Calibración e implementación de un doble lazo PID

Georgina C. Albornoz

Introducción

La tarea propuesta es desarrollar un método de calibración con base matemática para el lazo de control V-Omega implementado en el robot RoMAA-II. Este sistema mediante sus componentes proporcionales, integrativas y derivativas logra manipular la velocidad lineal y angular del vehículo.

En primera instancia se buscan técnicas para el análisis de sistemas con múltiples controladores que tengan acoplamientos fuertes entre sus lazos. Conociendo las herramientas disponibles, se procede a realizar un estudio para lograr un entendimiento integral del funcionamiento y determinar que método es adecuado emplear.

Luego de investigar diferentes teorías, se decidió aplicar un diseño que permite conservar las interacciones entre los distintos bloques. Para concretarlo se debieron realizar modificaciones estructurales que no cambiaran el funcionamiento efectivo del sistema, pero permitiera con una nueva distribución cumplir con las exigencias del método seleccionado.

Finalmente se obtuvo un esquema de control que cumple los requerimientos para dirigir el robot en cualquier dirección, con los beneficios de sintonizar los distintos lazos PID conforme se precisa, pudiendo modificar la respuesta por medio de cálculos matemáticos no demasiados complejos.

Métodos de sintonización de sistemas multilazos PID

La calibración de PID simple presenta gran variedad de métodos y teorías para aplicar con el fin de hallar el valor de la constante proporcional, integrativa y derivativa; desde el clásico de Ziegler-Nichols[1] donde se desarrollaron una serie de pasos heurísticos hasta alternativas donde será necesario modelar el sistema para utilizar herramientas como álgebra matricial o cambiar del dominio del tiempo a la frecuencia como lo muestran Åström-Hägglund [10]entre otros.

Con el avance en las industrias y las múltiples aplicaciones dadas a estos controladores, comenzaron a presentarse procesos de mayor complejidad donde había más de una variable para manipular, siendo necesario calibrar varios PID. En los casos en que éstos actúan de forma independientes pudiendo llegar a sus constantes considerando sistemas SISO (una entrada, una salida); sin embargo cuando existen acoplamientos entre los distintos lazos no se puede proceder del mismo modo.

Los primeros métodos fueron extensiones de los SISO, en el dominio de la frecuencia Nyquist-Evan's [4][5]propusieron pasos usando las ganancias y frecuencias característicos. Luego Mayne[2], formuló pasos donde se obtenía un sistema MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas) a través de un proceso de aplicar simultáneamente Nyquist a un SISO.

Otra opción es la presentada por Persson[6], ésta parte de la ubicación de polos en la función de transferencia para poder obtener la respuesta deseada, con la condición de tener modelizada por completo la planta donde trabajará el controlador.

Mientras seguían apareciendo diversos procedimientos para obtener los parámetros, uno de los problemas mas persistentes era el acople entre lazos que se apreciaba en repetidos sistemas. Intentando subsanar las teorías desarrolladas hasta el momento, se descubrió que colocando controladores en cascada con el sistema se lograba una diagonalización. Con esta novedad Rosembrock[7] presentó un método para descomponer un sistema MIMO en múltiples SISO descentralizados en caso de presentar la posibilidad de diagonalizarse. Una vez disociado, se puede tomar cualquier método para sintonización disponible en PID simples.

Nuevas alternativas fueron surgiendo como las matrices de desacople, las cuales se ubican con el fin de minimizar el efecto de las interacciones.

Una de las soluciones que combina rasgos empíricos y científicos, se encuentra en el dominio de la frecuencia bajo el nombre de Biggest Log Modulus Tuning (BLT) desarrollado por Luyben[9]. Mediante la calibración obtenida siguiendo la publicación de Ziegler–Nichols se obtiene de los distintos SISO's del sistema, sus parámetros. Éstos serán influenciados por medio de una constante limitada según se desee una respuesta mas estable o mas rápida. En cualquier caso se podrá verificar la estabilidad del sistema mediante Nyquist, renovando iterativamente la constante previa.

Así como los nombrados, se difundieron numerosas teorías las cuales abarcaban distintas cuestiones a considerar dentro de la planta y características requeridas en la respuesta dada por los PID's, las cuales determinaban el método a emplear.

