

MONOCICLO ELÉCTRICO ROBOTIZADO

Autor: Prieto-Renieblas González, Daniel.

Director: Muñoz Frías, José Daniel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Durante los últimos años se ha hecho una fuerte apuesta por los vehículos eléctricos, especialmente en ciudades para reducir polución, ruido, consumo energético y dinero. El Monociclo Eléctrico Robotizado (MER) pretende ser otro vehículo más dentro de este mercado emergente. Sin embargo, este no es el único objetivo de este proyecto. Se pretende que este vehículo sea también pequeño y ligero, aparte de ser incluso un vehículo recreativo dada su principal característica de tener una única rueda, lo cual lo hace atractivo a los ojos de los más aventureros. Con su reducido tamaño se pretenden dos objetivos paralelos. Por un lado, que sea fácil de aparcar o guardar en el propio domicilio. Por otro lado, si se compara el rendimiento energético entre transportar a una persona en un coche y transportar a una persona en el MER, claramente la segunda opción es mucho mejor por la diferencia de peso entre los vehículos. Hay que señalar también que la inmensa mayoría de los trayectos urbanos son inferiores a 10 km, y para aquellos trayectos que son demasiado largos como para ir a pie realmente no parece compensar usar el coche, por lo que un vehículo eléctrico compacto, ligero, barato y de fácil recarga parece ser una buena solución para los problemas de tráfico expuestos.

Así pues, el objetivo de este proyecto consiste en diseñar y fabricar un sistema de péndulo invertido controlado por un microprocesador que tome datos de inclinación con respecto a la vertical, su velocidad de inclinación y velocidad lineal de la rueda para actuar sobre el motor que hace que se desplace el sistema. Se pretende dotar al prototipo de una pantalla, pulsadores y un altavoz para conseguir establecer una comunicación con el usuario y así incluso personalizar varios aspectos del comportamiento del sistema, como por ejemplo la velocidad de respuesta, variando así el tiempo que tarda el péndulo invertido en recuperar la posición vertical.

Otro objetivo importante de este proyecto es llevar a cabo una idea desde el diseño conceptual hasta su completa implementación física en un prototipo funcional. Esto ha implicado que a lo largo de la fabricación del prototipo se ha recurrido a iteraciones en el diseño para hacerlo más eficiente con los recursos disponibles al comprobar que algunas ideas del diseño original tenían una alternativa más barata, sencilla o que simplemente tenía un mejor resultado, como por ejemplo la anchura de los apoyos para las piernas o la eliminación de unos ruedines para dotar al monociclo de una mayor estabilidad lateral para usuarios con poca experiencia en su uso.

La idea de crear un vehículo basado en un péndulo invertido no es nada nuevo. El ejemplo más conocido es el Segway, un vehículo unipersonal de dos ruedas paralelas que ofrece estabilidad lateral por el mero hecho de tener dos puntos de apoyo, además de la estabilidad en dirección de la marcha que ofrece el sistema de control. Sin

embargo, este vehículo es caro y bastante pesado, por lo que se ha querido investigar opciones que eviten estos problemas.

Otros productos más parecidos al MER, vehículos de una única rueda y basados en el péndulo invertido son el scooter eléctrico de una rueda de la empresa RYNO, el monociclo eléctrico autoestabilizado omnidireccional de Honda (conocido como Honda U3-X), el Solowheel o Uniciclo Autobalanceado de Focus Designs. Este último es lo más parecido que existe en el mercado al MER, ya que consiste simplemente en un sillín, una rueda, una horquilla similar a la de una bicicleta, unos apoya pies y, de forma oculta y elegante, baterías y microprocesador. Todos estos productos alcanzan en mayor o menor medida los objetivos fijados de este proyecto, pero hay varios aspectos que no cubren, como por ejemplo que no existe la opción de personalización por parte del usuario de cambiar el comportamiento del sistema o que no existe comunicación con él. Además, aunque ya existieran productos que permitiesen estas características, sigue siendo interesante como proyecto fin de carrera abordar un problema como el citado y llevarlo a cabo desde cero hasta la creación de un prototipo.

