



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Universidad Politécnica de Valencia

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Control por eventos para la estabilización del péndulo lineal

Proyecto Final de Carrera

AUTOR:

Marco Contreras Gallardo

DIRECTOR:

Vicente Casanova Calvo

Valencia, a 22 de Julio de 2015

A María Argentina

Índice General

MEMORIA.....	7
PLIEGO DE CONDICIONES.....	125
PRESUPUESTO.....	139

MEMORIA

Tabla de contenido de la memoria

Índice de Figuras.....	12
Índice de Tablas	17
1. Introducción.....	19
1.1 Sistemas de control.....	19
1.1.1 Introducción	19
1.1.2 Conceptos básicos.....	19
1.1.3 Ejemplo de sistemas de control	23
1.1.4 Diseño de los sistemas de control	26
1.2 Sistemas de control basados en red	26
1.3 Sistemas de control basados en eventos	28
2. Péndulo lineal	30
2.1 Introducción	30
2.2 Péndulo.....	30
2.3 Aplicaciones	33
2.4 Parámetros del sistema	35
2.5 Modelo del péndulo lineal.....	37
2.5.1 Modelo matemático	38
2.5.2 Análisis dinámico de Lagrange	39
2.5.3 Linealización y Función de Transferencia (fdt).....	44
2.6 Estructura de control	46
2.6.1 Regulador Lineal-Cuadrático (LQR).....	46
2.6.2 Ganancias del sistema.....	47
3. Implementación del modelo matemático.....	48
3.1 Matlab y Simulink.....	49
3.2 Modelo en Simulink.....	49

3.2.1	Bloque de referencia de entrada al sistema.....	51
3.2.2	Bloque de control de la posición del carro	52
3.2.3	Bloque de control del ángulo del péndulo	54
3.2.4	Bloque del sistema péndulo-carro.....	55
3.3	Ajuste experimental del regulador PID.....	58
3.4	Obtención del periodo de muestreo (T) óptimo	61
4.	Objetivo del proyecto	66
4.1	Antecedentes y Trabajos Previos	67
4.2	El problema del péndulo	68
4.3	Planteamiento de soluciones alternativas.....	69
4.4	Justificación de la solución adoptada.....	70
4.4.1	Justificación de la elección del péndulo lineal	70
4.4.2	Justificación de la elección del control por eventos	71
5.	Descripción detallada de la solución adoptada.....	72
5.1	Diseño del sistema.....	74
5.1.1	Cálculo de la tolerancia	74
5.1.2	Error acumulado de la posición del carro	75
5.1.3	Error acumulado del ángulo del péndulo.....	76
5.1.4	Realimentación de la posición del carro.....	77
5.1.5	Realimentación del ángulo del péndulo.....	79
6.	Resultados obtenidos	79
6.1	Realimentación de la posición del carro	80
6.2	Controlando además el balanceo del péndulo	84
6.3	Análisis del comportamiento de la planta	88
6.3.1	Realimentación de la posición del carro.....	89
6.3.2	Realimentación del ángulo del péndulo.....	97
6.4	Análisis de los umbrales combinados	104

7.	Problemas y soluciones	112
7.1	Zona muerta.....	112
7.2	Parada de emergencia.....	116
8.	Conclusiones.....	118
8.1	Posible aplicación industrial.....	119
8.2	Líneas futuras de trabajo	120
9.	Bibliografía.....	121

Índice de Figuras

Figura 1.1: Representación de un sistema de control en diagrama de bloques	20
Figura 1.2: Sistema de control de velocidad	23
Figura 1.3: Sistema de control de temperatura.....	25
Figura 1.4: Sistema de control de un robot	25
Figura 1.5: Sistema de control basado en red.....	27
Figura 2.1: Péndulo lineal en un carro [5].....	30
Figura 2.2: Péndulo rotatorio de Furuta [5].....	32
Figura 2.3: Grúa transportando madera [12]	33
Figura 2.4: Segway [14]	34
Figura 2.5: Configuración péndulo-carro [11]	34
Figura 2.6: Péndulo ensamblado [16].....	37
Figura 2.7: Diagrama simplificado del sistema del péndulo invertido [2].....	39
Figura 2.8: Gráficas (LdR) y diagramas de Bode de polos y ceros con el sistema linealizado alrededor de $\theta = 0$ (<i>péndulo hacia abajo</i>) [18].....	46
Figura 3.1: Esquema general del sistema en Simulink.....	50
Figura 3.2: Bloque de referencia de la trayectoria del carro	51
Figura 3.3: Parámetros del bloque <i>Pulse Generator</i>	51
Figura 3.4: Bloque de control para el seguimiento de la referencia del carro.....	52
Figura 3.5: Obtención de nuestro Filtro de Butterworth	53
Figura 3.6: Diagrama de Bode de nuestro Filtro de Butterworth.....	53
Figura 3.7: Bloque de control del balanceo del péndulo	54
Figura 3.8: Captura de pantalla del osciloscopio <i>péndulo y carro</i>	55
Figura 3.9: Bloque <i>ADI</i> con sus salidas Y_p e Y_c	55
Figura 3.10: Parámetros de los Conversores AD (Análogo-Digital)	56
Figura 3.11: Bloque <i>DA</i> con sus entradas $DA1$ y $DA2$	56

Figura 3.12: Interior del bloque <i>DA</i> y parámetros del Conversor DA (Digital-Analógico)	57
Figura 3.13: Configuración para conseguir el tiempo “pseudo-real” y parámetros de su bloque	58
Figura 3.14: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.225$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.115$	59
Figura 3.15: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.2$ $K_i = 0.03$ $K_d = 0.1$	60
Figura 3.16: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.23$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.115$	60
Figura 3.17: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.23$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.105$	61
Figura 3.18: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.01$ segundos.....	62
Figura 3.19: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.02$ segundos.....	62
Figura 3.20: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.02$ segundos.....	63
Figura 3.21: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.05$ segundos.....	63
Figura 3.22: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.01$ segundos.....	64
Figura 3.23: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.02$ segundos.....	64
Figura 3.24: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.02$ segundos.....	65
Figura 3.25: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.05$ segundos.....	65
Figura 4.1: Péndulo Feedback [23]	67
Figura 4.2: Los tres problemas de control presentados [11]	68
Figura 5.1: Modelo utilizado en el proyecto	73
Figura 5.2: Bloques para definir la tolerancia	74
Figura 5.3: Parámetros de los bloques <i>Step</i>	74
Figura 5.4: Bloques para definir el error acumulado de la posición del carro	75
Figura 5.5: Bloques para definir el error acumulado de la posición del carro	76
Figura 5.6: Bloques para definir el error acumulado del ángulo del péndulo	77
Figura 5.7: Bloques para definir el error acumulado del ángulo del péndulo	77
Figura 5.8: Bloques para definir el ancho de banda consumido.....	78

Figura 5.9: Bloques para restar los 20 s. iniciales y así definir el tiempo total de ejecución 79

Figura 6.1: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro ... 80

Figura 6.2: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo 80

Figura 6.3: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro ... 81

Figura 6.4: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo 81

Figura 6.5: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro ... 82

Figura 6.6: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo 82

Figura 6.7: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro ... 83

Figura 6.8: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo 83

Figura 6.9: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro ... 84

Figura 6.10: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo 84

Figura 6.11: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro . 85

Figura 6.12: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo 85

Figura 6.13: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro . 86

Figura 6.14: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo 86

Figura 6.15: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro . 87

Figura 6.16: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo 87

Figura 6.17: Error relativo de la posición del carro usando el control por eventos 89

Figura 6.18: Ancho de banda relativo en la posición del carro usando el control por eventos 90

Figura 6.19: Error relativo frente al ancho de banda consumido en la posición del carro usando el control por eventos 91

Figura 6.20: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0$ 92

Figura 6.21: Ángulo del péndulo con $umbral = 0$	92
Figura 6.22: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.03$	93
Figura 6.23: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.03$	93
Figura 6.24: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.08$	94
Figura 6.25: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.08$	94
Figura 6.26: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.1$	95
Figura 6.27: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.1$	95
Figura 6.28: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.2$	96
Figura 6.29: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.2$	96
Figura 6.30: Error relativo del ángulo del péndulo usando el control por eventos	97
Figura 6.31: Ancho de banda relativo en el ángulo del péndulo usando el control por eventos	98
Figura 6.32: Error relativo frente al ancho de banda consumido en el ángulo del péndulo usando el control por eventos	99
Figura 6.33: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.06$	100
Figura 6.34: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.06$	100
Figura 6.35: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.1$	101
Figura 6.36: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.1$	101
Figura 6.37: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.2$	102
Figura 6.38: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.2$	102
Figura 6.39: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.3$	103
Figura 6.40: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.3$	103
Figura 6.41: Factor I en la realimentación de la posición del carro	104
Figura 6.42: Factor I en la realimentación del ángulo del péndulo	105

Figura 6.43: Error relativo frente al ancho de banda consumido usando el control por eventos mediante umbrales combinados	108
Figura 6.44: Trayectoria del carro frente a la referencia con <i>combinación de umbrales</i> = 0.06 / 0.08	109
Figura 6.45: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con <i>combinación de umbrales</i> = 0.06 / 0.08	109
Figura 6.46: Trayectoria del carro frente a la referencia con <i>combinación de umbrales</i> = 0.07 / 0.1	110
Figura 6.47: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con <i>combinación de umbrales</i> = 0.07 / 0.1	110
Figura 6.48: Trayectoria del carro frente a la referencia con <i>combinación de umbrales</i> = 0.08 / 0.1	111
Figura 6.49: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con <i>combinación de umbrales</i> = 0.08 / 0.1	111
Figura 7.1: Bloques para identificar la zona muerta del motor	112
Figura 7.3: Oscilaciones del carro alrededor del valor final amplificadas por las minúsculas variaciones del ángulo del péndulo	113
Figura 7.4: Minúsculas variaciones del ángulo del péndulo que provocan un mal posicionamiento del sistema.....	114
Figura 7.5: Bloques y parámetros para definir la zona muerta del ángulo.....	114
Figura 7.6: Oscilaciones del carro minimizadas gracias a la zona muerta impuesta al péndulo	115
Figura 7.7: Variaciones del ángulo minimizadas gracias a la zona muerta impuesta al péndulo	115
Figura 7.8: Bloques para definir la parada de emergencia y parámetros del bloque Sample & Hold.....	116
Figura 7.9: Trayectoria del carro frente a la referencia cuando activamos el pulsador de parada.....	117
Figura 7.10: Control del ángulo del péndulo en el modo parada de emergencia .	117

Figura 7.11: Bloques que definen el subsistema *STOP!* Modifican la anterior parada de ejecución 118

Índice de Tablas

Tabla 1: Parámetros del sistema [15]	36
Tabla 2: Error acumulado de la posición del carro usando el control por eventos.	89
Tabla 3: Ancho de banda consumido en la posición del carro usando el control por eventos	90
Tabla 4: Error acumulado del ángulo del péndulo usando el control por eventos .	97
Tabla 5: Ancho de banda consumido en el ángulo del péndulo usando el control por eventos	98
Tabla 6: Errores acumulados usando el control por eventos mediante umbrales combinados	106
Tabla 7: Ancho de banda consumido usando el control por eventos mediante umbrales combinados	107

1. Introducción

1.1 Sistemas de control

1.1.1 Introducción

En las últimas décadas, los sistemas de control automático han adoptado un papel muy importante en el desarrollo y avance de la civilización y tecnología modernas. A nivel doméstico, los controles automáticos en los sistemas de calefacción y aire acondicionado regulan la temperatura y la humedad de los hogares para conseguir el ambiente deseado en cada momento.

Lavadoras, planchas, lavavajillas, cámaras de vídeo, etc. son otros ejemplos de sistemas de control que podemos encontrar en el hogar. En la industria, los sistemas de control automáticos se encuentran en numerosas aplicaciones, tales como el control de presión, viscosidad, humedad, temperatura y flujo de los procesos industriales. También son esenciales en el control de calidad de productos manufacturados, en el control de stock de cualquier almacén, en la automatización y control de máquinas-herramientas, en los sistemas modernos de tecnología espacial y de armas (guiado de proyectiles), en los sistemas de transporte, en los de computadores y robots, etc.

En definitiva, los sistemas de control se usan para la hacer la vida más fácil y evitar las tareas rutinarias y que repercutan riesgo para la salud. Su implementación ha ayudado a la fabricación de productos disminuyendo los costes, utilizando menos recursos con un menor consumo de energía y por lo tanto con una menor contaminación ambiental. Se trata de diseñar sistemas eficaces teniendo en cuenta siempre la eficiencia como premisa fundamental [1].

1.1.2 Conceptos básicos

La teoría de control estudia el comportamiento y respuesta de los sistemas dinámicos mediante diagramas de bloques, que son una representación gráfica y simplificada del sistema, con sus correspondientes entradas y salidas.

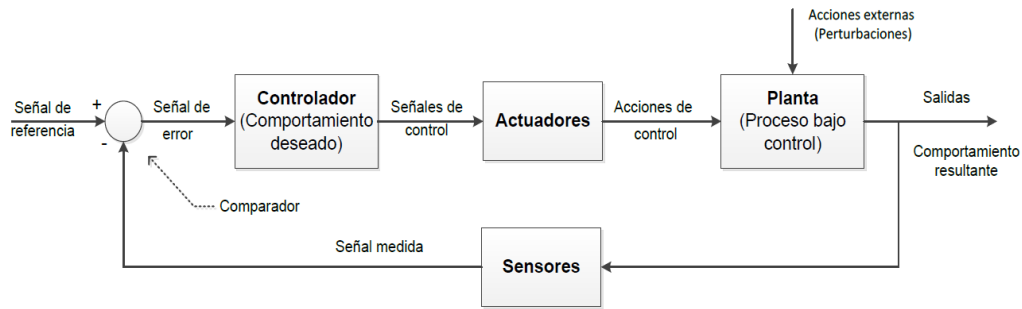


Figura 1.1: Representación de un sistema de control en diagrama de bloques

Generalmente, la entrada del sistema es una señal analógica o digital que se capta en algún punto del sistema.

Los bloques intermedios representan los diferentes componentes de un sistema de control y están conectados de un modo que caracteriza sus funciones dentro del sistema.

Definiciones en el campo de la Teoría de Control:

Variable controlada y señal de control o variable manipulada. La variable controlada es una cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición modificada por el controlador, a fin de afectar a la variable controlada. Normalmente la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema, y aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al valor deseado.

Planta. Una planta puede ser un equipo o una parte del mismo, tal vez un conjunto de elementos que funciona conjuntamente, y cuyo objetivo es realizar una operación determinada. Se puede llamar planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un horno de calefacción, un dispositivo mecánico, un reactor químico o un vehículo espacial).

Proceso. Consiste en una operación o desarrollo natural, caracterizado por una serie de cambios graduales, progresivamente continuos, que se suceden unos a otros de un modo relativamente fijo, y que tienden a un determinado resultado o final; o a una operación voluntaria o artificial progresivamente continua, que consiste en una serie de acciones controladas o movimientos dirigidos sistemáticamente hacia determinado resultado o fin.

En otras palabras, un proceso se refiere a cualquier operación que deba controlarse. Ejemplos de ello son los procesos químicos, económicos o biológicos.

Sistema. Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Perturbación. Es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se le denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada.

Control en lazo abierto. Sistemas en los cuales la salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control). En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto la salida ni se mide ni se realimenta para compararla con la entrada. Por tanto, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija. Así, la precisión del sistema depende de la calibración y en presencia de perturbaciones, no cumple su función asignada. Un ejemplo práctico lo constituye una lavadora: el remojo, lavado y centrifugado operan con una base de tiempo; la máquina no mide la señal de salida, es decir, la limpieza de la ropa.

Control realimentado. Es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, realizándolo sobre la base de esta diferencia. Con esto se logra que el sistema de control sea más adaptable a cualquier cambio no previsto en su diseño, aunque éstos son más costosos desde el punto de vista económico. Aquí solo se especifican las perturbaciones no predecibles, ya que las predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema.

Servosistema. Se llama así a un sistema de control retroalimentado en el que la salida es algún elemento mecánico: sea posición, velocidad o aceleración. Estos servosistemas se utilizan ampliamente en la industria moderna. También se les llama servomecanismos. Por ejemplo: con el uso de servosistemas e instrucciones programadas se puede lograr la operación totalmente automática de maquinarias de herramientas.

Comparación entre sistemas de control en lazo cerrado con sistemas en lazo abierto. Una ventaja del sistema de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de los parámetros del sistema. De esta manera, es posible utilizar componentes relativamente imprecisos y económicos para lograr el control requerido de determinada planta, cosa que sería imposible en un control en lazo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, en el sistema de control en lazo abierto es más fácil de desarrollar, ya que en él la estabilidad no llega a ser un problema importante. En cambio, la estabilidad es un gran problema en los sistemas de control en lazo cerrado, por la tendencia a corregir en exceso errores que pueden producir oscilaciones de amplitud constante o variable.

Hay que puntualizar que para los sistemas cuyas entradas son conocidas previamente y en los cuales no hay perturbaciones, es preferible emplear un control en lazo abierto. Los sistemas de control en lazo cerrado solo tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones imprevisibles de componentes del sistema. Se debe notar que la potencia de salida determina en forma parcial el coste, peso y tamaño de un sistema de control. La cantidad de componentes usados en un sistema de control en lazo cerrado es mayor que el que se emplea para un sistema de control equivalente en lazo abierto. Por lo tanto, el sistema de control en lazo cerrado generalmente suele tener costes y potencias mayores. Para reducir la potencia requerida de un sistema, se emplea un control en lazo abierto siempre que pueda aplicarse. Por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado es menos costosa y ofrecerá un comportamiento satisfactorio del sistema global.

La mayoría de los análisis y diseños de sistemas de control presentados en este libro son sistemas de control en lazo cerrado. En ciertas circunstancias (por ejemplo, si no hay perturbaciones o la salida es difícil de medir) pueden ser deseables los sistemas de control en lazo abierto.

Por tanto, es conveniente resumir las ventajas y desventajas de utilizar sistemas de control en lazo abierto.

Las ventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son las siguientes:

- Construcción simple y facilidad de mantenimiento.
- Menos costosos que el correspondiente sistema en lazo cerrado.
- No hay problemas de estabilidad.
- Convenientes cuando la salida es difícil de medir o cuando medir la salida de manera precisa no es económicamente viable. (Por ejemplo, en el caso de la lavadora, sería bastante costoso proporcionar un dispositivo para medir la calidad de la salida de la lavadora, es decir, la limpieza de la ropa lavada).

Las desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son las siguientes:

- Las perturbaciones y los cambios en la calibración originan errores y la salida puede ser diferente de lo que se desea.
- Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria la recalibración de vez en cuando.

1.1.3 Ejemplo de sistemas de control

❖ Sistema de control de velocidad

El principio básico del regulador de velocidad de Watt para una máquina se ilustra en el diagrama esquemático de la siguiente figura:

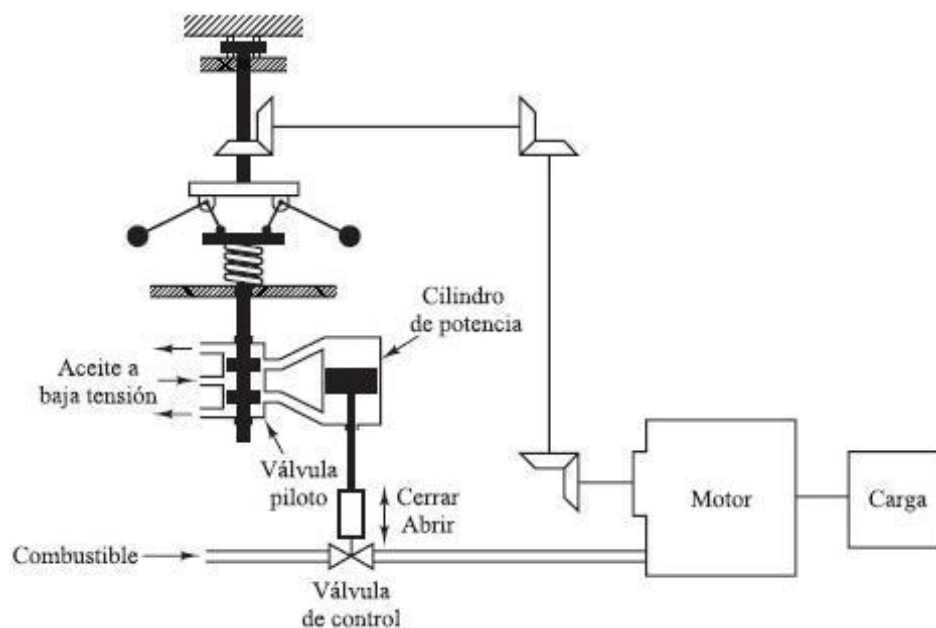


Figura 1.2: Sistema de control de velocidad

La cantidad de combustible que se admite en la máquina se ajusta de acuerdo con la diferencia entre la velocidad de la máquina que se pretende y la velocidad real.

La secuencia de acciones puede describirse del modo siguiente: el regulador de velocidad se ajusta de modo que, a la velocidad deseada, no fluya aceite a presión en ningún lado del cilindro de potencia. Si la velocidad real cae por debajo del valor deseado debido a una perturbación, la disminución de la fuerza centrífuga del regulador de velocidad provoca que la válvula de control se mueva hacia abajo, aportando más combustible, y la velocidad del motor aumenta hasta alcanzar el valor deseado. Por otra parte, si la velocidad del motor aumenta por encima del valor deseado, el incremento en la fuerza centrífuga del regulador provoca que la válvula de control se mueva hacia arriba. Esto disminuye el suministro de combustible, y la velocidad del motor se reduce hasta alcanzar el valor deseado.

En este sistema de control de velocidad, la planta (el sistema controlado) es la máquina y la variable controlada es la velocidad de la misma. La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real es la señal de error. La señal de control (la cantidad de combustible) que se va a aplicar a la planta (la máquina) es la señal de actuación. La entrada externa que se aplica para alterar la variable controlada es la perturbación. Un cambio inesperado en la carga es una perturbación.

❖ Sistema de control de temperatura

La Figura 1.3 muestra un diagrama esquemático del control de temperatura de un horno eléctrico. La temperatura del horno eléctrico se mide mediante un termómetro, que es un dispositivo analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz. Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay una discrepancia (error) el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y relé, para hacer que la temperatura del horno adquiera el valor deseado.

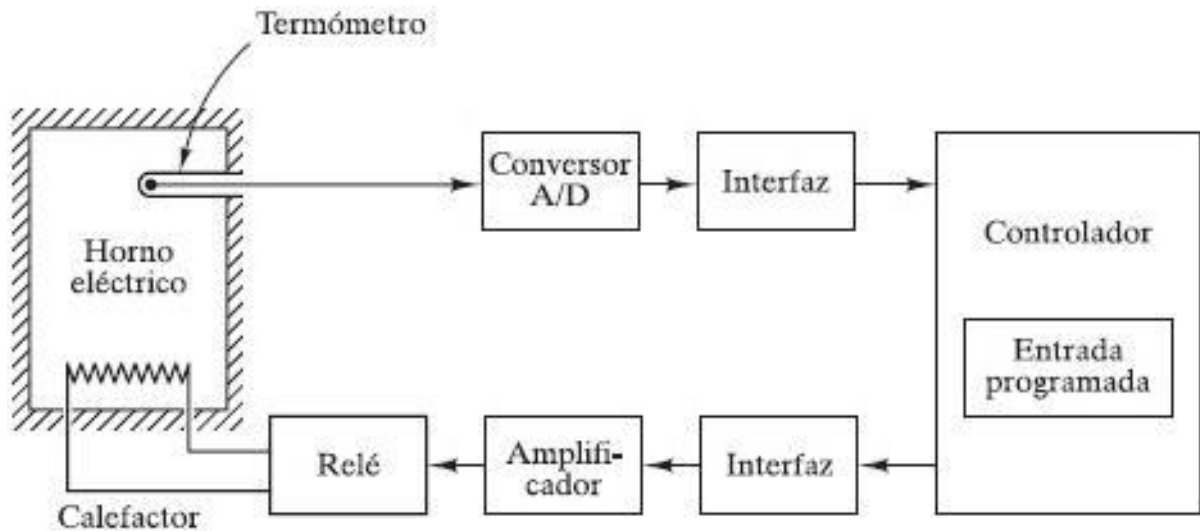


Figura 1.3: Sistema de control de temperatura

❖ Sistema de control de un robot

Los robots industriales se usan con frecuencia en la industria para mejorar la productividad. Un robot puede realizar tareas monótonas y complejas sin errores en la operación. Asimismo, puede trabajar en un ambiente intolerable para operadores humanos. Por ejemplo, puede funcionar en temperaturas extremas (tanto altas como bajas), en un ambiente de presión alta o baja, bajo el agua o en el espacio. Hay robots especiales para la extinción de incendios, las exploraciones submarinas y espaciales, entre muchos otros. Una computadora digital bien programada funciona como controlador.

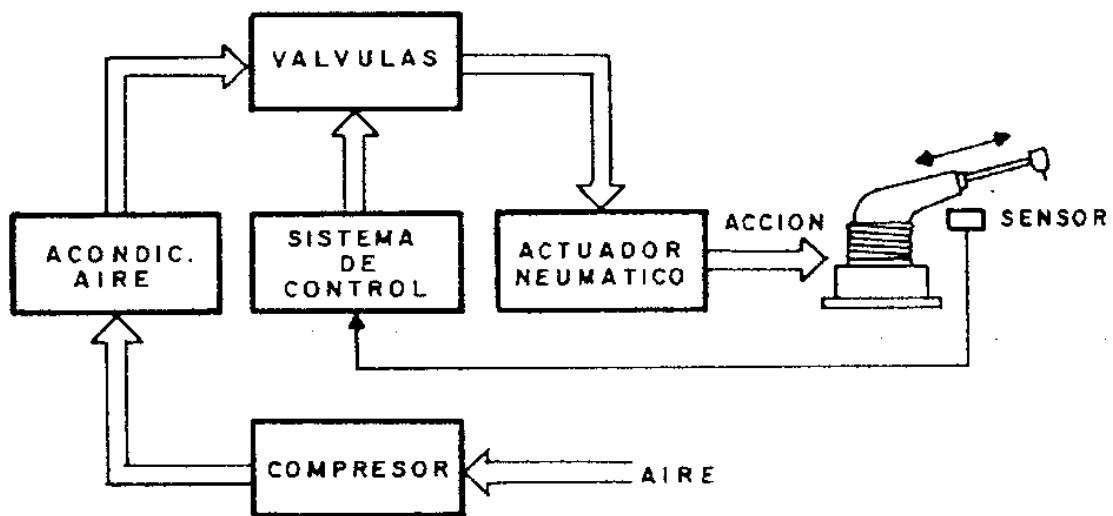


Figura 1.4: Sistema de control de un robot

1.1.4 Diseño de los sistemas de control

Los sistemas de control actuales son, por lo general, no lineales. Sin embargo, si es posible aproximarlos mediante modelos matemáticos lineales, podemos usar uno o más métodos de diseño bien desarrollados. En un sentido práctico, las especificaciones de desempeño determinadas para el sistema particular sugieren cuál método usar. Si se presentan las especificaciones en términos de las características de respuesta transitoria y/o de medidas en el dominio de la frecuencia, no tenemos otra opción que usar un enfoque convencional basado en los métodos del lugar geométrico de las raíces y/o la respuesta en frecuencia. Si las especificaciones se presentan como índices de desempeño en términos de las variables de estado, deben usarse los enfoques de control moderno.

En tanto que el diseño de un sistema de control mediante los enfoques del lugar geométrico de las raíces y de la respuesta en frecuencia es una tarea de la ingeniería, el diseño del sistema en el contexto de la teoría de control moderna (métodos en el espacio de estados) emplea formulaciones matemáticas del problema y aplica la teoría matemática para diseñar los problemas en los que el sistema puede tener entradas y salidas múltiples y ser variantes con el tiempo. Aplicando la teoría de control moderna, el diseñador puede iniciar a partir de un índice de desempeño, junto con las restricciones impuestas en el sistema, y avanzar para diseñar un sistema estable mediante un procedimiento completamente analítico. La ventaja del diseño basado en la teoría de control moderna es que permite al diseñador producir un sistema de control óptimo en relación con el índice de desempeño considerado [2].

1.2 Sistemas de control basados en red

Es un término que se emplea para referirse a un tipo especial de sistemas de control, que se caracterizan por la utilización de un medio de comunicación compartido para la transferencia de información entre el controlador y la planta controlada. Esto significa que, a diferencia de un sistema de control discreto convencional, en este tipo de sistemas el mismo medio de comunicación es empleado para establecer varios bucles de control e incluso para otro tipo de tareas no relacionadas con el control.

El medio de comunicación compartido separa las dos partes en las que se puede dividir este tipo de sistemas. Los elementos situados en el extremo del enlace en el que se encuentra la planta controlada constituyen la parte local del SCBR. En el otro extremo del medio están los elementos que componen la parte remota del SCBR.

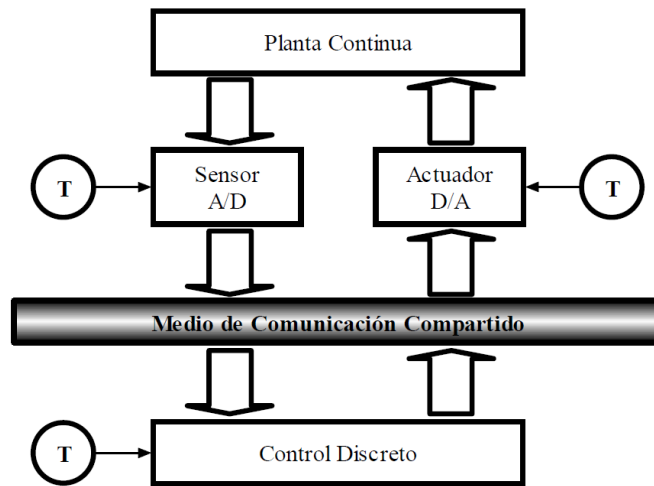


Figura 1.5: Sistema de control basado en red

El hecho de utilizar un enlace de uso no exclusivo para cerrar el bucle de realimentación presenta una serie de inconvenientes que tendrán una influencia negativa en la evolución temporal de la variable de interés:

- Limitación en la frecuencia de muestreo y control. Al compartir el enlace entre varios dispositivos, el tiempo de utilización debe repartirse entre ellos, lo cual limita la cantidad de información que es posible transmitir por unidad de tiempo. En definitiva, el ancho de banda efectivo disponible para cada bucle de control que se cierra a través del enlace compartido se ve reducido, tanto más cuanto mayor es el número de dispositivos emisores/receptores compartiendo el enlace.
- Presencia de retrasos de acceso variables en la comunicación control-planta. Las muestras capturadas por los sensores y las acciones de control calculadas por el controlador llegarán a su destino con un cierto retraso, impuesto por el enlace compartido. Este retraso será debido fundamentalmente, al tiempo que el dispositivo emisor de la información pasa esperando a que el enlace le sea concebido para su utilización. Lógicamente, este retraso tendrá una influencia negativa en las prestaciones del sistema.

- Falta de sincronismo control-planta. El hecho de no disponer de un enlace de uso exclusivo entre el controlador y el proceso controlado implica que sea difícil, sino imposible, garantizar una perfecta sincronización entre sensor, controlador y actuador. Esta falta de sincronismos que, en el caso más general tendrá un carácter variable, será de especial importancia al combinarse con el retraso de acceso aleatorio, influyendo de forma significativa en las prestaciones del sistema [3].

En resumen, el principal problema de no emplear un enlace exclusivo es la limitación de ancho de banda del medio de comunicación, utilizado por los diversos sistemas para el envío de la información. Para resolverlo existen dos maneras. Obviamente, la primera es aumentar el ancho de banda disponible en el medio de comunicación pero, sin embargo, en ocasiones éste impondrá limitaciones. Por ello, se deberá recurrir a estructuras de control que mitiguen la influencia de esta limitación de ancho de banda.

Dicho de otra manera, en los sistemas de control basados en red conviene que el bus de comunicación entre ambos sistemas esté lo más liberado posible. Por eso cuanto menos ancho de banda se utilice en el proceso, más habrá para poder ser ocupado con otras funciones que queramos realizar. Y ya que el muestreo de los datos se hace con un periodo T seleccionado anteriormente, para liberar ancho de banda lo que implementamos es un control donde la transmisión de los datos sea por eventos.

1.3 Sistemas de control basados en eventos

Los sistemas de control periódicos o activados por tiempo han dominado casi de manera exclusiva la investigación en ingeniería de control. El control basado en eventos es una alternativa muy prometedora particularmente cuando se trabaja con sistemas con capacidad limitada de computación y de comunicación. En un sistema de control basado en eventos es la ocurrencia de un evento lo que decide cuándo se debe efectuar el muestreo y no el paso de cierto tiempo (periodo de muestreo).

El empleo de un período de muestreo síncrono es una de las condiciones más severas que imponen los ingenieros de control en la implementación del software. Es posible relajar estos requerimientos con los controladores basados en eventos, en los cuales ninguna acción de control se toma hasta que la señal medida se haya desviado cuanto consideremos suficiente del punto de referencia, justificando así la transmisión de una nueva muestra.

Este tipo de sistema puede ofrecer varias ventajas:

- Si se reduce el número de actualizaciones de la señal de control que se envían a través de la red, transmitiendo solo información de interés, se consigue una reducción en el número de muestras que se transmite. Por consiguiente obtenemos una disminución de la carga media del bus, es decir, del ancho de banda usado.
- Utilización de los recursos de cálculo optimizada. Tener ocupada la CPU para realizar cálculos cuando nada significativo ha ocurrido en el proceso es claramente un uso innecesario de los recursos disponibles. Con el control por eventos el tiempo de CPU se comparte entre las distintas tareas y solo se utiliza en casos necesarios.
- Las transmisiones inalámbricas en una red de sensores alimentados por baterías consumen significativamente energía. Así pues, para reducir el consumo sería deseable un método de muestreo basado en eventos que requiriese menos transmisiones de datos.

En este proyecto, la finalidad del control basado en eventos es obtener un balance entre la carga del procesador y del sistema de comunicación (ancho de banda consumido), el consumo energético y el coste del sistema en sí, sin que se produzca una degradación en la respuesta del sistema respecto de la que se obtendría en un sistema equivalente con muestreo por tiempo [4].

2. Péndulo lineal

2.1 Introducción

El sistema del péndulo es un problema clásico en la ingeniería de control, el cual consiste en una varilla con una masa en un extremo y en el otro un eje que puede pivotar bidimensionalmente, todo esto montado sobre un carro que puede moverse longitudinalmente. Este carro está controlado por un servomotor y su función principal es aplicar fuerzas al péndulo.

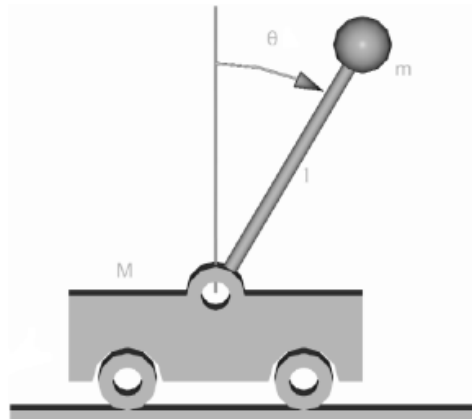


Figura 2.1: Péndulo lineal en un carro [5]

Este sistema del péndulo invertido es inestable, ya que la varilla puede caer en cualquier momento y en cualquier dirección dentro del plano X-Y. Para evitar esto se introduce un controlador PID, la misión del cual es mantener la varilla recta mediante el control de la fuerza aplicada al carro, conociendo en todo momento el ángulo del péndulo.

En otras palabras, el objetivo del control es cambiar la dinámica del sistema con el fin de tener un punto de equilibrio en la vertical. Para hacer esto, la idea es encontrar las fuerzas que deban aplicarse al carro para corregir las oscilaciones que se producen sobre el péndulo con el movimiento del primero, incluso si es perturbado por estímulos del tipo impulso o escalón [6].

2.2 Péndulo

Este sistema constituye un caso concreto de sistema físico en el que se ponen de manifiesto importantes problemas, lo que ha hecho de él un banco de pruebas (benchmark) para sistemas de control.

El interés en el estudio de este tipo de sistema radica en que, salvando las particularidades de cada caso, su modelo matemático presenta una formulación basada en ecuaciones diferenciales, lo que guarda cierta analogía con procesos reales de mayor complejidad, como por ejemplo el sistema de control de vuelo para aeronaves (el control del péndulo invertido es un proyecto de ingeniería de control basado en la simulación de vuelo de un cohete o un misil durante las fases iniciales del vuelo). Por tanto, su estudio sirve como una primera aproximación a los problemas que plantean sistemas de mayor complejidad [7] [8].

El sistema empezó a ser visto en los laboratorios de las universidades más prestigiosas en los años 60-70. Manualmente situaban el péndulo en la posición vertical invertida soltándolo posteriormente para que de una forma autónoma, realimentando su posición, continuase en la posición invertida mediante la adecuada acción sobre el carro.

El problema de control, considerado de esta manera, es local y su interés residía en que se trataba de estabilizar una posición inestable en lazo abierto, lo que constituye un problema de control muy notable. Este problema, por su carácter local, puede resolverse con métodos lineales y así se ha hecho desde los años sesenta.

Es importante destacar que en sistemas lineales la estabilización en lazo cerrado de un punto inestable en lazo abierto no ofrece mayores problemas; éstos aparecen cuando el sistema es no lineal. El inconveniente con esta versión del péndulo, a la hora de plantear problemas globales, reside en que el recorrido del carro está acotado, por lo que si se alcanza uno de los extremos del soporte horizontal, el sistema deja de funcionar al hacer contacto con uno de los dos finales de carrera.

Para evitar esta limitación Katsuhisa Furuta, del Instituto de Robótica de Tokio, propuso en los años setenta el péndulo rotatorio conocido desde entonces como péndulo de Furuta. Consiste en un motor de eje vertical al que está acoplado un brazo de cuyo extremo cuelga la varilla del péndulo. Es decir, el extremo del brazo juega el mismo papel que el carro en el péndulo descrito en el párrafo anterior. Con este artefacto se evitan los problemas de final de carrera, aunque aparecen otros nuevos debido a que la dinámica del sistema se complica considerablemente al hacer su aparición fuerzas centrífugas y de Coriolis [5] [7] [9].

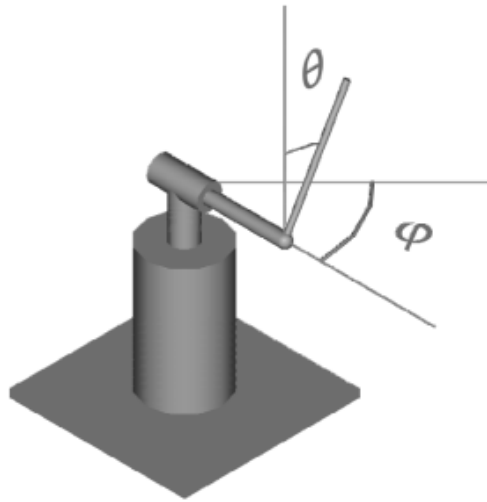


Figura 2.2: Péndulo rotatorio de Furuta [5]

El control del péndulo invertido es un problema que ya ha sido resuelto previamente usando gran variedad de técnicas de control tales como: técnicas lineales como el control PID, el método del regulador lineal cuadrático (LQR) y el control por asignación de polos en el espacio de estados; técnicas no lineales como la realimentación de la posición, control robusto y control basado en energía y pasividad. Este proyecto se concentra solo en el control PID.

Comparando los controladores lineales y no lineales, los primeros están diseñados basándose en el modelo linealizado. Estos controladores son más fáciles de diseñar en comparación con los no lineales, aunque tienen limitada la zona de control. Por otro lado, los modelos y controladores no lineales son más difíciles de derivar y desarrollar, pero dan mejores resultados en la consecución del objetivo de control. Por ejemplo, los controladores lineales solo pueden trabajar para una pequeña desviación del ángulo desde la posición vertical invertida, y si el ángulo se hace demasiado grande, el controlador no podría mantener más tiempo el péndulo hacia arriba. Desde otro punto de vista, los controladores lineales son más convenientes para la investigación de nuevas tecnologías integradas para la implementación de diversas acciones de control como el Real-Time (Tiempo real) de Matlab® y LabVIEW o las aplicaciones FPGA, debido a su simplicidad y tipo limitado y la cantidad de cálculos necesarios para implementar la acción de control [10].

También es cierto que existen otros tipos de péndulos invertidos como el de rueda de inercia, el acrobot, el pendubot, el doble péndulo invertido, etc. Sin embargo, este proyecto solo se ocupa del péndulo lineal sobre un carro.

En síntesis, uno de los problemas más simples en robótica es el de controlar la posición de un solo enlace utilizando una fuerza de dirección aplicada al extremo. Los sistemas de balanceo de un palo o varilla son impresionantes modelos de demostración de los problemas de estabilización de misiles. Las grúas utilizadas en los puertos de embarque y en muchas otras industrias, como la maderera (Figura 2.3), son otro ejemplo de sistema electromecánico no lineal que tiene un comportamiento dinámico complejo y crea desafiantes problemas de control. Matemáticamente ambos son solo un péndulo en posición estable o inestable [11].



Figura 2.3: Grúa transportando madera [12]

2.3 Aplicaciones

Su aplicación en la vida cotidiana va desde el control de estabilidad de grúas y edificios, hasta la construcción de vehículos de dos ruedas con auto balanceo para el transporte de personas, como es el caso del famoso Segway, donde el usuario debe inclinarse hacia la dirección que quiera tomar (Figura 2.4). Además, el péndulo invertido se puede utilizar como una aproximación a cualquier humano de pie en posición vertical o estado ortostático, el cual significa estar solo soportado por los pies [13].



Figura 2.4: Segway [14]

La configuración péndulo-carro consiste en una varilla montada en un carro de tal manera que ésta solo puede oscilar libremente en el plano vertical. El carro es accionado por un motor de corriente continua. Para balancear y equilibrar el péndulo, el carro es empujado de un lado al otro en una pista de longitud limitada (± 0.5 metros).

