

Control de seguimiento de trayectorias por navegación satelital Tracking control of trajectories through satellite navigation

I. Valencia-Sandoval ^{a,*}, C. Cervantes-Vázquez ^a, M. Reyes-Hernández ^a, A. Traslosheros-Michel ^a

^aUniversidad Aeronáutica en Querétaro, 22154, Colón, Querétaro, México.

Resumen

Con la finalidad de rastrear y dirigir la trayectoria de un vehículo en movimiento, este artículo presenta un algoritmo de seguimiento de trayectorias mediante navegación satelital. Utilizando mediciones de longitud y latitud del GPS, se calculan las coordenadas en el plano xy para representar la trayectoria en dos dimensiones, con lo cual es posible determinar la dirección y calcular la desviación con respecto al punto de destino. Para ajustar el seguimiento de la trayectoria y lidiar con las perturbaciones se propone un controlador PID y se realizan pruebas en un prototipo de vehículo terrestre, a partir de la información obtenida en dichas pruebas se realiza la sintonización del controlador evaluando adicionalmente la eficiencia en condiciones de referencia dinámica.

Palabras Clave: Control de seguimiento de trayectorias, GPS, navegación satelital, vehículo terrestre.

Abstract

In order to track and steer the trajectory of a moving vehicle, this paper presents a trajectory tracking algorithm using satellite navigation. Using GPS longitude and latitude measurements, the coordinates in the xy plane are calculated to represent the trajectory in two dimensions, thus making it possible to determine the direction and calculate the deviation from the target point. To adjust the trajectory tracking and deal with disturbances, a PID controller is proposed and tests are performed on a prototype ground vehicle. Based on the information obtained in these tests, the controller is tuned and the efficiency under dynamic reference conditions is additionally evaluated.

Keywords: Path Tracking Control, GPS, Satellite navigation, Land-vehicle.

1. Introducción

El control de seguimiento de trayectorias desempeña un papel fundamental en aplicaciones que involucran el movimiento de vehículos autónomos cuyas tareas pueden estar asociadas al análisis de movimiento, seguridad y vigilancia, navegación autónoma, realidad virtual, etc. En la actualidad, diversos algoritmos y métodos se han desarrollado con el objetivo de mejorar la eficiencia y la precisión de estos sistemas, lo que ha impulsado la investigación en este campo (Nise y Romo, 2002).

Por ejemplo, en (Pérez, 2012) se exploran los avances en sistemas de transporte inteligente y conducción autónoma, centrándose en el control de vehículos automáticos. Este estudio destaca la importancia de contar con algoritmos eficientes y precisos para el seguimiento de trayectorias en entornos complejos.

Otro ejemplo relevante es utilizando agrupaciones de ante-

nas en satélites de órbita baja (Pérez y Conte, 2010), donde se investiga el rastreo preciso de satélites utilizando tecnologías de agrupación de antenas. Esta investigación resalta la importancia de la navegación satelital y la necesidad de algoritmos robustos para el seguimiento de trayectorias.

En este proyecto de investigación toma como punto de partida los avances antes mencionados y se explora la metodología del control de seguimiento de trayectorias por navegación satelital. Este artículo presenta la metodología implementada, que abarca desde el procesamiento de datos del GPS (Sistema de Posicionamiento Global) hasta el diseño de un algoritmo de seguimiento; además, se presentarán los resultados obtenidos a través de pruebas exhaustivas, demostrando la efectividad y precisión del algoritmo propuesto. También se discutirán las limitaciones identificadas durante el estudio, ofreciendo posibles mejoras y áreas de investigación futura.

Con este artículo, se busca proporcionar una visión integral

* Autor para correspondencia: 6726@soyunaq.mx

Correo electrónico: 6726@soyunaq.mx (Ivón Guadalupe Valencia-Sandoval), 6858@soyunaq.mx (Cristina Cervantes-Vázquez), 7142@soyunaq.mx (Michelle Reyes-Hernández), alberto.traslosheros@unaq.mx (Alberto Traslosheros-Michel).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2023, última versión-revisada recibida el 16/10/2023, aceptado el 11/10/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11395>



del proceso de desarrollo y evaluación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias basado en la navegación satelital, permitiendo contribuir al avance y la comprensión de esta área de investigación en la actualidad, proporcionando una base sólida para futuros desarrollos en el control de vehículos autónomos y otras aplicaciones que requieren navegación precisa.