Metodología

El proyecto está dividido en tres fases. En la primera fase se ha diseñado en Solid Edge los elementos que componen el MER para poder analizar los momentos de inercia, teniendo en cuenta la geometría y pesos de las distintas piezas. Estos momentos de inercia son 0,327 kg/m² para la rueda y 110,9 kg/m² para el conjunto del resto de la estructura más la persona que va montada sobre ella. En paralelo, se ha fabricado un prototipo a escala real para poder ser operado por una persona adulta. Esto se ha hecho así para poder tener en cuenta los pesos de las piezas iterando en el diseño hasta conseguir un prototipo que satisficiera unos mínimos de calidad y evitara complicaciones excesivas en el diseño principal. El prototipo cuenta con bastantes piezas, siendo las más importantes: un motor Magic Pie 3 radiado en una rueda de 20'' con su controlador programable y sistema de freno regenerativo, 12 células de tipo LiFePO₄ 3,2 V y 10 A*hora que componen las baterías, una horquilla de bicicleta para montar el motor, un sistema de frenado mecánico (el freno de mano), un microprocesador Arduino Mega 2560 con su placa de prototipado, una pantalla Phi-2 LCD, un sensor MPU6050 (acelerómetro y giróscopo) y un sensor de velocidad.

En la segunda fase se ha modelado matemáticamente el sistema para obtener una matriz que explique físicamente como responde la planta ante un cierto par de velocidad. Aparte de analizar la planta, también es necesario conocer el comportamiento del actuador. Sin embargo, al usar un motor con una información muy limitada y sin la posibilidad de realizar ensayos típicos de las máquinas eléctricas, ya que no se puede separar el controlador del motor sin romperlo. Esto ha supuesto que el modelado del actuador se ha tomado como si fuera ideal, que es erróneo, pero tomar un valor aleatorio podría ser peor. Se han creado dos sistemas de control con dos tipos de respuesta diferenciados por su velocidad de respuesta. Estos dos sistemas corresponden a dos modos de funcionamiento, llamados “normal” y “sport”, para que puedan ser seleccionados por el usuario según su gusto.

En la tercera y última fase se han creado varios sistemas de control por realimentación de estado con distintos tipos de respuesta diferenciados por su velocidad de respuesta.

Estos sistemas también difieren en la cantidad de lazos de realimentación, ya que uno de los tipos tiene un control tipo PI adicional, mientras que el control sencillo se limita a multiplicar el vector de estado por una serie de ganancias. Dentro de cada grado de complejidad del proyecto existen dos tipos de control distintos, denominados “normal” y “sport”, para que puedan ser seleccionados por el usuario según su gusto. El modo “sport” tiene una ω_n que duplica a la del modo “normal”. Esto implica que a la hora de la conducción la sensación es de mayor dureza y de respuesta más rápida que en modo “normal”, aunque está más limitada ante ángulos máximos de inclinación antes de que saturate el mando. Esto se puede apreciar en la Figura 1.

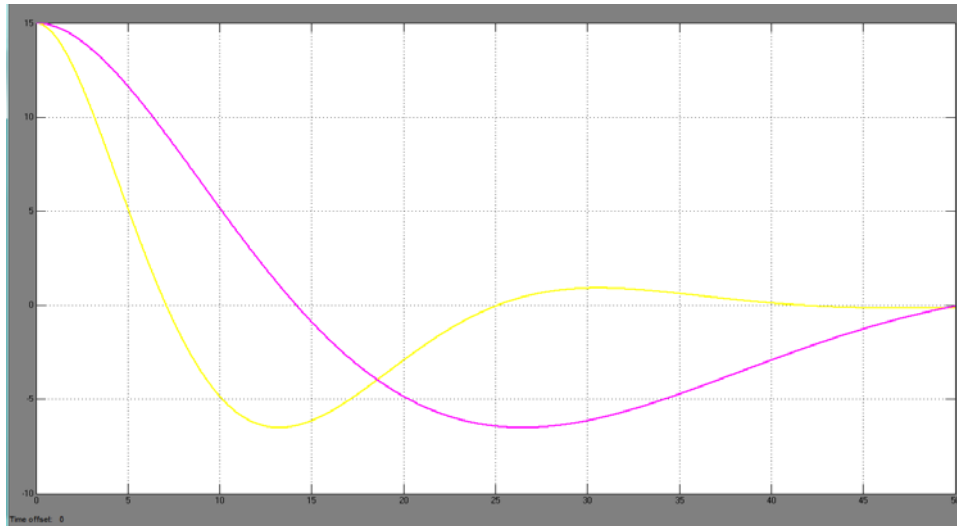


Figura 1: Ángulos de inclinación simulados en modo normal (rosa) y sport (amarillo)

Adicionalmente, en esta fase se ha codificado un programa que puede ser volcado al microprocesador Arduino Mega que controla el MER. Dicho programa se encarga de leer las entradas del acelerómetro y sensor de velocidad y, aplicando filtros y cálculos a través de las ganancias correspondientes, obtiene un valor de mando que es enviado al motor.

