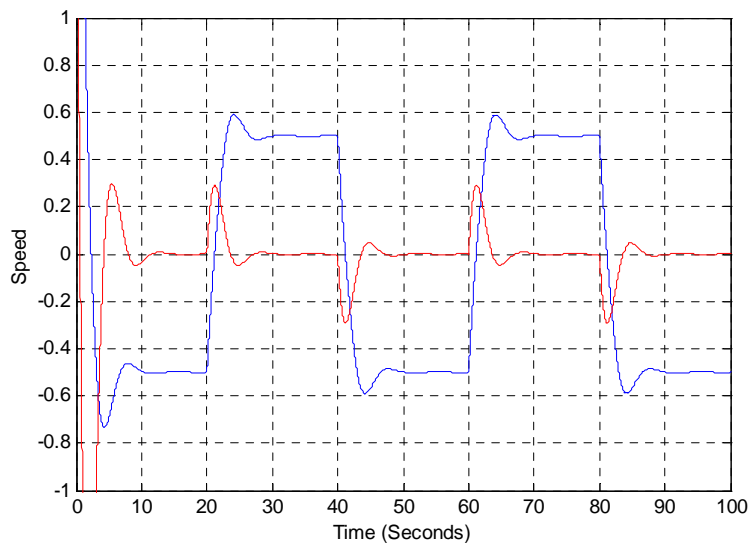


Figura 12. Anulación de perturbaciones utilizando control hacia adelante.

Referencias

1. Mayr, O. *The Origins of Feedback Control*, MIT Press, 1970.
2. Dorf, R C and Bishop, R H, *Modern Control Systems*, (9th Ed) Prentice Hall 2000.
3. Bennett, S. *A History of Control Engineering*, Peregrinus, 1979.
4. Uglow, J, *The Lunar Men: The Friends that Made the Future*, Faber and Faber, 2002.
5. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 22, No. 2, April 2002.
6. Un análisis matemático del gobernador centrífugo de velocidad– <http://www.nsm.buffalo.edu/~hassard/>
7. Un sitio excelente para maquinas antiguas – <http://oldenginehouse.users.btopenworld.com/oeh.htm>
8. Museo de ciencia e industria de la ciudad de Manchester – <http://www.msimg.org.uk/>
9. Cook, P. *Non-linear Dynamical Systems*, (2nd ed.) Prentice-Hall International, 1994

Apéndice – Esquemático del sistema estándar de control de la velocidad.