2. Estructura y arquitectura

Para simplificar el desarrollo del prototipo, se utilizó la estructura de un pequeño vehículo de tracción. Para su movimiento dicho vehículo contaba con un módulo ESC (Módulo Sistema de Control de Estabilidad), un motor de CD (Corriente Directa) y un servo motor MG996R.

Con el fin de lograr un control altamente preciso sobre la dirección del vehículo, y efectuar giros en un rango específico, se buscó realizar ajustes en la orientación del vehículo. Comenzando con el servo motor MG996R, este recibe señales provenientes del microcontrolador, permitiéndole ajustar la posición de las ruedas delanteras según las condiciones requeridas por el sistema.

La operación conjunta del actuador con el resto de componentes del sistema, se llevó a cabo en colaboración con el microcontrolador Hercules Launchpad TMS570LS04 y el sensor de posicionamiento satelital GPS. La función del microcontrolador se centra en el procesamiento de la información proveniente del GPS y, en función de la ubicación del vehículo, tomar decisiones en cuanto a qué dirección debía tomar. Posteriormente, enviaba las señales de control al servomotor, modificando el ángulo de las ruedas y así logrando un control global y seguro del prototipo.

Teniendo esta base, se montó el sensor de posicionamiento satelital GPS, junto con un microcontrolador orientado a seguridad crítica (Hercules Launchpad TMS570LS04).



Figura 1: Sistema físico armado.

En la figura 1 se muestra el prototipo con los componentes montados en el vehículo, como puede observarse se utilizó una estructura de fácil acceso a los actuadores, sensores y que

permitiera ajustar cualquier error en el cableado de los componentes.

En la figura 2 se muestra la arquitectura de las conexiones entre los componentes del prototipo. Como se observa en el diagrama, el vehículo se alimenta por medio de una batería LiPO, la cual proporciona energía al módulo ESC y a un regulador que alimenta al microcontrolador. El microcontrolador debe tener comunicación con el módulo ESC, que a su vez controla al motor, con el servomotor y con el GPS.

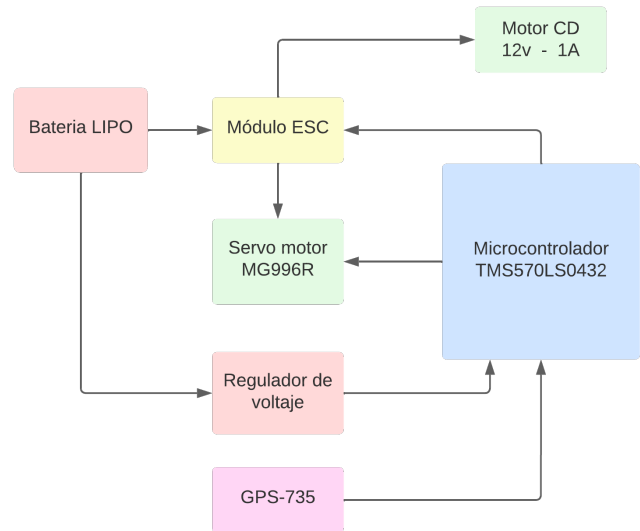


Figura 2: Diagrama de componentes electrónicos del sistema.

3. Instrumentación

3.1. GPS 735

El Sistema de Posicionamiento Global es un sistema de radio navegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación y cronometría gratuita e ininterrumpida a usuarios civiles en todo el mundo. Toda persona que cuente con un receptor GPS, el sistema le proporcionará su localización y la hora exacta en cualquier condición atmosférica, de día o de noche, en cualquier lugar del mundo y sin límite de usuarios simultáneos. (NOAA, 2020)

El GPS se compone de tres elementos: los satélites en órbita alrededor de la Tierra, las estaciones terrestres de seguimiento y control, y los receptores GPS propiedad de los usuarios. Desde el espacio, los satélites del GPS transmiten señales que reciben e identifican los receptores GPS; estos proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa. (NOAA, 2020)

La precisión de un dispositivo GPS depende de muchas variables, por ello, existen muchos factores que pueden afectar a la precisión del mismo, tales como:

- Obstrucciones físicas: Las mediciones pueden verse alteradas por montañas, edificios, árboles y otras estructuras.
- Efectos atmosféricos: Los retrasos ionosféricos, las fuertes tormentas y las tormentas solares pueden afectar a los dispositivos GPS.