Funcionamiento del lazo V-Omega

Comportamiento

El esquema de control es un sistema TITO, donde sus entradas son las velocidades de referencia lineal y angular, mientras que las salidas son las velocidades angulares ofrecidas por las ruedas.

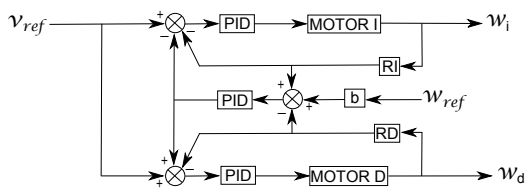

Figura 1: Lazo V-Omega

En caso de desplazamiento en línea recta, la entrada de velocidad angular permanecerá nula. Por su parte, se observa que las velocidades correspondientes a cada rueda se restan, y la diferencia es afectada por el PID central para reingresar a los motores luego de ser comparada nuevamente con la velocidad de referencia. De esta forma nos aseguramos eliminar cualquier diferencia, ya sea proveniente del piso donde se mueve el móvil o a causa de las normales diferencias de los motores.

En el momento en que deba girar, la entrada de velocidad angular deberá ser positiva o negativa para indicar el sentido de giro, horario ó antihorario. Se puede apreciar que para lograr la rotación, se realimenta a cada rama donde se hallan los motores con signo opuesto, es decir en una rueda aumentará la velocidad y en la otra disminuirá. Si solo se mantiene la entrada angular y se elimina la lineal, comenzará a girar sobre el propio eje sin mostrar desplazamiento.

De esta forma se consigue un vehículo de tracción diferencial que es accionado mediante una velocidad lineal, igual para cada rueda, además de la velocidad angular que permite e indica el sentido de giro.

Características

El doble lazo proporciona la capacidad de desplazarse en linea recta y girar sin tener zigzagueos debido a que se tiene control en ambas velocidades y a su vez, existe un tercer PID donde logran relacionarse las salidas con las entradas.

Dentro de las principales cualidades sobresale la de autocompensarce frente a perturbaciones externas provenientes del ambiente en el que se desplaza u ocasionados por efectos propios de la estructura como puede ser las discrepancias entre los motores o rozamientos.

Por medio de simples ecuaciones de dinámica se consigue obtener la velocidad lineal y angular del móvil en base a las velocidades angulares presentados como salida:

$$v = (w_d + w_i) \cdot \frac{R}{2} \tag{1}$$

$$w = (w_d - w_i) \cdot \frac{b}{2} \tag{2}$$

donde R es el radio de las ruedas y b la distancia entre ellas.características

Si bien la configuración dispuesta presenta muchas ventajas, el análisis y la calibración de los distintos PID se vuelve una tarea engorrosa.

Para adquirir un buen entendimiento de como funciona el lazo, se deben estudiar las distintas realimentaciones que posee y cuanto éstas se ven afectadas por los distintos componentes de los controladores además de conocer las repercusiones en las distintas salidas.

Lo primero a advertir son las realimentaciones no convencionales realizadas, es decir una salida vuelve e ingresa al sistema pero no en su respectiva entrada y sin respetar la misma magnitud, lo cual se observa en la figura 1.

Por otro lado, el lazo de control se forma por tres controladores PID, pero solo 2 pares de entradas-salidas, lo cual presenta otra dificultad en el momento de intentar desacoplar el sistema con el fin de conocer la influencia de cada factor.

Estas propiedades impiden alcanzar una sintonización de forma sencilla por medio de métodos heurísticos, resultando un lazo de control pobremente calibrado desperdiciando sus óptimas cualidades.

Lo primordial de este lazo, se encuentra en el punto de suma central, donde convergen ambas salidas y la entrada de velocidad angular, cada una previamente multiplicada por su correspondiente escalar de forma tal que haya compatibilidad de unidades. En este lugar se lograran las compensaciones en caso de que las velocidades en las ruedas sean dispares por disturbios en el suelo o a causa de la diferente reacción en respuesta de los motores; tarea resuelta por el PID allí designado.

Dependiendo de la sintonización de los PID, por medio de este lazo de control se puede tener un sistema en donde constantemente se estén eliminando los errores, lo que asegura poder alcanzar los valores de referencia con rapidez.

