

# Efectos del Tiempo de Procesamiento y la Cuantización sobre el Ángulo de Optimización de un Sistema de Seguimiento

Enrique Mariano Lizárraga<sup>1</sup>, Gastón Peretti<sup>2</sup>, Emanuel Bernardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Catamarca, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco, Argentina.  
{emlizarraga@conicet.gov.ar, gaston.peretti@frsfcfco.utn.edu.ar}

**Resumen.** En este trabajo se plantea un modelo de análisis del ángulo de orientación que optimiza un sistema basado en el seguimiento de un objeto con una posición fija, desde un segundo objeto que tiene una trayectoria que se desarrolla en el tiempo. Este análisis surge de un estudio particular conseguido a partir de un *vehículo aéreo no tripulado* (UAV, *unmanned aerial vehicle*) de pequeña escala, al que se ha dotado con un sistema de adquisición de posición basado en el *sistema de posicionamiento global* (GPS, *global positioning system*). Un modelo lineal es utilizado para estimar variables interpoladas que se utilizan para calcular el ángulo de orientación. Con estos resultados se determinan el ángulo de desajuste que introduce el retardo de procesamiento y la cuantización en un procesador digital, además de la respuesta dinámica de un eventual actuador. Estos resultados se utilizan como punto de partida para una especificación de velocidad de cómputo y requerimientos de hardware que son necesarios en el dispositivo para control de orientación.

**Palabras clave:** UAV, ángulo (angulo), orientación (orientacion), GPS, modelo, lineal.

## 1 Introducción

Se toma como punto de partida la interesante aplicación que tiene el problema de seguir un *objeto fijo* desde un *objeto móvil*, mientras el segundo describe una trayectoria que se desarrolla a lo largo del tiempo [1], [2], [4]. El seguimiento consiste en aplicar el control necesario para que un *dispositivo direccionable* instalado en el objeto móvil optimice el funcionamiento del sistema.

En este contexto, tres aplicaciones dan motivación a este trabajo. La primera surge de la aplicación de técnicas basadas en *radares de apertura sintética* (SAR, *synthetic-aperture radar*) [5]. En este concepto se recurre a un sistema con múltiples antenas sobre el que se aplica una conformación de haz (*beamforming*) dependiente de la trayectoria, que consigue un mejor aprovechamiento de la energía disponible. Entonces se aprovecha el movimiento relativo para obtener varias réplicas de la señal, distintas pero con una correlación de largo término.

De esta manera se obtiene una representación con una mejorada resolución espacial, en comparación con la lograda con otros métodos. Por esto, el ángulo de direccionamiento del haz debe ser actualizado dinámicamente, a partir del conocimiento de las variables de movimiento del vehículo (en vuelo). La segunda aplicación tomada en cuenta consiste en el sistema que surge de instalar, sobre un vehículo, una cámara de video cuya orientación relativa puede ser controlada [4]. Aunque esta aplicación es más rudimentaria que la anterior, presenta por sí misma una gran utilidad con fines de exploración en lugares con acceso dificultoso, o que representen algún riesgo para las personas. Un ejemplo lo constituye la transmisión de imágenes en tiempo real para sistemas de televisión. Por su parte, la inspección en redes de distribución de energía eléctrica frecuentemente requiere revisiones visuales en componentes instalados a gran altura (por ejemplo sobre torres). Se advierte que la necesidad de no sacar de servicio el sistema durante la inspección implica la imposibilidad de que los operarios se acerquen a tales instalaciones debido al riesgo de descarga eléctrica. La tercera aplicación se inspira en la combinación de las técnicas involucradas en los dos sistemas descritos previamente, y nos induce a considerar la optimización de la potencia disponible en la transmisión de señales de video si en el objeto móvil se cuenta con la capacidad de direccionar el haz principal de un arreglo de antenas que se utiliza para vincularlo con un receptor fijo. Este caso cobra vigencia dado el advenimiento de las transmisiones de alta definición, que requieren mayores recursos de potencia, con el objetivo de ampliar (o mantener) el alcance de las transmisiones inalámbricas de video.

