Comparación teórico-experimental del desempeño de Servosistemas sincronizados en un proceso de Manufactura.

Mario Alberto Noriega Guerrero [1], M.C. Crescencio Hernández Rosales [2], M.C. Victor Aguilar Orozco [3]
[1]Alumno del posgrado en manufactura avanzada, CIATEQ A.C., [2] IPICYT A.C., [3] CIATEQ A.C.
mario.a.ng13@gmail.com

RESUMEN

Este artículo muestra la comparación teórico-práctica de una aplicación de control de movimiento para la sincronización de 2 servosistemas para un proceso de envoltura. La metodología seguida es: (i) El modelado de los servomotores es realizado con los parámetros del fabricante.(ii) Simulaciones numéricas se usan para sintonizar los controladores PI para el control de velocidad. (iii) Para la parte experimental, se usan las ganancias simuladas y se programaron en un sistema comercial. La comparación teórico-práctica muestra una diferencia de +/- 0.2 rad/s. Esto es aceptable para el proceso que tendrá una tolerancia del 3 % de error de estado estacionario.

PALABRAS CLAVE: Servosistema, Sincronización, Manufactura

1.-INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de servomotores ha alcanzado gran relevancia en aplicaciones de manufactura por su alto desempeño en aplicaciones donde se requiere una elevada precisión en posición y velocidad, algunos ejemplos de su aplicación son: robots manipuladores, sistemas de control numérico, máquinas de corte por láser o chorro de agua, maquinas envolvedoras horizontales y verticales, sistemas de etiquetado automático, sistemas de indexado por mencionar solo algunos. Pero ¿Qué es un servomotor y que función cumple en un servosistema?, es una pregunta con amplias definiciones y una definición es: un motor o actuador que permite a un dispositivo de potencia y control, comúnmente llamado servoamplificador (servodrive del vocablo en inglés) controlar la posición y velocidad angular de mecanismos en un proceso para realizar una tarea en específico. Para conocer la posición y velocidad en cualquier

instante de tiempo se realiza mediante un dispositivo transductor y codificador de estas señales (encoder del vocablo en inglés), las cuales se retroalimentan al servoamplificador.

Para convertir la potencia mecánica, posición y velocidad angular del servomotor, en un movimiento mecánico ya se lineal o rotativo se pueden usar los siguientes dispositivos de trasmisión mecánica: sistema de engranes (reductor de velocidad), piñón-cremallera, tornillo de bolas, sistema de bandas, los cuales deben tener un buen diseño mecánico en precisión, potencia e inercia para implementar un buen servosistema. En la figura 1 se muestra un diagrama a bloques del servosistema.