- Cálculos numéricos erróneos: Este aspecto puede influir cuando el hardware del dispositivo no se ha diseñado siguiendo las especificaciones.

La precisión tiende a ser mayor en áreas abiertas sin edificios. De lo contrario, se puede dar lugar a cálculos erróneos de la distancia al satélite. (Kyes, 2020)

Al tomar lo anterior en cuenta y para lograr una buena ejecución del control, se hizo uso del módulo de antena inteligente GPS, el cual es bastante compacto y de ultra alto rendimiento.

Según la hoja de datos del sensor GP-735 (TechnologyADH, 2014), tiene una precisión en posición horizontal menor a 2.5 m cuando el receptor GPS opera en modo autónomo, lo que significa que no utiliza ninguna fuente adicional de corrección de señal.

También, este módulo cuenta con un protocolo de comunicación en serie UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), para la transmisión de datos entre dispositivos.

3.2. Hercules Launchpad

De acuerdo con la información proporcionada en las hojas de datos del kit de desarrollo de LaunchPad (TexasInstruments, 2018), el microcontrolador TMS570LS0432 cuenta con una certificación de la norma internacional de seguridad funcional IEC 61508, SIL 3 (Safety Integrity Level) y certificación ISO 26262 ASIL D (Automotive Safety Integrity Level), lo que lo convierte en un dispositivo dirigido a seguridad crítica. Algunas de las características principales del microcontrolador son:

- Boot Time: < 100 ms.
- Speed: 80 MHz.
- Memory: 32 KB (RAM) y 384KB (Flash).
- UART Ports: 1.
- Mass: 1.57 g.
- Maximum Power Consumption: 24 mW.

4. Algoritmo de seguimiento de trayectorias

El propósito del prototipo desarrollado, es que sea capaz de seguir de manera autónoma una trayectoria a partir de coordenadas destino (x,y), como variables de entrada al sistema. Por lo que, se diseñó y se desarrolló un algoritmo de seguimiento de trayectorias que cuenta con un procesamiento de datos GPS, cálculo de variables que le dan orientación al vehículo, como: ángulo actual, ángulo de destino y error. Además, se implementa un control PID que permita la corrección de trayectoria del sistema.

En primera instancia, se realizó el procesamiento correspondiente de los datos recibidos por el módulo GPS, ya que, los bits recibidos necesitan ser decodificados por el microcontrolador para que puedan ser utilizados posteriormente. Con ayuda de la ficha técnica del componente, se extrajo información relevante sobre el formato de mensaje GPGLL de posición geográfica, el cual es parte del estándar NMEA (National

Marine Electronics Association), de donde se obtuvo la latitud, longitud, hora UTC de fijación de posición y estado.

Después de obtener las mediciones de longitud y latitud (las únicas de interés para el propósito del proyecto), fue necesario procesar nuevamente la información, haciendo un cambio en las unidades de medición del sensor. Para guiar el vehículo de una mejor manera, se requerían coordenadas en un plano 2D en metros (x, y), que realizara recorridos en solo dos ejes. Las fórmulas que se usaron para hacer la transformación fueron:

$$\begin{aligned}x &= r \cdot \cos(Long) \cdot \cos(Lat), \\y &= r \cdot \sin(Long) \cdot \cos(Lat); \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

- r : es el radio de la tierra 6371000m,
- Lat : Latitud recibida por el GPS en radianes,
- Log : Longitud del GPS en radianes.