Resultados

Por desgracia, el MER no llegó a funcionar como se esperaba. Surgieron problemas de programación que afectaban principalmente al convertidor analógico-digital, por lo que no fue posible actuar sobre el mando. Un ejemplo de lo leído y procesado a través del acelerómetro se muestra en la Figura 2. El objetivo de la figura es mostrar la evolución del ángulo de inclinación (en radianes) desde reposo, luego con inclinación posterior (variándola suavemente) e inclinación anterior. Pese a que el resultado es algo ruidoso, incluso filtrándolo, los números tienen un orden de magnitud correcto y parece que el algoritmo de cálculo angular es correcto para ángulos pequeños.

El DAC, a su vez, no conseguía dar un valor analógico a su salida. Pese a modificar los campos CS y WR necesarios para su funcionamiento, aparte de los datos de entrada, la salida quedaba siempre a 0 V, por lo que se sospecha que exista algún error en la soldadura de los pines.

El sensor de velocidad sí funcionó, por lo que sería posible leer su valor y combinarlo con la información del acelerómetro para obtener un valor del mando.

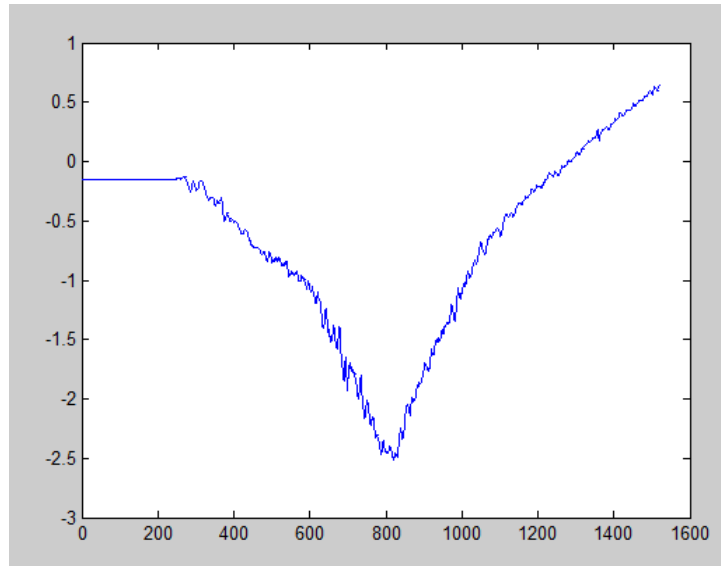


Figura 2: Ángulo de inclinación procesado a partir de los datos del acelerómetro

Sin embargo, el acelerador que tuvo que ser usado para esto fue el acelerador de puño del kit de fábrica del motor y, al no ser seguro usarlo estando montado sobre el MER, se tuvo que sujetar la estructura durante el ensayo de velocidad, por lo que los valores del acelerómetro no fueron usados. Un ejemplo de los valores de la velocidad, en rad/s, puede ser observado en la Figura 3, que procede de un ensayo en el que se aceleró y deceleró suavemente y luego se aceleró rápidamente. Como se puede ver, el sensor funcionó, pero tampoco como debería. La mayor parte de las veces el puerto lee un 0, por lo que no es viable usar un paso bajo para filtrar la entrada puesto que no existe modo alguno de saber cuántos ceros se leerán antes de obtener un valor no nulo, y el valor de la velocidad disminuiría mucho.