Todo este marco propicia el estudio de un sistema basado en un *vehículo aéreo no tripulado* (UAV, *unmanned aerial vehicle*) cuya posición relativa se conoce en tiempo real. En él se supone la instalación del dispositivo direccionable. Para no perder generalidad podemos decir que el dispositivo direccionable puede tener una función de captación, como en el caso de una cámara de video; o puede tener una función de emisión, como en el caso de un arreglo de antenas que direcciona la energía irradiada. En nuestro caso particular, el análisis parte de un sistema que se compone de un UAV de pequeña escala representado por un aeromodelo, dotado de un sistema de adquisición de posición basado en un receptor del *sistema de posicionamiento global* (GPS, *global positioning system*) y un microcontrolador. Para esta prueba, el microcontrolador solamente administra la información de posición, aunque se pretende luego agregar la función de control del dispositivo direccionable. El principal aporte de este trabajo consiste en la utilización de modelos lineales para estimar los efectos de desajuste que implican los recursos de cómputo limitados (relacionados con la velocidad de procesamiento y la resolución en el ángulo de direccionamiento), así como los recursos de actuación con respuesta no ideal (considerando las características de respuesta de un actuador mecánico, en caso de existir).

El resto del trabajo se describe a continuación. En la Sección 2 se dan las definiciones del sistema. Luego, la Sección 3 presenta el algoritmo de cálculo de las variables analizadas. En la Sección 4 se describe la prueba de campo

y el prototipo utilizado, mientras que la Sección 5 contiene el análisis de los desajustes. Por último en la Sección 6 se dan las conclusiones.

## 2 Modelo del Sistema

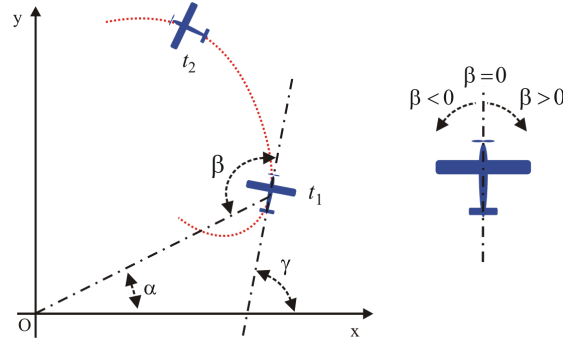
Para simplificar el sistema, en este trabajo se consideran las variables *latitud* y *longitud*, que generan el par  $(x, y)$ , y no se toma en cuenta la *altura*. Mas adelante se muestra que esta simplificación no altera las conclusiones presentadas. Dada la simplificación en dos dimensiones que se ha citado antes, se supone que el dispositivo direccionable sólo cuenta con un movimiento angular en un plano. El plano de movimiento es el determinado por las alas del aeromodelo. Este plano será durante una buena fracción del recorrido equivalente al determinado por el plano latitud-longitud. El objeto fijo que se desea seguir con el direccionamiento tiene una ubicación  $O$ , con coordenadas  $(x_o, y_o)$ .

*Variables angulares.* Dado que este trabajo se enfoca en el análisis del direccionamiento de un dispositivo con movimiento angular, se hace a continuación una cuidadosa definición de las variables angulares utilizadas. En primer lugar se considera que el ángulo que define la tangente a la trayectoria con respecto al eje de longitudes (es decir, el eje  $x$ ) se denomina  $\gamma$ . Luego, se puede trazar una recta que pasa por el punto  $O$  y también por el punto de la trayectoria donde instantáneamente se encuentra el objeto móvil. De este modo, el ángulo que forma esta recta con el eje  $x$  se denomina  $\alpha$ . Finalmente se define la variable angular  $\beta$  cuyo valor se determina midiendo el ángulo que define la recta que genera la dirección principal (de captación o emisión) del dispositivo direccionable, con respecto a la recta que determina la recta tangente a la trayectoria. En otras palabras,  $\beta$  es el ángulo de direccionamiento. Por definición, esta variable toma valores positivos al girar hacia la derecha (sentido de las agujas del reloj), y toma valores negativos en el sentido contrario. Por lo tanto, el valor  $\beta = 0$  representa un direccionamiento en la misma dirección que la tangente a la trayectoria, es decir, un direccionamiento hacia adelante del objeto móvil. Estas definiciones se indican en la Fig. 1, donde se muestra la posición en los instantes  $t_0$  y  $t_1$ . En la definición de  $\beta$  se determina el siguiente intervalo:

$$-180 \leq \beta < 180. \quad (1)$$

Esto se debe a que ante un eventual giro mecánico en el dispositivo direccionable, se debe tener en cuenta que esta limitación es común debido a limitaciones constructivas tales como el cableado. Más adelante se considera el efecto de esta limitación sobre el ajuste del sistema.