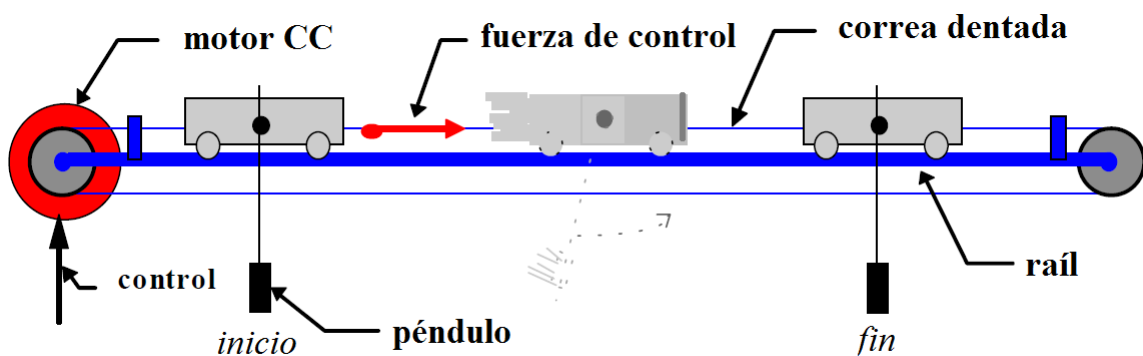


Figura 2.5: Configuración péndulo-carro [11]

2.4 Parámetros del sistema

En la Tabla 1 se muestran todos los parámetros físicos de la configuración péndulo-carro, con sus respectivas unidades y descripción:

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
θ	Ángulo de la varilla con respecto a la línea vertical		<i>rad</i>
$\dot{\theta}$	Velocidad angular de la varilla		<i>rad/seg</i>
$\ddot{\theta}$	Aceleración angular de la varilla		<i>rad/seg²</i>
x	Posición del carro		<i>m</i>
\dot{x}	Velocidad del carro		<i>m/seg</i>
\ddot{x}	Aceleración del carro		<i>m/seg²</i>
f	Fuerza aplicada al carro		<i>N</i>
M	Masa del carro	1.120	<i>kg</i>
m	Masa de la varilla	0.025	<i>kg</i>
m_c	Masa de la carga	0.095	<i>kg</i>
L	Longitud de la varilla	0.402	<i>m</i>
g	Fuerza de la gravedad	9.81	<i>m/seg²</i>
R_l	Longitud del raíl	1	<i>m</i>
l_{vo}	Distancia entre el centro de masas de la varilla y el eje de rotación	0.146	<i>m</i>
l_c	Longitud de la carga	0.041	<i>m</i>
l_{co}	Distancia entre el centro de masas de la carga y el eje de rotación	0.347	<i>m</i>
r_c	Radio de la carga	0.02	<i>m</i>

r_v	Radio de la varilla	0.006	m
J_{pt}	Momento de inercia teórico del péndulo	0.0136	$kg * m^2$
FS	Fricción estática del carro	3.0	N
FC	Coeficiente de fricción dinámica del carro	2.0	kg/seg
M	Máxima fuerza	15.5	N
DZ_u	Mínima fuerza para mover el carro	1	N
DZ_{cv}	Zona muerta de velocidad del carro	0.080	m/seg
DZ_{vv}	Zona muerta de velocidad del péndulo	6.800	rad/seg
f_p	Constante de fricción del péndulo	$2.1 * e^{-5}$	$kg * m^2 / seg$
T	Periodo del péndulo	1.160	seg
J_v	Momento de inercia en relación con el eje de rotación	0.013922	$kg * m^2$
J	Momento de inercia en relación con el centro de masas	0.0135966	$kg * m^2$
I	Distancia entre el eje de rotación del péndulo y el centro de masas del sistema péndulo-carro	0.0167066	m

Tabla 1: Parámetros del sistema [15]

Teniendo en cuenta el modelo del péndulo lineal (Figura 2.6), y tanto los datos ofrecidos por el fabricante como las variables del sistema (Tabla 1), se está en disposición de resolver las ecuaciones del sistema.

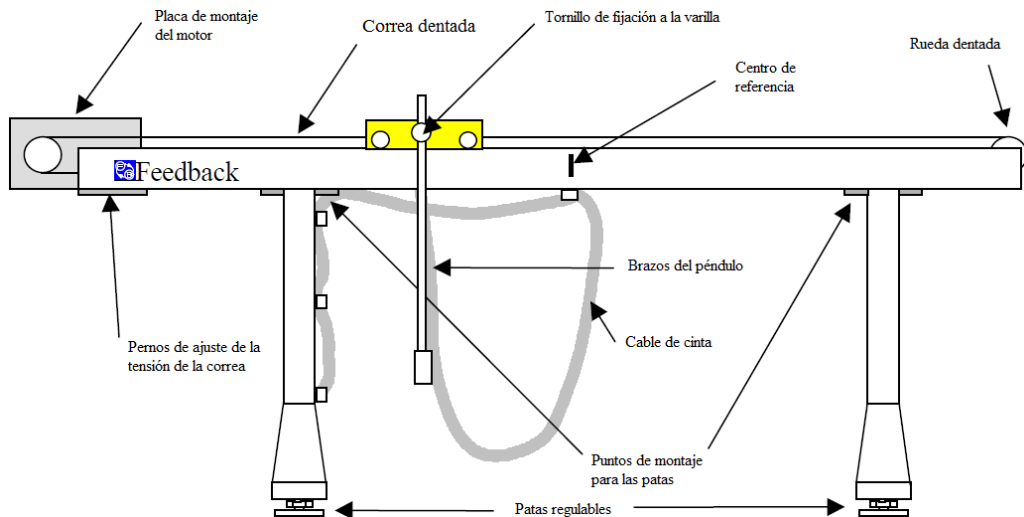


Figura 2.6: Péndulo ensamblado [16]

2.5 Modelo del péndulo lineal

El primer paso necesario para el diseño de un controlador capaz de mantener estable el péndulo es encontrar un modelo del sistema, es decir, una representación abstracta de sus características y propiedades.

En nuestro caso, se pretende obtener un modelo matemático que refleje el comportamiento del sistema, o lo que es lo mismo, un conjunto de ecuaciones matemáticas que relacionen una serie de variables con las características físicas del sistema. Además, con el modelo y un software matemático adecuado, en nuestro caso Matlab y Simulink, podemos simular cuál es el comportamiento del sistema bajo cualquier condición. En definitiva, lo que se persigue es evaluar las salidas que el sistema proporciona cuando se le aplica determinadas entradas, salidas que en nuestro caso serán muy útiles cuando diseñemos el controlador.

Una de las claves cuando implementamos el control eficiente de cualquier sistema es partir de un modelo que refleje fielmente el comportamiento del sistema real. Sin embargo, elaborar un modelo exacto es muy complicado y la mayoría de las veces imposible. Por tanto, se busca establecer un equilibrio entre las complicaciones que conlleva elaborar el modelo con las ventajas que proporciona a la hora de su estudio. En resumen, no estamos interesados en un modelo matemático demasiado elaborado o complicado, si a la hora de su estudio y posterior simulación, se obtienen controladores que apenas mejoran el comportamiento de la planta del que se hubiese obtenido a partir de modelos más simplificados [14].

2.5.1 Modelo matemático

Los componentes que abarcan los sistemas de control son muy diversos. Pueden ser electromecánicos, hidráulicos, neumáticos, electrónicos, etc. En ingeniería de control, en lugar de operar con dispositivos o componentes físicos, se les reemplaza por sus modelos matemáticos. Obtener un modelo matemático razonablemente exacto de un componente físico es uno de los problemas más importantes en ingeniería de control. Se debe notar que para ser útil, un modelo matemático no debe ser ni muy complicado ni excesivamente simple, debe representar los aspectos esenciales de un componente físico. Las predicciones sobre el comportamiento de un sistema, basadas en el modelo matemático, deben ser bastante precisas. Se debe notar también que dados varios sistemas aparentemente diferentes, pueden representarse todos estos por el mismo modelo matemático. El uso de tales modelos matemáticos permite a los ingenieros de control desarrollar una teoría de control unificada. En ingeniería de control se usan ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo, funciones de transferencia y ecuaciones de estado, para modelos matemáticos de sistemas lineales, invariantes en el tiempo y de tiempo continuo. Aunque las relaciones de entrada-salida de muchos componentes son no-lineales, normalmente esas relaciones se linealizan en la vecindad de los puntos de operación, limitando el rango de las variables a valores pequeños. Obviamente, tales modelos lineales son mucho más fáciles de manejar, tanto analíticamente como por computadora [2].

Originalmente se puede considerar el problema del péndulo invertido como un sistema no lineal, pero la dificultad que implica el modelado de estos sistemas hace que sea necesaria una linealización del mismo. Como hemos dicho ya, todo sistema no lineal se puede linealizar dentro de un rango en el cuál se comporte se forma muy parecida a un sistema lineal. En el caso del péndulo invertido ese rango lo establecemos en torno al punto de equilibrio, es decir, el punto en que el robot se encuentra a cero grados con la vertical. Con ello, podremos simplificar [14].

Ahora bien, la literatura sobre el modelado del péndulo invertido es muy abundante, así pues se encuentran modelos basados tanto en técnicas de dinámica de Lagrange como en leyes de Newton. Para este caso se presenta un modelo basado en la primera de las dos. En la Figura 2.7 se ilustra un diagrama esquemático del péndulo en el que se presentan las variables usadas para la obtención del modelo.

Asumimos que el centro de gravedad de la varilla del péndulo y de la carga es el punto A y su masa es m , la masa del carro es M , la longitud desde donde pivota hasta el centro de gravedad es L y el ángulo de la varilla desde la vertical es θ .

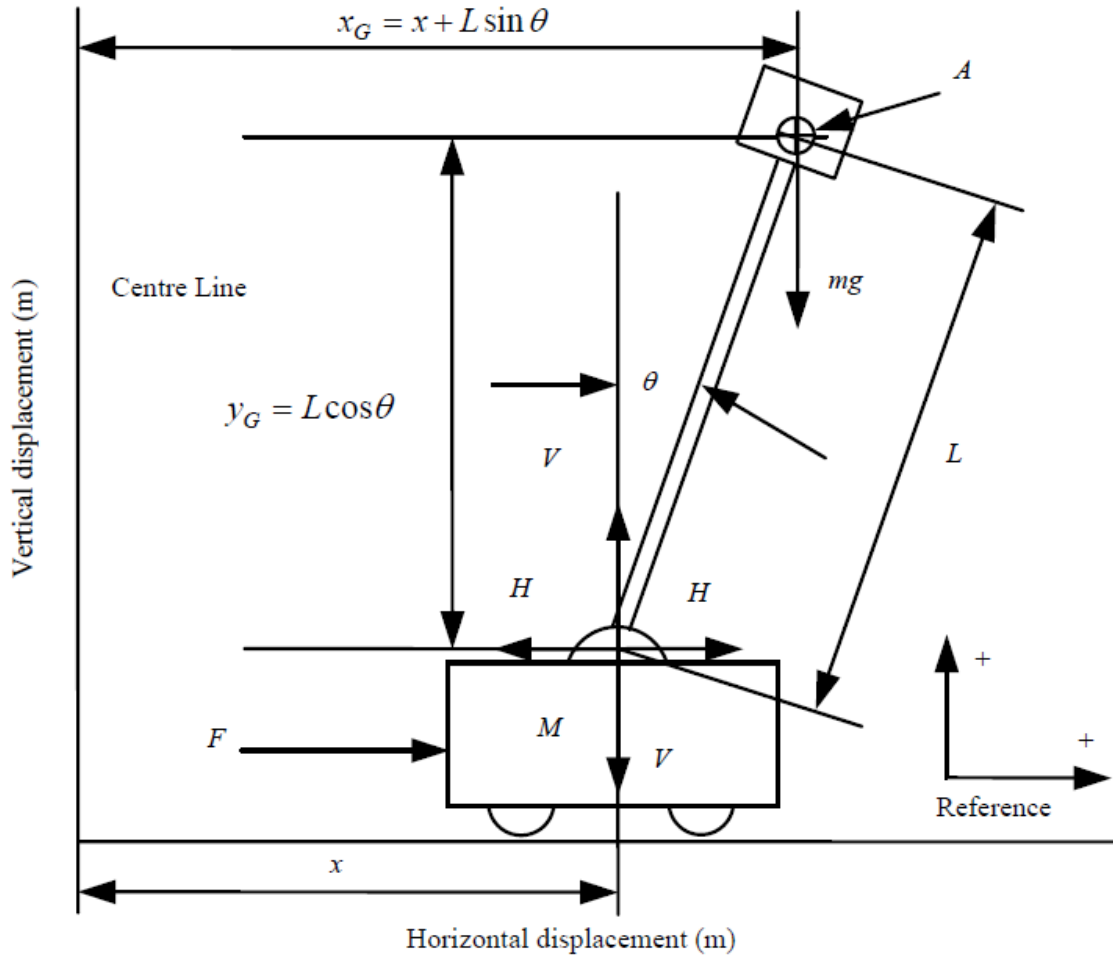


Figura 2.7: Diagrama simplificado del sistema del péndulo invertido [2]

La fuerza aplicada sobre el carro es F , la cual es trasladada desde el servomotor por la correa, el desplazamiento del carro desde la línea central es x , y H y V indican las fuerzas horizontales y verticales aplicadas al péndulo.

2.5.2 Análisis dinámico de Lagrange

Tal y como hemos dicho anteriormente, el modelo dinámico puede ser deducido utilizando dinámica Lagrangiana como se muestra a continuación [17]:

La ecuación de Lagrange es expresada en una de sus formas principales como:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial q_i} \right) = Q_{nci}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Dónde:

$T = \text{energía cinética}$

$V = \text{energía potencial}$

$Q_{nci} = \text{fuerzas no conservativas generalizadas}$

$n = \text{número total de coordenadas generalizadas independientes}$

Para este caso en particular las coordenadas generalizadas son:

$q_1 = \theta$ (ángulo de la varilla)

$q_2 = x$ (posición del carro)

Nota: El movimiento de la varilla es un movimiento planar.

La energía cinética de un cuerpo rígido en dos dimensiones dado como:

$$T = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \omega^2 \quad (2.2)$$

Dónde:

$v_c = \text{velocidad del centro de masa } c$

$I_c = \text{momento de inercia de la masa en relación al centro de masa}$

$\omega = \text{velocidad angular del cuerpo rígido rotando en relación al centro de masa}$

La energía cinética del sistema del péndulo invertido es deducido mediante la suma de las energías cinéticas del carro (T_1), de la varilla (T_2) y del cuerpo (T_3) como se muestra a continuación:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2.3)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (2.4)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m (\dot{y}_2^2 + \dot{x}_2^2) + \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$y_2 = x + \frac{L}{2} \sin \theta \quad \dot{y}_2 = \dot{x} + \frac{L}{2} \dot{\theta} \cos \theta$$

$$z_2 = \frac{L}{2} \cos \theta \quad \dot{z}_2 = -\frac{L}{2} \dot{\theta} \sin \theta \quad (2.5)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_c (\dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2)$$

$$y_1 = x + L \sin \theta \quad \dot{y}_1 = \dot{x} + L \dot{\theta} \cos \theta$$

$$z_1 = L \cos \theta \quad \dot{z}_1 = -L \dot{\theta} \sin \theta \quad (2.6)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left(\left(\dot{x} + \frac{L}{2} \dot{\theta} \cos \theta \right)^2 + \left(-\frac{L}{2} \dot{\theta} \sin \theta \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{12} m L^2 \right) \dot{\theta}^2 + \dots$$

$$+ \frac{1}{2} m_c \left(\left(\dot{x} + L \dot{\theta} \cos \theta \right)^2 + \left(-L \dot{\theta} \sin \theta \right)^2 \right) \quad (2.7)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \left(\dot{x}^2 + L \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{L^2}{4} \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + \frac{L^2}{4} \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta \right) + \frac{1}{24} m L^2 \dot{\theta}^2 + \dots$$

$$+ \frac{1}{2} m_c \left(\dot{x}^2 + 2L \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + L^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + L^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta \right) \quad (2.8)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m L \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{6} m L^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_c \dot{x}^2 + m_c L \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} m_c L^2 \dot{\theta}^2 \quad (2.9)$$

La energía potencial está dada como:

$$V = mgz_2 + m_cgz_1$$

$$V = mg \frac{L}{2} \cos \theta + m_cgL \cos \theta$$
(2.10)

Las fuerzas no-conservativas se expresan de la siguiente manera:

$$Q_{nc1} = -b_\theta \dot{\theta}$$

$$Q_{nc2} = -b_x \dot{x} + f(t)$$
(2.11)

Se aplica la ecuación de Lagrange para la coordenada generalizada $q_1 = \theta$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = \frac{1}{2} m \dot{x} L \cos \theta + \frac{1}{3} mL^2 \dot{\theta} + m_c \dot{x} L \cos \theta + m_c L^2 \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{1}{2} mL (\dot{x} (-\sin \theta) \dot{\theta} + \cos \theta \ddot{x}) + \frac{1}{3} mL^2 \ddot{\theta} + m_c L (\dot{x} (-\sin \theta) \dot{\theta} + \cos \theta \ddot{x}) + m_c L^2 \ddot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) = -\frac{1}{2} mL \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + \frac{1}{2} mL \ddot{x} \cos \theta + \frac{1}{3} mL^2 \ddot{\theta} - m_c L \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta + m_c L \ddot{x} \cos \theta + m_c L^2 \ddot{\theta}$$
(2.12)

$$-\frac{\partial T}{\partial \theta} = - \left(-\frac{1}{2} m \dot{x} L \dot{\theta} \sin \theta - m_c \dot{x} L \dot{\theta} \sin \theta \right)$$
(2.13)

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = -mg \frac{L}{2} \sin \theta - m_c g L \sin \theta$$
(2.14)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = Q_{nc1}$$

$$-\frac{1}{2} mL \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + \frac{1}{2} mL \ddot{x} \cos \theta + \frac{1}{3} mL^2 \ddot{\theta} - m_c L \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta + m_c L \ddot{x} \cos \theta + m_c L^2 \ddot{\theta} + \dots$$

$$+ \frac{1}{2} mL \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta + m_c L \dot{x} \dot{\theta} \sin \theta - mg \frac{L}{2} \sin \theta - m_c g L \sin \theta = -b_\theta \dot{\theta}$$

$$-\frac{1}{2}mL\ddot{x}\cos\theta + \frac{1}{3}mL^2\ddot{\theta} + m_cL\ddot{x}\cos\theta + m_cL^2\ddot{\theta} - mg\frac{L}{2}\sin\theta - m_cgL\sin\theta = -b_\theta\dot{\theta}$$

$$I_p\ddot{\theta} + m_oL\ddot{x}\cos\theta - m_oL\sin\theta = -b_\theta\dot{\theta}$$

(2.15)

Dónde:

$$I_p = \frac{1}{3}mL^2 + m_cL^2 \quad m_o = \frac{m}{2} + m_c$$

Se aplica la ecuación de Lagrange para la coordenada generalizada $q_2 = x$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = M\dot{x} + m\dot{x} + \frac{1}{2}m\dot{\theta}L\cos\theta + m_c\dot{x} + m_cL\dot{\theta}\cos\theta$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = M\ddot{x} + m\ddot{x} + \frac{1}{2}mL(\dot{\theta}(-\sin\theta)\dot{\theta} + \cos\theta\ddot{\theta}) + m_c\ddot{x} + m_cL(\dot{\theta}(-\sin\theta)\dot{\theta} + \cos\theta\ddot{\theta})$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = M\ddot{x} + m\ddot{x} + \frac{1}{2}mL\dot{\theta}^2\sin\theta + \frac{1}{2}mL\ddot{\theta}\cos\theta + m_c\ddot{x} - m_cL\dot{\theta}^2\sin\theta + m_cL\ddot{\theta}\cos\theta$$

(2.16)

$$-\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

(2.17)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x} = Q_{nc2}$$

$$M\ddot{x} + m\ddot{x} - \frac{1}{2}mL\dot{\theta}^2\sin\theta + \frac{1}{2}mL\ddot{\theta}\cos\theta + m_c\ddot{x} - m_cL\dot{\theta}^2\sin\theta + m_cL\ddot{\theta}\cos\theta = f - b_x\dot{x}$$

$$(M + m + m_c)\ddot{x} + \left(\frac{1}{2}m + m_c\right)L\ddot{\theta}\cos\theta - \left(\frac{1}{2}m + m_c\right)L\dot{\theta}^2\sin\theta = f - b_x\dot{x}$$

$$m_t\ddot{x} + m_oL\ddot{\theta}\cos\theta - m_oL\dot{\theta}^2\sin\theta = f - b_x\dot{x}$$

(2.18)

Dónde: $m_t = M + m + m_c \quad m_o = \frac{m}{2} + m_c$

De esta manera la dinámica del péndulo invertido está dada por:

$$\begin{cases} I_p \ddot{\theta} + m_o L \ddot{x} \cos \theta - m_o g L \sin \theta = -b_\theta \dot{\theta} \\ m_t \dot{x} + m_o L \dot{\theta} \cos \theta - m_o L \dot{\theta}^2 \sin \theta = f - b_x \dot{x} \end{cases} \quad (2.19)$$

Dónde:

$$I_p = \frac{1}{3} mL^2 + m_c L^2 \quad m_t = M + m + m_c \quad m_o = \frac{m}{2} + m_c$$

2.5.3 Linealización y Función de Transferencia (fdt)

Antes de continuar con análisis más profundo, hay que linealizar las ecuaciones de estado. Hay dos puntos de equilibrio: $\theta = 0$ (péndulo hacia abajo, estable) y $\theta = \pi$ (péndulo hacia arriba, inestable). Centrándose en pequeñas variaciones de θ sobre el punto de equilibrio θ_0 [18]:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 + \varepsilon \\ \dot{\theta} &= \dot{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2.20)$$

A partir de una expansión de las Series de Taylor, una aproximación de primer orden de cualquier función de θ es

$$f(\theta) \approx f(\theta_0) + \varepsilon \left. \frac{df}{d\theta} \right|_{\theta_0} \quad (2.21)$$

También, ya que los términos de orden superior se desprecian,

$$\varepsilon^2 \approx 0 \quad (2.22)$$

Ahora linealizamos alrededor del punto de equilibrio que nos interesa para este proyecto, es decir, cuando el péndulo está hacia abajo $\theta = 0$. En este caso, la ecuación 2.26 pasa a ser de primer orden:

$$\begin{aligned}\cos \theta &\approx \cos(0) + \theta[-\sin(0)] = 1 \\ \sin \theta &\approx \sin(0) + \theta[\cos(0)] = \theta\end{aligned}$$

(2.23)

Sustituyendo estas linealizaciones en las ecuaciones de estado del sistema (ecuación 2.19) y despreciando los términos de orden superior, la ecuación quedaría así:

$$\begin{cases} -m_o L \ddot{x} + (m_o L^2 + I_p) \ddot{\theta} + b_\theta \dot{\theta} + m_o g L \theta = 0 \\ (m_t + m_o) \ddot{x} + b_x \dot{x} - m_o L \ddot{\theta} = f(t) \end{cases}$$

(2.24)

Tomando la transformada de Laplace

$$\begin{cases} -m_o L s^2 X(s) + (m_o L^2 + I_p) s^2 \Theta(s) + b_\theta s \Theta(s) + m_o g L \Theta(s) = 0 \\ (m_t + m_o) s^2 X(s) + b_x s X(s) - m_o L s^2 \Theta(s) = F(s) \end{cases}$$

(2.25)

Para $I_p = 0$, que es el caso ideal donde la masa del péndulo la constituye un punto y la masa de la carga se desprecia, de modo que no hay momento de inercia respecto a su centro de masas, la función de transferencia (fdt) se reduce a:

$$G_1(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{m_o L^2 s^2 + b_\theta s + m_o g L}{m_t m_o L^2 s^4 + [(m_t + m_o) b_\theta + m_o L^2 b_x] s^3 + [(m_t + m_o) m_o g L + b_\theta b_x] s^2 + m_o g L b_x s}$$

$$G_2(s) = \frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{m_o L s}{m_t m_o L^2 s^3 + [(m_t + m_o) b_\theta + m_o L^2 b_x] s^2 + [(m_t + m_o) m_o g L + b_\theta b_x] s + m_o g L b_x}$$

(2.26)

Las gráficas (Lugar de las Raíces) y los diagramas de Bode de polos y ceros para estas funciones de transferencia se muestran en la Figura 2.8:

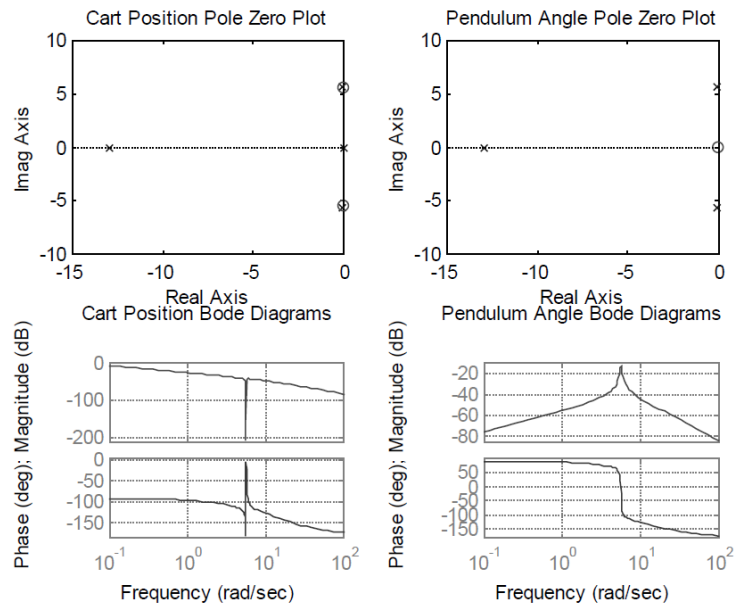


Figura 2.8: Gráficas (LdR) y diagramas de Bode de polos y ceros con el sistema linealizado alrededor de $\theta = 0$ (péndulo hacia abajo) [18]

2.6 Estructura de control

2.6.1 Regulador Lineal-Cuadrático (LQR)

La teoría de control óptimo se refiere a la operación de un sistema dinámico a un coste mínimo. El caso en el que la dinámica del sistema son descritos por un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales, y el coste es descrito por una funcional cuadrática que se llama el problema LQ. Uno de los principales resultados en la teoría es que la solución es proporcionada por el regulador lineal-cuadrático, un controlador de realimentación.

Esto significa que la configuración de un controlador de dirección, bien una máquina o proceso se encuentran mediante el uso de un algoritmo matemático que minimiza una función de coste con factores de ponderación proporcionados por un ser humano. El "coste" a menudo se define como la suma de las diferencias de las mediciones clave de sus valores deseados. En efecto, este algoritmo encuentra los parámetros del controlador que minimizan las desviaciones no deseadas, como las desviaciones de altitud o la temperatura del proceso. A menudo, la magnitud de la acción de control en sí está incluida en esta suma con el fin de mantener la energía gastada por la acción de control limitada en sí.

En efecto, el algoritmo LQR se encarga de la dura tarea de control de la optimización del controlador, realizada por el Ingeniero de Sistemas de Control [19].

2.6.2 Ganancias del sistema

Para obtener un modelo lineal estable en el punto de equilibrio, se siguen los siguientes pasos en Matlab:

```
[A, B, C, D] = linmod ("péndulo", [0, pi, 0, 0], 0);
```

Obtenemos:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \\ 0 & 0.611 & -34.9727 & -0.001 \\ 0 & 43.4213 & -145.7195 & -0.0054 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 9.1803 \quad -38.2514]'$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]'$$

$$E = eig(A)$$

$$E = [0 \quad -0.0379 - 6.3997i \quad -0.0379 + 6.3997i \quad -34.9024]'$$

Teniendo esto estamos preparados para aplicar el controlador LQR.

El siguiente paso es asumir las matrices de ponderación Q y R. Se puede hacer de acuerdo a los principios del LQR. Por ejemplo, escribimos en la ventana de comandos de Matlab lo siguiente, usando el comando *lqr* e introduciendo los valores de nuestro sistema (matrices Q y R sugeridas por el fabricante) [14]:

$Q = \text{eye}(\text{size}(A));$

$Q(1, 1) = 50;$

$Q(2, 2) = 100;$

$Q(3, 3) = 1;$

$Q(4, 4) = 1;$

$R = 1;$

$[K, S, E] = \text{lqr}(A, B, Q, R);$

Lo que obtenemos son las 4 ganancias a aplicar:

$$K = [7.0711 \quad -11.7190 \quad 2.0251 \quad -0.02106]$$

Sin embargo, en este proyecto el regulador (PID) ha sido obtenido por el método experimental. Así se controlará mejor la planta, pues los parámetros indicados por el fabricante serían solo válidos en las condiciones iniciales que el mismo propone, no correspondiéndose con los actuales que encontramos en el péndulo lineal. Aunque sea poco, han cambiado valores como el peso del carro, la tensión de la correa, los coeficientes de fricción, etc. Resaltar que hemos trabajado en todo momento sobre el péndulo físico, no realizando simulación alguna.

3. Implementación del modelo matemático

Una vez obtenido el modelo matemático del sistema, el siguiente paso es implementarlo en el ordenador con Simulink®, paquete de simulación incluido en el programa de cálculo numérico Matlab®.

3.1 Matlab y Simulink

Matlab (MATrix LABoratory) es un programa orientado al cálculo con matrices, al que se reducen muchos de los algoritmos que resuelven problemas de Matemática Aplicada e Ingeniería.

Tal y como lo describen sus creadores, Matlab es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Gracias a este programa, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java.

Se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional [20].

Por otro lado, Simulink es una aplicación que permite diseñar y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo.

Simulink dispone de una serie de utilidades que facilitan visualizar, analizar, guardar y exportar los resultados de simulación. Junto a Matlab, se emplea profusamente en ingeniería de control, sistemas embebidos, mecatrónica, etc. [21].

3.2 Modelo en Simulink

A continuación se muestra el modelo de control diseñado para el proceso, sus diferentes bloques y las funciones de cada uno de los componentes utilizados para conseguir optimizar el comportamiento del sistema. Se puede observar que el modelo está implementado en bucle cerrado con las realimentaciones necesarias puesto que el análisis en bucle abierto (sin realimentaciones) no tiene ninguna relevancia.

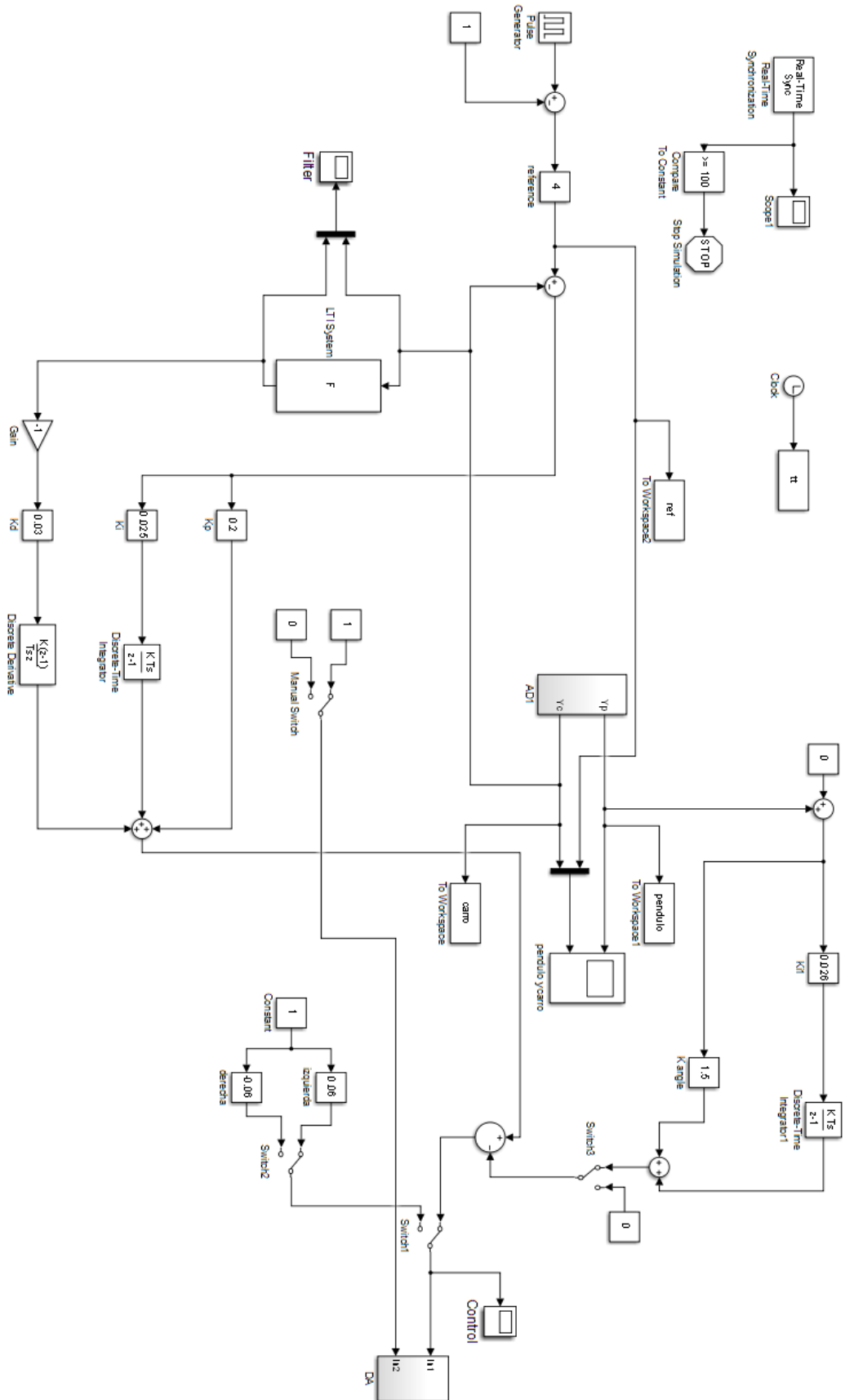


Figura 3.1: Esquema general del sistema en Simulink

Se dividirá el modelo en bloques para su descripción.

3.2.1 Bloque de referencia de entrada al sistema

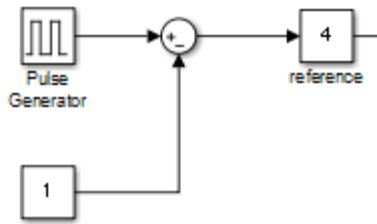


Figura 3.2: Bloque de referencia de la trayectoria del carro

En esta parte del modelo se establece la referencia, es decir, se especifican los límites en los que se moverá el carro. Los parámetros del bloque *Pulse Generator* son los siguientes:

La imagen muestra la interfaz de configuración para el bloque 'Pulse Generator'. El título de la ventana es 'Parameters'. Los parámetros configurados son:

- Pulse type: Time based
- Time (t): Use simulation time
- Amplitude: 2
- Period (secs): 10
- Pulse Width (% of period): 50
- Phase delay (secs): 0
- Interpret vector parameters as 1-D

En la parte inferior de la ventana hay cuatro botones: OK, Cancel, Help y Apply.

Figura 3.3: Parámetros del bloque *Pulse Generator*

De esta forma generamos una onda rectangular de amplitud ± 4 Voltios y con un periodo de 10 segundos, estableciendo de esta manera la frecuencia del sistema en 0,1 Hertzios.

3.2.2 Bloque de control de la posición del carro

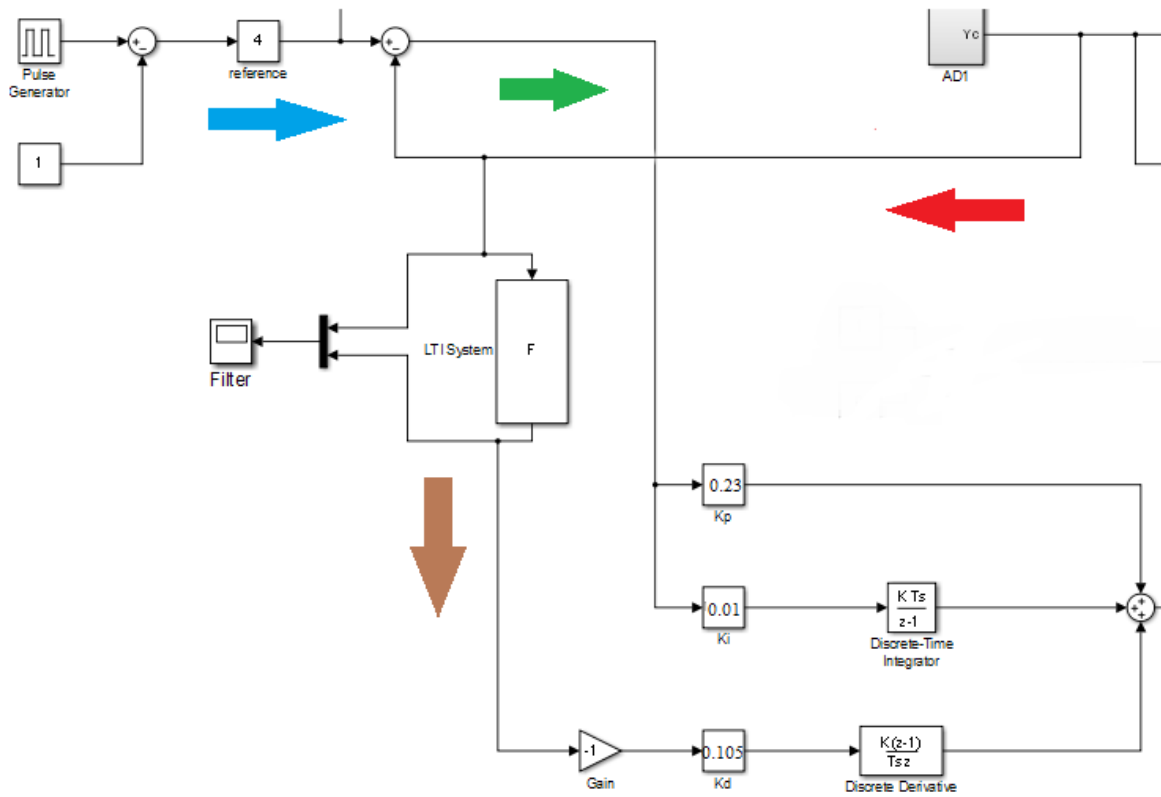


Figura 3.4: Bloque de control para el seguimiento de la referencia del carro

Se calcula el error (flecha verde) presente en la posición mediante la resta entre el valor deseado de la referencia (flecha azul) y el valor actual medido (flecha roja).

A partir de aquí implementamos el regulador PID necesario para conseguir la posición de referencia y para que se mantenga ahí el tiempo establecido por el periodo. Dicho regulador consta de parte Proporcional; de parte Integral: aunque sea muy pequeña es necesaria para lograr que el error de posición sea nulo; y de parte Derivativa.

Esta última pasa antes por un filtro F , que se encuentra en el bloque *LTI System*, y que viene directamente de la lectura de posición del carro (salida Y_c del bloque *ADI*) para minimizar al máximo el ruido existente en la señal. El osciloscopio *Filter* lo utilizamos para corroborar que elimina el ruido que afecta al funcionamiento del sistema.

Nuestro filtro F es un filtro de Butterworth de segundo orden cuya frecuencia de corte, en la que la respuesta cae 3 dB por debajo de la banda pasante, es de aproximadamente 5 Hz. Lo obtenemos en Matlab de la siguiente forma:

```

Command Window

>> T=0.01

T =

    0.0100

orden del filtro (N)
    ^
    |
    v

>> [B,A]=butter(2,0.1)

B =

    0.0201    0.0402    0.0201

frecuencia natural (Wn)
    ^
    |
    v

A =

    1.0000   -1.5610    0.6414

>> F=tf(B,A,T)

Transfer function:
0.02008 z^2 + 0.04017 z + 0.02008
-----
z^2 - 1.561 z + 0.6414

Sampling time: 0.01

```

Figura 3.5: Obtención de nuestro Filtro de Butterworth

Mediante el comando *bode* (*F*) obtenemos el diagrama de Bode de nuestro filtro:

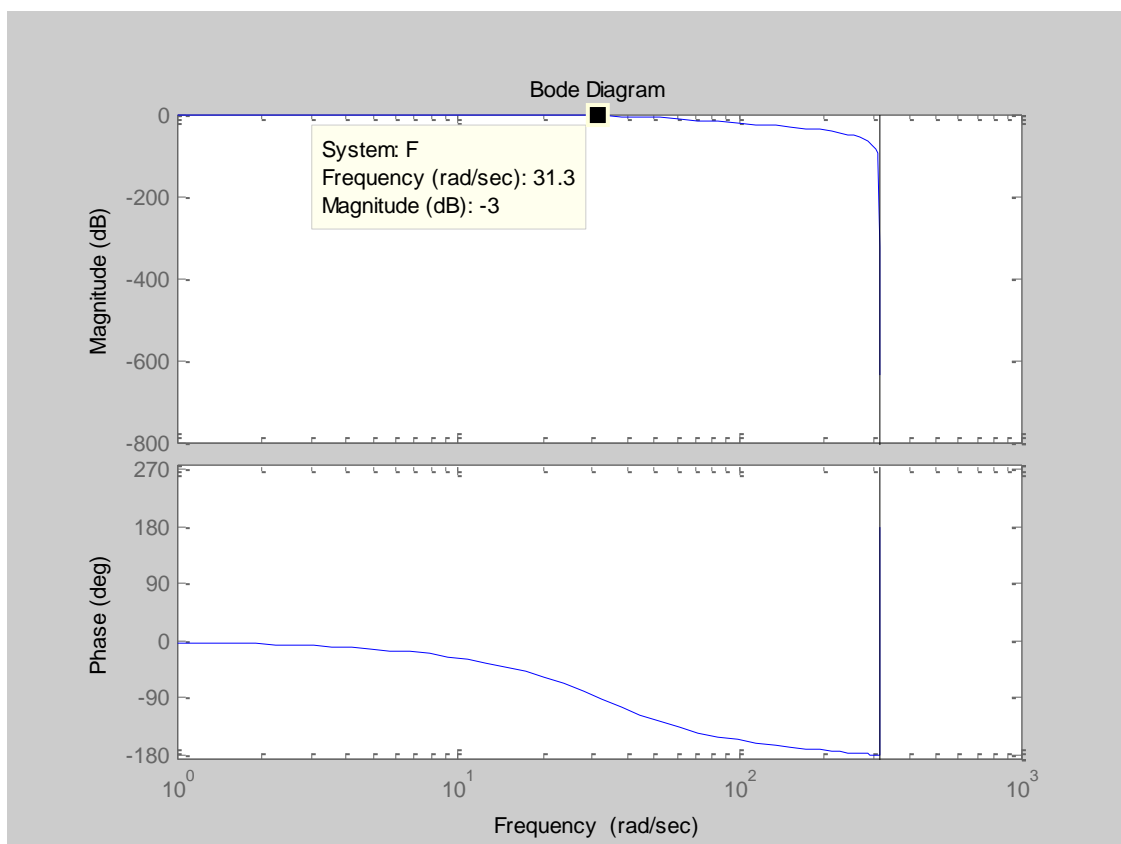


Figura 3.6: Diagrama de Bode de nuestro Filtro de Butterworth

Por último, comentar que las ganancias K_p , K_i y K_d han sido obtenidas después de probar varios tantos de valores para cada una hasta dar con la combinación que mejor se ajustaba por parte del sistema péndulo-carro al seguimiento de la trayectoria. En el Apartado 3.3 entramos más en detalle acerca de la búsqueda de este regulador.