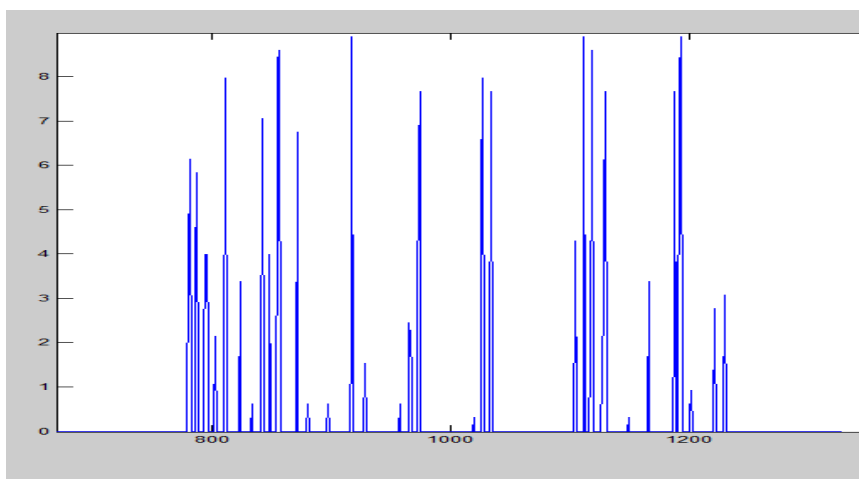


Figura 3: Valores del sensor de velocidad durante un ensayo

Conclusiones

La principal conclusión que se puede obtener de este proyecto es que cualquier tipo de proyecto con una mínima complejidad técnica puede consumir una gran cantidad de tiempo a priori no previsible. En el caso del Segway, con sus similitudes y sus diferencias con el MER, fueron necesarios 100 ingenieros durante 10 años para desarrollar dicho vehículo.

Por otro lado, por muy ambicioso que haya sido este proyecto y pese a no haber sido acabado, la experiencia de diseñarlo, fabricarlo, buscar proveedores, soldar la placa, crear el modelado, diseñar el control y programar ha sido muy enriquecedora; y pese a que no haya funcionado correctamente, no es motivo de desánimo sino la oportunidad de poder conseguirlo en el futuro.

Este proyecto también ha sido una clara muestra de que todo proyecto de esta naturaleza (creación de prototipos electromecánicos) tiene una rama mecánica, una de electrónica analógica y una de informática. Unir todos los conocimientos específicos y dificultades resulta muy complejo, siendo necesaria una división y especialización del trabajo, además de una coordinación extraordinaria entre las diferentes fases.

ROBOTIC ELECTRIC UNICYCLE

Introduction

In recent years there has been a strong commitment to electric vehicles, especially in cities in order to reduce pollution, noise, energy and money. The Robotic Electric Unicycle (REU) is intended to be another vehicle more within this emerging market. However, this is not the only objective of this project. It is intended that this vehicle is also small and light, apart from being even a recreational vehicle because of its main feature of having a single wheel, which makes it attractive in the eyes of the more adventurous. With its small size two objectives are intended. On one hand, it is easy to park or keep at home. On the other hand, if you compare the energy efficiency between transporting a person in a car and transporting a person in the REU, clearly the second option is much better because of the weight difference between the vehicles. It is also noted that the vast majority of urban trips are less than 10 km, and for those journeys that are too long to walk, it really does not seem to compensate using the car, so that an electric vehicle which is compact, lightweight, inexpensive and easily rechargeable seems to be a good solution for the traffic problems exposed.

Thus, the objective of this project is to design and manufacture an inverted pendulum system controlled by a microprocessor that takes the tilt angle data, its inclination and speed of the wheel linear velocity and to act on the motor that moves the system. The prototype will be provided of a screen, buttons and a loudspeaker for establishing communication with the user and thus even customize various aspects of its behavior, such as response speed, thereby varying the time for the inverted pendulum to recover the upright position.

Another important objective of this project is to carry out an idea from concept design until complete physical implementation in a working prototype. This has meant that

over the manufacturing of prototype iterations have been made in the design to make it more efficient with the resources available, as some ideas of the original design had a cheaper or simpler alternative, or just had a better outcome, such as decreasing the width of the supports for the legs or removing the unicycle training wheels that provided lateral stability (used for users with little experience in its use) because they were too weak.

The idea of creating a vehicle based on an inverted pendulum is not new. The best known example is the Segway, a vehicle with two parallel wheels that provides lateral stability for the mere fact of having two points of support, and stability in driving direction provided by the control system. However, this vehicle is expensive and quite heavy, so investigating options to avoid these problems was another objective of this project.

Other products similar to MER are single wheeled vehicles also based on the inverted pendulum, like a one-wheeled electric scooter from the company RYNO, the self-stabilizing electric omnidirectional unicycle from Honda (known as Honda U3-X), the Solowheel or Self-Balancing Unicycle of Focus Designs. The latter is the closest thing on the market to REU, since it consists simply of a saddle, a wheel, a fork similar to that of a bicycle, a footrest and a concealed and elegant batteries, and microprocessor. All these products reach in a greater or lesser extent the objectives of this project, but there are several aspects that they do not cover, such as that there is the option of customization by the user to change the behavior of the system or that there is no communication with him. Furthermore, although there are already products that would enable these features, it is still interesting as a final project to address a problem like the one summoned and pull it from zero to prototyping.

