

Sistemas de Servo Control 2: Servomecanismos Digitales.

Marco Antonio Pérez Cisneros*, y Mark Readman⁺

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

⁺Consultor "Control Systems Principles"

RESUMEN: Este es uno de una serie de manuales sobre modelado de sistemas, análisis y control preparado por Control Systems Principles.co.uk para dar entrada a importantes principios y procesos en control. En los sistemas de control hay un gran número de métodos y sistemas genéricos, los cuales son encontrados en todas las áreas de la industria y la tecnología. Estos manuales tratan de explicar esos importantes sistemas y métodos en sencillos términos. El manual describe lo que hace un tipo particular de método/sistema, cómo trabaja y cómo lo controla. Las demostraciones de control son desarrolladas usando modelos de sistemas reales diseñados por nuestro fundador y compañero Peter Wellstead, y ha sido desarrollado por TQ Education and Training Ltd en su rango de equipamiento CE. Este manual usa la computadora basado en herramientas de control y simulación CE300 para demostrar un servomecanismo digital para control de posición de un servo (mecanismo o sistema auxiliar) usando un sensor óptico de posición.

1. Introducción

Los sistemas de control de posición son un componente importante de muchos productos industriales. Ejemplos son encontrados en robótica, procesos de control y muchos otros. El manual de Sistemas de Servo Control 1 describió algunas de esas aplicaciones y las bases del servo control. El primer manual fue para mecanismos de corriente directa, de cualquier forma, muchos de los mecanismos de servo control son implementados digitalmente usando sensores digitales. El objetivo de este manual es describir, en términos simples, cómo son implementados los mecanismos digitales, usando sensores digitales e implementaciones de sistemas de control digital directos. Todas las ilustraciones fueron echas usando el simulador lógico CE300.

En todos los servomecanismos, uno de los más importantes componentes es el sensor de posición. Este mide la posición del servomotor y la convierte en una señal eléctrica que el sistema de control puede interpretar y usar. Los sensores digitales ópticos de posición son particularmente importantes porque ellos no contactan y por consiguiente no esta sujeto al ruido de los controladores de posición análogos. Una gran ventaja de los sensores ópticos es que ellos pueden ser usados en ambientes severos donde existan fuertes campos magnéticos y RFI. sensores digitales ópticos de posición usan un disco especial codificado para medir la posición del eje. Muchos tipos diferentes de ejes rotatorios usados para medir relativa o absoluta posición, de cualquier forma, una forma común de codificación de posición angular están basados en el código Gray. En este manual mostraremos una forma común codificación angular usando código Gray. Asumimos que usted ha leído el primer manual de Servo Control, por lo que hay muy poca teoría de control en este manual. En su lugar, nos concentramos en las bases de la implementación servo-digital.

2. Control de posición.

Un sistema de control de posición básico consta de un servomotor, sensor de posición y controles como los mostrados en la Figura 1. Este diagrama de bloques está redibujado en la Figura 2 para mostrar cómo el sistema de control de posición es implementado sobre el CE300. Todas las señales en la Figura 2 son señales digitales con sólo dos niveles, alto y bajo. El eje codificador entrega la posición

del eje en código Gray. Este es convertido a binario usando un decodificador. Un sumador de cuatro bits es usado para comparar la medición de la posición del eje con la posición de referencia. La entrada a el sumador son números de cuatro bits en binario. El sumador está localizado en modo restador. Por lo tanto, la salida del sumador es un número d 4 bits representando la posición de error. Algo lógico es usado para decidir cuándo el motor debe ser encendido y en qué dirección debe ir. Cuando el error es cero, el motor se apaga. Por lo tanto, la señal de control del motor es también apagada. Esto es llamado control bang-bang en la literatura de control porque el tamaño de la señal de control es independiente de la magnitud del error.

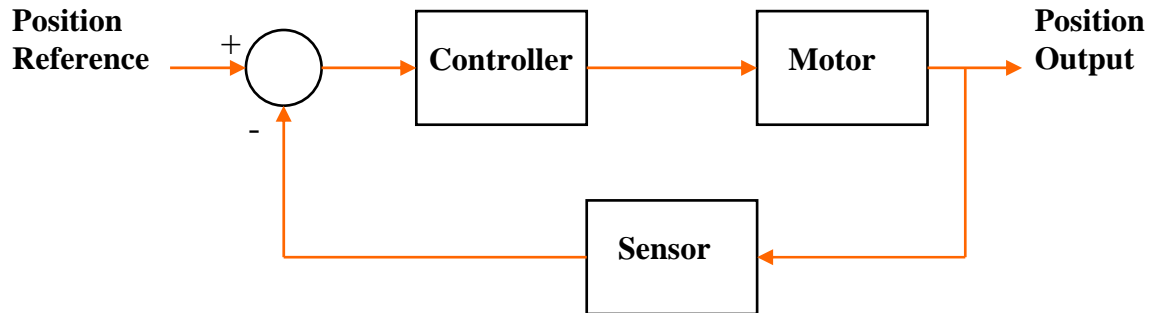


Figura 1. Sistema de Control de Posición.