3.2.3 Bloque de control del ángulo del péndulo

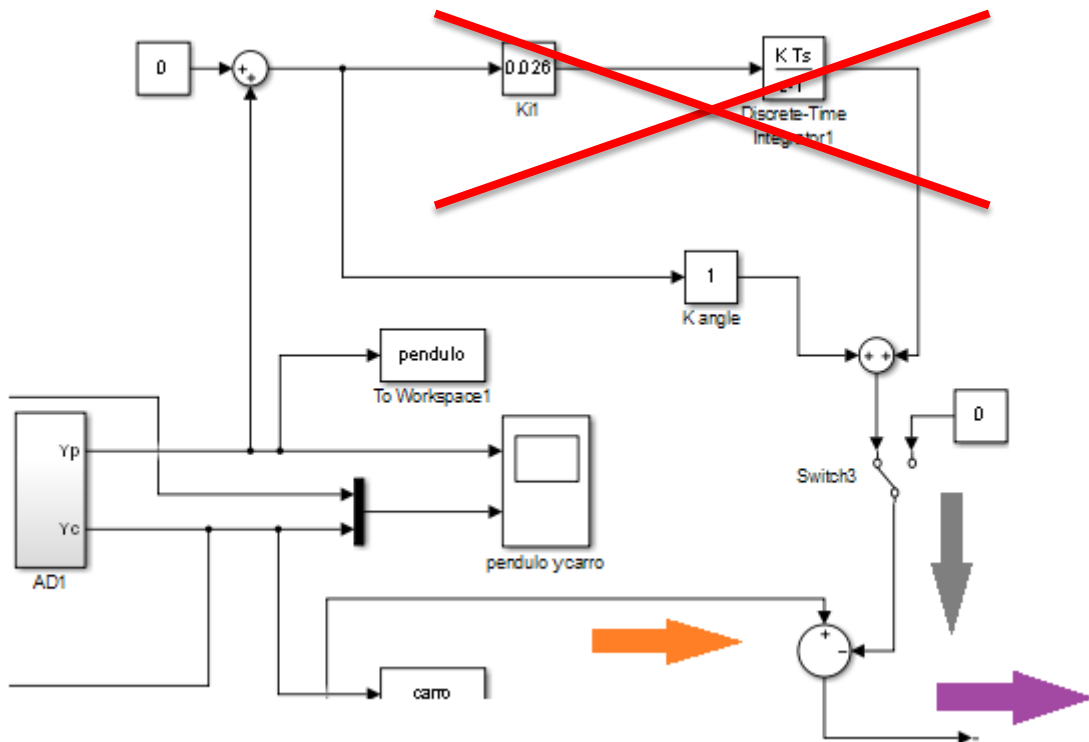


Figura 3.7: Bloque de control del balanceo del péndulo

La señal proviene del sensor angular que lleva acoplado el péndulo (salida Y_p del bloque $AD1$) y después de pasar por el regulador P (flecha gris) se resta a la señal de salida del regulador PID que controla la trayectoria del carro (flecha naranja). La señal de salida (flecha morada) será la señal de entrada al sistema, es decir, la acción de control resultante de los dos reguladores PID y P.

En este caso nuestra referencia es 0 Voltios, que corresponde a la posición vertical hacia abajo, ya que queremos que el péndulo actúe como grúa produciendo las menores oscilaciones posibles. También queremos comentar que en un primer momento añadimos

acción integral, pero más adelante nos dimos cuenta que no era necesaria y la quitamos, dejando únicamente un regulador P (Proporcional) con una ganancia $K_{angle} = 1$.

Por último, el osciloscopio *péndulo y carro* muestra las trayectorias realizadas por ambos, así como la referencia que debe seguir el segundo (Figura 3.8), y el *Switch3* lo añadimos para los casos en que quisiéramos dejar de controlar el balanceo del primero.

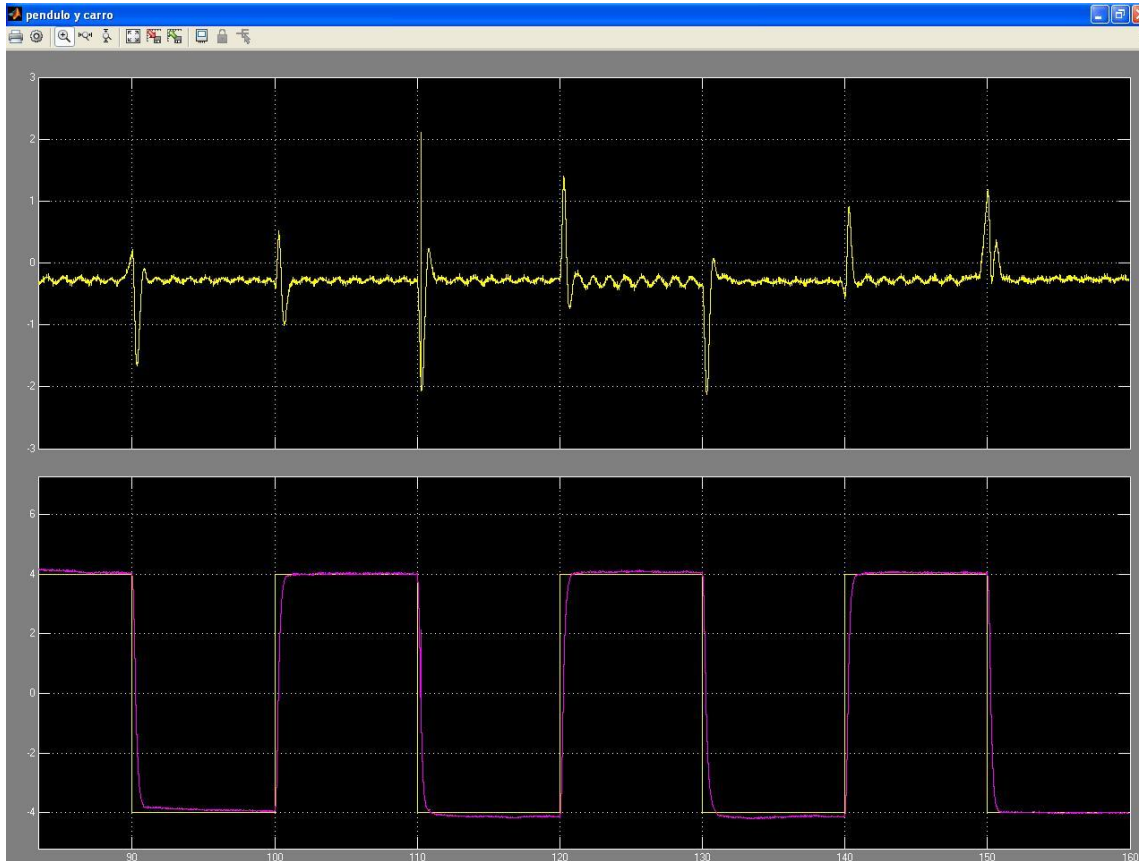


Figura 3.8: Captura de pantalla del osciloscopio *péndulo y carro*

3.2.4 Bloque del sistema péndulo-carro

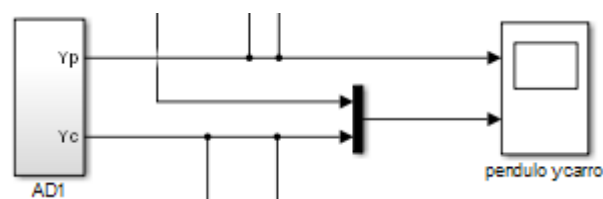


Figura 3.9: Bloque *AD1* con sus salidas Y_p e Y_c

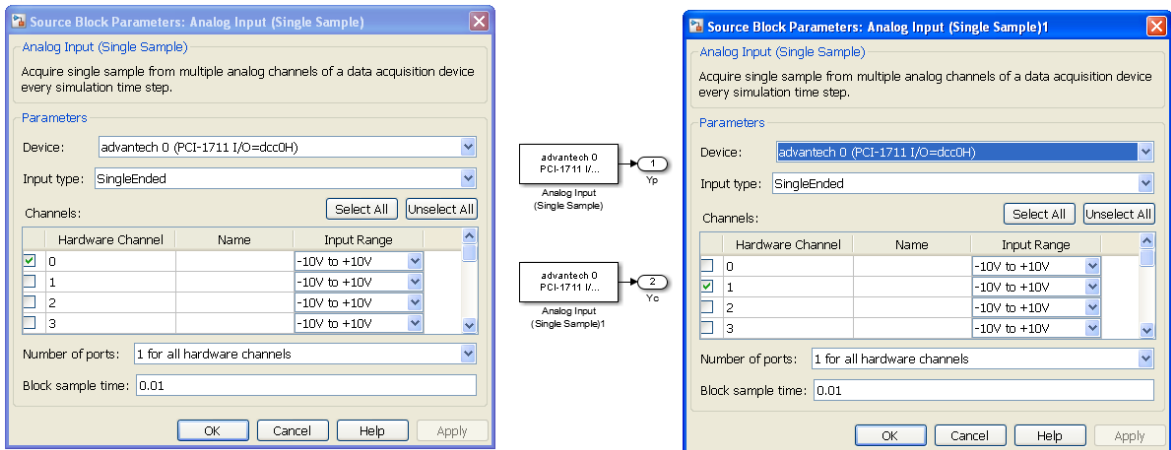


Figura 3.10: Parámetros de los Conversores AD (Análogo-Digital)

Los dos sensores (posición y ángulo) actúan como entradas analógicas. Posteriormente convertimos estos datos analógicos de las posiciones del sistema péndulo-carro en digitales para así poder controlarlas.

Para los datos del ángulo del péndulo utilizamos en el Conversor AD el *Canal 0 (AI.0)* y para los de la posición del carro el *Canal 1 (AI.1)*, ambos con un *Rango de entrada de ±10 Voltios* y con un *Sample Time (tiempo de muestreo) de 0,01 segundos*, esto es, se leen 100 muestras al segundo en cada uno de los sensores.

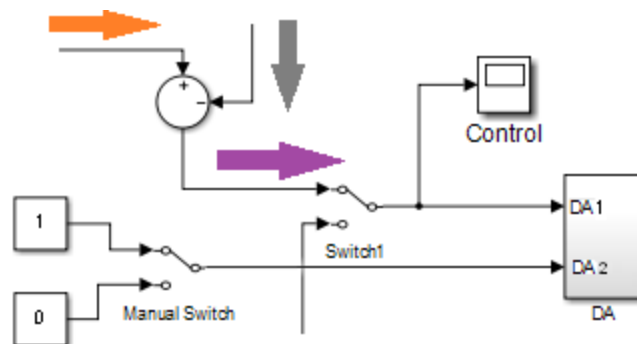


Figura 3.11: Bloque DA con sus entradas DA1 y DA2

La flecha morada representa la acción de control que aplicamos al motor del péndulo lineal, resultante del regulador PID encargado de controlar la posición del carro (flecha naranja) y del regulador P que controla el balanceo del péndulo (flecha gris). El osciloscopio *Control* nos ayuda a ver dicha acción de control.

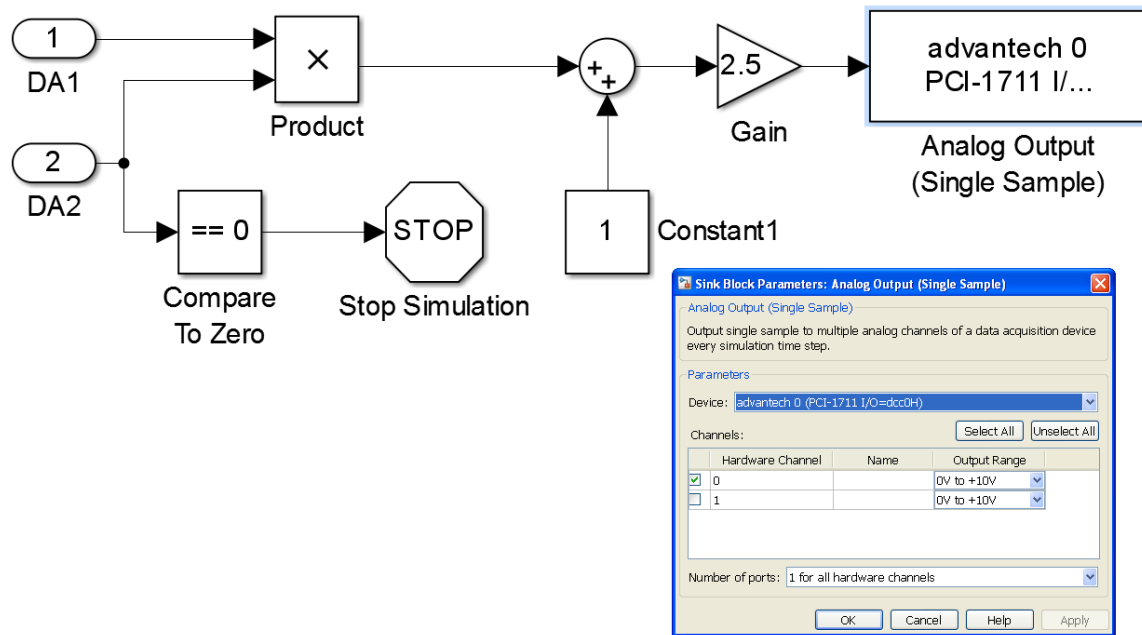


Figura 3.12: Interior del bloque *DA* y parámetros del Conversor DA (Digital-Analógico)

La acción de control (entrada *DA1*) es multiplicada mediante el bloque *Product* con la entrada *DA2*, que como vemos arriba puede tomar los valores *0* ó *1* según la forma en la que tengamos el *Manual Switch*. Está configurado de esta manera ya que si queremos parar la ejecución del programa solo hay que hacer que la señal *DA2* sea un *0*. Esto se consigue gracias a los bloques *Compare To Zero* y *Stop Simulation*.

Siempre que *DA2* sea un *1* estaremos estableciendo que la señal de control se rija por la entrada *DA1*. Los bloques *Constant1* y *Gain*, cuyos valores son *1* y *2.5* respectivamente, nos sirven de tal manera que cuando termina la ejecución del programa el sistema carro-péndulo no pega un golpe violento hacia uno de los extremos de la vía.

A continuación nos encontramos con el bloque *Analog Output*, que es el encargado de convertir la señal digital, procedente de la acción de control, en analógica para así controlar el motor. Para ello hacemos uso, en el Conversor DA, del *Canal 0 (AO.0)* cuyo *Rango de Salida es de 0 a 10 Voltios* y también presenta un *tiempo de muestreo de 0,01 segundos*.

Por último, comentar que no simulamos en ningún momento el proceso, sino que la ejecución se produce en tiempo “pseudo-real”. Decimos esto ya que no se pudo trabajar en modo *External* con la adquisición de datos en tiempo real de Simulink (*Real Time Toolbox Simulink Extension*) debido a un problema con la tarjeta de adquisición de datos (tarjeta DAQ) *Advantech PCI-1711*.

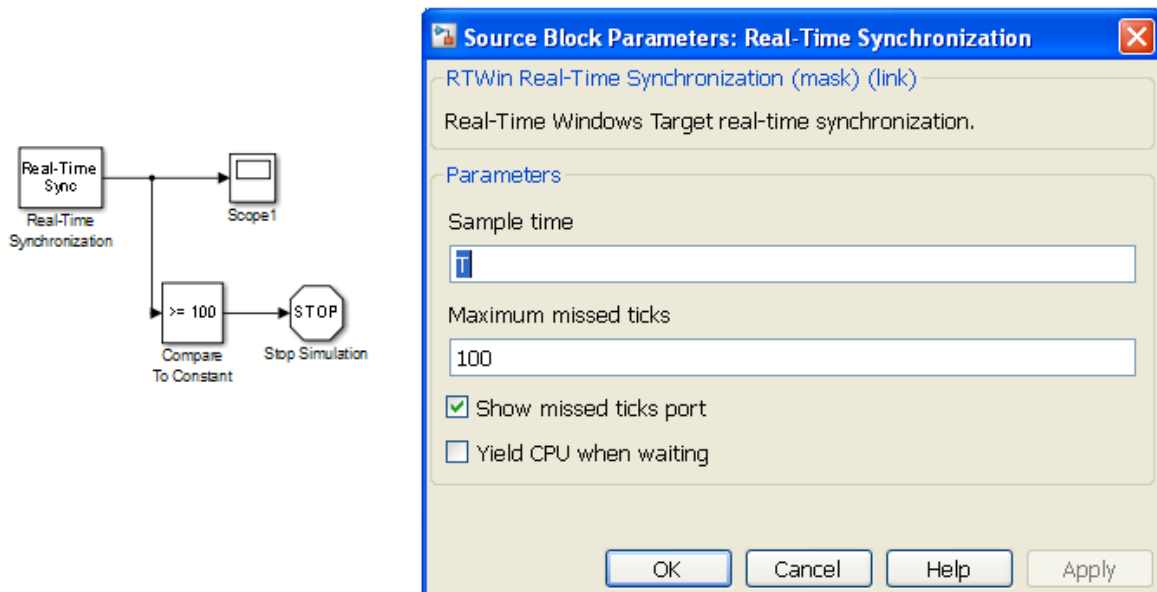


Figura 3.13: Configuración para conseguir el tiempo “pseudo-real” y parámetros de su bloque

Como decíamos, no ejecutamos el proceso en modo *External*, sino que logramos dicho tiempo “pseudo-real” en modo *Normal* y con el bloque *Real-Time Synchronization*, siendo así la forma más parecida a trabajar con la librería de tiempo real de Simulink. En los parámetros del bloque podemos ver que el tiempo de muestreo es igual a T , que como veremos en el Apartado 3.4 va a ser de *0,01 segundos*, y que las máximas muestras perdidas que permitimos son *100*. Gracias a los bloques *Compare To Constant* y *Stop Simulation*, en el momento que se llega a dicho número se para la ejecución del programa.

3.3 Ajuste experimental del regulador PID

Como hemos indicado ya varias veces, trabajamos sobre el método experimental.

La ganancia proporcional siempre debe estar presente y en base a ella se elegirán los otros dos términos. En cuanto a la acción integral, ésta es más adecuada generalmente en dinámicas lentas en las que se necesite eliminar el error estacionario. Como se ha comentado, ninguna de estas dos cosas se da en el movimiento del péndulo. Además, tiende a empeorar el transitorio del sistema, por lo que el término integral, en caso de que lo utilicemos, que así va a ser, tendrá un valor muy bajo y de apoyo a la ganancia proporcional.

El caso del derivativo es muy distinto. Éste actúa sobre la variación del error en el tiempo (sobre la derivada) mejorando la parte transitoria en sistemas muy oscilatorios, “adelantándose” por decirlo de alguna forma, a la respuesta de nuestro sistema.

Por lo dicho, usar un término derivativo encaja perfectamente para controlar un péndulo cuya respuesta es completamente oscilatoria. Un posible inconveniente de su uso sería que tiende a amplificar cambios bruscos en el error (golpes o frenazos al péndulo), ya sea debido a ruido o a cambios en la consigna, pero de nuevo su uso cumple, pues en el péndulo no se preveía que se dieran este tipo de casos [22].

Se probaron distintas combinaciones para el controlador PID hasta dar con el que mejor seguía la trayectoria de la referencia:

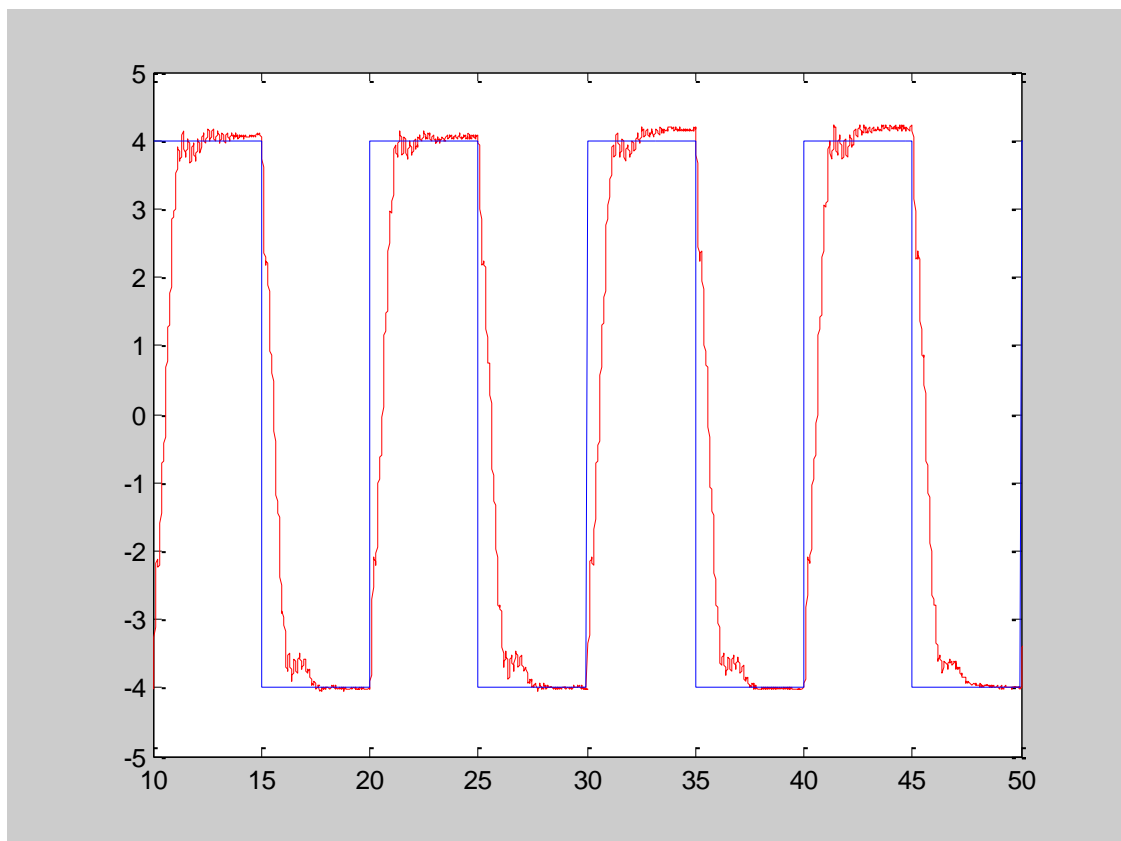


Figura 3.14: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.225$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.115$

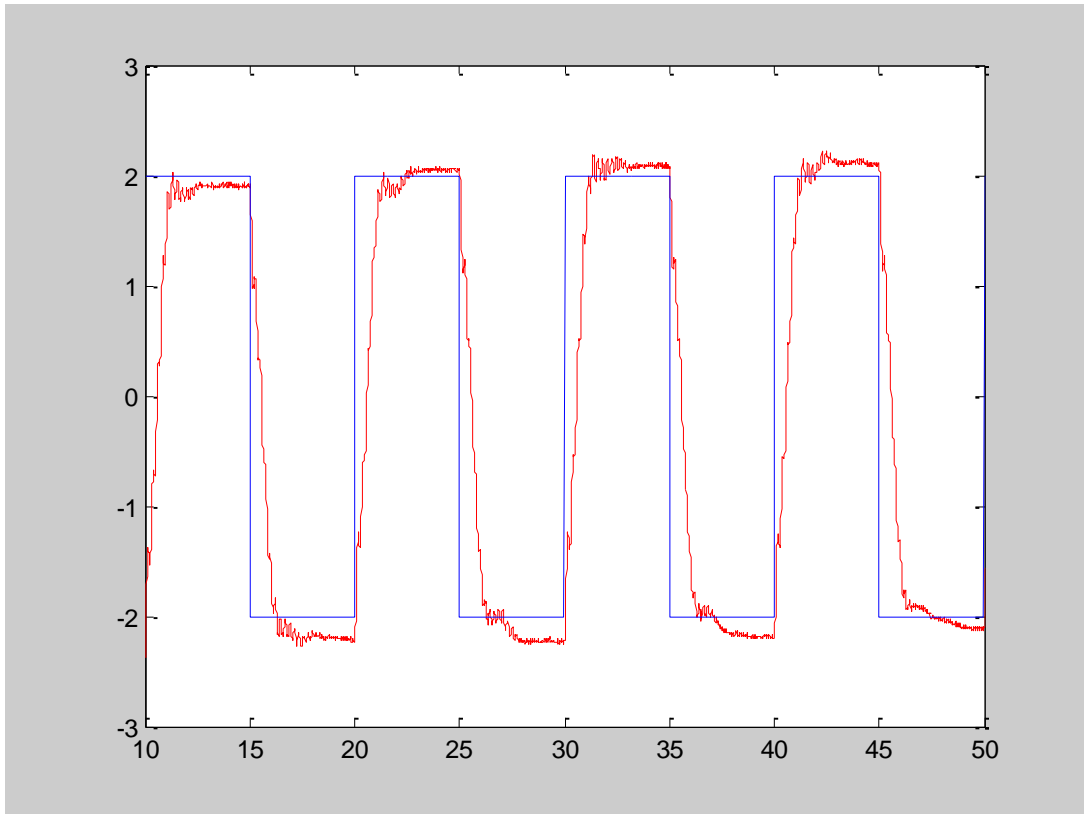


Figura 3.15: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.2$ $K_i = 0.03$ $K_d = 0.1$

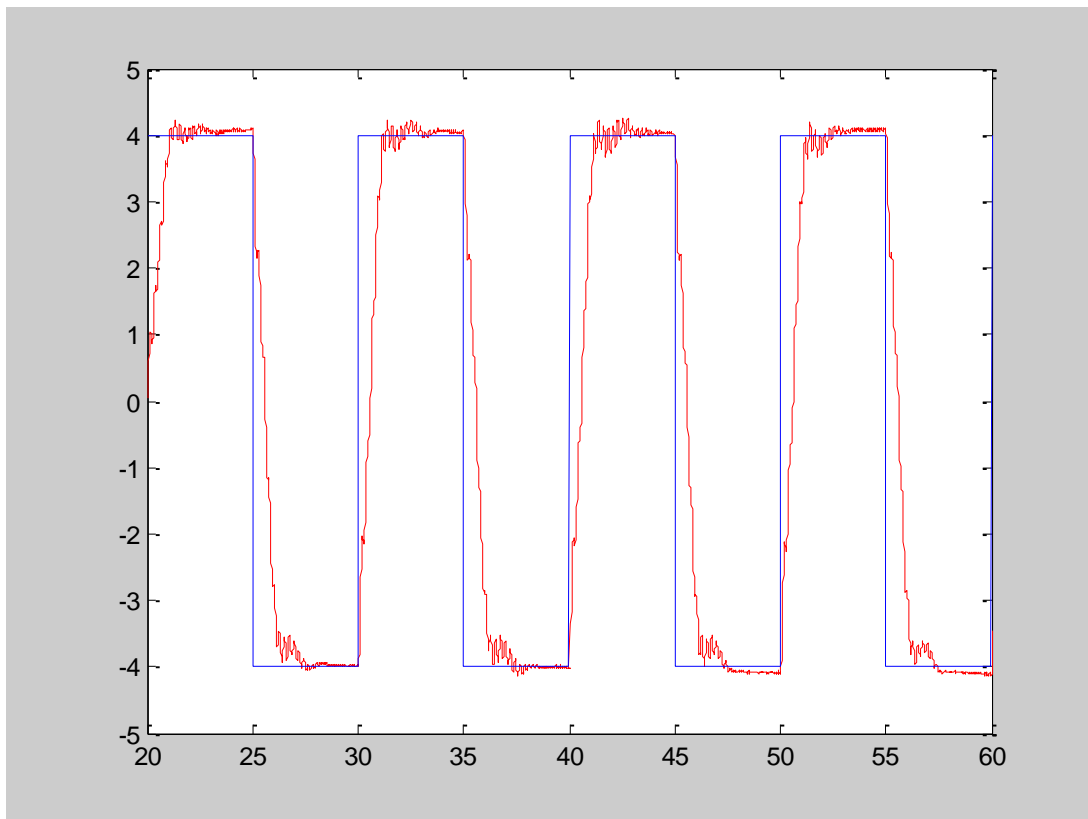


Figura 3.16: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.23$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.115$

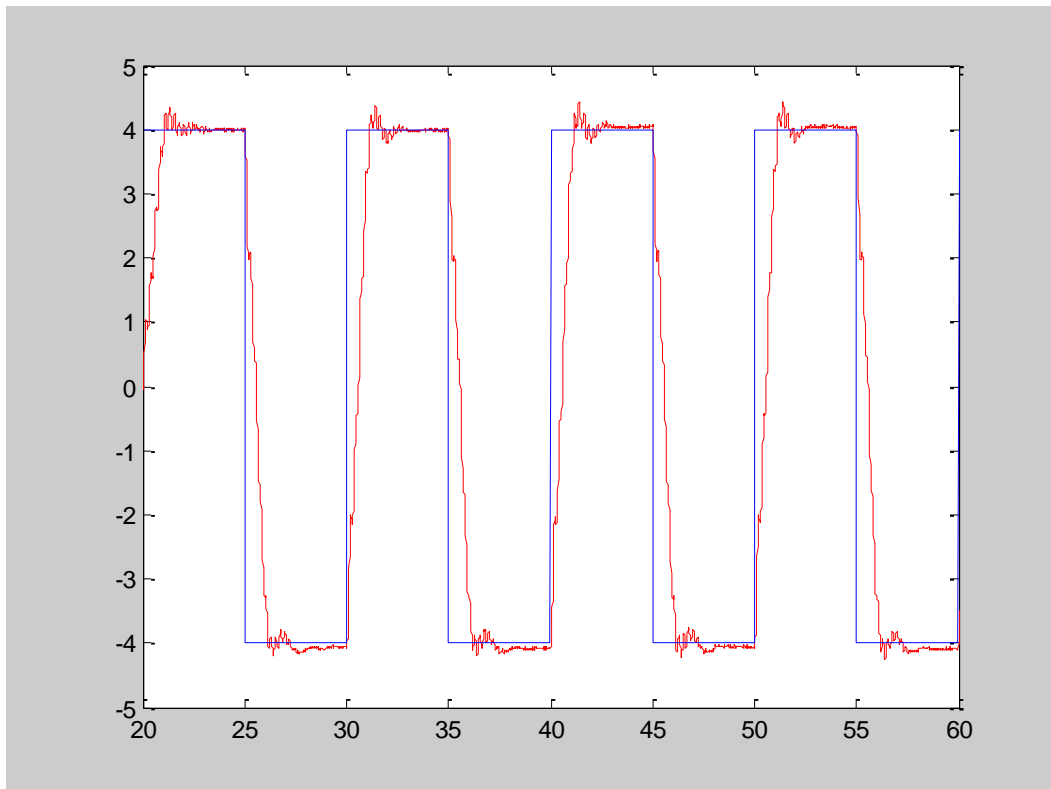


Figura 3.17: Trayectoria del carro con: $K_p = 0.23$ $K_i = 0.01$ $K_d = 0.105$

Después de varias pruebas vemos que el comportamiento es similar, pero el regulador que mejor sigue la referencia de posición del carro y el que utilizamos para analizar el efecto del control por eventos es el que tiene la configuración que mostramos en la Figura 3.17.

3.4 Obtención del periodo de muestreo (T) óptimo

En este apartado se evaluarán distintos valores del periodo de muestreo (T) que se van a utilizar en el proceso y sus posibles efectos, llegando a la conclusión de cuál es el óptimo a la hora de ejecutarlo.

El periodo de muestreo que recomienda el fabricante es de $T = 0.01s$, ya que al tratarse de un sistema con dinámica muy rápida se necesitan actualizaciones muy frecuentes para conseguir un funcionamiento óptimo. A continuación se verá sobre el proceso el efecto de aumentar dicho periodo T :

