



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“Implementación de un Sistema Automático para la
Transmisión de una Bicicleta de Uso Urbano”.**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

JORGE ELIECER HERRERA SALAZAR

MIGUEL ADRIÁN SILVA PELÁEZ

Director:

ESTEBAN DAMIÁN COELLO MORA

CUENCA – ECUADOR

2017

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
INDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Sistema de Transmisión Convencional: El Sistema de Desviadores.....	4
1.3 Introducción a las mejoras propuestas con el sistema de transmisión automático	6
1.3.1 Física relacionada a la bicicleta	7
1.3.2 Transmisión	8
1.4 Partes utilizadas en el prototipo.....	10
1.4.1 Transmisión Variable Continua (CVT)	10
1.4.2 Sensores utilizados en el estudio	12
1.5 Diagrama de bloques de control del sistema propuesto	14
1.6 Introducción al Método de Identificación de Sistemas	16
1.6.1 Tipos de modelado.....	18
1.6.2 Modelado de Caja Negra	19

1.6.3 Procedimiento de Identificación de Sistemas	20
1.6.4 Validación del Modelo.....	20
1.6.5 Criterios de selección.....	21
1.7 Procedimiento para elaboración de sistema de transmisión automática	21
CAPÍTULO II - RECOLECCIÓN DE DATOS DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA.....	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 Circuitos de Interfaz de los Sensores.....	24
2.2.1 Circuito de Interfaz del Sensor de Hall.....	24
2.2.2 Giroscopio.....	27
2.3 Adquisición de Datos	28
2.3.1 Proceso de adquisición.....	28
2.3.2 Ubicación de los sensores dentro de la bicicleta.....	30
2.3.3 Condiciones de adquisición	31
2.4 Señales Adquiridas	33
2.4.1 Gráficos de las señales adquiridas	34
2.4.2 Análisis estadístico de las señales adquiridas	35
CAPÍTULO III - IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	39
3.1 Introducción.....	39
3.2 Preparación previa de las señales adquiridas.....	39
3.2.1 Estimación de los tiempos de retardo de las señales de entrada.....	39
3.3 Base teórica para la estimación del modelo	40

3.3.1 Estructuras de modelo polinomiales	40
3.4 Entorno de software y proceso de identificación del sistema.....	44
3.4.1 Estimación de modelos con la estructura ARX	45
3.4.2 Modelos obtenidos con la estructura ARX	45
3.4.3 Estimación de modelos con la estructura OE	46
3.4.4 Modelos obtenidos con la estructura OE	47
CAPÍTULO IV - SOFTWARE DE CONTROL Y SIMULACIÓN	51
4.1 Introducción.....	51
4.2 Base Teórica	51
4.2.1 Controlador Proporcional	51
4.2.2 Control Proporcional Integrativo	52
4.2.3 Control Proporcional Derivativo	52
4.2.4 Controlador Proporcional Integrativo Derivativo (P-I-D).....	53
4.3 Ajustes previos del modelo obtenido	53
4.4 Diagrama de bloques del sistema controlado	54
4.5 Simulación del controlador.....	55
4.5.1 Obtención de los coeficientes del controlador PID	55
4.6 Resultados de la Simulación.....	57
4.6.1 Comportamiento de la salida frente a la entrada.....	57
4.6.2 Señal entregada al actuador.	59
CAPÍTULO V - IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE CONTROL	60
5.1 Introducción.....	60

5.2 Partes usadas en la implementación del sistema	60
5.2.1 Microcontrolador	60
5.2.2 Alimentación de los circuitos	61
5.3 Ubicación de los circuitos en la bicicleta.	62
5.4 Software programado en el microcontrolador	62
5.4.1 Inicialización del sistema.....	63
5.4.2 Proceso de adquisición y procesamiento de señales.....	63
5.4.3 Proceso de obtención de la relación de transmisión óptima	63
CAPÍTULO VI - PRUEBAS DE CAMPO.....	66
6.1 Introducción.....	66
6.2. Descripción de la ruta.....	67
6.2.1. Descripción por Tramos:	67
6.3 Descripción de los Ciclistas en prueba.....	71
6.3.1 Sujeto 1 (Ciclista Experimentado).....	72
6.3.2 Sujeto 2 (Ciclista Amateur).	72
6.4 Parámetros de medición de rendimiento.	72
6.4.1 Dispositivo de medición de los parámetros de rendimiento.....	73
6.5 Pruebas y resultados	73
CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sistema de transmisión convencional de desviadores	5
Figura 1.2. Relación de transmisión entre dos ruedas.....	9
Figura 1.3. Nuvinci N360	11
Figura 1.4. Rango de relaciones de transmisión del CVT Nuvinci N360.....	12
Figura 1.5. Principio Efecto Hall.	13
Figura 1.6. MPU-6050	14
Figura 1.7. Diagrama de bloques del sistema de transmisión automático	15
Figura 1.8. Proceso para la obtención del software para el sistema de transmisión automática controlado	22
Figura 2.1. Circuito de Interfaz para el sensor de Hall	25
Figura 2.3. Ubicación del sensor de Hall	26
Figura 2.4. Ubicación del sensor de Hall	27
Figura 2.5. Diagrama de bloques de adquisición de los datos para su posterior identificación.....	28
Figura 2.6. Conexiones de los sensores y la memoria SD para almacenamiento hacia el microcontrolador	29
Figura 2.7 Ubicación de los sensores dentro de la bicicleta	30
Figura 2.8. Ruta de experimentación para adquisición de las señales de entrada y salida del sistema de transmisión	31
Figura 2.9. Perfil topográfico del circuito de experimentación escogido	32
Figura 2.10. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 65 r.p.m.	34
Figura 2.11. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 75 r.p.m.	35
Figura 2.12. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 75 r.p.m.	35
Figura 2.13. Señales de velocidad adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación, medidas en kilómetros por hora	36
Figura 2.14. Relaciones de transmisión del CVT adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación	37
Figura 3.1. Estructura de modelo ARX.....	41

Figura 3.2. Estructura de modelo OE.....	43
Figura 3.3. Ingreso al software de identificación de los grupos de datos obtenidos..	44
Figura 3.3. Interfaz de configuración de las condiciones de estimación para la estructura ARX	45
Figura 3.4. Gráficas de los modelos generados con la estructura ARX.....	46
Figura 3.5. Interfaz de configuración de las condiciones de estimación para la estructura OE.....	47
Figura 3.6. Gráficas de los modelos generados con la estructura OE.....	48
Figura 3.5. Modelo matemático escogido	49
Figura 3.6. Respuesta al escalón de cada una de las entradas en el modelo escogido	50
Figura 4.1. Diagrama de bloques del controlador PID con las plantas obtenidas de cadencia, velocidad e inclinación.....	54
Figura 4.2. Diagrama de bloques de la simulación del sistema	55
Figura 4.3. Sintonizador PID gráfico	56
Figura 4.4. Respuesta de la salida del sistema frente a la señal deseada o señal de entrada.....	57
Figura 4.5. Señal de error resultante de la señal de cadencia deseada y la señal de cadencia medida en la simulación.....	58
Figura 4.6. Señal entregada al actuador con respecto al tiempo	59
Figura 5.1. Microcontrolador usado en el prototipo, marca Arduino, modelo MEGA 2560.....	61
Figura 5.2. Batería de alimentación de los circuitos del sistema, de 12V y 3800mAh.....	61
Figura 5.3. Ubicación del microcontrolador, circuitos de los sensores y batería dentro del prototipo	62
Figura 5.4. Diagrama de flujo del software incorporado al microcontrolador.....	64
Figura 6.1. Bicicletas usadas en las pruebas comparativas de rendimiento.....	66
Figura 6.2. Mapeo del tramo 1	67
Figura 6.3. Perfil topográfico del tramo 1	68
Figura 6.4. Mapeo del tramo 2	68
Figura 6.5. Perfil topográfico del tramo 2.....	69
Figura 6.6. Mapeo del tramo 3	69
Figura 6.7. Perfil topográfico del terreno tramo 3	70
Figura 6.8. Mapeo del tramo 4	70

Figura 6.9. Perfil topográfico del terreno tramo 4	71
Figura 6.10. Samsung Gear Neo 2™.	73
Figura 6.11. Gráficas del perfil topográfico de la ruta y de la frecuencia cardíaca de los ciclistas.....	74

INDICE DE TABLAS

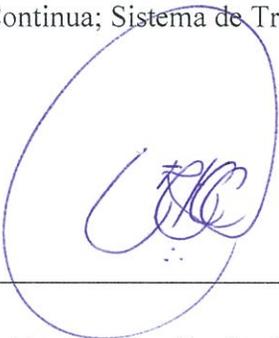
Tabla 1.1 Analogías entre la transmisión manual (convencional) y la transmisión automática (propuesta).....	7
Tabla 2.1. Definición de las variables utilizadas en el sistema de transmisión automática	24
Tabla 2.2. Datos estadísticos de las señales de velocidad adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación, medidas en kilómetros por hora	37
Tabla 2.3. Datos estadísticos de las señales de relación de transmisión adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación.....	38
Tabla 3.1. Tiempos de retardo en segundos para cada señal de entrada con respecto a la salida	40
Tabla 3.2. Valores de los coeficientes de los polinomios pertenecientes a la estructura del modelo escogido para cada una de las entradas	49
Tabla 6.1. Valores Obtenidos a partir de las pruebas del circuito de 4 tramos.....	75

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA TRANSMISIÓN DE UNA BICICLETA DE USO URBANO

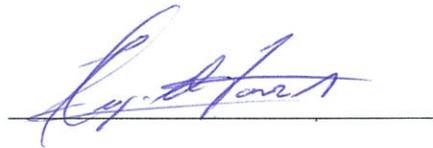
RESUMEN

Este trabajo se enfoca en solucionar los inconvenientes de seguridad vial, comodidad, y rendimiento a los que se enfrenta un ciclista dentro de un entorno urbano. Para ello se ha desarrollado un sistema de transmisión para bicicletas formado por un servomotor y una manzana de transmisión variable continua. Un microcontrolador comanda dicho sistema mediante algoritmos de control automático que calculan la relación de transmisión óptima en base a datos tomados de sensores de velocidad, ritmo de pedaleo e inclinación ubicados previamente en la bicicleta. El prototipo resultante es comparado con un sistema de transmisión convencional para demostrar su utilidad.

Palabras clave: Ciclismo; Control Automático; Manzana de Transmisión Variable Continua; Sistema de Transmisión; Microcontrolador.



Esteban Damián Coello Mora



Hugo Marcelo Torres Salamea

Director del Trabajo de Titulación



Jorge Elieser Herrera Salazar

Director de Escuela



Miguel Adrián Silva Peláez

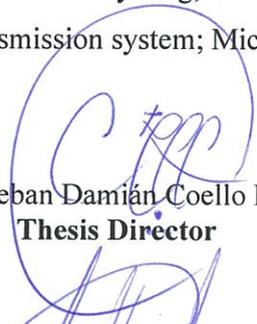
Autores

IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATIC TRANSMISSION SYSTEM FOR AN URBAN BICYCLE

ABSTRACT

This work focuses on solving drawbacks in regard to road safety, comfort, and performance problems that a cyclist faces within an urban environment. For this purpose, a bicycle transmission system consisting of a servo motor and a continuous variable transmission has been developed. A microcontroller commands this system by means of automatic control algorithms that calculate the optimum transmission ratio based on data taken from speed sensors, pedaling rhythm and from tilt, previously located on the bicycle. The resultant prototype is compared to a conventional transmission system in order to demonstrate its utility

Keywords: Cycling; Automatic control; Continuous Variable Transmission system; Transmission system; Microcontroller.



Esteban Damián Coello Mora
Thesis Director



Hugo Marcelo Torres Salamea
School Director



Jorge Eliaser Herrera Salazar



Miguel Adrián Silva Peláez

Authors



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

Herrera Salazar Jorge Eliecer

Silva Peláez Miguel Adrián

Trabajo de Titulación

Esteban Damián Coello Mora. Mst.

Febrero, 2017.

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA TRANSMISIÓN DE UNA BICICLETA DE USO URBANO

INTRODUCCIÓN.

La dificultad para movilizarse dentro de ciudades modernas, donde la congestión vehicular crece año tras año, ha generado la necesidad de buscar nuevas soluciones en movilidad, de modo que sus habitantes puedan transportarse de forma ágil y segura. Uno de los medios de transporte alternativos de mayor uso es la bicicleta, por ser de bajo costo, saludable y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, los sistemas de transmisión convencionales presentan algunas dificultades para el ciclista: el cansancio que se produce al hacer sobre-esfuerzo por mantener una relación de transmisión inadecuada para la pendiente del terreno por el que se transita; además, el acto de calibrar la transmisión de la bicicleta distrae al ciclista quien necesita enfocar su atención en los demás vehículos para evitar un posible accidente. Este y otros motivos impulsan a proponer la implementación de un sistema de transmisión automática que calcule y active la relación de transmisión óptima en toda circunstancia para así lograr mayor comodidad, menor esfuerzo, disminuir la distracción del ciclista, o también aportar a la movilidad del usuario en caso de tener capacidades especiales, donde el usuario no cuenta con alguna de sus extremidades y necesita reducir los elementos de manejo y control de la bicicleta.

El sistema de transmisión automático mantiene el ritmo de giro de los pedales, o cadencia, a un nivel constante, a través de un servo motor que servirá de actuador junto con una manzana de transmisión variable continua instalada en la llanta trasera de la bicicleta.

El algoritmo de control es elaborado a partir del registro de mediciones de las variables de velocidad inclinación y cadencia, tomadas al momento de circular con la bicicleta y de establecer la relación de transmisión de forma manual por el ciclista. Los datos de las variables y la relación de transmisión servirán para luego producir las funciones de transferencia de cada una de las variables con respecto a la relación de transmisión. Estas funciones de transferencia se calculan con el método de Identificación de Sistemas, usado generalmente en bioelectrónica y meteorología (Keesman, 2011). A partir de estas funciones de transferencia se invoca un controlador PID que mantenga la variable de cadencia en un valor constante preestablecido, mediante el actuador que es el servomotor y la variable controlada que es el valor de la relación de transmisión. El algoritmo de control, así como el procesamiento y registro de los datos que provienen de los sensores, están embebidos en un microcontrolador, que a su vez despliega los datos instantáneos en una pantalla LCD gráfica.

El prototipo resultante será comparado con una bicicleta que contenga un sistema de transmisión convencional. Ambas bicicletas serán manejadas por dos tipos de ciclistas, de quienes se medirán ciertos parámetros dentro de una ruta establecida y así determinar si el prototipo aporta o no mayor comodidad y eficiencia al momento de transitar dentro de un entorno urbano.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La bicicleta es un vehículo impulsado por el ser humano. Su uso se ha extendido por todo el mundo y su diseño se ha mantenido en esencia sin modificaciones desde hace más de un siglo (Ballantine & Grant, 1992). Algunos motivos de su popularidad incluyen el ser un medio de transporte económico y ecológico, su facilidad de manejo y por la ventaja obtenida en la relación entre esfuerzo y velocidad de desplazamiento en distancias cortas.

Recientemente, en nuestro país se ha dado mayor atención al ciclismo como un medio de transporte alternativo ya que brinda a los ciudadanos una opción más económica y saludable. En las principales ciudades se han desplegado obras y programas para incentivar a la comunidad a adoptar la movilidad en bicicleta, no solo por los beneficios expuestos, sino también porque contribuye a la disminución de la congestión vehicular, cuyos problemas aumentan cada día (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, s.f.).

Muchos estudios se han realizado en torno a la física que describe los diferentes movimientos de la bicicleta con la finalidad de aumentar su rendimiento y eficiencia, principalmente en la alta competencia. La aerodinámica, las fuentes de fricción, el peso de los materiales y otros temas relacionados han sido investigados por científicos de diferentes partes del planeta desde su invención (Gordon Wilson & Rowland Whitt, 1982).

Esta tesis relaciona el uso de una bicicleta convencional con otra de similares características, solo que con ciertas adaptaciones electromecánicas que aportan una mayor eficiencia al ciclista en términos de consumo de energía y ritmo cardíaco. Estas adaptaciones consisten en la implementación de un sistema de cambios automático y gradual que actúa en relación a la velocidad, inclinación y ritmo de giro de los pedales.

Se centra la atención al entorno urbano, por su creciente popularidad y porque dentro de las ciudades los ciclistas necesitan estar concentrados en el tráfico que los rodea para proteger su integridad, y esta atención se ve disminuida por las desventajas del sistema de transmisión manual convencional. Además, la bicicleta presentada es de uso urbano por los siguientes motivos:

- **Por su enfoque de medio de transporte y medio recreativo.** Dentro de la ciudad la bicicleta es utilizada para transportarse o para pasear. La transmisión de la bicicleta propuesta no está diseñada para competencias ni carreras, donde temas como el peso de la bicicleta o la búsqueda del máximo rendimiento del ciclista tienen mayor importancia.
- **Por su rango de inclinación.** El sistema está diseñado para soportar un rango de inclinaciones de cuesta limitado. *No* está diseñado para ciclismo de montaña, donde se trata con pendientes pronunciadas.
- Aunque no es una limitación que excluye a la bicicleta, si es necesario recalcar que la bicicleta tampoco ha sido pensada para desplazarse a altas velocidades, sino más bien para brindar comodidad al desplazarse.

En el presente capítulo, se presenta el funcionamiento del sistema de transmisión convencional y sus desventajas, seguido del esbozo del sistema propuesto. Además, se exponen las bases teóricas y otros aspectos que contribuirán a una mayor comprensión del estudio.

1.2 Sistema de Transmisión Convencional: El Sistema de Desviadores

El sistema de transmisión usado por la mayoría de bicicletas modernas es el sistema de desviadores (*derailleur*) que consta de las siguientes partes (Figura 1.1): un conjunto de engranajes ubicados junto a los pedales, a los cuales llamaremos “platos”; otro conjunto de engranajes ubicados junto al eje de la llanta trasera, a los que llamaremos “piñones”; dos “desviadores”, uno para los platos y otro para los piñones; dos “manipuladores”, cada uno colocado a un extremo del timón de la bicicleta y que controlan a cada uno de los desviadores; y la cadena que transmite el movimiento

desde los pedales hacia la llanta trasera, que es la llanta que permite el movimiento de la bicicleta con respecto a la pista (Real, 1988).

El sistema de desviadores funciona de la siguiente manera: el ciclista ajusta mediante los manipuladores del timón a los desviadores ubicados en los conjuntos de platos y los piñones. Los manipuladores se conectan a los desviadores a través de cables tensores (Ballantine & Grant, 1992). La función de cada uno de los desviadores es ajustar la cadena en uno de los engranes para así variar la relación de transmisión (véase sección 1.3.2.1) de los pedales con respecto a la rueda trasera, es decir de la fuerza aplicada por el ciclista con respecto al movimiento de la bicicleta. Este mecanismo permite al ciclista aplicar una mayor fuerza cuando se desplaza por una cuesta y una mayor velocidad cuando se encuentra en terrenos planos o en bajada. Diferentes combinaciones de platos y piñones (a las que llamaremos en adelante “cambios”) otorgan una gama variada de relaciones de transmisión para adaptarse a diferentes condiciones de terreno (Berto, 2009).

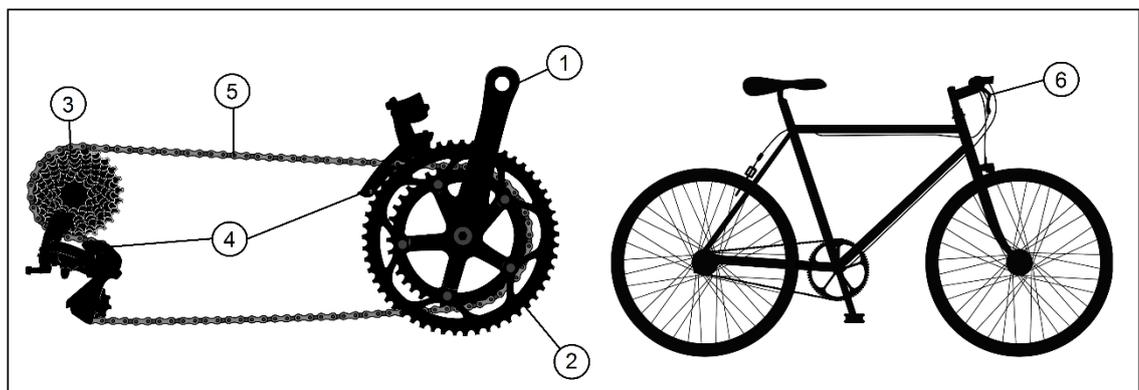


Figura 1.1. Sistema de transmisión convencional de desviadores. Consta de las siguientes partes: 1) Pedales. 2) Conjunto de platos. 3) Conjunto de piñones. 4) Desviadores. 5) Cadena de transmisión. 6) Manipuladores en el timón.

Una desventaja con el sistema de transmisión convencional de desviadores consiste en la discontinuidad que se produce en el giro de los pedales, producida por las interrupciones bruscas al realizar un cambio de marcha en una pendiente (Caldwell et al., 1998). Al subir una cuesta luego de transitar por una pista plana, el ciclista generalmente se encuentra con una disminución de la velocidad y pérdida del rendimiento de la fuerza que imprime hacia los pedales debido a traqueteos y fuertes

fricciones en el momento de realizar los cambios en un sistema de transmisión convencional. Además, no siempre el ciclista está capacitado para aplicar el cambio más adecuado que le permita sacar el mayor partido de la fuerza que entrega a la bicicleta.

1.3 Introducción a las mejoras propuestas con el sistema de transmisión automático

La mejora que se propone con el presente estudio es controlar electrónicamente el sistema de transmisión de una bicicleta en un entorno urbano, logrando que un microcontrolador determine la combinación de cambios adecuada en base a datos de velocidad, inclinación y cadencia (véase sección 1.3.1) adquiridos continuamente. Después de la elaboración de un modelo matemático que relacione estos datos con la transmisión de la bicicleta, se desarrolla un algoritmo de control que ajuste las diferentes variables con el fin de obtener una relación de transmisión óptima y confortable al ciclista.

Paralelamente, hemos decidido reemplazar el sistema de transmisión de desviadores por una transmisión variable continua (CVT, véase sección 1.4.1), es decir una transmisión sin pasos dentro del rango de relaciones de marcha entregada, para lograr así un manejo más suave y eficiente y tomando en cuenta las limitaciones del sistema de desviadores para su control electrónico, como son:

- En **precisión** porque tenemos pocas combinaciones de cambios (combinaciones plato-piñón) dentro del rango de relaciones de transmisión y así se tiene que redondear el cambio determinado por los cálculos del sistema.
- En **comodidad** porque las interrupciones que se dan producto de realizar un cambio provocan discontinuidad en la energía y por tanto en los datos adquiridos por el sistema, provocando alteraciones en su funcionamiento.

En la tabla 1.1 se puede observar una comparativa de la transmisión convencional frente a la transmisión automática propuesta. La tarea de realizar los cambios de relaciones de marcha pasa a ser controlado electrónica y automáticamente por un microcontrolador y el conjunto de piñones se reemplaza por una manzana que contiene

el sistema CVT. El microcontrolador comanda un servomotor que varía las relaciones de transmisión de la CVT.

Tabla 1.1 Analogías entre la transmisión manual (convencional) y la transmisión automática (propuesta).

	TRANSMISIÓN MANUAL	TRANSMISIÓN AUTOMÁTICA
Controlador	Cerebro del ciclista. Basado en el esfuerzo que siente y su impresión de comodidad.	Microcontrolador. Basado en los cálculos del modelo y según las mediciones de las variables.
Configuración cambio de marchas	Sistema de transmisión de desviadores Conjunto de platos + conjunto de piñones	Sistema de transmisión continua variable (CVT) Un Plato + Manzana de transmisión continua.
Actuador	Manipuladores ubicados en el timón de la bicicleta.	Servomotor. Su posición determina la relación de transmisión del CVT.