Cálculos de sintonización y aplicación

Conociendo el funcionamiento del lazo V-Omega, se procede a escoger el método más adecuado a utilizar. Dentro de las posibles teorías expuestas anteriormente se evitaron las que contienen desarrollos empíricos con el objetivo de elaborar un proceso sobre el cual se tenga amplio dominio. La opción de trabajar en el dominio de la frecuencia, en este caso también es descartada dado que para ello se debería tener conocimientos específicos de la planta, además de establecer donde deben ubicarse los polos y zeros en la respuesta deseada, lo cual también puede volverse dificultoso a la hora de deducir.

Otra consideración a tener en cuenta es el fuerte acoplamiento que se presenta entre los lazos, ya que muchas técnicas no lo consideran o solo están destinadas a lazos de una débil interacción. Como última observación a realizar, son las realimentaciones, ya que se encuentran dispuestas de forma que los análisis matemáticos, como la obtención de las funciones de transferencias se vuelven complejos.

En base a lo expuesto se seleccionó el método presente en "Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes"[16] presentado por Truong Nguyen Luan Vu y Moonyong Lee en el año 2010.

En el mismo se procede a separar los lazos del sistema de control, con la particularidad de mantener intacta las interacciones dinámicas entre los bloques. Una vez que hemos descompuesto el sistema TITO en dos SISO independientes (en nuestro caso), se prosigue a sintonizar por separado cada lazo en particular, mediante la teoría IMC pudiendo efectuarse por cualquier otro método a elección.

Análisis de la disposición del lazo de control

La incorporación de las interacciones entre los lazos para hallar los parámetros de los PID se basa en la utilización de la matriz de funciones de transferencia efectiva .

El efecto que posee un lazo en particular sobre el resto de los lazos se alcanza por medio de la matriz de ganancia relativa dinámica. Ésta representa las relaciones dinámicas entre la matriz de funciones de transferencia a lazo abierto y lazo cerrado, de cada relación entrada-salida que presente el sistema de control.

Una vez obtenidas todas las funciones, se dispone a la descomposición del sistema, en múltiples sistemas SISO independientes entre ellos pero manteniendo la relación presentada en su estado de TITO.

Como primer paso se analizó la estructura del lazo V-Omega para encontrar las cuatro ecuaciones que representaran el comportamiento del sistema. En ésta búsqueda se decidió hacer una reforma que posibilitara un estudio menos complejo, pero que sin embargo no alterara ningún aspecto funcional. Partiendo de esta premisa, se consideró necesario actuar sobre las salidas para lograr compatibilidad total con las entradas, es decir, que exista una entrada de velocidad lineal y otra de velocidad angular, cada una con su respectiva salida.

Una modificación que también se consideró necesaria fue unificar las velocidades angulares de las ruedas y poseer solo una, que represente la velocidad final del robot. De la misma forma se trató la velocidad lineal. Para ello se recurrió a las ecuaciones de dinámica en 1 y 2

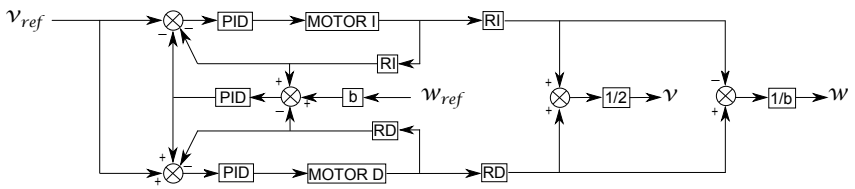

Figura 2: Lazo V-Omega con las salidas modificadas

Una vez establecido el lazo, se comenzaron a realizar los cálculos para obtener las cuatro funciones de transferencias del sistema de control. En ése momento se notó que la disposición a la que se había llegado no cumplía con los requerimientos mostrados en el método a aplicar. La estructura aconsejada es la expuesta en la figura 3