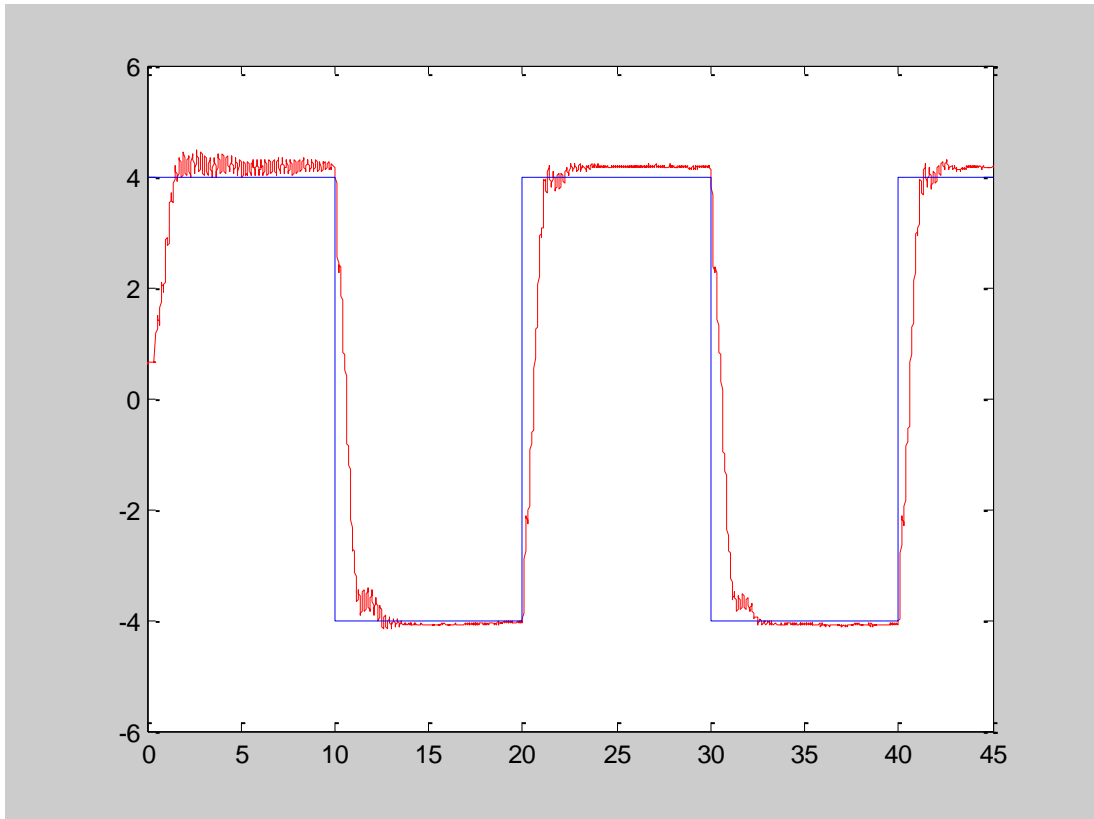


Figura 3.18: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.01$ segundos

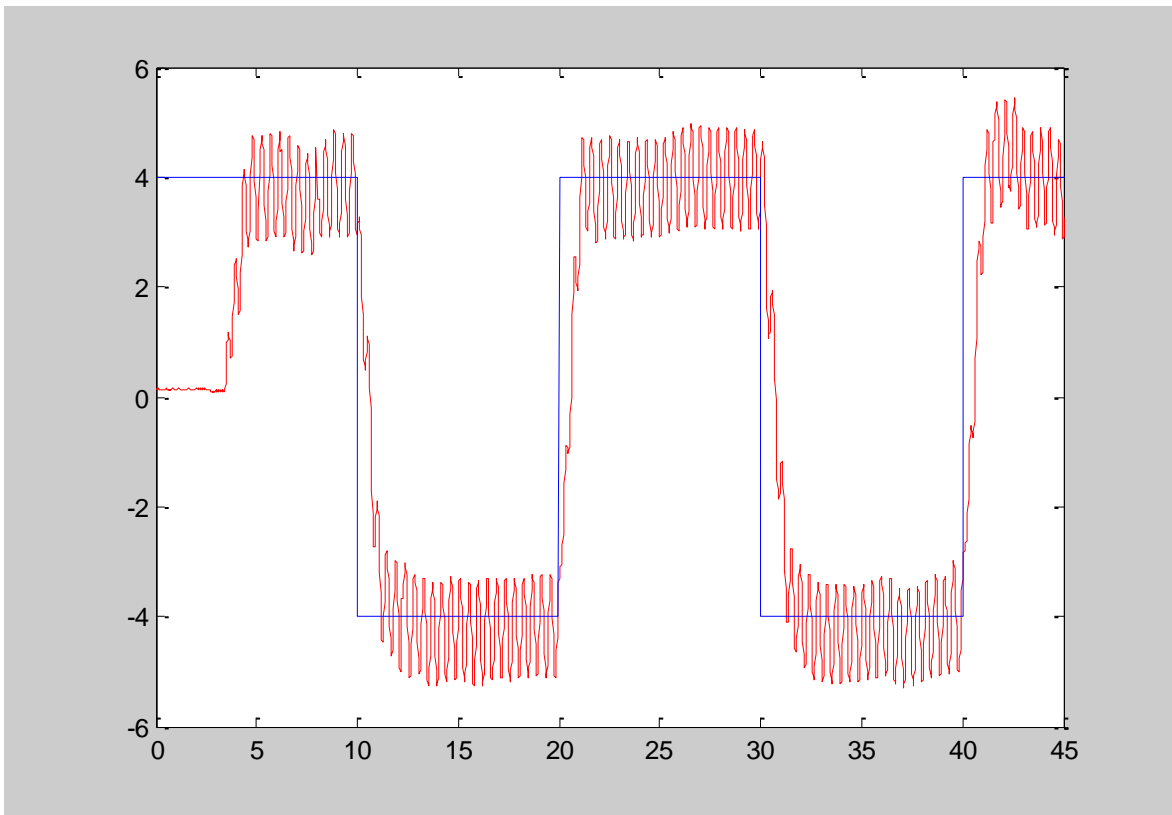


Figura 3.19: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.02$ segundos

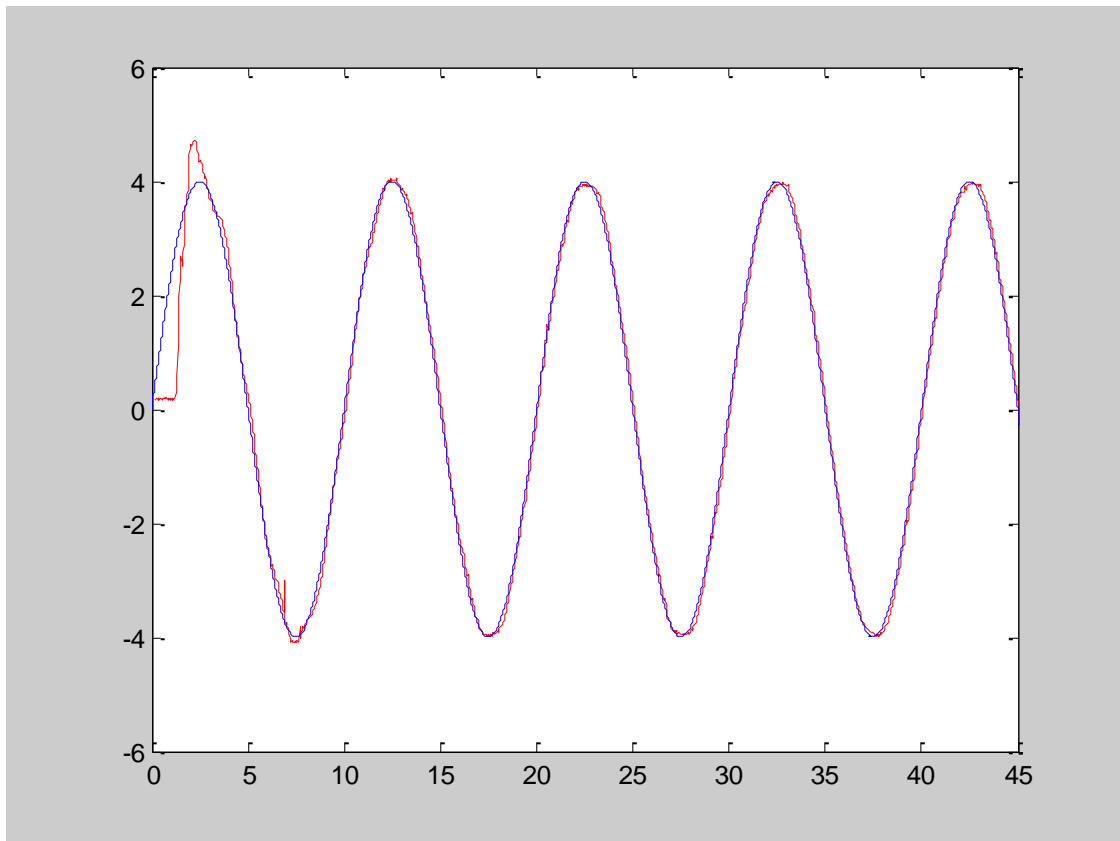


Figura 3.20: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.02$ segundos

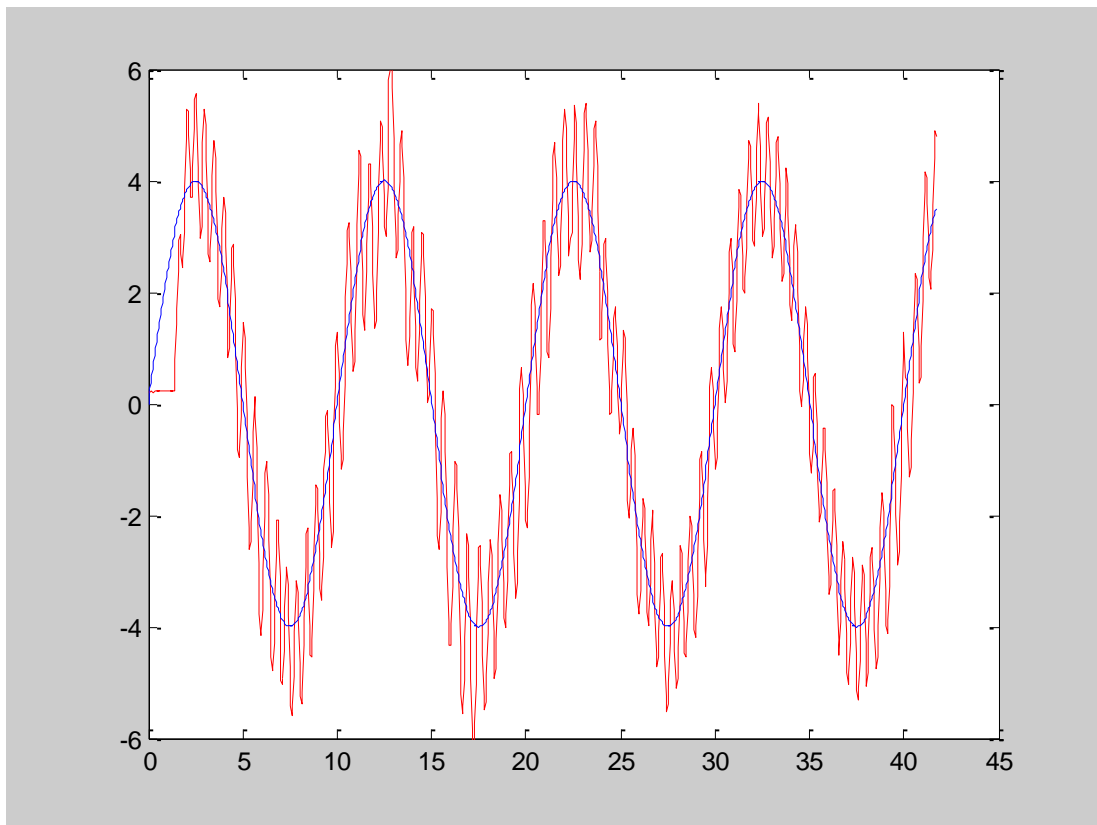


Figura 3.21: Respuesta de la posición del carro con $T = 0.05$ segundos

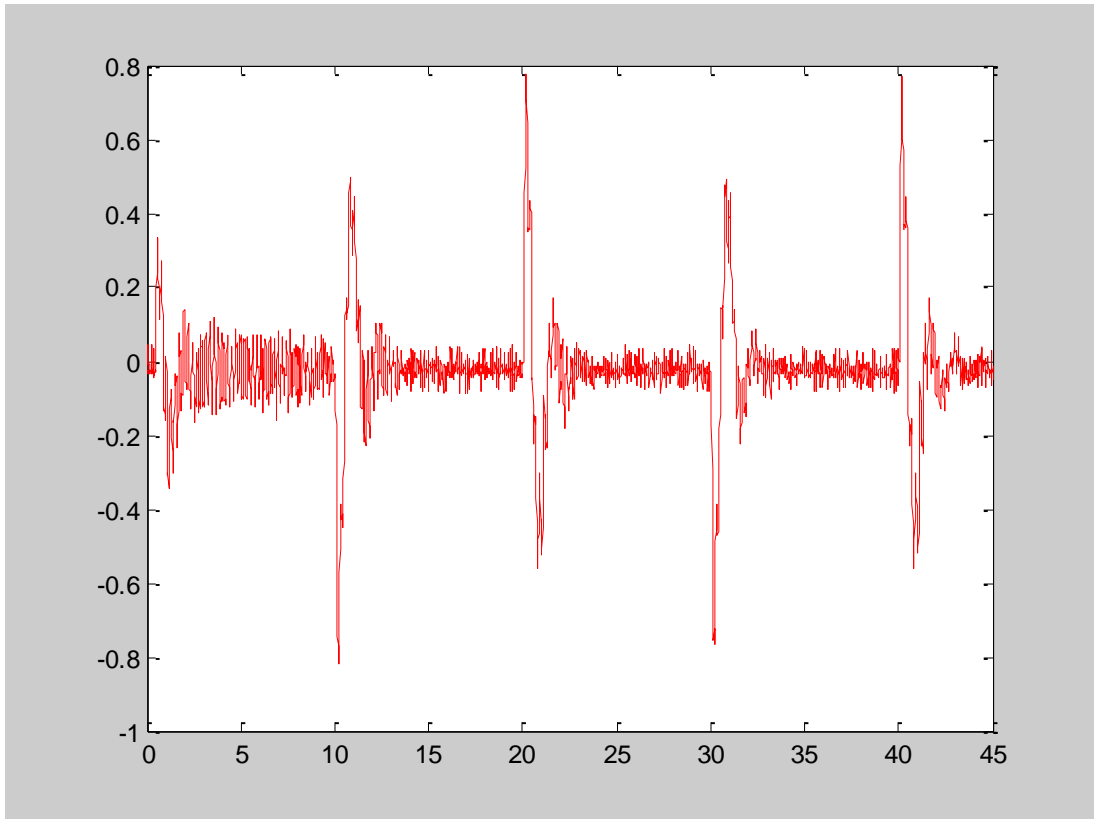


Figura 3.22: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.01$ segundos

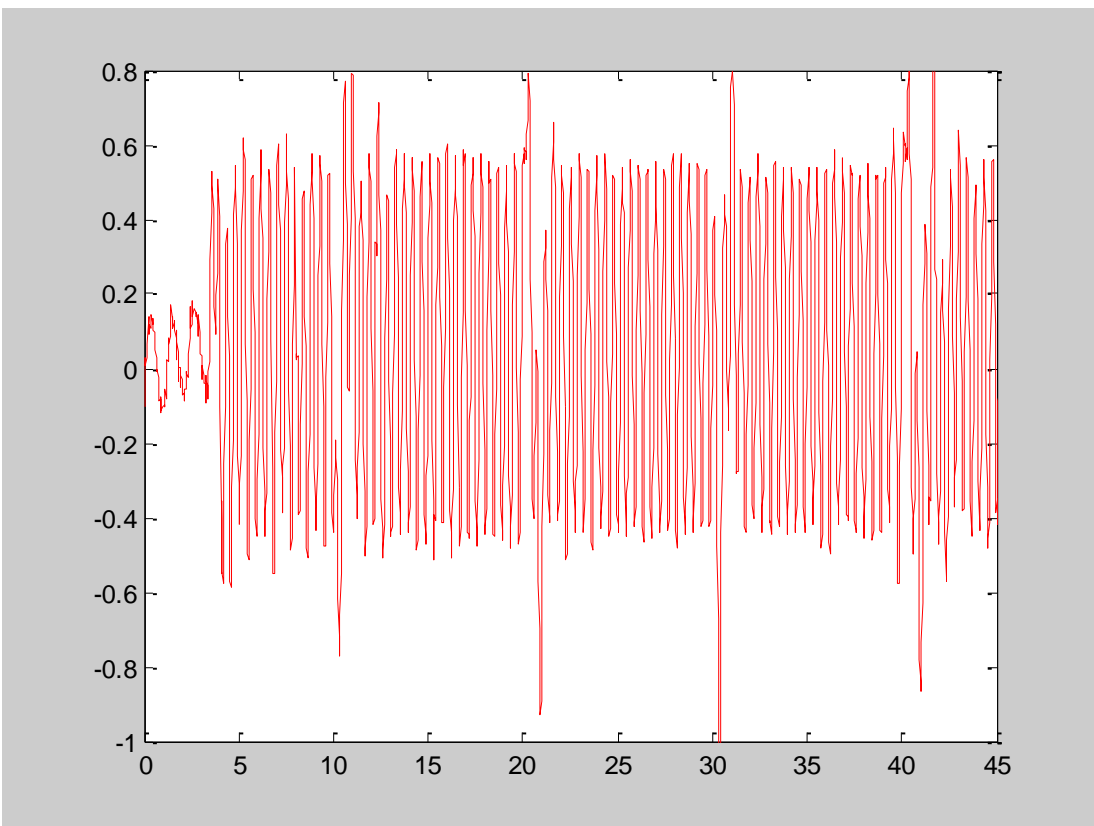


Figura 3.23: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.02$ segundos

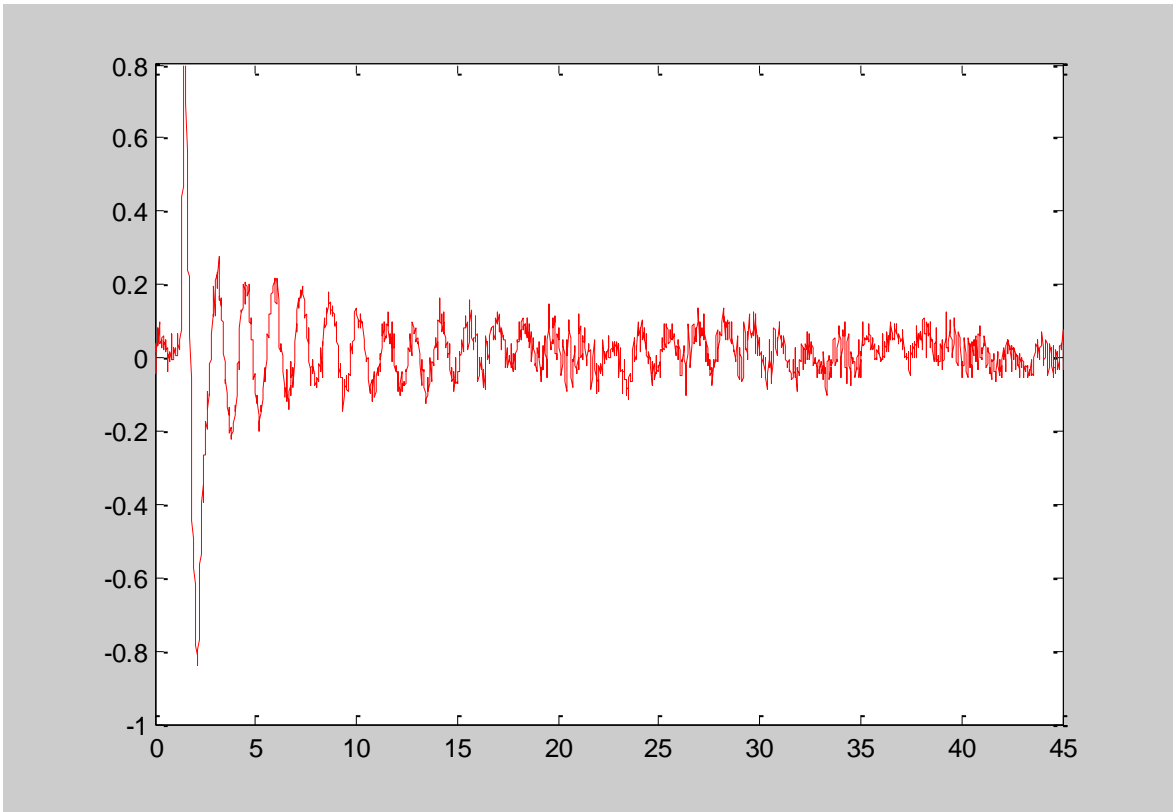


Figura 3.24: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.02$ segundos

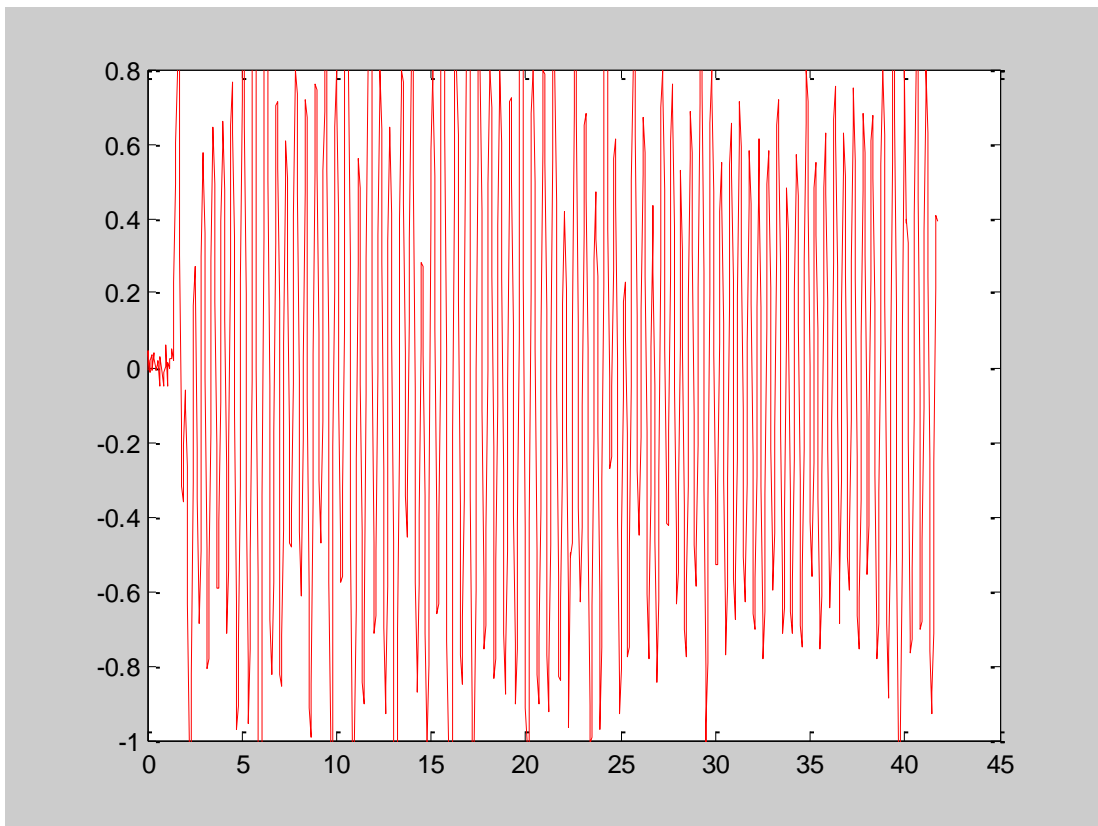


Figura 3.25: Respuesta del ángulo del péndulo con $T = 0.05$ segundos

Se puede observar en las figuras anteriores que la respuesta tanto de la posición del carro como del ángulo del péndulo empeoran al aumentar el tiempo de muestreo, llegando el comportamiento del sistema a degradarse ya con $T = 0.02$ segundos. Esto no ocurre cuando la referencia que introducimos al sistema es una onda senoidal, donde es con $T = 0.05$ segundos cuando empieza a funcionar mal.

Por lo tanto, el valor aconsejado por el fabricante, además de ser el mínimo periodo de muestreo de nuestra tarjeta DAQ, es suficiente y el más adecuado ($T = 0.01$ s.).

4. Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es llevar a cabo el control del Péndulo Feedback (Figura 4.1) que se encuentra en el Laboratorio de Investigación I del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA), utilizando MATLAB® y Simulink® como herramientas de software.

En primer lugar, pretendemos conseguir que el péndulo realice un desplazamiento a través de una trayectoria deseada lo más aproximado posible a la referencia de entrada introducida en el sistema, y a su vez, eliminar también en lo posible el balanceo del péndulo que va unido al carro, el cual porta una carga unida al extremo de éste.

Dicho de otra manera, dada una consigna de posición y partiendo del péndulo inmóvil, el vehículo tratará de alcanzar esa posición sin producir oscilaciones en el péndulo e intentando frenarlo una vez se dirige a la posición deseada, es decir, habrá un control simultáneo de la posición del carro y del balanceo del péndulo.

Una vez obtenido lo anterior, se pretende diseñar una estrategia de control en la que se decida cuándo enviar o no los nuevos datos de lectura, a través de una red de comunicación, según difieran respecto a instantes anteriores cierto umbral establecido. Además pretendemos que esta técnica de control no difiera en prestaciones de un control convencional, pero sí que minimice el ancho de banda consumido por la red.



Figura 4.1: Péndulo Feedback [23]

4.1 Antecedentes y Trabajos Previos

El control del péndulo es un problema que ya ha sido resuelto previamente usando una gran variedad de técnicas de control tales como: técnicas lineales como el control PID, el método del regulador lineal cuadrático (LQR) y el control por asignación de polos en el espacio de estados; técnicas no lineales como la realimentación de la posición, el control robusto y el control basado en energía y pasividad. Este proyecto se concentra solo en el control PID.

Tales técnicas consisten en una primera parte en la cual se realiza un modelo matemático del sistema en cuestión, obteniendo las ecuaciones que lo describen y haciendo un modelo del sistema a partir de ellas, para que las variables teóricas que se manejan se correspondan con las variables que se utilizarán en el modelo físico. En la segunda parte se realiza el diseño de una estrategia de control usando las herramientas Matlab o LabVIEW para que actuando sobre el carro lleguemos a mantener la verticalidad del péndulo. En cambio, la primera parte no se contempla en este proyecto ya que trabajamos experimentalmente sobre el modelo real.

Por otra parte, en los sistemas de control basados en red, el uso de ancho de banda es vital cuando hay varios procesos compartiendo el medio de comunicación y para minimizar este ancho de banda consumido existen varias técnicas que lo logran. Lo que sucede es que hacer esto repercute directamente en una pérdida de prestaciones en el comportamiento del sistema, por lo que hay que llegar a un compromiso entre el ancho de banda que queremos reducir y las prestaciones que vamos a perder.

Los proyectos final de carrera escritos por Enrique Vázquez Vidal y Ouassim Kheyyali, titulados “*Muestreo por eventos: control del péndulo invertido simple*” y “*Control con umbral adaptativo del péndulo invertido rotacional*” presentados en Abril y Julio del 2013, respectivamente, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID) tienen como objetivo reducir el número de muestras transmitidas para también reducir el ancho de banda consumido sin que se produzca una degradación significativa del sistema.

Como solución a este proyecto se optó por el uso de un control basado en eventos mediante un umbral constante, que consiste en transmitir información solo cuando haya cambios significativos, es decir, mayores que el umbral fijado. Solución que ha dado buenos resultados y permitido un ahorro en el ancho de banda consumido.

4.2 El problema del péndulo

Tal como muestra la Figura 4.2, con este modelo se pueden simular tres casos reales. El primer caso, sobre el cual trata este proyecto, modela el comportamiento de un puente grúa: el móvil se desplaza y la carga está suspendida, de modo que hay que controlar el balanceo de la misma. En el segundo caso se trata de llevar a la posición vertical una carga que está suspendida, por lo cual es necesario balancearla de forma adecuada. El tercer caso es el ejemplo típico de péndulo invertido, equivalente al control de un proyectil.

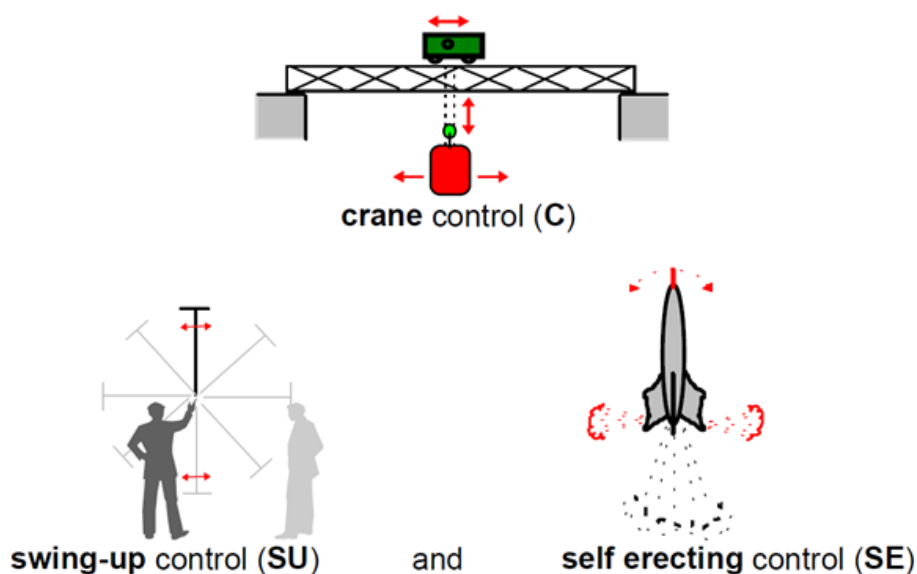


Figura 4.2: Los tres problemas de control presentados [11]

Las posiciones verticales estacionarias del péndulo (hacia arriba y hacia abajo) son posiciones de equilibrio cuando no se está aplicando ninguna fuerza. En la posición hacia arriba, una pequeña desviación de la misma resulta en un movimiento inestable.

Generalmente el problema del control del péndulo es llevar el palo hacia una de las posiciones de equilibrio y preferiblemente hacerlo lo más rápido posible, con pocas oscilaciones, y sin dejar que el ángulo y la velocidad sean demasiado grandes. Después de alcanzar la posición deseada, nos gustaría mantener el sistema en ese estado a pesar de las perturbaciones que se puedan generar.

Y eso es lo que deseamos lograr en este proyecto, además de hacerlo no transmitiendo el total de los datos de lectura, sino solo aquellos que consideremos significativos pero sin empeorar así el funcionamiento del sistema, es decir, queremos reducir el ancho de banda consumido lo máximo posible pero sin perder prestaciones.

4.3 Planteamiento de soluciones alternativas

En este apartado proponemos algunas soluciones alternativas a la solución adoptada:

- La solución más sencilla es trabajar con referencias de bajas frecuencias, por lo que de esta manera el sistema realizaría un trayecto lento donde no aparecerían oscilaciones del péndulo, evitando así el aplicar el control adicional al sistema destinado a la reducción de este balanceo.
- También se puede reducir la longitud del péndulo y así provocar oscilaciones de menor amplitud, pero querríamos trabajar con una longitud media.
- Otra posible solución para reducir el consumo de ancho de banda es la de aumentar el periodo de muestreo T , pero como hemos visto ya, esta opción la descartamos ya que los errores aumentan e incluso se puede llegar a un mal funcionamiento del sistema.

4.4 Justificación de la solución adoptada

Queremos conseguir que el péndulo realice una trayectoria un tanto forzada al punto de que mantenga una velocidad suficiente como para apreciar oscilaciones considerables.

A continuación diseñamos un controlador proporcional realimentado del movimiento angular obtenido desde el sensor que dispone el sistema. Este regulador hará que el carro anule o reduzca considerablemente estas oscilaciones.

El resultado final será haber conseguido que el péndulo realice una buena trayectoria, muy aproximada a la referencia ideal introducida al sistema, y además apreciar cómo no existe balanceo o se ha reducido casi por completo al aplicar la acción de control realimentada del desplazamiento angular del péndulo.

Otra solución importante añadida al sistema es un pulsador que actúa como parada de emergencia. En el momento que activamos el pulsador, el carro se detendrá en el punto del recorrido en el que pulsamos el mismo, pero no instantáneamente ya que a su vez también tiene que eliminar las oscilaciones del péndulo. El equipo contiene un pulsador físico de parada de emergencia, pero el adicional implementado en Simulink aporta una gran mejora debido a que equilibra el sistema no simplemente anulando la señal de entrada (acción de control) al mismo en el momento de la parada.

4.4.1 Justificación de la elección del péndulo lineal

El objetivo de este trabajo es demostrar que la estrategia de un control basado en umbrales mencionado anteriormente se puede aplicar a una planta real con un ahorro significativo en el consumo del ancho de banda.

En el control convencional una manera fácil de ahorrar ancho de banda es aumentando el periodo de muestreo, es decir, disminuyendo la frecuencia de control. Esto es simple y eficiente, pero solo es útil cuando los requisitos de tiempo de muestreo de la planta controlada son bajos como por ejemplo en el control de temperatura de un horno, ya que el sistema del péndulo requiere de acciones rápidas. Cuando controlamos una planta con constantes de tiempo pequeñas, la frecuencia límite inferior de control se consigue fácilmente. En este caso, aumentar más el periodo de muestreo dará lugar a una

degradación del rendimiento. La estrategia propuesta solo tiene sentido si es mejor que la solución convencional por lo que se debe comprobar en condiciones adversas, es decir, en los límites de la frecuencia de control. La planta a controlar será el péndulo lineal y ha sido elegido por varias razones:

- El péndulo lineal es un problema de control clásico utilizado frecuentemente como referencia para medir la calidad de las distintas estructuras de control.
- El péndulo lineal es un ejemplo de sistema SIMO: una única entrada de control y múltiples salidas (estados), en este caso con dos señales a la realimentación, que se puede utilizar para demostrar las ventajas del control de bucle cerrado. Al transmitirse bastante información entre el controlador y la planta podremos reducir el consumo de ancho de banda en gran medida gracias al control por eventos.
- El péndulo lineal está disponible en nuestro laboratorio y por lo tanto la estrategia de control propuesta puede implementarse en condiciones reales y no solo sobre el modelo de simulación.

4.4.2 Justificación de la elección del control por eventos

Esto es, la elección de una serie de valores que determinaremos como el cambio menor que debe sufrir una variable a comunicar para considerarlo significativo y por lo tanto un cambio en la variable suficientemente grande para considerar que merezca la pena enviarlo.

Por ejemplo, para el sensor se guarda el dato utilizado anteriormente y la nueva medida se mandará solo si la resta del dato utilizado anteriormente menos la medida actual en valor absoluto supera el valor elegido. Si no se superase, el valor guardado actual será el anterior.

Existen dos formas con las que se puede abordar este problema: el control multifrecuencia o el control por eventos, en este caso en particular, basado en umbrales. Hemos decidido optar por la segunda proponiendo el control multifrecuencia como trabajo futuro por los siguientes motivos [24]:

- El control basado en umbrales mantiene el controlador, mientras que para un control multifrecuencia habría que modificarlo. Si bien es verdad que el control basado en umbrales podría mejorarse mediante un control híbrido, en el que un pequeño controlador local en la planta calculara pequeñas modificaciones de la acción de control cuando la planta decidiese no comunicar el nuevo valor de las variables de interés.
- El control multifrecuencia es verdad que no manda cierta información a través del canal de comunicación pero la información que envía es periódica y no se puede modificar, es decir, si enviamos una muestra cada 5 segundos y en el momento en el que toca enviar otra muestra el canal de comunicación está ocupado, podemos tener problemas. El control basado en umbrales manda más información cuando lo necesita, y si por ejemplo en un estacionario no necesita enviar apenas muestras no tiene por qué enviarlas.

5. Descripción detallada de la solución adoptada

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, la solución adoptada en este proyecto consiste en usar un control basado en eventos mediante un umbral constante, es decir:

- Calculamos una tolerancia cuyo valor, como veremos más adelante, será el valor medio de las diferencias entre valores leídos en dos instantes seguidos durante el tiempo de ejecución del proceso. Esta tolerancia nos sirve en un primer momento para hacernos una idea de los valores por los que se ronda el umbral.
- A continuación, durante el proceso, se calcula la diferencia entre los valores de información leída en el instante actual t_1 con la del instante anterior t_0 .
- Si esta diferencia es mayor que el umbral fijado se transmite la información actual, esto es, se produce un evento; y en el caso contrario no se transmite nada, ahorrando así ancho de banda ya que el sistema mantiene la información anterior.

Se consigue así un muestreo adaptativo, pues toda la información se muestrea cada T segundos, pero no toda se envía, ya que depende de si supera o no el umbral establecido.

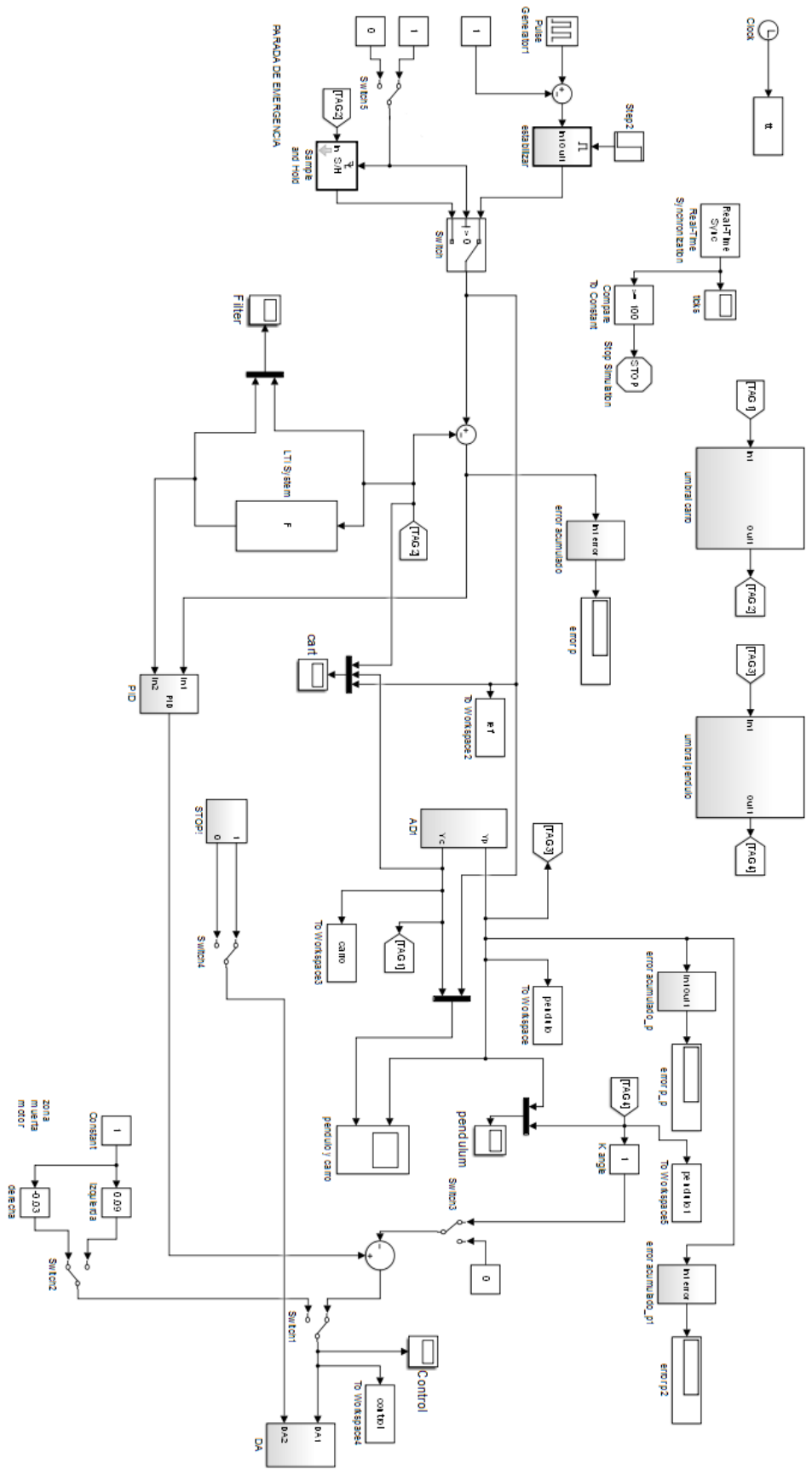


Figura 5.1: Modelo utilizado en el proyecto

5.1 Diseño del sistema

Una vez visto el modelo general que controla el proceso, se procede a describir los bloques utilizados para definir el umbral y analizar los resultados obtenidos.

Para ello, en primer lugar se implementan los bloques para el control del umbral en la realimentación de la posición del carro. Una vez obtenidos los resultados se procede de la misma forma para la realimentación del ángulo del péndulo y finalmente se combinan los dos umbrales. Los resultados obtenidos así como las conclusiones se detallarán en apartados posteriores.

5.1.1 Cálculo de la tolerancia

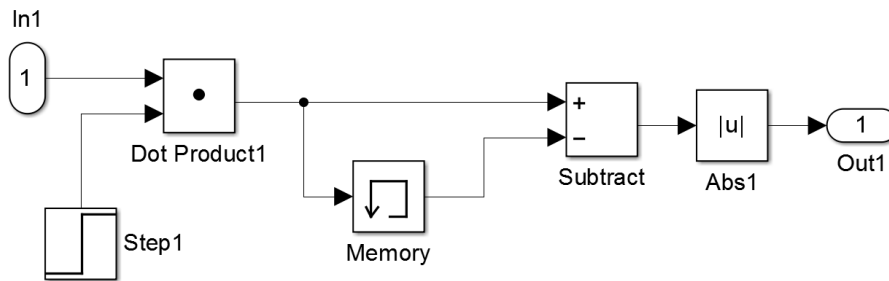


Figura 5.2: Bloques para definir la tolerancia

Dentro de *umbral carro* encontramos el bloque *diferencia* y, sabiendo que la señal circula hacia la izquierda, a continuación detallamos el funcionamiento de los bloques.

En muchas partes del modelo tenemos unos bloques llamados *Step*, *Step1*, *Step2*, etc., encargados de iniciar la toma de datos al segundo 20 de la ejecución:

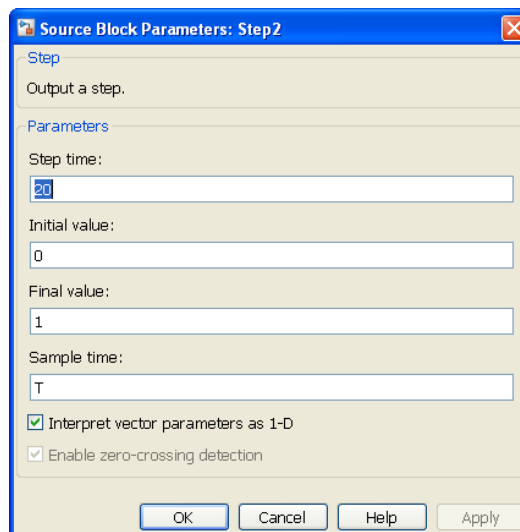


Figura 5.3: Parámetros de los bloques *Step*

La señal *In1* se multiplica por el *I* que produce el *Step* y en la rama superior de la bifurcación se transmite el dato en el instante actual *t1*. Por el inferior, gracias al bloque *Memory*, se obtiene el dato transmitido en el instante anterior *t0*.

El bloque *Substract* sirve para obtener el resultado de la resta del valor de ambos datos y a continuación con el bloque *Abs1* se obtiene el valor absoluto de este resultado.

Estos valores se guardan en un vector mediante el bloque *To Workspace*, lo que nos permite una vez terminada la ejecución del proceso hallar el valor medio de las diferencias previamente calculadas usando el siguiente comando en Matlab:

```
>> tolerancia = mean ( dif_th ( 2000 : 8000 ) )
```

La razón de calcular la media solo para los valores comprendidos entre el instante 20s y 80s (duración total de ejecución) es para dejar tiempo suficiente para que el sistema se estabilice. Esto es debido a que el comportamiento inicial del sistema depende de la inicialización del usuario, consideración que se usará para todos los cálculos, evitando así datos que pueden dar lugar a desviaciones importantes.

5.1.2 Error acumulado de la posición del carro

Un dato importante para el análisis del sistema y la viabilidad de la solución adoptada es el error total acumulado en la realimentación. La relación que existe entre éste y el ancho de banda utilizado es crucial para extraer las conclusiones del estudio.

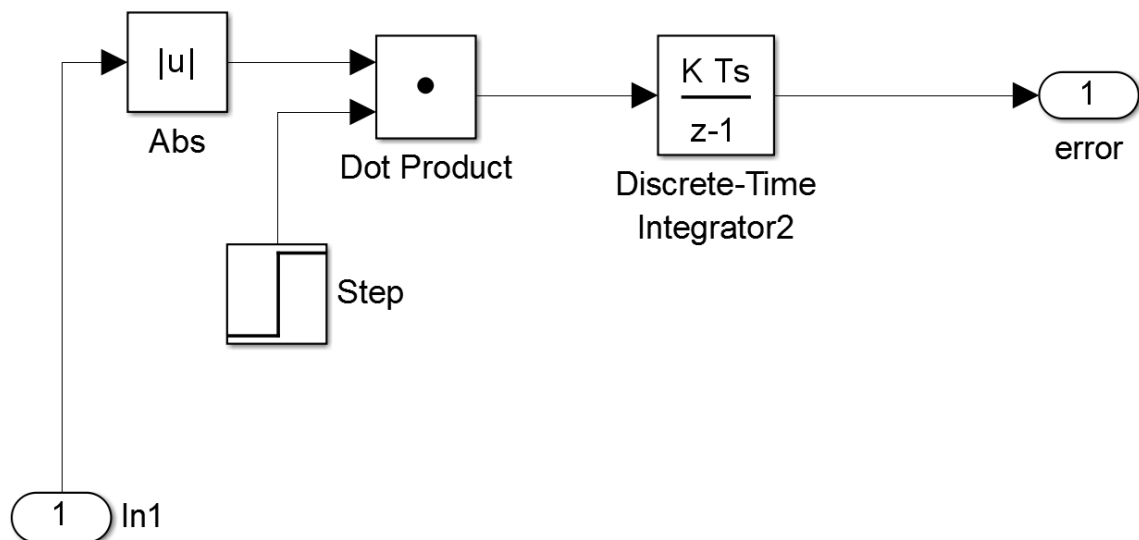


Figura 5.4: Bloques para definir el error acumulado de la posición del carro

Este cálculo se hace mediante acumulación de los errores gracias al bloque *Discrete-Time Integrator*². El bloque *Abs* sirve para obtener el valor absoluto de los errores *In1* que son la entrada a este subsistema. Los bloques restantes *Dot Product* y *Step* sirven para empezar a contabilizar el error acumulado a partir del segundo 20 para, tal y como se ha comentado en el apartado anterior, dejar que el sistema se estabilice.

Estos bloques se reagrupan en el subsistema *error acumulado*, con salida a un bloque *Display* llamado *error p* que nos muestra el valor del error acumulado. En la siguiente figura se observa cómo se integra en el modelo:

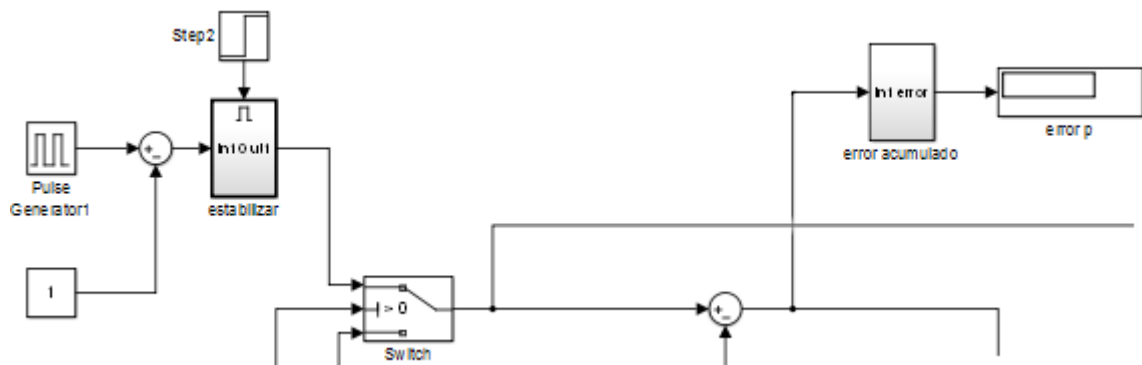


Figura 5.5: Bloques para definir el error acumulado de la posición del carro

5.1.3 Error acumulado del ángulo del péndulo

En el caso del péndulo invertido, el cálculo del error total acumulado para el ángulo sigue otro procedimiento debido a su alta sensibilidad: respecto a la vertical 0° se obtiene el máximo error cometido, es decir, el valor de la máxima oscilación del péndulo.

En cambio, en nuestro proyecto, para estudiar el umbral y su repercusión en el ángulo se procede exactamente de la misma forma que en la del apartado anterior: mismo esquema y mismos bloques, únicamente que estos son introducidos en la realimentación del ángulo del péndulo.

No es necesaria pues una explicación detallada, puesto que coincide exactamente con la metodología descrita en el apartado anterior.

El subsistema completo *error acumulado_p* se integra en el modelo con un bloque *Display* en la salida llamado *errorp_p* para así mostrar el valor del error máximo.

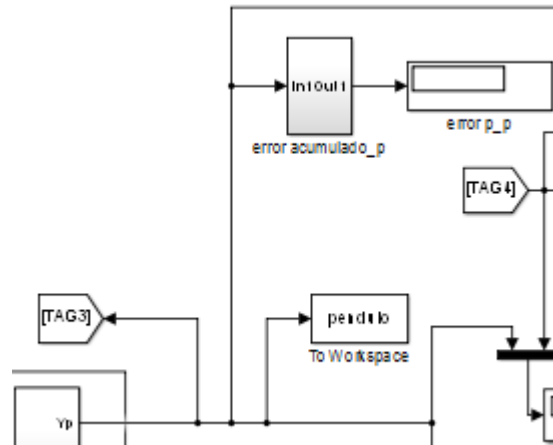


Figura 5.6: Bloques para definir el error acumulado del ángulo del péndulo

5.1.4 Realimentación de la posición del carro

En la siguiente figura (subsistema *umbra carro*) podemos ver el esquema de bloques utilizado:

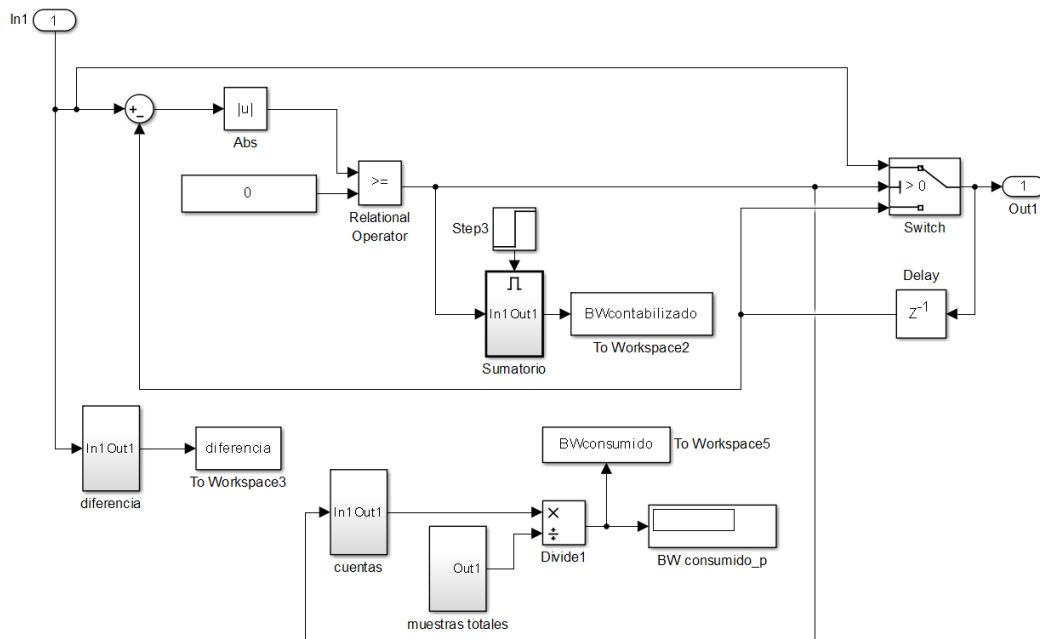


Figura 5.7: Bloques para definir el error acumulado del ángulo del péndulo

Por la rama superior transmitimos el dato $t1$ que recibimos en ese instante y gracias al bloque *Delay* guardamos el del instante anterior $t0$.

Al unirse en el bloque *Sum* se produce la resta entre esos dos valores obteniendo así la diferencia del valor de la posición en dos instantes consecutivos.

A continuación obtenemos su valor absoluto mediante *Abs* para compararlo, gracias al bloque *Relational Operator*, con el valor del umbral constante que elijamos previamente y cuya salida será 1 ó 0 dependiendo de si supera o no dicho umbral. Ésta es la variable de control del bloque *Switch*: si es 1 se transmite el valor de la posición actual y en caso contrario la variable de salida será igual a la variable del estado anterior no transmitiéndose el nuevo dato y ahorrando de esta manera ancho de banda. El subsistema *Sumatorio* y el bloque *BWcontabilizado* nos sirve para saber cuántas veces y cuándo se supera el umbral establecido.

El cálculo del ancho de banda consumido se hace mediante los subsistemas *cuentas* y *muestras totales*:

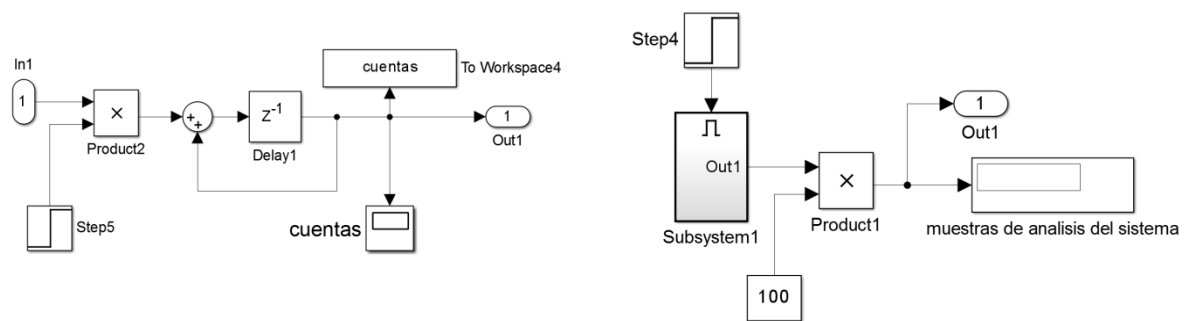


Figura 5.8: Bloques para definir el ancho de banda consumido

Este conjunto de bloques determina el ancho de banda consumido, es decir, realiza la operación de división entre el número de datos enviados y el tiempo empleado.

Para ello, se debe distinguir dos líneas de operaciones las cuales se unen en el bloque *Divide1*, bloque que divide ambas líneas entre sí. La línea superior (parte izquierda de la Figura 5.8) sumaría los 1 que devuelve el comparador, valores mayores que el umbral y por tanto a considerar. La inferior (parte derecha de la Figura 5.8) restaría al tiempo total 20 segundos (subsistema *Subsystem1*) calculando así el número total de muestras analizadas, que podemos ver en el *Display muestras de análisis del sistema*. Esos 20 segundos son el tiempo inicial que se deja al proceso para que se establezca por completo y así realizar un estudio más preciso analizando los 60 segundos siguientes.