Es importante destacar que, estas unidades son la base de funcionamiento del sistema, con ellas se trabajará durante el resto del procesamiento. El sensor originalmente manda las medidas en latitud y longitud, pero estas fueron cambiadas para que dentro del sistema sean procesadas en metros por fines prácticos. Por lo que, las Formulas 1 representan únicamente la conversión de grados a metros.

Sin embargo, después de obtener las mediciones del sensor y dadas las especificaciones del mismo, se observó que era propenso a presentar una deriva en sus mediciones, debido a esto, se optó por desarrollar un sistema de filtrado de señal. De esta manera, se disminuiría la deriva que el sensor presenta desde el momento en que empieza a funcionar, incrementando gradualmente con el tiempo (Díaz *et al.*, 2001).

Dadas las características del sistema, el filtro que se implementó es un alfa-beta, el cual es ideal para aplicaciones que requieran control de movimiento o en sistemas de navegación. El funcionamiento del filtro se basa en la diferenciación numérica de una señal, lo que se espera obtener es una estimación futura de la señal dadas las muestras actuales y anteriores del sistema, lo que se busca es, obtener una predicción en el comportamiento del sistema, que ayudará a disminuir la deriva en las mediciones del sensor. En este caso, se hace la estimación utilizando dos coeficientes (alfa y beta), de los cuales recibe su nombre. A continuación, se dará una explicación más detallada de su funcionamiento (de Abreu *et al.*, 2020).

En la Ecuación 2, se lleva a cabo la actualización del estado actual del sistema, empleando una aproximación numérica de diferenciación, la cual se basa en la estimación previa del estado, multiplicada por el factor $\alpha = 0,4$, y ajustada por la diferencia entre la medición actual del GPS y la estimación anterior. Así pues, se considera la información actual para predecir y corregir el estado futuro del sistema.

En este caso, las mediciones del GPS son mencionadas de manera general en la ecuación como Z_k , sin embargo, en realidad se aplican separadamente a las coordenadas (x, y), permitiendo un filtrado específico para cada componente de posición.

La actualización del estado actual del sistema se expresa de la siguiente manera:

$$x_{kk} = x_{k,k1} + \alpha \cdot (Z_k - x_{k,k1}); \quad (2)$$

donde:

- x_{kk} : Estado actual del sistema,
- $x_{k,k1}$: Estado anterior del sistema,
- α : Factor Alpha,
- Z_k : Medición del GPS en metros.

En la ecuación 3 se actualiza la ganancia del filtro que se utiliza en la corrección del estado, basándose en la medida de la ganancia anterior, la diferencia entre el valor actual del estado y la estimación anterior, multiplicado por un factor $\beta = 0,025$, dividido entre el valor del periodo.

$$x_{kp} = x_{kp-p1} + \beta * \frac{Z_k - x_{k,k1}}{P}; \quad (3)$$

donde:

- x_{kp} : Estado predicho actual,
- x_{kp-p1} : Estado predicho anterior,
- $x_{k,k1}$: Estado anterior del sistema,
- β : Factor Beta,
- Z_k : Medición del GPS en metros,
- P : Periodo.

Por último, en las ecuaciones 4, se calcula la predicción del estado del sistema en el tiempo siguiente dado el estado actual, utilizando un modelo dinámico para ello.

$$x_{k,k1} = x_{kk} + (P * x_{kp}); \quad (4)$$

donde:

- $x_{k,k1}$: Estado anterior del sistema,
- x_{kk} : Estado actual del sistema,
- x_{kp} : Estado predicho actual,
- P : Periodo.

Es esencial considerar los valores de los coeficientes α y β en el proceso, ya que, un valor de α mayor (cercano a 1 o incluso superior), contribuirá a la reducción de los picos en la señal. Sin embargo, este enfoque también alejará los datos la señal de salida, de los datos reales del sensor, acercándola a la salida prevista por el filtro, lo que resultará en una respuesta más lenta del filtro.

Por otro lado, si el valor de β es grande (cercano a 1 o mayor), la salida será notablemente más rápida, pero se asemejará más a los valores muestreados de la señal real. En este caso, no se logrará un filtrado efectivo de la señal, ya que esta seguirá reflejando los valores originales de manera cercana.