1.3.1 Física relacionada a la bicicleta

Hablando en términos de equilibrio, la bicicleta carece de estabilidad lateral cuando está en reposo, debido a su configuración en dos ruedas a lo largo de un eje longitudinal. Asimismo, la bicicleta se mantiene erguida la mayor parte del tiempo cuando se encuentra en movimiento. Al momento de realizar una curva, se inclina con respecto al eje longitudinal y se mantiene estable gracias al equilibrio que aporta el ciclista que la conduce (Jones, 1970).

El ciclista debe vencer la inercia estática de la bicicleta haciendo girar los pedales para iniciar el movimiento. Entre las variables que influyen en el movimiento y la transmisión de la bicicleta tenemos: el momento de fuerza sobre el giro de los pedales, el ritmo de giro de los pedales, la velocidad, la inclinación y la relación de marchas de la transmisión (Real, 1988).

1.3.1.1 Variables físicas

Velocidad.- Se refiere a la velocidad de desplazamiento de la bicicleta sobre la pista por la que circula. Tiene relación estrecha con la velocidad de giro de las ruedas de la bicicleta. Las magnitudes utilizadas para su medición son Km/h y m/s (Serway & Jewett Jr., 2003).

Cadencia.- Es la velocidad o ritmo de giro de los pedales, o, dicho de otra forma, el número de veces que la biela del pedal realiza un giro completo en un espacio de tiempo. Para ilustrar tenemos que, en un terreno plano, con un cambio duro se tendrá una menor cadencia que con un cambio suave. En este estudio, la magnitud de la cadencia se mide en revoluciones por minuto (r.p.m.) (Bertucci et al., 2005).

Inclinación.- Es la magnitud de la pendiente resultante de la posición de la bicicleta con respecto a un terreno estrictamente plano. Las magnitudes utilizadas para representar la inclinación son: porcentaje, grados y radianes (Real, 1988).

Relación de transmisión.- Es la relación que existe entre el giro de los pedales con respecto al giro de la llanta que produce el movimiento. Es una relación sin magnitud y hay varios métodos de expresarla (véase la sección 1.3.2) (Brown, s.f.).

1.3.2 Transmisión

La transmisión hace referencia a la conexión entre la fuente de alimentación de la bicicleta, o la masa muscular del ciclista, y las ruedas de contacto con la pista que hacen posible el movimiento. La transmisión variable permite ajustar la fuerza y velocidad de giro de los pedales para impulsar la bicicleta eficientemente a través de variadas condiciones de velocidad y terreno (Lucía, Hoyos, & Chicharro, 2001). En otras palabras, si la velocidad rotacional en la rueda es una proporción de la velocidad rotacional en los pedales, la transmisión variable permite adaptar esta relación con el fin de aprovechar de mejor manera la energía del ciclista.

1.3.2.1 Relación de transmisión

Hace referencia a la relación que existe entre la velocidad angular de dos discos o engranajes interconectados, debido a la diferencia en los diámetros de los mismos (Lucía, Hoyos, & Chicharro, 2001). Está dada por:

$$d_1 \omega_1 = d_2 \omega_2 \quad (1.1)$$

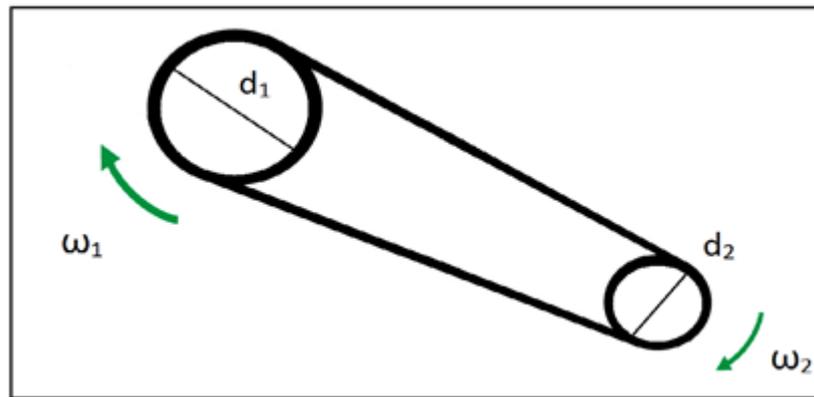


Figura 1.2. Relación de transmisión entre dos ruedas.

Donde d_1 y d_2 representan los diámetros de los engranajes del plato y piñón respectivamente y ω_1 y ω_2 sus respectivas velocidades angulares. Como se sustituye el conjunto de piñones trasero por una manzana con cambios continuos internos o CVT, debemos tomar sus relaciones de transmisión dentro de una magnitud que represente claramente la equivalencia con las relaciones de transmisión de sistemas convencionales. Un método de medición que nos permita representar estas equivalencias es el método de pulgadas del engranaje, ampliamente usado en el mundo del ciclismo.

El método de las pulgadas del engranaje (*Gear Inches* en inglés) consiste en expresar la relación entre el diámetro de la rueda expresado en pulgadas junto con el número de dientes del plato y del piñón. Este método describe la magnitud de la relación de transmisión, es decir que cuanto más alto sea este valor se tiene más resistencia al pedalear y un desplazamiento en pista mayor por cada revolución completa de la biela del pedal (Brown). Se calcula según la fórmula:

$$gi = d \frac{m}{n} \quad (1.2)$$

Donde:

gi Magnitud que representa las pulgadas del engranaje.

d Diámetro de la rueda de la bicicleta.

m Número de dientes del plato.

n Número de dientes del piñón.

En el presente estudio se utilizará una bicicleta con una llanta con aro de 27 pulgadas de diámetro. Al tener un valor constante de la magnitud del diámetro, la relación de transmisión también será medida en una magnitud directa, es decir, el resultado de la magnitud de la relación de transmisión medida en pulgadas del engranaje dividida para el diámetro de la llanta en pulgadas.

Con estos métodos de medición, se puede determinar el rango de relaciones de transmisión con los que cuenta el CVT (véase sección 1.4.1) y establecer equivalencias en magnitud con el sistema de transmisión de desviadores.

1.4 Partes utilizadas en el prototipo

1.4.1 Transmisión Variable Continua (CVT)

La transmisión variable continua (en adelante CVT) consiste en un sistema que varía la relación de transmisión sin pasos ni interrupciones sino de una manera suave y continua. Este mecanismo facilita el control automático de los cambios porque se deja a un lado las interrupciones entre cambios que existe en el sistema de transmisión convencional y porque permite lograr una mayor precisión en el momento de determinar una relación de marcha calculada. Esta innovadora tecnología ha sido desarrollada por *Fallbrook Technologies*® y para este estudio se ha adquirido el CVT

Nuvinci N360, modelo pensado especialmente para el uso en bicicletas (Fallbrook Technologies Inc., 2012).

La configuración interna del CVT (Figura 1.3.b) reemplaza los engranajes por esferas, colocadas sobre un soporte. Se tiene un disco de entrada, en donde se coloca la cadena y se aplica la fuerza proveniente de los pedales; y un disco de salida, que da el movimiento a la llanta trasera. La inclinación de los ejes de estas esferas permite variar la relación de transmisión del disco de entrada con respecto al de salida (Fallbrook Technologies Inc., 2012). Por ejemplo, si el eje de las esferas está inclinado en la manera que se ilustra en la figura, el disco de entrada gira con mayor velocidad que el disco de salida. Si el eje se mantiene recto, ambos discos giran con la misma velocidad, es decir que la relación de transmisión es 1:1. La inclinación de los ejes de las esferas, y por tanto la relación de transmisión, se controla a través de tensores que giran el ángulo de posición de un disco pequeño ubicado en el CVT. En el prototipo presentado, reemplazaremos los tensores por un servomotor que girará dicho disco.

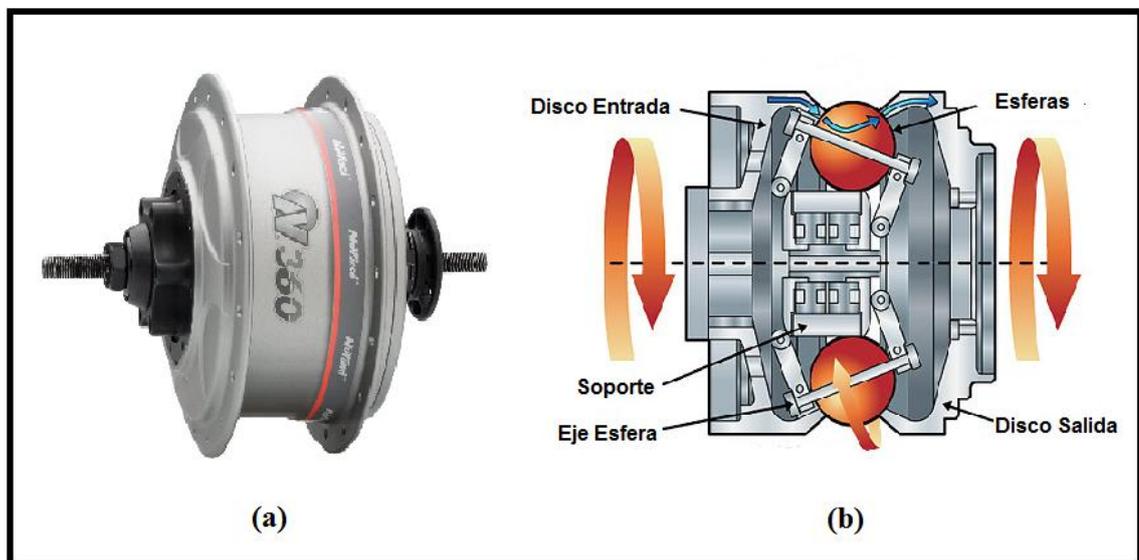


Figura 1.3. (a) Nuvinci N360 Manzana de transmisión utilizada en el prototipo. (b) Configuración interna de la transmisión variable continua. Esta tecnología fue desarrollada por Fallbrook Technologies®, empresa que fabrica la manzana CVT utilizada, Nuvinci N360.

Fuente: (Fallbrook Technologies Inc., 2012).

Dentro del diseño de la transmisión automática propuesto, se reemplaza el conjunto de piñones por el CVT, que se conecta con un solo piñón a la cadena. Asimismo, se reemplaza el conjunto de platos por un solo plato, de manera que los cambios están controlados enteramente por el CVT. Para el control electrónico de esta transmisión, se reemplaza el manipulador ubicado en el timón por un actuador. Este actuador consiste en un servomotor cuya posición es dictada de acuerdo a los cálculos provenientes del algoritmo de control. Este servomotor está conectado directamente a los mecanismos que varían las relaciones de transmisión del CVT a través de cables tensores.

El rango de relaciones de transmisión que comprende el CVT Nuvinci N360, medido en pulgadas del engranaje, varía desde las 27gi en el cambio más suave, hasta alrededor de las 93gi en el cambio más duro (Figura 1.4), medidas para una rueda motriz de 27", que es la que se ocupa en la bicicleta del prototipo propuesto. El nombre N360 viene dado porque la magnitud del cambio más duro representa el 360% de la magnitud del cambio más suave.

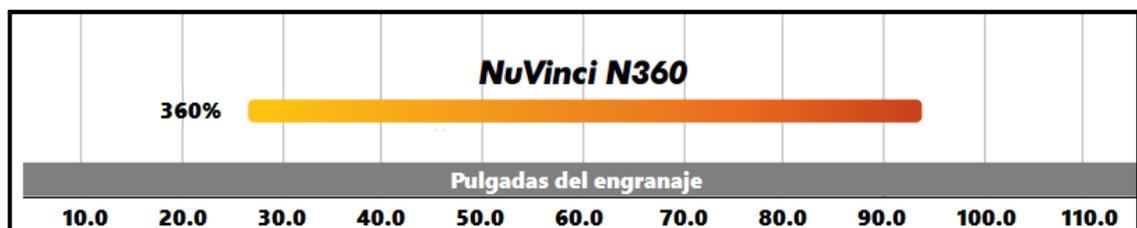


Figura 1.4. Rango de relaciones de transmisión del CVT Nuvinci N360 medido en pulgadas del engranaje para un diámetro de rueda motriz de 27".

Fuente: (Fallbrook Technologies Inc., 2012).

1.4.2 Sensores utilizados en el estudio

1.4.2.1 Sensor de efecto Hall

Es un transductor que varía su voltaje de salida de acuerdo a los cambios en la densidad de cambio magnético, de acuerdo con el efecto Hall (Melexis Microelectronic Integrated Systems, 2006). Son utilizados para medir las variables de **velocidad** y **cadencia** en el presente estudio.

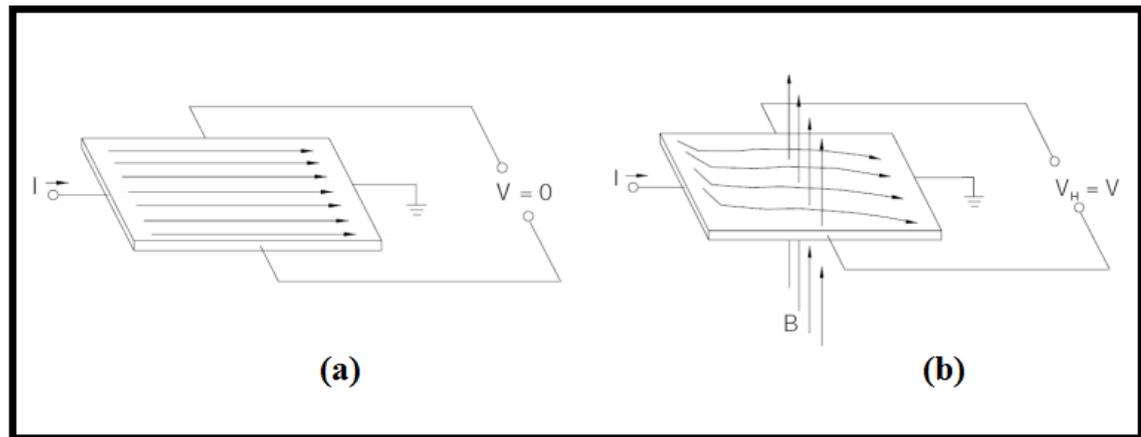


Figura 1.5. Principio Efecto Hall. (a) Sin un campo magnético, la distribución de la corriente se mantiene estable y no genera potencial en la salida. (b) En presencia de un campo magnético, las perturbaciones sobre la corriente generan un voltaje en la salida proporcional al campo magnético aplicado, o voltaje de Hall.

Fuente: (Melexis Microelectronic Integrated Systems, 2006).

El principio del efecto Hall consiste en la tensión generada cuando un conductor portador de corriente se coloca en un campo magnético. Esta tensión es perpendicular tanto a la corriente como al campo. Como se muestra en la figura 1.5, cuando se presenta un campo magnético perpendicular a la corriente, se ejerce una fuerza proveniente del campo electromagnético sobre esta corriente, (*fuerza de Lorentz*). Esta fuerza altera la distribución de la corriente y genera así un potencial en la salida, llamado voltaje de Hall (V_H) (Melexis Microelectronic Integrated Systems, 2006).

$$V_H \propto I \times B \quad (1.10)$$

1.4.2.2 Giroscopio: sensor de inclinación

Un giroscopio (figura 1.6) es un dispositivo que permite medir la orientación en el espacio de cualquier aparato. En este estudio, se utiliza un giroscopio con tecnología micro-electromecánica (MEMS por sus siglas en inglés) instalado en una mini-tarjeta, que facilita su ubicación en la bicicleta por su reducido tamaño y velocidad en la entrega de datos (InvenSense Inc., 2011).



Figura 1.6. MPU-6050 Giroscopio con tecnología micro-electromecánica (MEMS).

Fuente: (InvenSense Inc., 2011).

1.5 Diagrama de bloques de control del sistema propuesto

Para poder elaborar un sistema de transmisión automática dentro de una bicicleta de manera electrónica, con el fin de obtener mayor comodidad y rendimiento, se ha determinado que lo idóneo es mantener un ritmo constante de cadencia. Si se sube una cuesta, no es la velocidad lo que importa, sino tener baja resistencia en los pedales y mantener los niveles de energía del ciclista, puesto que la fatiga es lo que se busca disminuir. Por otro lado, cuando la bicicleta se mueva por un terreno plano o cuesta abajo, es necesario que la transmisión se adapte a un cambio que brinde mayor resistencia; este cambio debe darse incluso cuando el ciclista no gira los pedales. Es incómodo y hasta peligroso el imprevisto de que, luego de adquirir una velocidad mayor en una pendiente debido a la gravedad, encontrarse con una baja resistencia al volver a pedalear, porque la transmisión se ha mantenido en un cambio suave. En estos casos, se busca que la relación de marchas de la bicicleta sea alta para poder aprovechar al máximo el impulso provocado por la gravedad y la energía del ciclista combinados. En resumidas cuentas, sea cual sea la inclinación del terreno, es deseable mantener constante la cadencia.

D_w Es el diámetro de la rueda motriz en pulgadas. El diámetro de la rueda del prototipo es de 27 pulgadas.

K Es una constante que contiene los valores de homologación de los diferentes sistemas de medidas y cuyo valor es 208,986.

Encontrar un modelo matemático que represente estas particularidades es sin duda una tarea complicada. El reto consiste en encontrar una función que determine una relación de marchas específica en función de la velocidad e inclinación de la bicicleta en cualquier momento, dado un valor de cadencia previamente establecido. Este valor de cadencia también debe variar dependiendo de la inclinación de la bicicleta.

Después de revisar varios estudios y sus respectivos principios de funcionamiento, la decisión se ha inclinado por el método usado en los métodos usados por Daqui y su equipo (Daqui Loureiro et al., 2013) donde se utiliza la identificación de los modelos matemáticos con base en mediciones de las variables de entrada y salida durante un intervalo de tiempo prudente (Dao & Chen, 2012).

En los siguientes capítulos, se expone el procedimiento de la adquisición de las señales, su acondicionamiento y de la identificación del modelo que describe el comportamiento de la transmisión en la bicicleta para su posterior control. Para comprender claramente dicho proceso, es importante conocer previamente de qué se trata la identificación de sistemas.

1.6 Introducción al Método de Identificación de Sistemas

La identificación de sistemas consiste en reconocer patrones a partir de observaciones del comportamiento de un sistema dinámico. A partir de estas observaciones se pretende inferir un modelo matemático que describa cómo se relacionan las diferentes variables. A continuación, se explican las definiciones necesarias para comprender este método (Ljung, 1987).

Sistema.- Un sistema dinámico N es cualquier proceso en donde se produce la transformación de una señal de entrada $u(t)$ en una salida $y(t)$

$$y(t) = Nu(t) \quad (1.11)$$

Modelo.- Un modelo matemático M es una aproximación del sistema N. El modelo M estima la salida del sistema N desde la entrada $u(t)$ y el conjunto de parámetros del modelo (θ)

$$\hat{y}(\theta, t) = M(\theta, u(t)) \quad (1.12)$$

Empezar por construir el modelo basado en mediciones que abarquen el comportamiento del sistema, así como la reacción de éste frente a reacciones externas. Es importante tener en cuenta que se tiene que dejar de lado los detalles de cómo está en realidad funcionando el sistema, sino adaptarnos a los aspectos prácticos del mismo. Esto se conoce como Identificación de Sistemas (He, Wang, & Yin, 2010).

Las técnicas de Identificación de Sistemas hacen uso de los datos de entrada y salida. En algunos casos se tienen datos solo de la salida. Naturalmente una técnica que incluya los datos de entrada y salida va a ser más precisa, pero los datos de entrada no están siempre disponibles.

El objetivo de la Identificación de Sistemas es encontrar un modelo M de un sistema N con la mínima cantidad de parámetros (θ), desplegando una descripción precisa $\hat{y}(\theta, t)$ de la salida del sistema $y(t)$ (Sung, Lee, & Lee, 2009).

La identificación de un modelo matemático se hace tomando una estructura matemática de modelo. Esta estructura de modelo cuenta con parámetros que son desconocidos, que se calcularán con la ayuda de los datos observados.

Antes se definirán algunos términos:

Estructura de modelo.- Es una relación matemática existente entre las variables de entrada y salida, que contiene parámetros desconocidos. Ejemplos de estructuras son

las funciones de transferencia con polos y ceros ajustables, o un sistema de espacio de estados con matrices desconocidas (Sung, Lee, & Lee, 2009).

Parámetro.- Hace referencia a las constantes de una ecuación que, por lo general, acompañan a las variables. Los parámetros describen la naturaleza del comportamiento de un sistema, a diferencia de las variables, cuyo comportamiento varía en el tiempo (Ljung, 1987).

1.6.1 Tipos de modelado.

Sistemas de caja blanca.- Hace referencia a modelos creados a partir de conocimientos previos en la materia, aplicando ecuaciones y fórmulas conocidas a un problema determinado para su modelado matemático (Ljung, 2015). La desventaja de este tipo de modelado consiste en la práctica, donde es casi imposible obtener un modelo dentro de un lapso de tiempo razonable debido a la naturaleza compleja de algunos sistemas y procesos. Construir un modelo a partir de mediciones que abarquen el comportamiento del sistema y la reacción del mismo frente a reacciones externas y dejar de lado los detalles acerca de cómo está funcionando en realidad el sistema, son objetivos básicos dentro de la rama de la Identificación de Sistemas.

Sistemas de caja gris.- Se tiene una estructura previa del modelo, formado a partir de conocimientos previos por el sistema. Aquí sólo se realiza la estimación de los parámetros. Esta estimación es relativamente fácil si la forma del modelo es conocida, aunque este fenómeno es raramente observado (Ljung, 2015).

Sistemas de caja negra.- No existe modelo previo, la mayoría de algoritmos de Identificación de Sistemas son de este tipo.

Las técnicas de Identificación de Sistemas hacen uso de los datos de entrada y salida. En algunos casos se tienen datos sólo de la salida. Desde luego, una técnica con datos de entrada y salida va a ser más precisa, aun así, los datos de entrada no están siempre disponibles (Ljung, 2015).

1.6.2 Modelado de Caja Negra

Cuando no se tiene ninguna especie de dato previo ni una estructura específica sobre el modelo matemático que queremos obtener, es común recurrir a un modelado de caja negra. Con este se puede obtener un grupo de modelos candidato a partir de los cuales se escogerá un solo modelo que describa de manera más precisa y aproximada el sistema sobre el que se trabaja. Esta decisión se la realiza en base a criterios de selección previamente definidos que ayudarán a detectar el modelo más acorde a los objetivos planteados.

Es necesario recalcar que el modelado de caja negra es un proceso de prueba y error. Una vez obtenido un modelo matemático idóneo se pasa a la validación del modelo, que es donde se prueba el rendimiento del mismo. Si es satisfactorio, se queda, caso contrario se repite el proceso analizando las posibles causas del error, a saber: mala selección de los criterios, datos poco precisos, falta de identificación de alguna variable importante, entre otras.

Las estructuras lineales de caja negra más simples requieren de pocas opciones para configurar. Algunas de estas estructuras son (Sung, Lee, & Lee, 2009):

- **Función de transferencia.**- Con un número de polos y ceros dado
- **Modelos polinomiales.**- Que es el modelo entrada-salida para datos adquiridos en series de tiempo. A este tipo de modelos pertenecen las estructuras ARX y OE (véase sección 3.3.1).
- **Modelo de espacio de estados.**- Que se puede estimar especificando el número de modelos de estado.

Para reducir la complejidad en la estimación de estas estructuras, se hace uso de algoritmos no-iterativos. Para los datos obtenidos es más conveniente utilizar los modelos polinomiales, dada la naturaleza discreta de los mismos.

Es menester determinar el orden del modelo que se requiere. Este criterio varía dependiendo de la estructura del modelo seleccionado. Así, si es de una función de transferencia, está en función del número de polos y ceros que se tiene; si es de espacio

de estados, el orden del modelo se corresponde al número de estados; y si se tiene un modelo polinomial, se determina el orden del modelo a partir de los datos obtenidos. Sin embargo, siempre es preferible mantener el orden lo más bajo posible para evitar complejidad en el resto del sistema.