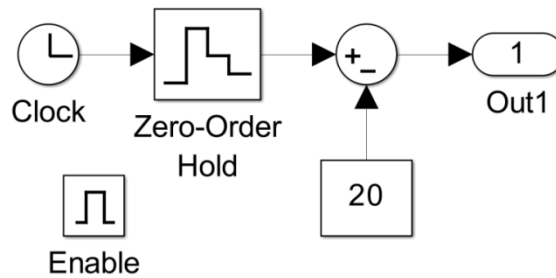


Figura 5.9: Bloques para restar los 20 s. iniciales y así definir el tiempo total de ejecución

Resaltar pues, que con el periodo de muestreo elegido (10 ms) el número total de muestras analizadas es siempre de 6000. El tiempo completo de ejecución son 80 segundos.

Por último, al dividir mediante el bloque *Divide1* el total de muestras que superan el umbral entre el total de muestras analizadas (6000) obtenemos el total de ancho de banda consumido, guardándolo en el vector *BWconsumido* y mostrándolo en la pantalla *BWconsumido_p*.

5.1.5 Realimentación del ángulo del péndulo

Para estudiar el umbral y su repercusión en el ángulo se procede exactamente de la misma forma que en la del apartado anterior: mismo esquema y mismos bloques, únicamente que estos son introducidos en la realimentación del ángulo del péndulo.

No es necesaria pues una explicación detallada, puesto que coincide exactamente con la metodología descrita en el apartado anterior.

6. Resultados obtenidos

En primer lugar realizamos únicamente el control sobre la posición del carro aplicando distintas amplitudes y periodos, y mostrando el funcionamiento en las gráficas que aparecen abajo. Lo siguiente será añadir el control sobre el balanceo del péndulo.

Solo incluimos aquellas gráficas en las que la referencia de entrada es una onda rectangular, ya que el seguimiento de ondas senoidales o triangulares no es una condición adversa / límite donde investigar el efecto que tiene el control por eventos sobre el sistema.

Los 20 segundos iniciales para la estabilización del sistema no aparecen en las gráficas, pues su análisis no es de interés.

6.1 Realimentación de la posición del carro

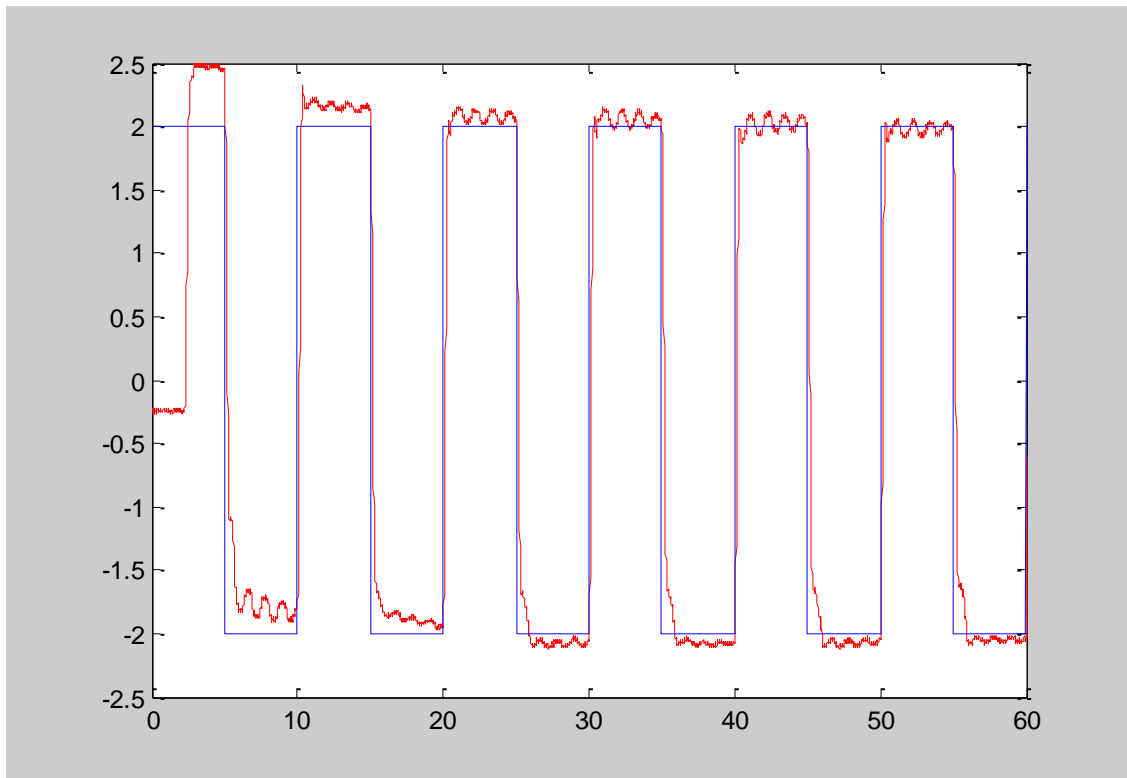


Figura 6.1: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro

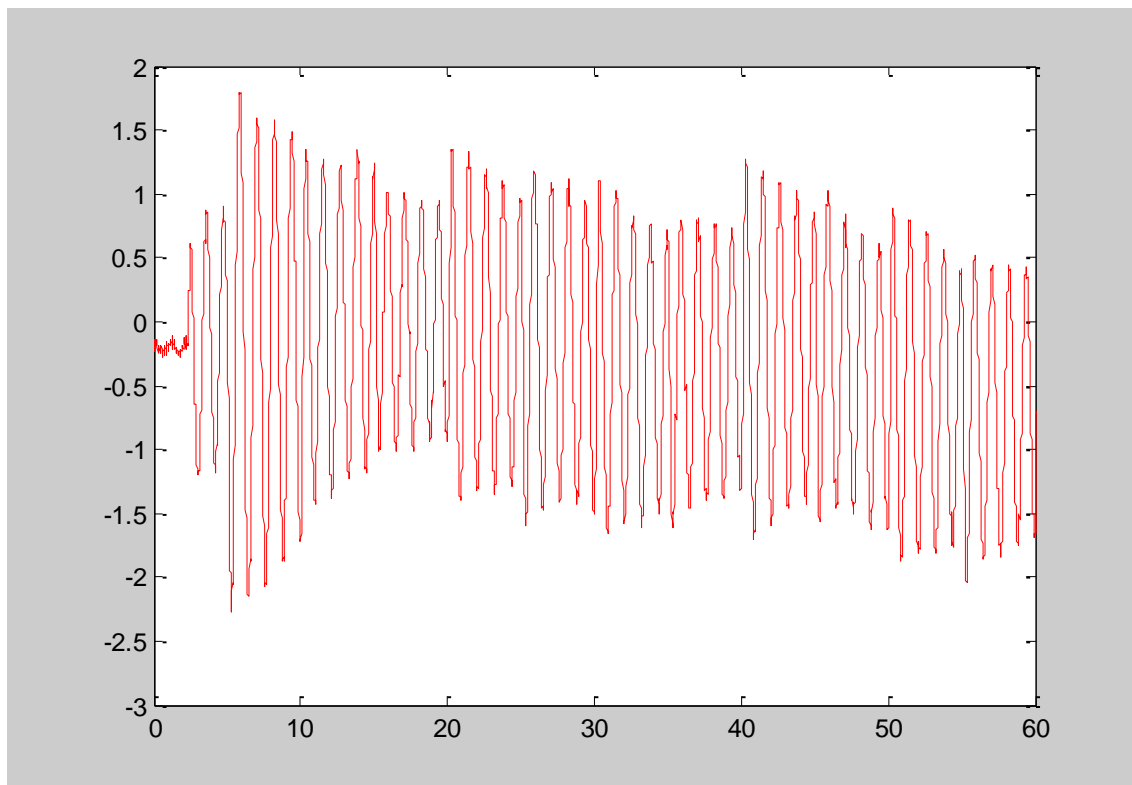


Figura 6.2: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo

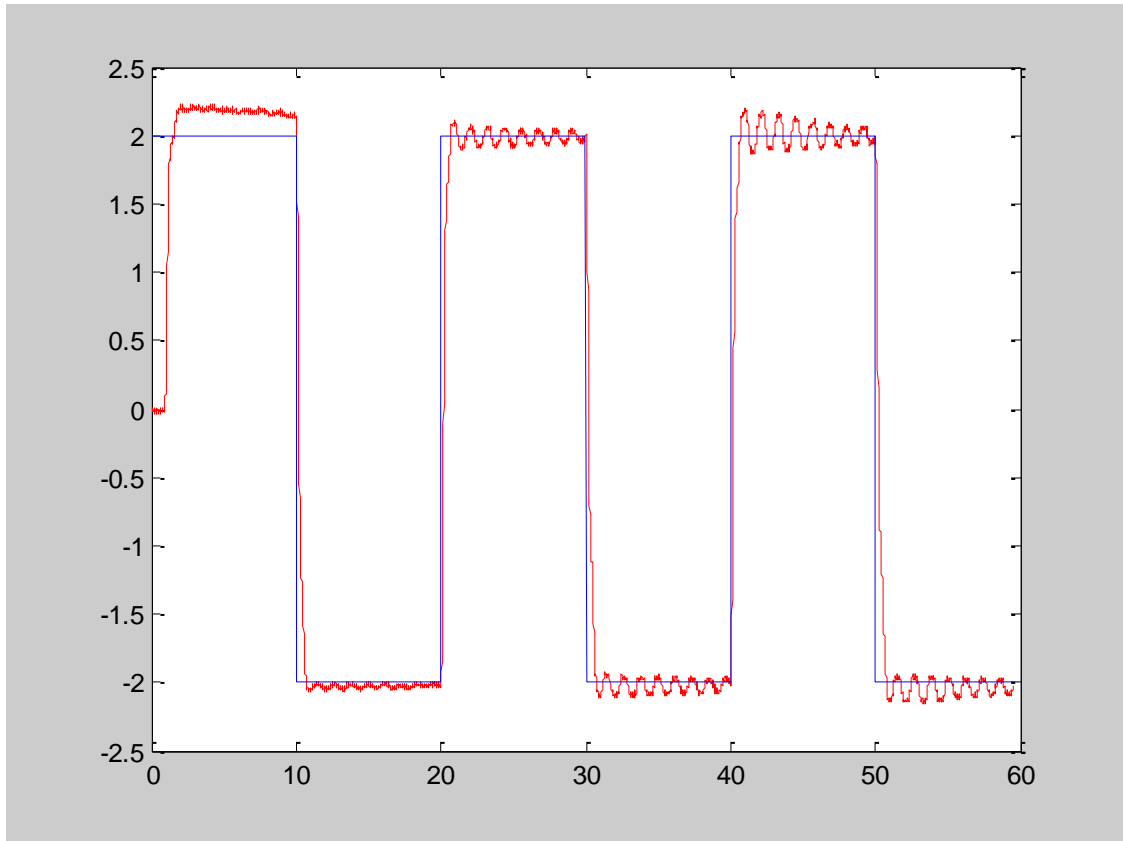


Figura 6.3: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro

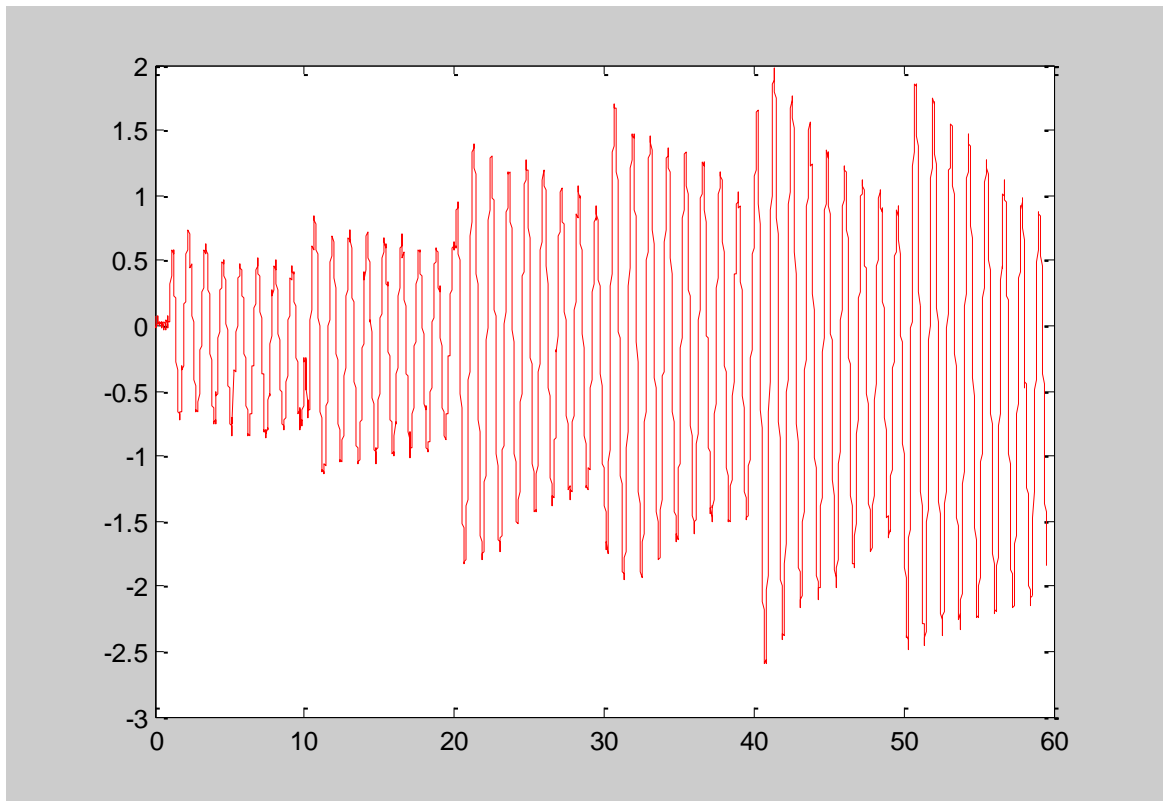


Figura 6.4: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo

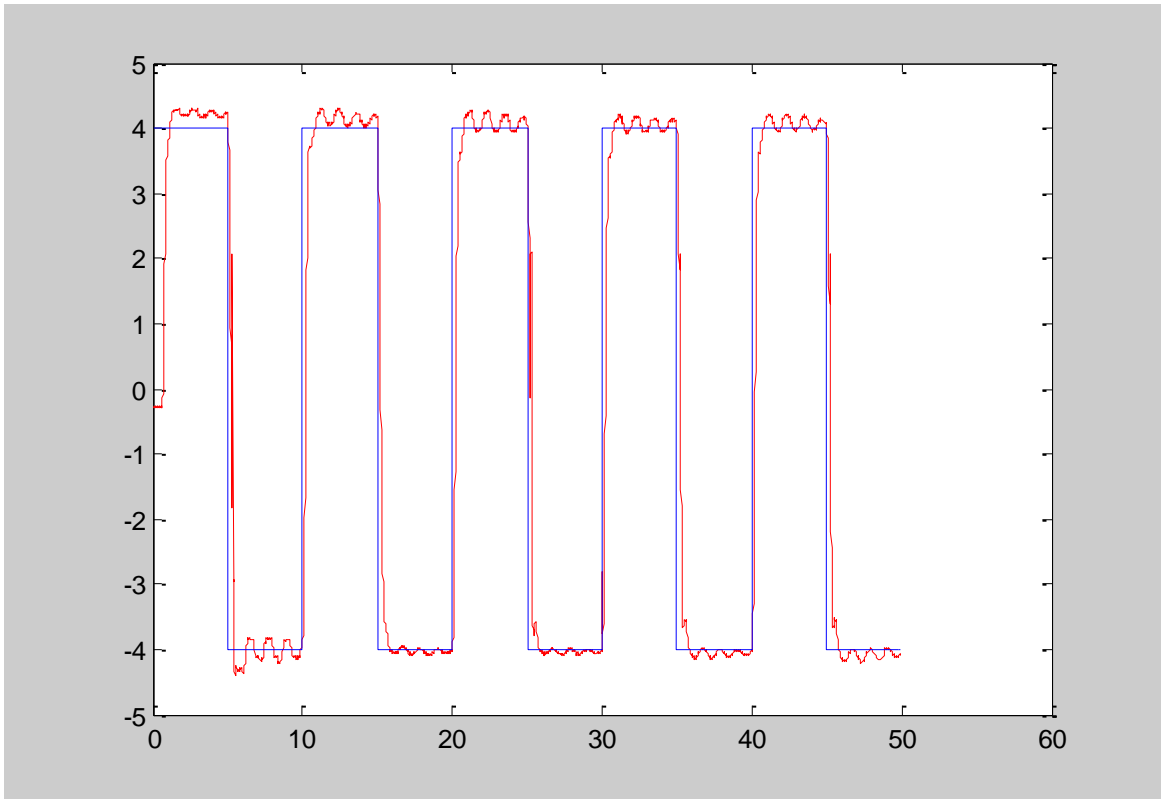


Figura 6.5: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro

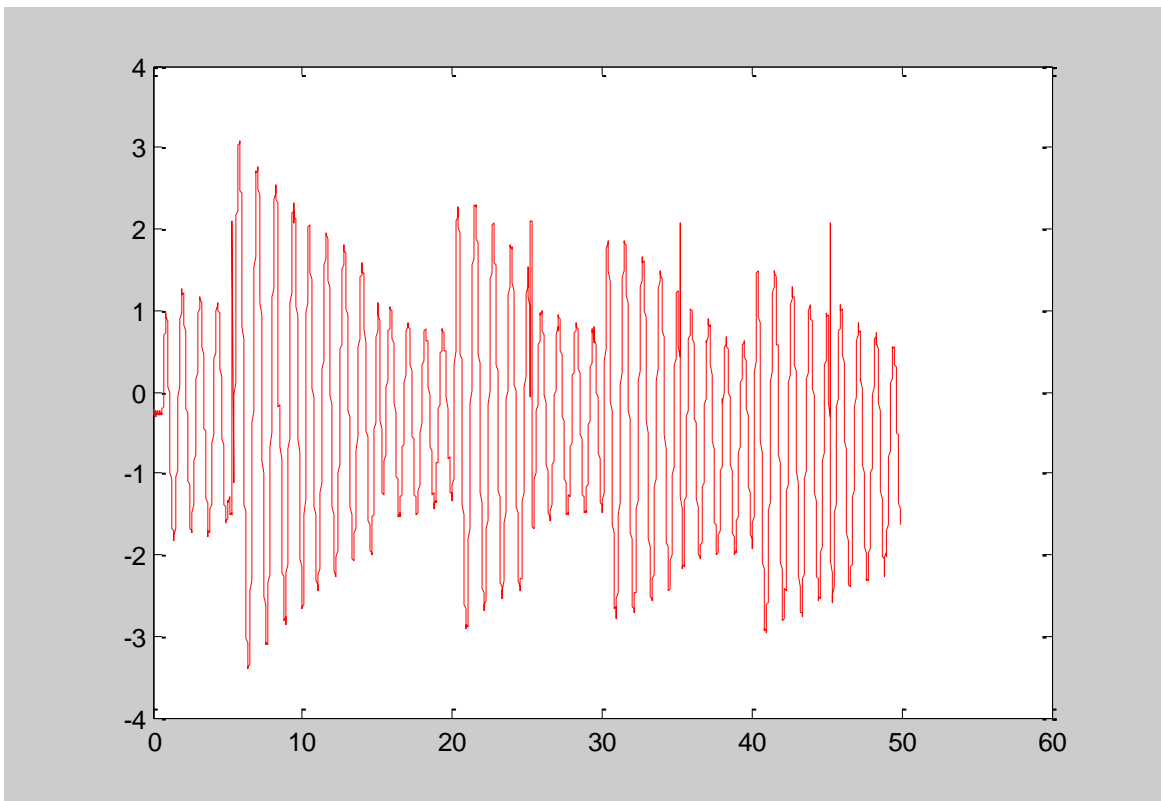


Figura 6.6: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo

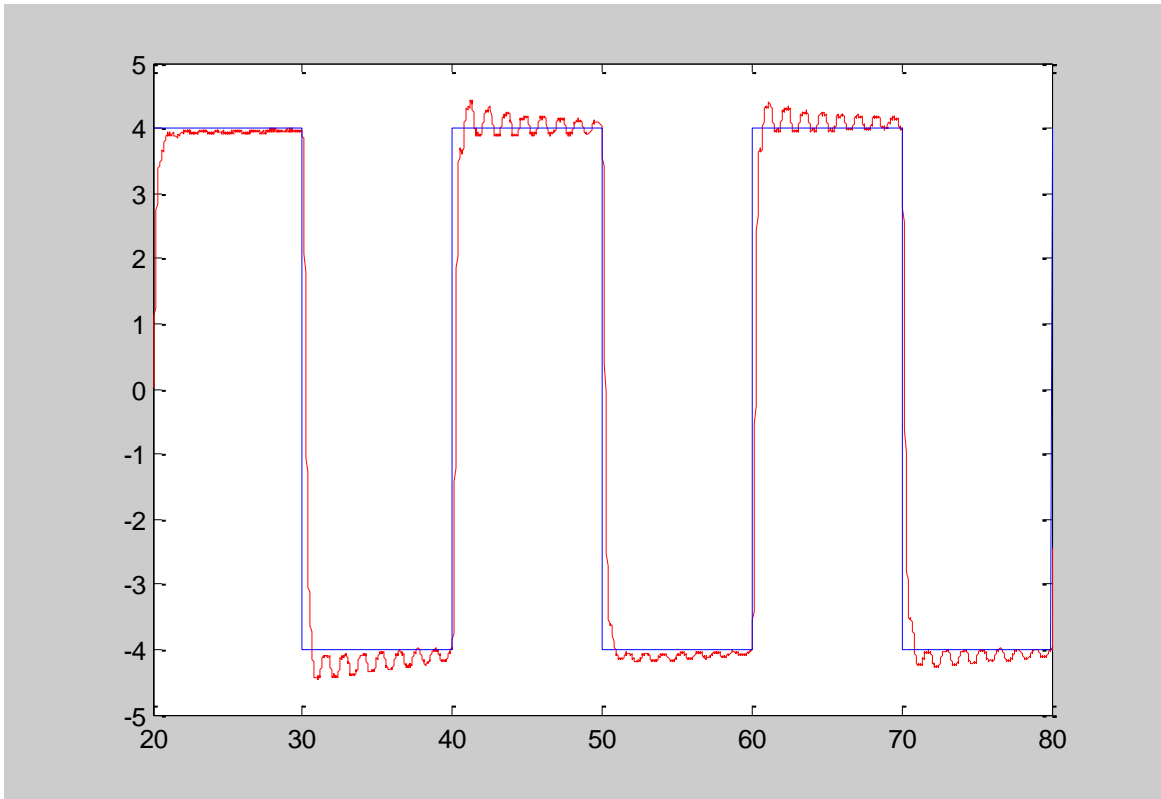


Figura 6.7: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{\text{ref}} = 20$ segundos, Carro

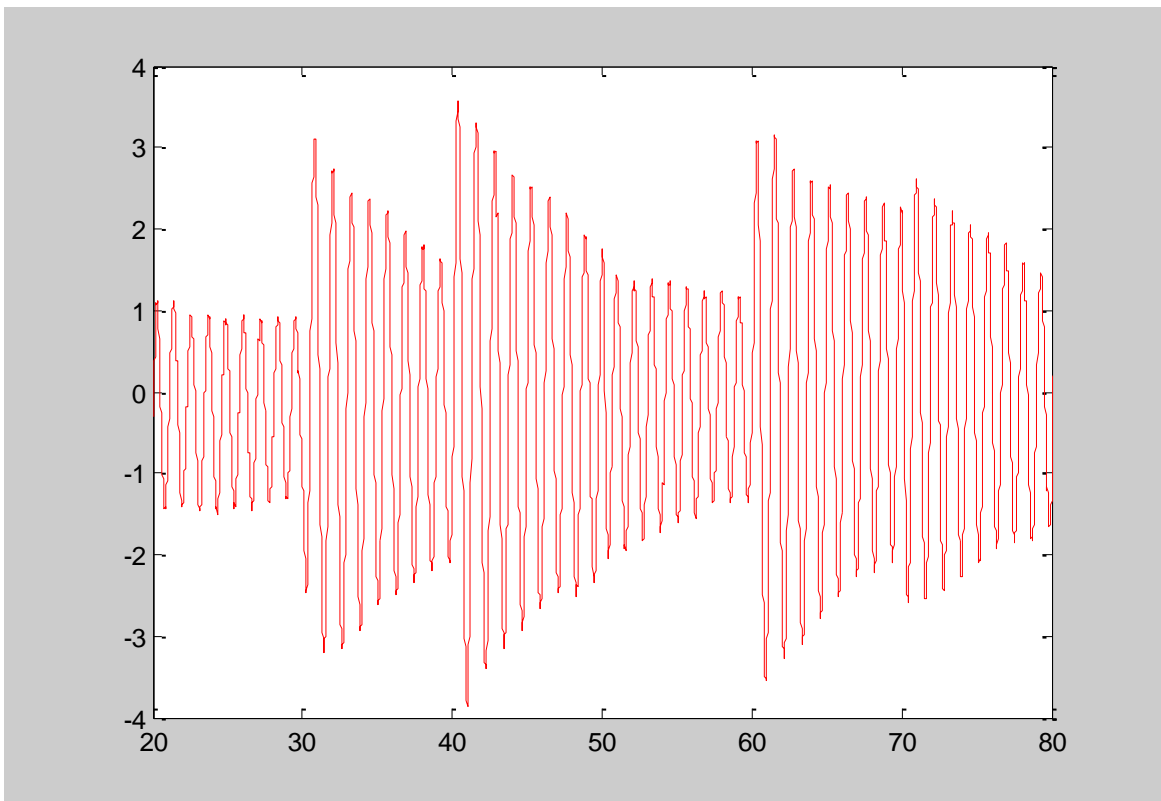


Figura 6.8: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{\text{ref}} = 20$ segundos, Péndulo

6.2 Controlando además el balanceo del péndulo

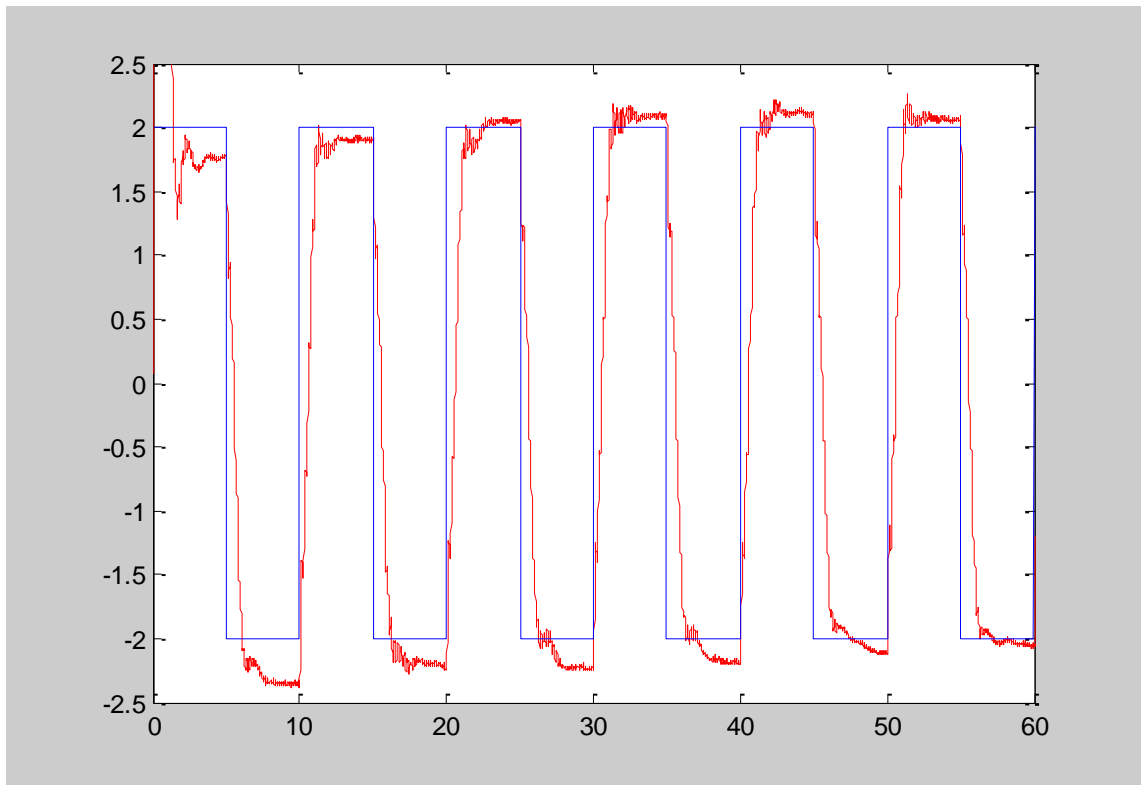


Figura 6.9: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{\text{ref}} = 10$ segundos, Carro

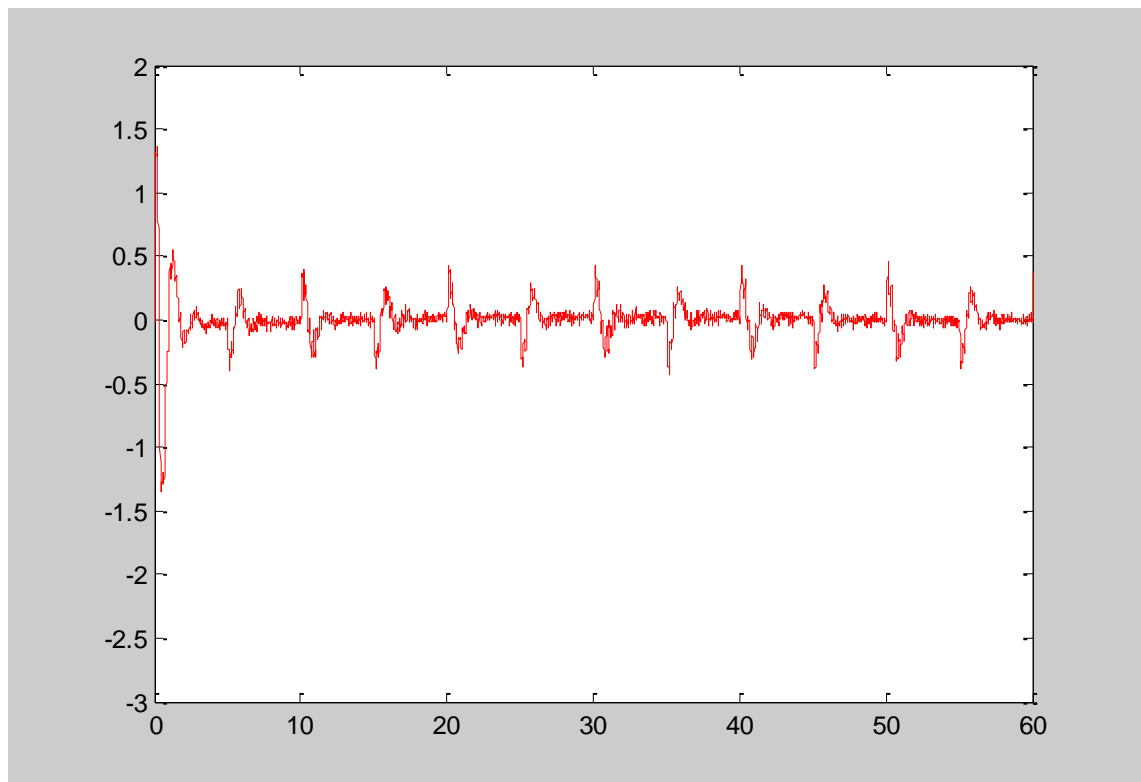


Figura 6.10: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{\text{ref}} = 10$ segundos, Péndulo

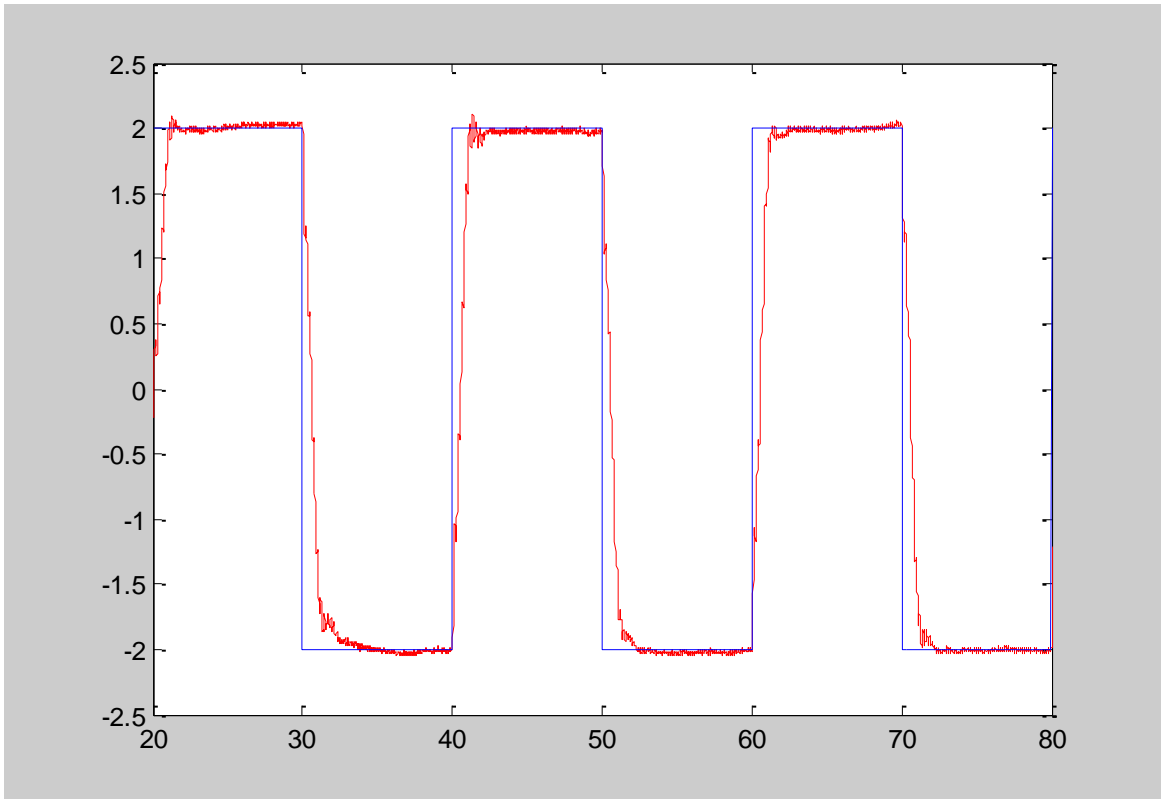


Figura 6.11: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{\text{ref}} = 20$ segundos, Carro

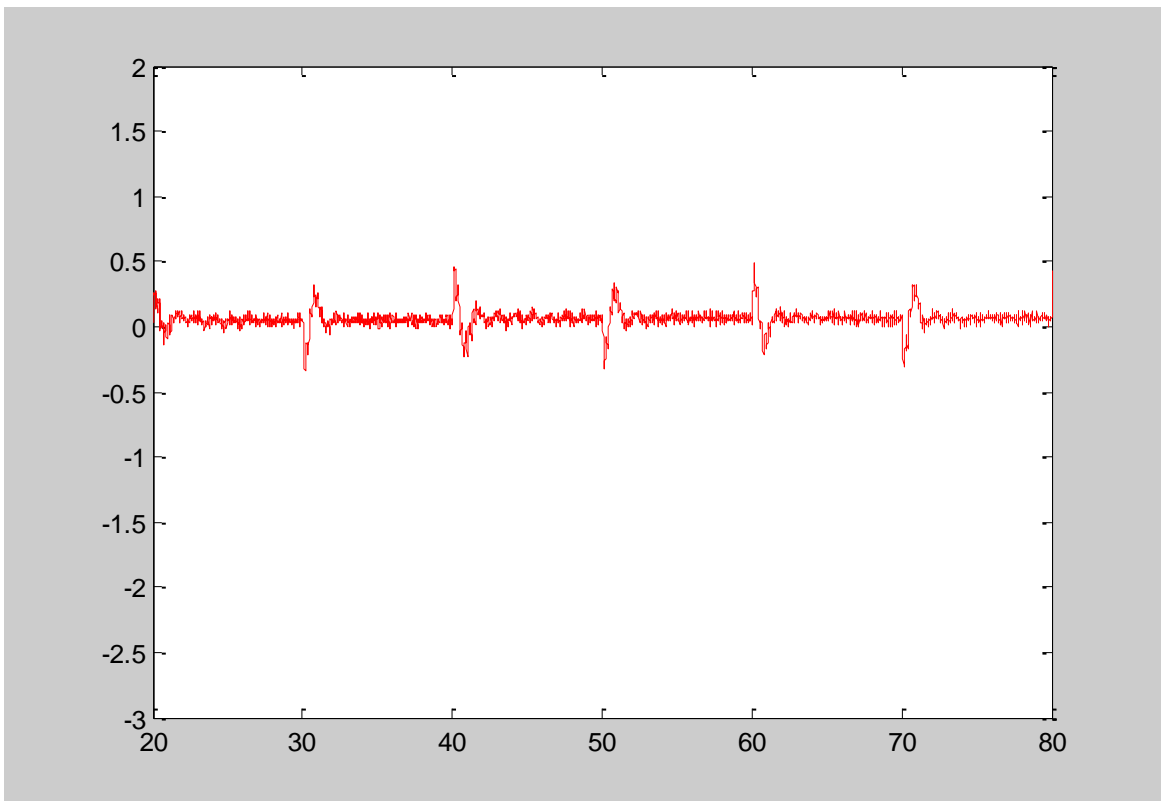


Figura 6.12: Señal rectangular: Amplitud = 2 voltios, $T_{\text{ref}} = 20$ segundos, Péndulo

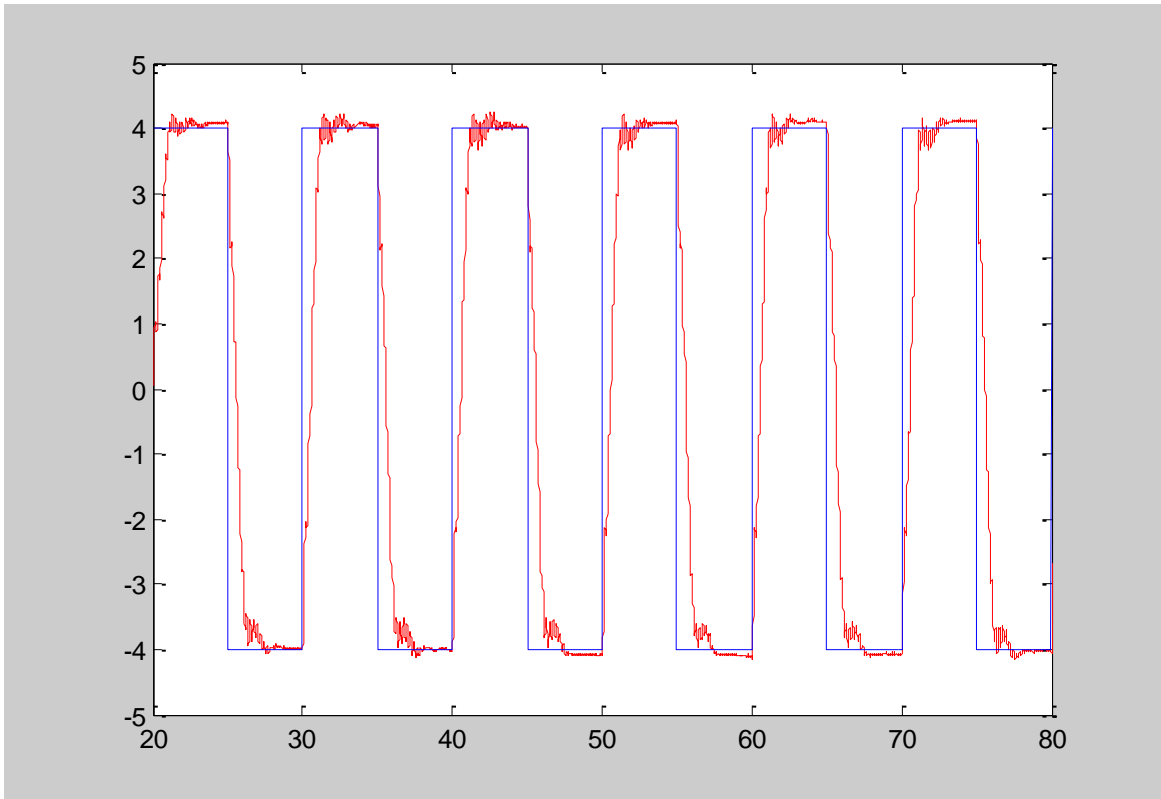


Figura 6.13: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Carro

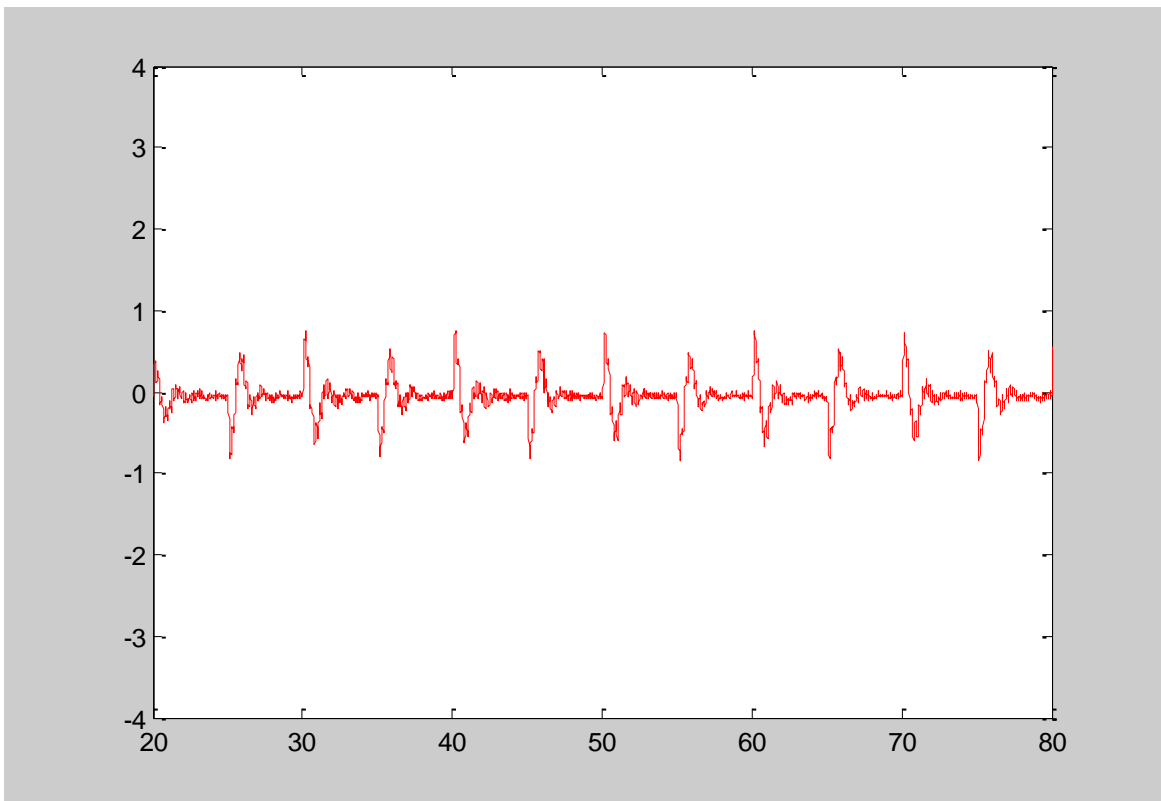


Figura 6.14: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 10$ segundos, Péndulo