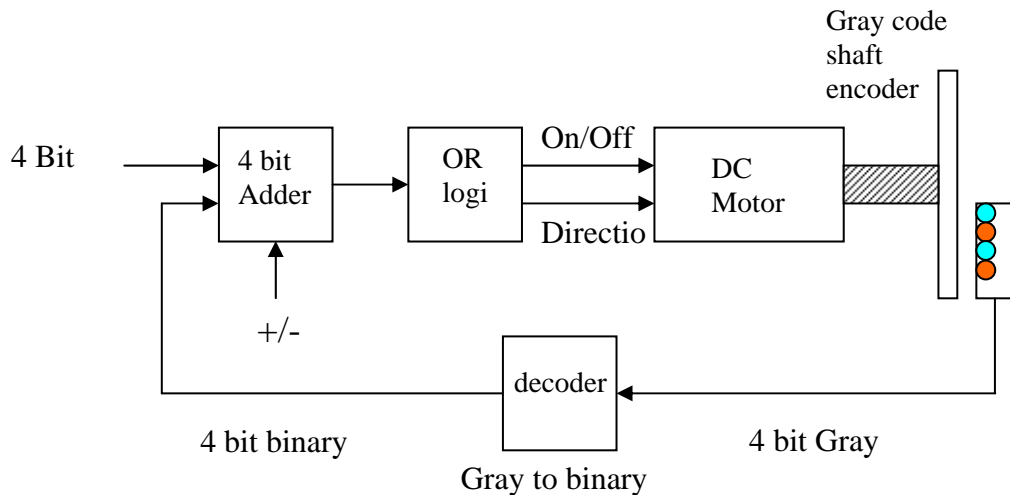


Figura 2. Sistema de Control de Posición CE300

3. El codificador de eje óptico.

Los codificadores son discos transparentes con la posición angular digitalmente codificada (de negro), por lo que para ser leído el código un sensor óptico puede determinar la posición angular de el eje. En la práctica, se usarán codificadores de 12 o 16 bits, dando altos grados de precisión de aproximadamente 0.1 y 0,05 deg de resolución respectivamente. En nuestros ejemplos usaremos un codificador óptico de 4 bits como el mostrado en la figura 3. Esto tiene mucha menor precisión que el

que será usado en un servo digital industrial, pero es mucho más fácil de explicar la operación con sólo 4 bits. El disco mostrado en la figura 3 es el tipo suministrado con el CE300. Está hecho de plástico transparente con el código Gray mostrado en negro. El código Gray es usado porque es en el que hay un solo bit de cambio entre una y otra posición adyacente del codificador. Esto reduce la posibilidad de un error siendo introducido como el codificador esta rotando. Con el codificador binario alternativo todos los bits pueden cambiar simultáneamente entre dos posiciones adyacentes del codificador. Esto introduce la posibilidad de la ocurrencia de errores esperados para ruido y diferencias de tiempo en la lógica. Por ejemplo, como lo muestra la Tabla 1 ir del decimal 7 al decimal 8 cambian los 4 bits en binario mientras sólo uno cambia en código Gray. Desde luego que el ruido y error de tiempo están presentes cuando se usa código Gray, sin embargo, debido a que cambia un solo bit por tiempo, la oportunidad de ocurrencia de un error se reduce significativamente. El codificador óptico CE300 usa 4 bits para codificar la posición del eje. Con sólo estos 4 bits podemos solamente codificar 16 posiciones, por lo que la resolución del codificador es $360/16 = 22.5$ deg.

Para usar en un controlador digital la salida del codificador se tiene que convertir a binario. Esto permite el cálculo del error para ser hecho en binario. Afortunadamente, como se muestra en la



Figura 3. Codificador del eje de giro Gray CE300

Siguiente sección, la conversión de una posición codificada en Gray a una en Binario es simple.

Decimal	Hex	Binary	Gray
0	0	0000	0000
1	1	0001	0001
2	2	0010	0011
3	3	0011	0010
4	4	0100	0110
5	5	0101	0111
6	6	0110	0101
7	7	0111	0100
8	8	1000	1100
9	9	1001	1101
10	A	1010	1111
11	B	1011	1110
12	C	1100	1010
13	D	1101	1011
14	E	1110	1001
15	F	1111	1000

Tabla 1: Sistema numerico que muestra como solamente un bit cambia a la vez.

