

# Construcción y Control Difuso de una Transmisión de Variación Continua: Resultados Experimentales\*

Cruz Villar C.A., Alvarez Gallegos J., Flores Sánchez O.

CINVESTAV-IPN, Sección de Mecatrónica, Depto. de Ingeniería Eléctrica, Av. Instituto Politécnico Nacional, No. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, Apdo. Postal 14 740, México D.F.

**Resumen.** Uno de los principales beneficios al usar sistemas de transmisión de variación continua (STVC) es que debido a que su razón de transmisión varía continuamente, es posible operar un sistema de propulsión rotacional (por ejemplo el motor de un auto) en un amplio rango de velocidades y cargas, independientemente de los requisitos de par y velocidad en el sistema de salida. Entre los diversos tipos de STVC, los esféricos presentan diversas ventajas respecto a otras opciones. En entre las ventajas se pueden señalar: diseño cinemático sencillo, simpleza del actuador, transición suave entre los estados directo, neutral y reversa sin la necesidad de ningún tipo de embrague, etc. En este trabajo se presenta la construcción y el control difuso de un STVC esférico. El objetivo de control es la regulación de la velocidad del eje de salida. Los resultados experimentales muestran superioridad de la metodología de sintonización difusa sobre el método de oscilación de Ziegler-Nichols.

## 1. Introducción

Un sistema de transmisión es el dispositivo mecánico que se emplea para realizar tareas con diferentes necesidades de par-velocidad, a partir de un sistema de propulsión rotacional. Usualmente las transmisiones están compuestas de diferentes conjuntos de engranes que permiten elegir una relación de transmisión  $r$  dentro de un conjunto finito de ellas. Donde  $r$  se define mediante la ecuación (1),  $\omega_e$  es la velocidad del

sistema de entrada o de propulsión,  $\omega_s$  es la velocidad de la salida o de la carga,  $T_e$  es el par de entrada y  $T_s$  es el par de salida.

$$r = \frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{T_s}{T_e} \quad (1)$$

En un sistema de transmisión de variación continua los cambios de relación de transmisión son continuos, con lo cual se obtiene una curva par-velocidad perfectamente suave. Esta característica implica un menor consumo de energía y una mayor eficiencia del sistema de propulsión integrado al sistema de transmisión [1].

Entre los principales tipos de STVC se encuentran los de banda en V y polea cónica [8], los toroidales [4] y los esféricos [3]. Por otro lado, el STVC esférico presenta diversas ventajas respecto de las otras opciones, entre aquellas se encuentran: diseño cinemático sencillo, simpleza del actuador, transición suave entre los estados directo, neutral y reversa sin la necesidad de ningún tipo de embrague; estas características han permitido el uso del STVC esférico en aplicaciones como robots móviles e interfaces hápticas [7]. En este trabajo se presentan los detalles del control de un STVC esférico. El control tiene como propósito principal regular la velocidad del eje de salida del STVC. La estructura y el principio de operación del STVC considerado en este trabajo se describen en la sección 2. En la sección 3 se presenta la estrategia de control empleada para la regulación de velocidad a la salida ante cambios de velocidad a la entrada. Finalmente, en la sección 4 se muestran los resultados experimentales.

\*Trabajo financiado por el proyecto CONACYT I39342-A

## 2. STVC esférico

El STVC esférico está compuesto de dos pares de rodamientos (ver figura 1), uno de entrada-salida y el otro de dirección. El rodamiento de entrada se conecta al sistema de propulsión y el rodamiento de salida se conecta a la flecha de salida. La esfera es el componente principal del STVC y transmite la potencia del rodamiento de entrada al rodamiento de salida. El par de rodamientos de dirección está conectado entre sí por engranes cónicos con una relación de transmisión de 1 (ver figura 2). Este par de rodamientos determinan el eje de rotación de la esfera, con lo cual es posible variar la distancia entre el eje de rotación de la esfera y los puntos de contacto entre la esfera y los rodamientos de entrada y de salida, variando así la razón par-velocidad del STVC. Asumiendo que no hay “resbalamiento” entre los rodamientos y la esfera, la razón de transmisión entre los ejes de entrada y de salida del STVC está dada por la expresión (2), (ver la referencia [6] para mayores detalles), donde  $\theta$  es el desplazamiento angular del eje conectado a los rodamientos de dirección,  $\omega_1$  es la velocidad angular del eje conectado al rodamiento de entrada y  $\omega_2$  es la velocidad angular del eje conectado al rodamiento de salida. Como puede verse en la expresión (2), idealmente es posible una razón de par infinita, sin embargo, en la práctica hay un límite en el par que puede transmitirse el cual lo determina la fricción de rodamiento entre los metales de la esfera y los rodamientos.