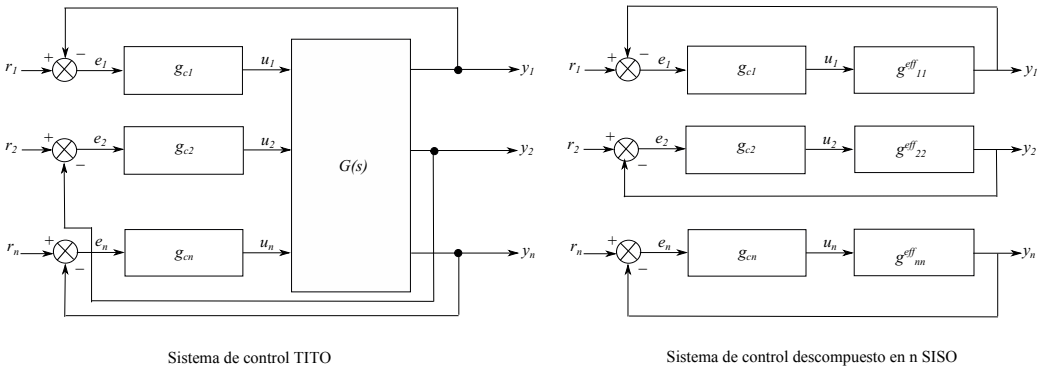

Figura 3: Estructura solicitada

Las entradas r_n son afectadas en primer lugar por los controladores g_{Cn} y luego por la ganancia central del sistema $G(s)$, en ese punto las salidas y_n se realimentan con su respectiva entrada.

Debido a que las modificaciones antes realizadas a nuestro sistema aún no son las que se pretenden, se vuelve a diagramar.

Del esquema de la figura 2 se mantienen los bloques que proporcionan la velocidad lineal y angular basadas en las ecuaciones de dinámica, pero se alteran las realimentaciones.

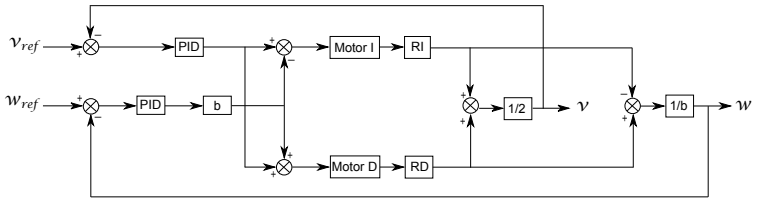

Figura 4: Lazo V-Omega propuesto

A partir de éste momento ya no habrá un PID para cada motor y otro central, debido a que la velocidad lineal enviada a cada motor es la misma, se coloca un controlador cuya salida se repite para ambas ruedas. A continuación se obtiene la velocidad final.

La entrada que posibilita el giro, se afecta por un segundo controlador y luego se aplica a los motores. Finalmente, al igual que en el caso anterior, se obtiene la velocidad angular que alcanza la planta.

El beneficio que proporciona éste cambio, es sintonizar 6 parámetros, en lugar de 9 como en el lazo original.

A razón de la nueva disposición se puede alcanzar un entendimiento del lazo con mayor rapidez, debido a que se puede realizar un análisis a simple vista con mayor claridad.

Teniendo la distribución final, se comienza a aplicar el método de calibración.

Matriz de funciones de transferencia

En principio la matriz se obtiene sin modelar la planta, es decir, considerando bloques generales. Ésta se puede representar como:

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Para la obtención de cada una, se considerarán las relaciones de entradas y salidas de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$V_{salida} = y_1$$

$$\omega_{salida} = y_2$$

$$V_{entrada} = u_1$$

$$\omega_{entrada} = u_2$$

Los motores en un primer momento se reemplazarán por ganancias representativas como G_1 y G_2, siendo el lado izquierdo y derecho respectivamente. Al aplicar álgebra matricial, se obtendrán las siguientes relaciones:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}.(G_1 + G_2). & \frac{1}{2}.(G_2 - G_1).b \\ \frac{1}{b}.(G_2 - G_1) & (G_2 + G_1) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$y_1 = \frac{1}{2}.\left[(u_1 - b.u_2).G_1 + (u_1 + b.u_2).G_2\right]$$

$$y_1 = \left[\frac{1}{2}.(G_1 + G_2).u_1 + \frac{1}{2}.(G_2 - G_1).u_2.b\right]$$

$$y_2 = \frac{1}{b}.\left[(u_1 + b.u_2).G_2 - (u_1 + b.u_2).G_1\right]$$

$$y_2 = \left[\frac{1}{b}.(G_2 - G_1).u_1 + (G_2 + G_1).u_2\right]$$

Siendo conocidas las funciones de transferencia de la matriz mostrada en 4, se prosigue calculando las funciones de transferencia a lazo abierto efectivas para cada lazo independiente:

$$G_{11}^{eff} = g_{11} - \frac{g_{21}.g_{12}}{g_{22}} \tag{6}$$

$$G_{22}^{eff} = g_{22} - \frac{g_{21}.g_{12}}{g_{11}} \tag{7}$$

Para conocer el valor final de éstas funciones, es necesario ahondar en la representación matemática de los motores.