4. Decodificador de Gray a Binario.

La conversión del código Gray a binario es desarrollada con un simple decodificador lógico. El decodificador usa compuertas XOR conectadas como se muestra en la figura 4. El diagrama bloques mostrado en la figura 4 fue tomado de la librería del CE300.

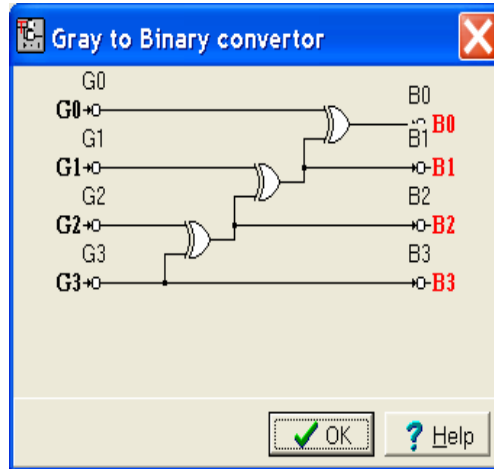


Figura 4. Diagrama de bloques de un codificador de código Gray a código binario.

El diagrama bloques expresa gráficamente la ecuación lógica para convertir de código Gray a binario, donde \oplus es el símbolo lógico para el XOR. Las ecuaciones para esta conversión para 4 bits son mostrados en la ecuación 1. Esta ecuación puede ser extendida por cualquier número de bits.

$$\begin{aligned}
 B_0 &= G_3 \oplus G_2 \oplus G_1 \oplus G_0 \\
 B_1 &= G_3 \oplus G_2 \oplus G_1 \\
 B_2 &= G_3 \oplus G_2 \\
 B_3 &= G_3
 \end{aligned}
 \tag{eqn.1}$$

5. El sumador.

El decodificador binario de posición es alimentado directamente por un sumador para ser comparado con la posición de referencia. La señal de referencia es también codificada como un binario de 4 bits dando 16 diferentes posiciones posibles. Para propósitos de referencia, el símbolo tradicional para un sumador es comparado con el símbolo lógico usado para un sumador de 4 bits en el CE300 de la figura 5.

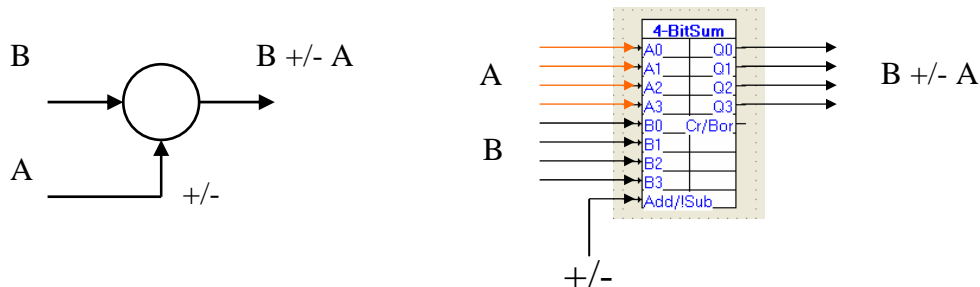


Figura 5. Símbolos Summer y el sumador de 4 bits.

6. Decisión lógica.

En esta forma de servomecanismo digital, la señal de control es computada directamente usando control lógico (on/off o bang-bang) como el mostrado en la figura 6. En este esquema de control, la salida del sumador es la posición de la señal de error en binario de 4 bits. Si el esta señal de error no es cero, entonces desearemos mover el motor. Esto es archivado en un controlador lógico para alimentar la salida del sumador a una compuerta OR, por lo que la salida será cero si todas son cero, (e.g. el error es zero). El bit más significativo Q3 es usado para determinar la dirección del motor. Note que en la figura 6 hay dos compuertas usadas debido a que el máximo giro es 3 para cada compuerta en el CE300.

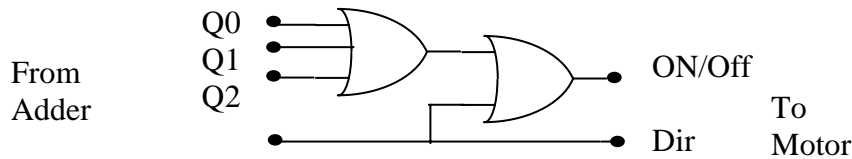


Figura 6. Lógica de Decisión.

7. CE300 Implementación: Uniéndolos.

El servo programa de posición digital completo es mostrado en la figura 7. Una posición de referencia de 4 bits en binario es generada usando una fuente digital conectada a cada una de las entradas de referencia B0 a B3. Presionando la fuente digital genera las 16 posiciones de referencia. La posición actual es obtenida de un bloque de entrada y decodificada en binario. El eje binario de posición es alimentado también al sumador.