Notar que la dirección principal del dispositivo direccionable puede ser determinada por una rotación mecánica de este dispositivo, o puede ser determinada mediante algún otro fenómeno, tal como el direccionamiento (no mecánico) que se consigue en arreglos de antenas mediante una asignación adecuada de fases a cada uno de los elementos del arreglo.



**Fig. 1.** Variables angulares definidas. El ángulo de direccionamiento  $\beta$  indica la rotación de la dirección principal del dispositivo direccionable, con respecto a la recta tangente a la trayectoria.

### 3 Cálculo de las variables angulares

#### 3.1 Algoritmo de Cálculo

En esta sección nos enfocamos en el cálculo de las variables indicadas previamente. Para comenzar, tenemos en cuenta la recta tangente a la trayectoria. Por lo tanto, dadas dos muestras (de tiempo discreto) consecutivas e indicadas por  $(x_i, y_i)$  y  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ , es posible obtener una estimación de  $\gamma$  dada por

$$\hat{\gamma} = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{si } x_{i+1} > x_i \\ \tan^{-1} \left( \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \cdot \frac{180}{\pi} + 180 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad [^\circ]. \quad (2)$$

Dada la ambigüedad en la función  $\tan^{-1}()$ , en este algoritmo se hace necesario determinar la relación entre los valores de  $x_i$  y  $x_{i+1}$  para determinar el cuadrante al cual pertenece el ángulo que se desea estimar. Este criterio es el que determina la aparición de dos casos en (2). Por otro lado, el ángulo que determina la recta que une el punto  $O$  con el punto de la posición instantánea del objeto móvil,  $\alpha$ , se puede determinar de acuerdo con las operaciones en

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \cdot \frac{180}{\pi} & \text{si } x_i > x_0 \\ \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \cdot \frac{180}{\pi} + 180 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad [^\circ]. \quad (3)$$

Una vez más, la identificación del cuadrante adecuado implica la consideración de dos casos, según (3). Luego, dado el valor  $\beta' = \gamma - \alpha + 180$ , la estimación del ángulo de direccionamiento  $\beta$  se puede expresar por medio de

$$\hat{\beta} = \begin{cases} \beta' & \text{si } \beta' < 180 \\ \beta' - 360 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad [^\circ]. \quad (4)$$

El intervalo definido en (1) para  $\beta$  nos conduce a la distinción para los dos casos en (4). Notar que las operaciones en (2) y (3) pueden ser implementadas mediante el algoritmo CORDIC (*coordinate-rotation digital computer*).

En adelante nos referiremos a  $\hat{\gamma}$ ,  $\hat{\alpha}$  y  $\hat{\beta}$  utilizando directamente los símbolos  $\gamma$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  para simplificar la notación. Dado que la interpolación consigue una alta resolución temporal, podemos considerar que las expresiones en (2)-(4) representan adecuadamente sus valores de tiempo continuo.

### 3.2 Registros de Posición en el Prototipo

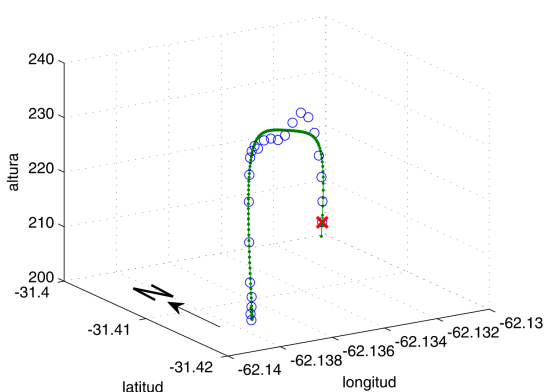
Este análisis se apoya en una prueba lograda a partir de una plataforma desarrollada especialmente para este análisis. Según se indicó, el objeto móvil (UAV) se constituye por un aeromodelo sobre el que se ha montado un GPS de tipo OEM (*original equipment manufacturer*) con antena integrada. Este receptor carece de gabinete y está preparado para ser integrado en un diseño electrónico mayor. Una unidad de procesamiento externa debe administrar la energía de alimentación y las señales de control, y debe estar preparada para recuperar la información de sus salidas. El receptor utilizado implementa un protocolo de comunicación serie, de acuerdo a la especificación NMEA0183. Para los resultados de este trabajo se utiliza una velocidad de refresco en las lecturas del GPS de 1 [Hz]. Se usa un microcontrolador de 16 bits (Microchip<sup>®</sup> PIC24HJ128GP202) dentro del cual se ha embebido un firmware que permite el almacenamiento de las variables: longitud, latitud, altura y tiempo. En este microcontrolador también se implementa la funcionalidad de permitir una descarga de la información en una PC, por medio de una conexión de tipo EIA-232. El almacenamiento temporal se hace en una memoria externa al microcontrolador que es integrada en el circuito electrónico. Para este análisis se ha planteado el objetivo de almacenar las variables de posición durante un periodo de 30 segundos.

