



REPORTE DEL PROYECTO DE LABORATORIO DE CONTROL

Controlador PID de un motor de DC

11/7/2002

INTRODUCCIÓN LOS MOTORES

Este proyecto consiste en controlar la posición de un motor de corriente continua por medio de un controlador PID. Este proyecto tiene una gran aplicación en la industria ya que en nuestra vida diaria los motores se encuentran en todas partes como por ejemplo:

- El abanico sobre la estufa y el horno microondas.
- El dispensador sobre el fregadero.
- La batidora.
- El abrelatas.
- El refrigerador -en verdad, dos o tres: uno para el compresor, uno para el abanico dentro del refrigerador, y uno para la máquina para fabricar hielo.
- El mezclador.
- El motor de la cinta grabadora en la contestadora.
- Tal vez el reloj del horno

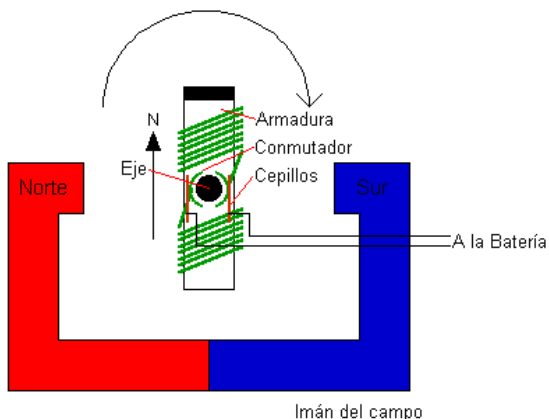
¿COMO FUNCIONAN?

¡Los motores eléctricos están por todas partes!. En la casa, y casi en cada movimiento mecánico que observe a su alrededor es ocasionado por un motor eléctrico AC o DC. Para entender cómo funciona un motor se debe entender acerca de imanes, electroimanes y electricidad en general.

Comenzamos mirando el diseño global de un motor eléctrico DC simple de 2 polos. Un motor simple tiene 6 partes, tal como se muestra en la

figura:

- Ⓒ Una armadura o rotor.
- Ⓒ Un conmutador.
- Ⓒ Cepillos.
- Ⓒ Un eje.
- Ⓒ Un Imán de campo.
- Ⓒ Una fuente de poder DC de algún tipo.



Un motor eléctrico está compuesto de imanes: un motor los usa para crear movimiento. Si conoce un imán conoce acerca de la ley fundamental de todos los imanes: Cargas opuestas se atraen e iguales se repelen. Así que si tiene dos imanes con sus extremos como norte y sur, entonces el extremo

norte se atraerá con el sur. De otro lado, el extremo norte del imán repelerá el extremo norte del otro (y similarmente el sur repelerá el sur). Dentro de un motor eléctrico esas fuerzas atractoras y repulsoras crean movimiento rotacional.

En el diagrama se puede observar 2 imanes en el motor: la armadura (o rotor) es un electroimán, mientras el imán de campo es un imán permanente (el imán de campo puede ser un electroimán también, pero en los motores más pequeños no ahorra energía).

El bobinado de la armadura no se ha tenido en cuenta así que es fácil ver al conmutador en acción. De lo que hay que darse cuenta es que la armadura pasa a través de la posición horizontal, los polos del cambio del electroimán. Debido al cambio, el polo norte del electroimán está siempre sobre el eje para que pueda repeler el polo norte del imán del campo y atraer el imán del campo del polo sur.

Si alguna vez tiene la oportunidad de desmontar un pequeño motor eléctrico encontrará que contiene las mismas partes descritas arriba: dos



pequeños imanes permanentes, un conmutador, dos cepillos y un electroimán hecho por un enrollado de cable alrededor de metal. Casi siempre, el rotor tendrá tres polos en lugar de dos. Hay dos buenas razones para que un motor tenga tres polos:

Esto hace que el motor sea más dinámico. En un motor de dos polos, si el electroimán está balanceado, perfectamente horizontal entre los dos polos del imán del campo cuando el motor arranca, usted puede pensar que la armadura se quede "pegada" ahí. Esto nunca ocurre en un motor de tres polos.

Cada vez que el conmutador toque el punto donde cambia el campo a un motor de dos polos, el conmutador enchufa la batería (conecta directamente las terminales positivas y negativas) por un momento. Este enchufe hace que se gaste la energía de la batería innecesariamente. Un motor de tres polos arregla el problema. Es

posible tener cualquier número de polos, dependiendo del tamaño del motor y la aplicación específica en que se está utilizando

En la imagen anterior se observan algunos clásicos micro-motores DC (Direct Current) o también llamados CC (corriente continua) de los usados generalmente en robótica. Los hay de distintos tamaños, formas y potencias, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento. Accionar un motor DC es muy simple y solo es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para invertir el sentido de giro basta con invertir la alimentación y el motor comenzará a girar en sentido opuesto. A diferencia de los motores paso a paso y los servomecanismos, los motores DC no pueden ser posicionados y/o enclavados en una posición específica. Estos simplemente giran a la máxima velocidad y en el sentido que la alimentación aplicada se los permite.

