

Bicicleta eléctrica de radiocontrol como proyecto docente

P. Rubial¹, Á. Varela¹, E. Sobrino¹, U. Lugrís², E. Sanjurjo²

¹Universidade da Coruña. [p.rubialy, alvaro.varela2, e.scortes]@udc.es

²Laboratorio de Ingeniería Mecánica, Campus Industrial de Ferrol, CITENI, Universidade da Coruña. [urbano.lugris, emilio.sanjurjo]@udc.es

En un esfuerzo por incrementar la docencia práctica en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol, desde el curso 2019/2020 se han añadido dos asignaturas optativas llamadas Proyecto Interdisciplinar I y II, una en cada cuatrimestre del 4º curso de los grados de ingeniería mecánica y de tecnologías industriales. Cada curso se propone un proyecto que los alumnos han de desarrollar. En la primera parte de la asignatura se hacen seminarios que les proporcionan a los estudiantes las bases teóricas específicas para cada proyecto, y se les pide que realicen una propuesta conceptual. En el segundo cuatrimestre, se trabaja sobre la propuesta conceptual para llevarla a práctica, ya sea un prototipo, o una maqueta funcional, dependiendo del proyecto a abordar en cada curso.

En concreto, durante el curso 2021/2022, el proyecto abordado fue el diseño y construcción de una bicicleta de radiocontrol. El punto de partida era una emisora de radiocontrol Futaba que ya estaba disponible de un proyecto previo, y una bicicleta eléctrica cedida durante el curso 2021/2022 por ciclos Roca, una tienda de bicicletas local. A partir de este material, la propuesta realizada a los alumnos era que diseñasen una bicicleta que se pudiese mantener en equilibrio de forma autónoma, y que se pudiese controlar su velocidad y trayectoria de forma remota mediante la emisora de radio. El mecanismo de equilibrado debía ser la dirección, que es el principal mecanismo de control que emplea un conductor humano cuando el vehículo está en movimiento, sin añadir volantes de inercia, ruedas giroscópicas, ni ningún tipo de elemento similar.

1. Introducción

La formación de los estudiantes en ingeniería debe proporcionar herramientas a los alumnos para que sean capaces de resolver problemas. Si bien una base teórica sólida es imprescindible para acometer con éxito esta empresa, una de las mejores formas de fijar esos conceptos es mediante su aplicación en casos prácticos. Por ello, en la EPEF (Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol), se han implementado dos asignaturas cuatrimestrales optativas en el cuarto curso de los grados de Ingeniería en Tecnologías Industriales y de Ingeniería Mecánica. Cada curso se aborda un proyecto distinto. En este artículo se detalla el proyecto de transformación de una bicicleta eléctrica convencional en una bicicleta de radiocontrol, que fue el proyecto abordado en el curso académico 2021/2022, destacando los aspectos del proyecto que resultan interesantes desde el punto de vista docente.

Las condiciones a considerar a la hora de plantear este proyecto fueron las siguientes:

- El presupuesto estaba limitado a unos pocos cientos de euros (el gasto corriente para el material docente de un curso).
- El número de alumnos habitual en estas asignaturas oscila entre 2 y 6 por cuatrimestre.
- Ya se disponía, por proyectos previos, de un enlace de radio Futaba T3PV de 3 canales, y de una placa Arduino Uno Wifi Rev.2.
- La bicicleta de partida para el proyecto, una Littium Ibiza Dogma, fue cedida por un año por Ciclos Roca, una tienda de bicicletas local.

Con todos estos condicionantes en mente, la propuesta de proyecto para el curso 2021/2022 fue la transformación de la bicicleta eléctrica en una bicicleta que se pudiese controlar a distancia. Una vez en marcha, la bicicleta debía mantener el equilibrio de forma autónoma, y el operario debía ser capaz de controlar la velocidad y la trayectoria del vehículo desde el mando a distancia. El control de la estabilidad se debía conseguir actuando únicamente sobre la dirección, sin usar ningún otro sistema como ruedas giroscópicas, masas móviles, volantes de inercia, etc.

Para llevar a cabo con éxito este proyecto, los estudiantes tendrían que hacer, en primer lugar, una o varias propuestas de las modificaciones mecánicas a realizar a la bicicleta, así como el diseño y selección del resto de componentes, tales como sensores, motores, y otros elementos eléctricos y electrónicos para alimentar todo el sistema y acondicionar la señal de los distintos sensores que propusiesen emplear. La bicicleta, al haber sido cedida temporalmente, no podría sufrir modificaciones no reversibles, pues no se sabía si se iba a adquirir finalmente.

Los conocimientos que implica la realización de un proyecto como este abarcan desde el estudio dinámico del comportamiento de la bicicleta, la teoría de control necesaria para estabilizar el vehículo, la programación de la adquisición de datos y el control en la placa Arduino, etc. Además de todo ello, se han empleado técnicas de fabricación aditiva (impresión 3d FDM), y también algunas piezas de acero soldadas.

2. Formación específica a los estudiantes

Los estudiantes que cursan las asignaturas de proyecto interdisciplinar I y II proceden de dos titulaciones distintas, el grado de Ingeniería Mecánica, y el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Este hecho hace que sus formaciones sean complementarias, pero, a la vez, también se hace necesario compensar algunas carencias que tienen los alumnos de alguno o de ambos grados. En el caso particular de este curso se han organizado los siguientes seminarios de 3 horas: búsqueda bibliográfica y patentes; ensamblaje y simulación de mecanismos con SolidWorks; introducción a la programación con Arduino; control; dinámica de bicicletas y estimación del ángulo de inclinación. En cada caso, se busca al personal docente más adecuado para cada seminario, aunque no sean profesores de la asignatura.