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \tan\left(\tan^{-1}\left(\tan \theta \cos \frac{\pi}{4}\right) - \frac{\pi}{4}\right) \quad (2)$$

## 3. Control Difuso

Como se mencionó en la sección anterior, se pretende regular la velocidad angular del eje de salida del STVC. Es conocido que los controladores proporcional-integral-derivativo (PID) son los más empleados en los sistemas de control industrial debido a que su simplicidad ofrece una fácil implementación desde los puntos de vista de hardware y software, así como un desempeño

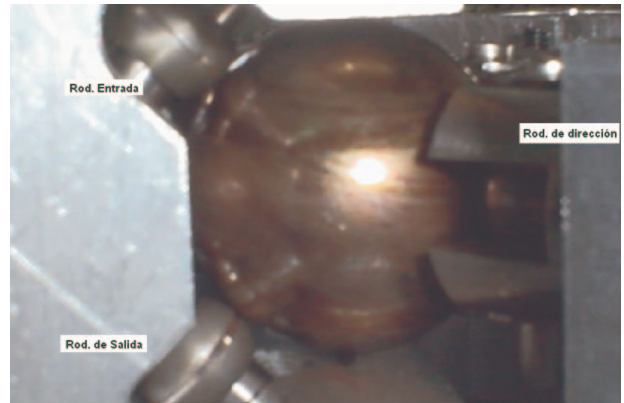


Figure 1: Rodamientos de soporte

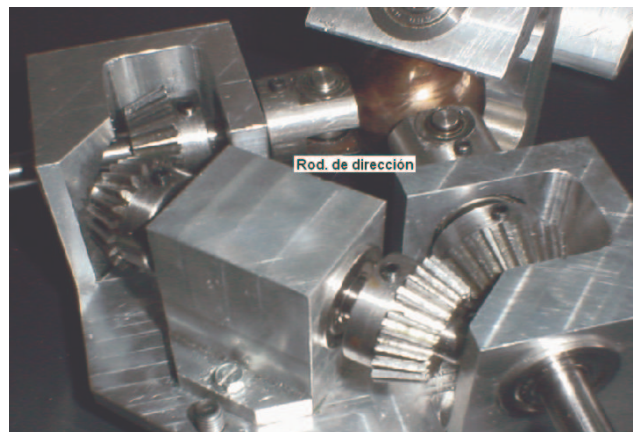


Figure 2: Rodamientos de dirección

adecuado en muchas aplicaciones [10]. Sin embargo, una buena sintonización del controlador PID normalmente requiere de un conocimiento sustancial del proceso y de una amplia experiencia de parte del operador, aún más, en algunos casos no es suficiente una ganancia constante para asegurar buen desempeño del controlador. En esta sección se presenta una técnica de sintonización del controlador PID basada en lógica difusa, con la cual se logra el objetivo de control, (para mayores detalles ver la referencia [9]).

La metodología de control consiste de dos partes, la selección de la ley de control y la de autosintonización, la primera realiza la acción de control de acuerdo a la función de transferencia de un controlador PID dada por la expresión (3), donde  $K$ ,  $T_i$  y  $T_d$  son respectivamente los parámetros proporcional, integral y derivativo. La autosintonización determina los parámetros PID mediante reglas difusas y reconocimiento de patrones.

$$C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

A partir de mediciones de entrada y de salida del sistema y mediante reconocimiento de patrones se encuentran los valores de las variables siguientes: primer pico (PP), razón de tiempo de establecimiento (TE), razón de constante de tiempo (CT) y razón de primer pico (RP),  $RP = PP/PP(\text{anterior})$  las cuales se consideran como entradas al sistema de autosintonización, el proceso de fusificación convierte los valores de las variables de entrada en valores lingüísticos apropiados, los cuales a su vez representan a una variable lingüística. Los valores lingüísticos tienen significados tales como: grande negativo (GN), cero (CO), grande positivo (GP). La inferencia difusa se realiza usando las variables lingüísticas y las reglas difusas almacenadas en una base de conocimiento. Los resultados se defusifican a valores no difusos (factores de ajuste). Los nuevos parámetros PID se determinan al multiplicar los parámetros anteriores por los factores de ajuste. Para la implementación práctica, se considera la regla de operación mínima de Mamdani para la implicación

difusa y el método de centros de área para la defusificación [2]. Las reglas difusas empleadas son:

- 1 Si  $PP = GP$  y  $TE = GP$  y  $CT = GP$  y  $RP = GP$   
entonces  $K = CO$ ,  $T_i = GP$ ,  $T_d = CO$
- 2 Si  $RP = CO$  y  $CT = GP$   
entonces  $K = GP$ ,  $T_i = GN$ ,  $T_d = CO$
- 3 Si  $RP = GP$  y  $TE = GP$  y  $CT = GP$   
entonces  $K = CO$ ,  $T_i = GP$ ,  $T_d = CO$
- 4 Si  $PP = GP$  y  $TE = GP$  y  $CT = GP$  y  $RP = GN$   
entonces  $K = GN$ ,  $T_i = GN$ ,  $T_d = GN$
- 5 Si  $PP = CO$  y  $CT = CO$   
entonces  $K = CO$ ,  $T_i = CO$ ,  $T_d = CO$
- 6 Si  $PP = GN$  y  $CT = GP$   
entonces  $K = CO$ ,  $T_i = GN$ ,  $T_d = GN$

#### 4. Resultados experimentales

En esta sección se describen las condiciones bajo las cuales se realizaron los experimentos, así como el equipo empleado. De acuerdo a la expresión (2), es posible variar la razón de transmisión del STVC al variar el ángulo  $\theta$ . Con este propósito se acopla un servomotor de c.d. (Pittman, GM87 12-31) al eje que contiene a los rodamientos de dirección del prototipo, de manera que la entrada de control es el voltaje proporcionado al motor. La medición de la posición del eje de salida se realiza mediante un decodificador óptico (USDigital, S2-2048-B) de 2048 pulsos por revolución; para obtener la velocidad del eje de salida se emplea diferenciación numérica. Como sistema de propulsión se empleó un motor de c.d. que opera nominalmente a 500 r.p.m. El algoritmo de control difuso se programó en un PC Pentium a 266 MHz, la interfaz entre el prototipo y la PC es una tarjeta de adquisición de datos MultiQ de Quanser Consulting.

##### 4.1 Sintonización Inicial

En la sección anterior se menciona que se requiere un sintonización inicial del controlador PID, tal sintonización se realiza empleando las reglas heurísticas de sintonización de Ziegler y

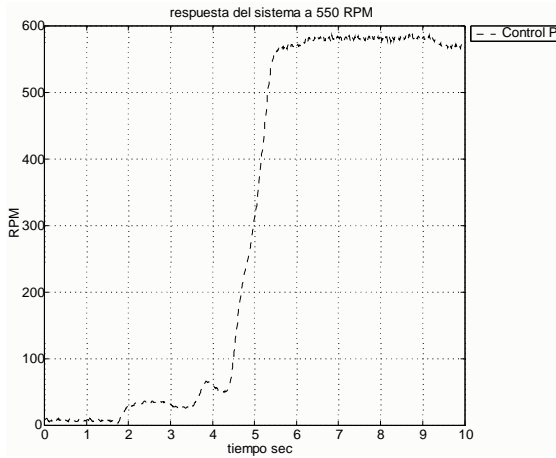


Figure 3: Respuesta del sistema, con control PID sintonizado por las reglas de Ziegler-Nichols

Nichols [11], cuando el punto de operación cambia de 0 rpm a 550 rpm. En la figura 3, se muestra la evolución temporal de la velocidad de salida, en la cual se observa que existe un error de aproximadamente 20 rpm y eventualmente oscila alrededor de la referencia. Los parámetros del controlador bajo estas circunstancias son  $K = 5.04$ ,  $T_i = 3.34$ ,  $T_d = 0.18$