El motor de corriente continua está compuesto de 2 piezas fundamentales :

- Rotor
- Estator



Dentro de éstas se ubican los demás componentes como :

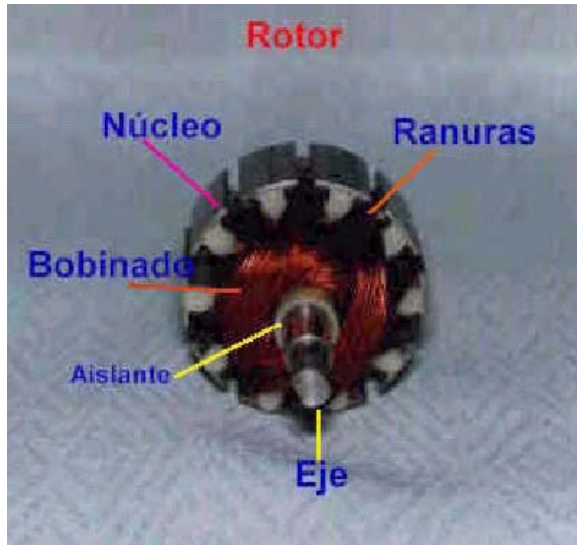
- Escobillas y portaescobillas
- Colector
- Eje
- Núcleo y devanado del rotor
- Imán Permanente
- Armazón
- Tapas o campanas

La siguiente tabla muestra la distribución de las piezas del motor :

Rotor	Estator
Eje	Armazón
Núcleo y Devanado	Imán permanente
Colector	Escobillas y portaescobillas
	Tapas

Rotor Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga, está formado por :

- U** Eje: Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.
- U** Núcleo: Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.



Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo. El acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis. Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

Devanado: Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.

- **Colector:** Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas. La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos)

un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas. La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos)

Estator Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio. Está formado por :

- **Armazón:** Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético.

Imán permanente: Compuesto de material ferromagnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.

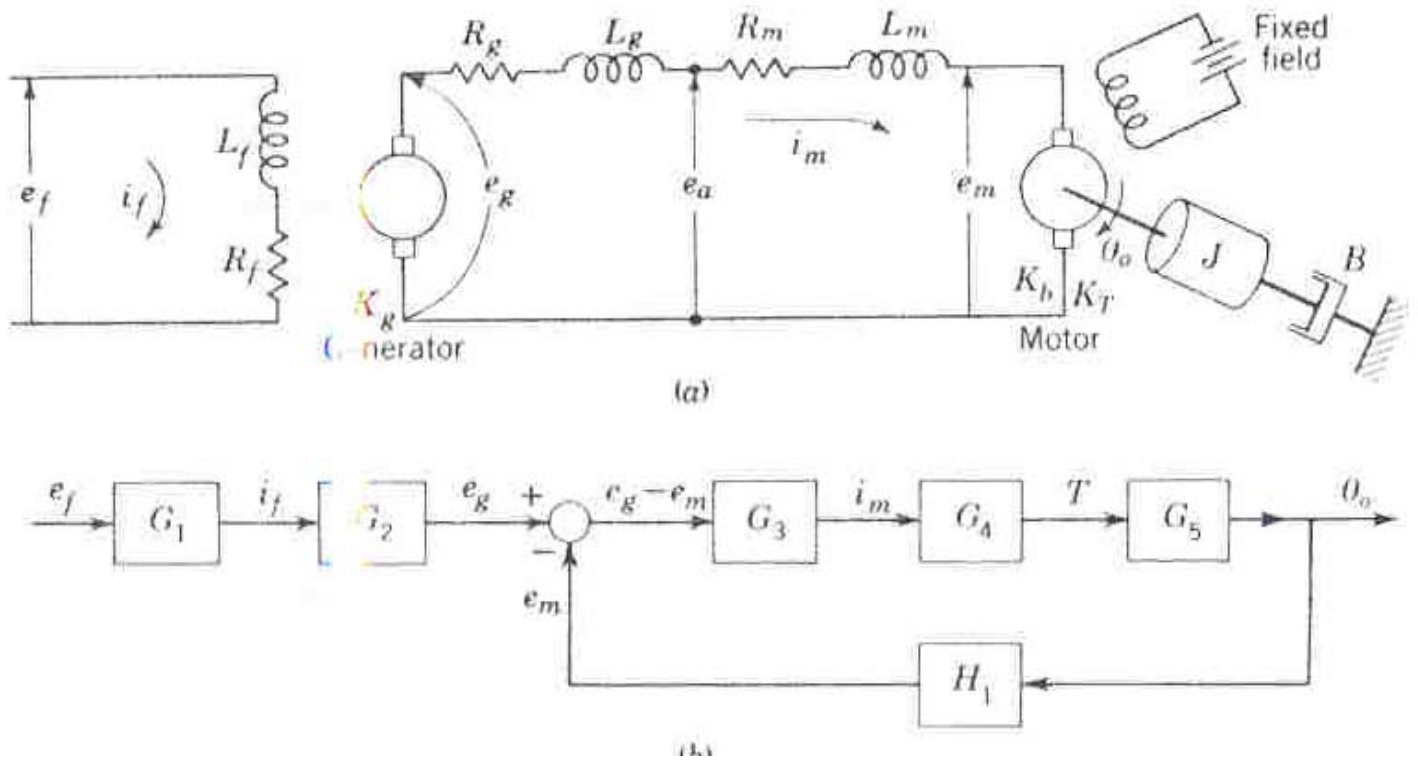
Escobillas: Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por los portaescobillas. Ambos, escobillas y portaescobillas, se encuentran en una de las tapas del estator.



La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor. La función del portaescobillas es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto.