Tras recibir esta formación, los estudiantes empiezan a trabajar la propuesta conceptual, que debe estar finalizada en el primer cuatrimestre. En el segundo cuatrimestre también se pueden organizar seminarios, dependiendo de las propuestas realizadas por los alumnos, y de las carencias que se vayan detectando, aunque para este proyecto no ha sido necesario.

3. Propuesta conceptual

El punto de partida para este proyecto es el desarrollo realizado previamente en [1], en donde se presenta la simulación de un modelo multicuerpo de motocicleta. Para poder simular distintas maniobras con un modelo de motocicleta, es necesario emplear un controlador que se encargue de mantener el vehículo en equilibrio y guiando su trayectoria para poder realizar las maniobras deseadas. Salvo a velocidades muy bajas, el principal elemento de control que tiene una persona para controlar una bicicleta o moto es la actuación sobre la dirección [2][3]. Por ese motivo, en [1] se diseñó un controlador LQR [4] que emplea un modelo de Whipple [5], en el que la única entrada

es un par en la dirección, y la salida es el ángulo de inclinación de la bicicleta. En la propuesta realizada a los alumnos, el conductor tendría un mando con dos controles: uno el que puede controlar la velocidad longitudinal del vehículo en lazo abierto, como en un vehículo tripulado convencional, y otro con el que puede fijar un ángulo de inclinación objetivo. Este último control es el que se emplea para controlar la trayectoria del vehículo: si el conductor desea girar hacia la derecha, fijará un ángulo de inclinación hacia la derecha. Al mantenerse la inclinación hacia la derecha, el controlador girará la dirección hacia ese mismo lado para mantener el equilibrio, con lo que se consigue el giro hacia la dirección deseada por el conductor. De forma análoga, se puede conseguir un giro hacia la izquierda.

La primera tarea que se encarga a los estudiantes tras establecer claramente el objetivo del proyecto y después de haber recibido los seminarios específicos, es que piensen en soluciones específicas para los problemas que hay que resolver, como diseñar la forma de actuar sobre la dirección, seleccionar los sensores a emplear, y diseñar la forma de colocar tanto el actuador como los sensores.

Desde el principio del curso tienen disponible la bicicleta que van a tener que transformar, con lo que pueden empezar a tomar medidas, comprobar cómo se unen las piezas, desmontar parcialmente la bicicleta y pesar las piezas por separado, hacer modelo de CAD, etc. De esta forma pueden empezar a considerar qué piezas se mantienen, cuáles se eliminan, y qué piezas hay que diseñar y construir para conseguir el objetivo final.

En paralelo, es necesario empezar a ajustar el controlador. Aunque el diseño básico del mismo ya se proporciona a principio de curso, es necesario ajustar los parámetros del controlador. En concreto, el controlador LQR empleado se basa en un modelo de Whipple (ver Figura 1:), que es un modelo simplificado que representa la bicicleta mediante 4 sólidos rígidos: la rueda delantera, la rueda trasera, el conjunto de la dirección (horquilla delantera, potencia¹, y manillar) y cuadro. Se asume que la ruedas tienen un espesor nulo y que ruedan sin deslizar. Para ajustar bien este modelo a la bicicleta que se empleará, es necesario caracterizar adecuadamente los parámetros físicos de la bicicleta, como la masa de todos los elementos, sus momentos de inercia, y las características geométricas del vehículo.

Tras este proceso, se concluye que la dirección se actuará mediante un motor de corriente continua convencional (con escobillas); el ángulo de dirección se medirá con un encoder incremental montado sobre el propio motor; la velocidad lineal se estimará usando un sensor óptico que detectará un testigo en la rueda delantera una vez por vuelta; finalmente, la velocidad angular de inclinación se medirá directamente con el sensor de velocidad angular que incorpora la placa Arduino Wifi Rev.2, y el ángulo de inclinación se estimará combinando medidas de este mismo sensor y de la velocidad longitudinal de la bicicleta. La necesidad de estas medidas se justifica en apartados posteriores, donde se explica el diseño final del control empleado.

Finalmente, también se llega a la conclusión de que el modelo dinámico se puede simplificar un poco con respecto al empleado en [1] si la entrada empleada para controlar la dirección es la velocidad angular de la dirección en lugar del par aplicado a la dirección. Este cambio reduce el tamaño del modelo matemático, y elimina la necesidad de determinar el par aplicado a la dirección (ya sea mediante una medida directa, o mediante una estimación indirecta). A cambio, supone añadir un controlador PI adicional que se habrá de ajustar mediante prueba y error.

4. Diseño del controlador

La propuesta inicial realizada a los alumnos fue la de replicar, en la medida de lo posible, el esquema de control que se había usado previamente con éxito en [1]. La mayor diferencia es que en [1] se controla un modelo multicuerpo de motocicleta. Al ser una simulación, el par motor de la dirección puede tomar cualquier valor instantáneamente, y se dispone de toda la información requerida por el controlador sin ningún tipo de error. En nuestro caso, el vehículo a controlar es un sistema real. Por ello, por un lado, existirán limitaciones en el par motor disponible en un instante dado, dependiendo de la velocidad de giro, la aceleración, etc. Por otro lado, la información requerida por el controlador ha de ser obtenida a través de sensores o de estimaciones, que también pueden contener errores y, por consiguiente, afectar al controlador.