1.6.3 Procedimiento de Identificación de Sistemas

1. Adquisición de los datos. Consiste en el almacenamiento de las señales de entrada-salida durante un proceso de experimentación previamente diseñado, en donde se escoge qué señales medir y cuándo medirlas.
2. Conjunto de modelos. Luego de la obtención de las señales se despliega un conjunto de modelos candidato, especificando los criterios de selección adecuados para así escoger el modelo más óptimo. Este es el paso más importante porque es donde los conocimientos previos sobre el tema junto con un rastreo intuitivo tienen que combinarse con las propiedades formales de los modelos.
3. Determinar el mejor modelo del conjunto. Esta es la meta del método de identificación. La calidad del modelo es comúnmente basada en cómo los modelos se comportan en el momento de reproducir la información adquirida (Ljung, 1987).

1.6.4 Validación del Modelo

Después de haber seguido el procedimiento anteriormente descrito, hemos obtenido un modelo en particular, aquel que mejor describe los datos de acuerdo con el criterio escogido. Luego, se hacen pruebas para determinar si este modelo es válido para el propósito planteado. Estas pruebas son conocidas como la validación del modelo y evalúan de qué manera el modelo se relaciona con los datos observados, a los conocimientos previos y a su utilidad. Una validación deficiente nos obliga a descartar el modelo, mientras que una validación satisfactoria incrementa la confianza en la elección (Ljung, 2015). Hay que tener claro que un modelo nunca va a ser definitivo ni va a lograr convertirse en una reproducción exacta del sistema, es por eso que simplemente tiene que ser lo suficientemente bueno para cumplir con los intereses prácticos del modelado.

Hay varias razones para un modelo no pase las pruebas de modelado, entre ellas tenemos:

- Los procesos numéricos fallaron al encontrar el mejor modelo de acuerdo a los criterios escogidos
- Criterios erróneamente elegidos
- El conjunto de modelos no es apropiado porque no contiene ninguna descripción correcta del sistema
- El conjunto de datos proporcionados no fue suficiente para determinar un modelo adecuado del sistema

1.6.5 Criterios de selección

Para seleccionar el modelo más adecuado de entre las opciones calculadas, es menester tener planteados algunos criterios a tener en cuenta, entre ellos:

- **Porcentaje de similitud.** Indica el nivel en el que los datos simulados con el modelo obtenido se acercan a los datos obtenidos experimentalmente. Para este estudio es necesario que este porcentaje este por sobre el 70% para que poder trabajar de manera aceptable.
- **Parsimonia.** Elección del modelo menos complejo, es decir, con el menor número de ceros y polos.

1.7 Procedimiento para elaboración de sistema de transmisión automática

La figura 1.8 detalla el proceso de obtención de nuestro sistema de transmisión automática. Primero se tomarán datos experimentales sobre una pista, en donde se recogerán datos de la salida manualmente, es decir, ajustando la relación de transmisión directamente para mantener un ritmo constante de cadencia (véase sección 2.1). En el capítulo 3, se procesan los datos obtenidos y se calcula un modelo matemático que represente al sistema mediante el método de Identificación de Sistemas. Con el modelo matemático del sistema se procede a calcular un controlador que mantenga el ritmo de cadencia constante, alrededor de un valor preestablecido. El siguiente paso es implementar en un microcontrolador el modelo matemático y el controlador obtenido, junto con el procesamiento de las señales de los sensores.

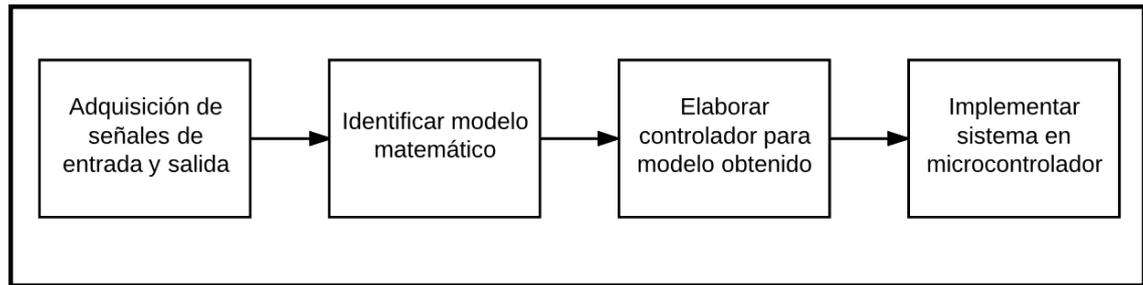


Figura 1.8. Proceso para la obtención del software para el sistema de transmisión automática controlado.

Cada uno de los pasos de dicho proceso se irá detallando en cada uno de los capítulos siguientes.

Por último, luego de construir nuestro sistema de transmisión automático, se realizarán pruebas de campo para medir la utilidad del mismo. Estas pruebas de campo consisten en comparar, en una misma ruta, el esfuerzo que un ciclista realiza en el prototipo desarrollado, con el esfuerzo que el mismo ciclista realiza en una bicicleta convencional con transmisión de desviadores, para luego determinar si la bicicleta desarrollada contribuye a un mayor bienestar en la experiencia de montar una bicicleta. Las condiciones en las que se realizaron estas pruebas y los resultados generados están disponibles en el último capítulo (capítulo 6) de este estudio.

CAPÍTULO II

RECOLECCIÓN DE DATOS DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA

2.1 Introducción

El primer paso para lograr un sistema de transmisión automático consiste en la adquisición de muestras de las señales generadas por las variables de entrada y salida del sistema. En la tabla 2.1 se detalla cada una de estas variables. Es preciso recalcar al lector que en un sistema de control se considera variable de entrada al valor de estado estable que queremos alcanzar. En este estudio se las llama variables de entrada y salida por el enfoque de identificación de sistemas que se ha adoptado, en donde se quiere determinar cuál es la relación de transmisión óptima (o salida) que se debe adoptar según las lecturas de los sensores de las llamadas entradas. Para la fase de recolección de datos la salida se obtiene de manera manual, es decir que la relación de transmisión se ajusta a criterio del ciclista que recolecta los datos, manteniendo siempre un ritmo de cadencia constante. Este ajuste se lo realiza mediante pulsantes ubicados en el timón que varían la posición angular del servomotor ubicado en la manzana CVT.

Las muestras adquiridas de cada una de las variables serán ocupadas para posteriormente realizar el proceso de identificación. En este capítulo se muestra el proceso para obtener estas muestras, desde los circuitos de interfaz de los diferentes sensores, pasando por su acondicionamiento y procesamiento, las condiciones de adquisición de las muestras, y por último las gráficas de las señales adquiridas.

A continuación, se describe brevemente los circuitos de interfaz para los sensores de medición de las diferentes variables de entrada de nuestro sistema, a saber: la velocidad, cadencia e inclinación del terreno.

Tabla 2.1. Definición de las variables utilizadas en el sistema de transmisión automática.

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLE DE SALIDA
Inclinación del terreno (grados). El valor es positivo en una pendiente de subida y negativo en bajada.	Relación de transmisión. Variable sin medida. Expresa la relación entre el giro de los pedales y el giro de la rueda motriz. El rango de la variable va desde 1 hasta 3,6, que es el rango de transmisiones del CVT
Velocidad de la bicicleta (Km/h). En este estudio se considera una velocidad máxima de 50 Km/h.	
Cadencia (r.p.m.). Es la velocidad del giro de los pedales y la variable que se compara con el estado estable que se ingresa al sistema.	

2.2 Circuitos de Interfaz de los Sensores

2.2.1 Circuito de Interfaz del Sensor de Hall

En el prototipo, se ocupa el sensor de efecto Hall para medir los valores de las variables de cadencia y velocidad. Por su tamaño y sus características, se ha elegido el sensor de Melexis US5881, que cuenta con las siguientes características:

- Rango voltaje operativo de 3.5V a 24V.
- Tecnología CMOS.
- Bajo consumo de corriente.
- Encapsulado TO-92.
- Salida Colector Abierto.

Este modelo funciona como un *switch* magnético y es utilizado en la industria automotriz, como detector de corriente y como detector de proximidad. El sensor cumple la función de generar una variación en el voltaje de salida cada vez que siente la proximidad de un imán (Melexis Microelectronic Integrated Systems, 2006). Para las mediciones de velocidad y cadencia de la bicicleta, se coloca un imán en uno de los radios de la llanta y en el pedal. Respectivamente. De esa manera se contabiliza una cantidad de pulsos de acuerdo a cada revolución de la llanta o del pedal.

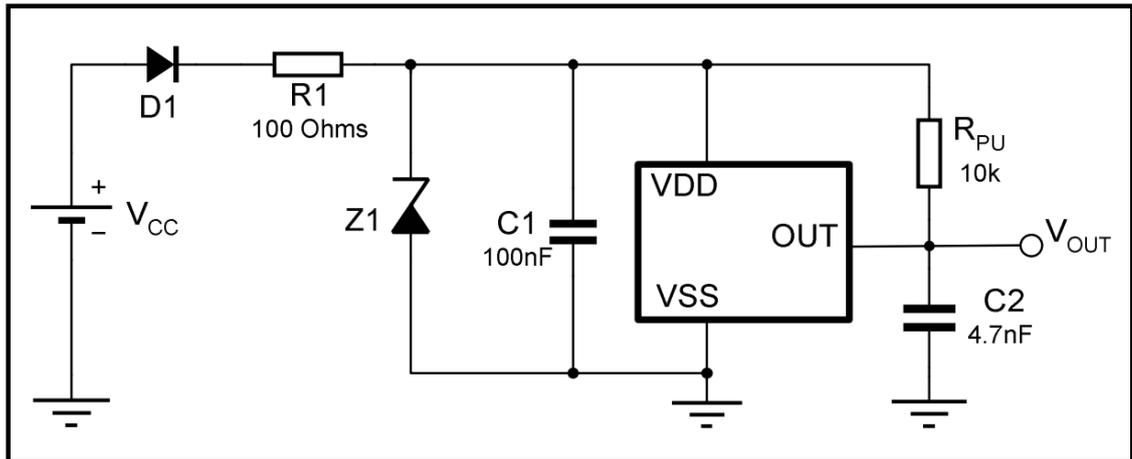


Figura 2.1. Circuito de Interfaz para el sensor de Hall, utilizado para medir las variables de velocidad y cadencia.

Fuente: (Melexis Microelectronic Integrated Systems, 2006)

Para la adquisición de estos pulsos, se monta el circuito de interfaz de la Figura 2.1. El filtro pasa-bajos formado por la resistencia R1 y el capacitor C1, junto con el diodo zener Z1, evita los picos de voltaje y las perturbaciones provenientes de la fuente de alimentación del dispositivo. Adicionalmente, el diodo D1 otorga protección a voltajes inversos al sensor.

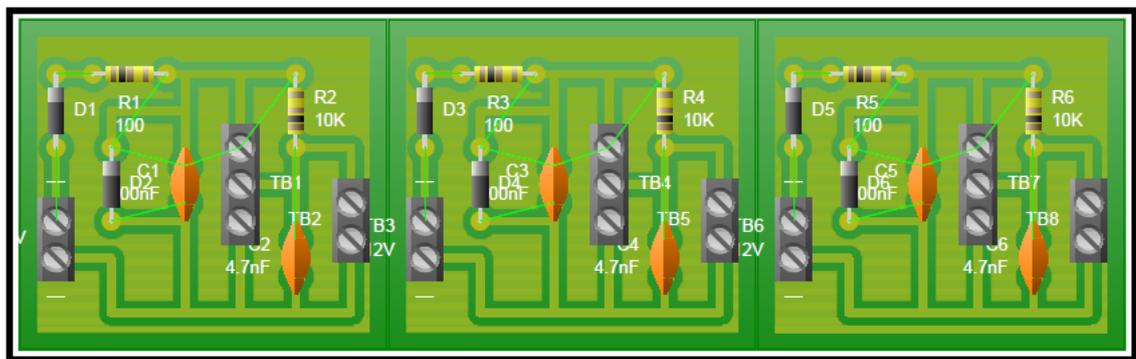


Figura 2.2. Diseño de los circuitos de interfaz para el sensor de Hall. Dos de estos circuitos se usan para medir la cadencia, y el restante se usa para la velocidad.

La ubicación del sensor de Hall destinado a medir la velocidad se encuentra en la parte trasera del cuadro de la bicicleta, de manera fija. Con una estructura montada en resina junto al CVT está colocado un imán, que cada vez que la rueda de una vuelta completa y el imán pase cerca del sensor de Hall, este emitirá un pulso de bajada hacia el

controlador. En la figura 2.3 podemos observar una fotografía donde se aprecia la colocación del sensor y el imán en el prototipo.

Para el cálculo de la velocidad (en kilómetros por hora) se mide el tiempo entre pulsos t_V (en segundos) y se aplica la siguiente fórmula:

$$V = \frac{D_{rueda} \cdot 0.0254 \cdot \pi}{t_V} \cdot \frac{3600}{1000} \quad \left[\frac{Km}{h} \right] \quad (2.1)$$

En donde el diámetro de la rueda D_{rueda} es igual a 27 pulgadas.



Figura 2.3. Ubicación del sensor de Hall, junto al cuadro; y el imán, junto al CVT.

Para medir la cadencia, se utilizan dos sensores ubicados en la parte más inferior del cuadro, donde se encuentra el agujero por donde se sostiene el eje de los pedales (figura 2.4). La razón por la cual se utilizan dos sensores es para aumentar la resolución de la medición. Estos sensores están separados 180 grados, para que el tiempo entre pulsos se mantenga constante.



Figura 2.4. Ubicación del sensor de Hall, junto al cuadro; y el imán, junto al CVT.

Para el cálculo de la medición de cadencia (en revoluciones por minuto) se tiene dos pulsos por cada revolución de la biela del pedal. Luego de medir el tiempo entre pulsos t_c , se aplica la siguiente fórmula:

$$C = \frac{30}{t_c} \quad [r.p.m.] \quad (2.2)$$

2.2.2 Giroscopio.

Para la medición de la inclinación del terreno, se ha escogido un giroscopio embebido en una unidad de procesamiento móvil (MPU), la “InvenSense MPU-6050”, que además cuenta con un acelerómetro de 3 ejes, comunicación a través de I2C, un convertidor analógico digital (ADC) por cada eje y un buffer FIFO de 1024 bytes para almacenar los datos y enviarlos al microcontrolador en ráfagas (véase figura 1.6). Este MPU es utilizado en aplicaciones de estabilización de imágenes, reconocimiento de gestos, sensores de movimiento para juegos, entre otras (InvenSense Inc., 2011). Entre las características remarcables del giroscopio tenemos:

- Rango de voltaje de alimentación: 2.375V – 3.46V.
- Corriente de funcionamiento: 3.6mA.

- ADC integrado de 16 bits que permite muestreo simultáneo de las mediciones.
- Filtro pasabajos programable.
- Protección ante descargas electrostáticas.

Solo se ocupan los datos de uno de los tres ejes del giroscopio para su procesamiento. En la bicicleta se usará el eje X del giroscopio para medir la inclinación del terreno de la pista.

2.3 Adquisición de Datos

2.3.1 Proceso de adquisición

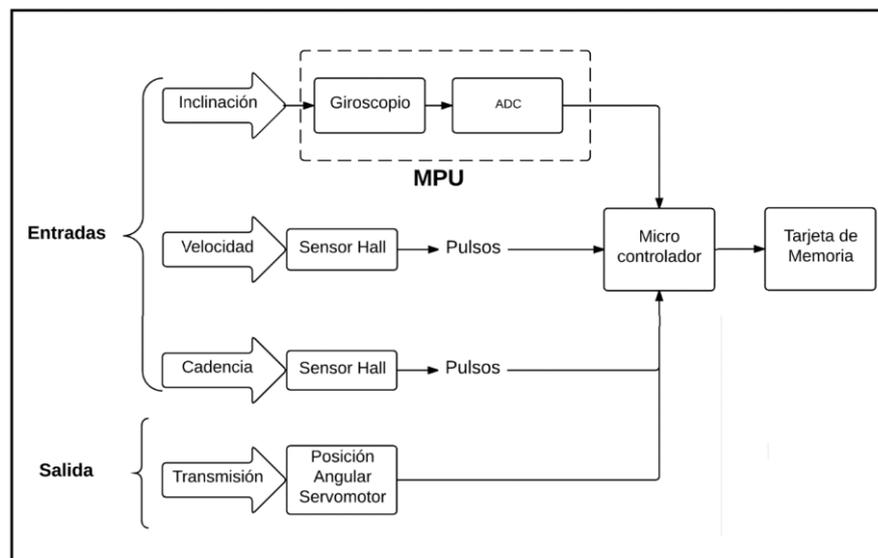


Figura 2.5. Diagrama de bloques de adquisición de los datos para su posterior identificación.

La figura 2.5 ilustra el proceso de adquisición, donde las señales recogidas por los sensores que llegan al microcontrolador son procesadas y ordenadas debidamente, generando tablas de datos con respecto al tiempo. Estas tablas de datos son almacenadas en una memoria SD, utilizada especialmente para adquirir la información sobre la pista, de manera móvil. Estos datos adquiridos son luego pasados al computador, desde donde se puede utilizar esta información para continuar con el proceso de identificación y generar el modelo matemático que represente el comportamiento del sistema.

Los sensores de Hall ubicados cerca de la llanta y los pedales, van conectados a sus respectivos circuitos de interfaz, para luego sacar los pulsos y enviarlos al microcontrolador. El giroscopio, que estará ubicado de manera paralela a una superficie sin inclinación, se conecta al microcontrolador a través de los pines especificados en su hoja de datos. El almacenamiento de los datos adquiridos y procesados por el microcontrolador saldrán hacia la memoria SD, que también se conecta a través de los pines especificados por el fabricante. Las conexiones del circuito pueden observarse en la figura 2.6.

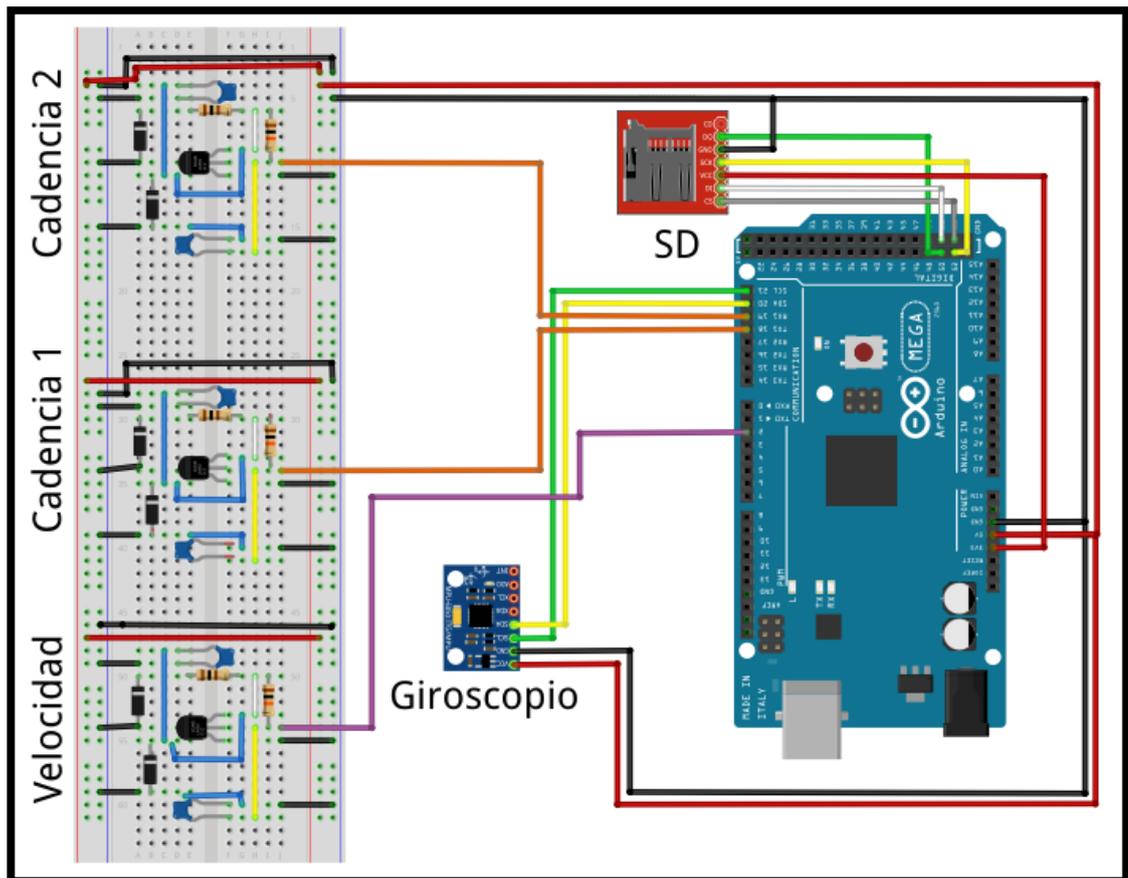


Figura 2.6. Conexiones de los sensores y la memoria SD para almacenamiento hacia el microcontrolador.

2.3.2 Ubicación de los sensores dentro de la bicicleta

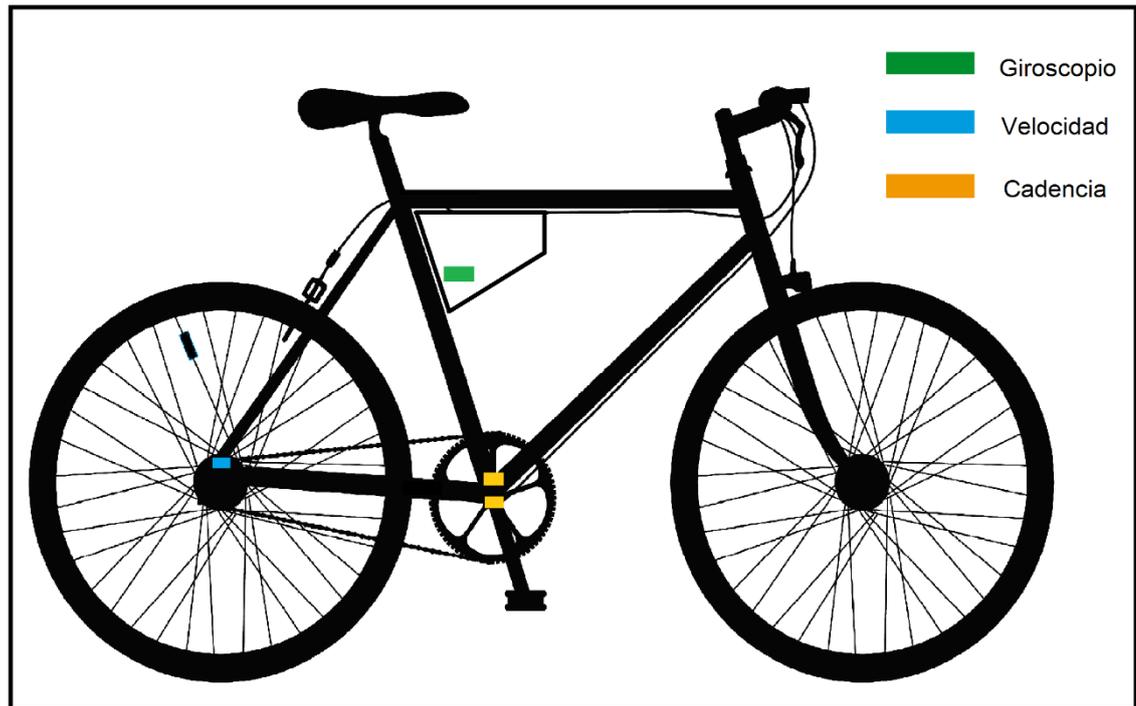


Figura 2.7 Ubicación de los sensores dentro de la bicicleta.

Los sensores están ubicados en la bicicleta de la siguiente manera:

Sensor de Velocidad.- Un sensor de Hall ubicado en la parte trasera del cuadro, junto al agujero donde va el buje de la manivela de cambios. El imán va ubicado en el CVT, en el lugar destinado al disco de frenos.

Sensor de Cadencia.- Los dos sensores de hall para medir la cadencia van ubicados en la parte inferior del cuadro, junto al eje de los pedales. Los sensores están separados 180 grados, de manera que tengamos dos pulsos por cada revolución y lograr mayor resolución. El imán que genera los pulsos va incrustado en el pedal.