MODELADO DEL SISTEMA

El primer paso para diseñar un controlador es el de modelar la planta, que en este caso es el motor de corriente continua. Un diagrama a bloques muy bueno de el modelo de nuestro sistema es el de la figura siguiente: Nuestro sistema a controlar contiene un motor y también por que no todo



es perfecto es un generador a la vez. Además de un sistema de poleas unidas por una banda elástica que está representada por la carga del motor. La función de transferencia de nuestro sistema se puede escribir en base al diagrama de la figura de arriba en el cual tenemos seis funciones de transferencia de las cuales están involucrados los fenómenos característicos de un motor de corriente continua como son:

- Un campo de excitación magnético constante
- Inercia
- Fricción
- Voltaje de armadura
- El voltaje como generador

Las ecuaciones de estos fenómenos son las siguientes:

$$e_f = L_f Di_f + R_f i_f$$

$$e_g = K_g i_f$$

$$e_g - e_m = (L_g + L_m) Di_m + (R_g + R_m) i_m$$

$$e_m = K_b D\theta_o$$

$$T = K_T i_m = J D^2\theta_o + B D\theta_o$$

Con base en el diagrama a bloques de el modelo del sistema a controlar y en las fórmulas que se acaban de mencionar obtenemos las siguientes funciones de transferencia para cada uno de los bloques del diagrama:

$$G_1(s) = \frac{I_f(s)}{E_f(s)} = \frac{1/R_f}{1 + (L_f/R_f)s} = \frac{1/R_f}{1 + T_f s}$$

$$G_2(s) = \frac{E_g(s)}{I_f(s)} = K_g$$

$$G_3(s) = \frac{I_m(s)}{E_g(s) - E_m(s)} = \frac{1/(R_g + R_m)}{1 + [(L_g + L_m)/(R_g + R_m)]s}$$

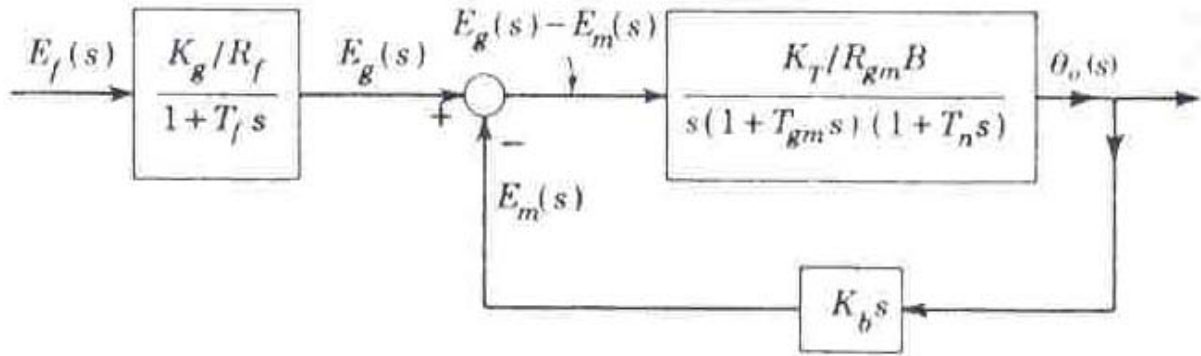
$$= \frac{1/R_{gm}}{1 + (L_{gm}/R_{gm})s} = \frac{1/R_{gm}}{1 + T_{gm} s}$$

$$G_4(s) = \frac{T(s)}{I_m(s)} = K_T$$

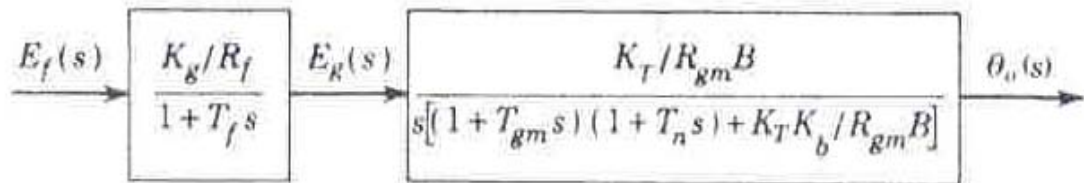
$$G_5(s) = \frac{\Theta_o(s)}{T(s)} = \frac{1/B}{s[1 + (J/B)s]} = \frac{1/B}{s(1 + T_n s)}$$

$$H_1(s) = \frac{E_m(s)}{\Theta_o(s)} = K_b s$$

Entonces el sistema a bloques del mismo sistema, pero ya con los valores correspondientes a cada una de las funciones de transferencia y multiplicadas cada una para llegar a el bloque básico de un sistema de retroalimentación es el siguiente:



Y una vez reducido el sistema a un solo bloque:



Y entonces la función de transferencia final de el sistema en lazo cerrado nos queda:

$$G_x(s) = \frac{\Theta_o(s)}{E_f(s)} = \frac{K_g K_T / R_f B R_{gm}}{s(1 + T_f s) \left[(1 + K_T K_b / B R_{gm}) + (T_{gm} + T_n) s + T_{gm} T_n s^2 \right]}$$

Lo que es una expresión bastante compleja y de cuarto orden. Pero que en realidad se comporta como si fuera un sistema de primer orden. Así que podemos simplificar esta expresión hasta encontrar su mínima expresión. Lo primero que debemos de tomar en cuenta es que la inductancia de la armadura y del generador son muy pequeñas ($T_{gm} \rightarrow 0$) entonces podemos mandar a volar los dos términos con T_{gm} y nos deshacemos de el término cuadrático en el denominador y la expresión la podemos reducir a la siguiente:

$$\frac{\Theta_o(s)}{E_f(s)} = G_x(s) \approx \frac{K_x}{s(1 + T_f s)(1 + T_m s)}$$