La parte central del controlador empleado en [1] es un controlador LQR [4] basado en el modelo de bicicleta Whipple linealizado [5]. Las ecuaciones del modelo de Whipple se obtienen de considerar un modelo de bicicleta compuesto por 4 sólidos rígidos: la rueda delantera, la rueda trasera, el cuadro, y el conjunto de la dirección, como se muestra en la Figura 1:

¹ La potencia, en este contexto, es la pieza que une el manillar de la bicicleta con la horquilla delantera. En este caso, la potencia unirá el motor con la dirección. Adicionalmente, en las bicicletas con dirección sin rosca (como en este caso), la potencia, además de transmitir el movimiento de la dirección a la horquilla, también se encarga de proporcionar la precarga necesaria a los rodamientos de la dirección para que ésta se mueva de forma suave y sin holgura

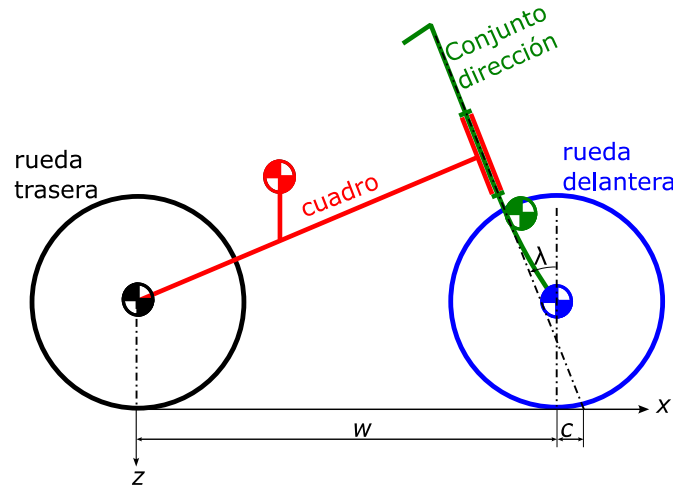


Figura 1: Diagrama del modelo de Whipple.

La dinámica lateral linealizada del modelo de Whipple se puede expresar como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + v\mathbf{C}_1\dot{\mathbf{q}} + [g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2]\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (1)$$

En donde $\mathbf{q} = [\phi, \delta]^T$, siendo ϕ el ángulo de balanceo y δ el ángulo girado por la dirección, $\dot{\mathbf{q}}$ y $\ddot{\mathbf{q}}$ son la primera y segunda derivada temporal del vector \mathbf{q} , respectivamente, \mathbf{M} la matriz de masas, \mathbf{C}_1 una matriz de amortiguamiento, \mathbf{K}_0 y \mathbf{K}_2 dos matrices de rigidez, \mathbf{f} el vector de fuerzas generalizadas aplicadas sobre el ángulo de balanceo y sobre la dirección, g es la aceleración de la gravedad, y v la velocidad lineal de desplazamiento de la bicicleta. Las expresiones de todos estos términos se pueden encontrar en [5]. En el problema abordado en este artículo no hay ningún momento aplicado sobre el ángulo de balanceo, por lo que la única fuerza que consideramos es el par aplicado sobre la dirección.

Para facilitar la incorporación de este modelo en el controlador LQR, se puede escribir como ecuación en espacio de estados, de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (3)$$

En donde el vector de estados es $\mathbf{x} = [\mathbf{q}^T, \dot{\mathbf{q}}^T]^T = [\phi, \delta, \dot{\phi}, \dot{\delta}]^T$, el vector de entradas \mathbf{u} contiene únicamente el par aplicado a la dirección, T_δ , el vector de salidas \mathbf{y} es el ángulo de inclinación ϕ , con lo que $\mathbf{C} = [1, 0, 0, 0]$, y $\mathbf{D} = [0]$. Las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} tienen la forma siguiente:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -\mathbf{M}^{-1}[g\mathbf{K}_0 + v^2\mathbf{K}_2] & -\mathbf{M}^{-1}v\mathbf{C}_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = [0, 0, 0, (-\mathbf{M}^{-1})_{2,2}]^T \quad (5)$$

En donde $\mathbf{0}_{2 \times 2}$ es una matriz de ceros de 2 por 2, $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ es la matriz identidad 2 por 2, y $(-\mathbf{M}^{-1})_{2,2}$ es el elemento 2, 2 de la inversa de la matriz de masas.

Para poder emplear este modelo, se requeriría poder medir o estimar sus estados y sus entradas. De todas estas magnitudes, la que se ha considerado más problemática para medir o estimar con cierta precisión fue el par de la dirección. Por ese motivo, se modificó el modelo de Whipple considerando como entrada la velocidad de dirección en lugar del par de dirección, de forma que ahora $\mathbf{u} = [\dot{\delta}]$. De esta forma, el estado del modelo simplificado sería $\mathbf{x} = [\phi, \delta, \dot{\phi}]^T$. La nueva matriz \mathbf{A} está compuesta por las tres primeras filas y las tres primeras columnas de la matriz \mathbf{A} expresada en la ecuación (4), la matriz \mathbf{D} no cambia, y las matrices \mathbf{B} y \mathbf{C} ahora quedan como $\mathbf{B} = [0, 1, 0]^T$, $\mathbf{C} = [1, 0, 0]$.

Con este cambio, no es necesario conocer explícitamente el par motor aplicado, simplemente será necesario aplicar una velocidad de giro a la dirección. Esto se conseguirá mediante un controlador PI ajustado mediante prueba y error con el prototipo de bicicleta de radiocontrol.

Una vez definido el modelo que empleará el controlador, se usa para ajustar el controlador LQR. En este caso, se ha partido de un cuaderno de Jupyter creado por Urbano Lugiés y disponible en la dirección web <https://github.com/ulugris/bike>. En este cuaderno se modela la dinámica de la bicicleta como un péndulo invertido.

Esto ya se probó en [1], y se ha visto que funciona a algunas velocidades, pero no consigue estabilizar el vehículo en un rango amplio de velocidades. Por lo tanto, se emplea este cuaderno de Jupyter, pero con el modelo de Whipple linealizado con el formato que se acaba de describir.