Sensor de Inclinación.- El giroscopio va ubicado de manera horizontal dentro de la caja donde irán el microcontrolador, los circuitos de los sensores y la batería. Esta caja se encuentra en medio del cuadro, debajo de la montura de la bicicleta. En la figura 2.7 se tiene una ilustración de la ubicación de cada uno de los sensores descrita.

2.3.3 Condiciones de adquisición

Después de conectar y ubicar los sensores en el prototipo, se procede a adquirir los datos con la bicicleta en movimiento sobre la pista. La idea es almacenar los datos adquiridos de las variables de entrada y de la variable de salida cuando se trata de mantener constante la cadencia de manera empírica, manteniendo el mismo ritmo y cambiando la relación de transmisión del CVT manualmente. Para poder mantener la cadencia constante, es necesario tener una referencia mediante una pantalla donde se visualiza el valor actual de la variable.

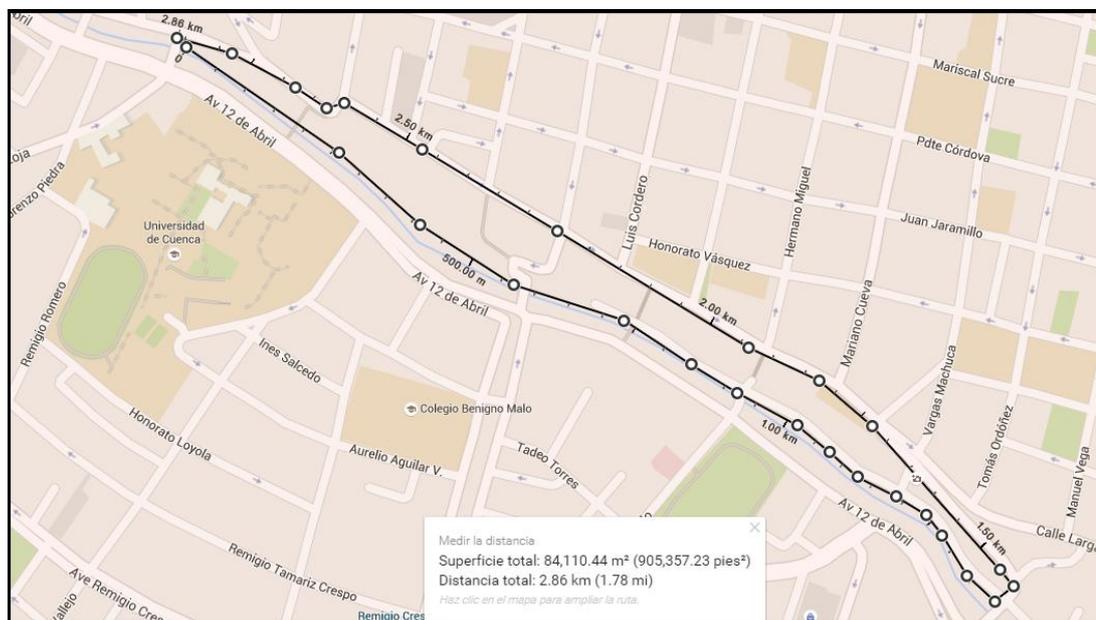


Figura 2.8. Ruta de experimentación para adquisición de las señales de entrada y salida del sistema de transmisión.15

Fuente: (Map Data ©2016 Google)

Para poder adquirir datos que representen un amplio espectro de circunstancias ante las que se pueda enfrentar un ciclista en un ambiente urbano, se ha dispuesto un recorrido de bicicleta que incluya pendientes en subida y bajada, así como algunos puntos donde la bicicleta se detenga completamente, como semáforos, pasos cebra, etc. En la ciudad de Cuenca, ciudad donde se elabora este estudio, la ruta que se va a cubrir comprende el circuito compuesto por las siguientes etapas: la ciclovia ubicada en el Paseo 3 de noviembre junto al río Tomebamba, desde Todos Santos hasta la calle La Condamine; la calle La Condamine hasta la intersección de las calles Tarqui y calle Larga; la calle Larga desde la calle Tarqui; y la bajada de Todos Santos para

cerrar el circuito. La ruta tiene una distancia aproximada de 3Km, recorrido que tiene una duración aproximada de 15 minutos en bicicleta.

La razón principal por la que se escogió este circuito es porque cuenta con las pendientes más pronunciadas del casco urbano central de la ciudad de Cuenca. Luego de hacer el análisis topográfico de la ruta, se observa que los ángulos de inclinación no superan el rango de los ± 9 grados ($\approx \pm 15\%$ de inclinación). Esta es una de las características que influyen en la delimitación del ámbito urbano del prototipo de bicicleta presentado, y contrasta con las inclinaciones pronunciadas encontradas en rutas de montaña. En la Figura 2.9 se puede apreciar el perfil topográfico del circuito escogido, teniendo como punto de partida la ciclovía desde el puente de Todos Santos con dirección hacia el oeste, para luego trepar la avenida La Condamine, continuar por la calle Larga y bajar por Todos Santos para terminar en el punto de partida.

Se propone tomar dos conjuntos de muestras de dos diferentes sujetos: Uno más experimentado en el manejo de bicicletas y competencia, y un segundo sujeto con experiencia más corta montando bicicleta.

Además, se pretende mantener varios niveles de cadencia con el motivo de adaptarse a un mayor rango de ciclistas. Existen ciclistas más experimentados que tienen mayor fuerza en las piernas y se sienten más cómodos con ritmos de cadencia más bajos. Por otro lado, es recomendable mantener un ritmo más veloz de cadencia cuando se trata de ciclistas menos regulares.

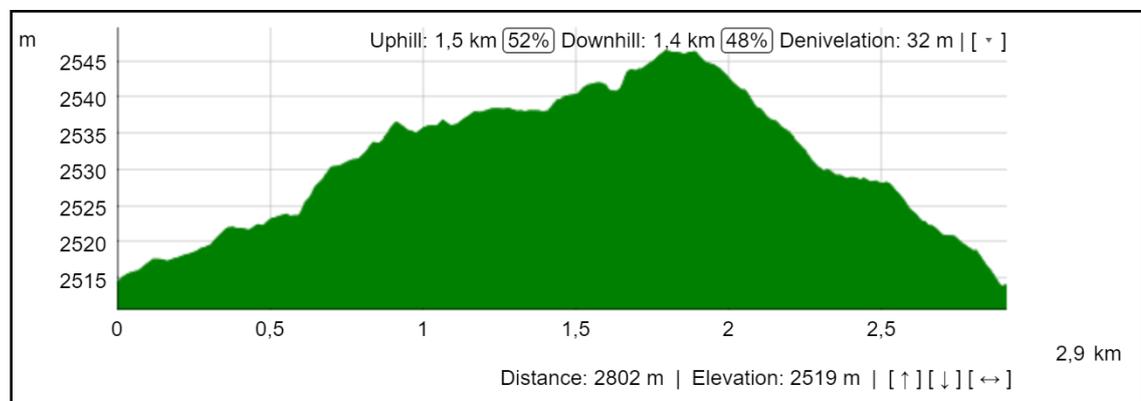


Figura 2.9. Perfil topográfico del circuito de experimentación escogido.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de Geocontext©).

Estos niveles de cadencia se podrán regular variando el valor de estado estable del sistema de control, mediante la colocación de dos botones: uno para subir el ritmo de cadencia, y otro para disminuirla. Con el paso del tiempo y adquiriendo habilidad con nuestro prototipo, el usuario conocerá qué ritmo es el más adecuado para sus necesidades.

2.4 Señales Adquiridas

Luego de la experimentación y obtención de datos para cada una de las variables, se escogen algunos grupos de muestras generados en cada recorrido. Cada grupo de muestras se compone de tres señales de entrada: inclinación, velocidad y cadencia; y de una señal de salida: la relación de transmisión del CVT. Así, se tiene tres experimentos escogidos que han generado su grupo de muestras. El primer experimento tiene base en tener una cadencia constante de 65 revoluciones por minuto (en adelante r.p.m.); el segundo, con una cadencia constante de 75 r.p.m.; y el tercero con una cadencia constante de 95 r.p.m. Como se dijo antes, la manera de mantener constantes estas cadencias es visualizando la cadencia en una pantalla, en donde el sujeto del experimento tiene una referencia para mantener constante el ritmo de pedaleo la mayor parte del tiempo posible, a través de la variación de la relación de transmisión del CVT con botones incorporados al timón de la bicicleta.

De esa manera, se adquirieron datos con una frecuencia de muestreo de 0.05 segundos, es decir, veinte muestras por segundo. Como resultado, se obtiene un vector de datos por cada una de las variables y, por tanto, el número de muestras de las señales de entrada y salida coincide para cada uno de los tres experimentos. La gran cantidad de muestras generadas son útiles para lograr una mayor precisión al momento de iniciar el proceso de identificación. Tener un tiempo extenso de experimentación o disminuir el tiempo de muestreo, es un criterio general que recomienda la normativa referente al diseño de experimentos.

Cada grupo de señales adquiridas las exporta hacia MATLAB y ordenarlas en matrices, de manera que los datos estén relacionados entre sí y ordenados en el tiempo.

Los datos que corresponden a cada recorrido se han agrupado en un solo objeto de datos que facilita MATLAB llamado `iddata`, que además de contener las señales de entrada y salida con respecto al tiempo, permite al usuario asignar propiedades a las mismas, como por ejemplo el nombre y las unidades de las variables. Por consiguiente, las señales adquiridas de las variables de la bicicleta se asignarán en tres objetos de datos: “InOut65”, para el experimento de 65 r.p.m.; “InOut75”, para el de 75 r.p.m. e “InOut95”, para el experimento de 95 r.p.m.

A lo largo de este capítulo, se desplegarán gráficos y análisis estadísticos de cada uno de los grupos de muestras tomadas.

2.4.1 Gráficos de las señales adquiridas

2.4.1.1 Gráfico de las señales del Experimento con Cadencia Constante de 65 r.p.m.

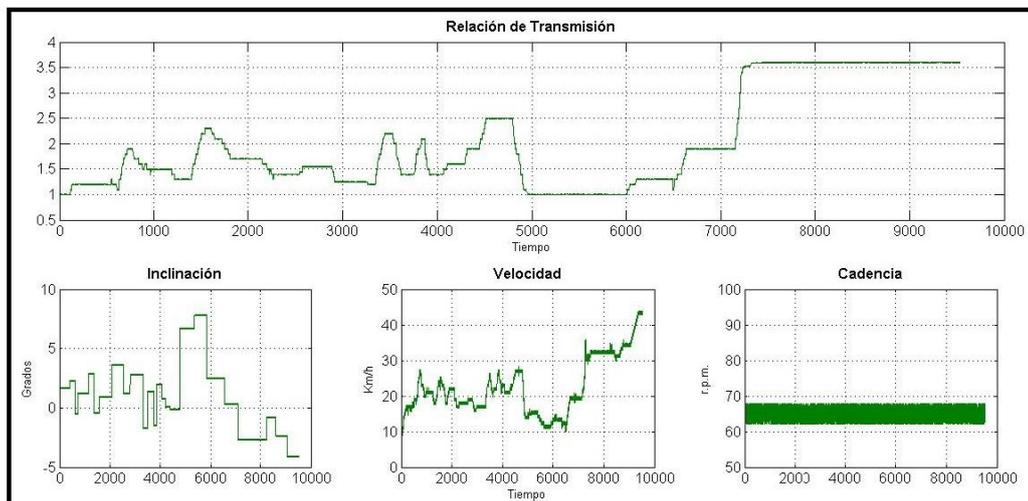


Figura 2.10. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 65 r.p.m.

2.4.1.2 Gráfico de las señales del Experimento con Cadencia Constante de 75 r.p.m.

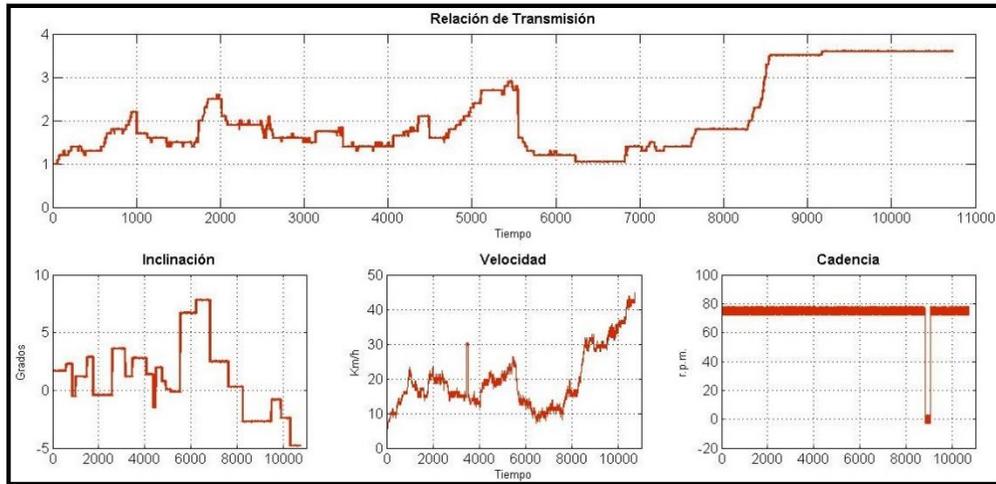


Figura 2.11. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 75 r.p.m.

2.4.1.3 Gráfico de las señales del Experimento con Cadencia Constante de 95 r.p.m.

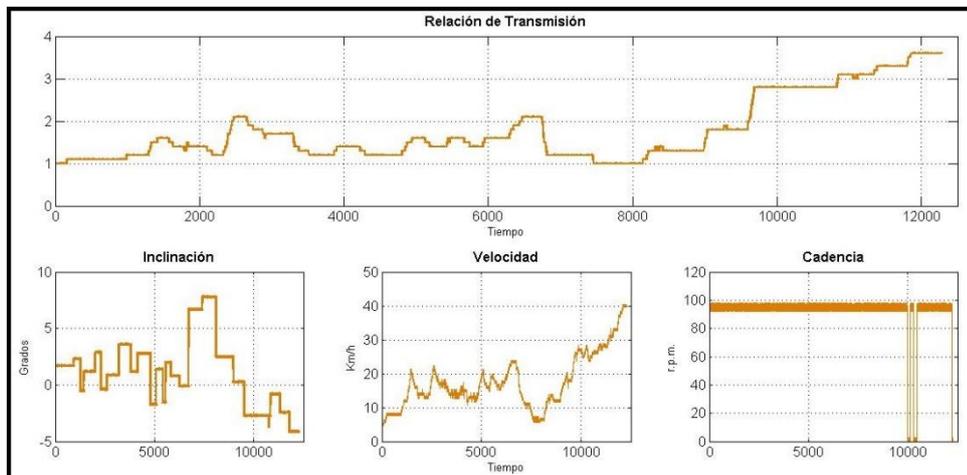


Figura 2.12. Señales de entrada y salida del experimento con cadencia constante de 95 r.p.m.

2.4.2 Análisis estadístico de las señales adquiridas

Se realiza un análisis estadístico de las señales de velocidad y relación de transmisión adquiridas, con el fin de observar algunas particularidades que diferencian a los grupos de datos obtenidos por cada uno de los ritmos de cadencia escogidos. Las variables de

inclinación del terreno y la cadencia se omiten puesto que son constantes para todos los experimentos.

2.4.2.1. Análisis estadísticos de los datos de velocidad

En la Figura 2.13 se observa las señales de velocidad de los diferentes grupos de muestras con respecto al tiempo, adquiridas en la misma ruta.

Del proceso estadístico de las señales, se observa que la media aritmética y la mediana de la velocidad a un ritmo menor de cadencia (65 r.p.m.) es mayor que en los otros ritmos de cadencia. Por lo tanto, se puede decir que con menos revoluciones por minuto en el pedal se obtiene una mayor velocidad, lo que conlleva aplicar mayor fuerza. Es por ese motivo que el menor ritmo de cadencia está recomendado para ciclistas experimentados o con mayor fuerza en sus piernas.

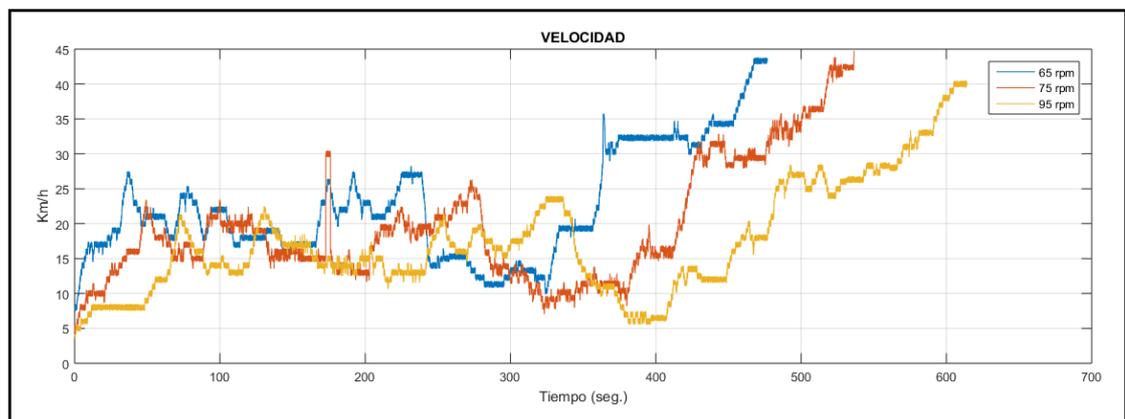


Figura 2.13. Señales de velocidad adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación, medidas en kilómetros por hora.

De igual manera, los grupos de datos de los otros ritmos, de 75 y 95 r.p.m., fueron desarrollados para lograr un sistema que funcione pensando en cubrir una mayor población de ciclistas. Los usuarios a los que está dirigido este estudio son los ciudadanos promedio de un entorno urbano, quienes deseen llevar un paseo tranquilo con velocidades y esfuerzos menores, y son menos experimentados en el uso de la bicicleta.

Tabla 2.2. Datos estadísticos de las señales de velocidad adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación, medidas en kilómetros por hora.

r.p.m.	Media (\bar{x})	Mediana (\tilde{x})	Desviación S. (σ)	Varianza (σ^2)
65	22.3956	20.7413	7.7886	60.6628
75	19.5698	17.1297	8.4537	71.4654
95	17.5153	16.1188	7.7552	60.1429

2.4.2.2. Análisis estadísticos de los datos de relación de transmisión

En el CVT se tiene un rango continuo de relaciones de transmisión que varía desde 1 a 3,6 (de ahí viene su nombre, Nuvinci N360), y se han medido las posiciones angulares del servomotor correspondientes al nivel de relación de transmisión presente en el CVT.

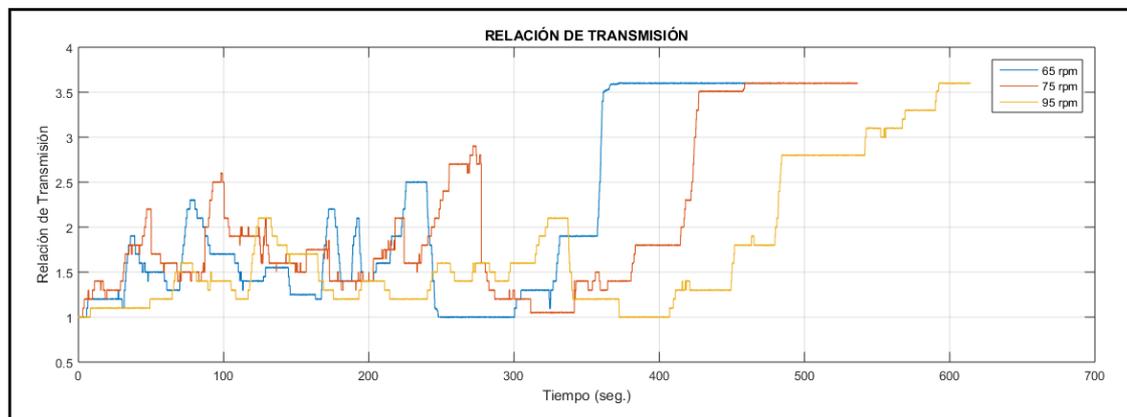


Figura 2.14. Relaciones de transmisión del CVT adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación.

Tabla 2.3. Datos estadísticos de las señales de relación de transmisión adquiridas en los diferentes recorridos de experimentación.

r.p.m.	Media (\bar{x})	Mediana (\tilde{x})	Desviación S. (σ)	Varianza (σ^2)
65	2.0250	1.6083	0.9594	0.9205
75	2.0551	1.7503	0.8625	0.7439
95	1.7643	1.4080	0.7495	0.5617

Como se puede observar en la tabla 2.3, la media de relaciones de transmisión es mayor cuando la cadencia es menor, lo que claramente ilustra la manera en la que el esfuerzo en las piernas disminuye cuando la relación de transmisión se suaviza.

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

3.1 Introducción

Con las muestras de las señales de entrada y salida obtenidas, se procede a iniciar la identificación de un modelo matemático que describa la realidad de los datos tomados. Para esto ocuparemos el conjunto de datos de 95 r.p.m. y lo procesaremos para la determinación del modelo, luego tomaremos otro conjunto de datos, que puede ser el de 75 o 65 r.p.m. para validar este modelo y observar el porcentaje de similitud.

El modelo consiste en generar tres plantas, donde cada una de ellas estará expresada mediante una función de transferencia que describa el comportamiento de la relación de transmisión, o variable de salida, frente a los estímulos provenientes de cada una de las variables de entrada. En otras palabras, el modelo deseado va a contener una función de transferencia para la variable de inclinación, otra para la velocidad, y una más para la cadencia.

Para calcular este modelo matemático fue necesaria la ayuda de la herramienta de software *System Identification Toolbox* de MATLAB. Dicha herramienta proporciona métodos para construir modelos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada y salida medidos, y con base en la teoría de la Identificación de Sistemas expuesta brevemente en la sección 1.6 del presente estudio.

3.2 Preparación previa de las señales adquiridas

3.2.1 Estimación de los tiempos de retardo de las señales de entrada

El retardo hace referencia al tiempo transcurrido para que la salida del sistema reaccione ante una de las señales de entrada. Generalmente, en un sistema de una sola entrada, el retardo entre la entrada y la salida se determina fácilmente con la gráfica de la respuesta al impulso. Sin embargo, en el presente caso tenemos tres entradas y no se puede determinar cuál de las entradas es la que causa los cambios iniciales en la salida, es por eso que los tiempos de retardo tienen que calcularse independientemente.

El comando `delayest` de MATLAB estima los retardos entre señales de entrada y salida de un grupo de muestras, ingresadas en forma de un objeto `iddata` (véase sección 2.4), y devuelve los valores de tiempo como un vector columna, donde cada columna pertenece a cada una de las entradas del sistema. La estimación se la realiza con base a una comparación de modelos ARX con diferentes retardos (Ljung, 2015). Los tiempos calculados en segundos para cada una de las entradas en cada uno de los grupos de señales adquiridas se pueden apreciar en la Tabla 3.1. Los valores de los ceros y polos asignados para el cálculo en las señales adquiridas son de 2 para cada uno y el rango de tiempos de retardo especificado de (0:20) segundos.

Tabla 3.1. Tiempos de retardo en segundos para cada señal de entrada con respecto a la salida.

<i>Variable de Entrada</i>	<i>65 r.p.m.</i>	<i>75 r.p.m.</i>	<i>95 r.p.m.</i>
<i>Inclinación</i>	11	2	20
<i>Velocidad</i>	18	20	17
<i>Cadencia</i>	2	6	19

3.3 Base teórica para la estimación del modelo

3.3.1 Estructuras de modelo polinomiales

Las estructuras de modelo polinomiales expresan una relación entre las entradas, la salida y el ruido y sirven para obtener una mayor flexibilidad en la descripción de la dinámica del sistema, usando los datos en el dominio del tiempo de manera discreta. Es decir, las estructuras polinomiales constituyen el esqueleto de nuestro futuro modelo. Los datos recogidos en la experimentación sirven para calcular los parámetros de las estructuras polinomiales escogidas.