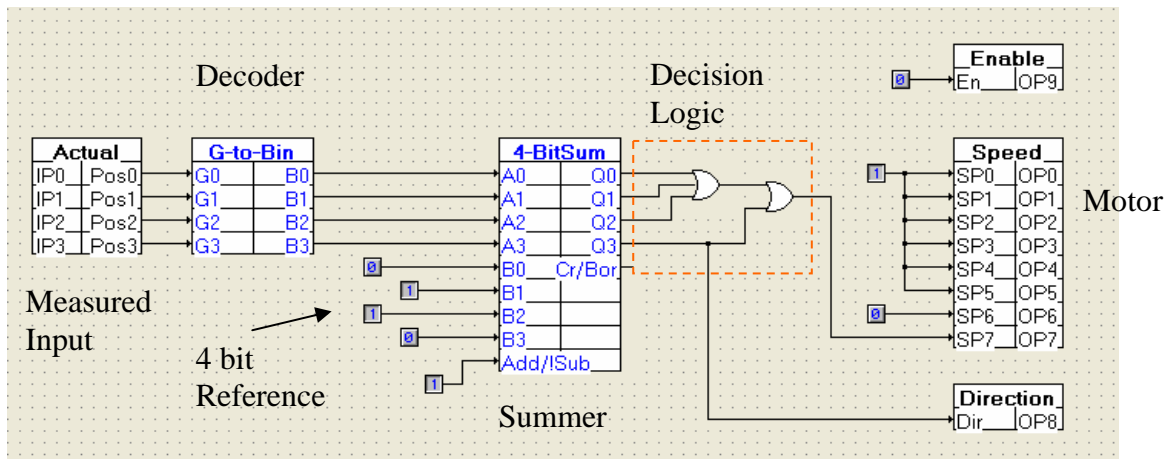


Figura 7. Servo Control de Posición CE300.

Para agregar bloques de 4 bits DA, la referencia y señales de salida pueden ser vistas sobre un grabador como el mostrado en la Figura 8. Aquí la señal de referencia para posición es generada de un generador de señal que es alimentado para un convertidor AD de 4 bits para generar una señal de referencia de 4 bits.

En la figura 8 el servo sistema digital es mostrado con la salida siguiendo un simple paso de entrada. De cualquier forma, la respuesta del servo a diferentes formas de onda puede ser también explorada. Es posible generar una respuesta aproximada en frecuencia para variar la onda senoidal de la frecuencia de referencia. Desde luego que una implementación de 4 bits de una onda senoidal será vista totalmente diferente a la versión de tiempo continuo debida a la cuantización del error presente en un controlador digital.

En la figura 9, los LED's están conectados a la referencia y medida la señal para dar otra indicación visual del servo en operación. Para algunos casos, la referencia de los LED's debería oponerse al estado gradual. Convertidores de cuatro bits digitales a análogos han sido de nuevo usados para convertir señales binarias a formas análogas para pantallas sobre el grabador gráfico. El grabador gráfico muestra el motor (azul) siguiendo la referencia (roja).

Como se notó previamente, la cuantización del error será significativa. Específicamente, debido a que estamos usando un codificador de 4 bits, un error de ± 11 deg aproximadamente es posible sobre el servo actual, aunque las señales binarias se igualen. En la figura 9 el trazo verde es la señal on/off del motor. La velocidad del motor puede ser incrementada por activación de SP0 a SP6. Efectivamente este está incrementando la ganancia del controlador por lo que ahora el motor responde más rápido a una señal de error.