El controlador LQR por defecto es un regulador, es decir, trata de llevar todos los estados a su valor de equilibrio. Sin embargo, el objetivo de este proyecto es poder controlar el ángulo de inclinación a voluntad. Para ello, el modelo dinámico empleado en el controlador LQR tendrá un estado adicional, que será la integración temporal del error en el seguimiento de la referencia de ángulo de inclinación.

En este artículo no se detalla el diseño del controlador LQR, pero, en resumen, lo que se busca es hacer estable el sistema a controlar, minimizando a la vez el valor de los estados y de las entradas, todos ellos ponderados con distintos coeficientes de penalización que el diseñador ha de ajustar, dependiendo de la respuesta del sistema deseada, y de las limitaciones en los actuadores existentes.

Al finalizar el diseño del controlador, lo que se obtiene es una matriz de coeficientes que, multiplicados por los estados, proporcionan los valores de las entradas que hay que aplicarle al sistema a controlar para conseguir el comportamiento deseado. En este caso, el vector de estados finalmente empleado ha sido $\mathbf{x} = [\phi, \delta, \dot{\phi}, \xi]^T$, donde ξ es la integral del error del ángulo de inclinación con respecto al ángulo deseado. Del proceso de optimización se obtiene un vector de coeficientes $\mathbf{K} = [K_1, K_2, K_3, K_4]$. El cálculo de la entrada a aplicar al controlador se hace como $\mathbf{u} = \mathbf{Kx}$. En este caso, con el diseño realizado, se obtiene un único valor, que es la velocidad angular que le hay que aplicar a la dirección para conseguir el comportamiento deseado en la bicicleta. Posteriormente, se aplicará tensión en bornes del motor de corriente continua de la dirección mediante un controlador PI hasta conseguir la velocidad angular requerida por el controlador LQR.

Dado que las ecuaciones del sistema varían con la velocidad de desplazamiento de la bicicleta (ver ecuación (4)), el controlador se debería ajustar para distintas velocidades. Sin embargo, para esta primera implementación, se ha decidido ajustar el controlador para un rango de velocidades bajo (2 m/s), dejando este ajuste dependiente de la velocidad para posteriores evoluciones del prototipo.

5. Selección de componentes e implementación del controlador

Para implementar el controlador es necesario contar con un sistema que lleve a cabo la computación necesaria, y, además, que permita realizar la adquisición de datos necesaria para ejecutar el controlador. En este caso se tomó la decisión de emplear un Arduino Uno Wifi Rev2 que ya estaba disponible de proyectos previos. Esta placa emplea un microcontrolador ATmega4809 8-bit, que es una mejora con respecto al microcontrolador ATmega328P empleado en el Arduino UNO R3. Sin embargo, la principal característica que ha decantado la decisión por esta placa es que incorpora una unidad de medida inercial LSM6DS3TR, de forma que posibilitará medir velocidades angulares y aceleraciones sin añadir elementos adicionales. También incorpora un módulo wifi que, aunque no es estrictamente imprescindible, se mostró muy útil en la fase de depuración.

Las magnitudes que habrá que medir son las siguientes: ángulo de inclinación de la bicicleta y su velocidad angular, y ángulo de dirección y su velocidad angular. Además, es necesario medir la velocidad longitudinal de avance de la bicicleta por varios motivos. Por un lado, como se ha visto, la dinámica del sistema varía con la velocidad longitudinal (aunque en esta implementación no se haya tenido en cuenta, sí se podrá tener en cuenta en el futuro). Por otro lado, es necesario detectar si el vehículo está avanzando o está estacionario, ya que el mecanismo de girar la dirección hacia el lado de la caída indeseada solo puede estabilizar la bicicleta si hay una velocidad de avance. Por último, emplearemos la velocidad de avance en parte del algoritmo para estimar el ángulo de inclinación de la bicicleta, como se detalla posteriormente en esta misma sección.

La dirección de la bicicleta ha de ser girada a la velocidad que determine el controlador LQR descrito en la sección anterior. Por ello, será necesario instalar un motor que actúe sobre la dirección. En este caso, se ha seleccionado el motor Pololu Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V, un motor de corriente continua con escobillas que funciona a 12 V, que incluye una reductora con una relación de reducción de 150:1 y un encoder de 64 pulsos por revolución en el eje del motor. Así, este componente nos proporciona la actuación sobre la dirección, y, además incluye el dispositivo de medida para el ángulo de la dirección. Este encoder es de tipo incremental, por lo que es necesario incluir una referencia fija para inicializar el valor del encoder. Se ha pensado en incluir un sensor infrarrojo y una pestaña solidaria a la dirección para obtener una referencia absoluta de ángulo durante la inicialización.

La medida de la velocidad de dirección se obtiene derivando numéricamente la medida de posición angular. Dado que la derivada numérica de la señal de un encoder tiende a ser bastante ruidosa, se hace también un filtrado numérico.

La velocidad angular de la inclinación de la bicicleta se obtiene directamente de la unidad inercial. Para ello uno de los ejes de la unidad de medida inercial ha de estar alineado con el eje longitudinal de la bicicleta (es decir, la línea que une los puntos de contacto de las ruedas con el suelo). En su defecto, se podría poner la unidad inercial

con una orientación arbitraria (aunque tendría que ser conocida), y componer la medida deseada a partir de las componentes detectadas por la unidad inercial.