Existen varias estructuras de modelo polinomiales, de las que se han escogido dos modelos sobre los cuales se procesarán los datos obtenidos, el modelo ARX y el modelo OE (véase las secciones siguientes), que son ampliamente usados en ingeniería de sistemas y procesos. Existen otros modelos más complicados y para ambientes

ruidosos que se dejarán de lado en este estudio. Ambas estructuras están disponibles en la herramienta de identificación de MATLAB.

3.3.1.1 Estructura Autorregresiva con Entrada Exógena (ARX)

La estructura autorregresiva con entrada exógena (ARX) (Sung, Lee, & Lee, 2009) se define por la ecuación:

$$\hat{y}(k\Delta t) = -\hat{a}_1 y((k-1)\Delta t) - \hat{a}_2 y((k-2)\Delta t) - \dots - \hat{a}_n y((k-n)\Delta t) + \hat{b}_1 u((k-1-\hat{d})\Delta t) + \hat{b}_2 u((k-2-\hat{d})\Delta t) + \dots + \hat{b}_n u((k-n-\hat{d})\Delta t) + \hat{B} \quad (3.1)$$

Donde Δt es el tiempo de muestreo. \hat{d} es el número del tiempo de muestreo correspondiente al tiempo de retardo, por tanto $\hat{d}\Delta t$ es el tiempo de retardo. n es el orden del modelo. $y(k\Delta t)$ y $u(k\Delta t)$ son los datos obtenidos de las mediciones de las entradas y salidas del proceso en la muestra k -ésima. La salida del modelo $\hat{y}(k\Delta t)$ es la salida del proceso predicha en la muestra k -ésima. Los coeficientes \hat{d} , \hat{a}_i $i = (1, 2, \dots, n)$ y \hat{b}_i $i = (1, 2, \dots, n)$ son los parámetros del modelo ARX. Nótese que la salida $\hat{y}(k\Delta t)$ depende de las salidas pasadas del proceso $y((k-1)\Delta t), y((k-2)\Delta t), \dots, y((k-n)\Delta t)$ y las entradas pasadas del proceso $u((k-1-\hat{d})\Delta t), u((k-2-\hat{d})\Delta t), \dots, u((k-n-\hat{d})\Delta t)$. Tómese en cuenta que se necesita al menos una salida anterior del proceso $y((k-1)\Delta t)$ para estimar la salida del modelo $\hat{y}(k\Delta t)$. Por lo tanto, el modelo ARX puede predecir sólo la siguiente salida del proceso.

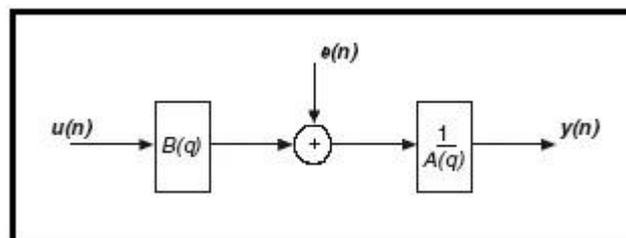


Figura 3.1. Estructura de modelo ARX.

Fuente: (Sung, Lee, & Lee, 2009).

MATLAB (Ljung, 2015) ocupa la estructura ARX representada por la ecuación:

$$A(q) y(t) = B(q) u(t - nk) + e(t) \quad (3.2)$$

De donde el software calcula los coeficientes de los polinomios $A(q)$ y $B(q)$, y donde previamente se define el orden de cada uno de ellos: n_a , n_b y n_k . Dado que N_y es el número de salidas y N_u es el número de entradas, tenemos:

n_a Es el orden del polinomio $A(q)$ y se especifica como una matriz $N_y \times N_y$ de enteros no-negativos.

n_b Es el orden del polinomio $B(q) + 1$ y se especifica como una matriz $N_y \times N_u$ de enteros no-negativos.

n_k Es el retardo entre la entrada y la salida expresado como los ceros fijos del polinomio B y se especifica como una matriz $N_y \times N_u$ de enteros no-negativos.

3.3.1.2 Estructura de Error de Salida (OE)

La estructura de error de salida (OE) (Sung, Lee, & Lee, 2009) se define por la ecuación:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k\Delta t) = & -\hat{a}_1\hat{y}((k-1)\Delta t) - \hat{a}_2\hat{y}((k-2)\Delta t) - \dots - \hat{a}_n\hat{y}((k-n)\Delta t) + \\ & \hat{b}_1u((k-1-\hat{d})\Delta t) + \hat{b}_2u((k-2-\hat{d})\Delta t) + \dots + \hat{b}_nu((k-n-\hat{d})\Delta t) + \hat{B} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Donde Δt es el tiempo de muestreo. \hat{d} es el número del tiempo de muestreo correspondiente al tiempo de retardo, por tanto $\hat{d}\Delta t$ es el tiempo de retardo. n es el orden del modelo. $u(k\Delta t)$ es la medición de las entradas del proceso en la muestra k -ésima. La salida del modelo $\hat{y}(k\Delta t)$ es la salida del proceso predicha en la muestra k -ésima. Los coeficientes \hat{d} , \hat{a}_i $i = (1, 2, \dots, n)$ y \hat{b}_i $i = (1, 2, \dots, n)$ son los parámetros del modelo OE. Nótese que la salida $\hat{y}(k\Delta t)$ depende de las salidas pasadas del modelo $\hat{y}((k-1)\Delta t), \hat{y}((k-2)\Delta t), \dots, \hat{y}((k-n)\Delta t)$ y las entradas pasadas del proceso $u((k-1-\hat{d})\Delta t), u((k-2-\hat{d})\Delta t), \dots, u((k-n-\hat{d})\Delta t)$. Tómese en cuenta que todas las salidas del modelo en el futuro pueden ser estimadas sólo si las entradas

del proceso son conocidas. Por lo tanto, el modelo OE puede predecir varias salidas a continuación del proceso.

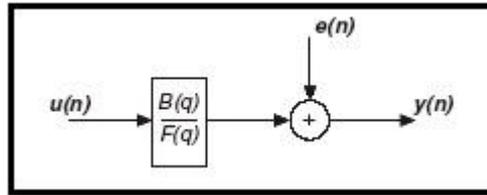


Figura 3.2. Estructura de modelo OE.

Fuente: (Sung, Lee, & Lee, 2009).

MATLAB (Ljung, 2015) hace el cómputo de la estructura OE representada por la ecuación:

$$y(t) = \begin{bmatrix} B(q) \\ F(q) \end{bmatrix} u(t - nk) + e(t) \quad (3.4)$$

De donde el software calcula los coeficientes de los polinomios $B(q)$ y $F(q)$, y donde previamente se define el orden de cada uno de ellos: n_b , n_f y n_k . Dado que N_y es el número de salidas y N_u es el número de entradas, tenemos:

n_b Es el orden del polinomio $B(q) + 1$ y se especifica como una matriz $N_y \times N_y$ de enteros no-negativos.

n_f Es el orden del polinomio $F(q)$ y se especifica como una matriz $N_y \times N_u$ de enteros no-negativos.

n_k Es el retardo entre la entrada y la salida y se especifica como una matriz $N_y \times N_u$ de enteros no-negativos.

En las ecuaciones (3.2) y (3.4) $e(t)$ representa el ruido que afecta a la salida del sistema (Sung, Lee, & Lee, 2009).

3.4 Entorno de software y proceso de identificación del sistema

El entorno de MATLAB contiene una herramienta que facilita el cálculo de modelos matemáticos con la ayuda de estructuras matemáticas, *System Identification Toolbox*, cuyo entorno gráfico ha servido de mucha ayuda en el presente estudio.

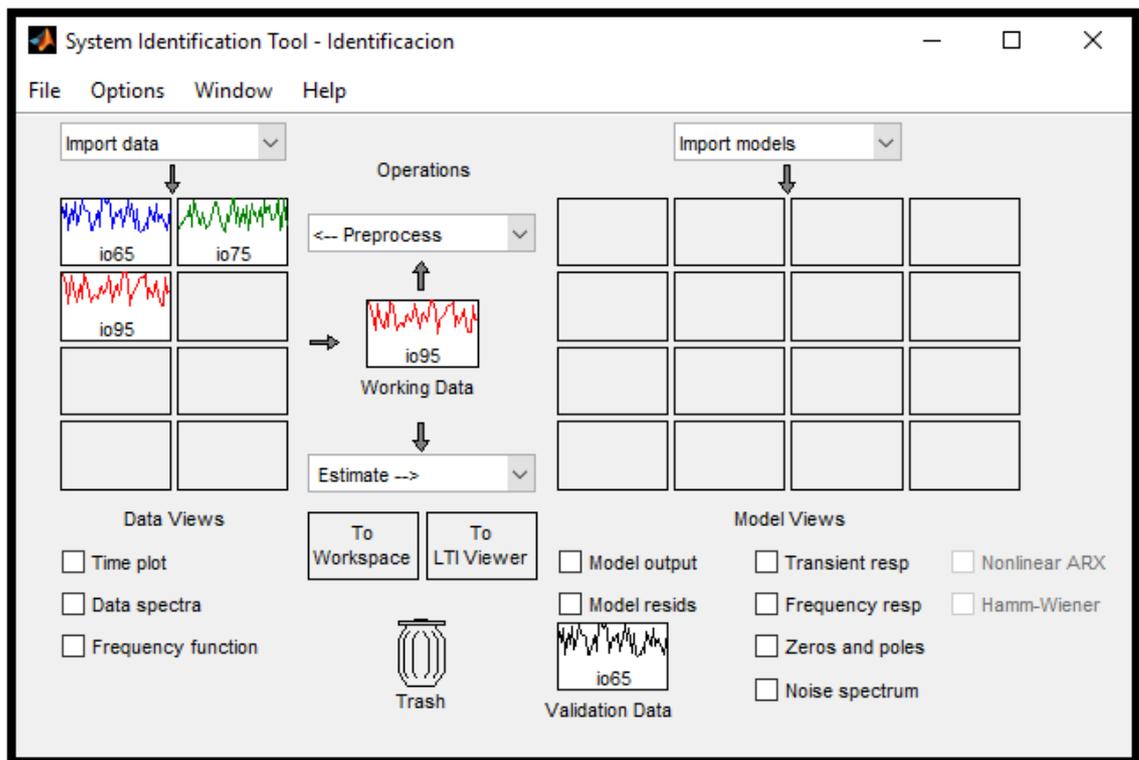


Figura 3.3. Ingreso al software de identificación de los grupos de datos obtenidos.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

Para empezar con el proceso de identificación, se importan hacia la herramienta los conjuntos de muestras ordenados en objetos de datos `iddata` (véase sección 2.4). Las propiedades de los objetos de datos ya se han modificado, de manera que los nombres y las unidades de las variables están ya incluidas en los objetos de datos. En la figura 3.3 se puede apreciar los grupos de datos importados al software en la parte izquierda de la ventana. El grupo de muestras del recorrido con cadencia constante de 95 r.p.m. es utilizado para la estimación del modelo, mientras que el grupo de 65 r.p.m. es usado para la validación del modelo. El modelo obtenido con las señales de 95 r.p.m. servirá de mejor manera para la estimación puesto que el objetivo es elaborar un sistema

dirigido a un espectro más amplio de posibles usuarios, para quienes el uso de la bicicleta cubra sus necesidades de transporte y recreación en un entorno urbano.

3.4.1 Estimación de modelos con la estructura ARX

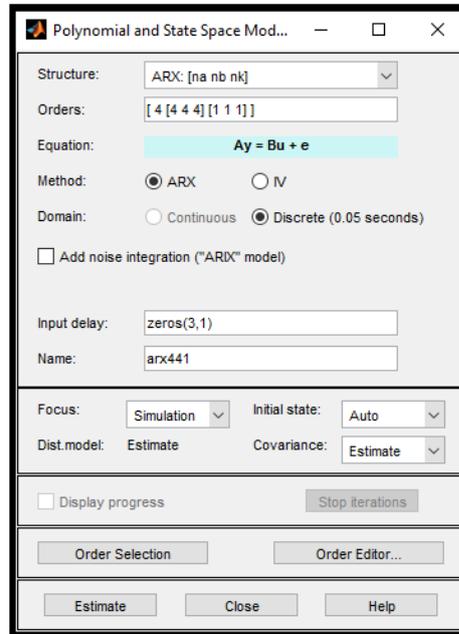


Figura 3.3. Interfaz de configuración de las condiciones de estimación para la estructura ARX.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

En la interfaz de la herramienta de identificación, luego de ingresar los grupos de datos obtenidos, se ingresa al apartado *Estimate* (véase figura 3.3) y se despliega la interfaz para la configuración de las condiciones de estimación. Entre las opciones de configuración se puede definir el orden de los polos y ceros, y el valor de los tiempos de retardo de cada una de las variables de entrada. En la pestaña de enfoque (*Focus*) tenemos las opciones de predicción y simulación, y hace referencia al cálculo del error del modelo a calcular frente a las mediciones realizadas.

3.4.2 Modelos obtenidos con la estructura ARX

Varios de los resultados obtenidos con la estructura ARX han sido poco satisfactorios y con altos niveles de incertidumbre en los modelos obtenidos. Sin embargo y a manera de ilustración, se ha decidido mostrar dos de los modelos más cercanamente acertados

que se obtuvieron (Figura 3.4). Como se observa, los porcentajes de similitud están por debajo del 70% que se busca para poder elegir el modelo, y además los polos y ceros están muy altos, lo que va en contra de nuestro criterio de parsimonia.

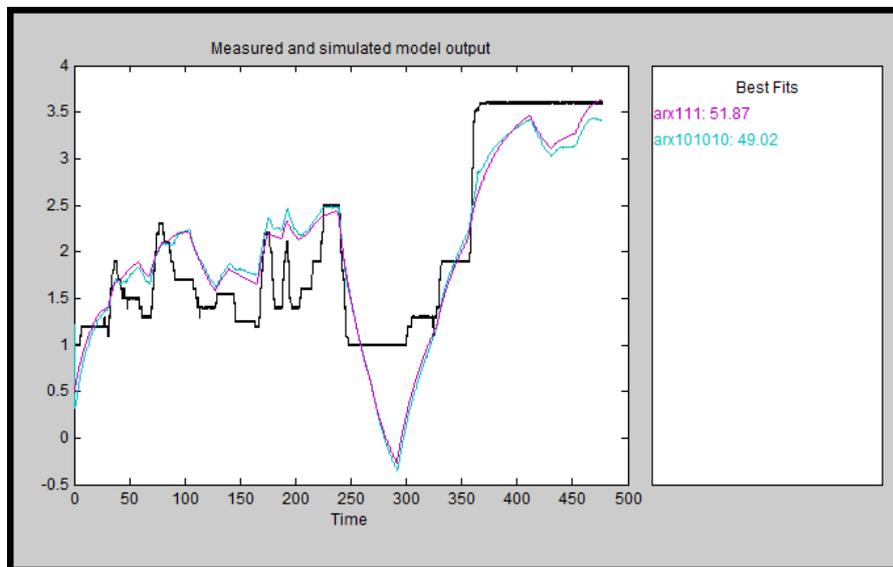


Figura 3.4. Gráficas de los modelos generados con la estructura ARX junto a la gráfica de los datos obtenidos de la salida o relación de transmisión (en color negro). En la columna derecha se evalúan los porcentajes de similitud con los datos obtenidos.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

3.4.3 Estimación de modelos con la estructura OE

En la interfaz de configuración de las condiciones de estimación, en la primera pestaña, se puede cambiar la estructura matemática base para la estimación del modelo. Otra de las estructuras que se escogieron fue la de error de salida, donde asimismo hacemos la prueba con el cálculo de varias combinaciones de polos y ceros. Los tiempos de retardos calculados en la sección 3.2.1 los colocamos en el campo de los coeficientes de retardo n_k .

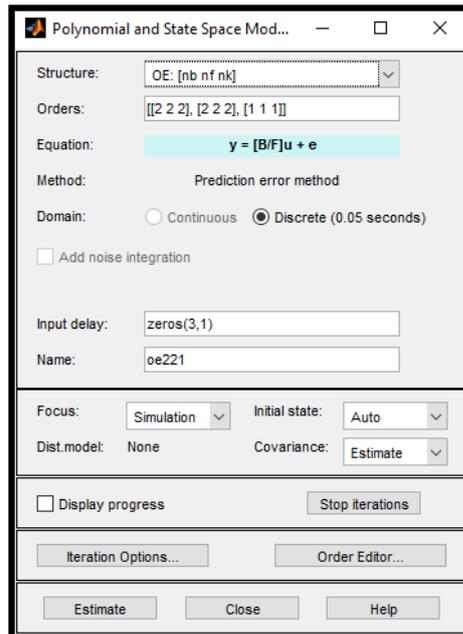


Figura 3.5. Interfaz de configuración de las condiciones de estimación para la estructura OE.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

3.4.4 Modelos obtenidos con la estructura OE

Se hicieron variaciones en los coeficientes de estimación para el cálculo del modelo con la estructura de error de salida y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 3.6. En este caso se observa que el modelo denominado “oe211” es el que mayor porcentaje de similitud presenta, junto con un menor número de polos ($nb=2$, $nf=1$; véase ecuación 3.4) que le brinda mayor favoritismo respecto al criterio de parsimonia planteado. En conclusión, el modelo “oe221” es el modelo que mejor describe el comportamiento de los datos observados y por tanto es el modelo escogido para continuar con este estudio.

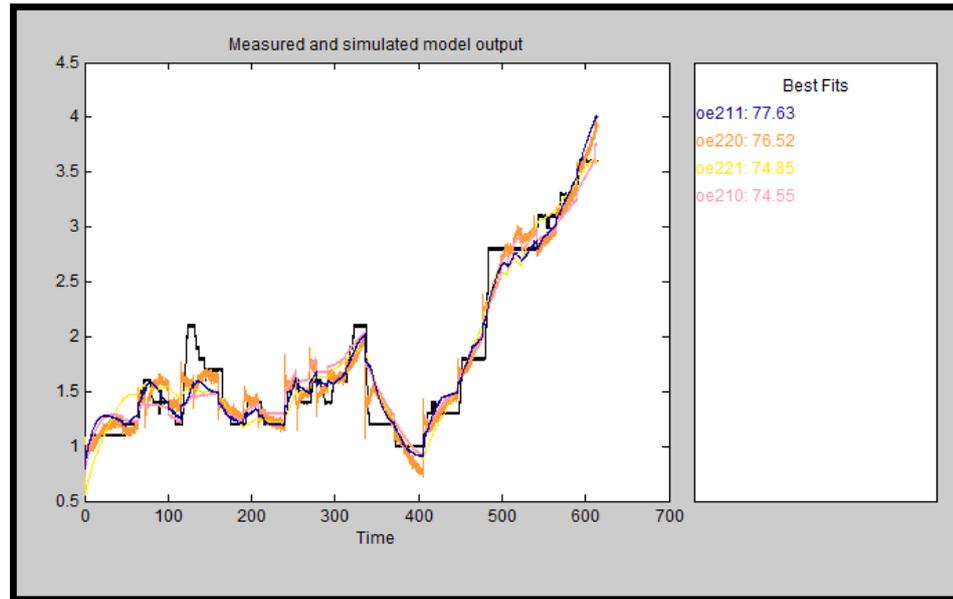


Figura 3.6. Gráficas de los modelos generados con la estructura OE junto con la gráfica de los datos obtenidos de la salida o relación de transmisión (en color negro). En la columna derecha se evalúan los porcentajes de similitud con los datos obtenidos.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

Características del modelo escogido

Tomando en cuenta que la estructura del modelo OE se representa en MATLAB mediante la ecuación (3.4), entonces tenemos que la salida en el modelo que escogido se compone de la suma de los polinomios $B(q)$ y $F(q)$ elaborados para cada una de las entradas. Es decir que, para las tres entradas del sistema de este estudio, tenemos:

$$y(t) = \frac{B_{incl}(q)}{F_{incl}(q)} u_{incl}(t - nk) + \frac{B_v(q)}{F_v(q)} u_v(t - nk) + \frac{B_{cad}(q)}{F_{cad}(q)} u_{incl}(t - nk) + e(t) \quad (3.5)$$

Donde los subíndices *incl*, *v* y *cad* hacen referencia a las entradas de inclinación, velocidad y cadencia respectivamente. En la tabla 3.2 observamos los valores del modelo “oe221” para cada una de estas entradas.

Observando más de cerca la comparación de los datos de salida simulados con el modelo y los datos de salida obtenidos mediante experimentación (Figura 3.5), se

puede comprobar que el modelo escogido se adapta muy velozmente a los cambios bruscos en los niveles de relación de transmisión.

Tabla 3.2. Valores de los coeficientes de los polinomios pertenecientes a la estructura del modelo escogido (oe211) para cada una de las entradas. (El operador “q” es equivalente al operador “z” y tiene la misma concepción de la transformada z).

<i>Entrada</i>	<i>B(q)</i>	<i>F(q)</i>
<i>Inclinación</i>	$-0.06343 z^{-1} + 0.06341 z^{-2}$	$1 - 0.9987 z^{-1} + 8.871e - 17 z^{-2}$
<i>Velocidad</i>	$0.04559 z^{-1} - 0.04545 z^{-2}$	$1 - 0.9987 z^{-1}$
<i>Cadencia</i>	$-0.0003957 z^{-1} + 0.0003947 z^{-2}$	$1 - 0.9986 z^{-1}$

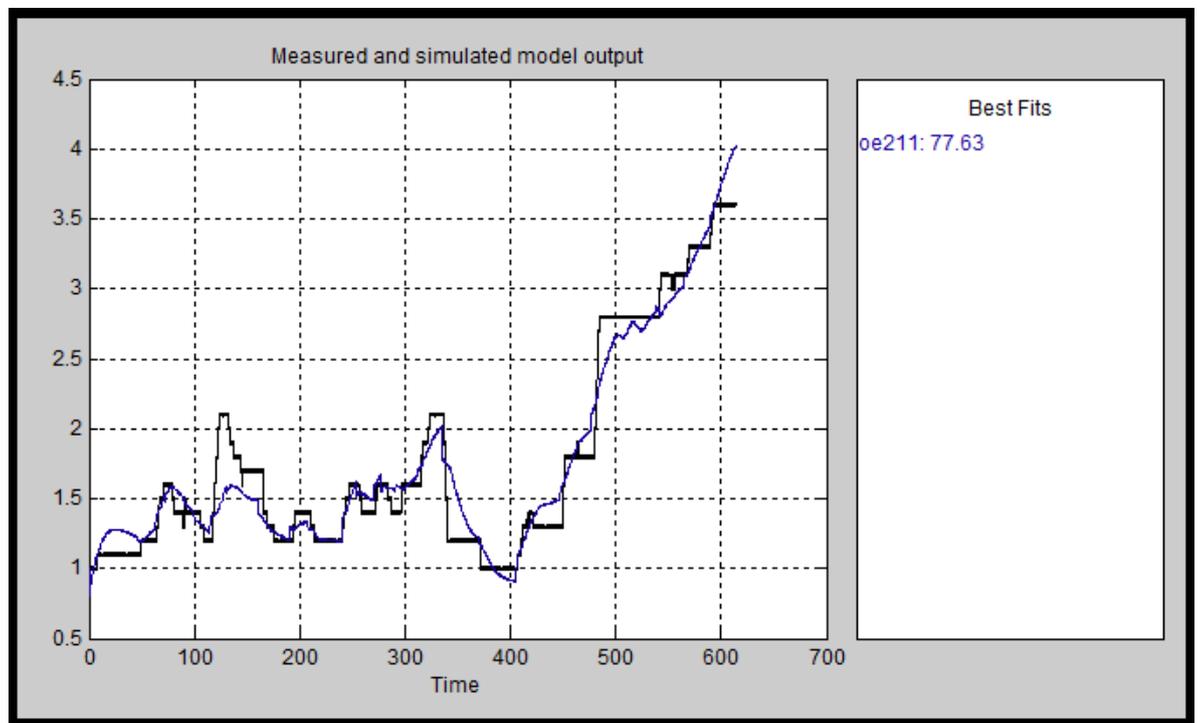


Figura 3.5. Modelo matemático escogido (oe211 en color azul marino) junto con la gráfica de los datos obtenidos de la salida o relación de transmisión (en color negro). En la columna derecha se evalúa el porcentaje de similitud con los datos obtenidos.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

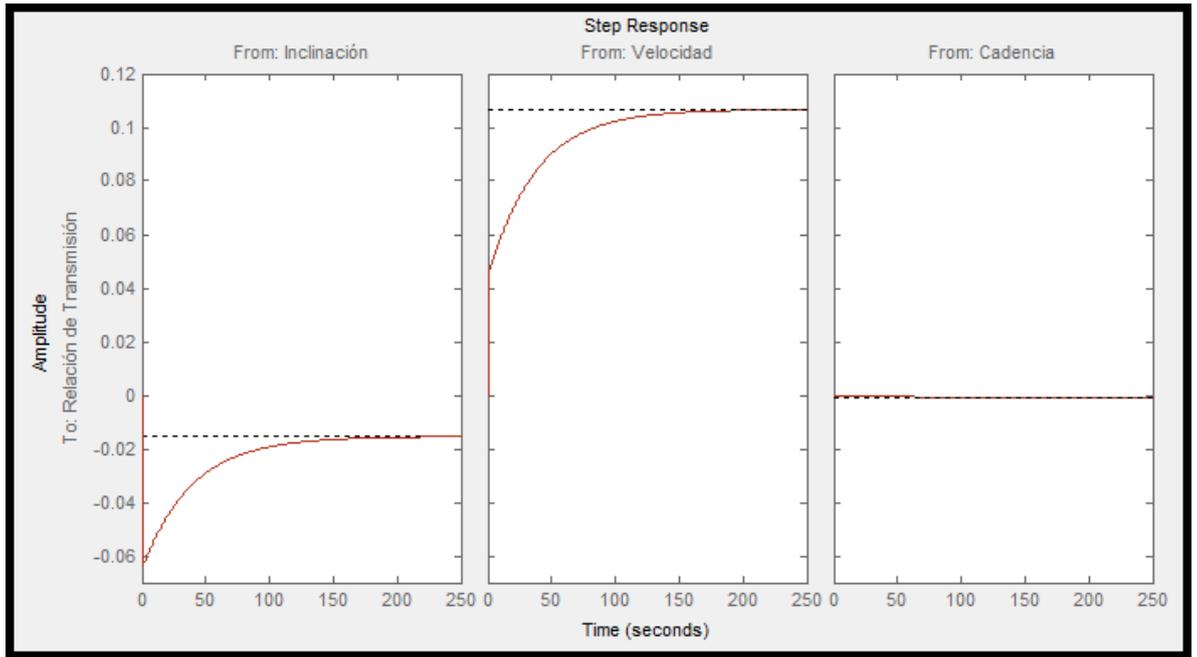


Figura 3.6. Respuesta al escalón de cada una de las entradas en el modelo escogido “oe211”.