#### 4.2 Sintonización difusa

Al emplear la estrategia de sintonización presentada en la sección anterior y bajo las mismas condiciones del experimento de la sección 4.1, se obtiene la evolución temporal del error mostrada en la figura 4. Aquí se muestra un acercamiento del error a partir de los seis segundos de evolución temporal con el propósito de apreciar la magnitud del error. En este caso los parámetros PID resultaron  $K = 4.12$ ,  $T_i = 2.11$ ,  $T_d = 0.91$

### 5. Conclusiones

En la figura 3, se observa que el prototipo construido es capaz de obtener cualquier valor de razón de transmisión dentro de los límites impuestos por el par transmitido, ya que la curva mostrada es continua. Las oscilaciones alrededor

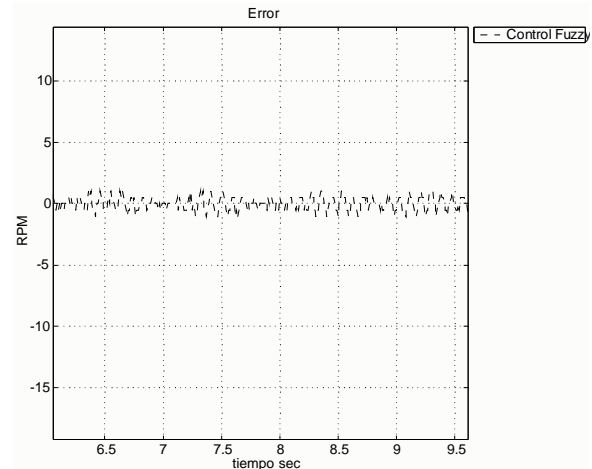


Figure 4: Evolución temporal del error de regulación al emplear el método de autosintonización de la sección 3.

del punto de operación se justifican debido a la zona muerta o “juego” presente en los engranes cónicos. A pesar de la discontinuidad ya comentada, en la figura 4 se observa que el error de regulación, así como la magnitud de la oscilación se reducen considerablemente cuando se emplea el algoritmo de sintonización difusa. Los resultados experimentales obtenidos motivan la implementación del controlador del prototipo como un sistema empotrado que opere en tiempo real.

### Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades proporcionadas por la Sección de Bioelectrónica del CINVESTAV-IPN para el maquinado de las piezas que componen el prototipo.

O. Flores agradece el apoyo financiero del CONACyT

### References

- [1] Brace C. J., Deacon M., Vaughan N. D., Horrocks R. W. and Burrows C. R. “An operating point optimizer for the design and calibration of an integrated diesel/continuously variable transmission

- powertrain,” Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 213, part D, pp. 215-226, 1999.
- [2] Chuen C.L. “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller part I” IEEE Trans. Sys. Man and Cyber., Vol. 20, No. 2, pp. 405-435, 1990.
- [3] J. Kim, K. Kim, Y. Park, C. Park and J. Lee, “Shifting Controller Design via Exact Feedback Linearization of a Spherical Continuously Variable Transmission,” International Conference on Robotics and Automation 2001, pp. 1325-1330, 2001.
- [4] Kluger M.A. and Fussner D.R. “An overview of CVT mechanisms, forces and efficiencies,” SAE paper No. 970688 in SAE Symposium on Transmissions and Driveline Systems, pp. 81-88, 1997.
- [5] Liu S. and Paden B. “A survey of today’s CVT controls,” 36th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4738-4743, 1997.
- [6] Moore C.A. “Continuously Variable Transmission for Serial Link Cobot Architectures”, Laboratory for Intelligent Mechanical Systems, Northwestern University, Master of Science Dissertation, 1997.
- [7] Peshkin M.A., Colgate J.E., Wannasuphprasit W., Moore C.E., Gillespie R.B., Akella P., “Cobot Architecture”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, pp.377-390, 2001
- [8] Shafai E., Simons M., Neff U. and Geering H.P. “Model of a continuously variable transmission,” First IFAC Workshop on Advances in Automotive Control, pp. 99-107, 1995.
- [9] Visioli A. “Tuning of PID controllers with fuzzy logic”, IEE Proc.-Control Theory Appl. Vol. 148, No. 1, pp.1-8, 2001.
- [10] Yu, Cheng-Ching. “Autotuning of PID controllers”, New York, Springer, 1999.
- [11] Ziegler J.G., Nichols N.B., “Optimum setting for automatic controllers”, ASME Trans., pp. 759-768, 1942