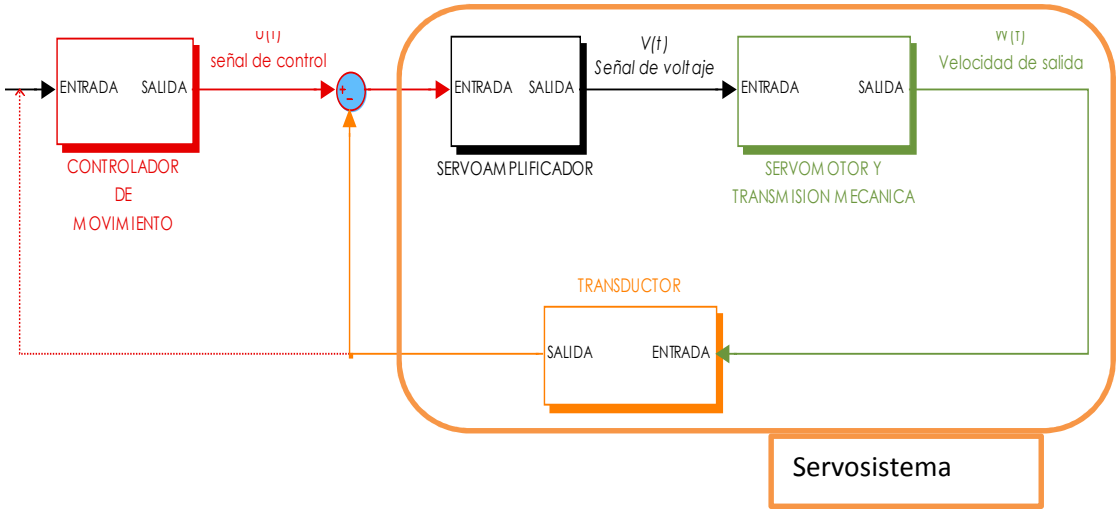

Figura 1.-Diagrama general de un control de movimiento

1.1.-Planteamiento del problema

Para el proceso de manufactura, actualmente este proceso está funcionando por una sincronía mecánica de velocidad mediante engranes, polea y bandas, los cuales requieren un mantenimiento continuo por los desgastes, tienen limitaciones en cuanto a velocidad de operación y si se requiere ajustar a un nuevo formato de envoltura se necesitan diseñar muchos componentes mecánicos aunado al tiempo de paro del proceso para sincronizarlos nuevamente. Es aquí donde se requieren servosistemas que ayuden a resolver el problema de sincronía y flexibilidad para este proceso de envoltura que debido a las características de los mismos ayudaran a mejorar la calidad, repetitividad y por ende la productividad del mismo.

1.2.- Sincronización de servosistemas

Para lograr automatizar el proceso de envoltura es necesario sincronizar más de un servosistema con el fin de coordinar los distintos mecanismos del proceso y lograr la tarea comandada.

Entonces que es sincronía, una definición es: cuando dos o más sistemas dinámico dígase un servomotor, un robot, fenómenos o movimientos coinciden en el tiempo. Existen dos clases de sincronización la mutua y la externa. En la sincronización mutua la información es compartida entre todos los sistemas involucrados, debido a la gran cantidad de información se necesita un controlador de movimiento complejo que pueda realizar esta sincronía, un ejempló es una máquina de control numérico. En la sincronización externa la información del sistema líder llamado "maestro" es compartida a los sistemas seguidores llamados esclavos para que trabajen como si estuvieran unidos mecánicamente.

Este esquema es el que se utilizó en el presente trabajo para sincronizar la velocidad de dos servosistemas, (comúnmente llamado engranaje electrónico). Entonces se necesita un dispositivo que sincronice a dos servosistemas para que respondan a una velocidad comanda en el mismo tiempo, esta tarea la realiza el controlador de movimiento que sincroniza los relojes de los servosistemas involucrados además de generar las trayectorias (perfiles de movimiento) y controla las repuestas de los mismos en un lazo cerrado.

2.-FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PROCEDIMIENTO

En esta parte es necesario conocer qué tipo de servomotor se va a usar, se define un servomotor de corriente directa(cd) de imanes permanentes cuyo campo magnético es fijo, ya que este es una maquina eléctrica y transforma la energía eléctrica en mecánica, y para comprender el comportamiento dinámico ante una señal de entrada, es necesario conocer su modelo matemático cuyas ecuaciones diferenciales[1], se formulan a partir de la ley de Kirchhoff para el circuito eléctrico y la ley de Newton para la parte mecánica se tiene:

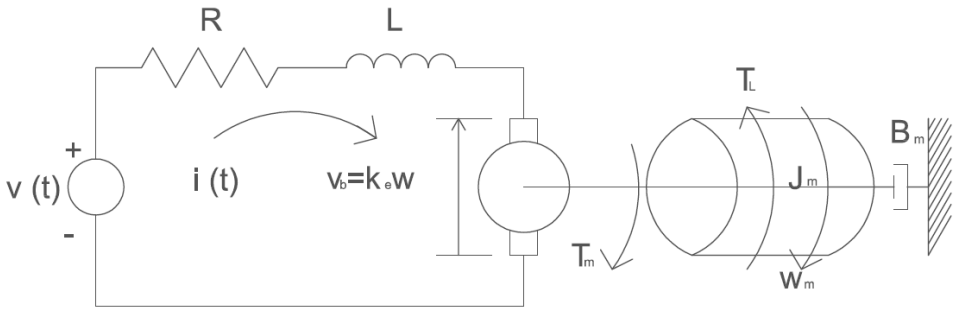

Figura 2 -Diagrama electromecánico de motor de corriente directa (cd).