Entonces, cada punto analizado de la trayectoria (i.e.  $(x_i, y_i)$  o  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ ) se obtiene a partir de los registros de un receptor GPS, tomados cada 1 [s]. Sin embargo, dado que en este trabajo se pretende analizar con alta resolución el comportamiento de un ajuste sobre el ángulo de direccionamiento en condiciones realistas, se utiliza una interpolación en las variables de posición para lograr una mejor determinación de la trayectoria. Esta interpolación se realiza mediante un modelo lineal que ajusta los coeficientes de una aproximación polinómica de orden cinco. Este ajuste se hace para obtener muestras de posición igualmente espaciadas cada 1 [ms].

## 4 Recorrido de Prueba

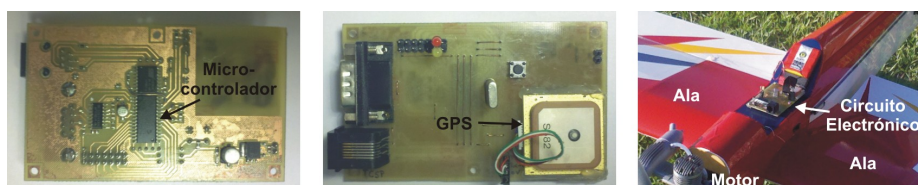
Para conseguir definiciones realistas sobre funcionamiento en ambientes de interés se ha realizado una prueba de campo. En un espacio abierto se utilizó el prototipo fabricado para recorrer una trayectoria que se desarrolla a lo largo de aproximadamente 1 [Km], a una altura cercana a los 220 [m], durante un período de análisis de alrededor de 29 [s]. La trayectoria seguida se muestra en

la Fig. 2 considerando el espacio tridimensional, en ella se ha indicado el punto cardinal norte, para dar claridad a la representación. En la Fig. 2 se observa el modelo interpolado mediante una línea continua. El ajuste para la variable altura no presenta una alta precisión. No obstante, esta curva sólo se incluye para dar claridad sobre el experimento realizado, y se muestra a continuación que el ajuste de interés se halla en el plano bidimensional determinado por la longitud y la latitud. El punto de inicio del recorrido se marca con una cruz. Hasta esta instancia, los registros de posición son procesados fuera del línea (*offline*). Se ha



**Fig. 2.** Trayectoria seguida en un recorrido de prueba que se abarca aproximadamente 1 kilómetro durante un período de 29 segundos, volando a 220 metros de altura.

instalado en el objeto móvil un circuito electrónico especialmente fabricado según se mencionó anteriormente. Las dimensiones del circuito para procesamiento y almacenamiento son de aproximadamente  $5 \times 8$  [cm]. Este accesorio ha sido instalado en la parte superior del fuselaje para mejorar la capacidad de adquirir la información enviada por los satélites GPS. Este prototipo, con su circuito microcontrolado se muestra en la Fig. 3. Dadas las pequeñas dimensiones del circuito

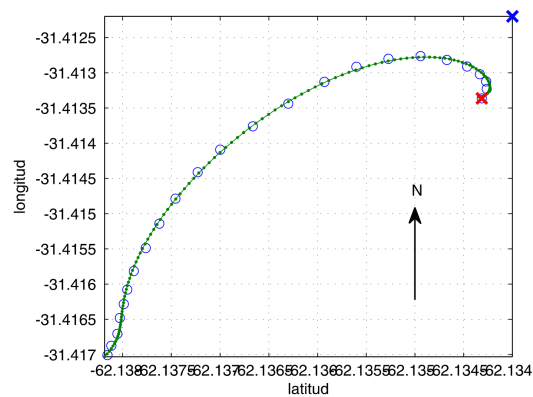


**Fig. 3.** Detalle del montaje de un circuito electrónico basado en un microcontrolador para administrar la operación del módulo GPS. El mismo se instala en la parte superior del fuselaje.

electrónico utilizado, se ha podido instalar sin afectar considerablemente el peso del modelo, ni sus características aerodinámicas.