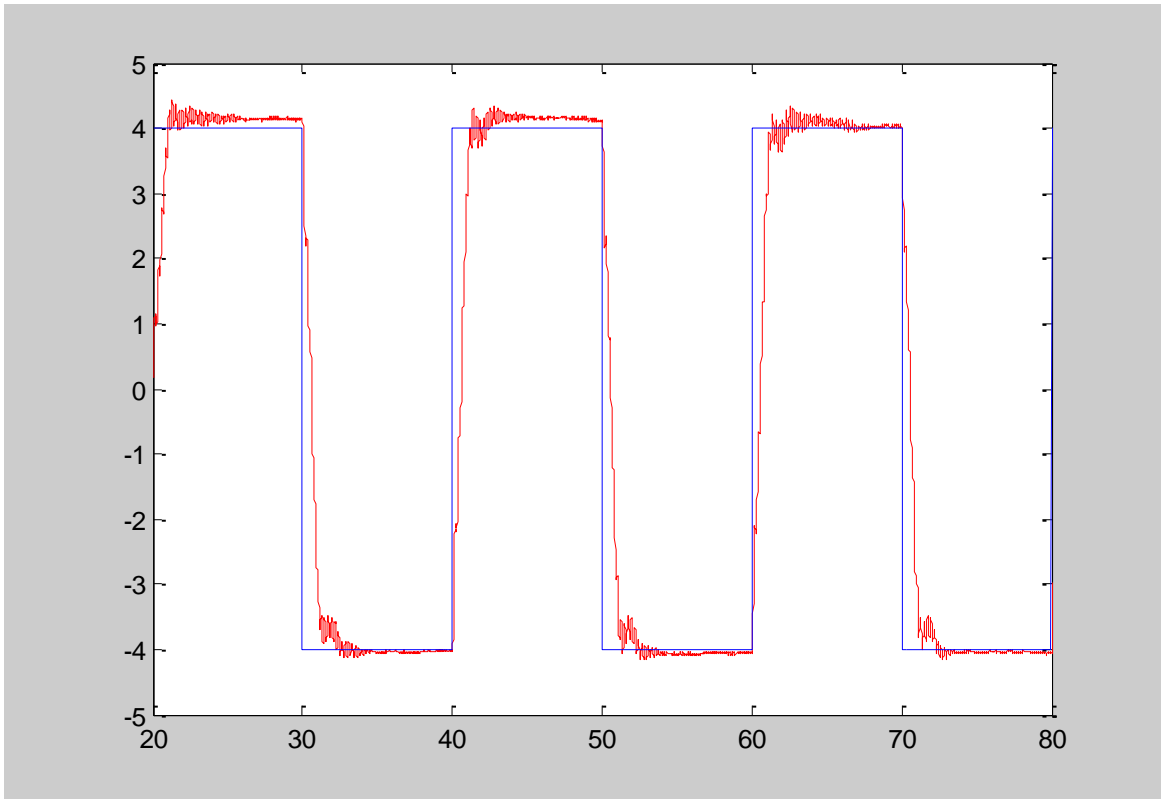


Figura 6.15: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Carro

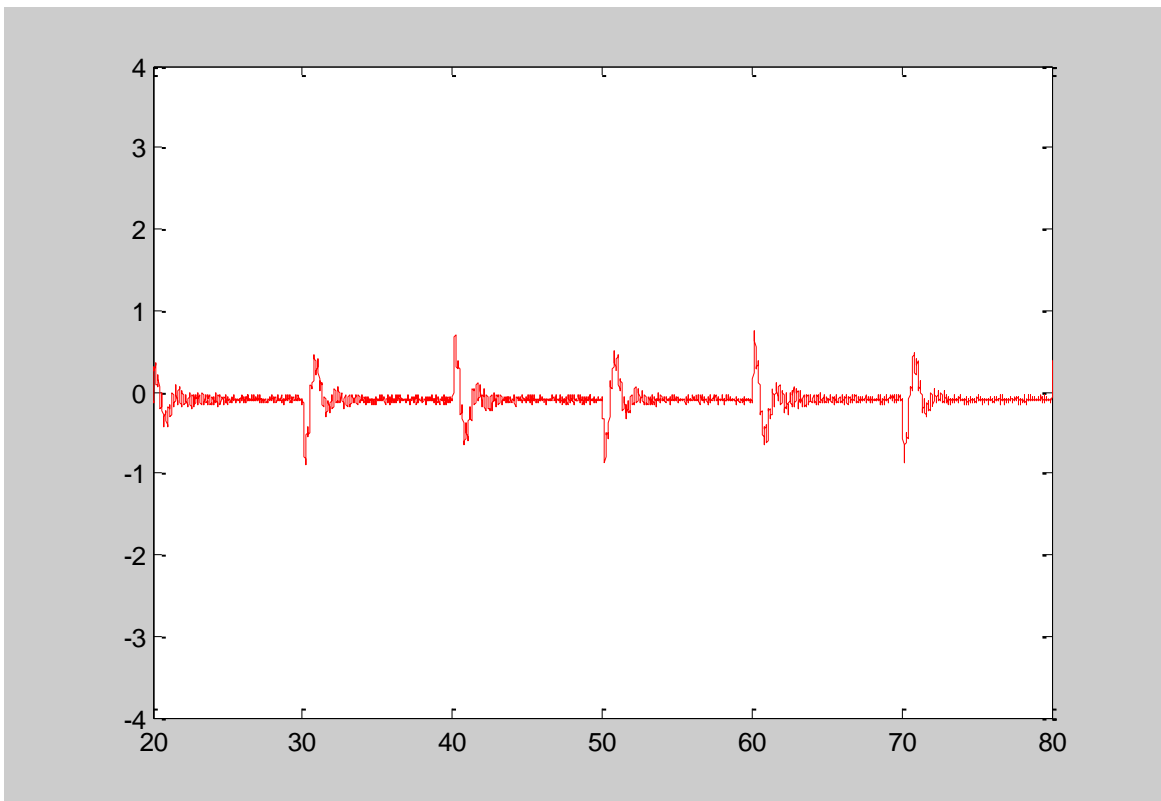


Figura 6.16: Señal rectangular: Amplitud = 4 voltios, $T_{ref} = 20$ segundos, Péndulo

6.3 Análisis del comportamiento de la planta

En segundo lugar, con la referencia de entrada al sistema siendo una onda rectangular de amplitud ± 4 voltios y un periodo de 10 segundos para que funcione en cierta medida al límite y los reguladores que comentamos en el apartado 3.3, aplicamos el control por eventos con umbrales hasta el momento en el que el sistema se vuelve incontrolable.

No es sencillo diseñar una técnica de control generalizada para todos los procesos que maximice el ahorro de ancho de banda y minimice las pérdidas de prestaciones en el comportamiento, ya que estas prestaciones dependen de cada proceso por separado. Por ello, hay que decidir previamente lo que estamos dispuestos a sacrificar a la hora de ahorrar ancho de banda.

En nuestro caso se ha optado por la opción de conocer al final del experimento el sumatorio del valor absoluto de cada error y asociar el aumento de este valor a unas pérdidas en prestaciones.

Para el análisis del comportamiento de la planta se realizan mediciones con cada umbral, comenzando desde umbral = 0, situación en la que ocupamos todo el ancho de banda disponible, hasta que el funcionamiento del sistema empieza a deteriorarse. Por lo tanto el trabajo ha sido el siguiente:

- ❖ Dejando el umbral del ángulo a cero, es decir, enviando todas sus muestras, realizar experimentos solamente modificando el umbral en la posición. De esta forma se han establecido 11 valores de umbrales distintos, realizando 3 pruebas para cada valor con el objetivo de obtener la media tanto del error acumulado como del ancho de banda consumido.
- ❖ Lo mismo para el ángulo, con la otra variable a cero: de nuevo se han usado 11 valores distintos para el umbral, y realizado 3 experimentos para cada uno de los valores con el objetivo de obtener las medias del error y del ancho de banda.

En total 66 experimentos, los cuales han dado lugar a una primera elección de doce posibles combinaciones de umbrales. Posteriormente debemos analizar estas doce combinaciones para ver cuál o cuáles de ellas son aceptables para confirmar el objetivo de nuestro proyecto.

6.3.1 Realimentación de la posición del carro

UMBRAL	ERROR ACUMULADO 1	ERROR ACUMULADO 2	ERROR ACUMULADO 3	MEDIA ERROR	ERROR RELATIVO
0	54,37	55,02	59,49	56,29	1,00
0,01	54,85	54,96	55,51	55,11	0,98
0,02	55,37	54,84	54,72	54,98	0,98
0,03	56,46	56,17	55,04	55,89	0,99
0,06	55,57	55,73	56,11	55,80	0,99
0,08	57,07	56,29	55,92	56,43	1,00
0,1	58,13	58,33	56,40	57,62	1,02
0,15	58,34	58,00	56,96	57,77	1,03
0,2	59,42	62,91	61,74	61,36	1,09
0,25	61,87	61,87	61,87	61,87	1,10
0,3	65,34	64,87	69,66	66,62	1,18

Tabla 2: Error acumulado de la posición del carro usando el control por eventos

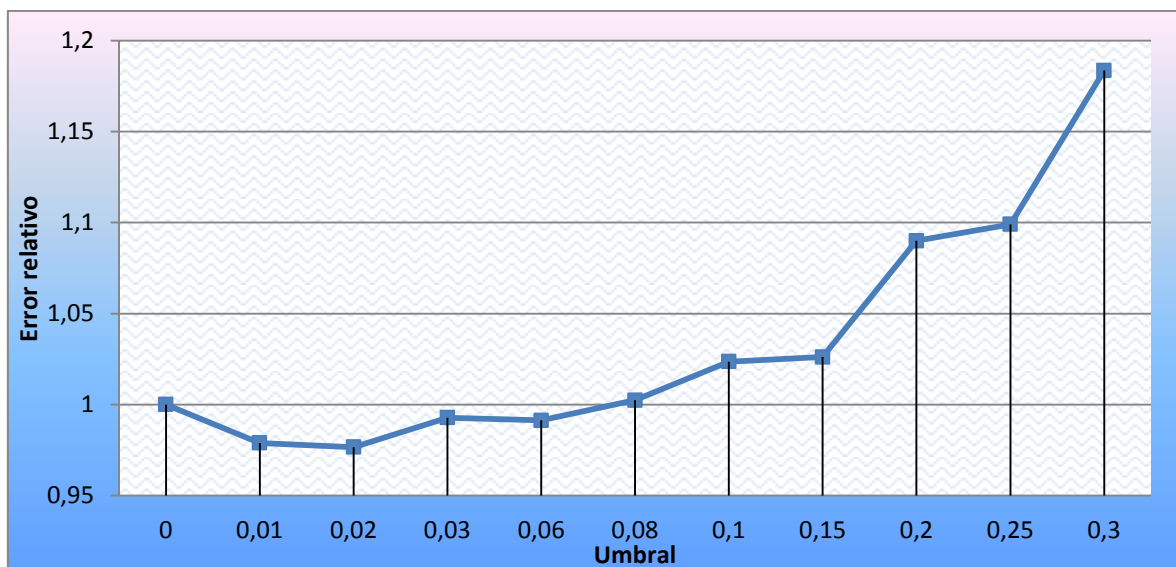


Figura 6.17: Error relativo de la posición del carro usando el control por eventos

UMBRAL	BW 1	BW 2	BW 3	MEDIA BW	BW RELATIVO
0	100,00	100,00	100,00	100,00	1,00
0,01	59,55	60,70	60,42	60,22	0,60
0,02	41,30	38,30	37,13	38,91	0,39
0,03	28,80	39,77	37,17	35,27	0,35
0,06	29,23	28,65	31,47	29,78	0,30
0,08	26,40	24,32	23,22	24,65	0,25
0,1	27,40	23,60	27,73	26,24	0,26
0,15	16,57	16,93	19,68	17,73	0,18
0,2	13,38	16,55	15,87	15,27	0,15
0,25	12,12	12,12	12,12	12,12	0,12
0,3	10,62	11,20	11,12	10,98	0,11

Tabla 3: Ancho de banda consumido en la posición del carro usando el control por eventos

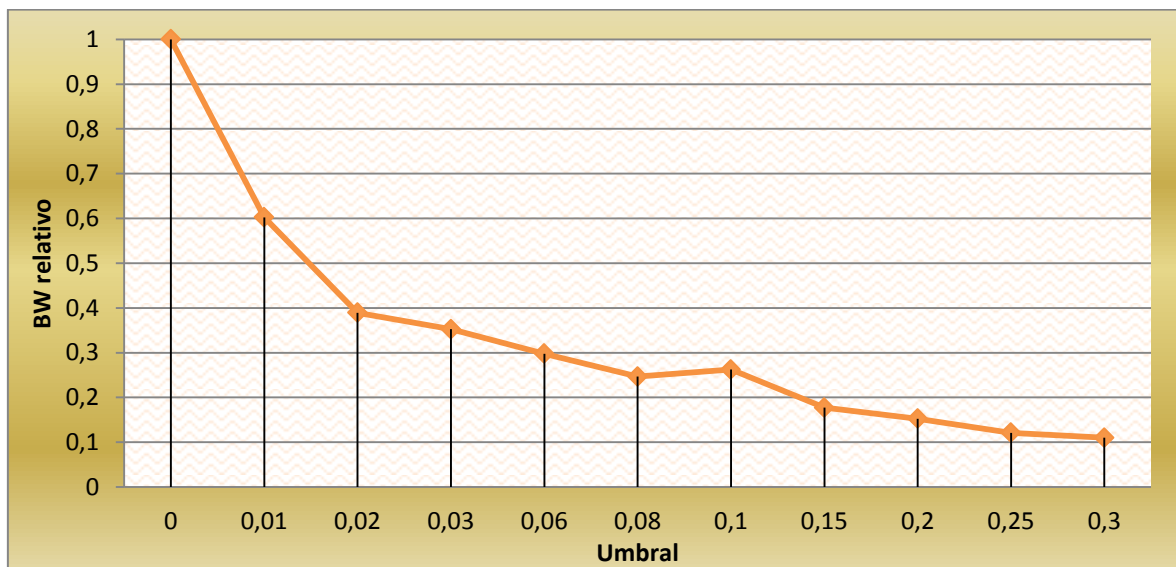


Figura 6.18: Ancho de banda relativo en la posición del carro usando el control por eventos

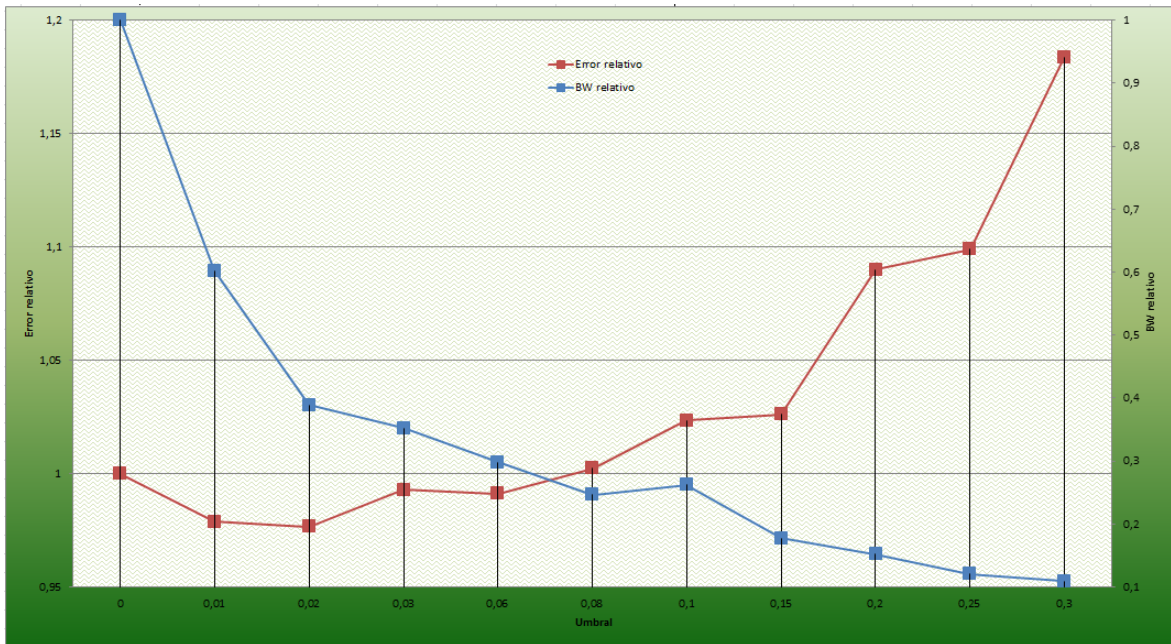


Figura 6.19: Error relativo frente al ancho de banda consumido en la posición del carro usando el control por eventos

En la gráfica de arriba vemos unas primeras muestras en las que a medida que aumenta el umbral disminuyen tanto el error como el ancho de banda consumido. Llega un punto (umbral = 0.08) en el que el error es prácticamente el mismo que cuando enviamos todas las muestras (umbral = 0) y además hemos ahorrado un ancho de banda considerable. A partir de este punto lo que sucede es que el error relativo sigue aumentando y el ancho de banda disminuyendo, pero no de forma en la que nos pueda interesar.

No sería aceptable por nuestra parte por el mal seguimiento de la referencia de posición por parte del carro y por no equilibrar el péndulo. Esto sucede porque a medida que aumentamos el umbral también aumentan las oscilaciones tanto en una señal como en la otra, oscilaciones que se dan por tener que corregir en alguna ocasión escalones bastante pronunciados. Este efecto queda reflejado en sus valores de error acumulado y además lo podemos ver en las gráficas de las siguientes páginas.

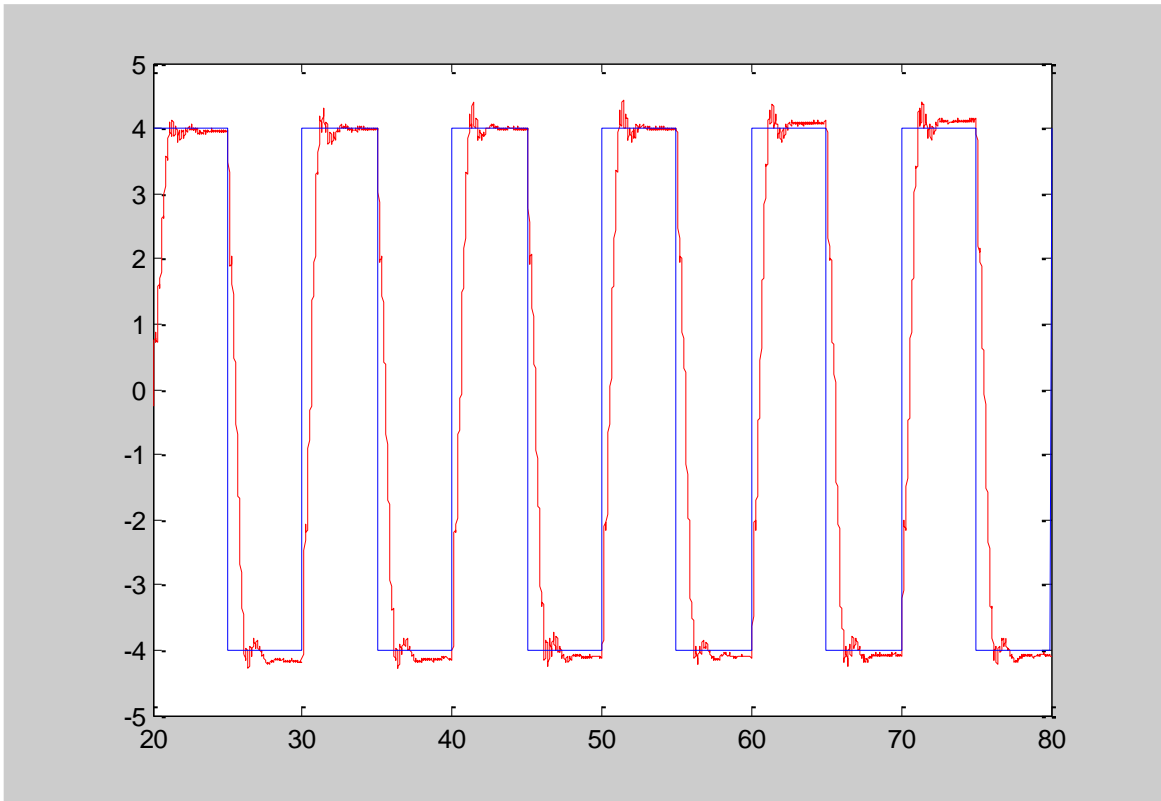


Figura 6.20: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0$

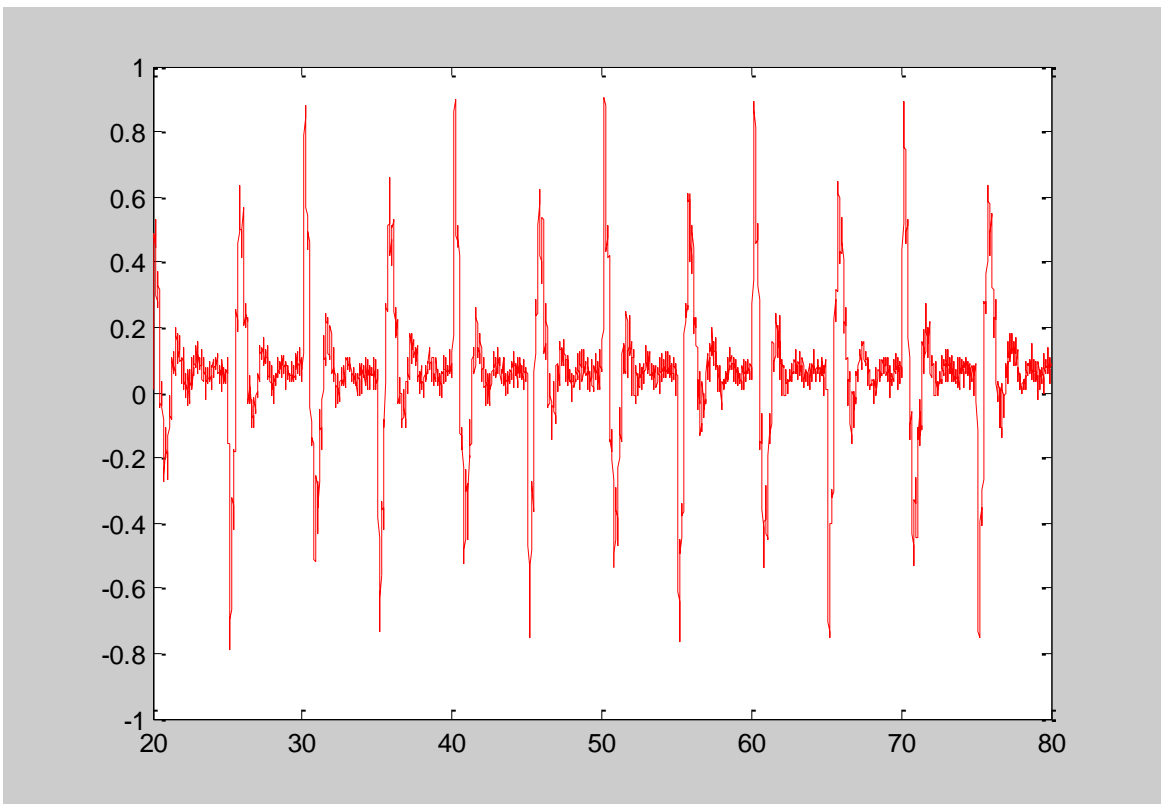


Figura 6.21: Ángulo del péndulo con $umbral = 0$

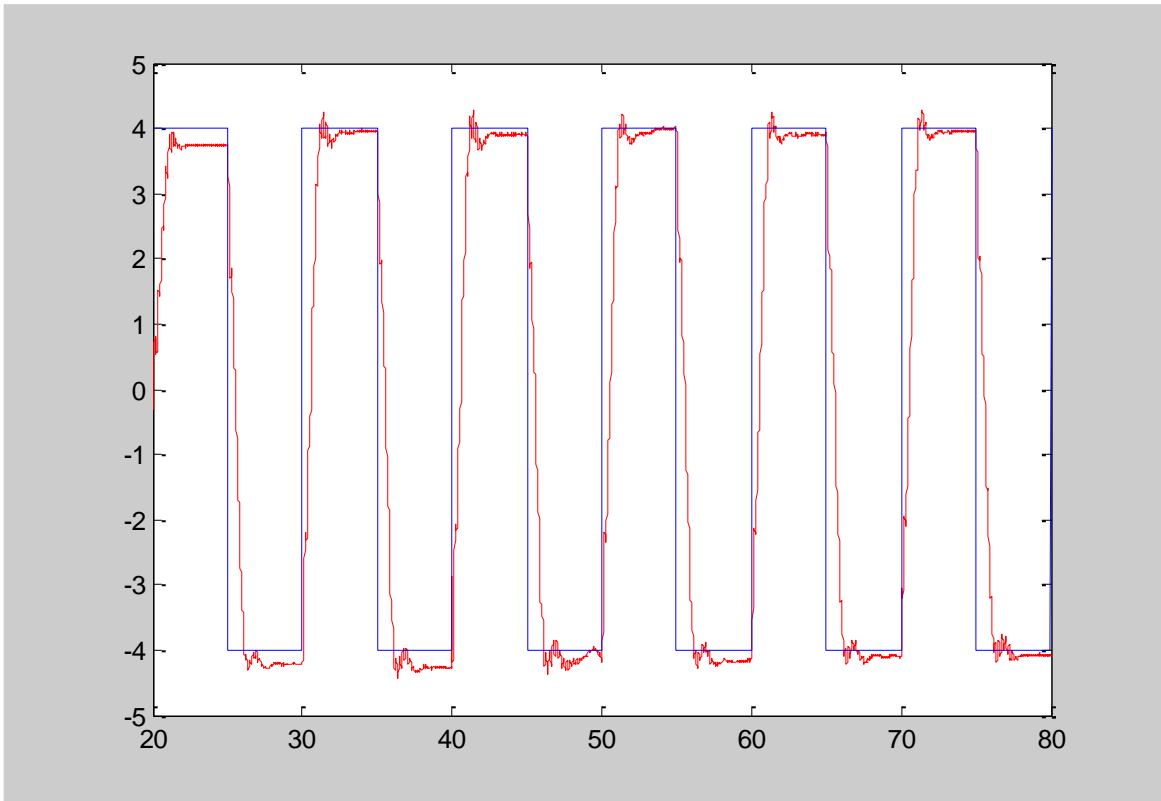


Figura 6.22: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.03$

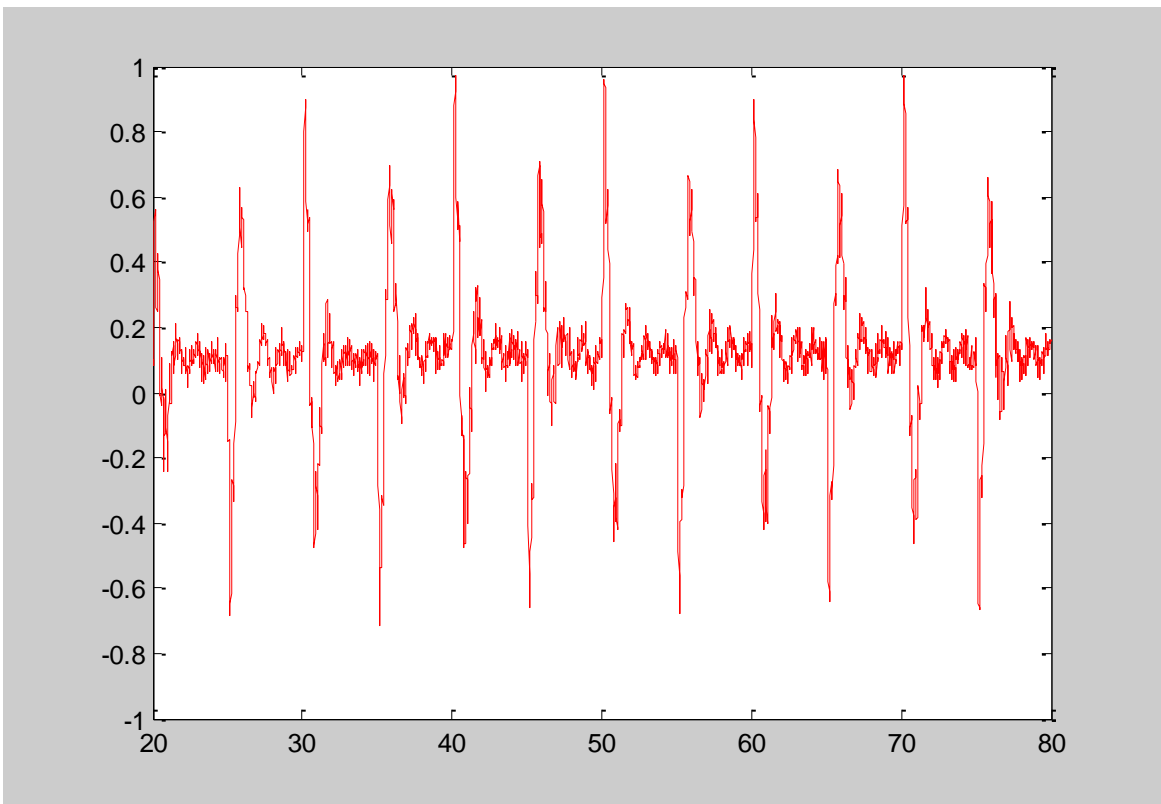


Figura 6.23: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.03$

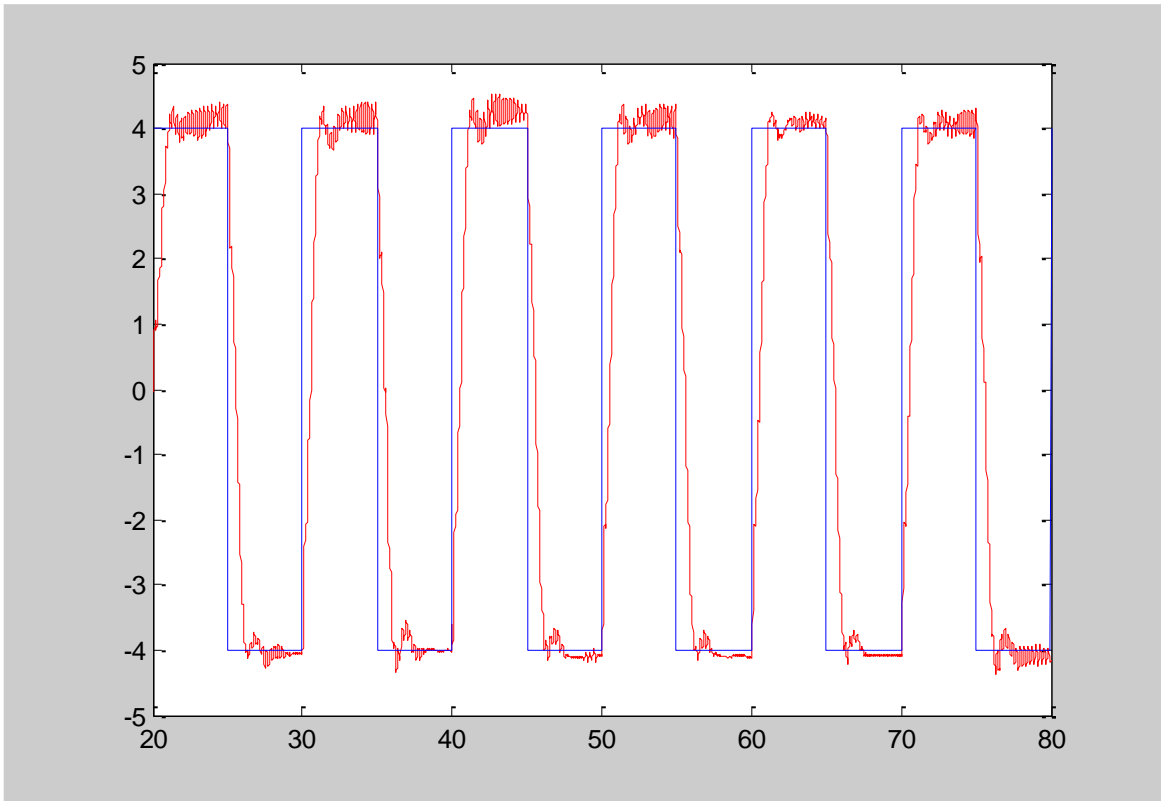


Figura 6.24: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.08$

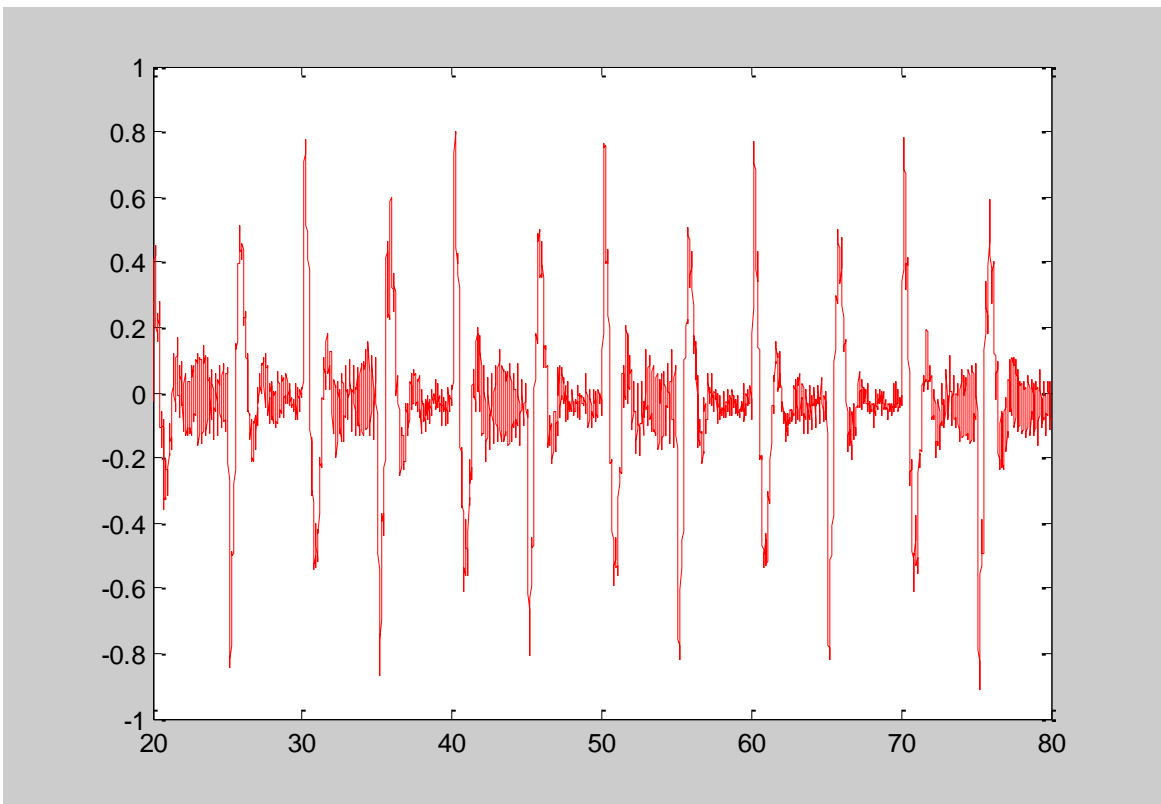


Figura 6.25: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.08$

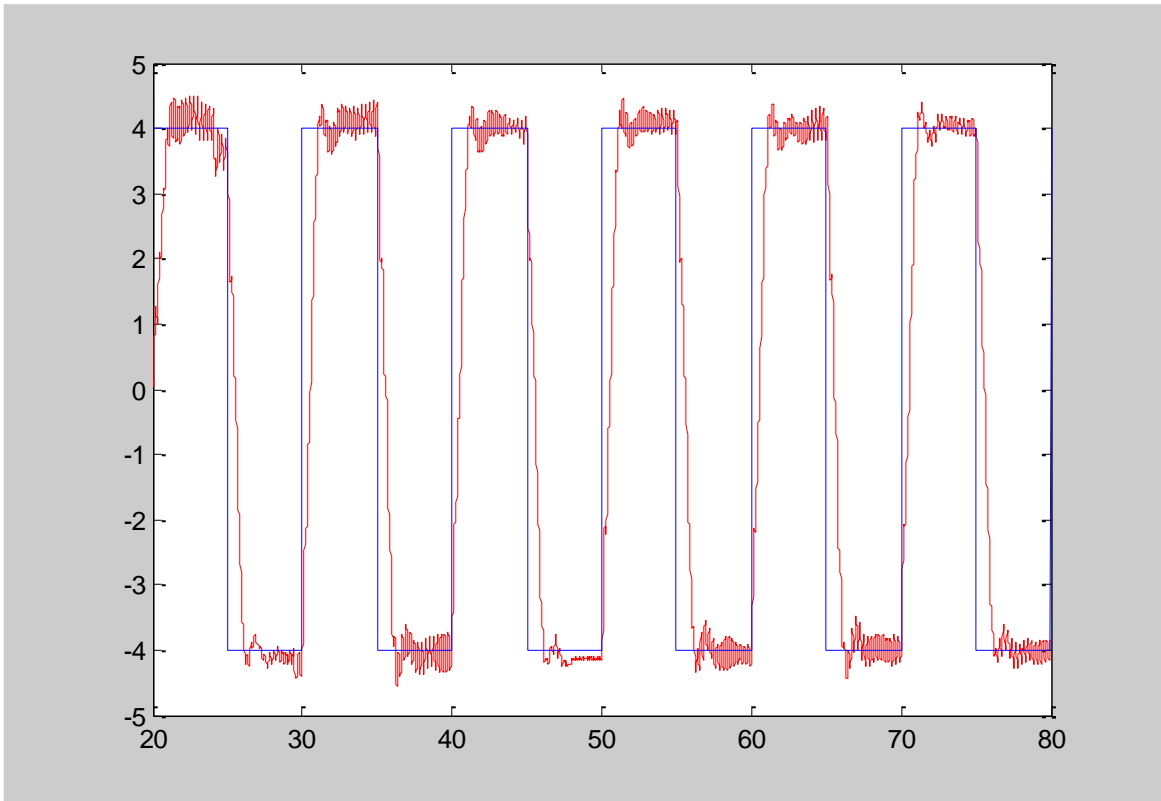


Figura 6.26: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.1$

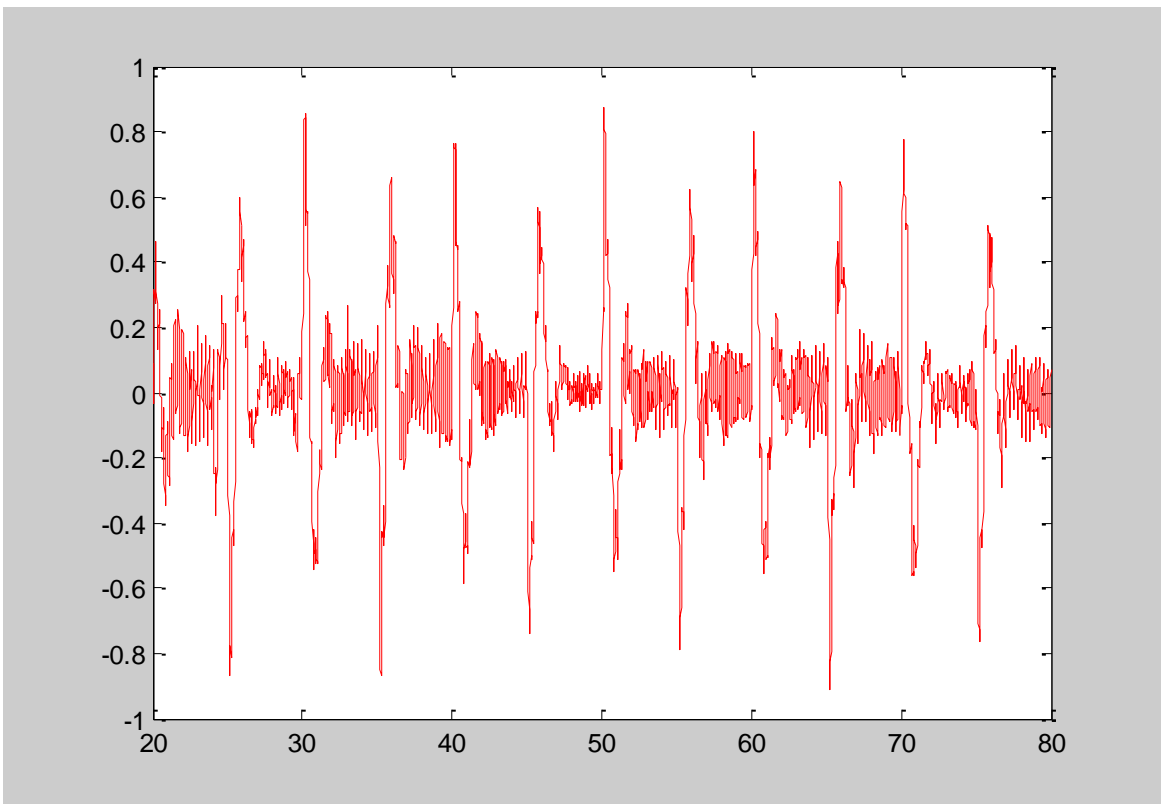


Figura 6.27: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.1$

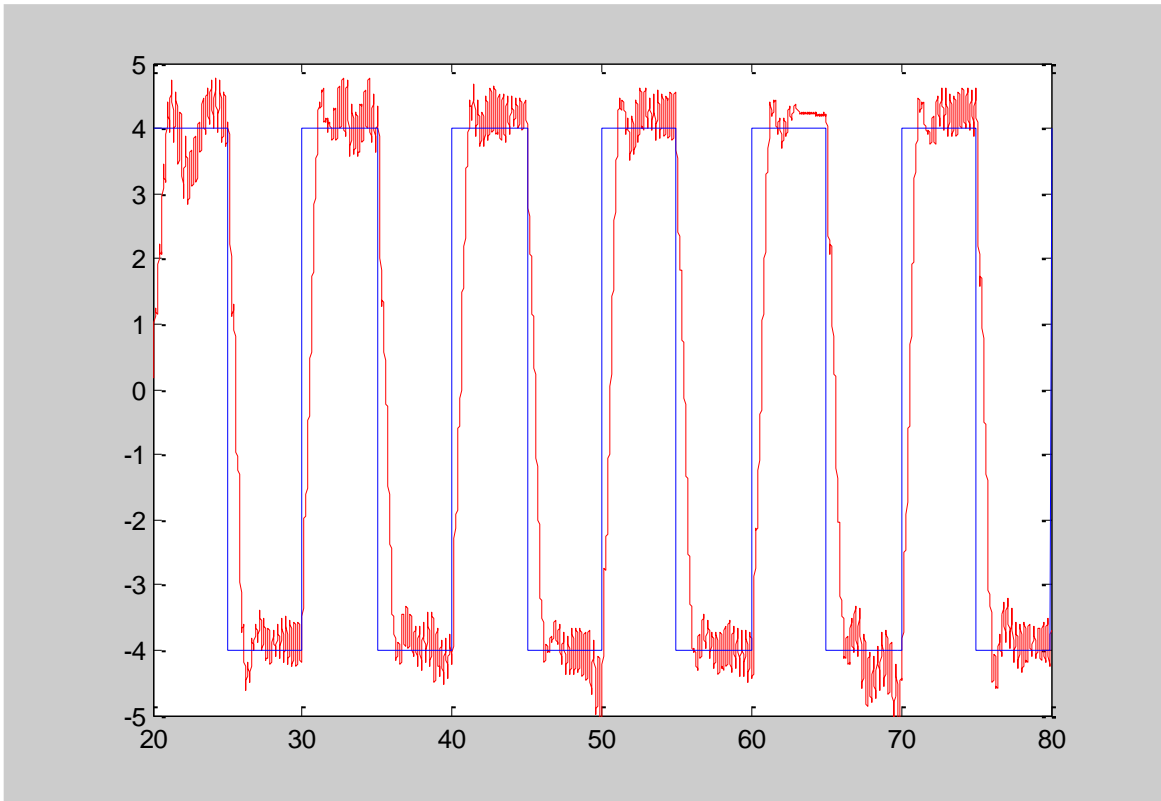


Figura 6.28: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.2$

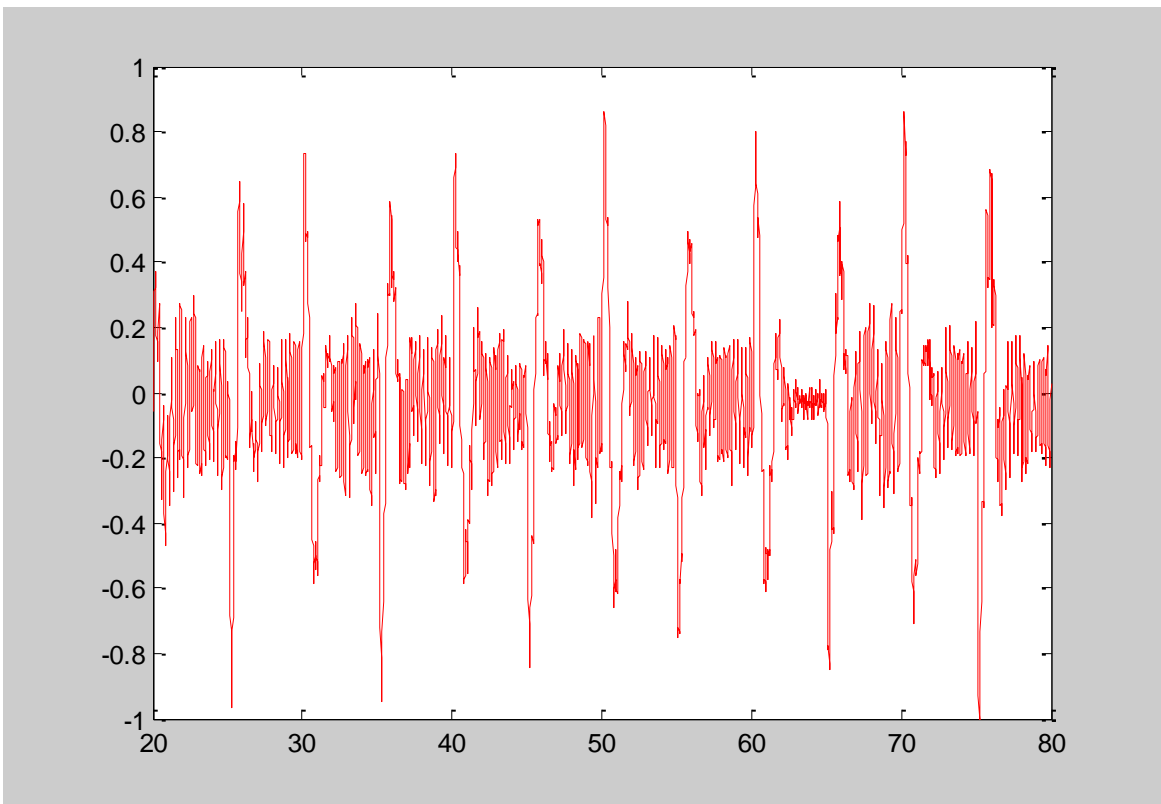


Figura 6.29: Ángulo del péndulo con $umbral = 0.2$

6.3.2 Realimentación del ángulo del péndulo

UMBRAL	ERROR ACUMULADO 1	ERROR ACUMULADO 2	ERROR ACUMULADO 3	MEDIA ERROR	ERROR RELATIVO
0	8,14	8,22	7,24	7,86	1,00
0,01	7,90	7,33	7,50	7,56	0,96
0,02	7,27	7,60	7,50	7,45	0,95
0,03	7,87	7,85	7,13	7,62	0,97
0,06	7,40	8,52	7,61	7,84	1,00
0,08	7,33	7,19	7,69	7,40	0,94
0,1	7,43	7,86	8,47	7,92	1,01
0,15	8,22	7,76	7,42	7,80	0,99
0,2	8,14	8,36	7,84	8,11	1,03
0,25	7,63	7,48	7,52	7,54	0,96
0,3	7,56	8,01	9,75	8,44	1,07