$$V(t) = L\frac{di}{dt} + Ri(t) + V_B(t) \quad \text{Ecuación(1)}$$

$$T_m = J_m\frac{d\omega_m}{dt} + B_m\omega_m + T_L \quad \text{Ecuación(2)}$$

Dónde:

TABLA 1.- DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE SERVOMOTOR

Parámetro	**Definición**	**Parámetro**	**Definición**
V(t)	Voltaje de entrada (V)	T_m	Torque eléctrico del motor (N.m)
L	Inductancia de la armadura (H)	J_m	Momento de inercia del motor(N.m.s^2/rad)
R	Resistencia de armadura (Ω)	T_m	$K_t\, i(t)$ (N.m)
i(t)	Corriente del motor (A)	K_t	Constante de torque del motor (N.m/A)
K_e	Constante de voltaje (V.s/rad)	ω_m	velocidad angular del motor (rad/s)
$V_B(t)$	Voltaje de fuerza electromotríz	$V_B(t)$	$K_e\, \omega_m$ (V)
B_m	Coeficiente de fricción viscosa del motor(N.m.s/rad)	T_L	Torque de perturbación (N.m)

3.-MODELADO MATEMÁTICO DEL SERVOMOTOR

Sustituyendo $V_B(t) = K_e\,\omega_m$ en ec. (1) y $T_m = K_t\, i(t)$ en ec.(2), manipulando algebraicamente y aplicando transformadas de Laplace con condiciones iniciales iguales a cero, se obtiene la siguiente ecuación: $W(s) = \dfrac{K_t V(s)}{(Ls+R)(J_m s + B_m) + K_e K_t} - \dfrac{(Ls+R)T_L(s)}{(Ls+R)(J_m s + B_m) + K_e K_t}$ Ecuación 3

Si T_L=0, y la inductancia por ser muy pequeña en comparación a la resistencia se toma L≈ 0 y se obtiene la siguiente ecuación [2]: $\dfrac{W(s)}{V(s)} = \dfrac{K_m}{\tau s + 1}$ Ecuación 4

Dónde: $K_m = \dfrac{K_t}{RB_m + K_e K_t}$; $\tau = \dfrac{RJ_m}{RB_m + K_e K_t}$

La ecuación 4 permite simular la respuesta del servomotor a una entrada escalón de voltaje y poder observar su respuesta en lazo abierto. Para controlar la respuesta de velocidad del servomotor en lazo cerrado y cuando se le aplique un escalón de velocidad, se utiliza un controlador del tipo Proporcional-Integral [3] cuya ecuación se define como: $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt$ Ecuación 5 Dónde:

K_P= Constante de ganancia proporcional K_i= Constante de ganancia integral

u(t)= Señal de control e(t)= Señal de error

La ganancia proporcional permite al sistema responder más rápido o más lento dependiendo de la magnitud y signo del error, la ganancia integral le permite al sistema estabilizar su respuesta en estado estacionario, es por esa razón que el controlador PI(proporcional-integral)es muy utilizado en la mayoría de aplicaciones industriales. Aplicando transformada de Laplace a la ecuación 5 con condiciones iniciales iguales a cero se tiene la siguiente ecuación:

$U(s) = K_p E(s) + K_i \dfrac{E(s)}{s}$ Ecuación 6

Con las ecuaciones 4 y 6 se procede a diseñar el modelo en Laplace para su simulación ante una entrada escalón de velocidad, que se muestra en la figura 3:

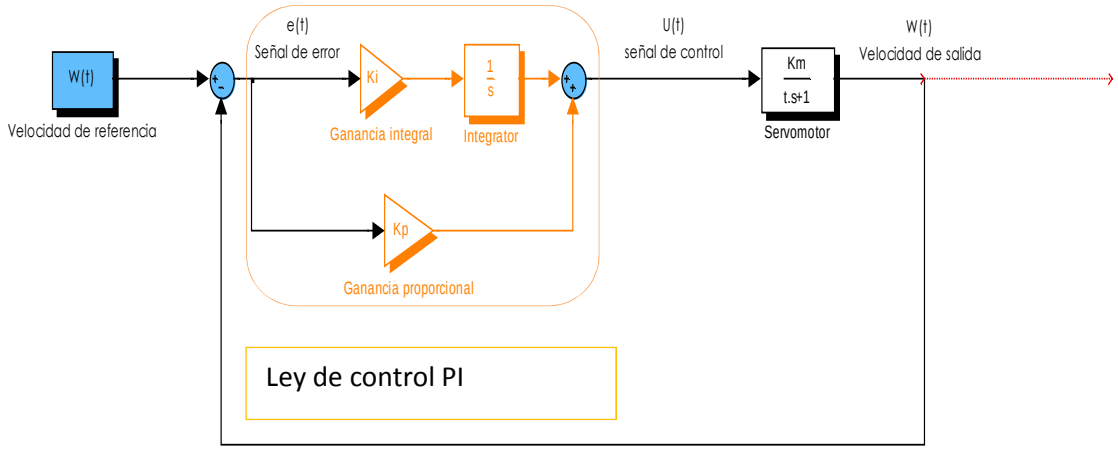

Figura 3.- Sistema en lazo cerrado de un servosistema para control de velocidad.

Una vez que se tiene el sistema en lazo cerrado del servosistema y el controlador se procede a sintonizar las ganancias de los controladores PI para el servosistema maestro y para el servosistema esclavo.

La fig. 4 muestra la configuración del servosistema maestro-esclavo, donde el servosistema esclavo toma como referencia la velocidad de salida del sistema maestro.

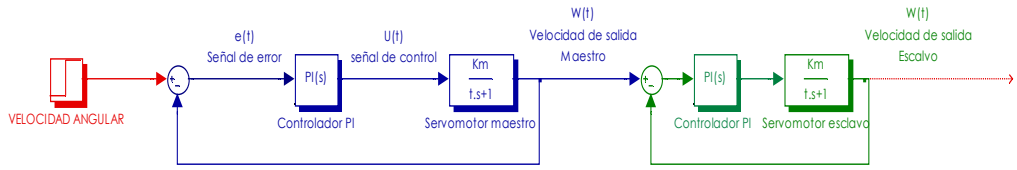

Figura 4.- Diagrama general maestro-esclavo

3.1.-SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES PI POR SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para la simulación se aplicó una entrada escalón de 62.83 rad/s, se sintonizaron los controladores PI para obtener una respuesta sin sobredisparó y un tiempo de establecimiento menor a 5 segundos de esta sintonización se encontró que las ganancias del sistema maestro fueron Kp=6.14 y la Ki=1.5351 y las ganancias del sistema esclavo Kp=6.64 Ki=1.57 . La respuesta de los sistemas simulados se muestra en la siguiente figura.

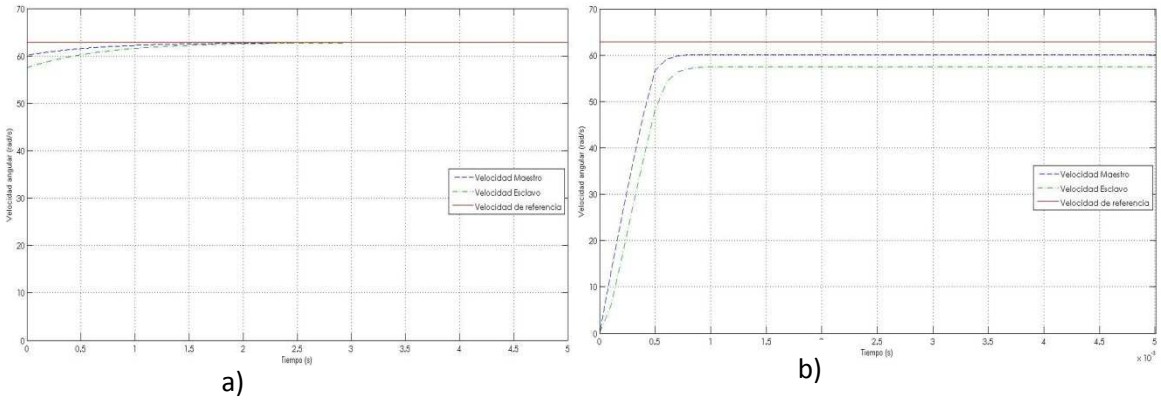

Figura 5.- Velocidad de maestro-esclavo a) Tiempo=5s,b) Tiempo=0.5ms

Las simulaciones nos permiten acercarnos a la respuesta deseada y se utiliza para ajustar las ganancias del controlador PI de velocidad de modo práctico mediante las simulaciones.