Por lo anterior, una parte fundamental de la implementación del filtro es poder sintonizar los valores de α y β a valores que sean favorables para el sistema, dependiendo de las necesidades que este requiere.

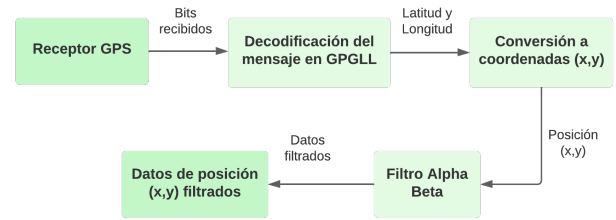


Figura 3: Proceso de recepción de datos GPS.

Es importante mencionar que previo a que sean filtrados, los datos se ajustaron a las coordenadas, es decir, se creó un marco de referencia a partir de la posición destino, cuales son representadas por el punto (0,0) del plano 'xy'.

Al inicio, el código desarrollado solo calculaba la orientación del vehículo. Este fue el primer reto, dado que se debía encontrar una forma de saber la orientación del prototipo, para que a partir de ahí se pudiera calcular el ángulo actual y el ángulo deseado. Lo siguiente fue calcular el error y hacer la implementación del control PID Knospe (2006).

En la Figura 4 se muestra uno de los primeros muestreos realizados, donde el vehículo recorrió una pequeña trayectoria y calculó la tangente de la misma para indicar la dirección que debía seguir. Para una mejor apreciación de las tangentes calculadas, véase la figura 5, donde las pequeñas líneas rectas de color gris son las tangentes.

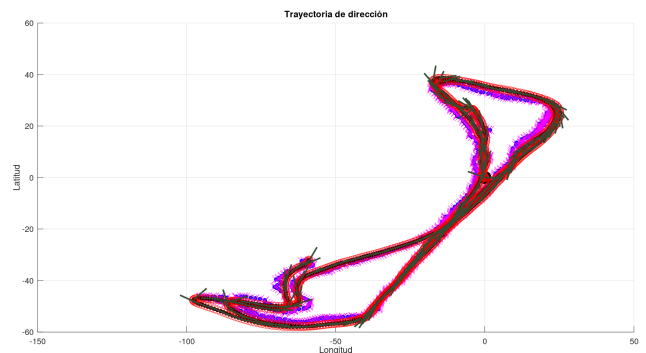


Figura 4: Dirección de la trayectoria (primera versión del algoritmo).

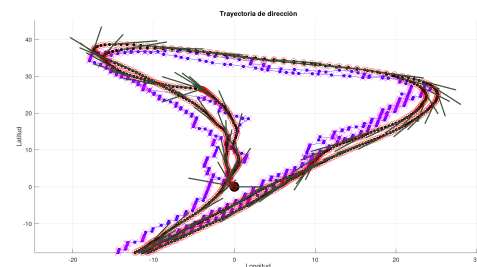


Figura 5: Tangentes de la trayectoria.

El cálculo del ángulo actual se realizó a partir de la trayectoria recorrida, contando con dos puntos de referencia, el punto anterior y el actual. Entre estos dos puntos se puede trazar una recta y a su vez un triángulo recto. Teniendo el triángulo dibujado se calcula el arco-tangente del cateto opuesto, en este

caso la diferencia del eje 'y' entre el cateto adyacente, es decir, la diferencia entre el eje 'x', como se describe en la siguiente imagen (figura 6), si bien en la fórmula mostrada en la figura puede perder información por el cuadrante, en la programación implementamos la función *atan2* que resuelve este problema.

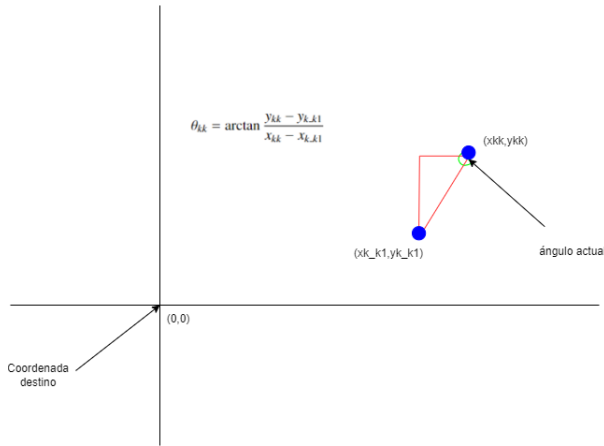


Figura 6: Cálculo de ángulo actual.