El ángulo de inclinación es más complicado de obtener. Teóricamente se podría obtener mediante la integración en el tiempo de la velocidad angular anterior. Sin embargo, este enfoque tiene dos problemas: por un lado, requiere conocer el ángulo de inclinación inicial. Por otro lado, en la práctica, este método siempre acaba presentando una cierta deriva, hasta el punto que es un método inviable con los sensores de bajo coste empleados en este prototipo. En este proyecto, lo que se ha hecho es combinar esta integración con una estimación del ángulo procedente del equilibrio dinámico estacionario de una bicicleta en curva, como se muestra en la Figura 2:

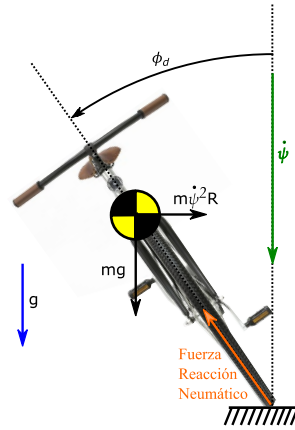


Figura 2: Equilibrio estacionario de una bicicleta en curva.

El ángulo de inclinación se puede calcular como:

$$\phi_d = \arctan\left(\frac{\dot{\psi}^2 R}{g}\right) = \arctan\left(\frac{\dot{\psi} v}{g}\right) \quad (6)$$

En donde ϕ_d es el ángulo de inclinación estimado usando el equilibrio dinámico estacionario de la bicicleta en curva, $\dot{\psi}$ es la velocidad angular de guiñada, R es el radio de curvatura de la trayectoria realizada por el centro de masa de la bicicleta, g es la aceleración de la gravedad, y v es la velocidad lineal de la bicicleta. Las dos expresiones indicadas para obtener el ángulo de inclinación son equivalentes. Sin embargo, en la primera de las expresiones interviene el radio de curvatura de la trayectoria del vehículo, pero no siempre es fácil de obtener. Sin embargo, la velocidad lineal ya se necesita en otras partes del algoritmo de control, y es fácil de obtener. La velocidad angular de guiñada se obtiene de la componente inicialmente vertical de la unidad de medida inercial. Esta medida es correcta cuando la bicicleta no está inclinada, y va empeorando según se alcanzan mayores ángulos de inclinación. Cabe destacar que lo que buscamos es una referencia consistente de ángulo de inclinación, pero su valor absoluto no importa demasiado, ya que se espera que el usuario que maneje el control remoto vaya ajustando el mando para obtener más o menos inclinación, según la trayectoria buscada, pero la intención nunca será alcanzar un valor exacto de ángulo de inclinación, sino ser capaz de aumentarla o reducirla de forma predecible, de la misma manera que un conductor humano no necesita conocer el valor del ángulo de inclinación exacto que necesita para tomar una curva en bicicleta.

Como se han indicado anteriormente, el ángulo de inclinación obtenido mediante integración tiene tendencia a presentar deriva con el tiempo. Por el contrario, el ángulo de inclinación obtenido de la ecuación del equilibrio en curva no presenta deriva, pero sí es una medida muy ruidosa, y proporciona resultados erróneos en los transitorios. Este es un problema habitual en la estimación del ángulo de inclinación en bicis y motos. La solución pasa por combinar ambas medidas mediante un filtro de Kalman, o un filtro complementario, entre otras opciones. Sin embargo, en este trabajo, dado que la precisión requerida no es muy alta, y el coste computacional debe ser lo más reducido posible, se opta por combinar ambas medidas mediante una media ponderada, de la siguiente forma:

$$\phi_i^- = \phi_{i-1}^+ + \dot{\phi} \Delta t \quad (7)$$

$$\phi_i^+ = \phi_i^- + k(\phi_d - \phi_i^-) \quad (8)$$

En donde ϕ_i^- es el valor obtenido por integración en el instante i , basándose en el último estado estimado ϕ_{i-1}^+ , la velocidad de inclinación $\dot{\phi}$, y el paso de tiempo de integración Δt . Una vez obtenido el valor del ángulo de inclinación por integración, se combina con el ángulo obtenido mediante el equilibrio dinámico ϕ_d , como se indica en la ecuación (8). Esta ecuación replica la ecuación de corrección de un filtro de Kalman, pero en este caso el valor empleado para la corrección k se ajusta por prueba y error. En este trabajo se ha ajustado para que, a la frecuencia de muestreo empleada, el ángulo tarde alrededor de 5 segundos en irse a 0 desde cualquier valor cuando

la bicicleta está parada. Con este tiempo se ha visto que la estimación del ángulo no es ruidosa, y, a la vez se evita la deriva de la integración.

La última medida que falta por detallar es la relativa a la velocidad longitudinal. En este caso se ha optado por medir el tiempo que la rueda delantera tarda en dar una vuelta. Conociendo el perímetro de la rueda y este tiempo, se puede estimar la velocidad media de la última revolución de la rueda. El sensor empleado ha sido un fotointerruptor igual al empleado para obtener la referencia del encoder de la dirección. Este sensor se monta sobre la horquilla delantera, y su haz infrarrojo es interrumpido una vez cada vuelta de la rueda delantera por una pestaña colocada sobre el disco de freno delantero.

6. Soluciones de instrumentación, programación y control del motor

Este apartado trata las soluciones que se han ido buscando para los distintos retos a conseguir para hacer funcionar la bicicleta de radiocontrol.

El sensor empleado para medir el ángulo de dirección es un encoder incremental. Aunque un encoder girando a baja velocidad se podría leer directamente desde un microcontrolador, exige mantener una frecuencia de muestreo muy elevada para no perder ningún pulso. En caso de perderse algún pulso, se cometería un error en el ángulo de medida y dicho error se mantendría en todos los instantes posteriores al pulso perdido. Si el motor gira a velocidades más elevadas, el microcontrolador se tendría que dedicar en exclusiva a la lectura del encoder. Por ello, en este caso, se ha empleado un decodificador de encoders, que es un circuito especializado que muestrea el encoder y determina su posición, y luego proporciona esta información al microcontrolador cuando se le consulta. El contador empleado en este caso ha sido la placa Counter Click del fabricante Mikroe, que es una placa de desarrollo que emplea el circuito integrado LS7366R. La comunicación con el Arduino Uno Wifi Rev2 usado como microcontrolador principal en este proyecto se realiza mediante el bus SPI.