Fuente: (Gráfico elaborado con la ayuda de *System Identification Toolbox* de MATLAB).

CAPÍTULO IV

SOFTWARE DE CONTROL Y SIMULACIÓN

4.1 Introducción

Luego de obtener un modelo matemático que describe muy de cerca el comportamiento de las variables de salida con respecto a las variables de entrada, el siguiente paso es elaborar un controlador PID que ajuste el comportamiento de las plantas obtenidas para obtener un valor de relación de transmisión que permita al ciclista conservar el mismo ritmo de cadencia a lo largo de un paseo.

La implementación de este controlador se la realiza mediante la simulación del sistema real con la ayuda de la herramienta *Simulink* de MATLAB. En esta herramienta colocaremos en paralelo las tres plantas que conforman el modelo obtenido en el capítulo anterior y las sumaremos para obtener un valor de la variable de salida o relación de transmisión. Según la comparación entre la señal de cadencia medida en el sensor y la establecida en el valor de estado estable, se genera una señal de error, la cual tiene que ser controlada. Este es el objetivo de este capítulo. Antes se proporciona una base teórica del controlador más común usado en las industrias, el controlador PID

4.2 Base Teórica

4.2.1 Controlador Proporcional

El objetivo principal del controlador proporcional es eliminar el error de estado estable del sistema, es decir la diferencia entre el valor establecido y el valor medido por el sensor. El factor multiplicador de este controlador, denominado factor proporcional K_p , contribuye a acelerar el proceso de la planta para que la señal medida se acerque a la establecida, es decir, que mientras el factor proporcional crece, el error de estado estable disminuye (Campo, 2013). Aun así, el controlador proporcional nunca podrá eliminar el error de estado estable totalmente por sí solo. Además, uno de los principales inconvenientes con este tipo de controlador es que al incrementar

demasiado la ganancia proporcional solo dará como resultado que el valor medido por los sensores sobrepase el límite del valor establecido en la respuesta de nuestro sistema, proceso denominado un “overshoot” o sobreamortiguación. Entre las desventajas de un controlador proporcional se enumeran también que causa oscilaciones en presencia de retardos y tiempos muertos; causa más problemas mientras mayor es el orden del sistema y que amplifica directamente el ruido (Temel, Yagli, & Goren, 2004).

4.2.2 Control Proporcional Integrativo

Este controlador es usado principalmente para eliminar el error de estado estable resultante de un controlador proporcional. Aun así, si se expresa en términos de respuesta y de estabilidad global del sistema, tiene un impacto negativo. Este controlador es usado cuando la velocidad de respuesta no es la esencial, porque no puede reducir el tiempo de elevación ni las oscilaciones dado que el controlador proporcional-integrativo no tiene la habilidad de predecir errores futuros en el sistema (Sung, Lee, & Lee, 2009).

4.2.3 Control Proporcional Derivativo

El enfoque de este controlador es de aumentar la estabilidad del sistema reduciendo las oscilaciones ya que se tiene una capacidad de predecir el error futuro de la respuesta del sistema, y por lo tanto ajusta el factor multiplicador resultante para prevenir un sobreamortiguamiento. Para poder evitar un cambio repentino en el valor de la señal de error, la derivada es tomada de la respuesta de salida de la variable del sistema en vez de tomarla de la señal de error. En consecuencia, la ganancia derivativa está diseñada para ser proporcional al cambio de la variable de salida para prevenir que los cambios bruscos que ocurran en la salida del controlador resulten en cambios bruscos en la señal de error. Un control puramente derivativo no es usado ya que también amplifica directamente el ruido (Temel, Yagli, & Goren, 2004).

4.2.4 Controlador Proporcional Integrativo Derivativo (P-I-D)

Este controlador dirige de manera óptima la dinámica del sistema ya que reduce a cero el error de estado estable, reduce el tiempo de elevación (respuesta rápida), elimina las oscilaciones y tiene una mayor estabilidad (Sung, Lee, & Lee, 2009). La necesidad de usar un componente derivativo sumado al controlador P-I es para eliminar el sobreamortiguamiento y las oscilaciones que ocurren en la respuesta de salida del sistema. Una de las principales ventajas del controlador P-I-D se basa en que puede ser usado en procesos de mayor orden, por lo tanto, será de mucha utilidad para la aplicación del presente estudio donde tenemos que la señal de salida es influenciada por tres plantas provenientes de tres variables de entrada, las cuales deben mantener nivel de estado estable en la variable de cadencia en el menor tiempo posible (Campo, 2013).

4.3 Ajustes previos del modelo obtenido

Para facilitar el trabajo de sintonizar un controlador es recomendable transformar los valores discretos de cada una de las plantas del modelo obtenido y representarlas mediante funciones de transferencia en tiempo continuo. Luego de esta transformación, se tiene que las ecuaciones de cada una de las plantas son:

$$\text{Planta Cadencia} = \frac{-0.0003955 s_{cad}^3 + 0.01668 s_{cad}^2 - 0.03436 s_{cad} - 0.00167}{s_{cad}^3 + 42.25 s_{cad}^2 + 90.07 s_{cad} + 2.487} \quad (4.1)$$

$$\text{Planta Velocidad} = \frac{0.04555 s_v^3 - 1.933 s_v^2 + 4.436 s_v + 0.2817}{s_v^3 + 42.53 s_v^2 + 101.1 s_v + 2.641} \quad (4.2)$$

$$\text{Planta Inclinación} = \frac{-0.06346 s_{incl}^3 + 2.671 s_{incl}^2 - 5.327 s_{incl} - 0.03301}{s_{incl}^3 + 42.13 s_{incl}^2 + 85.28 s_{incl} + 2.138} \quad (4.3)$$

Donde s_{cad} , s_v y s_{incl} son las variables en el plano s correspondientes a las variables de cadencia, velocidad e inclinación respectivamente

4.4 Diagrama de bloques del sistema controlado

La planta equivalente es implementada a través de la suma de cada una de las plantas correspondientes a cada una de las variables de entrada. La planta de cadencia recibe la señal del controlador PID (Figura 4.1). El controlador a su vez recibe el error resultante entre la cadencia deseada y la cadencia medida para así obtener la relación de transmisión que será enviada al servomotor para comandar la manzana CVT. Las plantas de velocidad e inclinación reciben las medidas de sus respectivos sensores para aportar con la salida más óptima, es decir, la relación de transmisión más apropiada según las condiciones de terreno y velocidad de la bicicleta.

Es necesario recalcar que, aunque el controlador aparentemente actúa sobre la planta de cadencia, en realidad actúa sobre la planta equivalente, ya que esta influye sobre la señal de error que ingresa al controlador. A cada instante, los cambios en las señales de velocidad e inclinación varían los resultados de sus respectivas funciones de transferencia, y estos influyen en la señal de salida.

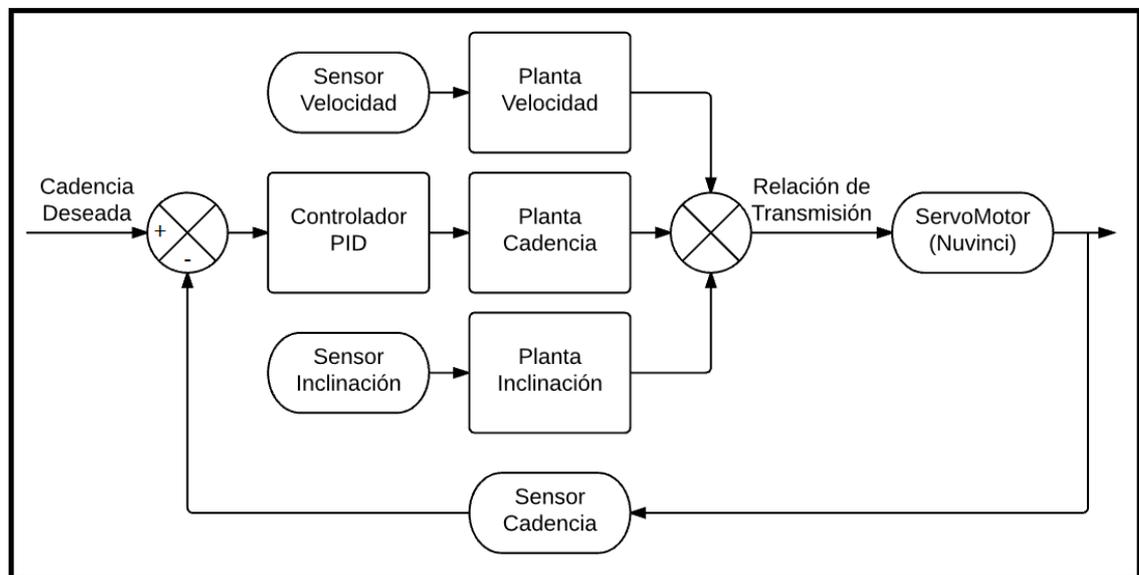


Figura 4.1. Diagrama de bloques del controlador PID con las plantas obtenidas de cadencia, velocidad e inclinación.

4.5 Simulación del controlador

Las plantas obtenidas en el capítulo 3 están ubicadas en paralelo y cada una de ellas recibe como entrada la medición de su sensor respectivo. En el caso de la planta que corresponde a la cadencia, esta recibe la señal del controlador PID, que a su vez recibe la señal de error resultante de la diferencia de la cadencia deseada con la cadencia medida. La unión de las salidas de cada planta contribuye a generar un nivel de relación de transmisión adecuado para mantener la cadencia alrededor del nivel de cadencia deseado.

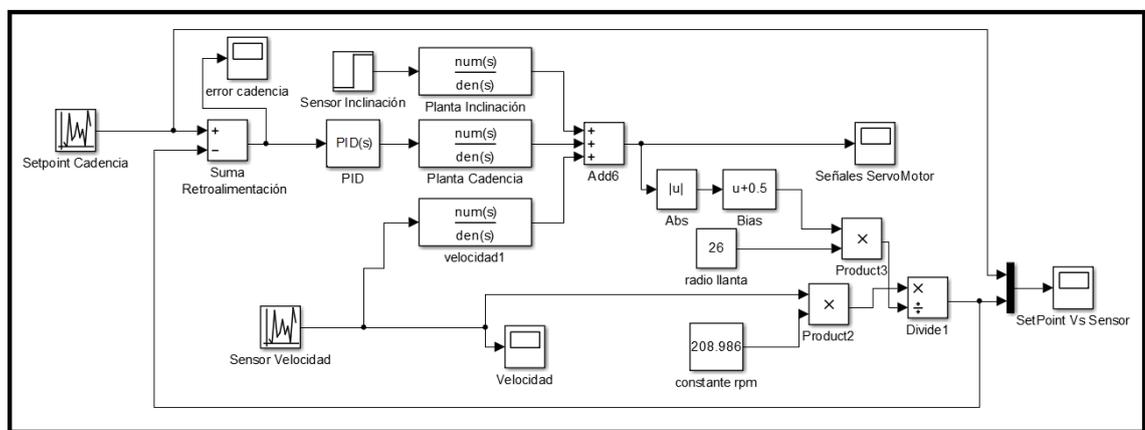


Figura 4.2. Diagrama de bloques de la simulación del sistema.

Fuente: (Gráfico elaborado en *Simulink*).

En la figura 4.2 observamos la configuración descrita en el diagrama de bloques de la figura 4.1. A la salida de las sumas de las plantas se recibe la señal que irá al servomotor que domina la manzana de cambios CVT. La señal del sensor de cadencia es a su vez simulada y comparada con la señal de cadencia deseada.

4.5.1 Obtención de los coeficientes del controlador PID

El software Simulink de MATLAB nos proporciona una interfaz de fácil manejo para sintonizar los coeficientes de manera gráfica. En la figura 4.3 se muestra la forma en la que se ajusta el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio de la respuesta al escalón y llegar a una gráfica satisfactoria. El software calcula los coeficientes PID de acuerdo a la gráfica escogida.

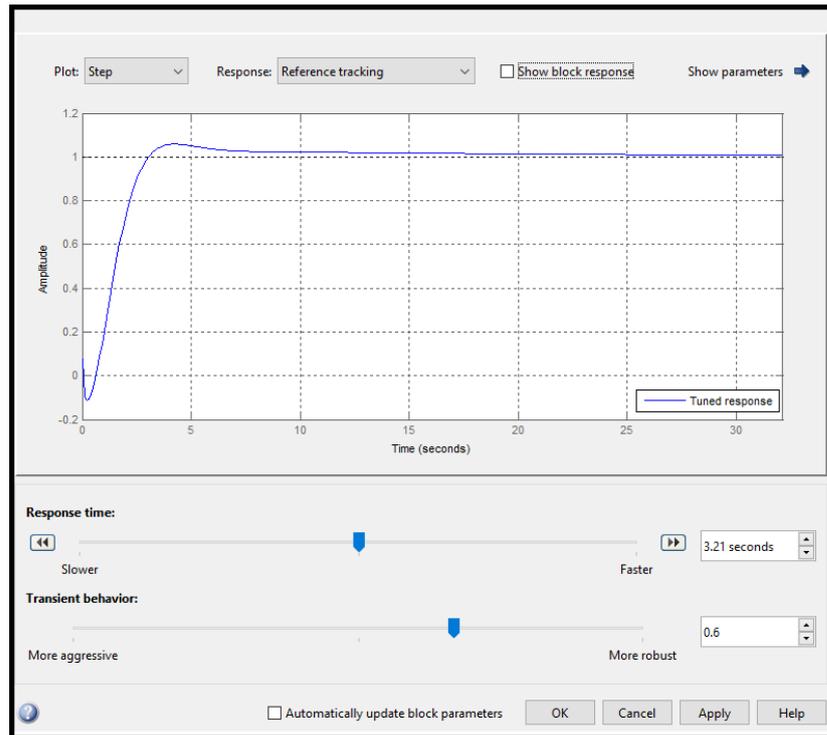


Figura 4.3. Sintonizador PID gráfico.

Fuente: (Gráfico elaborado en *Simulink*).

La fórmula del controlador consiste en un compensador que, además de los coeficientes PID tiene un coeficiente de filtrado en la parte derivativa. La fórmula está dada por:

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (4.1)$$

Los coeficientes obtenidos de la sintonización son:

Proporcional (P): 1

Integral (I): 14.1747336446602

Derivativo (D): 0

Coefficiente de filtrado (N): 100

El controlador sintonizado es un proporcional-integrativo. El coeficiente derivativo es nulo y, por tanto, el coeficiente de filtrado no tiene uso alguno.

4.6 Resultados de la Simulación

4.6.1 Comportamiento de la salida frente a la entrada

En la figura 4.4 tenemos una gráfica en el tiempo del comportamiento de la salida frente a la entrada deseada. La cadencia deseada de entrada es una señal aleatoria uniforme que se incorporó para ver cuán rápido responde el sistema frente a cambios en la misma. Frente a estos cambios, se puede observar cómo la salida se estabiliza en aproximadamente un segundo, tiempo aceptable de respuesta para los objetivos buscados.

Los picos excesivamente altos en la entrada se deben a las señales iniciales que circulan por el ciclo de retroalimentación y se pueden eliminar de manera fácil estableciendo tiempos muertos al inicio del funcionamiento del sistema, además de un correcto filtrado en el software del microcontrolador.

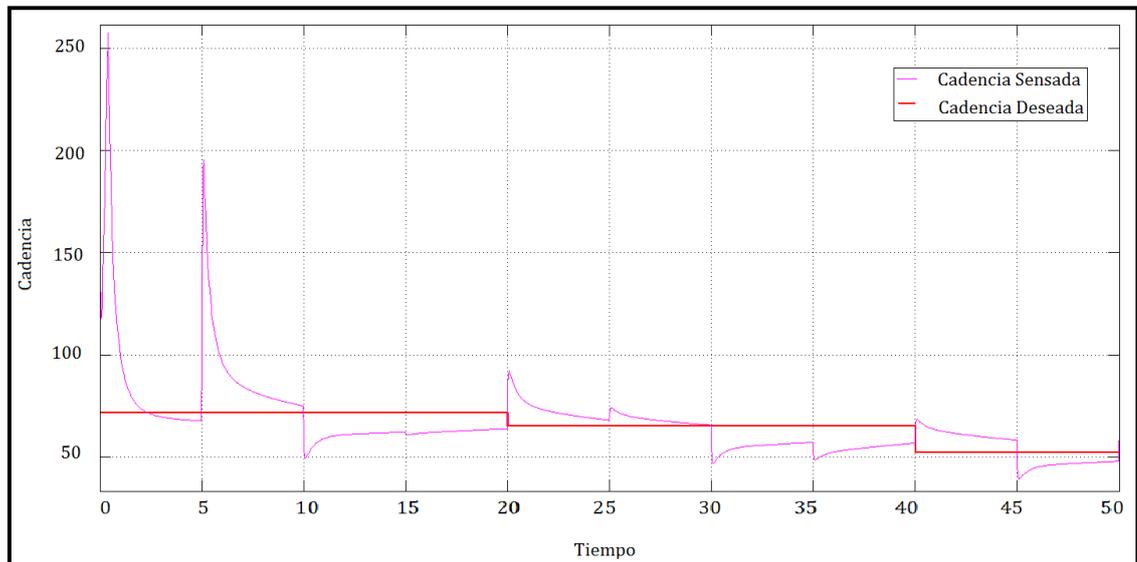


Figura 4.4. Respuesta de la salida del sistema frente a la señal deseada o señal de entrada.

Fuente: (Gráfico elaborado en *Simulink*).

Los cambios que se producen en la señal de salida cuando la entrada es constante se deben a los cambios en las variables de inclinación y velocidad, las cuales también están simuladas mediante una entrada aleatoria uniforme. De la misma manera, estos cambios no varían mucho de los producidos por cambios en la señal de cadencia y no exceden umbrales que puedan afectar significativamente al esfuerzo y confort del ciclista.

La señal de error de la cadencia de salida con respecto a la de entrada (Figura 4.5) no sobrepasa el valor de 10 r.p.m. en los picos de cambio de señal de entrada y no se aleja más de 5 unidades cuando la señal de salida se estabiliza. Estos resultados se encuentran dentro de las tolerancias esperadas, dado el porcentaje de incertidumbre de la planta, que rodea el 25% (véase figura 4.5). Estos errores de simulación provienen de plantas generadas con datos experimentales y llevan en su naturaleza datos que señalan pérdidas en circunstancias reales, tales como fricción de los mecanismos, desgaste de materiales y pérdidas por condiciones físicas del ambiente. Incluyen por tanto errores que se esperan al momento de la implementación física y que es normal que aparezcan en la simulación, ya que no se han ingresado datos en condiciones ideales.

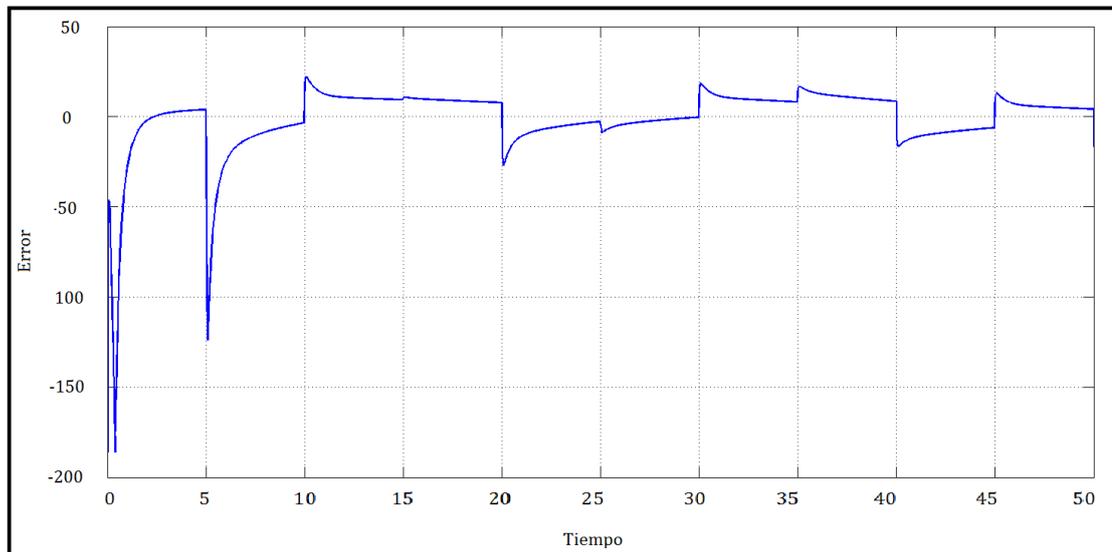


Figura 4.5. Señal de error resultante de la señal de cadencia deseada y la señal de cadencia medida en la simulación.

Fuente: (Gráfico elaborado en *Simulink*).

4.6.2 Señal entregada al actuador

La figura 4.6 ilustra la señal de salida del aporte de las tres plantas controladas, que consiste en la relación de transmisión que debe variar en la manzana CVT. Esta señal varía de acuerdo a la señal de cadencia deseada y los cambios en la velocidad e inclinación que se han programado.