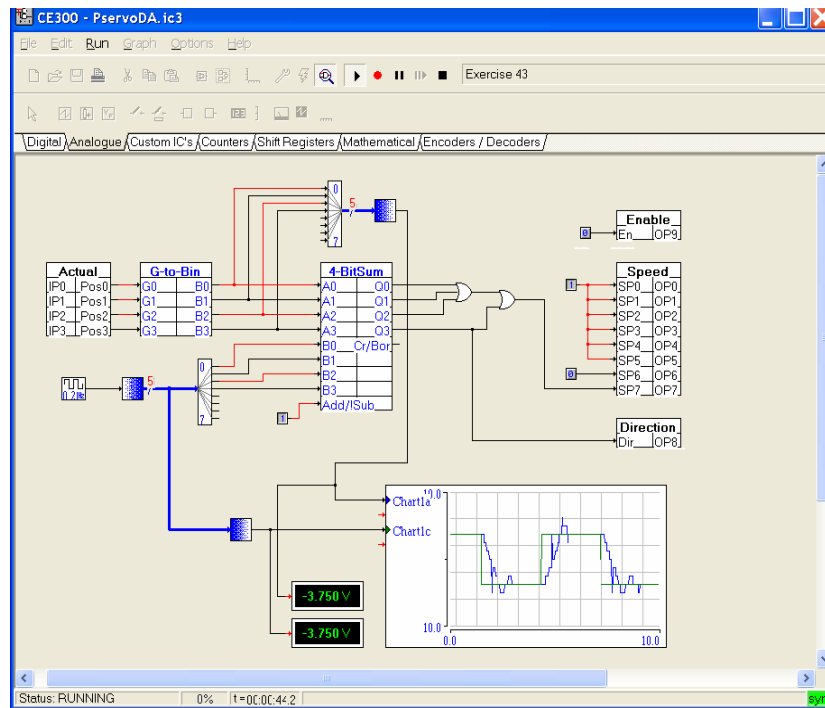


Figura 8. Servo Control de Posición CE300 con AD y DA

La figura 10 muestra el sistema de servo control digital cuando está siguiendo una onda cuadrada de 0.2 Hz y una senoidal de 0.1 Hz. La amplitud de referencia de 7.0 Volts está trazada de rojo. Nótese que la salida del codificador óptico muestra algún ruido. La parte mas baja de la figura muestra oscilaciones sostenidas cuando la servo referencia es constante y activa el dispositivo más rápido. Alta ganancia causa un límite en el ciclo y el motor oscila cerca de la posición de referencia deseada. Esto es una característica encontrada comúnmente en los sistemas de control y es llamada límite cíclico. Esto

es generalmente un fenómeno indeseable en sistemas de retroalimentación. Aunque el límite de oscilación del ciclo como este nos dice algo a cerca de el sistema. En este caso, el límite del ciclo es causado en parte por el retraso en la comunicación entre la PC y el probador lógico CE300.

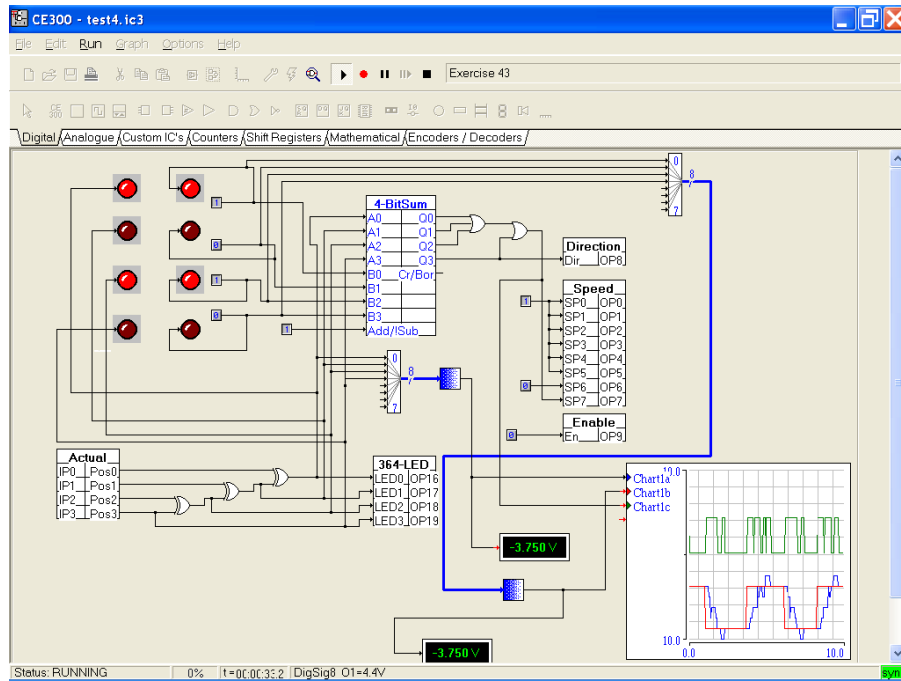


Figura 9. Servo Control de Posición CE300 con LEDs de referencia de 4 bits.