Methodology

The project is divided into three phases. In the first stage the elements composing the MER are designed in Solid Edge to analyze the moments of inertia, taking into account the geometry and weight of the individual parts. The moment of inertia is 0.327 kg/m² for the wheel and 110.9 kg/m² for the rest of the structure and the person mounted on it. In parallel, a full-scale prototype was produced to be operated by an adult. This was done in order to take into account the weights of the real parts by iterating the design to achieve a prototype that met a minimum quality and avoided excessive complications in the main design. The prototype has many parts, of which the most important are: a Magic Pie 3 electric motor radiated on a 20" wheel with a programmable controller and regenerative braking system, 12 LiFePO₄ cells of 3.2 V and 10 A * hour batteries, a bicycle fork to mount the motor on, a mechanical braking system (handbrake), Arduino Mega 2560 microprocessor, a prototyping board, a Phi-2 LCD screen, a MPU6050 sensor (accelerometer and gyroscope) and a speed sensor.

In the second phase, the system was mathematically modeled to obtain a matrix that explains physically how the plant responds to a certain pair of speed. Apart from analyzing the plant, it is also necessary to know the behavior of the actuator. However, using a motor with very limited information without the possibility of testing typical electrical machines, since one can not separate the motor controller without breaking, was problematic at this stage. This has meant that the modeling of the actuator is taken as if it were perfect, it is wrong, but taking a random value could be worse. Two control

systems have been created with two types of response differentiated by their response speed. These two systems are two modes of operation, called "normal" and "sport", so they can be selected by the user according to their taste.

In the third and final phase several control systems will be created with state feedback responses differentiated by their response speed. These systems also differ in the amount of feedback loops, as one of the types has an additional PI control, while the basic control simply multiplies the state vector by a series of gains. Within each level of complexity of the project there are two different control types, called "normal" and "sport", so they can be selected by the user according to their taste. The "sport" mode has a ω_n doubling "normal". This means that the driving feel is of greater hardness and faster response than in "normal" mode, but is more limited to maximum angles of inclination before saturating the motor's limits. These modes can be seen in Figure 1.

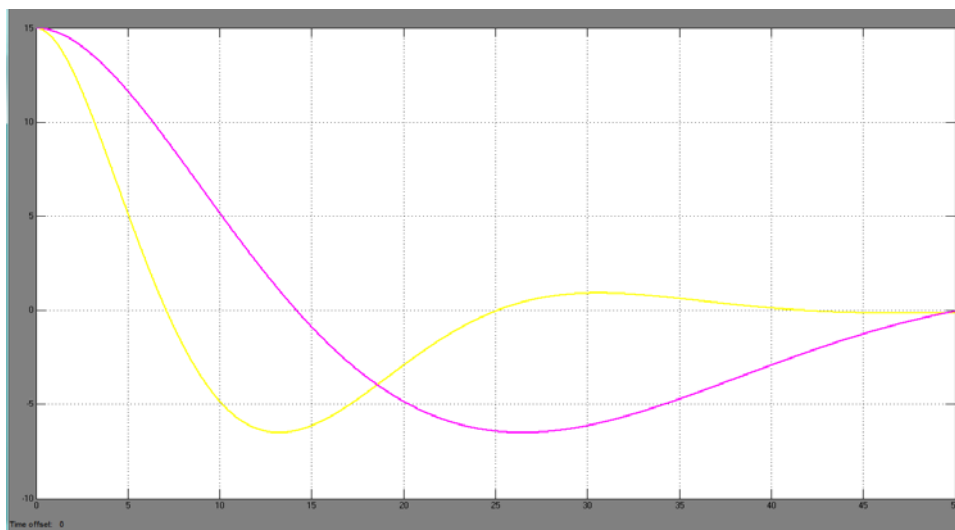


Figure 1: Tilt angles simulated in normal (pink) and sport (yellow)

Additionally, in this phase a program was coded that can be turned to the microprocessor. This program is responsible for reading the inputs from the accelerometer and speed sensor, and applying filters and calculations by corresponding gains, and a value of command is sent to the motor.

Results

Unfortunately, the MER did not work as expected. Scheduling problems arose mainly affecting the analog-digital converter, so it was not possible to act on the command. An example of reading and processing the accelerometer values is shown in Figure 2. The purpose of the figure is to show the evolution of the tilt angle (in radians) from rest, then with posterior tilt (varying it smoothly) and anterior tilt. Although the result is somewhat noisy, even filtering it, the numbers have a right order of magnitude and it seems that the angle calculation algorithm is correct for small angles. The DAC, in turn, could not give an analog value to its output. Although CS and WR fields were modified, apart from the input data, the output was always at 0 V, so it is suspected that an error exists in the some of the pins.