Tabla 4: Error acumulado del ángulo del péndulo usando el control por eventos

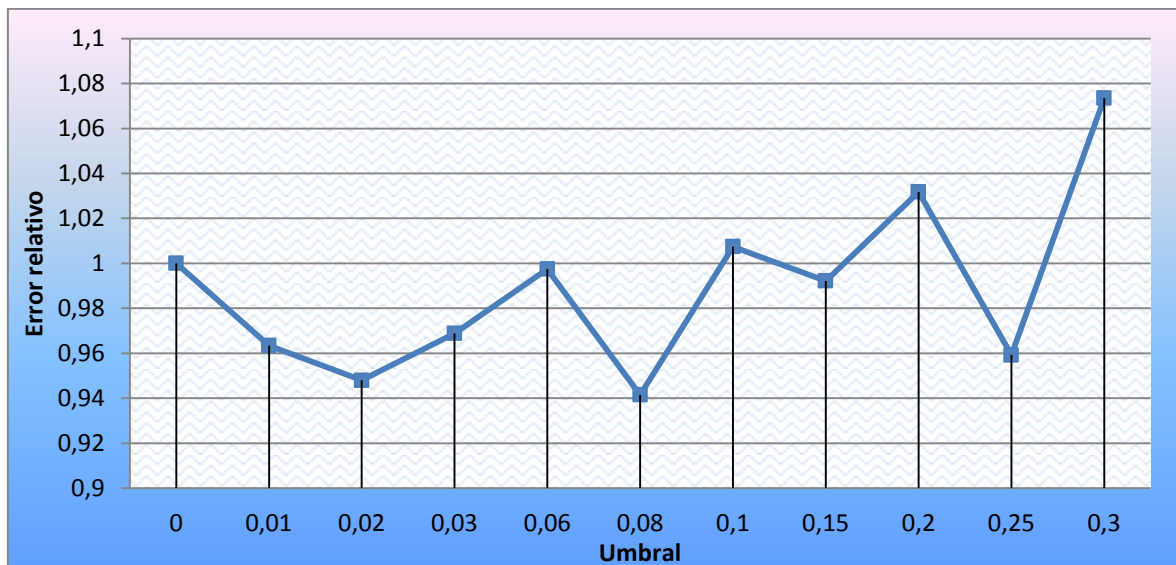


Figura 6.30: Error relativo del ángulo del péndulo usando el control por eventos

UMBRAL	BW 1	BW 2	BW 3	MEDIA BW	BW RELATIVO
0	100,00	100,00	100,00	100,00	1,00
0,01	65,68	65,02	64,27	64,99	0,65
0,02	43,75	45,02	41,45	43,41	0,43
0,03	31,37	33,17	30,93	31,82	0,32
0,06	16,32	13,78	16,15	15,42	0,15
0,08	10,50	9,55	11,62	10,56	0,11
0,1	6,92	8,75	7,70	7,79	0,08
0,15	5,37	4,57	3,50	4,48	0,04
0,2	2,70	2,95	2,60	2,75	0,03
0,25	1,62	2,07	1,90	1,86	0,02
0,3	1,40	1,30	1,50	1,40	0,01

Tabla 5: Ancho de banda consumido en el ángulo del péndulo usando el control por eventos

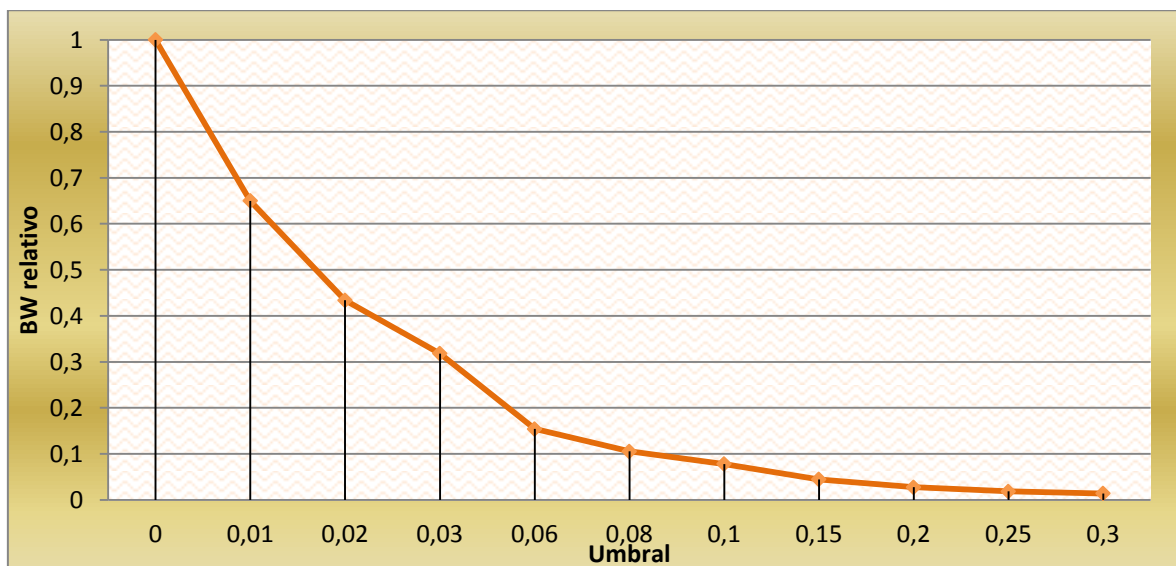


Figura 6.31: Ancho de banda relativo en el ángulo del péndulo usando el control por eventos

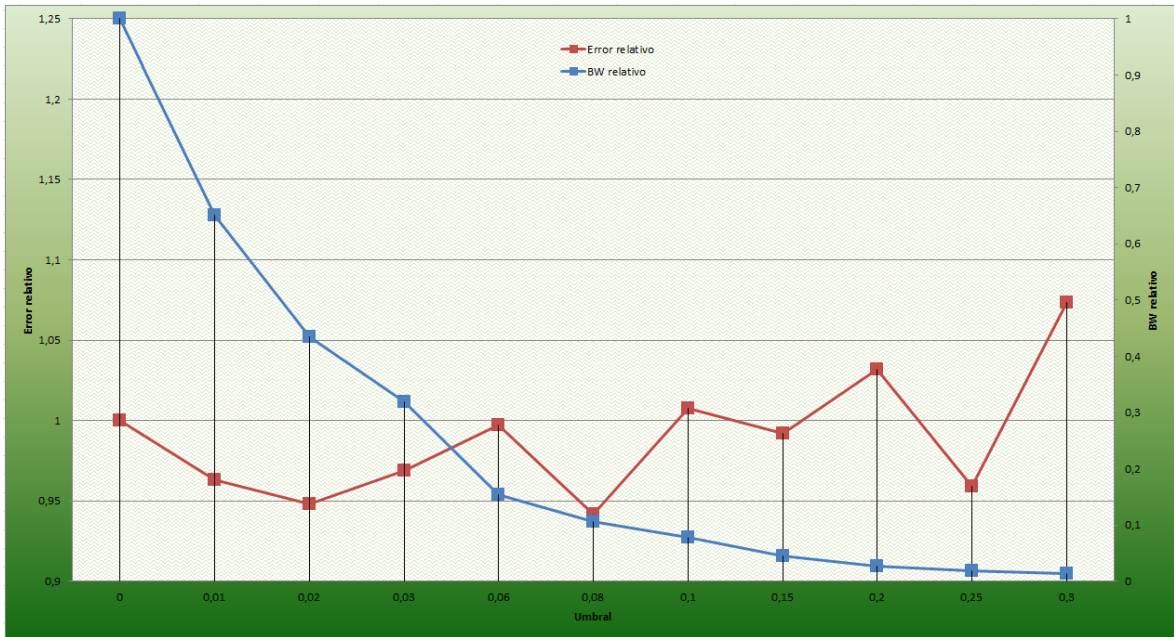


Figura 6.32: Error relativo frente al ancho de banda consumido en el ángulo del péndulo usando el control por eventos

Vemos que conforme el umbral aumenta, el error acumulado disminuye en un principio e incluso se mantiene aceptable en valores altos del umbral. Esto es debido a que el movimiento del péndulo presenta una sensibilidad tan alta que incluso el no transmitir tantas muestras beneficia el control del mismo. Además desciende bruscamente el ancho de banda hasta un punto (umbral = 0.1) en el que por mucho que aumentemos el umbral no obtenemos mejoras significativas en este ahorro.

También, a medida que aumentamos el umbral por encima del valor de 0.1, el seguimiento de la referencia por parte del carro se hace más erróneo y el péndulo presenta más oscilaciones. Estas se traducen en un mayor balanceo, cosa que no nos interesa que ocurra ya que lo que buscamos es eliminarlas en la medida de lo posible.

Las siguientes gráficas muestran cómo evolucionan las señales a lo largo del tiempo aplicando distintos umbrales en la realimentación del ángulo.

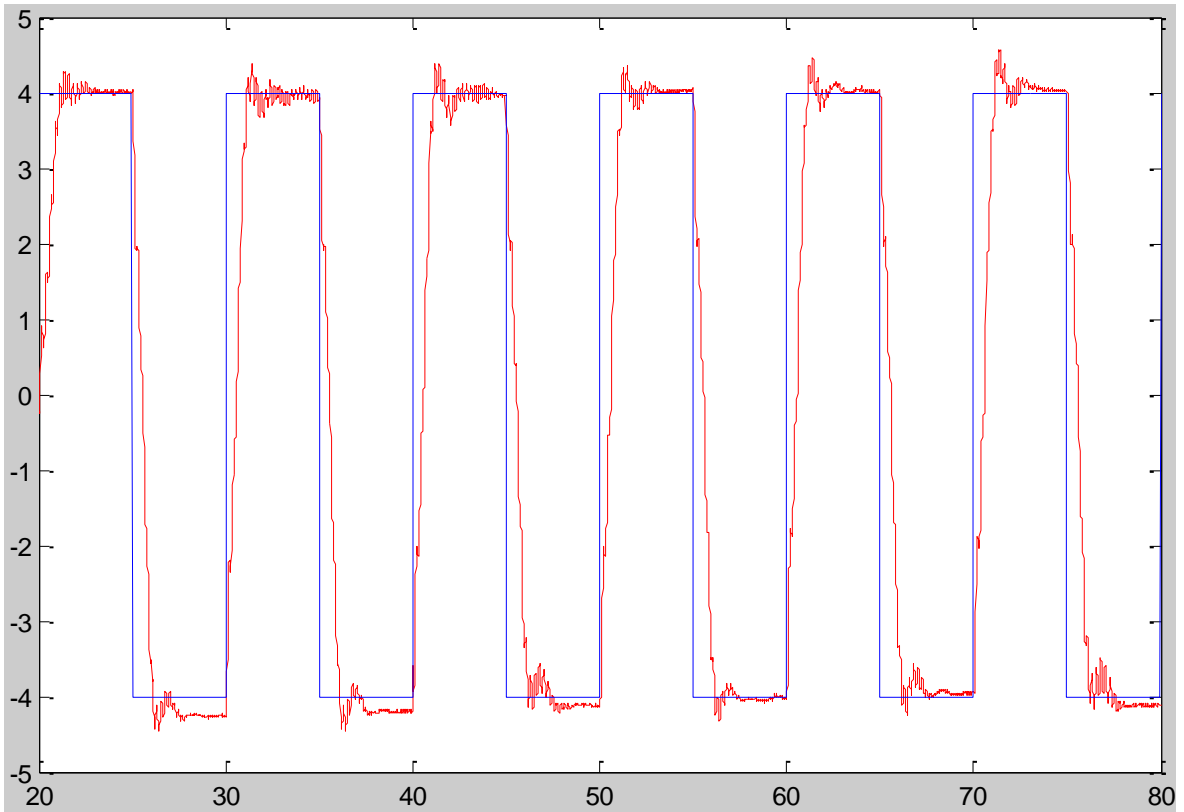


Figura 6.33: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.06$

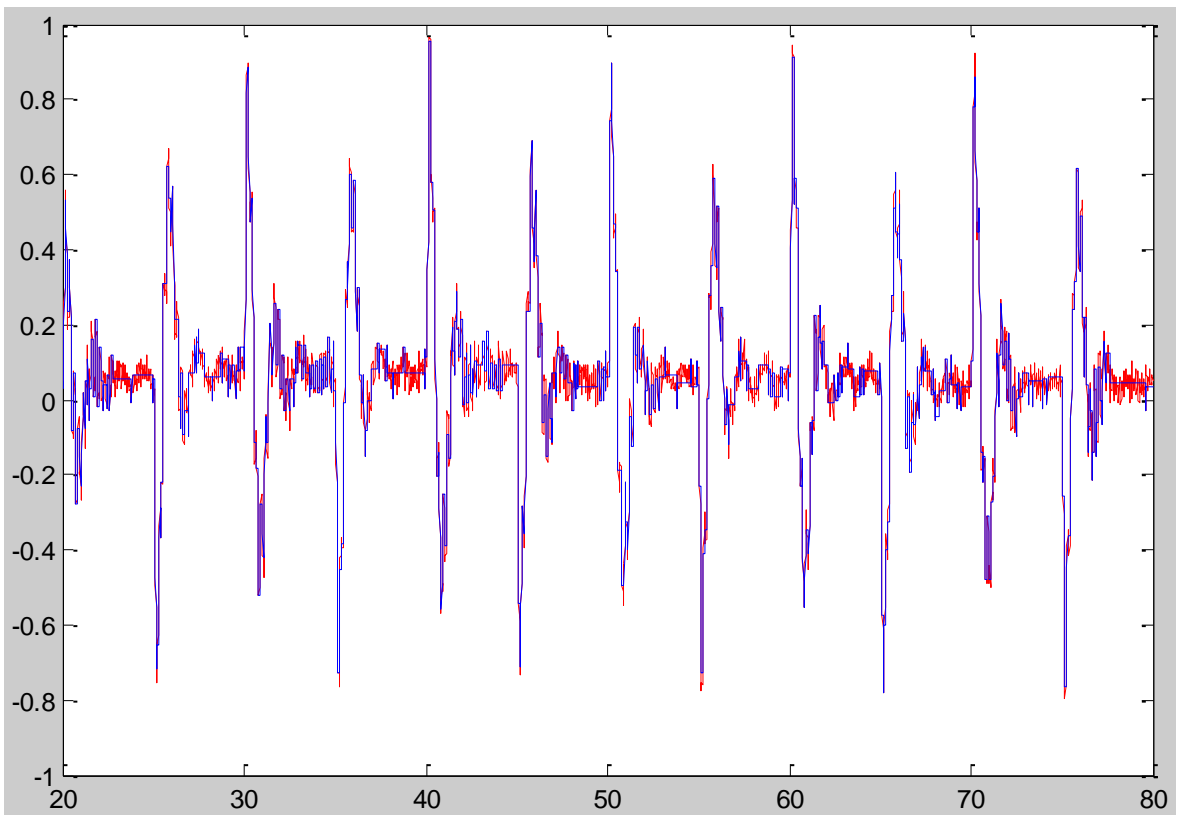


Figura 6.34: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.06$

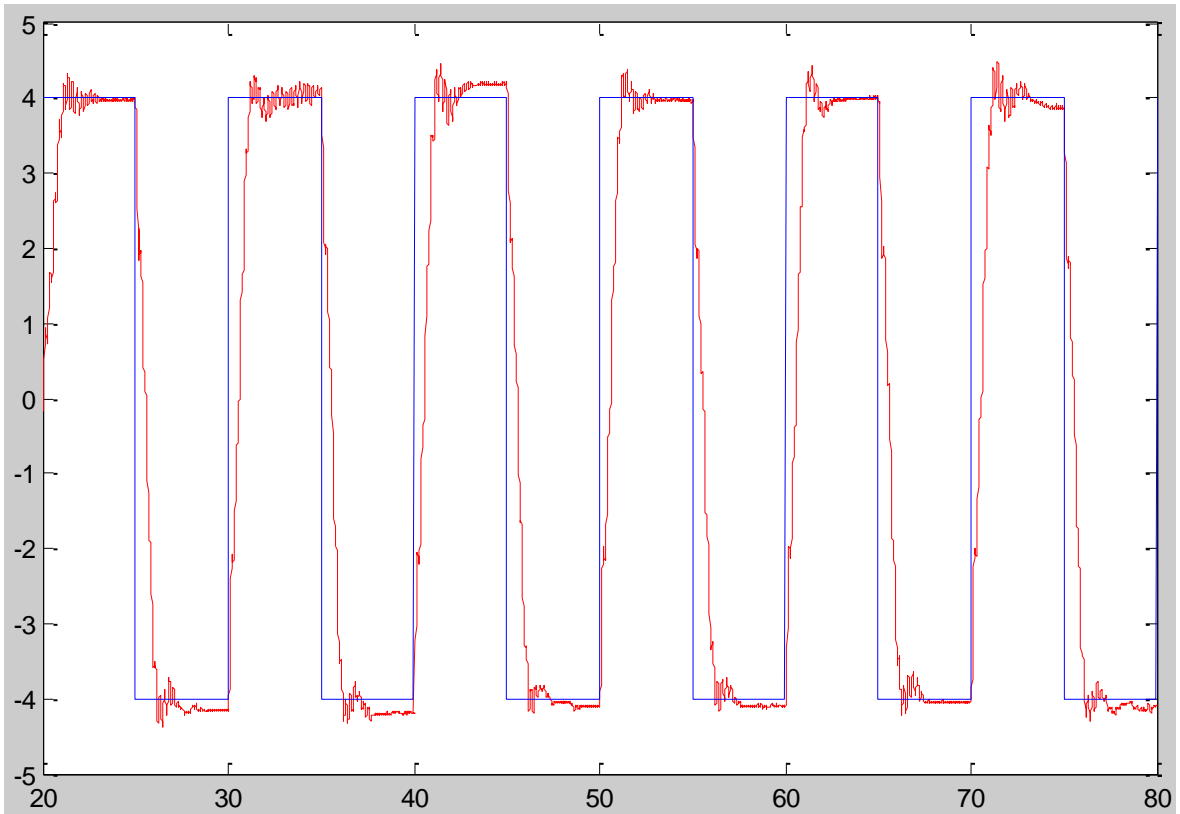


Figura 6.35: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.1$

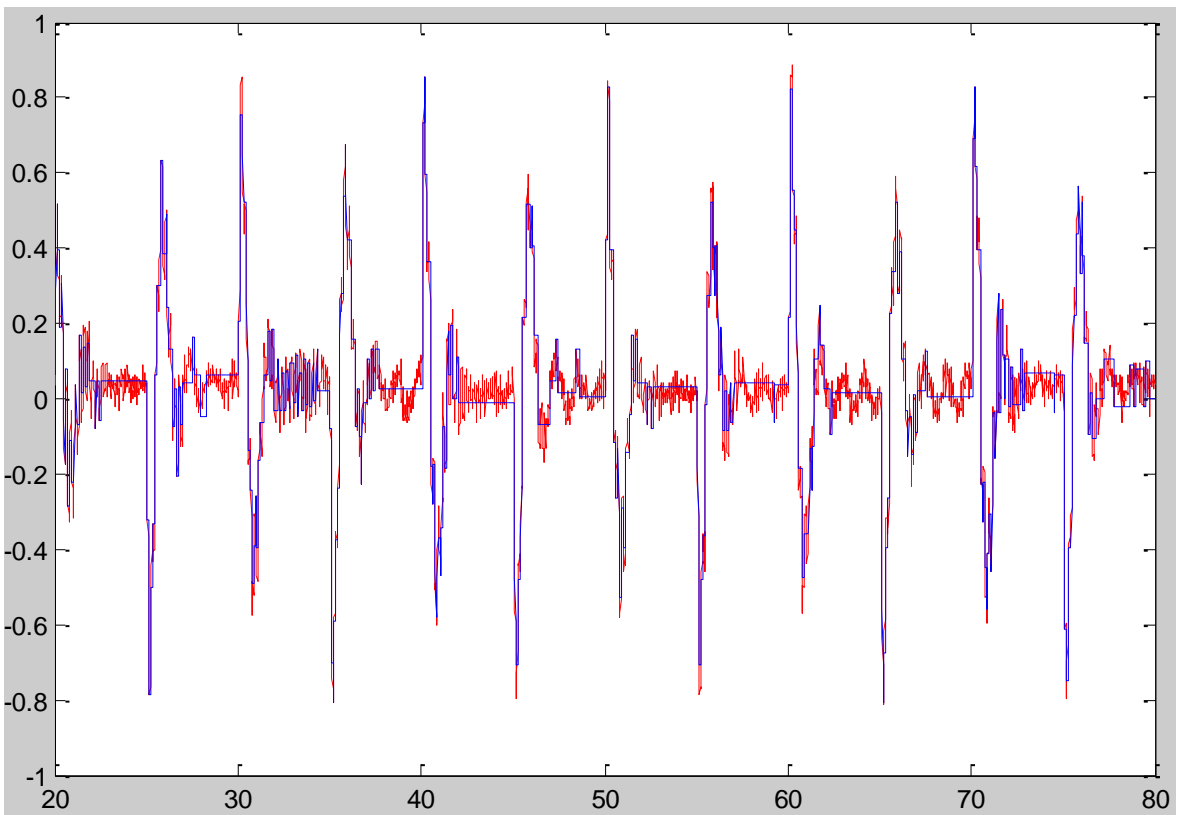


Figura 6.36: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.1$

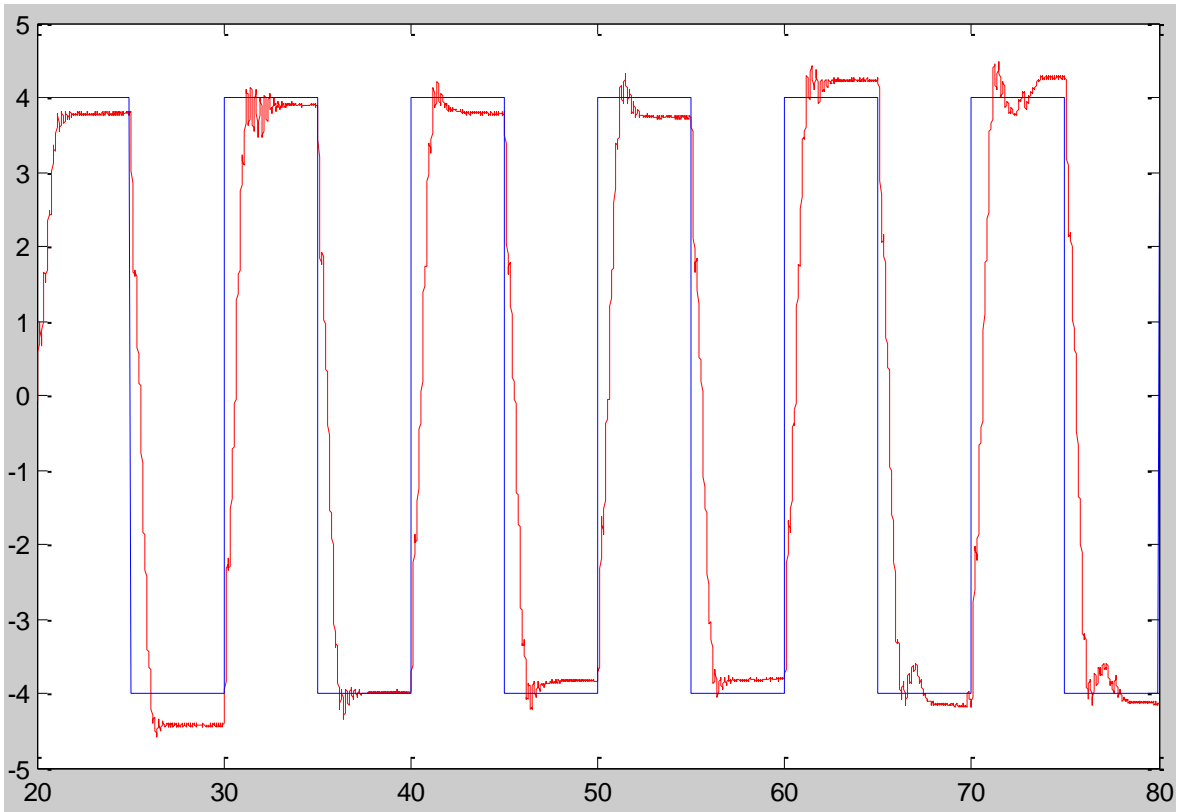


Figura 6.37: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.2$

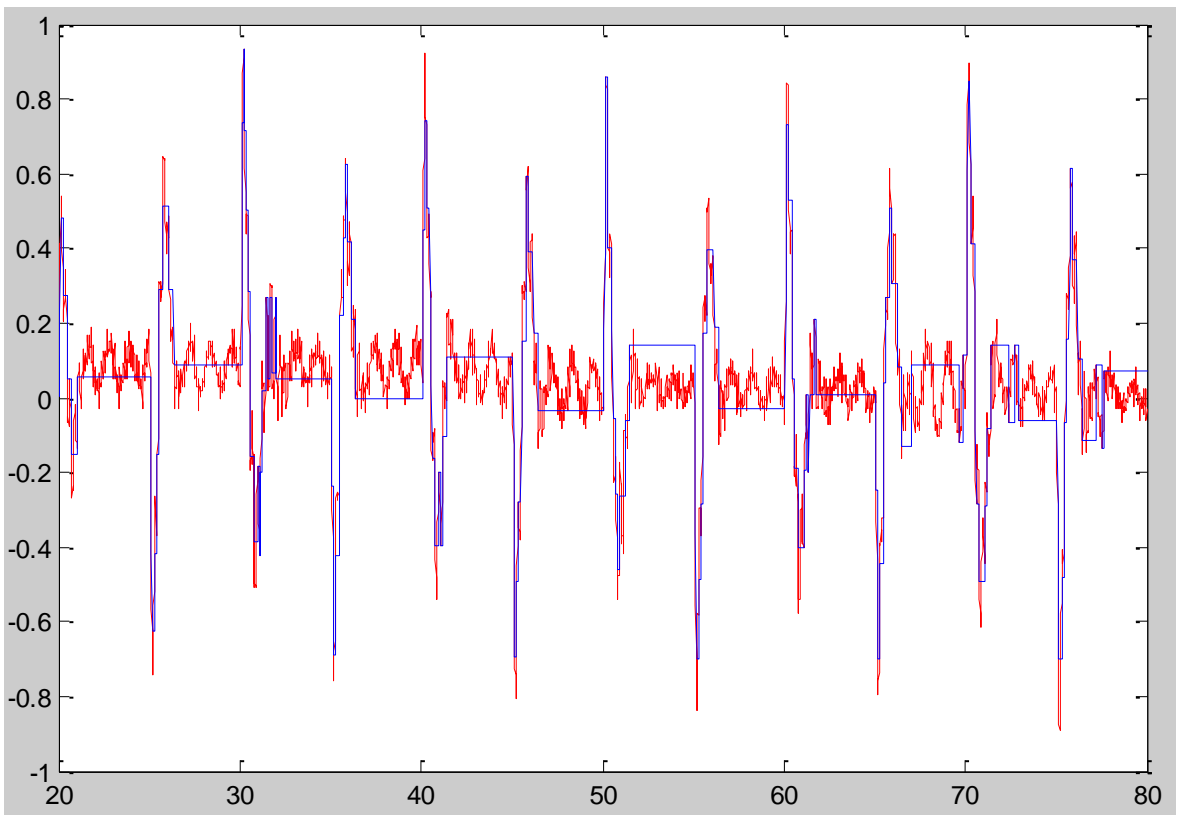


Figura 6.38: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.2$

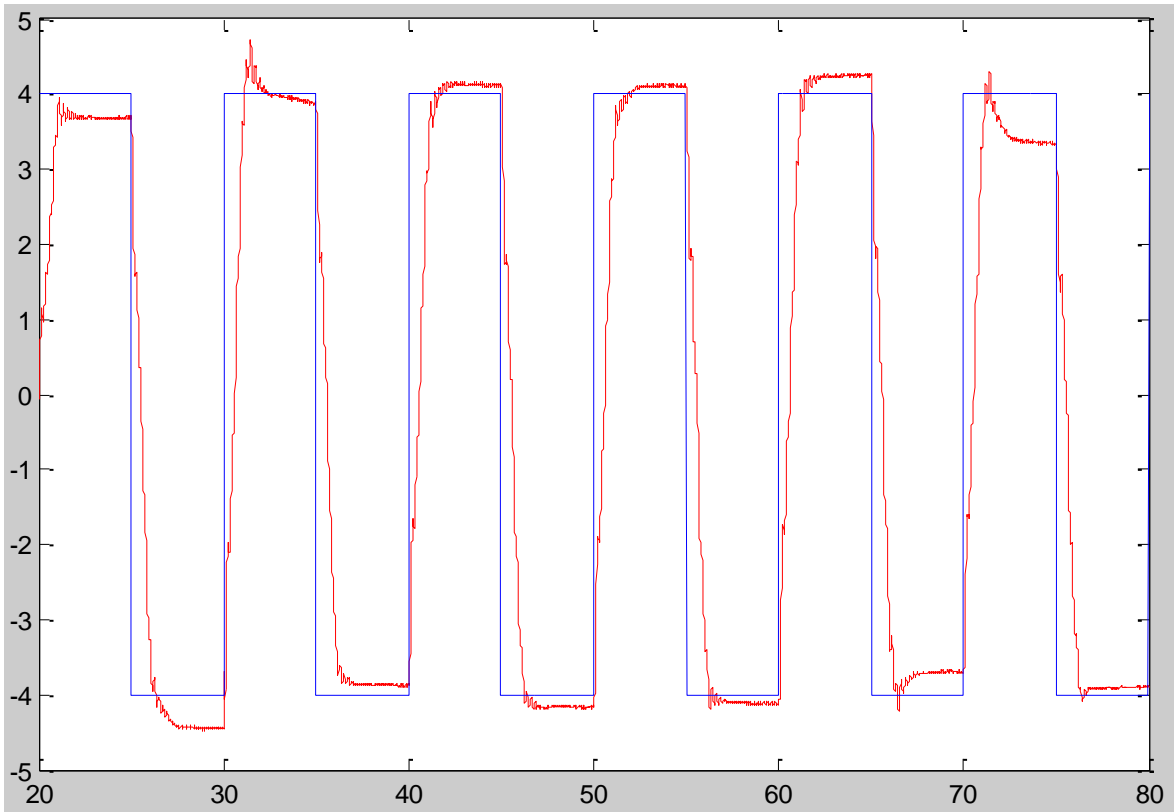


Figura 6.39: Trayectoria del carro frente a la referencia con $umbral = 0.3$

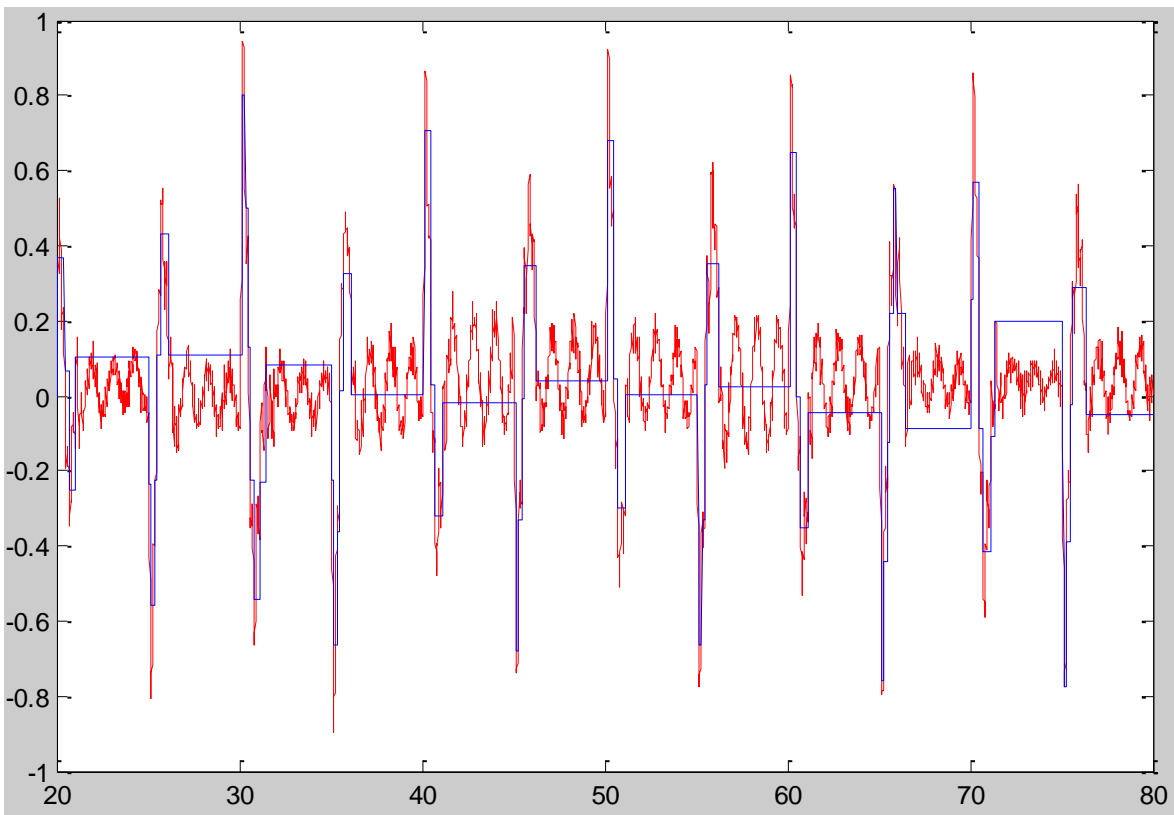


Figura 6.40: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con $umbral = 0.3$

6.4 Análisis de los umbrales combinados

En primer lugar, ayudándonos de las gráficas anteriores y de un factor I que describiremos a continuación, elegiremos aquellos umbrales que hayan dado buenos resultados a la hora de controlar el sistema.

El factor I viene dado por la fórmula de abajo, y nos ayuda a determinar a partir de qué umbral el error comienza a aumentar sin que el ancho de banda disminuya notablemente, de manera que será en ese punto y en sus alrededores más próximos donde encontremos aquellos valores que nos interesan para demostrar el objetivo de nuestro proyecto:

$$I = p \cdot e_r + (1 - p) \cdot BW_r$$

Dónde:

$$p = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$$

A continuación presentamos las gráficas que determinan dicho factor:

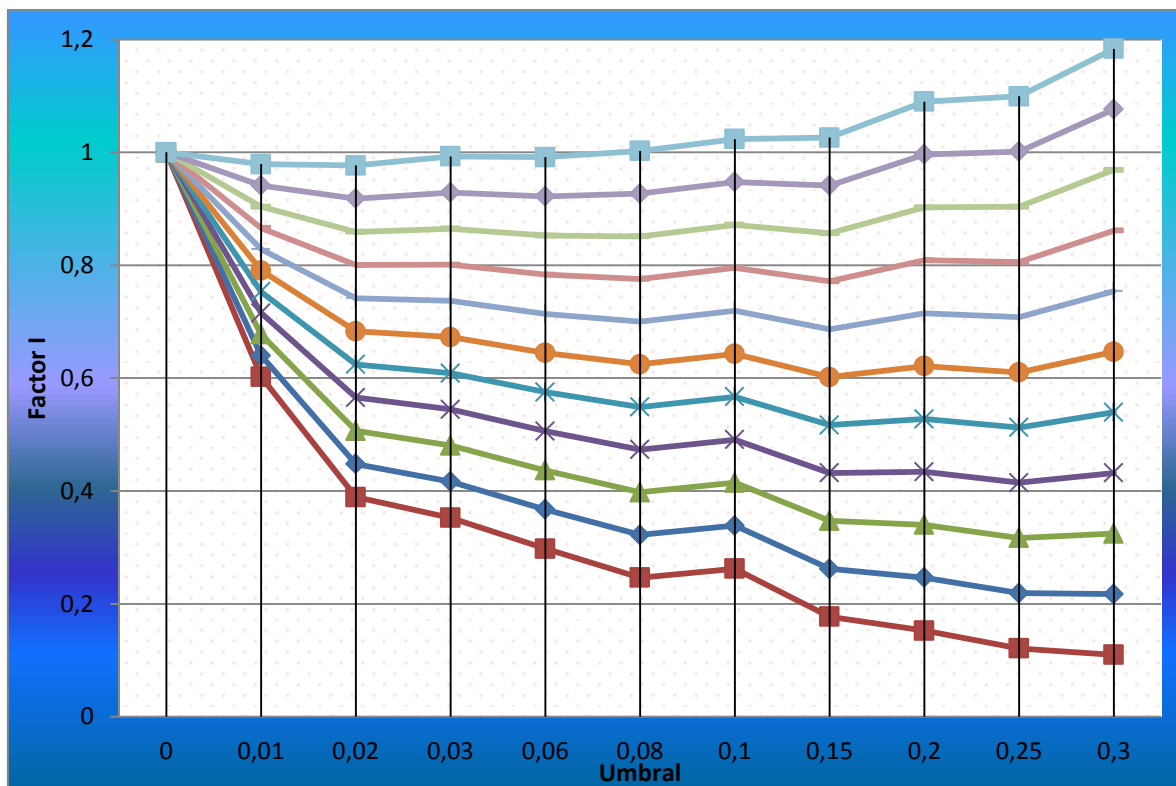


Figura 6.41: Factor I en la realimentación de la posición del carro

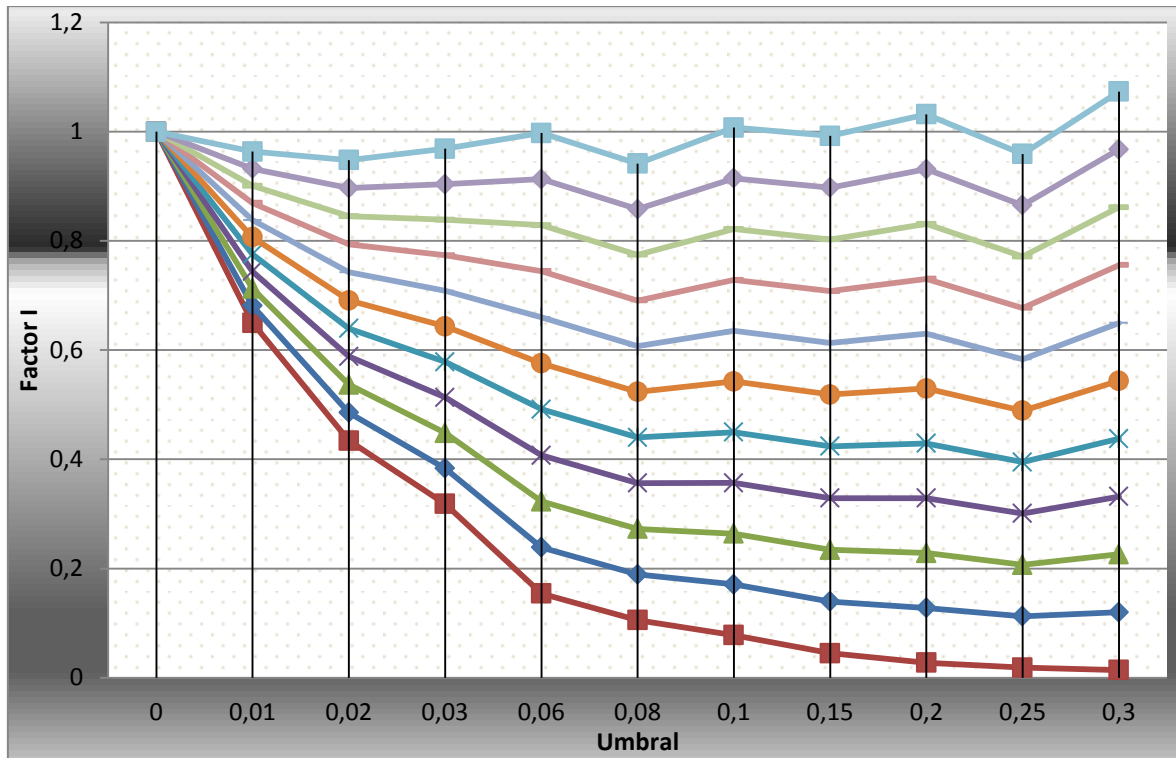


Figura 6.42: Factor I en la realimentación del ángulo del péndulo

Analizando toda la información anterior llegamos a la conclusión de que, para la realimentación de la posición del carro, los umbrales 0.06 y 0.08 son los que combinaremos ya que presentan un error más que aceptable y un bajo consumo de ancho de banda: casi un 30% y un 25% respectivamente. También combinaremos el umbral 0.07, ya que siendo el valor medio de ambos presenta unos resultados muy similares.