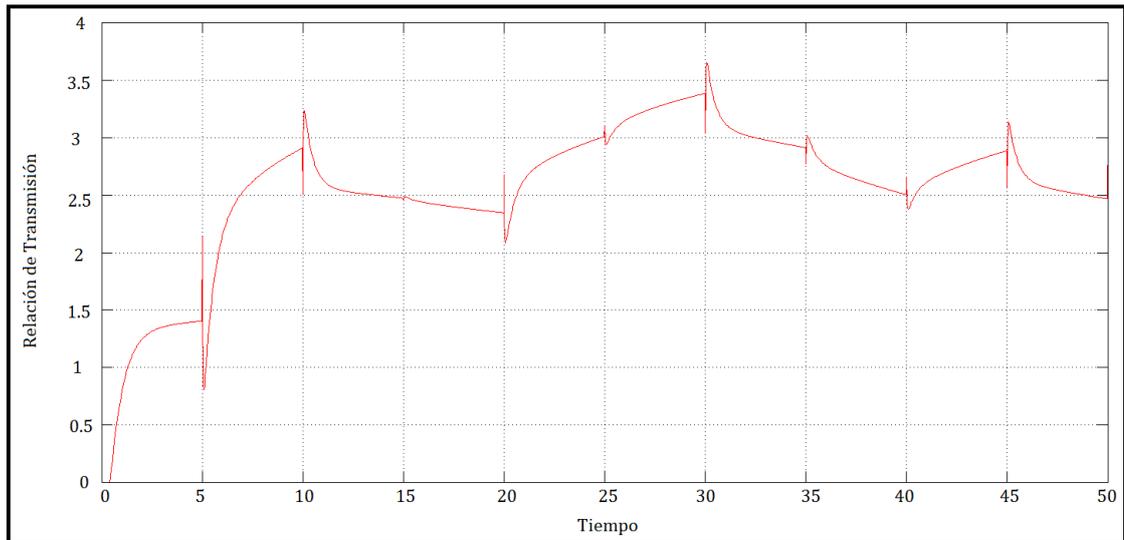


Figura 4.6. Señal entregada al actuador con respecto al tiempo.³⁶

Fuente: (Gráfico elaborado en Simulink).

En la práctica, la relación de transmisión de salida debe variar desde 1 a 3,6 en la manzana de cambios CVT. La parte del mecanismo que va conectada al servomotor varía 120 grados, por lo que desde el microcontrolador se hace la relación que aproximadamente por cada 4,5 grados de rotación del servomotor se varía la relación de transmisión en 0,1 unidades. Además, en el microcontrolador se programan los límites que la relación de transmisión (RT) puede alcanzar, es decir que la relación de transmisión no puede ser menor a 1 ni mayor a 3,6.

CAPÍTULO V

IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA DE CONTROL

5.1 Introducción

En el desarrollo de este capítulo se describe la implementación física del controlador, la ubicación de los circuitos de interfaz de los diferentes sensores y actuadores que intervienen en el sistema. Se muestra la disposición de los diferentes circuitos dentro de la bicicleta y, por último, se hace una descripción del software desarrollado y programado en el microcontrolador, junto con cada una de sus etapas.

5.2 Partes usadas en la implementación del sistema

5.2.1 Microcontrolador

Para las labores de procesamiento de las señales del sensor, cómputo de las plantas y el controlador PID, así como la visualización, se ha escogido la tarjeta Arduino Mega 2560 (Figura 5.1). Se ha escogido este sistema por su fácil programación, su capacidad de procesamiento veloz y su bajo costo, características que han dado fama al fabricante. El sistema propuesto necesita al menos de 35 pines digitales de entrada y salida, repartidos en las diferentes etapas del proceso. Además, se necesita que el tiempo entre la adquisición de las señales de los sensores y los cambios en la relación de transmisión sea mínimo para así poder notar un rendimiento positivo del sistema.

La tarjeta contiene el microcontrolador ATMega2560, de 8 bits, memoria Flash de 256 KB y comunicación con el computador mediante USB. Entre algunas de sus características más importantes tenemos:

- Rango de voltaje de alimentación: 6V – 20V
- Velocidad del reloj: 16MHz
- Canales PWM
- Comunicación I2C
- 54 pines digitales para entrada y salida
- 16 pines analógicos de entrada

Esta tarjeta presenta varias entradas extras que permitirán implementar mejoras que estarían planeadas para aplicarse a futuro en dependencia de las necesidades del sistema y del tipo de acople a la solución que se deseara colocar, por ejemplo, si se utilizaría para una persona con capacidades diferentes, es necesario que el sistema pueda detectar movimientos específicos del usuario o adquiera un comportamiento específico en caso de un movimiento repetitivo.

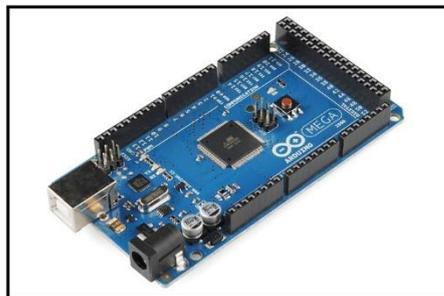


Figura 5.1. Microcontrolador usado en el prototipo, marca Arduino, modelo MEGA 2560.

Fuente: Arduino®.

5.2.2 Alimentación de los circuitos



Figura 5.2. Batería de alimentación de los circuitos del sistema, de 12V y 3800mAh.

Fuente: HitLights™.

Para energizar el sistema implementado, se incorpora al sistema una batería de 12V, pensado para suplir las necesidades energéticas de las diferentes partes. La batería usada en el prototipo es una batería recargable de ion de litio de 3800mAh de la marca HitLights™ (figura 5.2)

5.3 Ubicación de los circuitos en la bicicleta.

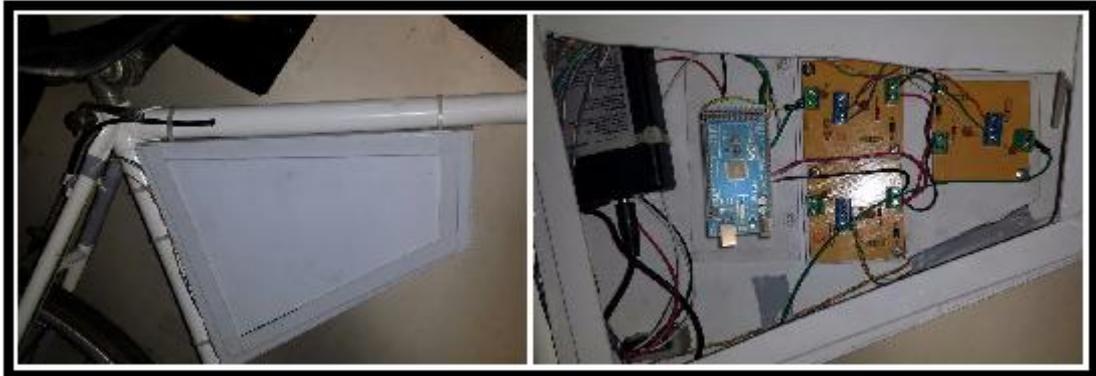


Figura 5.3. Ubicación del microcontrolador, circuitos de los sensores y batería dentro del prototipo.

La tarjeta del microcontrolador, junto con los circuitos de los sensores y la batería, van protegidos dentro de una caja ubicada en el centro del cuadro de la bicicleta, debajo de la montura. De esta manera se evita que los circuitos se llenen de polvo, se manipulen los circuitos, o se mojen por lluvias o charcos al momento de circular.

Todos los circuitos están sujetos firmemente y ordenados para tener fácil acceso al momento de la instalación y el mantenimiento del sistema. En la figura 5.3 podemos apreciar la disposición descrita dentro del prototipo.

5.4 Software programado en el microcontrolador

El software embebido en el microcontrolador del sistema consiste en tres etapas: inicialización, adquisición de las señales y cálculo de la relación de transmisión óptima. Una vez iniciado el sistema, las dos últimas etapas se repiten en un ciclo hasta que el sistema vuelve a estar en reposo. El diagrama de flujo del software puede ser apreciado en la figura 5.4 y será explicado a continuación.

5.4.1 Inicialización del sistema

En la etapa de inicialización del sistema, se arranca poniendo a cero cada una de las variables del sistema y se establece el valor de estado estable de la cadencia, es decir, el ritmo de cadencia que se va a mantener mediante el funcionamiento del sistema.

En esta etapa también se inhabilita el movimiento al servomotor, debido a que cuando este se energiza, regresa a la posición angular programada en una sesión anterior. Este inconveniente puede dañar a la manzana CVT puesto que el cambio de relaciones de transmisión de la misma se la debe realizar sólo cuando la rueda trasera se encuentra en movimiento.

5.4.2 Proceso de adquisición y procesamiento de señales

En esta etapa, se continúa con la obtención de los valores de cada una de las variables medidas en los sensores y tiene lugar cuando la rueda motriz de la bicicleta entra en movimiento, en otros términos, cuando el tiempo entre pulsos del sensor de velocidad es mayor a 0,5 segundos. De no ser así, el sistema espera indefinidamente, junto con el servomotor inhabilitado. Cuando la rueda trasera empieza a moverse, el sistema realiza el cálculo de la velocidad de acuerdo a la ecuación 2.1 (con base en el tiempo entre pulsos del sensor de hall). Luego, la variable de cadencia se calcula mediante la ecuación 2.2 cuando los pedales están girando, o según la ecuación 1.10, cuando los pedales están estáticos, esto para evitar que existan errores en los cálculos del sistema en el caso de que la cadencia tenga un valor de cero. Por último, el valor de la inclinación del terreno dado por el eje x del giroscopio viene dado en grados y simplemente se lo asigna a la variable de inclinación.

5.4.3 Proceso de obtención de la relación de transmisión óptima

El proceso se observa en la figura 5.4. Con los valores asignados a cada una de las variables medidas, se procede a calcular el valor de relación de transmisión aportado por cada una de las plantas identificadas y encontrar el valor de relación de transmisión óptimo necesario a ser aplicado al CVT mediante el servomotor. El valor de la variable

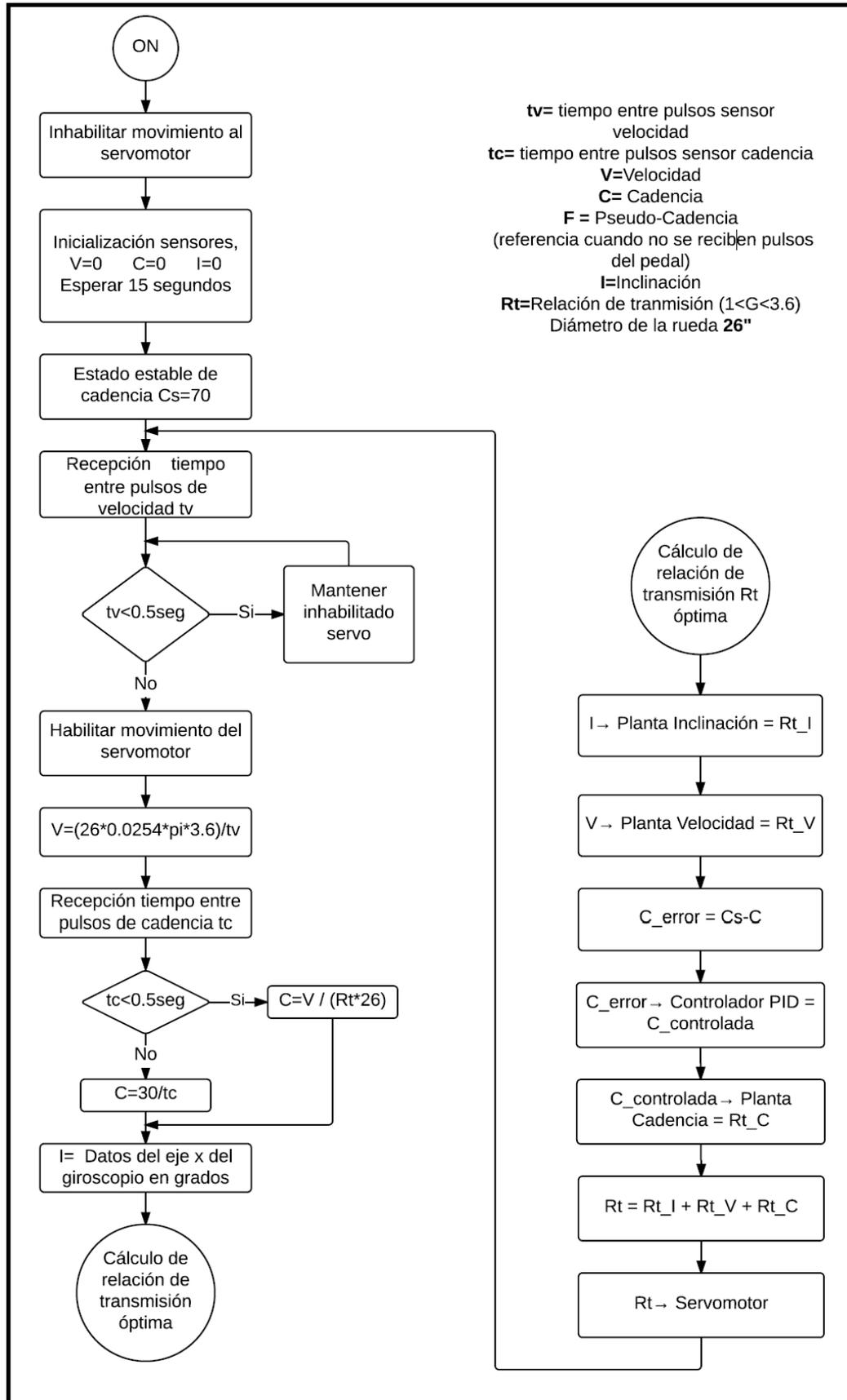


Figura 5.4. Diagrama de flujo del software incorporado al microcontrolador.

de cadencia ingresa primero al controlador PID para obtener el valor de cadencia controlado y luego ingresarlo a la planta de cadencia para obtener su aporte de relación de transmisión. Como último paso, se suman los resultados de las plantas para encontrar el valor definitivo de relación de transmisión que será enviado al actuador, o servomotor, para que este gire y haga el cambio respectivo en el CVT.

Una vez terminada esta etapa, el proceso retorna a la segunda etapa para obtener nuevos valores de las variables y calcular un nuevo valor de relación de transmisión, y así sucesivamente. El ciclo se repite cada segundo.

CAPÍTULO VI

PRUEBAS DE CAMPO

6.1 Introducción

En este capítulo se pone a prueba el sistema de transmisión desarrollado a lo largo de este estudio. Se pondrá la bicicleta sobre la pista y se realizarán pruebas comparativas frente una bicicleta común con sistema de transmisión manual.

Por una parte, tenemos el prototipo desarrollado que tiene la posibilidad de efectuar los cambios en base al ritmo de sus pedales, inclinación y velocidad por medio de un sistema de procesamiento automático, con la suavidad que nos entrega un sistema de cambios continuo y que evita los saltos de engranajes entre los cambios, mejorando sustancialmente la pérdida de torque y fuerza por parte del ciclista.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que este sistema está diseñado exclusivamente para uso urbano, debemos usar una bicicleta de peso moderado, que oscila entre los 13 a 15 kg y sistema de transmisión convencional de 27 velocidades, con nueve piñones y tres platos.



Figura 6.1. Bicicletas usadas en las pruebas comparativas de rendimiento. A la izquierda, el prototipo desarrollado en este estudio. A la derecha, bicicleta con sistema de transmisión convencional.

En la figura 6.1 se observan imágenes de las dos bicicletas utilizadas para estas pruebas. El diámetro de las llantas de la bicicleta prototipo es de 27 pulgadas, mientras que el de la llanta de la bicicleta convencional es de 26 pulgadas. Ambos tamaños son muy populares para una bicicleta de uso urbano.

6.2. Descripción de la ruta.

La ruta que se va a cubrir para realizar el recorrido de los ciclistas que harán las pruebas es la misma ruta que se planteó en la sección 2.3.3 de este estudio. Recuérdese que esta ruta cubre alrededor de 3 kilómetros y es un trazado que trata de idealizar una ruta típica en la cual se describen pendientes ascendentes, rectas, pendientes descendentes y sectores de velocidad variable donde el esfuerzo del ciclista será mayor y el sistema electrónico debería definir en poco tiempo una respuesta para mantener su velocidad y cadencia adecuada. Para facilitar el análisis, se divide esta ruta en cuatro tramos que sirven de modelo para las diferentes inclinaciones de terreno posibles que se pueda encontrar un ciclista urbano promedio.

6.2.1. Descripción por Tramos.

6.2.1.1 Tramo 1.

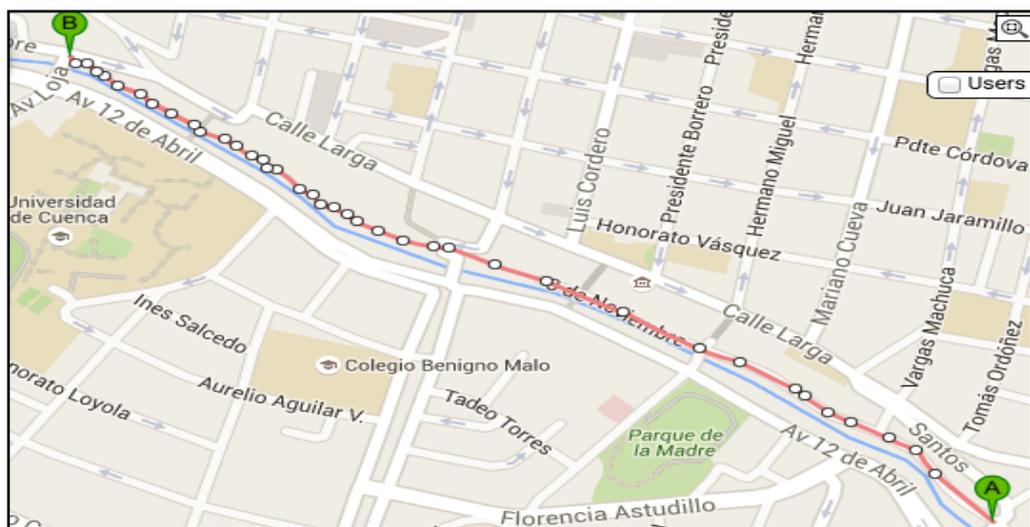


Figura 6.2. Mapeo del tramo 1 (Paseo 3 de noviembre).

De acuerdo a lo indicado en la figura 6.3, en el paseo 3 de noviembre se arranca con el inicio de la ruta en dirección este-oeste desde la calle “Todos Santos” siguiendo 1.4km hasta la intersección de la calle “La Condamine”. Este tramo comprende una ruta de espacios relativamente lineales, con ligera pendiente en subida y con espacios pequeños de pendientes de no más de 7° hacia el final del tramo. En el perfil topográfico de la figura 6.2 se pueden apreciar las pendientes descritas.



Figura 6.3. Perfil topográfico del tramo 1 (Paseo 3 de noviembre en dirección este-oeste).

6.2.1.2 Tramo 2.

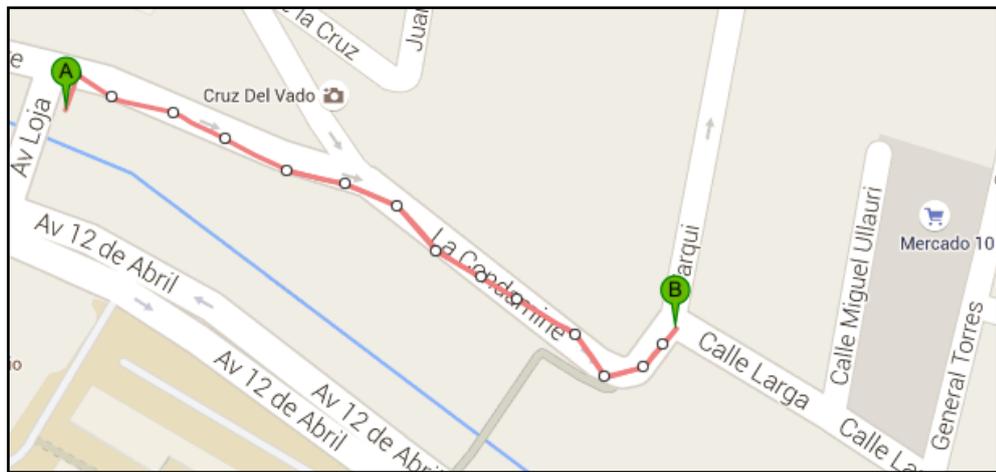


Figura 6.4. Mapeo del tramo 2 (calle La Condamine).

De acuerdo a lo referido en la figura 6.4, este tramo comprende la calle la Condamine y comienza en el puente de la avenida Loja para finalizar en la intersección de la calle Larga con la calle Tarqui, con una distancia aproximada de 0,25 kilómetros. El tramo inicia con una pendiente ascendente que aproximadamente está en 9 grados de inclinación ($\approx 15\%$). Hacia el final del tramo la pendiente se pronuncia un poco más

hasta alcanzar 11 grados de inclinación ($\approx 18\%$). En el gráfico de la figura 6.5 se puede apreciar las pendientes descritas.

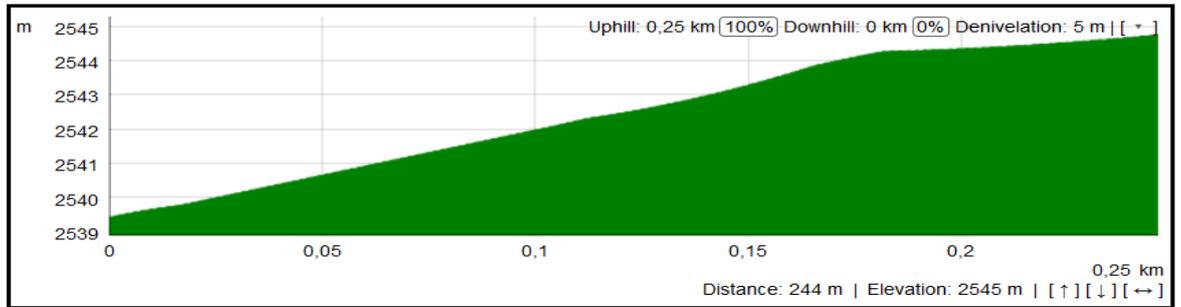


Figura 6.5. Perfil topográfico del tramo 2 (calle La Condamine en dirección oeste-este).

6.2.1.3 Tramo 3.

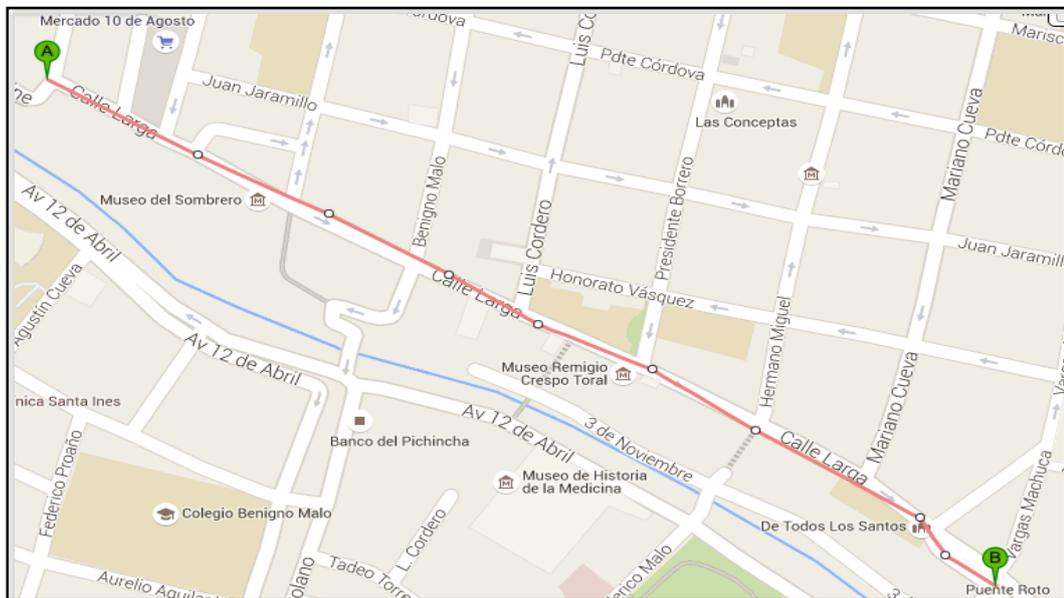


Figura 6.6. Mapeo del tramo 3 (Calle Larga).