4.0.-IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO

Para la parte práctica se utilizó un controlador, un módulo de red para la comunicación y dos servosistemas para implementar la topología maestro-esclavo. La figura 6 muestra el diagrama general de un sistema de control de movimiento en cascada. En esta configuración el controlador de movimiento utiliza el control en cascada[4], en donde se utiliza un generador de trayectorias, que le indica al primer controlador la posición deseada, la compara con la posición de salida y se genera un error de posición el cual procesa el controlador PI de posición. Este a su vez se encarga de mandar la referencia de velocidad, se compara con la velocidad de salida y se genera el error que procesa el segundo controlador PI y genera una referencia de corriente, que se compara con la corriente de salida, la procesa el controlador PI de corriente, el cual genera una señal de control de corriente. Este último controlador PI generalmente se encuentra cerrado o no se puede ajustar debido a que la mayoría de los fabricantes ajusta este lazo de corriente para asegurar el desempeño del servoamplificador.

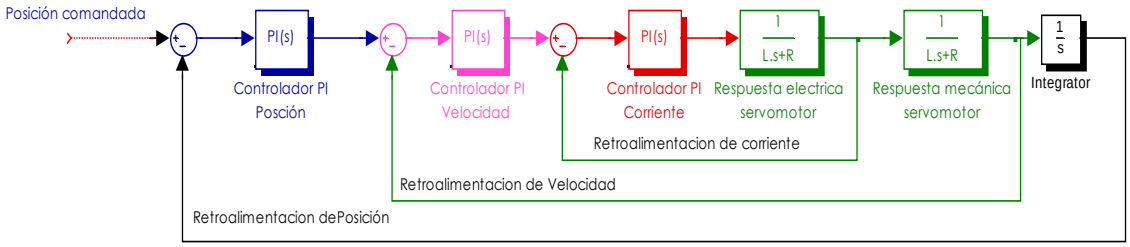

Figura 6.- Diagrama general de un control en cascada.

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la implementación, se introdujeron las ganancias obtenidas en la sección 3.1 para los dos servosistemas mediante simulaciones numéricas, y con los siguientes parámetros kt=0.468Nm/A,ke=0.270V/(rad/s),R=9.4Ω,L=0.0082H,J_m=0.000023N.m.s^2/rad,B_m=0.000535N.m /(rad/s) de los dos servomotores (maestro-esclavo).