Modelado de los motores

Para obtener las funciones de transferencia aproximadas de los motores acoplados a las ruedas y al cuerpo del RoMAA, se consideró el eje de rotación como el punto medio entre las dos ruedas y se despreció el efecto de la rueda castor en el comportamiento de la trayectoria.

El proceso que se llevó a cabo se basó en excitar ambos motores a la vez por medio de un PWM con el duty cicle al máximo (de modo que la señal sea próxima a un escalón) a lazo abierto, logrando una trayectoria aproximadamente recta.

Al mismo tiempo se relevó la velocidad lineal de cada motor. Éstos datos fueron usados para confeccionar una curva de respuesta al escalón en el dominio del tiempo.

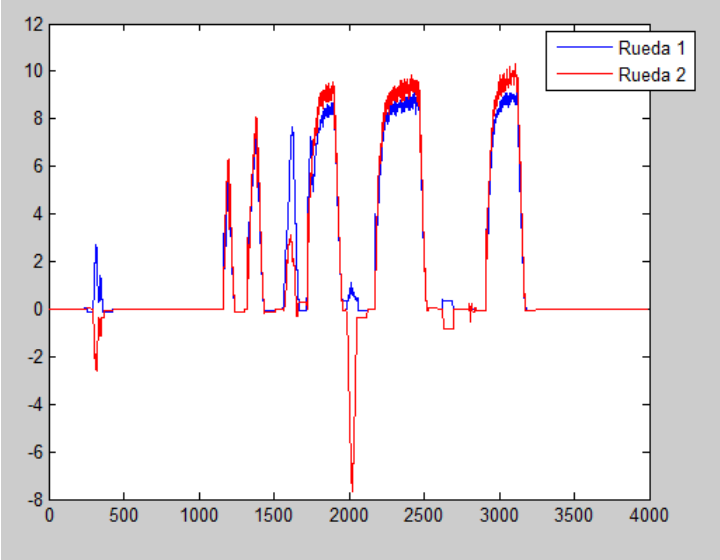

Figura 5: Curvas de respuesta al escalón dadas por los motores

Como se puede ver, se excitó tres veces a los motores; una vez finalizado el transitorio se trabaja con la señal establecida.

Se puede apreciar que son consecuentes con un sistema de primer orden debido a que se alcanza su valor máximo al derivar para $t = 0$.

Los picos negativos, son errores sistemáticos propios de las mediciones y que no deben ser tomados en cuenta.

Una vez transformadas las expresiones al dominio de la frecuencia, se consiguió obtener la función de transferencia que corresponderán a G_1 y G_2.

En nuestro caso, ellas son:

$$G_1 = \frac{4,245}{s + 2,86} \qquad G_2 = \frac{4,628}{s + 2,86} \tag{8}$$

Se advierte que si bien se intenta utilizar motores idénticos, cada uno presentará características intrínsecas a su estructura y fabricación.

Cabe aclarar que para obtener expresiones matemáticas que representen el comportamiento de los motores en forma precisa, es necesario considerar varios factores, alguno de ellos tomando a la estructura como unidad y otros por separado. En cuyo caso existen diversas herramientas para el modelado de motores dependiendo de la clasificación con la que se trabaje.

Cálculo de los parámetros de los PID

Conociendo nuestra planta se procede a la obtención directa de los parámetros de los dos controladores de nuestro sistema.