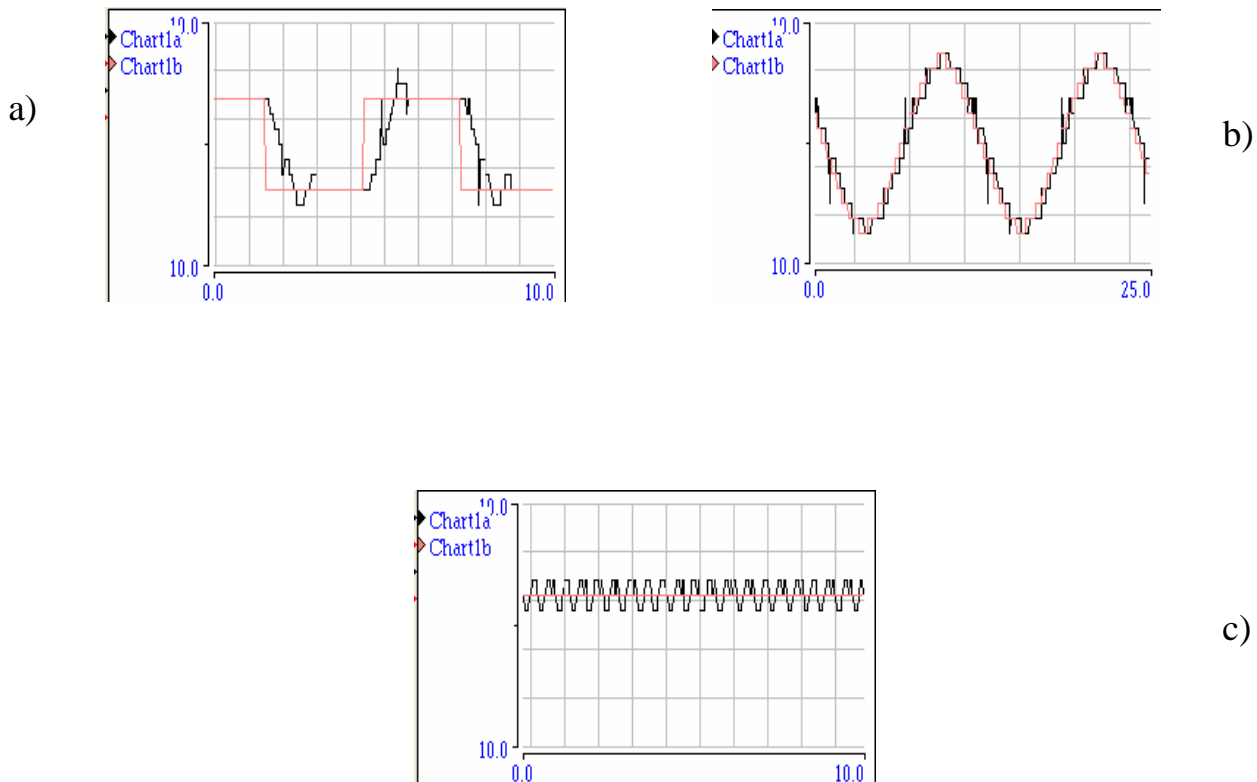


Figura 10. Salida de la posición servo para a) Respuesta al escalón, b) Respuesta Sinusoidal c) Ciclos límite.

8. Un simple modelo.

En esta sección mostramos un simple modelo (Figura 11) del sistema de retroalimentación. Esto puede ser usado como un punto de inicio para el análisis y la simulación. El resultado de la simulación es mostrado en la Figura 12. usando este modelo son una razonable presentación de los resultados obtenidos con el servo CE300. El tiempo de espera es activado a 0.1 segundos y la ganancia puede ser variada para simular el efecto del cambio en la velocidad del motor. Los números mostrados son aproximados y variarán d sistema en sistema. En el diagrama bloques, la ganancia K controla la velocidad del motor. El tiempo de espera T es usado para tomar en cuenta la comunicación entre la computadora y el servo y otros procesos de retraso. Para el CE300, fueron usados los valores de $K=10$ y $T=0.1$.

En el modelo un cuantizador es usado para simular el efecto del codificador en código Gray de 4 bits. La constante de tiempo del motor de 0.4 segundos es de nuevo una aproximación y el valor usado será un poco diferente dependiendo del equipamiento usado. Despreciando esas aproximaciones, la simulación da resultados que son similares a el actual servo. Por ejemplo, las simulaciones correspondientes a la figura 10 son mostradas en la figura 12.