#### 4.1 Análisis Dinámico

Se considera que el objeto móvil desea orientar el dispositivo direccionable de acuerdo al punto objetivo  $O$  definido por  $(x = 62,134; y = -31,4122)$ . Este punto ha sido seleccionado para mostrar con claridad los resultados de este trabajo, dada la trayectoria particular de la prueba. En la Fig. 4 se muestran el recorrido en dos dimensiones. Una cruz de color rojo indica el inicio del recorrido, mientras que una cruz de color azul en la parte superior derecha del área de trazado es utilizada para indicar el punto  $O$ . Para este recorrido, los ángulos de

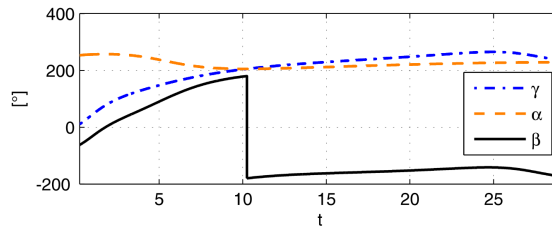


**Fig. 4.** Recorrido de prueba considerando latitud y longitud. El punto objetivo se encuentra en la parte superior derecha del área de trazado.

interés  $\gamma$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son representados en la Fig. 5. Se observa que, tanto para el ángulo que determina la recta tangente a la trayectoria (i.e.  $\gamma$ ), como para el ángulo  $\alpha$ , se presenta una reducida variación durante una fracción considerable del periodo de análisis, que va desde los 15 [s] hasta los 25 [s] aproximadamente. Por su parte, la discontinuidad en la representación de  $\beta$  se debe a la restricción introducida en (1), e indica que la trayectoria del objeto móvil es tal que en un instante cercano a los 10 [s] el giro hacia la derecha del objeto móvil llega a su valor máximo de  $180 [^\circ]$ , y por lo tanto debe girar casi una vuelta completa para poder seguir el punto  $O$ , con una rotación hacia izquierda.

## 5 Estimación de los Errores de Desajuste

En esta sección nos enfocamos en describir el análisis hecho sobre los errores en el ángulo de adaptación. Este enfoque persigue el objetivo de determinar las

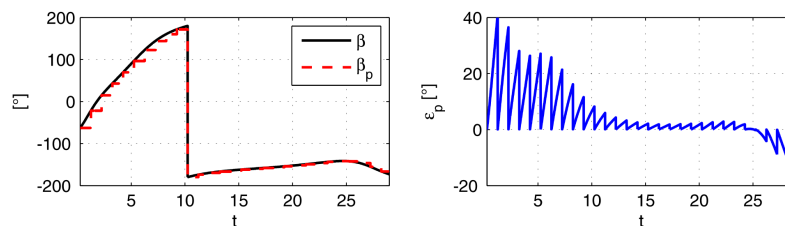


**Fig. 5.** Variables angulares definidas. El ángulo de direccionamiento  $\beta$  indica la rotación de la dirección principal del dispositivo direccionable, con respecto a la recta tangente a la trayectoria.

variables que intervienen en el desajuste entre un ángulo de adaptación que se obtiene en el sistema práctico, en comparación con el valor ideal que se desea.

### 5.1 Error por Retardo de Procesamiento

Partiendo del valor  $\beta$  que se obtiene de (4), comenzamos por analizar el efecto de un tiempo de procesamiento mayor que cero para actualizar este ángulo. Esto es, dado que el ángulo debe adaptarse a lo largo del tiempo en función de una trayectoria variable, se ha indicado cómo un microcontrolador ha sido dispuesto en el objeto móvil para realizar las operaciones de cálculo del valor deseado para  $\beta$ . Sin embargo, dadas las capacidades de procesamiento limitadas del microcontrolador (o de cualquier otra unidad de procesamiento que se emplee) se requiere un tiempo de operación determinado para actualizar el valor deseado. Con esto se advierte que el valor  $\beta$  se actualiza cada un periodo de tiempo  $T$  y se genera una variación escalonada en la estimación de  $\beta$ . Este efecto se modela en  $\beta_p$ , donde el subíndice alude al retraso en la actualización que introduce el tiempo de procesamiento. Mediante una evaluación para la trayectoria y el punto  $O$  fijados