Con las funciones de transferencias obtenidas en la matriz 5 se aplican las ecuaciones 6 y 7:

$$G_{11}^{eff} = 2.\left(\frac{G_1.G_2}{G_1 + G_2}\right) = \frac{39,29.s^2 + 224,7.s + 321,4}{8,873.s^3 + 76,13.s^2 + 217,7.s + 207,6} \tag{9}$$

$$G_{22}^{eff} = 4.\left(\frac{G_1.G_2}{G_1+G_2}\right) = \frac{78,58.s^2+449,5.s+642,8}{8,873.s^3+76,13.s^2+217,7.s+207,6} \tag{10}$$

Una consideración que presenta el método a utilizar, es que las funciones de transferencias efectivas puedan resultar complejas matemáticamente, por lo cual se aplica un modelo para reducir el orden de las ecuaciones, con el fin de simplificar los procesos dinámicos.

Cualquier técnica de reducción puede ser aplicada, el propuesto se denomina modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT).

Para lograr la reducción primero se deben expandir las ecuaciones 9 y 10 en series de Maclaurin, resultando en la forma:

$$G_{nn}^{eff}(s) = a_{nn} + b_{nn}.s + c_{nn}.s^2 + d_{nn}.s^3 \tag{11}$$

Conocidos los diferentes coeficientes, se realizan las operaciones necesarias:

$$K = a_{nn}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{2.c_{nn}}{a_{nn}} - \left(\frac{b_{nn}}{a_{nn}}\right)^2}$$

$$\vartheta = -\frac{b_{nn}}{a_{nn}} - \sqrt{\frac{2.c_{nn}}{a_{nn}} - \left(\frac{b_{nn}}{a_{nn}}\right)^2}$$

En estas condiciones, se aplica FOPDT resultando en las nuevas expresiones:

$$G_{nn}^{r-eff} = \frac{K.e^{-\vartheta.s}}{\tau.s+1}$$

$$G_{11}^{r-eff} = \frac{1,548.e^{-0,000259.s}}{0,3493.s+1} \qquad G_{22}^{r-eff} = \frac{3,096.e^{-0,000685.s}}{0,3488.s+1} \tag{12}$$

Estas ecuaciones representan el comportamiento de los lazos SISO actuando independientemente. Modificandolas, se intentará lograr la conducta deseada por el sistema.

En el caso expuesto, sólo se hizo variar la contante de tiempo en $\tau = 0,1$ para lograr acelerar la respuesta.

Las ecuaciones finales fueron:

$$G_{11}^{r-eff} = \frac{1,548.e^{-0,000259.s}}{0,1.s+1} \qquad G_{22}^{r-eff} = \frac{3,096.e^{-0,000685.s}}{0,1.s+1}$$

Una vez especificadas, los parámetros de los PID se logran según

$$\tau_I = \tau + \frac{\vartheta^2}{2.(\lambda+\vartheta)}$$

$$K_C = \frac{\tau_I}{K(\lambda+\vartheta)}$$

$$\tau_D = \frac{\vartheta^2}{2.(\lambda+\vartheta)}.\left[1 - \frac{\vartheta}{3.\tau_I}\right]$$

Cada controlador se expresa como

$$G_C(s) = K_C.\left(1 + \frac{1}{\tau_I.s} + \tau_D.s\right)$$

A partir de esta expresión es posible hallar para cada lazo SISO, los tres parámetros que conforman el PID. En nuestra aplicación, los resultados fueron:

$$K_{P_1} = 2,2505 \qquad K_{P_2} = 2,2379$$

$$K_{I_1} = 6,4428 \qquad K_{I_2} = 6,416$$

$$K_{D_1} = 7,5558.e^{-7} \qquad K_{D_2} = 5,216.e^{-6}$$

Resultado de las simulaciones

Mediante la aplicación del método antes descrito, se obtuvieron los factores de cada PID del lazo V-Omega. Para comprobar que el comportamiento dados por éstos sea el requerido, se utilizó la herramienta de simulación ScicosLab la cual por medio de diagrama de bloques permite constituir el sistema de control.

Por medio de éste software, se permite realizar diferentes variaciones pudiendo anticiparnos a una aproximación de cual será la respuesta dada por el robot en diversas situaciones.

La ventaja que ofrece éste instrumento es la posibilidad de realizar un seguimiento de como actuarán los controladores una vez integrados al sistema final, para poder optimizar al máximo las prestaciones.