Para resolver el problema de inicialización del encoder se empleó un sensor infrarrojo Sharp GP1A57HRJ00F, que detecta cuando su haz es interrumpido por una pestaña que se mueve solidariamente con la dirección de la bicicleta. Aprovechando que se diseñó y construyó una potencia específica para dirección mediante impresión 3D, se incluyó esta pestaña como parte de la potencia, como se muestra en la Figura 3:



Figura 3: Potencia (en azul) con la pestaña empleada para la referencia de ángulo de dirección, en combinación con el sensor infrarrojo, que se ve en la parte delantera.

Otro de los problemas que hubo que abordar fue la lectura de las señales proporcionadas por el sistema de radiocontrol. Este sistema cuenta con dos componentes principales: la emisora (es decir, el “mando” que maneja el operario), y el receptor, que viaja a bordo del vehículo. Aunque el sistema tiene tres canales, en este caso solo se emplean dos: uno para proporcionar la referencia de ángulo de dirección deseada, y otro para controlar la velocidad longitudinal del vehículo. Ambas señales son enviadas desde la emisora al receptor. Una vez recibidas, el receptor emite una señal eléctrica por cada canal, de forma que cada canal emite un pulso eléctrico a 50 Hz. La anchura de dicho pulso determina el nivel de cada canal, de forma que un pulso con una duración de 1 ms significa que el canal está al mínimo (por ejemplo, no acelerar nada, o tumbar a tope hacia la izquierda), y una duración de pulso de 2 ms significa que el canal está a tope (es decir, acelerar al máximo, o tumbar a tope hacia la derecha).

La señal de salida de cada uno de estos canales se conecta a un pin del Arduino, con lo que el problema se reduce a medir de la forma más eficiente el ancho del pulso.

En el lenguaje del Arduino ya existe una función, llamada `pulseIn`, que mide la duración de un pulso en una señal. Sin embargo, se ha comprobado que esta función interrumpe la ejecución del programa desde que se llama a la función hasta que se acaba el pulso. Esto supone retrasos inadmisibles en esta aplicación, por lo que se ha optado por medir la duración de los pulsos empleando rutinas activadas por interrupciones. En este caso, cuando la señal del canal considerado pasa de 0 V a 5 V, se lanza automáticamente una rutina que lo único que hace es consultar el reloj del sistema (en microsegundos), y guardar el dato de tiempo de ese instante en una variable. Luego el programa continúa su ejecución normalmente en el punto en el que se había interrumpido. Cuando esa misma señal vuelve a 0 V, se vuelve a consultar el tiempo y se calcula el ancho del pulso comparándolo con la medida tomada anteriormente. De esta forma no se bloquea la ejecución del programa principal.

En cuanto a la actuación sobre la dirección, el elemento seleccionado para esta función es un motor de corriente continua. El Arduino es una placa de control, y, por lo tanto, no tiene salidas de potencia para alimentar un elemento como un motor. Por este motivo es necesario emplear un elemento intermedio, que reciba la señal de control adecuada desde el Arduino, y que controle la corriente de alimentación al motor. Como va a ser necesario hacer girar el motor a ambos lados, la opción adecuada en este caso es emplear un puente H, que permite invertir la polaridad de la corriente de alimentación del motor. En este caso, se ha empleado una placa de desarrollo que contiene dos circuitos integrados BTS7960, que cada uno de ellos es medio puente H. La tensión eficaz que llega a los bornes del motor se controla mediante modulación por ancho de pulso (PWM).

Para controlar la velocidad longitudinal de la bicicleta se ha optado por partir de una bicicleta con acelerador manual, con la idea de eliminar dicho acelerador y simular la señal que produce desde el microcontrolador. Aunque la idea es aparentemente sencilla, no conseguimos obtener información fiable y precisa acerca de las características que debía tener la señal. El conector del acelerador tenía tres pines. Uno de ellos proporcionaba 5 V, el otro 0 V, y el tercero era al que le había que proporcionar la señal de entrada. Leyendo sobre sistemas similares, la señal de entrada debía ser una señal de tensión de entre 1 y 4 V. La primera solución probada fue colocar un potenciómetro entre el pin de 5 V, y el de 0 V, y su dial al pin de la señal. Este sistema parecía funcionar para cargas muy bajas del motor. Sin embargo, al tratar de acelerar con una mayor intensidad, la controladora de la bicicleta detectaba un error, y se bloqueaba. El siguiente intento se hizo también con un potenciómetro, pero en este caso, en lugar de tomar los 5 V de la controladora, se tomaban del Arduino. De esta forma se elimina el consumo del potenciómetro desde la centralita, y de esta manera ya se podía acelerar la bicicleta correctamente. Entonces se sustituyó el potenciómetro convencional por un potenciómetro digital, en el que el valor de resistencia del potenciómetro se puede ajustar por software desde el microcontrolador principal. Esta solución parecía funcionar, pero en un breve período de tiempo se quemaron dos potenciómetros digitales. Así que, finalmente, se optó por probar la solución que se adoptó finalmente: un circuito RC alimentado por un canal PWM del Arduino. De esta forma, se puede generar cualquier nivel de tensión eficaz entre 0 y 5 V, y el circuito RC lo filtra, de forma que la controladora de la bicicleta lo interpreta como si fuese el puño del acelerador que traía la bicicleta antes de ser modificada.