Por otra parte, el cálculo del ángulo deseado o destino, se calcula de la misma manera, solo que ahora la diferencia de coordenadas está dada por el punto destino y el punto actual.

Una vez que se tienen las variables calculadas, se calcula el error, restando el ángulo deseado con el actual. Para este punto, ya se completó todo el procesamiento de datos y el cálculo de las variables requeridas para implementar el control PID. Dicho control diseñado, es de lazo cerrado y las ganancias fueron definidas mediante prueba y error. En la Figura 7 lo primero es mandar el ángulo de referencia al sistema, el cual está configurado para que sea cero, después se le resta el ángulo actual del sistema, es por eso que el sistema es de lazo cerrado, indica que habrá una retroalimentación constante al sistema que permita la disminución del error en cada iteración.

Lo que recibe el bloque de control PID es el error que debe corregirse, el bloque de control lo procesa de la siguiente manera: se hace un control Proporcional logrando que el sistema oscile en torno a la referencia, posteriormente se aplica el control Integral el cual hace que el sistema sea cada vez más estable, disminuyendo el error en cada iteración, por último, se aplica el control Derivativo cuyo propósito es hacer que el sistema llegue a la referencia y por lo tanto, a un estado estable, en el menor tiempo posible. Todo lo anterior es lo que hace un controlador PID (Borase et al., 2021).

En la salida del bloque de control se obtiene una señal de duty cycle, esta señal PWM es la necesaria corregir la dirección del actuador, el servomotor se moverá en la dirección deseada dadas las condiciones actuales del sistema. Esta señal es la que entra a la planta, en donde se hace la aproximación para obtener las condiciones ideales de control en el sistema.

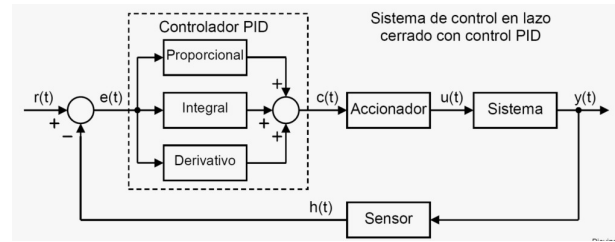


Figura 7: Implementación del PID.

Por último, en la figura 8 se muestra el diagrama del algoritmo. En este diagrama de flujo, se describe la condición que debe cumplirse para que el vehículo se detenga al llegar a su destino. La condición es que las coordenadas 'xy' deben estar dentro de una tolerancia de +/- 2 metros.

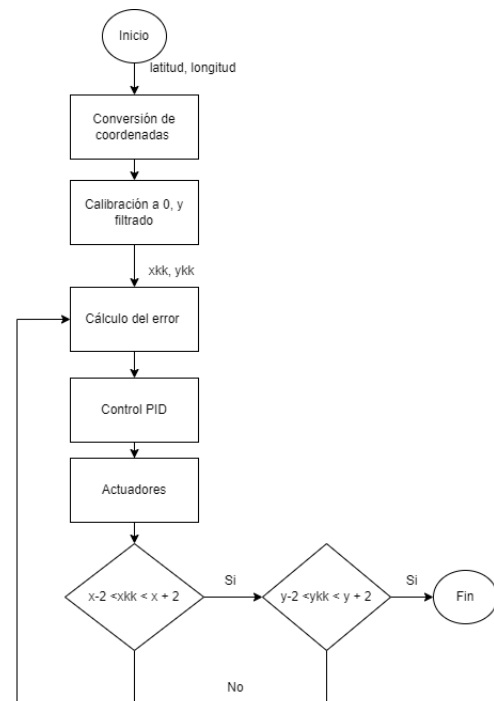


Figura 8: Diagrama del algoritmo explicado.