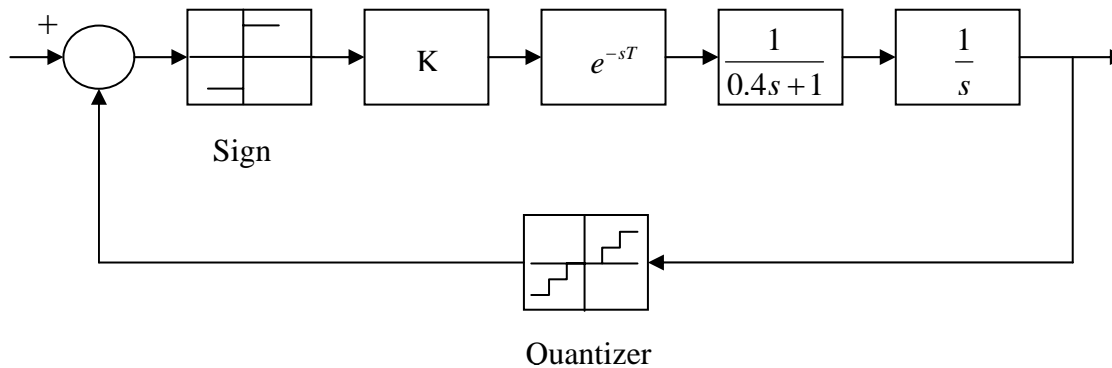


Figura 11. Modelo del posicionador Servo CE300.

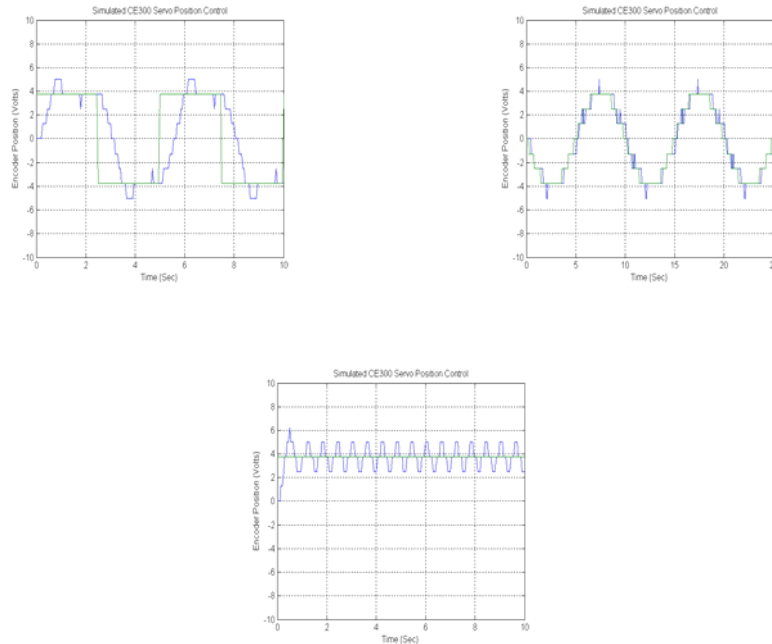


Figura 12. Salida de simulación: a) Respuesta al escalón b) Respuesta Sinusoidal c) Ciclo límite.

9. Control de retroalimentación de un contador UP/Down

Sistemas dinámicos donde la retroalimentación es usada para controlar un sistema lógico son muy comunes. En el ejemplo desarrollado mostramos cómo la retroalimentación puede ser usada para controlar un contador up/down. El comportamiento de este sistema es similar a el ejemplo del servo control usando un codificador. Podemos tomar a el motor como un contador digital. Como el eje rota, la cuenta se incrementa o decrementa dependiendo de la dirección del motor. De esta forma podemos usar el mismo circuito de retroalimentación para controlar el conteo en un contador binario. El código Gray no es usado debido a que no es un codificador.

Una simulación en CE300 para controlar un contador up/down es mostrado en la Figura 13. La referencia en este ejemplo es un generador de señal alimentado a un convertidor análogo o digital. Esto provee una cuenta de referencia de 4 bits. La salida del sumador es alimentada a la compuerta OR en la misma forma que antes, pero ahora un reloj es activado y desactivado lo cual permite que el contador up/down cuente. La señal de dirección es usada en forma similar para cambiar la dirección de la cuenta. Los bloques convertidores DA son usados para dar una indicación visual de la cuenta y referencia. El contador sigue la señal de referencia de una manera similar a el servomotor.

La velocidad del reloj en esta simulación es equivalente a la velocidad del motor donde

$$\text{clock speed} \approx 16 \frac{\text{RPM}}{60}$$

y la velocidad del motor varía de aproximadamente 15 RPM a 40 RPM como medida para medir el período de rotación del disco sobre cada indicador de velocidad. Con cuatro bits obtenemos el equivalente de 16 pulsos de reloj por rotación. La principal diferencia aquí es que el dinamismo del motor no es tan grande en el lazo. Esto es algunas veces llamado un sistema discreto. Otra aplicación común usando contadores es un convertidor-integrador AD. Cuando el contador alcanza la referencia deseada será la representación binaria equivalente de la referencia de entrada.