**Fig. 6.** Efecto del retardo de procesamiento en la actualización del valor  $\beta$ , produciendo  $\beta_p$ . El error  $\epsilon_p$  se observa también indicando un desajuste máximo de aproximadamente  $40$   $^{\circ}$ . Se fija  $T = 1$  [s].

previamente podemos obtener la Fig. 6, donde se muestra el ajuste gradual en  $\beta_p$



para un retardo de procesamiento  $T$  de 1 [s]. También se presenta una variable denominada *error por retardo de procesamiento*, que se define como

$$\epsilon_p = \beta - \beta_p \quad (5)$$

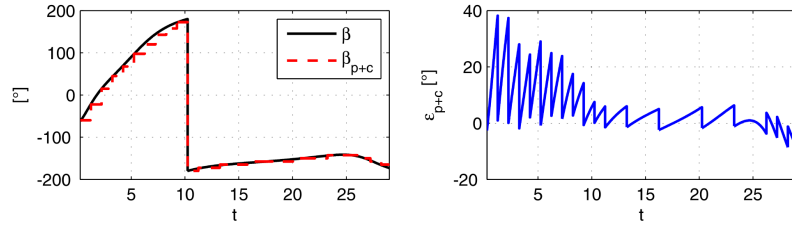
y establece el desajuste entre el ángulo  $\beta$  idealmente obtenido, y el que produce un procesador con un tiempo de procesamiento mayor que cero (i.e.  $\beta_p$ ).

## 5.2 Error por Cuantización

A continuación, se considera que una cuantización es introducida en el sistema debido a dos motivos. El primero consiste en que se estudia un sistema donde el procesamiento se hace en el dominio digital. Un segundo motivo se deriva de que, en el caso de que el ajuste en el ángulo de direccionamiento del dispositivo direccionable se hace mecánicamente, una opción con buenas prestaciones puede ser basada en motores paso a paso. La rotación en este tipo de motores se ajusta a una grilla que la define el paso del motor. Por esta razón, el valor calculado en  $\beta_p$  es cuantizado en nuestro modelo para representar tanto el procesamiento digital como una eventual discretización en el ángulo de rotación de un actuador. Una versión cuantificada de  $\beta_p$  se presenta en  $\beta_{p+c}$ , dependiendo de la resolución de la cuantización  $\Delta$ . No debemos perder de vista que la discretización realizada sirve para estimar el efecto de la cuantización sobre el error; sin embargo, un valor cuantificado en la salida depende del procesamiento digital calculado en el procesador del sistema. Este procesamiento puede introducir errores debido a los cálculos internos con variables cuantizadas (especialmente en el caso de aritmética de punto fijo), por lo tanto la cuantización realizada directamente sobre  $\beta_p$  para obtener  $\beta_{p+c}$ , puede diferir del valor que genere un procesamiento digital con baja resolución. El *error por retardo de procesamiento y cuantización* se define para evaluar el desajuste por medio de

$$\epsilon_{p+c} = \beta - \beta_{p+c}. \quad (6)$$

Aunque la cuantización debida a un actuador mecánico puede no existir en un sistema (por ejemplo en el caso de antenas direccionables), se considera la utilización de un motor paso a paso para llegar a un análisis tan realista como sea posible. En esta situación seleccionamos el modelo Mitsumi<sup>®</sup> M42SP-5 [3]. En este modelo se observa que el ángulo de paso tiene un valor de 7,5 [°]. Dado que el intervalo  $[-180, 180)$  se cuantifica produciendo 48 estados posibles, una representación en valores binarios se puede lograr con 6 dígitos (bits), que a su vez determinan una resolución de 5,625 [°]. Consecuentemente, el paso del motor determina la cuantización a emplear en nuestro modelado. No obstante, no debemos perder de vista que este tipo de actuadores puede ser manejado digitalmente, por medio de un circuito electrónico que controla la corriente en las bobinas del motor con una base binaria (digital), donde la cuantización es implícita. Por lo tanto, desde ambos puntos de vista la resolución angular la determina el paso del motor para este caso. Los resultados de este análisis se presentan en la Fig. 7. Se observa que el efecto de la cuantización ha modificado