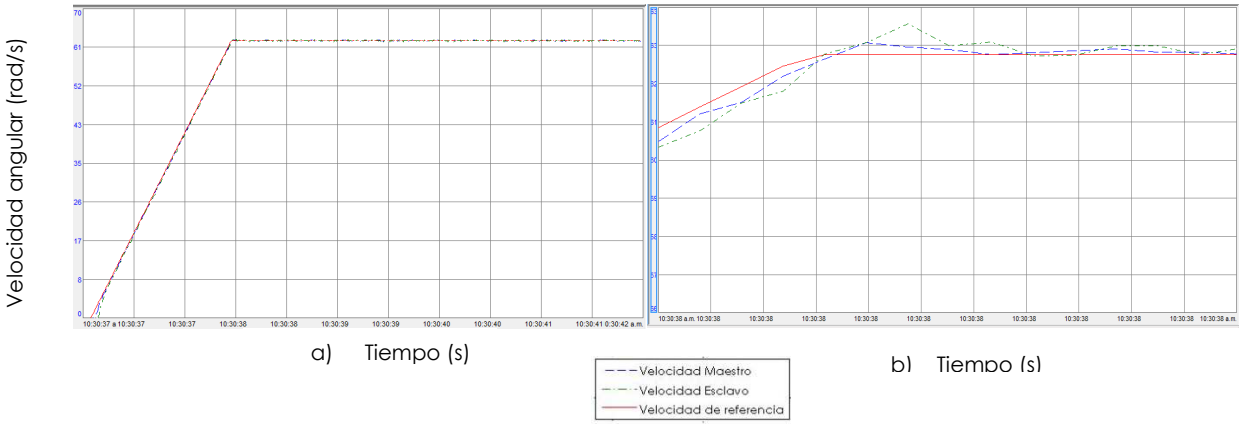

Figura 7.- Velocidad maestro- Esclavo a) tiempo 5s b) tiempo 0.5ms

En la figura 7 se observa la respuesta del sistema maestro-esclavo a una referencia de velocidad de 62.83 rad/s, se observa en la figura 7 (b) que se obtiene una respuesta de ambos servosistemas con un sobreimpulso de 0.2 rad/s para el sistema maestro y de 0.5rad/s para el sistema esclavo, ya funcionando en estado estacionario alrededor de 5 segundos el sistema tiene un error de +- 0.2rad/s para ambos servosistemas.

4.-CONCLUSIONES

Si se compara la respuesta simulada del sistema maestro-esclavo con la respuesta práctica, se tienen diferencias principalmente en los tiempos de respuesta y el error de estado estacionario del sistema y estas son por lo siguiente:

En la simulación numérica (sección 3.1), la respuesta del sistema maestro-esclavo tarda aproximadamente 2.5 segundos en alcanzar la referencia comandada pero sin sobredisparo, esto se debe a que los modelos del servomotor, el controlador PI y la retroalimentación son ideales, es decir no existe ruido eléctrico y no hay retrasos en el procesamiento, cálculos y respuesta de los mismos.

En la práctica el sistema maestro-esclavo alcanza la misma referencia (62.83 rad/s) en aproximadamente 2 segundos sin embargo la respuesta presenta oscilaciones alrededor de la referencia de aproximadamente +/- 0.2 rad/s, esto se debe a que la constante de torque Ke del motor cambian dependiendo de la temperatura de trabajo, además se tiene una etapa de amplificación de potencia para el manejo del servoamplificador el cual tiene un tiempo de respuesta. Se tiene también un procesador digital de señales (DSP del vocablo en inglés) que maneja el procesamiento y cálculos en tiempo discreto (muestreo de datos cada cierto intervalo de tiempo) además de que las señales de retroalimentación necesitan ser filtradas para eliminar ruido eléctrico al igual que la señal de control, esto origina retrasos en las señales de control y por lo tanto el sistema práctico no tiene la misma respuesta que un sistema simulado.

No obstante, es importante señalar que si la mayoría de las condiciones del sistema práctico pudieran ser incorporados en las simulaciones numéricas como errores de modelado, incertidumbres o perturbaciones; la conclusión a la que llegamos en el presente trabajo, es que si es posible simular un sistema de control de movimiento real. Con la enorme ventaja de que el ingeniero de aplicación podría llegar a comprender cuales son las dinámicas o comportamientos que tiene un servosistema antes de llevarlo a la práctica. Ya que muchas de las veces los fabricantes de este tipo de servosistemas los venden de arquitectura cerrada y el usuario no tiene acceso ni alcanza a comprender todos los subsistemas que lo conforman, lo que se traduce que en la mayoría de las aplicaciones de control de movimiento dichos servosistemas sean mal configurados o en el mejor de los casos subutilizados.

5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Palm III William J., Modeling, Analysis and Control of Dynamic Systems, 2nd edition, John Wiley & Sons , ,2000, ISBN 0-0471-07370-9

[2] Kutz Myer, Mechanical Engineers' Handbook: Instrumentation, Systems, Controls, and MEMS, Volume 2, Third Edition,2006 ,John Wiley & Sons, Inc. chapter 14

[3] Singh Sanjay, Pandey A. K., Design of Pi Controller To Minimize The Speed Error of D.C. Servo Motor, INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH, NOVEMBER 2012, VOLUME 1, ISSUE 10, ISSN 2277-8616

[4] Mohan Ned, Electric Drives An Integrative Approach, Minneapolis MN, MNPERE ,2003 , ISBN 0-9715292-1-3