Finalmente, se detalla el sistema de alimentación para todos los sistemas eléctricos y electrónicos añadidos a la bicicleta. Dado que la bicicleta es eléctrica, se podría haber empleado la batería de tracción incluida con la bicicleta. Sin embargo, este enfoque implica el riesgo de dañar la batería (con el consiguiente riesgo de explosión al ser una batería de litio). Además, para alimentar el Arduino sería necesario reducir la tensión de dicha batería (de 36 V) a un valor de entre 7 y 12 V, que es la tensión de entrada recomendada para el Arduino. El último inconveniente es que la batería va integrada en el interior del cuadro de la bicicleta y no es fácil acceder a la misma sin hacer modificaciones. Por todos estos motivos se ha optado por instalar una batería adicional de plomo-ácido de 12 V y 7 Ah.

7. Implementación física del prototipo

Una vez decididos los componentes que compondrían la bicicleta de radiocontrol hay que pensar cómo se colocarían.

El único actuador que tendría la bicicleta en esta fase sería el motor de la dirección, que también incorpora el encoder. Además, para la inicialización del encoder se emplea un fotointerruptor de infrarrojos. Estos elementos se montan directamente en la zona delantera de la bicicleta, alrededor de la pipa de dirección y sobre la parte superior de la caña de la horquilla delantera. Para sujetar todos estos elementos de forma segura y fiable, se han diseñado soportes específicos y se han construido mediante impresión 3d en plástico PLA. Para reforzar las piezas que tendrían unas mayores sollicitaciones mecánicas se ha optado por incluir varillas roscadas a modo de armaduras postensadas, que evitarán la separación de las distintas capas que conforman las piezas impresas en 3D en caso de posibles impactos.

Para facilitar el acoplamiento del motor a la horquilla, se ha eliminado el manillar y la potencia originales de la bicicleta, y ambos elementos han sido sustituidos por una potencia diseñada y construida específicamente para acoplarla al motor. Esta potencia también ha sido fabricada mediante impresión 3d, aunque la parte del acoplamiento se fabricó en acero usando una fresadora CNC, puesto que las piezas de plástico no soportaban los esfuerzos a que eran sometidas en la zona de contacto con el eje de salida de la reductora del motor de la dirección.

La mayoría de los componentes electrónicos restantes se situaron en una caja colocada sobre el transportín trasero; a saber, la batería de 12 V, el Arduino, el receptor de radio, el puente H, la tarjeta de lectura del encoder, y el circuito RC para emular el acelerador de la bicicleta. La caja que contiene estos elementos también se construyó mediante impresión 3d. Se diseñó para ir firmemente sujeta al transportín trasero mediante 4 tornillos, ya que hay dos elementos especialmente sensibles: el primero de ellos es la batería, que es un elemento relativamente pesado (2.2 kg), y podría causar daños materiales o lesiones en caso de desprenderse accidentalmente. Por este motivo, la caja de plástico ha sido reforzada con una estructura fabricada con pletina de acero que impide que la batería pueda romper la caja de plástico y salir despedida. El otro elemento crítico es la placa del Arduino, ya que, además del microcontrolador, incluye la unidad de medición inercial. Por ese motivo debería moverse solidariamente con el cuadro de la bicicleta. En este caso se ha decidido sujetar mediante tornillos la placa del Arduino a la base de la caja montada en el transportín trasero. En la siguiente figura se muestra el alojamiento de la batería.



Figura 4: Alojamiento de la batería, fabricado mediante impresión 3D y con refuerzo de acero.

El resto de componentes electrónicos situados en la caja trasera se montan sobre la placa del Arduino, con las conexiones eléctricas como único elemento de sujeción.

Para proteger el vehículo en su conjunto en caso de caída, se ha montado una estructura que evita el impacto de zonas sensibles con el suelo. Esta estructura está hecha de tubo y pletina de acero, y se sujeta al cuadro de la bici empleando el tubo que originalmente servía para alojar la tija del sillín y mediante el tornillo de sujeción del caballete lateral. En cada uno de los extremos cuenta con una rueda que ayuda a amortiguar el impacto de la caída y evita el rozamiento del metal contra el suelo.

Por último, se ha montado una seta de emergencia que detiene todos los sistemas de la bicicleta cuando se pulsa. Esta seta va montada sobre la parte superior del sistema anticaída. El propio interruptor de la seta de emergencia tiene dos canales, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado. El normalmente cerrado se coloca en serie con la alimentación de toda la electrónica añadida, por lo que, al pulsar la seta de emergencia, corta la alimentación a todos los sistemas que se han montado sobre la bicicleta. Sin embargo, al no tener acceso directo a la batería de tracción de la bicicleta, no se puede emplear el mismo enfoque. Afortunadamente, las bicicletas eléctricas cuentan con un mecanismo de seguridad que corta la alimentación del motor eléctrico en cuanto se actúa sobre el freno. Esta función se consigue mediante un interruptor normalmente abierto que está en cada una de las manetas de freno y que se cierran al frenar. Los interruptores de ambas manetas se conectan a la controladora de la bicicleta, y ésta corta la alimentación del motor de tracción en cuanto se cierra uno o los dos interruptores. En este caso se han conectado el interruptor normalmente abierto de la seta de emergencia a uno de los conectores que la controladora del motor tiene para los frenos, de forma que al pulsar la seta de emergencia se detenga inmediatamente el motor de tracción.

El conjunto final se muestra en marcha en las imágenes de la siguiente figura:



Figura 5: Prototipo en el estado alcanzado al final del curso 2021/2022.

8. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se explica el proyecto desarrollado por los alumnos de Proyecto Interdisciplinar del curso 2021/2022 de los Grados de Ingeniería Mecánica e Ingeniería en Tecnologías Industriales, consistente en la transformación de una bicicleta eléctrica comercial en una bicicleta de radiocontrol que mantenga el equilibrio de forma autónoma mediante movimientos de la dirección.