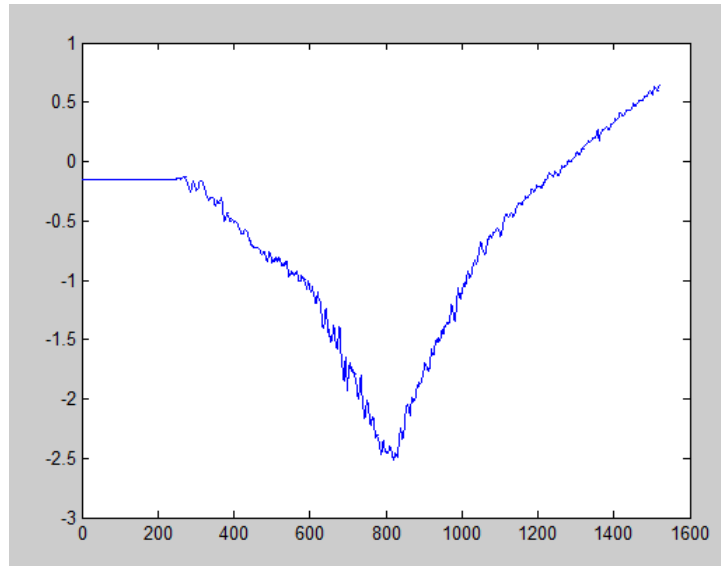


Figure 2: inclination angle processed from accelerometer data

The speed sensor did work, and it was possible to read its value and combine it with information from the accelerometer to obtain a value of the control.

However, the gas that had to be used for this was the the one from the original kit and, not being safe to use it while mounted on the REU, the structure had to be lifted during the test, so accelerometer values were not used. An example of the values of speed in rad / s, can be observed in Figure 3, which comes from a test in which the motor was smoothly accelerated and decelerated and then accelerated rapidly. As it is possible to see, the sensor worked, but not as it should. Most of the time the port reads a 0, so it is not feasible to use a low-pass filter input since there is no way of knowing how many zeros will be read before obtaining a nonzero value, and the value of the speed would decrease a lot.

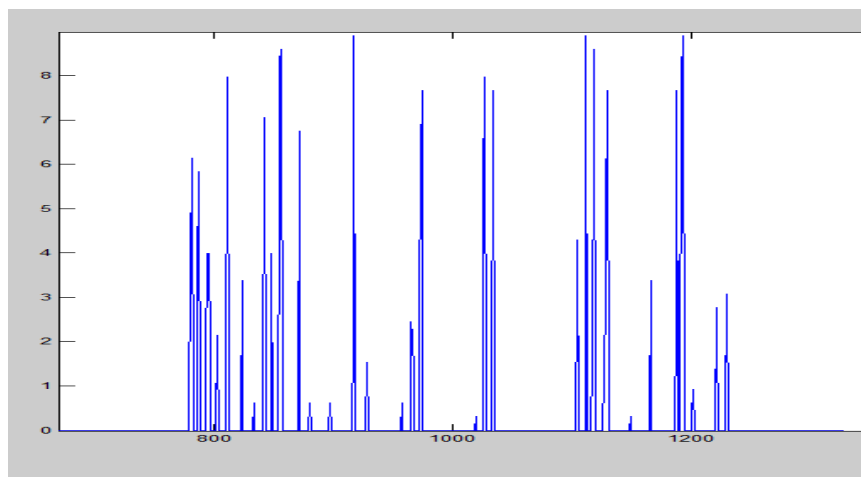


Figure 3: Speed sensor values during a test

Conclusions

The main conclusion that can be obtained from this project is that any project with minimal technical complexity can consume a huge amount of time. In the case of the Segway, with its similarities and differences in comparison with the REU, it took 100 engineers for 10 years to develop the project.

On the other hand, however ambitious this project has been and despite not having been finished, the experience from designing, building, finding suppliers, welding the prototype plate, creating the mathematical model, control and program design has been very enriching, and despite it did not work properly, it is not a cause for discouragement but the opportunity to finish it properly in the future.

This project has also been a clear sign that any project of this scope (electromechanical prototyping) has a mechanical, an analog electronics and computer fields, so that gathering together all the knowledge and bypassing all the difficulties is very complex, so that there is a need for a division and specialization of labor, plus extraordinary coordination between the different phases.