**Fig. 7.** Efecto del retardo de procesamiento y la cuantización en la obtención del valor  $\beta$ , produciendo  $\beta_{p+c}$ . El error  $\epsilon_{p+c}$  se observa también indicando un desajuste máximo de aproximadamente 40 [°] pero se advierte un incremento en los valores de desajuste incluso en el periodo en que la dirección de la trayectoria se mantiene con poca variación. Se fija  $T = 1$  [s],  $\Delta = 7,5$  [°].

sensiblemente el valor de desajuste. En esta situación, el beneficio de desarrollar una trayectoria con una dirección con poca variación, como se indica mediante el valor de  $\gamma$  entre los 15 [s] y los 25 [s], no se capitaliza en un bajo error de desajuste. Este efecto genera una notable variación entre  $\epsilon_p$  y  $\epsilon_{p+c}$  según se puede ver.

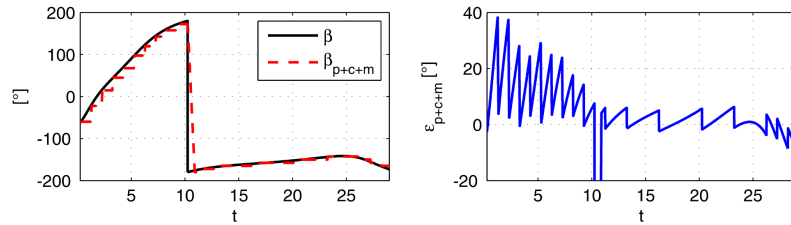
### 5.3 Error por Respuesta Mecánica del Actuador

Aunque un actuador mecánico puede existir en el sistema, o no. Para no perder generalidad es considerado en este trabajo. Seleccionamos el motor paso a paso indicado anteriormente dado que cuenta con las características mecánicas apropiadas para controlar la orientación de una pequeña cámara de video montada sobre nuestro prototipo. Estas características incluyen torque, dimensiones y consumo de potencia [3]. No obstante, nos centramos ahora en el análisis de su tiempo de respuesta. Si suponemos que el ángulo de direccionamiento se controla directamente mediante el ángulo de giro del eje de este motor, es válido considerar su velocidad de giro para analizar el retardo con el que se alcanza una posición deseada que la determina la etapa anterior. En este contexto nos enfocamos en analizar el comportamiento dinámico observado en el ángulo  $\beta_{p+c+m}$  que se observa al ajustar el motor al ángulo deseado  $\beta_{p+c}$ . El *error por retardo de procesamiento, cuantización y respuesta mecánica* se define como

$$\epsilon_{p+c+m} = \beta - \beta_{p+c+m}. \quad (7)$$

Para el análisis particular de este trabajo se encuentra la especificación de la máxima tasa variación en el ángulo del motor por medio de su definición de *maximum pull-in pulse rate* dada en 365 [pps] para una alimentación en 12 [V]. Dado que el fabricante indica que el torque máximo se obtiene en un régimen de 200 [pps], nos parece adecuado tomar el 80% del valor máximo como un valor de diseño. De esta manera la velocidad de giro del motor paso a paso seleccionado ha sido sub-valorada para considerar los efectos de la inercia y una especificación

que no reduzca considerablemente el torque. Con estas definiciones se obtienen los resultados dados en la Fig. 8. Se observa que el retardo en el ajuste del ángulo



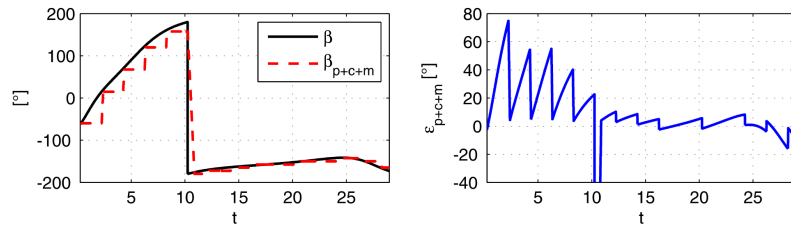
**Fig. 8.** Efecto del retardo de procesamiento, la cuantización y la respuesta mecánica de un actuador en la obtención del valor  $\beta$ , produciendo  $\beta_{p+c+m}$ . El error  $\epsilon_{p+c+m}$  presenta un desajuste máximo de aproximadamente  $-270$  [°] durante el periodo de tiempo en que el motor realiza el giro de derecha a izquierda para responder a la especificación en (1). En el resto de la curva para  $\epsilon_{p+c+m}$  no se observa una diferencia considerable con la curva de  $\epsilon_{p+c}$ . Se fija  $T = 1$  [s],  $\Delta = 7,5$  [°].