De donde:

$$K_x = \frac{K_g K_T}{R_f (BR_{gm} + K_T K_b)}$$

$$T_f = \frac{L_f}{R_f}$$

$$T_m = \frac{JR_{gm}}{BR_{gm} + K_T K_b}$$

Si a esto mismo le añadimos el hecho de que el efecto de la fricción sobre la carga es mínimo podemos hacer la aproximación de que B es casi igual a cero. Lo que simplifica los coeficientes de aquí arriba. Y quedan ahora de la siguiente forma:

$$K_x = \frac{K_g}{R_f K_b}$$

$$T_f = \frac{L_f}{R_f}$$

$$T_m = \frac{JR_{gm}}{K_T K_b}$$

Pero si además a eso mismo le aplicamos el DC Gain para hacer la reducción de orden, la función de transferencia nos queda de la siguiente forma:

$$G_{(s)} = \frac{B}{s(s + A)}$$

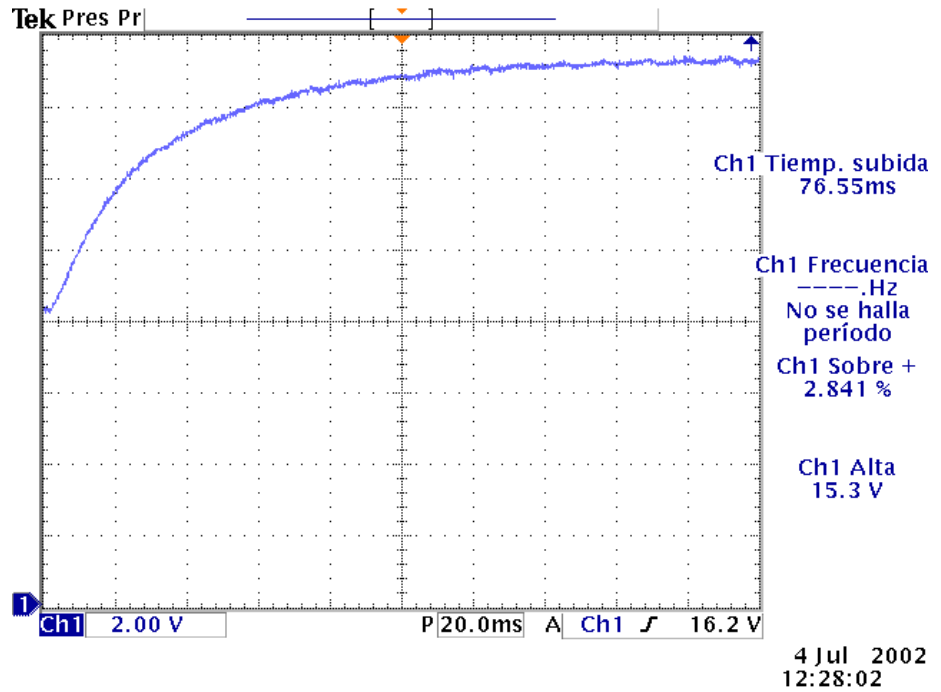
y la función de transferencia de velocidad que es la derivada de la de posición, queda la siguiente:

$$G_{(s)} = \frac{B}{s + A}$$

DETECCIÓN DE
LOS PARÁMETROS
DEL MODELO
MATEMÁTICO

Ahora que ya sabemos como es la función de transferencia, que es de segundo orden para el control de posición y de primer orden para el de velocidad. Sabemos que la respuesta a un escalón para una función de primer orden y en lazo abierto es la suma de la respuesta forzada y la natural. La respuesta forzada es un escalón y la respuesta natural es una exponencial decreciente cuya velocidad en nepers por segundo es el equivalente al valor del polo A dividido entre cuatro.

Por ello dispusimos detectar la localización del polo A por medio de un muestreo de la respuesta transitoria de la velocidad del motor a una excitación del tipo escalón. Medimos cual es el tiempo de establecimiento, luego lo dividimos entre cuatro y obtuvimos la localización del polo que determina la función de transferencia de velocidad del motor. La respuesta experimental fue la siguiente:



Con base a esta gráfica y los valores correspondientes a cada punto se logró la obtención de la localización del polo que determina la función de transferencia velocidad. Y que puede ver los datos de cada punto anexos a este reporte.

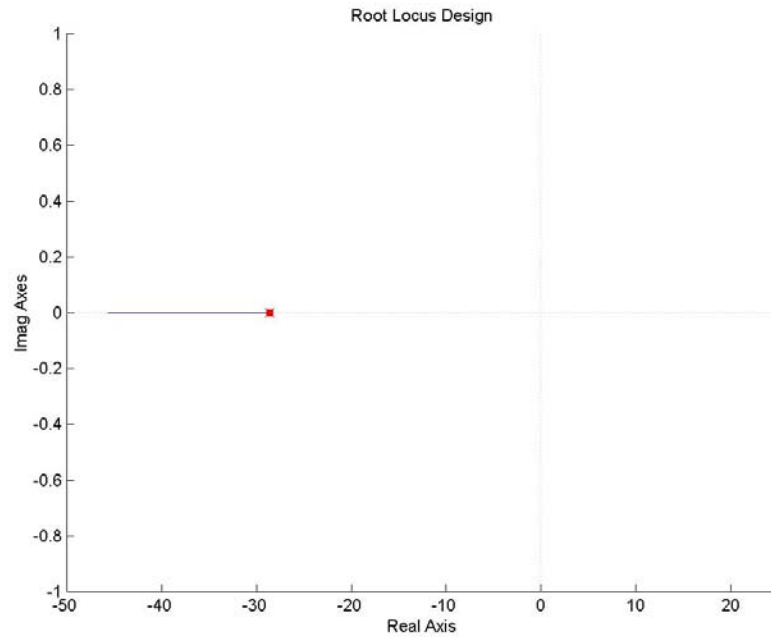
Tiempo de establecimiento de 0.1408seg
Polo localizado en: -28.5714
Vel Nep/seg=0.0352

Como a la entrada del sistema (motor) le metimos una entrada escalón de +15Volts y se obtuvo la velocidad máxima. El tacómetro que registró la velocidad registró un voltaje de +15.36 volts De allí obtenemos la constante B que es 1.024 y que redondeamos a 1.