Para conseguir este objetivo, los alumnos han tenido que aplicar sus conocimientos de dinámica (en este caso aplicada a bicicletas), teoría de control, modelado en CAD, programación y electrónica, entre otros. Además, se han tenido que enfrentar a un problema con una solución abierta, con el reto que esto supone, máxime cuando los problemas cerrados siguen teniendo un gran peso en la docencia en ingeniería.

Tras la realización de este proyecto, creemos que esta propuesta de proyecto ha sido muy acertada por los siguientes motivos:

- El proyecto en sí mismo tiene interés, ya que constituye una introducción progresiva para problemas más complejos, como el control de bicicletas o motocicletas autónomas, o el control activo de vehículos inclinables de vía estrecha mediante movimientos de dirección, entre otras muchas aplicaciones.
- Como proyecto docente toca varias ramas de conocimiento que lo hacen muy valioso para profundizar en dichas disciplinas.
- El proyecto es muy vistoso, y es relativamente fácil mostrar el prototipo en funcionamiento. Además, es muy fácil de explicar en qué consiste el prototipo y qué hace, pero a la vez parece que es mucho más difícil de conseguir de lo que realmente es. Todos estos factores hacen que los alumnos obtengan una gran motivación, pues en el proceso de realización del proyecto ellos mismos pasan de no creer que puedan ser capaces de conseguirlo a ver el prototipo funcionando.
- Exceptuando la propia bicicleta eléctrica y el enlace de radio, el resto de los componentes son relativamente económicos, con un coste total por debajo de 500 € sobre el coste de la bicicleta y la emisora de radio.
- Una vez que se dispone de un prototipo funcional, se puede emplear para multitud de proyectos de docencia y/o de investigación, como proyectos de conducción autónoma, o investigaciones en las que se requiera realizar la misma maniobra varias veces sin tener en cuenta la variabilidad introducida por un conductor humano, entre otras muchas posibilidades.

El estado del prototipo al finalizar el curso 2021/2022 es funcional, pero con limitaciones, lo que deja lugar para realizar mejoras en cursos posteriores. En este estado, el prototipo mantiene el equilibrio y se puede conducir a velocidades reducidas. Aunque no se ha medido con precisión, se ha podido verificar que la bicicleta es estable desde una velocidad de marcha a pie (aproximadamente unos 3 o 4 km/h) hasta un trote ligero (unos 10 o 12 km/h). A velocidades más reducidas, el motor no tiene la potencia necesaria para realizar giros de dirección rápidos y de gran amplitud necesarios para mantener la bicicleta en equilibrio. A velocidades más elevadas, se perciben oscilaciones que el controlador no es capaz de corregir, y si no se reduce la velocidad cuando esto sucede, la bicicleta posiblemente acabaría cayéndose. Cuando se reduce la velocidad, la inestabilidad se corrige inmediatamente. Las causas de esta inestabilidad pueden venir por el diseño del controlador, que ha sido ajustado para una velocidad de 2 m/s, y a la holgura de la reductora del motor de la dirección, que provoca imprecisiones y retrasos en las correcciones necesarias para mantener la estabilidad. Adicionalmente, en el estado al finalizar el curso 2021/2022, la bicicleta no tiene ningún sistema de frenado, ni siquiera de freno motor, por lo que siempre ha de haber una persona cerca para detener el vehículo manualmente si la situación lo requiere.

En cuanto a las inclinaciones máximas alcanzables, a velocidades bajas se requieren ángulos de dirección muy grandes para obtener inclinaciones importantes, por lo que el límite vuelve a ser la potencia y velocidad del actuador de la dirección. A velocidades un poco más elevadas, sin embargo, el límite se ha encontrado en la adherencia del neumático delantero. Como el conjunto es mucho más ligero que una bicicleta y un conductor humano, se ha observado una cierta tendencia a que la rueda delantera rebote con las pequeñas irregularidades del asfalto al tomar curvas con inclinación importante, lo que reduce mucho la capacidad de inclinación lateral, aunque este comportamiento mejora bajando las presiones de los neumáticos a aproximadamente 1 bar, que sería una presión muy baja para conducir esta bicicleta con un conductor humano. Debido a estas restricciones, en este momento se ha limitado la inclinación a 6 grados a baja velocidad, y ese rango se incrementa progresivamente hasta un máximo de 20 grados para velocidades un poco más altas.

Estas limitaciones ya apuntan a una serie de mejoras que se pueden abordar en cursos sucesivos, como la sustitución del sistema de actuación de la reducción por uno más robusto, con más potencia, y con menor holgura, y la inclusión de un sistema de frenado. También se puede perfeccionar el sistema de control, incluyendo la variación de las ganancias del controlador LQR con la velocidad. Por último, este prototipo se presta a realizar desarrollos más avanzados en el futuro, como la capacidad de detectar obstáculos y frenar o esquivar de forma autónoma, o incluso intentar hacer un vehículo completamente autónomo.

9. Agradecimientos

Los autores agradecen a Ciclos Roca y al Campus Industrial de Ferrol el apoyo prestado para la realización de este proyecto.

10. Referencias

- [1] Maceira, D., Luaces, A., Lugrís, U., Naya, M.Á., Sanjurjo, E., “Roll Angle Estimation of a Motorcycle through Inertial Measurements”, *Sensors*, **21**, 6626 (2021).
- [2] Schwab A. L., Meijaard J. P., “A review on bicycle dynamics and rider control”, *Vehicle System Dynamics*, **51**, 1059–1090 (2013).
- [3] Moore, J. K., Kooijman, J. D. G., Schwab, A. L., Hubbard, M. “Rider motion identification during normal bicycling by means of principal component analysis”, *Multibody System Dynamics*, **25**, 225–244 (2011).
- [4] Ogata, K. *Modern Control Engineering, 5th Ed.*, Pearson, (2010).
- [5] Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., Schwab, A. L., “Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review”. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **463**, 1955–1982 (2007).