de direccionamiento no introduce un cambio substancial sobre el desempeño, en términos de desajuste. Una excepción la constituye el giro que implica cumplir con la especificación dada en (1), la cual sí produce una perturbación de desajuste importante que llega a un pico de  $-270$  [°] (no mostrado en la Fig. 8 para favorecer la comparación con la Fig. 7).

Notar que la respuesta dinámica del sistema mecánico puede encontrar un fenómeno análogo en el caso de un control no mecánico. Esto puede deberse al tiempo de procesamiento de un dispositivo direccionable aún siendo no mecánico, como ejemplo podemos citar el tiempo de cálculo requerido para ajustar un ángulo de conformación de haz en un arreglo de antenas. Sin embargo, este procesamiento se puede integrar con el procesamiento de cálculo del ángulo de direccionamiento, incluso aprovechando técnicas de solapamiento de tareas (*pipelining*). Entonces, este modelo de análisis es igualmente válido al considerar ese retardo como un retardo de procesamiento.

En este punto podemos establecer que el error en el ángulo de direccionamiento  $\beta$  no es severamente afectado por la respuesta mecánica de un sistema que utiliza un actuador mecánico (o un componente equivalente). Por su parte, la principal perturbación que provoca desajuste en el ángulo de direccionamiento es el retardo de procesamiento y la cuantización. En nuestro caso particular, la cuantización sí está fuertemente ligada a las características de actuador mecánico, pero existen otros modelos de motor que podrían mejorar el rendimiento mediante un paso más pequeño.

Para complementar los resultados presentados, en la Fig. 9 se indican los valores para  $\beta_{p+c+m}$  y  $\epsilon_{p+c+m}$  en el caso de un tiempo de procesamiento  $T$  de 2 [s]. Este caso nuevamente muestra que la respuesta dinámica no ideal de un actuador que controle el ángulo de direccionamiento no produce la afeción más



**Fig. 9.** Efecto del retardo de procesamiento, la cuantización y la respuesta mecánica de un actuador en la obtención del valor  $\beta$ , produciendo  $\beta_{p+c+m}$ . El error  $\epsilon_{p+c+m}$  presenta un desajuste máximo de aproximadamente  $-335$  [°]. Se fija  $T = 2$  [s],  $\Delta = 7,5$  [°].

severa, sino que esta es principalmente debida a las imperfecciones que originan el tiempo de procesamiento y la cuantización.

## 6 Conclusiones

Se realizó una prueba de campo basada en un prototipo que conforma un *vehículo aéreo no tripulado* (UAV, *unmanned aerial vehicle*) para obtener registros de posición mediante un receptor GPS (*global positioning system*). Sobre estas muestras se aplicó una interpolación lineal basada en un polinomio de orden cinco para evaluar el ángulo de direccionamiento que se emplea para optimizar un sistema de seguimiento. Los resultados encontrados permiten establecer que el tiempo de procesamiento en el dispositivo de control (micropocesor, *Field-Programmable Gate Array*, etc.) y la cuantización en el cálculo representan la principal causa de desajuste en el ángulo deseado. Por su parte, se encuentra que de acuerdo con la tecnología actual, un motor paso a paso utilizado como actuador no impone restricciones importantes.

## References

1. Chen, J., Dawson, D.M.: UAV Tracking with a Monocular Camera. In: 45th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3873-3878 (2006)
2. Feng, L., Ben, C.M., Yew, L.K.: Integration and Implementation of a Low-cost and Vision-based UAV Tracking System. In: Chinese Control Conference, pp. 731-736 (2007)
3. Mitsumi<sup>®</sup> M42SP-5 Stepper Motor Technical Specification , <http://www.mitsumi.co.jp>
4. Ruangwiset, A.: Path generation for ground target tracking of airplane-typed UAV. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 1354-1358 (2009)
5. Sarkar, T.K., Wicks, M.C., Salazar Palma, M., Bonneau, R.J.: Smart Antennas. Wiley-IEEE Press. (2003)