Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros

5.1 Conclusiones

Para finalizar el Proyecto se van a realizar una serie de conclusiones finales. En primer lugar, hay que insistir en que el hecho de que las técnicas clásicas de control empleadas no tengan en cuenta la presencia de la saturación, impide en todos los casos obtener las especificaciones deseadas. Sólo el segundo método de Ziegler-Nichols tiene en cuenta al sistema completo (con saturador incluido).

El efecto de la duración del estado de saturación (y por tanto del cambio de referencia) es distinto, según intervengan o no actuaciones anteriores en la expresión de la ley de control. En el primer caso, al aumentar la referencia el sistema se hace cada vez más inestable (efecto *Windup*). En el segundo, el efecto va a ser el de mantener la misma sobreoscilación, independientemente de la referencia. Un caso típico de la primera situación es el control PI y de la segunda el control P. En ambos casos los tiempos empleados en alcanzar la referencia son proporcionalmente menores cuanto mayor sea la referencia, por estar más tiempo desplazándose a la máxima velocidad.

En segundo lugar, de todos los controladores estudiados, sólo el proporcional, el control por inversión del modelo y el de realimentación del vector de estados tienen un comportamiento que se acerca al deseado. El control PD presenta problemas en la señal de actuación y los controles PI y PID producen una sobreoscilación enorme, debido tanto al tipo de sistema como a la saturación del actuador, que origina el efecto *Windup*. La técnica *Anti-Windup* empleada mejora el resultado aunque no es capaz de eliminar completamente la s.o, debido a la naturaleza del sistema.

El Predictor de Smith elimina el problema del retardo, aunque se ve perjudicado por emplear reguladores PI y PID, y es sensible a errores de modelado. Por su parte el control *dead-beat* es el más rápido posible aunque puede resultar demasiado brusco para el sistema, y el LQR conlleva numerosos cálculos matemáticos y no permite partir para su sintonización de una dinámica deseada, dada por sus especificaciones.

También hay que señalar la existencia de dificultades para implementar los controladores en el sistema real. Estas dificultades se centran principalmente en que para que dichos controles funcionen bien y todas las señales sean entendidas por el sistema, éste no puede recibir consignas de cualquier manera. Así, no admite una frecuencia de envío inferior a los 200 ms., y en caso de no haberse detectado el movimiento tampoco es posible enviar una señal, debido a que se produce una saturación en la cola de mensajes y deja de interpretarlos debidamente.

Finalmente de todos los reguladores desarrollados, en caso de elegir se optaría por implementar el control por inversión ó el control por realimentación del vector de estados. El motivo es que son los únicos capaces de ajustarse a cualquier conjunto de especificaciones, que cumplirán más fielmente en caso de que la diferencia entre la posición actual y la deseada sea tal que no sature el actuador. Dentro de estos dos se puede decir que es más fiable el control por inversión, ya que presenta dos ventajas adicionales: por un lado no emplea observadores, y por el otro consigue eliminar más eficientemente el retardo del denominador. En los experimentos se ha visto que los resultados del control por inversión se parecen más a la simulaciones.

En el caso en que primase el aspecto económico, habría que tener en cuenta que la secuencia de actuaciones sea lo menor posible, para optimizar el consumo de

combustible. En este sistema al ser motores eléctricos alimentados a 24 voltios el consumo no es un factor importante.

5.2 Desarrollos futuros

Ante los resultados alcanzados en este Proyecto se proponen las siguientes líneas de investigación y mejora del control para un futuro.

La primera está relacionada con que, como ya se ha explicado, el paso mínimo de los motores provoca que el sistema no alcance la referencia de forma exacta y se quede oscilando de forma permanente en torno a ésta. Lo deseable es que el sistema, por tratarse de control de posición, llegue a la posición deseada y se pare.

Para solucionar este problema, se propone corregir los programas para que se ordene la parada de cada eje en caso de que la posición alcanzada esté en un intervalo suficientemente cercano a la referencia. Se establece para ello una banda de valores por encima y por debajo de ésta. En esta modificación hay que tener en cuenta el retraso que cada eje tiene en interpretar la nueva señal, para que cuando le llegue siga estando dentro del intervalo.

Un inconveniente de esta idea es que sólo será válida para respuestas sobreamortiguadas o críticamente amortiguadas. Para comportamientos con sobreoscilación, se estaría obligando al sistema a detenerse la primera vez que alcanza la referencia, falseando por tanto el control. Para este último tipo de respuestas sería necesario añadir a la condición de parada una segunda condición: que las actuaciones precedentes sean pequeñas, lo que significará que la sobreoscilación que se pudiera producir es ya pequeña o inexistente, por lo que no se altera apenas el control.

Se han efectuado algunas pruebas con la idea expuesta en los dos párrafos anteriores y se observa que para una banda de 0.2 grados en torno a la referencia (de 10 grados) da buenos resultados. También se ha visto que en las respuestas subamortiguadas, si la velocidad que lleva cuando alcanza por primera vez la referencia es grande (lo que implica sobreoscilación importante), a veces la posición no llega ni siquiera a situarse dentro de la banda, lo que evitaría añadir la segunda condición. De estos experimentos

se concluye también que el tiempo que tarda el sistema en pararse una vez se le ha enviado la señal oscila entre los 200 ms. y 400 ms.

Se necesita en consecuencia realizar un modelo lo más exacto posible de dicho retraso. De hecho en otras pruebas ha sucedido que cuando el sistema ha interpretado la parada, ya estaba fuera de la banda establecida. Un último detalle es que el ancho de la banda dependerá de la referencia. Cuanto menor sea, las velocidades para unos mismos parámetros serán menores y por tanto se podrá exigir una mayor precisión, puesto que tardará más en salirse del intervalo fijado. Esto también se ha comprobado, de forma que para una referencia de 1 grado funciona correctamente con un límite de 0.05 grados. Todo esto hay que estudiarlo con más detalle.