En la figura 6.6 se muestra la ruta de este tramo que inicia en la calle Larga desde la intersección con la calle Tarqui y termina en la intersección con la calle Vargas Machuca, en la iglesia de Todos Santos, en un tramo relativamente recto con una distancia aproximada de 0,97 kilómetros y una ligera pendiente en bajada, lo que contribuye al ciclista a adquirir mayores velocidades con menor esfuerzo. Este tramo, junto con el tramo 1, describe un terreno plano con inclinaciones ligeras, que son muy comunes en la mayoría de ciudades costeras, donde hay mayor densidad poblacional y se puede tener un mayor interés en sistemas de transmisión automáticos.

En el gráfico de la figura 6.7 se puede apreciar el perfil de las pendientes de este tramo.

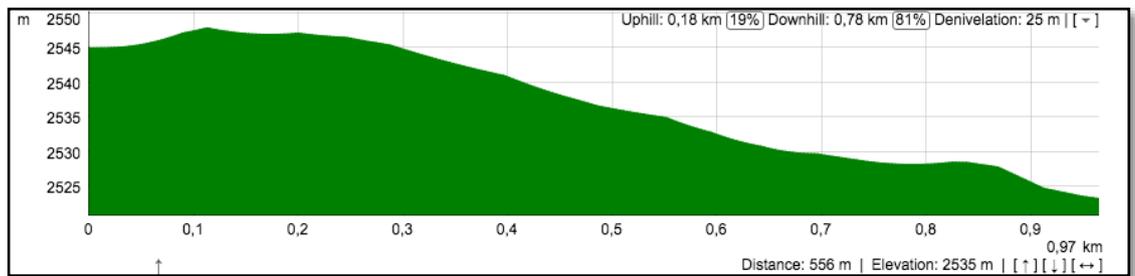


Figura 6.7. Perfil topográfico del terreno tramo 3 (Calle Larga dirección oeste-este).

6.2.1.4 Tramo 4.

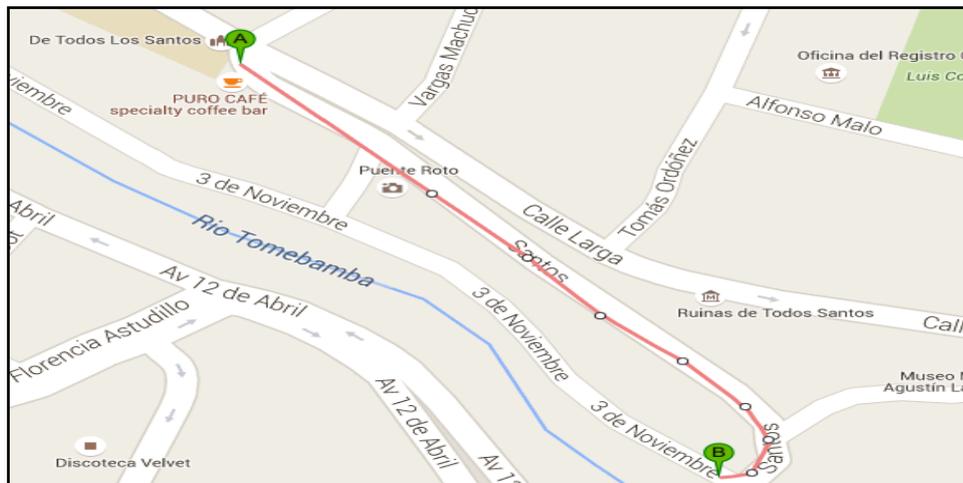


Figura 6.8. Mapeo del tramo 4 (bajada Todos Santos).

Finalmente, en el tramo 4 ilustrado en la figura 6.8, que cierra el circuito de la ruta de pruebas, inicia con una pendiente en descenso relativamente pronunciada y bordea los 3.6 grados de inclinación ($\approx -6\%$). El tramo comprende la calle Vargas Machuca hasta la intersección con el Paseo 3 de noviembre, con una distancia aproximada de 0,32 kilómetros. La pendiente pronunciada con curva cerrada inyecta velocidad a la bicicleta y motiva al ciclista a dejar de pedalear. Esta circunstancia obliga al sistema electrónico a prepararse para evitar que el ciclista pierda el equilibrio al retomar el pedaleo. El perfil de la pendiente de este tramo se observa en la figura 6.9.

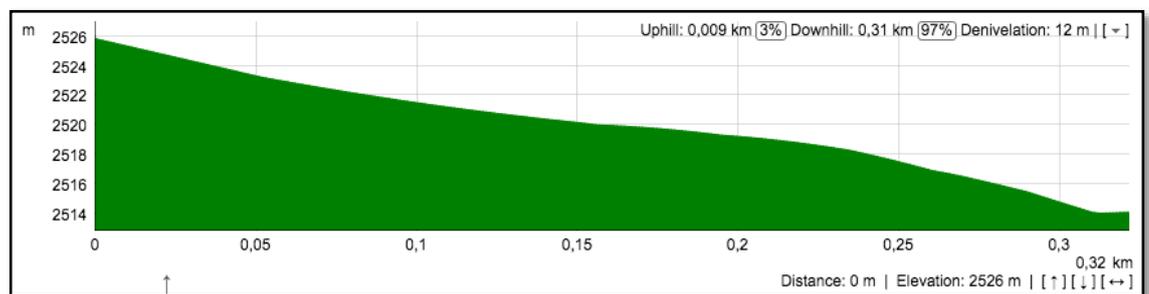


Figura 6.9. Perfil topográfico del terreno tramo 4 (bajada Todos Santos dirección oeste-este).

6.3 Descripción de los Ciclistas en prueba

Para el proceso de obtención de muestras acerca del desempeño, que pueda ser evidenciado en datos y demostrar las mejoras y soluciones que presenta este prototipo, se requiere efectuar varias muestras y pruebas en diferentes sujetos que puedan representar un amplio espectro de posibles usuarios a este prototipo.

Tomaremos dos individuos modelo: uno, que representa al ciclista más experimentado y otro, al ciclista promedio. Con ellos se pretende efectuar varias pruebas sobre pista, tomar datos concernientes al rendimiento y determinar si el prototipo nos da el resultado esperado.

6.3.1 Sujeto 1 (Ciclista Experimentado).

El primer ciclista sobre el que se medirá el rendimiento manejando las dos bicicletas de la comparación, es un sujeto experimentado en el uso de bicicletas de ruta y montaña, que ha cubierto largas distancias pedaleando y sobretodo tiene una mayor capacidad física. Representa al espectro de personas más ejercitadas, un público creciente en una ciudad que cada día tiene más adeptos al deporte y vida saludable.

6.3.2 Sujeto 2 (Ciclista Amateur).

Este ciclista representa la gran mayoría de la población, puesto que es una persona con menor experiencia manejando bicicleta y poco frecuente actividad física. Esta población, sin embargo, puede hacer uso de la bicicleta para llegar a su trabajo o recorrer distancias cortas, menores a los cinco kilómetros diarios, para poder cumplir con sus actividades diarias. Con el prototipo se quiere atraer a más gente y fomentar el uso regular de la bicicleta, sin que las personas tengan que esforzarse demasiado ni preocuparse por efectuar los cambios precisos en los momentos adecuados.

6.4 Parámetros de medición de rendimiento.

Para que nuestro objetivo de alcanzar mayor comodidad al momento de manejar una bicicleta y evitar molestias al realizar cambios de manera manual al momento de circular por rutas con pendientes y alcanzar diferentes velocidades, debemos establecer algunos parámetros de medición del gasto físico de un ciclista manejando por una misma ruta con una bicicleta común y con el prototipo desarrollado. Se medirá la energía consumida y la frecuencia cardiaca del ciclista a lo largo de la ruta, y se hará comparación con la velocidad alcanzada y el tiempo necesitado para cubrir la misma *Energía consumida*. Hace referencia a las calorías consumidas para realizar un trabajo. En las pruebas realizadas se toma el total de calorías cubiertas en la ruta planteada. Este parámetro constituye una referencia fiable del desgaste del ciclista (Reed, 2013). La unidad de medida utilizada es calorías (en adelante cal.).

Frecuencia cardíaca. Es el número de contracciones del corazón por unidad de tiempo. La frecuencia cardíaca es un indicador del esfuerzo del sujeto al realizar una actividad (Reed, 2013). La unidad de medida utilizada en las pruebas es pulsaciones por minuto (en adelante p.p.m.).

6.4.1 Dispositivo de medición de los parámetros de rendimiento.

Las medidas de los parámetros escogidos se las toma mediante un dispositivo colocado en la muñeca del ciclista. Se hace uso del reloj inteligente Samsung Gear Neo 2 (Figura 6.10) que incluye un entrenador personal consistente en un pulsómetro integrado. Además, despliega datos máximos y promedio de un recorrido, lo que facilita el análisis. Es de fácil colocación y no influye ni despista al sujeto al momento de las pruebas.



Figura 6.10. Samsung Gear Neo 2™. Mide los parámetros de rendimiento de las pruebas de campo.

Fuente: Samsung®.

6.5 Pruebas y resultados

Definidos los tramos y descrito las características de los ciclistas, a continuación, se describen las condiciones de las diferentes pruebas. Cada sujeto efectúa dos pruebas repetitivas en diferentes días y horarios para evitar interferencias en la fidelidad de los

datos tomados debido a condiciones climáticas y de cansancio. De estos datos se seleccionan aquellos en los que los factores externos influyen en menor medida, es decir, los recogidos con el sujeto descansado y de cuando las pruebas se realizaron en condiciones ambientales similares.

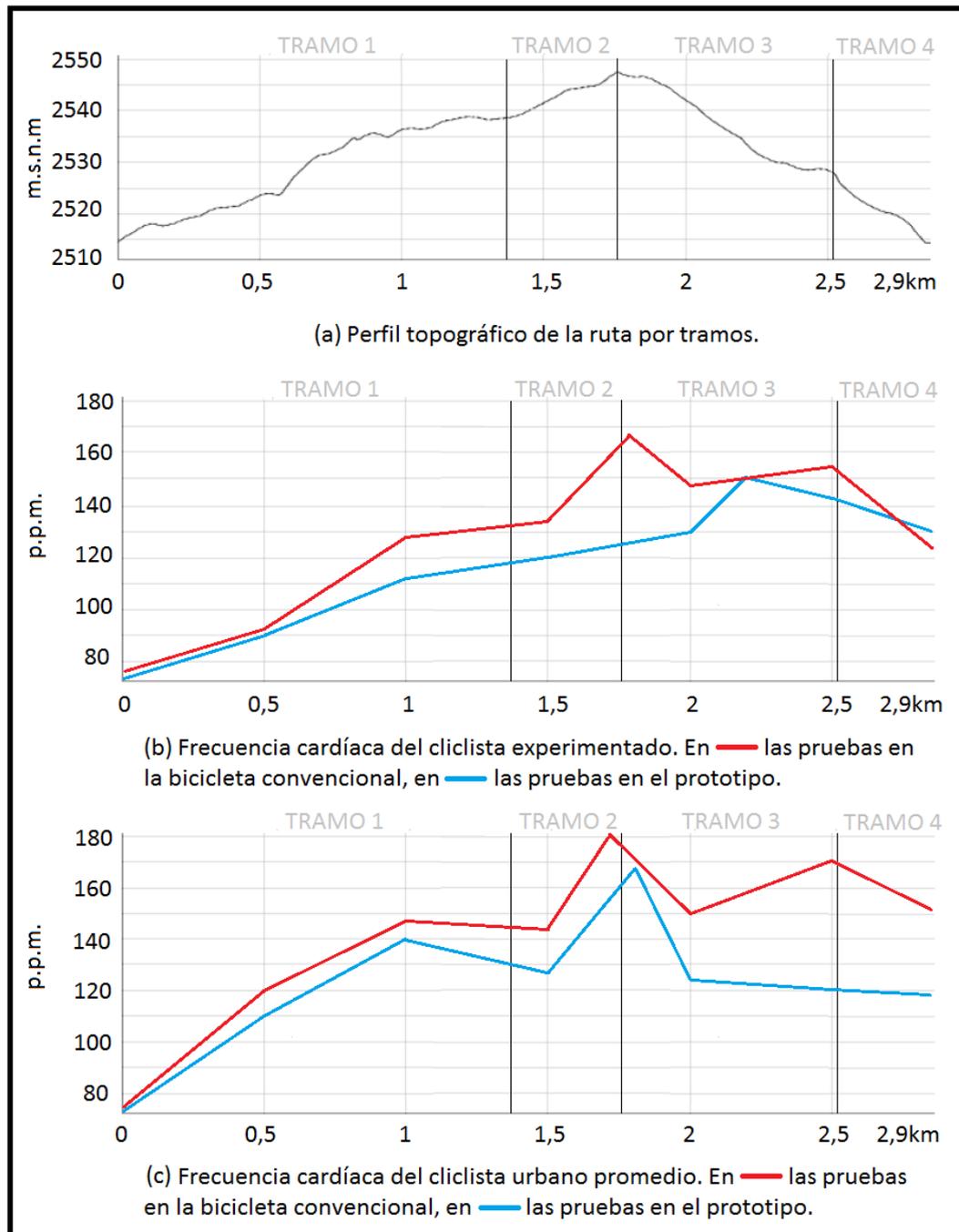


Figura 6.11. Gráficas del perfil topográfico de la ruta y de la frecuencia cardíaca de los ciclistas. Las pruebas se realizaron en la bicicleta convencional (en azul) y en la bicicleta prototipo (en rojo).

Se puede tener una valoración del esfuerzo que los ciclistas han realizado en cada uno de los tramos de la ruta midiendo la frecuencia cardíaca al manejar primero la bicicleta convencional y luego la bicicleta prototipo. En la figura 6.11 se observa que las pulsaciones por minuto de los sujetos cuando se utiliza la bicicleta prototipo son menores y se mantienen dentro de un rango moderado. Por otro lado, cuando los participantes han hecho uso de la bicicleta convencional, las pulsaciones alcanzan dos veces valores elevados y por tanto se evidencia que el individuo por momentos se ha esforzado innecesariamente. Este forzó más su cuerpo por mantener una relación de transmisión inadecuada para las condiciones de velocidad, condiciones del terreno y estado físico por las que atraviesa.

Tabla 6.1. Valores Obtenidos a partir de las pruebas del circuito de 4 tramos.

Datos Obtenidos	Sujeto 1 (Ciclista Experimentado)		Sujeto 2 (Ciclista Urbano Promedio)	
	Bicicleta Convencional	Bicicleta Prototipo	Bicicleta Convencional	Bicicleta Prototipo
Energía Consumida (calorías)	90	69	66	64
Velocidad Máxima (Km/h)	45.5	37.8	37.5	30.6
Velocidad Media (Km/h)	13.2	11.7	11.7	12.6
Frecuencia Cardíaca Máxima (p.p.m.)	165	150	180	169
Frecuencia Cardíaca Promedio (p.p.m.)	94	110	118	124
Ritmo Máximo (‘.”/Km)	1’18”	1’57”	1’36”	1’34”
Ritmo Promedio (‘.”/Km)	4’32”	5’55”	5’05”	4’44”

Es necesario considerar que la frecuencia cardíaca se tiene que relacionar con otros datos que también se adquirieron al momento de hacer las pruebas, tales como energía consumida, velocidad máxima, frecuencia cardíaca, velocidad promedio y ritmo; de esta manera se puede apreciar claramente si la frecuencia cardíaca ha disminuido por efecto del sistema propuesto.

La información recaudada se despliega en la tabla 6.1, donde al observar los ritmos cardíacos de ambos ciclistas usando los dos tipos de bicicletas, se revela claramente que sus latidos disminuyen al ocupar la bicicleta prototipo. Es cierto que también disminuye la velocidad de punta en el caso del Ciclista Experimentado, no obstante, esta particularidad demuestra la hipótesis de que el enfoque de un sistema de transmisión automático no sirve para que la bicicleta sea más rápida, sino para lograr un menor esfuerzo. Por otro lado, el ritmo, o tiempo promedio por kilómetro recorrido, mejora en el caso del Ciclista Urbano Promedio, lo que también pone de manifiesto que el sistema ayuda a un ciclista menos experimentado a aumentar su rendimiento con menor consumo de calorías y menor frecuencia cardíaca.

En la tabla, se puede además notar que el consumo de energía en calorías ha sido menor con el prototipo, y de ahí que se reducirán las posibilidades de que el usuario llegue a su destino con fatiga o mal aspecto por sudoración, requerimiento importante al considerar a la bicicleta como un vehículo de movilidad urbana.

Finalmente, este prototipo también ofrece un traslado más seguro y con el mínimo de variables que distraigan al ciclista y que puedan hacer que el usuario pueda ir planeando y organizando sus labores diarias mejorando el desempeño y evitando preocupaciones por efecto de cambios manuales.

CONCLUSIONES

- El sistema de transmisión automático para una bicicleta de uso urbano consiste en variar la relación de transmisión de la misma, con base en la medición de la velocidad a la que se desplaza un ciclista, la inclinación del terreno por el que atraviesa y el ritmo de giro de los pedales o cadencia. Este sistema mantiene un ritmo de cadencia constante y logra un menor esfuerzo por parte del sujeto, sin contar con que no se distrae ni pierde velocidad como ocurre con un sistema de transmisión convencional.
- Los datos de velocidad, inclinación y cadencia provenientes de sensores ubicados en distintos lugares de la bicicleta, van hacia un microcontrolador, donde estos se procesan y dan como resultado una relación de transmisión óptima a la salida y hacia la transmisión.
- Se comparó el prototipo desarrollado con una bicicleta convencional de transmisión manual. Para eso se pusieron a dos sujetos de diferentes condiciones físicas a cubrir una ruta determinada con ambas bicicletas y se midieron parámetros concernientes al esfuerzo realizado por el ciclista, como son la frecuencia cardíaca y la energía consumida. Los resultados demostraron que con la bicicleta prototipo existe un mayor rendimiento del ciclista, es decir, que se obtienen velocidades similares con un menor consumo calórico y menor ritmo cardíaco.
- La ruta escogida comprendió pendientes en subida y bajada, así como rectas con ligeras inclinaciones. De esa manera, se hace la prueba con amplio espectro de probabilidades de terreno que un ciclista urbano pueda afrontar. La bicicleta demostró ser más segura puesto que el piloto ya solo tiene que concentrarse en conducirla, y olvidarse de realizar cambios que posiblemente se den en medio de situaciones incómodas y riesgosas.

- Debido al acelerado avance de las tecnologías, el sistema desarrollado puede ser embebido directamente en un teléfono inteligente, donde con la ayuda de algunos accesorios destinados al deporte se puede hacer la medición de todas las variables de entrada. Los actuadores que intervienen en la relación de transmisión de la bicicleta pueden controlarse mediante protocolos de comunicación inalámbrica desde el teléfono. Además, pueden agregarse más variables que indiquen el estado físico del ciclista, o hacer identificación de datos en tiempo real, y de esa manera hacer una aproximación más correcta al valor de transmisión que más se necesite.

BIBLIOGRAFÍA

- Bachler, H. (7 de Julio de 2015). *Estados Unidos Patente n° US 9075076 B2*.
- Ballantine, R., & Grant, R. (1992). *El Gran Libro de la Bicicleta*. Madrid: Ediciones El País.
- Berto, F. J. (2009). *The Dancing Chain: History and Development of the Derailleur Bicycle*. San Francisco: Cycle Publishing/Van Der Plas Publications.
- Bertucci, W., Grappe, F., Girard, A., Betik, A., & Rouillon, J. (2005). Effects on the crank torque profile when changing pedalling cadence. *Journal of Biomechanics*(38), 1003-1010.
- Blied, L. (2013). *Nonlinear System Identification Control for Autonomous Robots*. Amsterdam: Delft Institute of Applied Mathematics (DIAM).
- Brown, S. (s.f.). *Gain Ratios: A new way of thinking about bicycle gears*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2015, de <http://www.adventurecycling.org/default/assets/resources/gainratios.pdf>
- Caldwell, G., Li, L., McCole, S., & Hagberg, J. (1998). Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *JOURNAL OF APPLIED BIOMECHANICS*(14), 245-259.
- Campo, A. B. (2013). PID Control Design. En *MATLAB – A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications – Volume 1* (págs. 1-12). Sao Paulo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.
- Chien, H.-C., & Tseng, C.-H. (2004). An automatic transmission for bicycles: a simulation. *International Journal of Industrial Ergonomics*(33), 123-132.
- Dao, T.-K., & Chen, C.-K. (2012). A study of bicycle dynamics via system identification approaches. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 35(7), 853-868.
- Daqui Loureiro, P. C., Sotomayor Paredes, V. A., & Suárez Luque, J. C. (2013). Identificación y diseño del controlador para un sistema de control de velocidad

tipo crucero en un vehículo. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Fallbrook Technologies Inc. (2012). *Nuvinci N360 Fact Sheet*. Texas.

Fallbrook Technologies Inc. (2012). *Nuvinci Planetary Analogy*. Texas.

Gevers, M. (s.f.). *A PERSONAL VIEW ON THE DEVELOPMENT OF SYSTEM IDENTIFICATION*. Lovain-La-Neuve: Center for Systems Engineering and Applied Mechanics (CESAME).

Gordon Wilson, D., & Rowland Whitt, F. (1982). *Bicycling Science*. Cambridge: The MIT Press.

He, Q., Wang, L. Y., & Yin, G. G. (2010). *System Identification Using Regular and Quantized Observations*. Londres: Springer.

Huang, Y., Liao, Q., Wei, S., & Guo, L. (2010). Dynamic Modeling and Analysis of a Front-Wheel Drive. *International Conference on Automation and Logistics*. Hong Kong.

InvenSense Inc. (2011). MPU-6000 and MPU-6050 Product Especification.

Isvan, O. (2014). *MEASURING CYCLING PERFORMANCE: Possibilities with Networked Instrumentation, and a New Tool for Analysis*.

Jones, D. H. (1970). The Stability of the Bicycle. *Physics Today*, 23(4), 34-40.

Keesman, K. J. (2011). *System Identification: An Introduction*. Londres: Springer.

Leirdal, S., & Ettema, G. (2011). The relationship between cadence, pedalling technique and gross. *Eur J Appl Physiol*, 111, 2885–2893.

Lin, S.-K., Yang, S.-W., & Cheng, C.-C. (2015). Design of an automatic shift control system with selflearning. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*.

Ljung, L. (1987). *SYSTEM IDENTIFICATION: Theory for the User*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Ljung, L. (2015). *System Identification Toolbox™ User's Guide*. Natick: The MathWorks, Inc.

- Lucía, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Med. Sci. Sports Exec.*, 33(8), 1361-1366.
- Melexis Microelectronic Integrated Systems. (2006). US5881 Data Sheet.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (s.f.). *Plan Nacional de Ciclovías*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2015, de <http://www.cicloviasecuador.gob.ec/>
- Real, J. S. (1988). *La Física de la Bicicleta*. Madrid: Ediciones de la Torre.
- Reed, R. (2013). A mathematical model to determine optimum cadence for an individual cyclist using power output, heart rate and cadence data collected in the field. Salford: University of Salford.
- Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., & Elso, J. (2014). Quantitative Feedback Control of Multiple Input Single. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014(136497), 17.
- Serway, R. A., & Jewett Jr., J. W. (2003). *Physics for Scientist and Engineers*. Boston: Brooks Cole.
- Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I.-B. (2009). *Process Identification and PID Control*. Singapur: IEEE Press.
- Temel, S., Yagli, S., & Goren, S. (s.f.). *P, PD, PI, PID CONTROLLERS*. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- The MathWorks, Inc. (2016). *Control System Toolbox™ User's Guide*. Natick: Mathworks.
- Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2003). *Theory of Machines and Mechanisms*. Londres: Oxford University Press.
- Xue, D., Chen, Y., & Atherton, D. P. (2007). PID Controller Design. En *Linear Feedback Control* (págs. 183-235). Society for Industrial and Applied Mathematics.