A continuación se examinan distintos casos de aplicación, donde se irán alternando las entradas para notar como cada una de ellas afectan las salidas.

Se puede estudiar también, la influencia de cada parámetro y cuanto se ve afectado un lazo PID, respecto al restante.

Todos estos análisis dan una idea de las reacciones a esperar una vez puesto en marcha el robot.

Análisis del lazo V-Omega modificado

Para conocer la influencia de cada entrada en las salidas, se procede a proveer de una señal escalón en la entrada correspondiente a la velocidad lineal, eliminando la entrada de velocidad angular. En el caso de ser un lazo totalmente independiente del otro, se esperaría sólo señal en la salida lineal, pero éste no es el caso debido al acoplamiento que se presenta en el sistema. En la figura 6 se observa que la salida lineal presenta una respuesta con sobrepico, pero luego de 14seg se establece. La salida angular si bien no es totalmente nula, presenta ondulaciones de 0,1.

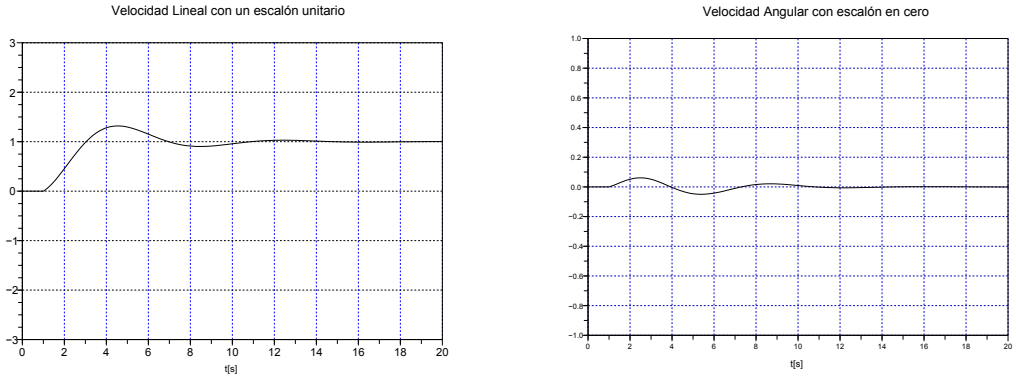

Figura 6: Entrada lineal excitada con un escalón y entrada angular nula

Cuando la entrada escalón se sitúa en la entrada de velocidad angular, tendremos un resultado similar al anterior. En la salida angular se observa un sobrepico que luego de 10 seg se estabiliza, mientras que en la salida lineal se observan ondulaciones de 0,01, prácticamente imperceptibles.

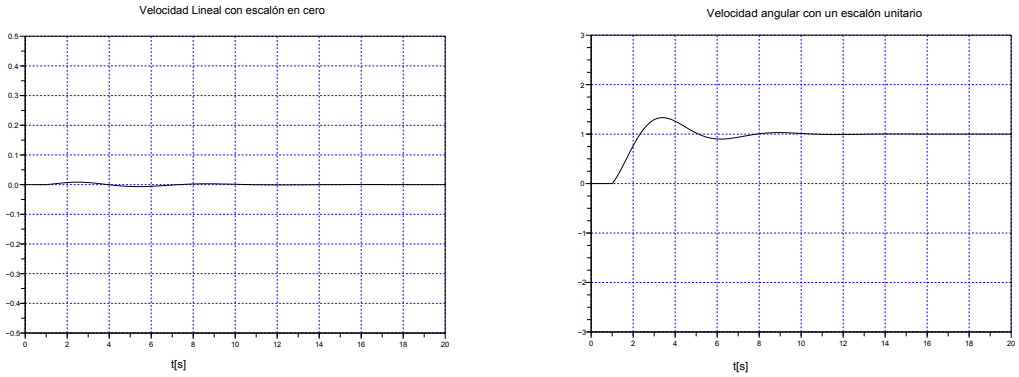

Figura 7: Entrada lineal nula y entrada angular con un escalón

Aplicando a ambas entradas, una señal escalón se obtendrán respuestas en las dos salidas. Cada una presenta sobrepicos como en los casos anteriores, diferenciándose en su velocidad de establecimiento.