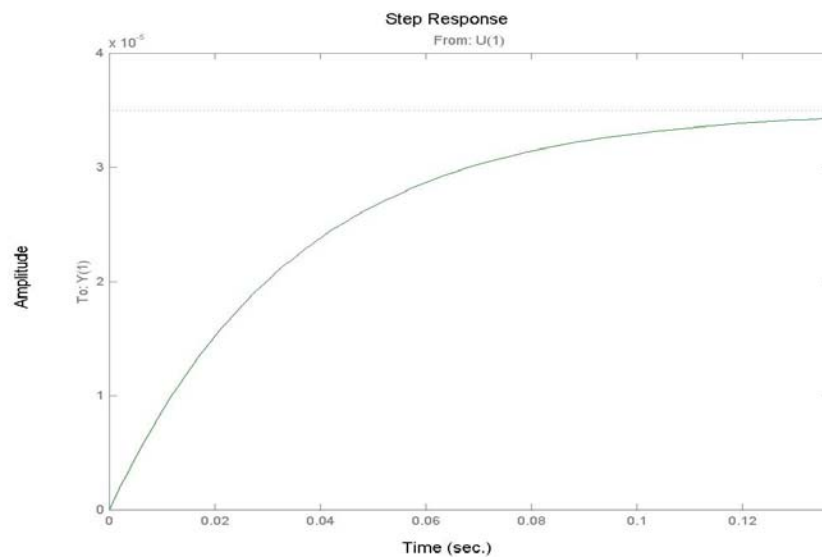
Entonces la función de transferencia de velocidad queda:

$$G_{(s)} = \frac{1}{0.0352s + 1} \quad \text{O} \quad G_{(s)} = \frac{1}{s + 28.5714}$$

Que nos da un lugar de las raíces:



Y la respuesta a un escalón simulada nos da la siguiente:



Donde podemos observar que el tiempo de establecimiento y la forma de la respuesta simulada en RLTOOL es muy parecida a la obtenida experimentalmente. Lo que hace prácticamente valido nuestro modelo.

Y para obtener la función de transferencia de posición solo integramos y nos queda:

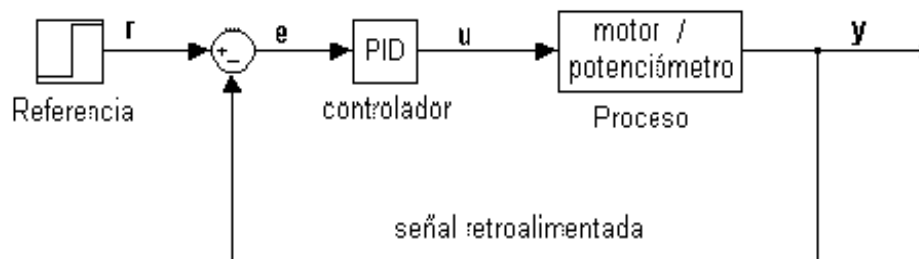
$$G_{(s)} = \frac{1}{s(s + 28.5714)}$$

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Se requiere diseñar y construir un controlador PID para regular la posición de un servomotor de corriente directa. La figura muestra el diagrama de bloques del sistema controlado, en donde:

- La señal de salida, y , corresponde a la salida del terminal móvil del potenciómetro. Si éste se alimenta con 15 voltios en sus terminales fijos (a y b), producirá un voltaje en su terminal móvil (c) equivalente a su posición. Podemos decir entonces que cuando produce 0 voltios esta en la posición equivalente a 0 grados, 6.5 voltios corresponderá a 90 grados, 10 voltios a 180 grados, etc.
- La señal de referencia, r , corresponde a la posición deseada. Es decir, si queremos que el motor alcance la posición 180 grados debemos colocar una referencia de 10 voltios, si queremos grados 0 colocamos referencia de 0 voltios, etc.
- La señal de error, e , corresponde a la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida. Por ejemplo, si queremos que el motor alcance la posición de 90 grados colocamos una señal de referencia de 6.5 voltios y esperamos dónde se ubica exactamente. Si se posiciona en 67.5 grados el potenciómetro entregará una señal de salida de 5.3 voltios y la señal de error, e , será de 1.2 voltios (22.5 grados).
- La señal de control, u , corresponde al voltaje producido por el controlador para disminuir o anular el error. Si la señal de error es positiva indica que la referencia es mayor que la salida real, entonces el controlador coloca un voltaje positivo al motor para que continúe girando hasta minimizar o anular el error. Si por el contrario la señal de error resulta negativa indica que la salida sobrepasó la referencia entonces el controlador debe poner un

voltaje negativo para que el motor gire en sentido contrario hasta minimizar o anular el error.



DISEÑO DEL PID Un controlador PID dispone de un componente proporcional (K_p), un componente integral (T_i) y un componente derivativo (T_d), de tal manera que produce una señal de control igual a:

$$u \approx K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) e$$

donde la acción integral del controlador tiene su mayor efecto sobre la respuesta estacionaria del sistema (tratando de minimizar el valor de e_{ss}) y la acción derivativa tiene su mayor efecto sobre la parte transitoria de la respuesta. De la información obtenida de la ubicación de los polos y ceros del sistema y del Lugar de las Raíces del mismo podemos concluir:

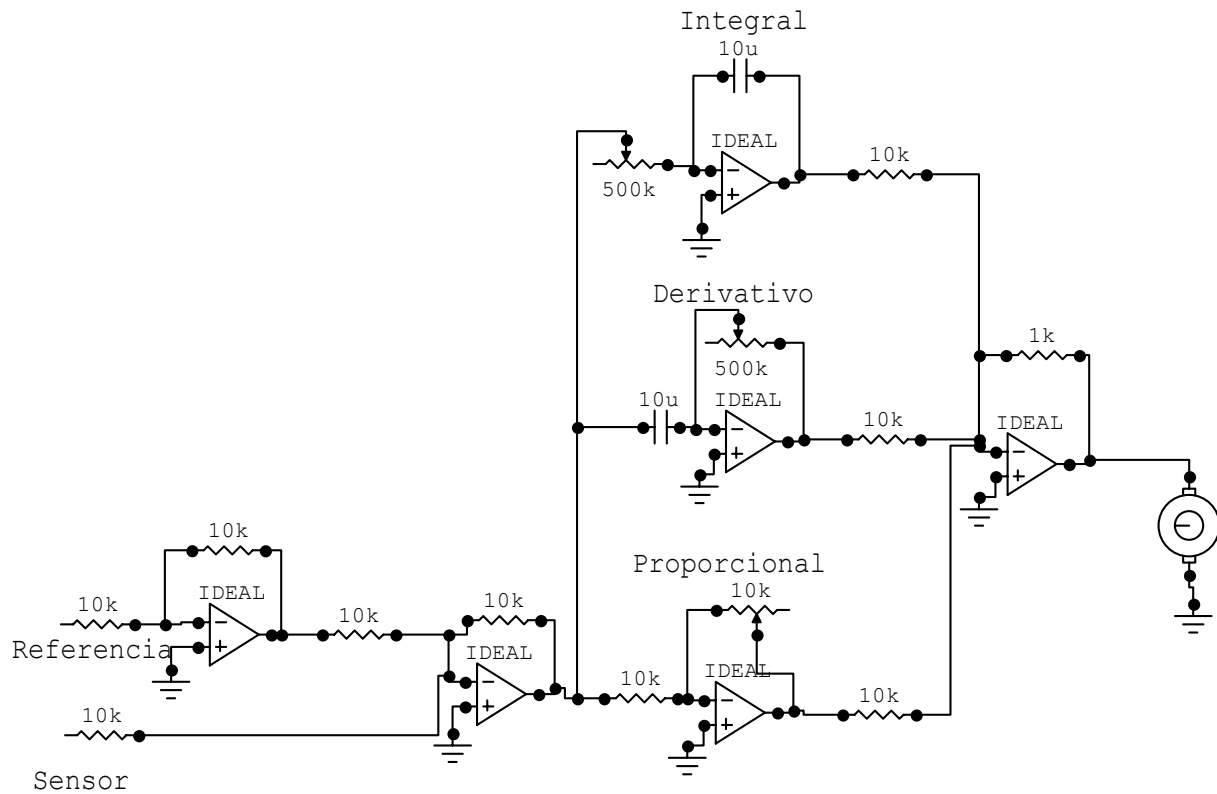
- < Por ser un sistema tipo 1, que equivale a decir que el modelo matemático del sistema incluye un integrador, el error en estado estacionario ante una señal escalón será nulo por lo que no necesitará la parte integrativa del controlador. Aunque en la práctica este error no será completamente nulo.
- < El Lugar de las Raíces nos muestra que con solo un controlador proporcional nosotros podemos variar la rapidez de la respuesta del sistema, por lo cual la parte derivativa tampoco será indispensable.
- < Podemos entonces decir que con un controlador proporcional será suficiente para obtener la respuesta deseada en el sistema controlado.

Se armó el siguiente circuito que es un PID con amplificadores operacionales MC1458, la entrada del sensor era el potenciómetro y la referencia era otro potenciómetro o en ocasiones el generador de funciones. Y la salida se alimentaba a la etapa de potencia del motor.

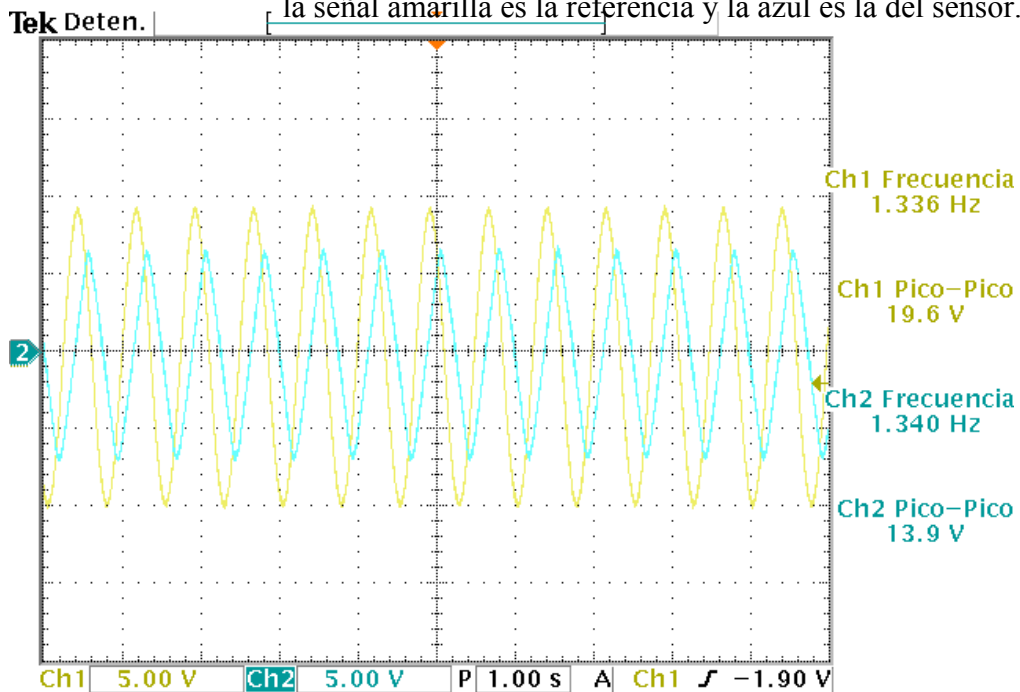
Con este mismo circuito se puede hacer el control de velocidad de el motor, sólo que en vez de conectar como sensor el potenciómetro se debe de conectar el tacómetro.