5. Pruebas y Resultados

Comenzamos nuestras pruebas con un algoritmo que inicialmente tenía ganancias de PID mal ajustadas, lo que resultó en un comportamiento incorrecto de la ruta del vehículo, ya que las coordenadas (x, y) nunca llegan a coincidir al mismo tiempo en el punto de origen, como se muestra en la Figura 9. Estas primeras ganancias nos dieron un punto de partida, lo que posteriormente nos llevó a ajustar el control para mejorar su desempeño.

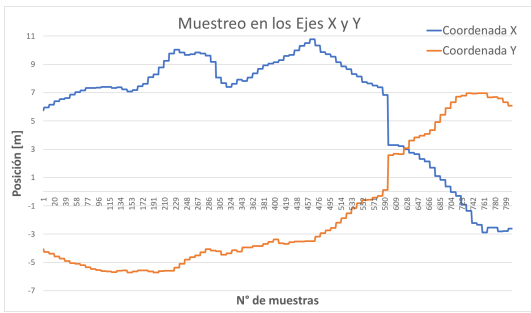


Figura 9: Comportamiento inicial con ganancias de PID mal ajustadas.

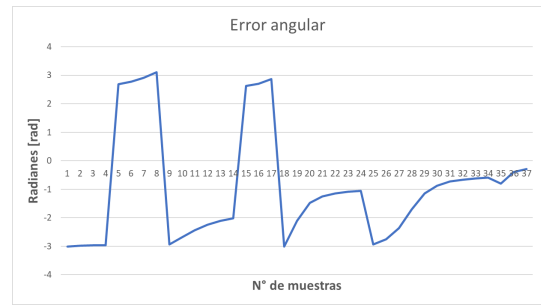


Figura 12: Error angular con ganancias PID mejoradas.

En la Figura 10, se observa el error angular de ambas coordenadas, inicialmente, este error es significativo, pero con el tiempo, el sistema se acerca gradualmente a un error cercano a cero. A pesar de este progreso, nuestro control nunca logra alcanzar el punto inicial deseado, por lo que en su lugar, se produce una oscilación continua que impide llegar al objetivo.

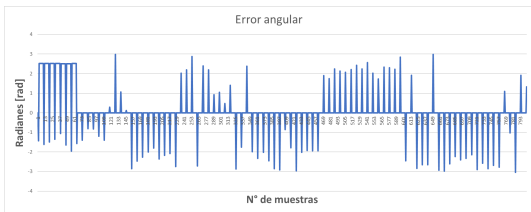


Figura 10: Error angular inicial con ganancias de PID mal ajustadas.

Como parte de las pruebas, se realizó el muestreo mostrado en la Figura 11, en donde primero, se direccionó el vehículo de manera manual hasta que llegara a su destino, después de eso, se llevó el prototipo de nuevo al punto de partida inicial, en donde fue liberado para que iniciara el recorrido de manera autónoma, la última parte de la gráfica muestra ese recorrido autónomo del vehículo de forma exitosa, con ganancias de PID adecuadas, las cuales obtuvimos a base de prueba, error y mucho análisis.

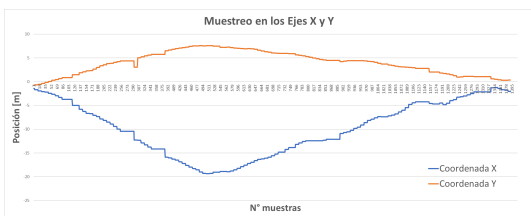


Figura 11: Muestreo de posición de las coordenadas 'xy'.

En la Figura 12, podemos observar un enfoque más detallado de la etapa final del recorrido previo. En esta imagen, podemos apreciar con mayor claridad cómo el error ya no experimenta oscilaciones significativas como con el primer algoritmo, sino que gradualmente se acerca a cero.

Este proceso se realizó de manera repetida durante varios días, orientando el vehículo en distintas direcciones y posicionándolo en distintos lugares, esto nos permitió poder conocer los límites del control y sobre todo, los límites del propio sistema.