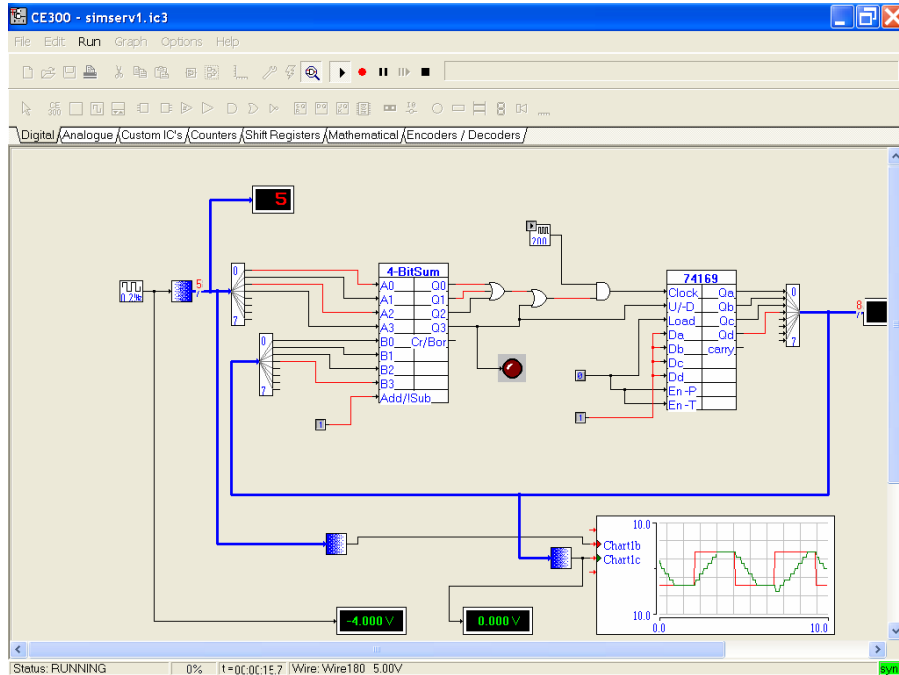


Figura 13. Control retroalimentado de un contador arriba/abajo

10. Conclusiones

En este manual hemos mostrado cómo el Circuito Probador Lógico CE300 puede ser usado para la CE300b posición servo. Un simple modelo de simulación ha sido desarrollado lo cual puede ser usado para explorar el comportamiento esperado de el servo control de posición CE300. No hemos incluido mucha teoría debido a que el objetivo de este manual es explicar las técnicas lógicas que son usadas en servomecanismos digitales.

11. Palabras finales

No es posible responder preguntas acerca de nuestro manual, a menos que tengamos un contrato con su organización. Para más información acerca del Programa de Control y Simulación CE300 dirigirse a el sitio web deTQ Education and Training usando la liga www.control-systems-principles.co.uk o el correo electrónico info@tq.com. Existen muchos libros sobre servo controles de posición y código Gray, y hay también un mundo de sitios web. Nosotros estamos particularmente agradecidos con las referencias siguientes.

Referencias

1. Dorf, R C and Bishop, R H, Modern Control Systems, (9th Ed) Prentice Hall, (New York), 2000.
2. M Healey, Principles of automatic control. (3rd ed.) English Universities Press, (London), 1975

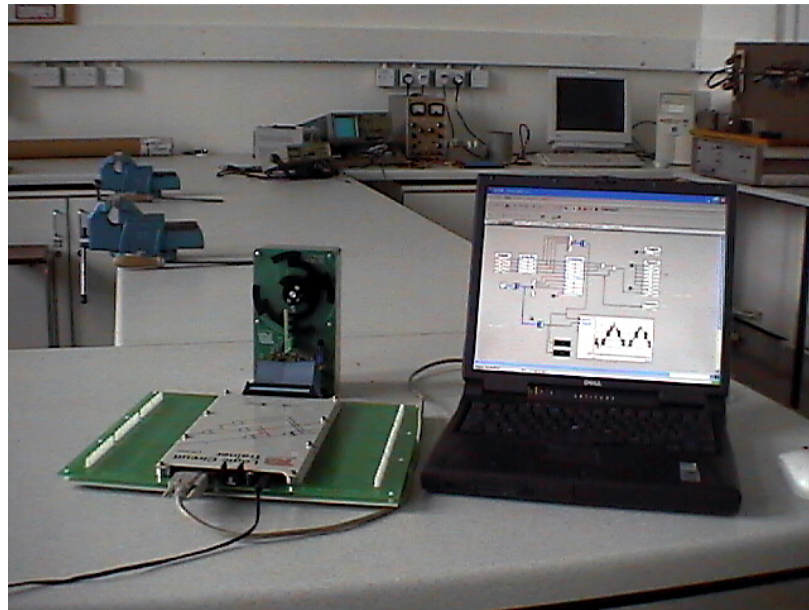


Figura 14. Entrenador lógico CE300 con el Servo CE300b.