Un segundo estudio estaría encaminado a emplear técnicas de control que tengan en cuenta la saturación en la actuación, ya que las técnicas clásicas estudiadas no lo contemplan. Para los controladores estudiados (a excepción del PI y PID, en los que la s.o. aumenta con la referencia por el efecto *Windup*), se recomienda, para conseguir una dinámica deseada, calcular los parámetros siempre para una sobreoscilación mayor de la requerida y un tiempo menor del especificado. El inconveniente es que resulta algo aleatorio por lo que para que esto funcione bien es necesario comprobarlo con simulaciones.

En tercer lugar, según se vio en el Capítulo 2 y se ha puesto de manifiesto en los experimentos reales, el retardo realmente tiene un valor constante para actuaciones grandes y un valor aleatorio aunque menor para señales menores. Además el retardo ante un cambio de sentido es en general mayor que el de las señales grandes, por lo que realmente se podría decir que existen tres modelos distintos. Por esta razón se podría plantear un control con un modelo mixto para el retardo, de forma que los parámetros del controlador cambien según el valor de la actuación anterior. Esto realmente se traduce en emplear técnicas de Control Adaptativo.

Otra línea a desarrollar es la aplicación de técnicas de Control Borroso (*Fuzzy Control*). Este tipo de control, relativamente moderno, tiene utilidad en procesos muy complejos de modelar o que presentan incertidumbre en su comportamiento, y la mejor forma de sintonizar el control es a partir de la experiencia. Así, según los resultados

obtenidos en el Capítulo 2 que muestran que el modelo no es totalmente constante, puede ser interesante estudiar sus resultados para este sistema.

Si que se pretende es que el sistema alcance una posición en el menor tiempo posible se puede buscar un control basado en el dead-beat, que desplace al sistema a la máxima velocidad y cuando alcance la referencia se pare repentinamente. Esto no es tan sencillo ya que habrá que tener en cuenta el retardo que posee el sistema, para enviarle la señal de parada en el instante adecuado.

Para finalizar, decir que el paso siguiente al cálculo de los controladores adecuados a las especificaciones para cada eje será el de establecer secuencias de control más complejas. En concreto, para una futura aplicación de seguimiento de objetos mediante visión por computador, se podría desarrollar control simultáneo en azimut y elevación, de forma que el posicionador se desplace a un punto dado por dos referencias, una para cada eje. Ya en el Capítulo 2 se anticipó que en los experimentos de movimiento simultáneo, el eje de elevación comenzaba a moverse antes que el de azimut. Esto puede ser debido a que los mensajes de elevación tengan preferencia sobre los de elevación.

La mayor dificultad para el control en dos dimensiones es que al poseer un único controlador interno, el sistema ha de interpretar el doble de mensajes, y ya se vio que si la frecuencia de los mensajes era grande la cola se saturaba y dejaba de comportarse correctamente. Para completar esta idea se han efectuado algunas pruebas iniciales de control simultáneo, observándose que ahora el período de muestreo mínimo pasa a ser de 400 ms., aunque hay que profundizar en esto. También se comentó en el Apartado 2.3.3 que en general el eje de elevación comenzaba a moverse antes que el de azimut. En la Figura 5.1 se muestra uno de estos resultados, para un control P de K=200 y una secuencia de referencias tal que el sistema describa un rombo de diagonales igual a 20 grados.

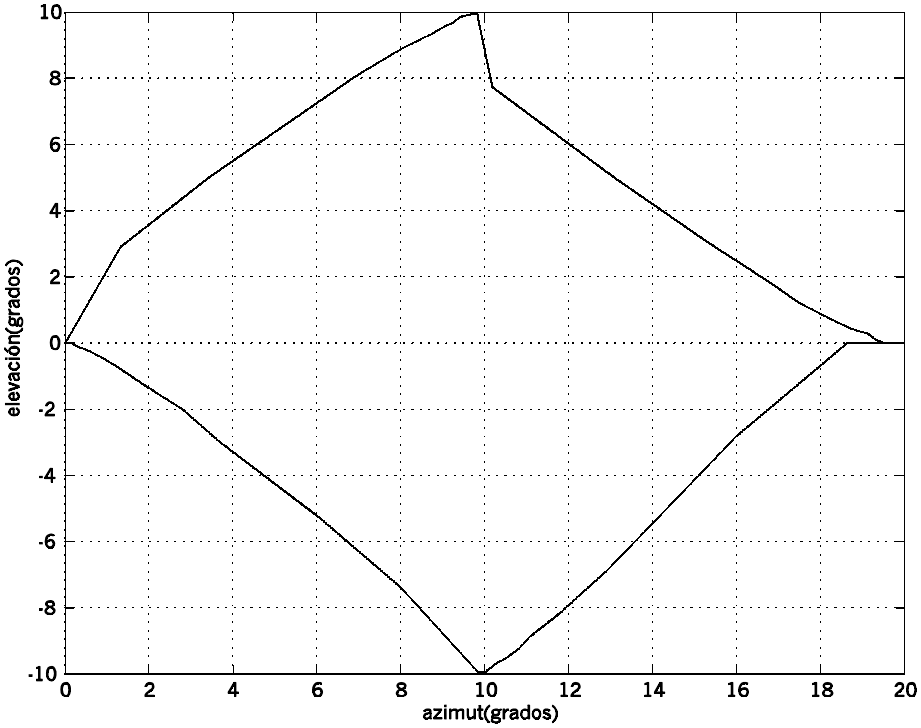
elevación(grados)
azimut(grados)
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

Figura 5.1