Lo anterior hizo que a partir de este momento, las pruebas pudieran hacerse de manera correcta, limitando los escenarios de prueba al margen del sistema. Esto permitió poder hacer una mejor sintonización del control PID implementado.

Una vez que se obtuvieron mejores valores para el control PID, se hizo una última prueba, donde se obtuvo un muestreo con referencia dinámica, cada que llegaba al punto destino, este se movía dándole una nueva referencia a donde debía llegar, de esta manera se podía probar la verdadera eficiencia del sistema.

La Figura 13 representa la respuesta del sistema en el eje x.



Figura 13: Control en eje x.

Mientras que la Figura 14, representa la respuesta del sistema en el eje y.



Figura 14: Control en eje y.

Se muestra como en la Figura 13 la primera pendiente se acerca poco a poco a 0, para después cambiar su referencia a 4, ahora el nuevo punto destino es 4 en el eje x. En la figura 14 ocurre exactamente lo mismo, solo que la nueva referencia cuando se alcanza el 0, es de -4 en el eje y. En el momento en que se detecta el nuevo destino, el vehículo avanza hacia la nueva referencia hasta llegar nuevamente a 0. Este proceso se repite varias veces, en donde cada vez que existe el cambio de referencia se observa con claridad como ambos ejes convergen al mismo tiempo cuando el coche llega a su punto destino.

6. Conclusiones

Como resultado, el desarrollo de un algoritmo de seguimiento de trayectorias basado en la navegación satelital ofrece una solución efectiva para lograr un control preciso del movimiento de vehículos en diferentes aplicaciones. El uso de mediciones de longitud y latitud proporcionadas por el GPS permite calcular la posición y la dirección del vehículo en tiempo real, lo que facilita el cálculo del error de seguimiento y su corrección mediante un controlador PID.

De igual manera, se comprendió que por ejemplo: el sistema tiene fuertes limitaciones cuando el terreno donde se navega es irregular. También, se aprendió que dados los sensores elegidos y el algoritmo programado, el vehículo en sí solo podía saber si se acercaba a la referencia a través del cálculo del ángulo de error, por lo que, en caso de posicionarlo en la dirección opuesta de su destino, mientras el ángulo siguiera siendo 0, no tenía manera de saber que se estaba alejando del destino.

A pesar de estas limitaciones detectadas en el sistema, se lograron avances significativos en la sintonización del controlador y la evaluación de la eficiencia del sistema en condiciones dinámicas. Este artículo sienta las bases para futuras investigaciones en el desarrollo de algoritmos más sofisticados y la integración de tecnologías emergentes para mejorar aún más la

precisión y confiabilidad del seguimiento de trayectorias mediante navegación satelital.

Referencias

- Borase, R. P., Maghade, D., Sondkar, S., y Pawar, S. (2021). A review of pid control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9:818–827.
- de Abreu, J. A. P., de Oliveira, R. C. L., y da Fonseca Neto, J. V. (2020). Rocket tracking impact point prediction using α - β , standard kalman, extended, kalman, and unscented kalman filters: a comparative analysis. *Research, Society and Development*, 9(3):20.
- Díaz, J. G., Mejías, A. M., y Arteaga, F. (2001). Aplicación de los filtros de kalman a sistemas de control. *Revista INGENIERÍA UC*, 8(1):1–18.
- Knospe, C. (2006). Pid control. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1):30–31.
- Kyes, J. (2020). ¿qué significa gps?, <https://www.geotab.com/es-latam/blog/qué-significa-gps/>.
- Nise, N. S. y Romo, J. H. (2002). *Sistemas de control para ingeniería*. Patria Cultural.
- NOAA (2020). Sistema de posicionamiento global, <https://www.gps.gov/spanish.php>.
- Pérez, A. y Conte, R. (2010). *Rastreo satelital utilizando agrupaciones de antenas en satélites de órbita baja*. Tesis doctoral, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Pérez, J. (2012). *Rastreo satelital utilizando agrupaciones de antenas en satélites de órbita baja*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- TechnologyADH (2014). Navisys technology ge-635 data sheet.
- TexasInstruments (2018). Launchxl-tms57004 development kit — ti.