Para la sintonización del PID se movieron los parámetros hasta que el sistema se comportara como un críticamente estable y así tuviera menor tiempo de asentamiento, no tuviera sobre impulso y la ganancia de los parámetros quedo de esta manera:

ProporcionalIntegralDerivativo		
1.54	0.87	0.13

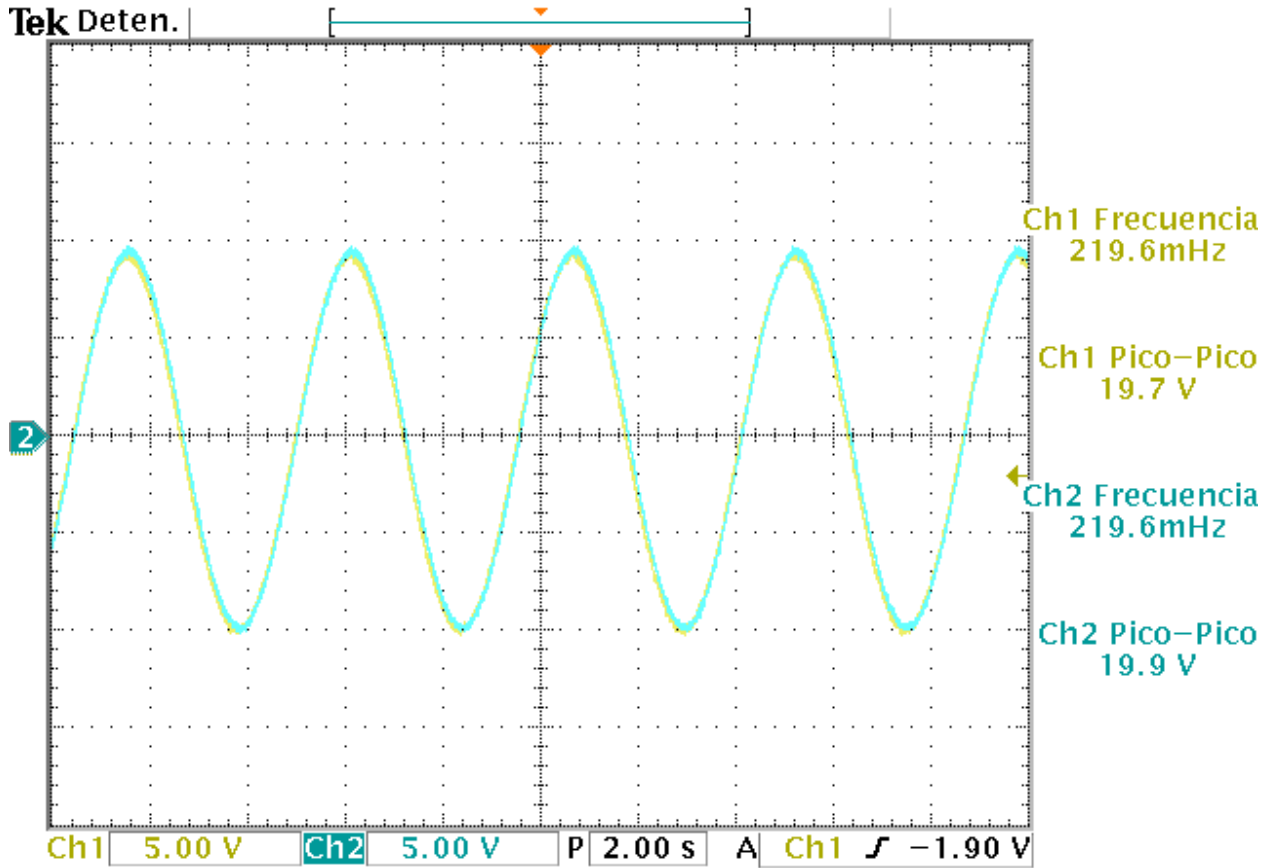


Después de haber sintonizado el PID se le aplico a la entrada del sistema el generador de funciones y se obtuvieron las siguientes gráficas: Donde la señal amarilla es la referencia y la azul es la del sensor.