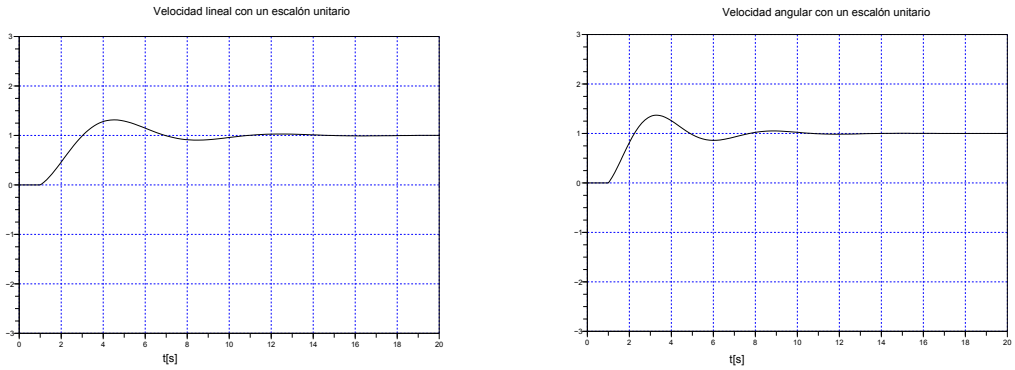

Figura 8: Ambas entradas excitadas con un escalón unitario

A través de la superposición de las entradas se puede comprobar que si bien el proceso matemático para el calculo de los controladores, individualizó dos SISO, cuando se monta nuevamente el sistema integrado todavía se observa una perturbación de un lazo sobre el otro, por más mínima que ésta sea.

Los sobrepicos y el tiempo de establecimiento pueden ser mejorados cambiando la respuesta deseada en la ecuación 12, hasta obtener el comportamiento requerido para la optimización del sistema.

Referencias

[1] Ziegler, J. G.; Nichols, N. B. “Optimum Settings for Automatic Controllers”.

[2] Mayne, D. Q. H1979I: “Sequential design of linear multivariable systems”.

[3] Evans, W. R., “The Use of Zeros and Poles for Frequency Response or Transient Response”.

[4] Evans, W. R. , "Control Systems Synthesis by Root Locus Method", (1950).

[5] Nyquist, H., “Regeneration Theory”, Bel1 System Tech. .Z., ll (1932).

[6] Persson, P. H1992I: “Towards Autonomous PID Control”, PhD thesis ISRN.

[7] Rosenbrock, H. H. H1969I: “Design of multivariable control systems using the inverse nyquist array.” In Proc. IEE, vol. 116, pp. 1929–1936.

[8] Rosenbrock, H. H. H1970I: “State-Space and Multivariable Theory”. Nelson, London, U.K.

[9] Luyben, W. L., “Simple Method for Tuning SISO Controllers in Multivariable Systems”. Ind. Eng. Chem. Res. 1986, 25, 654.

[10] Astrom, K. J. y Hagglund, T. “Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins”. (1984), Automatica, 20, 645-651.

[11] Astrom, K. J. y Hagglund, T. “PID Controllers: Theory, design and Tuning”, (2nd edition) (1995) research triangle park NC instrument society of America.

[12] Qing-GuoWang, Chang-Chieh Hang y Biao Zou , “A frequency response approach to autotuning of multivariable controllers”, (1997), Department of Electrical Engineering, National University of Singapore, Singapore

[13] L. Huang, W. Yu y S. K. Jhajharia , “Speed Control of Differentially Driven Wheeled Mobile Robots- Tracking and Synchronization”, (2003), IEEE Inslmmenlalion and Measurement, Technology Conference.

[14] Weng K. Ho, Tong H. Lee, y Oon P. Gan, “Tuning of Multiloop Proportional-Integral-Derivative Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications”, (1997),Centre for Intelligent Control, c/o Department of Electrical Engineering, National University of Singapore.

[15] Qing-GuoWang, Wen-Jian Cai, Zhen Ye y Chang-Chieh Hang, “PID Control for Multivariable Processes”, (2008), Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[16] Truong Nguyen Luan Vu y Moonyong Lee, “Independent design of multi-loop PI/PID controllers for interacting multivariable processes”, (2010), School of Chemical Engineering and Technology, Yeungnam University.