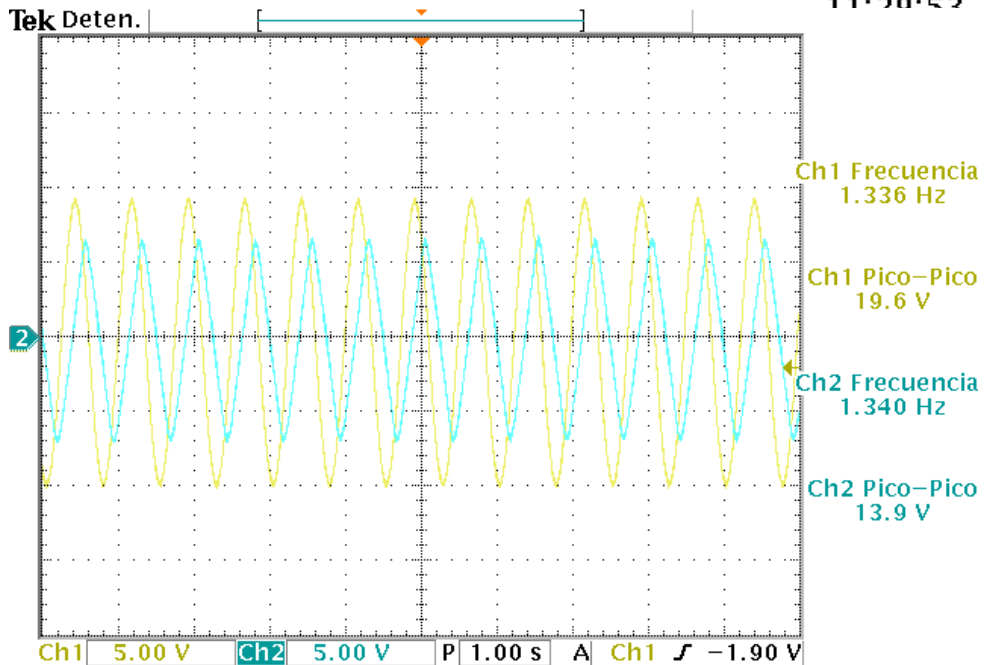


9 Jul 2002
 11:38:51

Aquí se observa que el controlador a frecuencias bajas y propias del sistema sigue fielmente a la señal de referencia ya que la dinámica propia del sistema así lo permite.

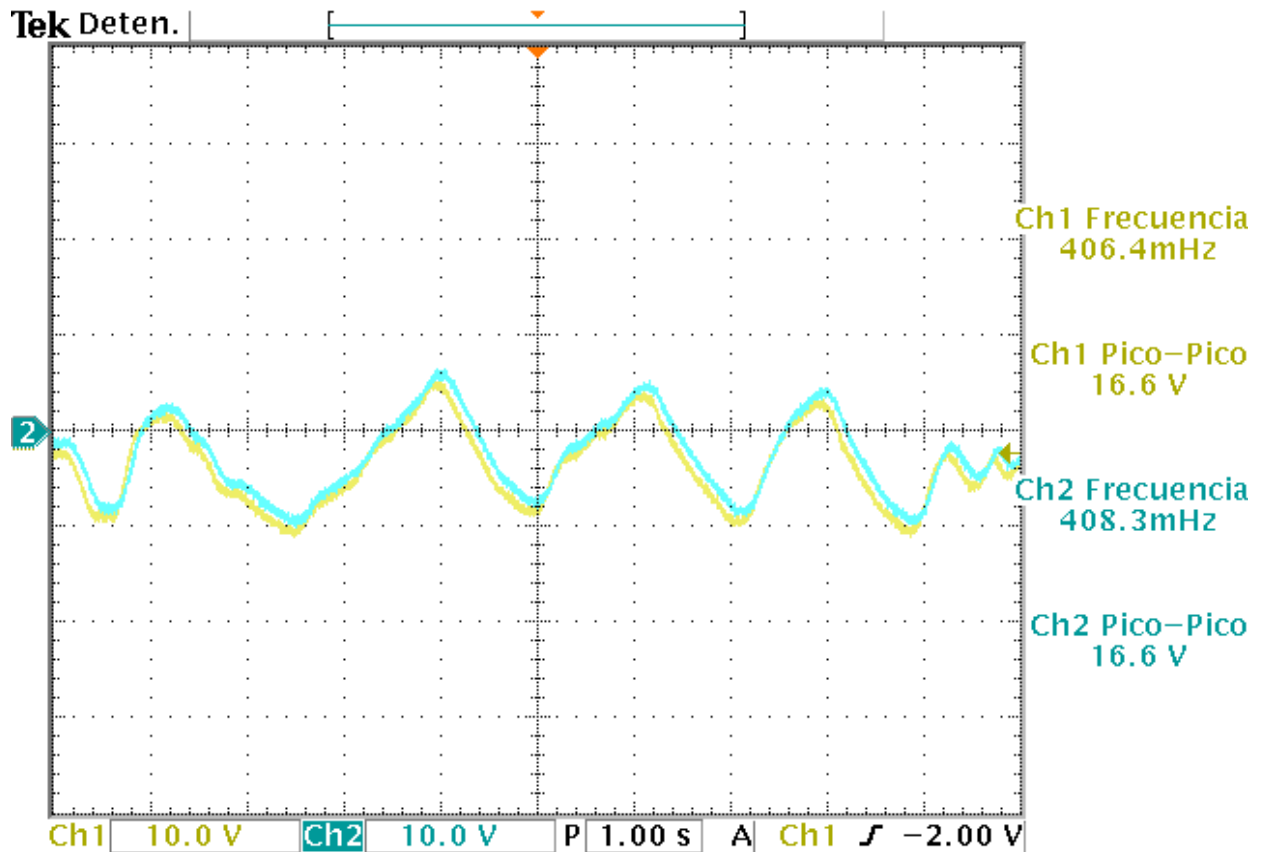


9 Jul 2002
11:20:52



9 Jul 2002
11:38:51

Y aquí podemos apreciar que con una señal aleatoria el comportamiento del sistema es muy bueno, puesto que sigue a la referencia bastante bien



9 Jul 2002
11:54:09

CONCLUSIÓN Estamos muy satisfechos con los resultados que se obtuvieron al construir el controlador. Creemos que fue un buen controlador. Aprendimos mucho, especialmente al encontrarnos con el problema de identificar el polo de la función de transferencia. Tuvimos muchos problemas al hacer la etapa de potencia por que pensábamos meter PWM pero tuvimos muchos problemas con la polaridad del modulador y con la dirección de giro. Pero a fin de cuentas resultó, gracias a que nos prestaron un motor con su etapa de potencia y un tacómetro. Y fue de mucho provecho.