En cuanto en la realimentación del ángulo del péndulo y por las mismas razones que las explicadas en el párrafo anterior, los umbrales que combinaremos son 0.03, 0.06, 0.08 y 0.1.

De esta manera, después de ejecutar el proceso dos veces en cada una de las combinaciones de umbrales elegidas, los resultados obtenidos para las dos realimentaciones son los siguientes:

UMBRAL CARRO / PÉNDULO	ERROR POSICIÓN	ERROR ÁNGULO	ERROR POSICIÓN (RELATIVO)	ERROR ÁNGULO (RELATIVO)
0.06 / 0.03	61,35	9,61	1,09	1,22
	57,85	8,71	1,03	1,11
0.06 / 0.06	56,98	8,74	1,01	1,11
	55,84	8,54	0,99	1,09
0.06 / 0.08	57,81	8,59	1,03	1,09
	58,01	8,24	1,03	1,05
0.06 / 0.1	58,88	8,75	1,05	1,11
	59,34	9,54	1,05	1,21
0.07 / 0.03	56,74	8,83	1,01	1,12
	56,28	8,73	1,00	1,11
0.07 / 0.06	59,73	9,82	1,06	1,25
	59,30	9,06	1,05	1,15
0.07 / 0.08	60,53	9,83	1,08	1,25
	58,12	8,84	1,03	1,12
0.07 / 0.1	58,49	8,88	1,04	1,13
	58,78	9,03	1,04	1,15
0.08 / 0.03	58,84	9,64	1,05	1,23
	57,89	8,89	1,03	1,13
0.08 / 0.06	57,78	8,94	1,03	1,14
	57,11	8,77	1,01	1,12
0.08 / 0.08	58,08	9,42	1,03	1,20
	59,30	9,57	1,05	1,22
0.08 / 0.1	60,68	10,30	1,08	1,31
	57,76	9,65	1,03	1,23

Tabla 6: Errores acumulados usando el control por eventos mediante umbrales combinados

UMBRAL CARRO / PÉNDULO	BW CARRO	BW PÉNDULO	CUENTAS CARRO	CUENTAS PÉNDULO	BW TOTAL CONSUMIDO	BW TOTAL RELATIVO
0.06 / 0.03	42,32	43,77	2539	2625	43,03	0,43
	38,77	40,22	2326	2413	39,49	0,39
0.06 / 0.06	39,08	21,13	2344	1267	30,09	0,30
	36,67	19,70	2200	1182	28,18	0,28
0.06 / 0.08	35,28	13,60	2117	816	24,44	0,24
	34,25	13,17	2055	785	23,67	0,24
0.06 / 0.1	38,73	11,03	2324	662	24,88	0,25
	37,45	11,12	2247	667	24,28	0,24
0.07 / 0.03	34,30	40,17	2058	2410	37,23	0,37
	34,15	39,17	2049	2350	36,66	0,37
0.07 / 0.06	35,72	21,42	2143	1284	28,56	0,29
	35,53	21,83	2132	1310	28,68	0,29
0.07 / 0.08	38,43	17,57	2306	1054	28,00	0,28
	33,97	15,07	2038	904	24,52	0,25
0.07 / 0.1	35,15	11,97	2109	718	23,56	0,24
	33,88	11,25	2033	675	22,57	0,23
0.08 / 0.03	31,57	40,77	1894	2446	36,17	0,36
	30,68	40,65	1841	2439	35,67	0,36
0.08 / 0.06	31,78	21,50	1907	1290	26,64	0,27
	29,67	20,20	1780	1212	24,93	0,25
0.08 / 0.08	33,25	16,65	1995	999	24,95	0,25
	35,40	18,20	2124	1092	26,80	0,27
0.08 / 0.1	35,30	14,87	2118	892	25,08	0,25
	32,60	12,87	1956	772	22,73	0,23

Tabla 7: Ancho de banda consumido usando el control por eventos mediante umbrales combinados

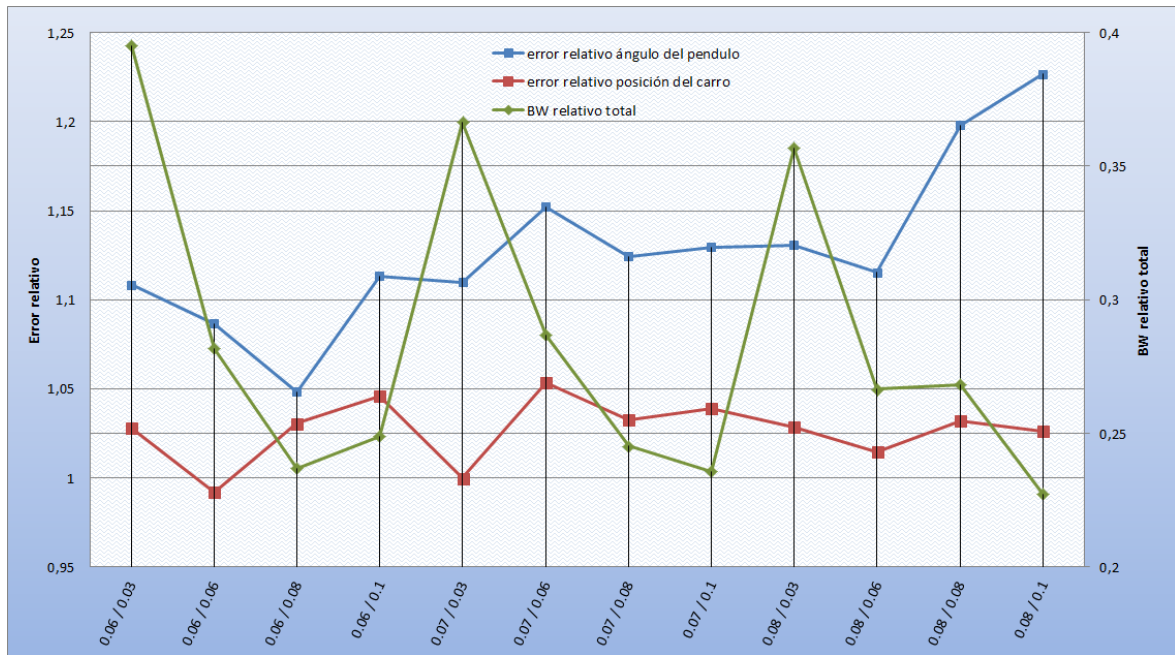


Figura 6.43: Error relativo frente al ancho de banda consumido usando el control por eventos mediante umbrales combinados

Tras los resultados seleccionamos aquella combinación de umbrales que consideramos mejor para controlar el proceso: 0.06 / 0.08. Así la consideramos porque presenta un error relativo bastante moderado para cada una de las señales, de hecho el más bajo para el ángulo del péndulo, y por la reducción del consumo de ancho de banda tanto en éste ($BW_{\text{consumido}} = 13.08\%$) como en la posición del carro ($BW_{\text{consumido}} = 34.25\%$). Al realizarse 12000 medidas, habiendo solo 2055 cuentas en la señal de la posición y 785 en la del ángulo, el total del ancho de banda consumido es de:

$$BW_{\text{consumido}} = \frac{2055 + 785}{12000} = 23.67\%$$

A continuación presentamos las gráficas para la combinación de umbrales seleccionada y, a modo de ejemplo, mostramos algunas de otras combinaciones para que quede más claro el funcionamiento del péndulo lineal cuando aplicamos el control por eventos.

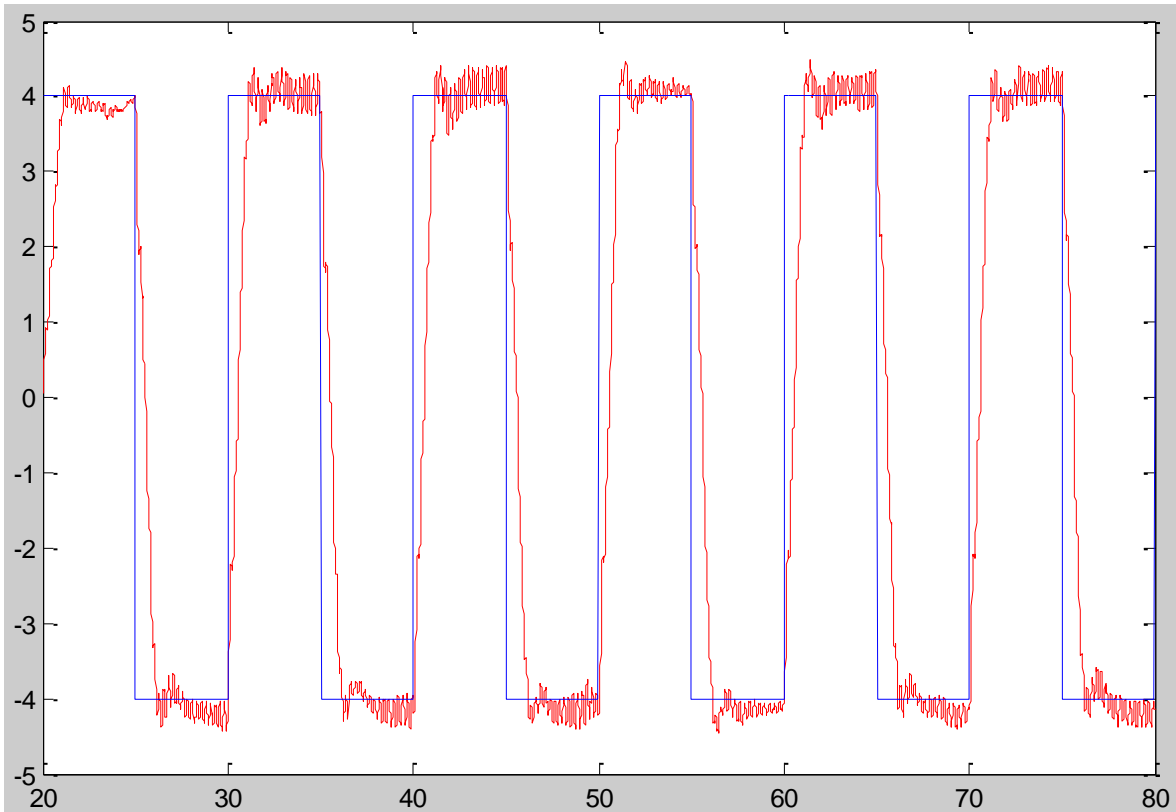


Figura 6.44: Trayectoria del carro frente a la referencia con *combinación de umbrales* = 0.06 / 0.08

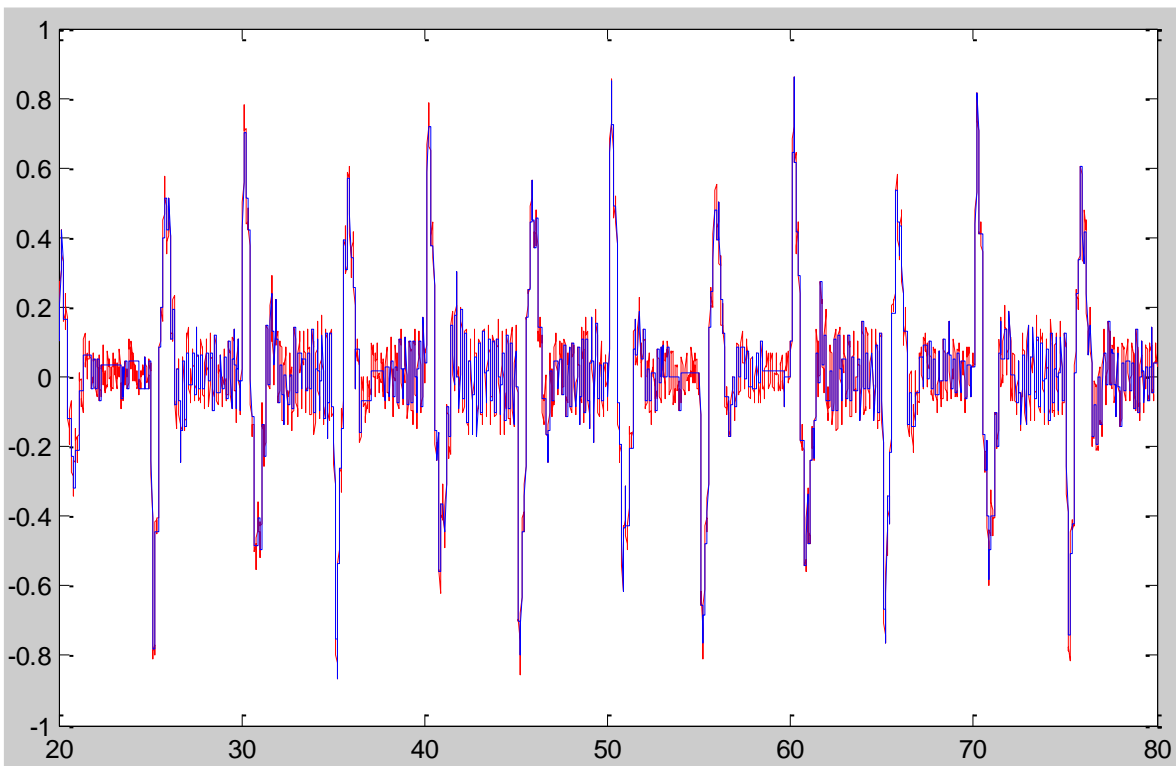


Figura 6.45: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con *combinación de umbrales* = 0.06 / 0.08

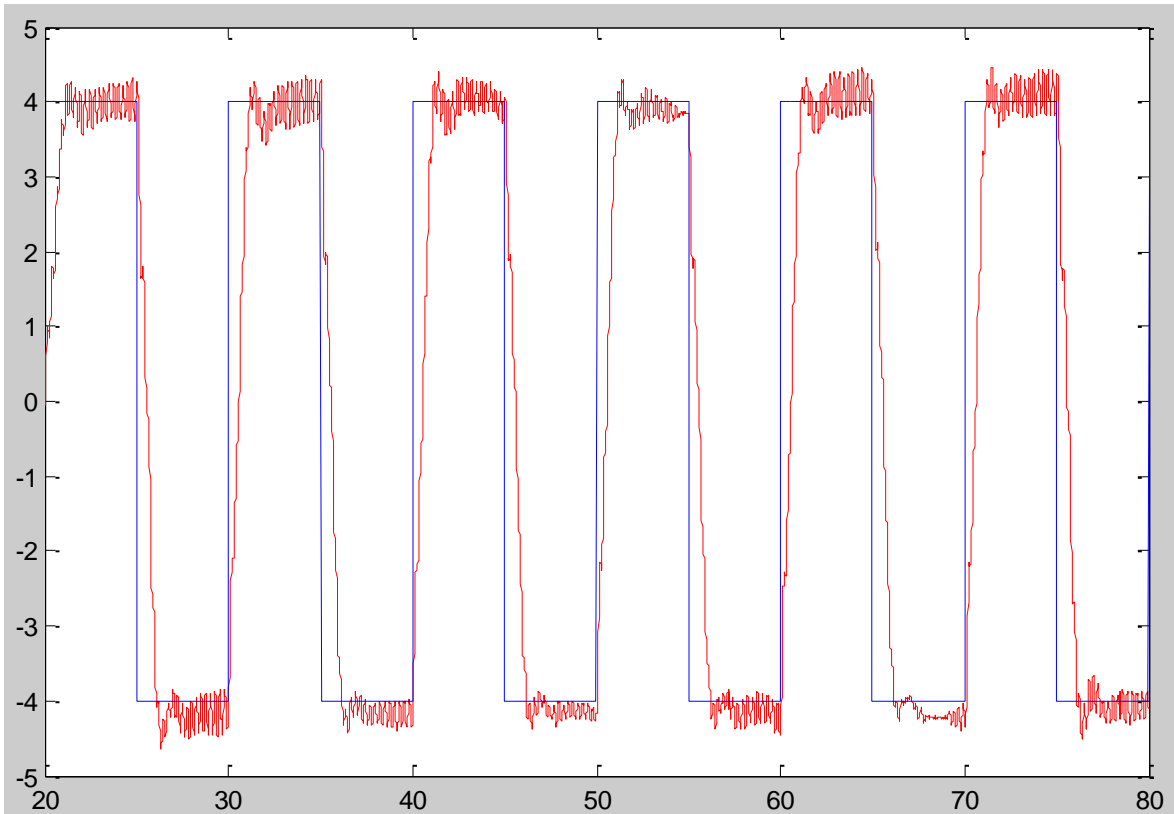


Figura 6.46: Trayectoria del carro frente a la referencia con *combinación de umbrales* = 0.07 / 0.1

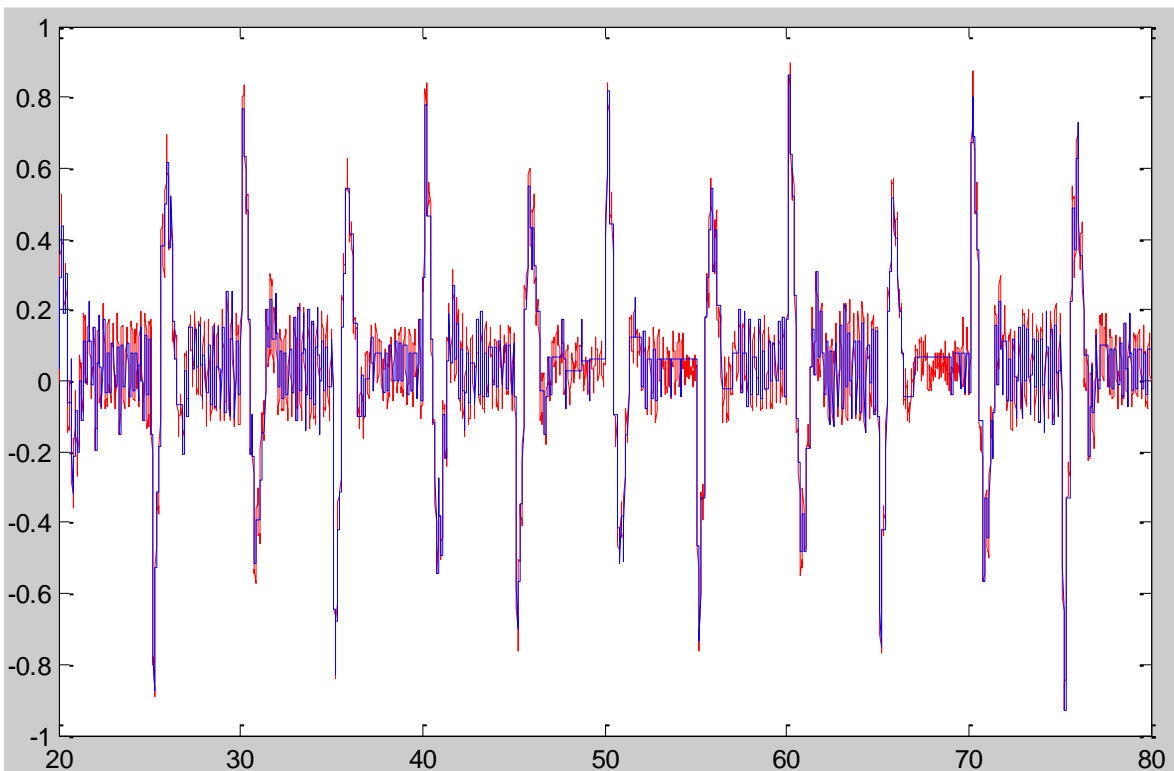


Figura 6.47: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con *combinación de umbrales* = 0.07 / 0.1

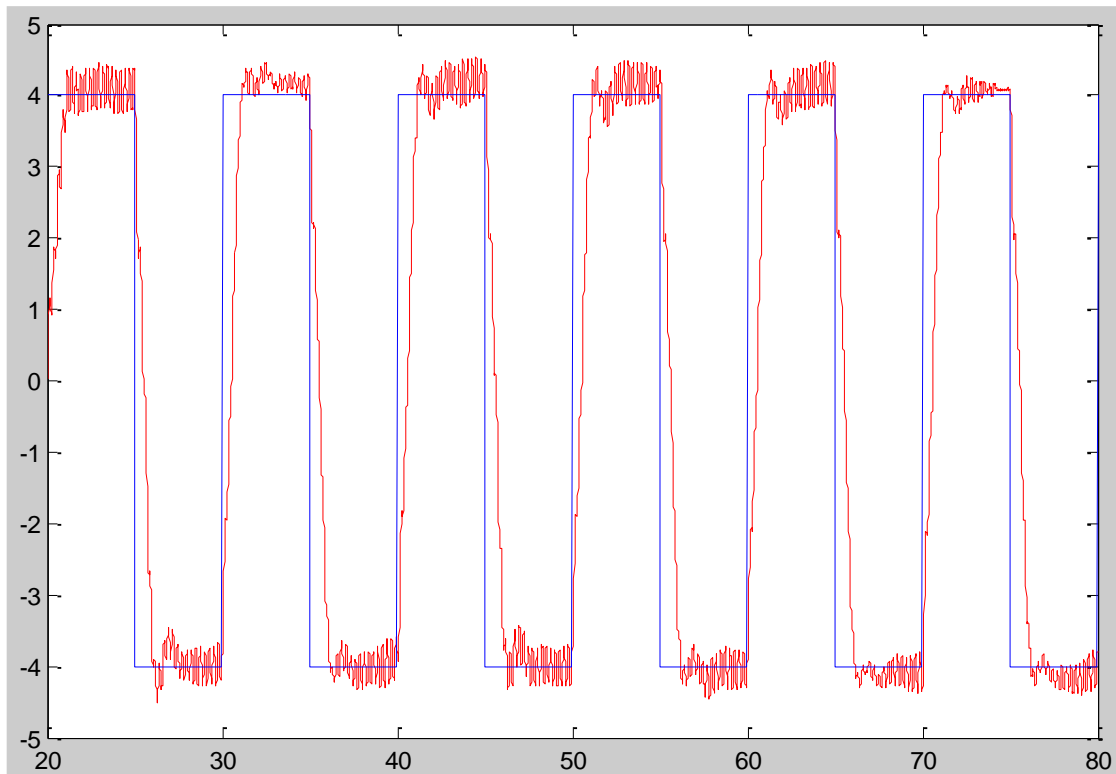


Figura 6.48: Trayectoria del carro frente a la referencia con *combinación de umbrales* = 0.08 / 0.1

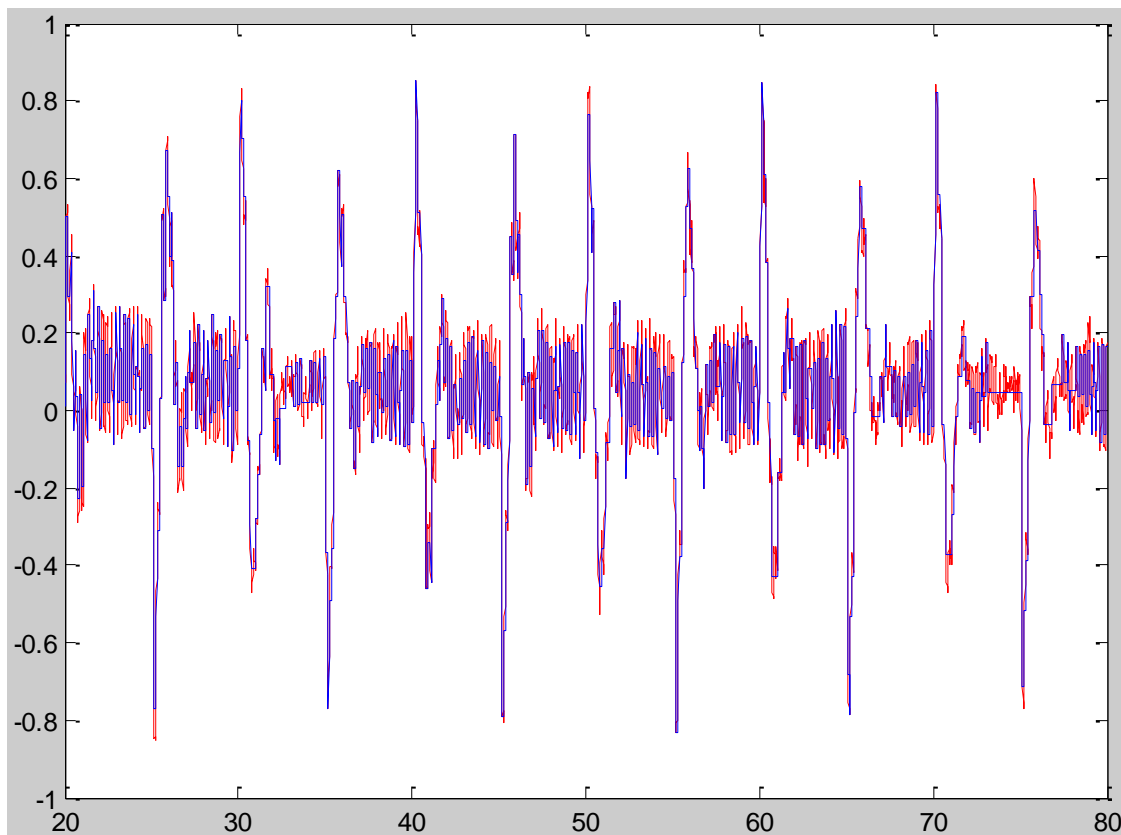


Figura 6.49: Muestras enviadas frente a las totales en el ángulo del péndulo con *combinación de umbrales* = 0.08 / 0.1

7. Problemas y soluciones

7.1 Zona muerta

En un principio pensamos en actuar sobre la zona muerta del motor, es decir, el intervalo de tensión donde este no es capaz de mover la carga.

Para ello, en Simulink® se crea una variable dinámica, que va aumentando poco a poco desde cero conectada directamente al motor. En el momento que el carro comience a moverse, se habrá identificado uno de los límites del motor. El proceso habría que hacerlo tanto para valores positivos como negativos, es decir, hacia ambos sentidos de la vía.

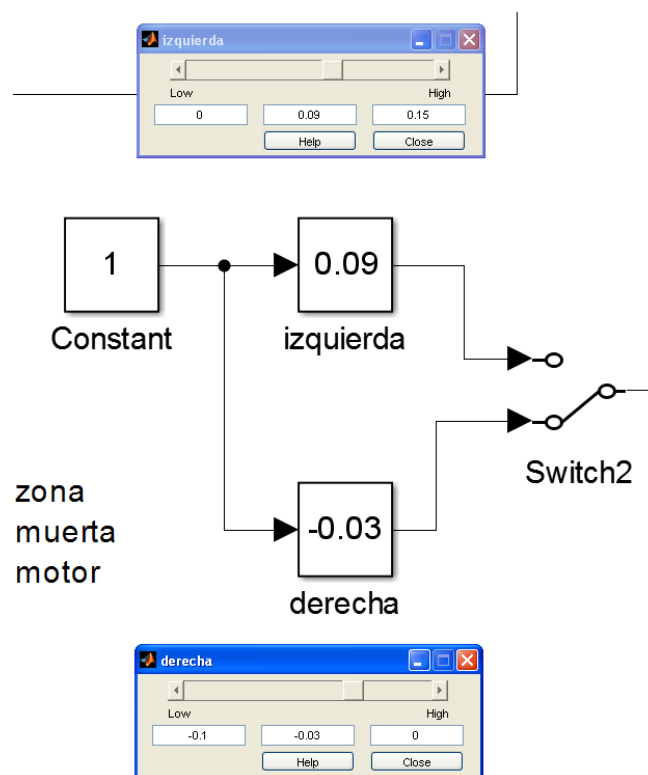


Figura 7.1: Bloques para identificar la zona muerta del motor

El motor usado en este proyecto tiene una zona muerta de + 0.09V y - 0.03V.

El problema de tener una zona muerta es la imposibilidad de controlar el proceso en ese intervalo puesto que el motor no es capaz de moverse en valores tan pequeños, con lo que es imposible obtener la precisión deseada respecto a la referencia.

La solución radica en sumar, antes de producirse la acción de control, los mínimos de nuestro intervalo para que aquellos valores pertenecientes a la zona muerta salgan de ella.

En cambio, la solución anterior está enfocada más bien al control del péndulo invertido ya que tiene que moverse continuamente para que éste no se caiga. En nuestro caso particular ocurre lo contrario, pues deseamos que cuando el sistema alcance la referencia, tanto el péndulo como el carro detengan sus oscilaciones completamente.

Dicho esto, nos hemos fijado en que cuando el péndulo está prácticamente parado, oscilando entre ± 0.1 voltios, hay muestras que son leídas por el sensor. Como hemos dicho, el péndulo está casi quieto y nosotros así consideramos que lo está. Por ello no nos interesa que lea esas minúsculas variaciones del ángulo, ya que al amplificarse la señal para controlar el balanceo del péndulo, éstas provocan movimientos no deseados en el carro haciendo que éste nunca llegue a pararse, pues no deja de oscilar alrededor del valor final. En otras palabras, esas pequeñas oscilaciones se retroalimentan aumentando el error, e impidiendo mantener una posición fija y, por lo tanto, empeorando el funcionamiento del sistema. Abajo mostramos un ejemplo gráfico (de tantos) de lo que hemos comentado:

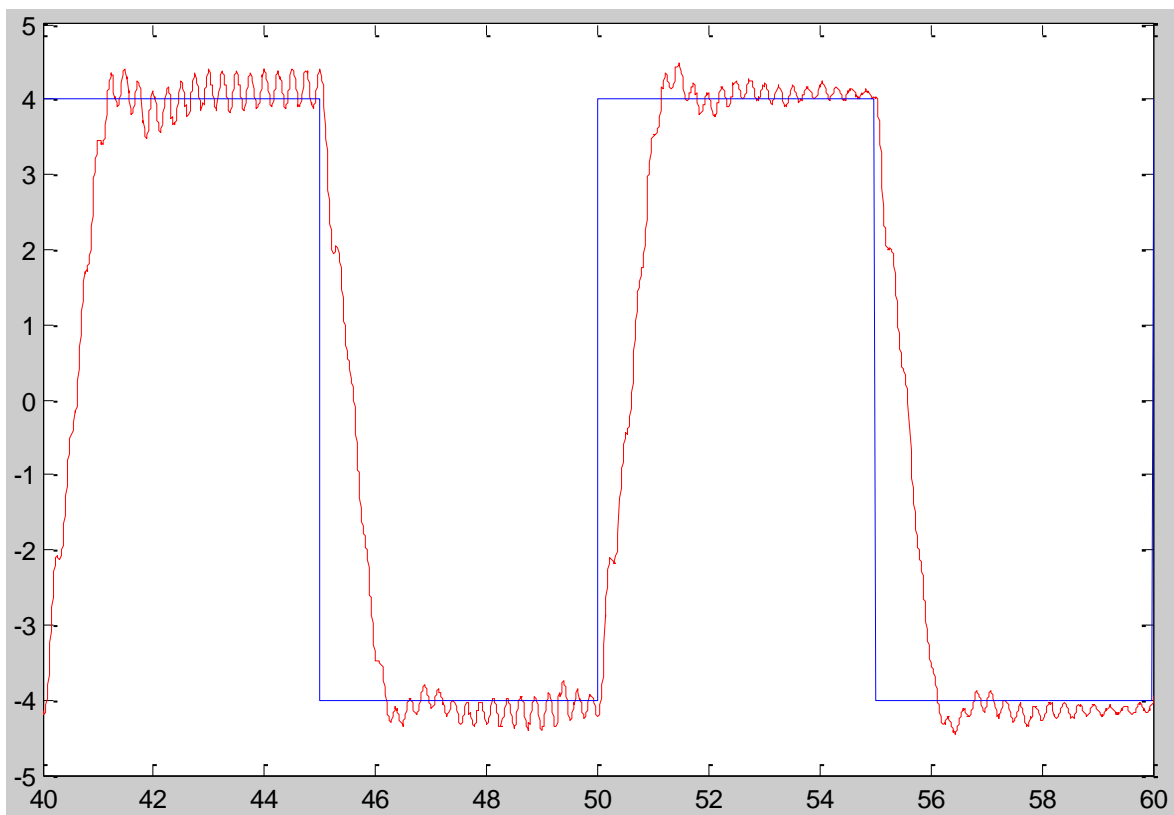


Figura 7.3: Oscilaciones del carro alrededor del valor final amplificadas por las minúsculas variaciones del ángulo del péndulo

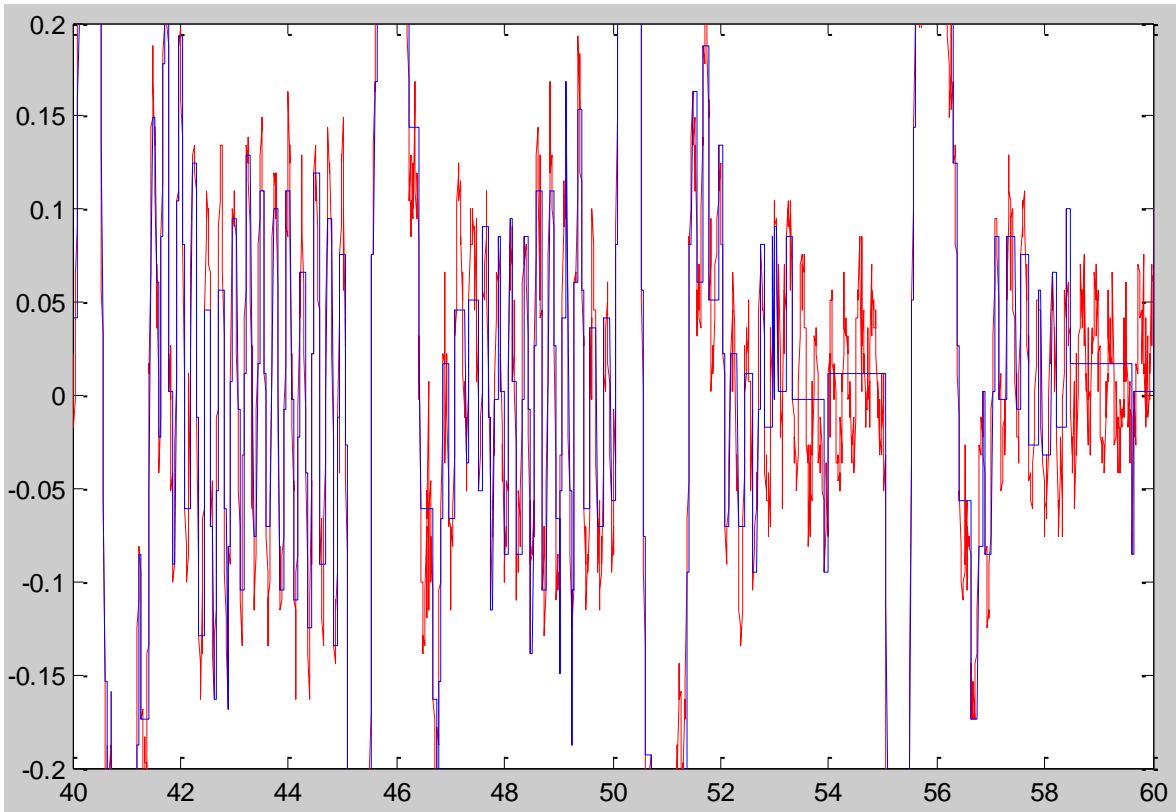


Figura 7.4: Minúsculas variaciones del ángulo del péndulo que provocan un mal posicionamiento del sistema

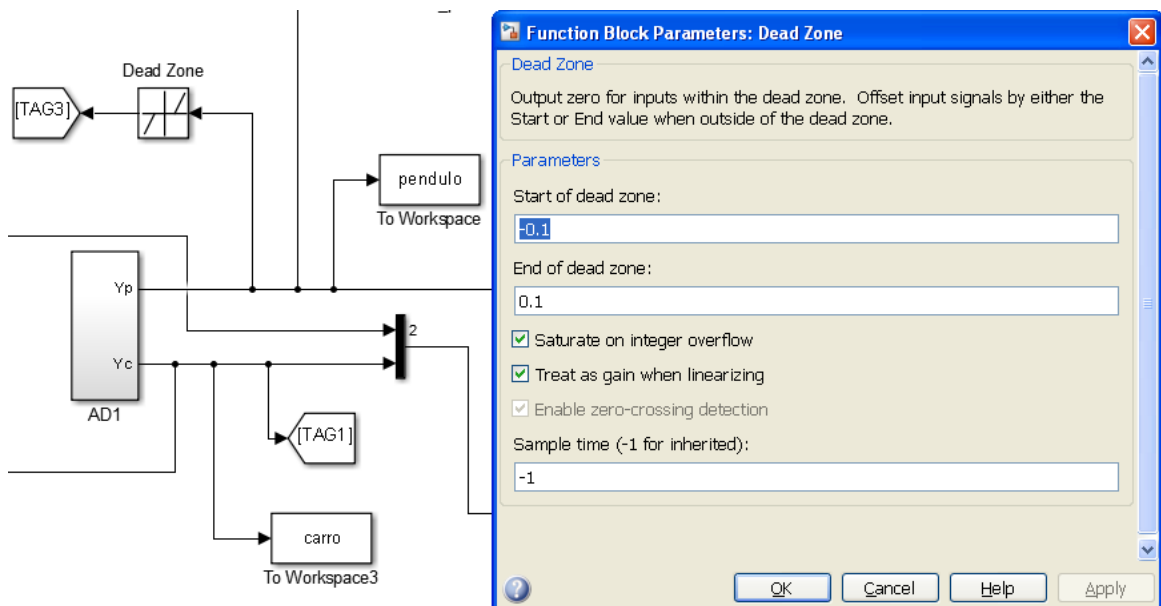


Figura 7.5: Bloques y parámetros para definir la zona muerta del ángulo

Gracias al bloque *Dead Zone* conseguimos obviar dichos valores y mejorar el funcionamiento general de todo el sistema, tal y como vemos en las siguientes gráficas:

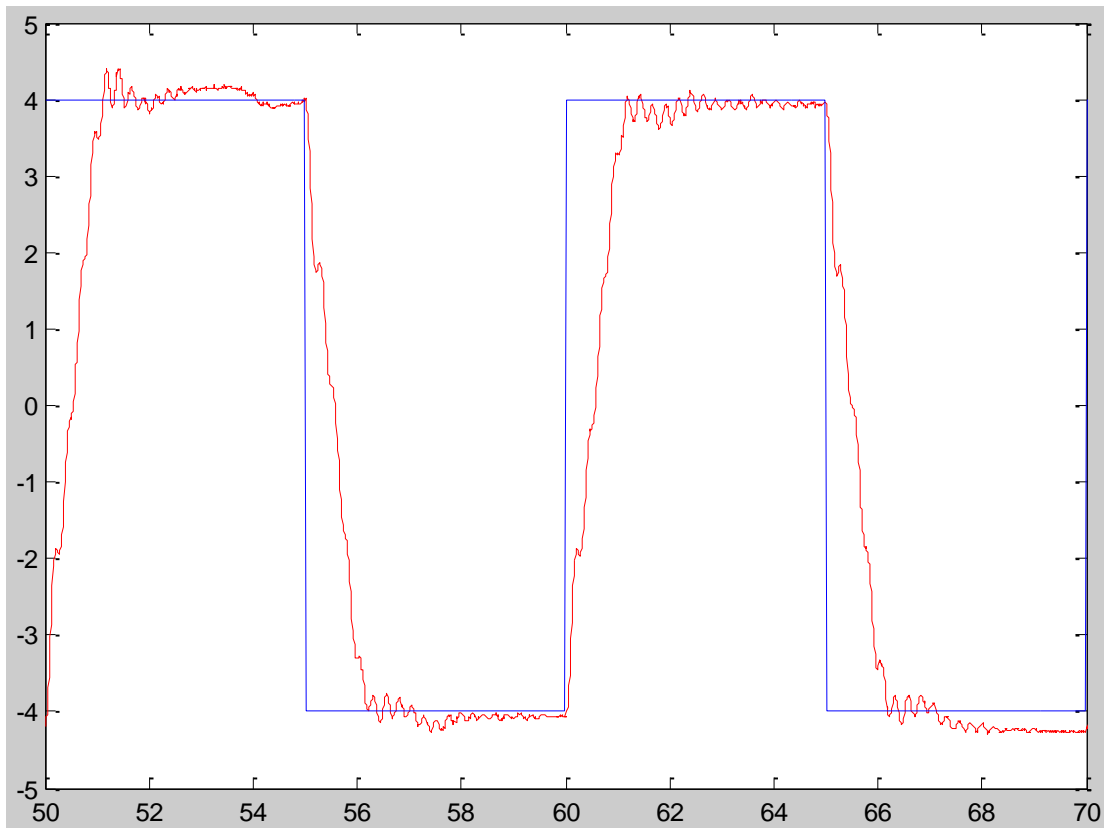


Figura 7.6: Oscilaciones del carro minimizadas gracias a la zona muerta impuesta al péndulo

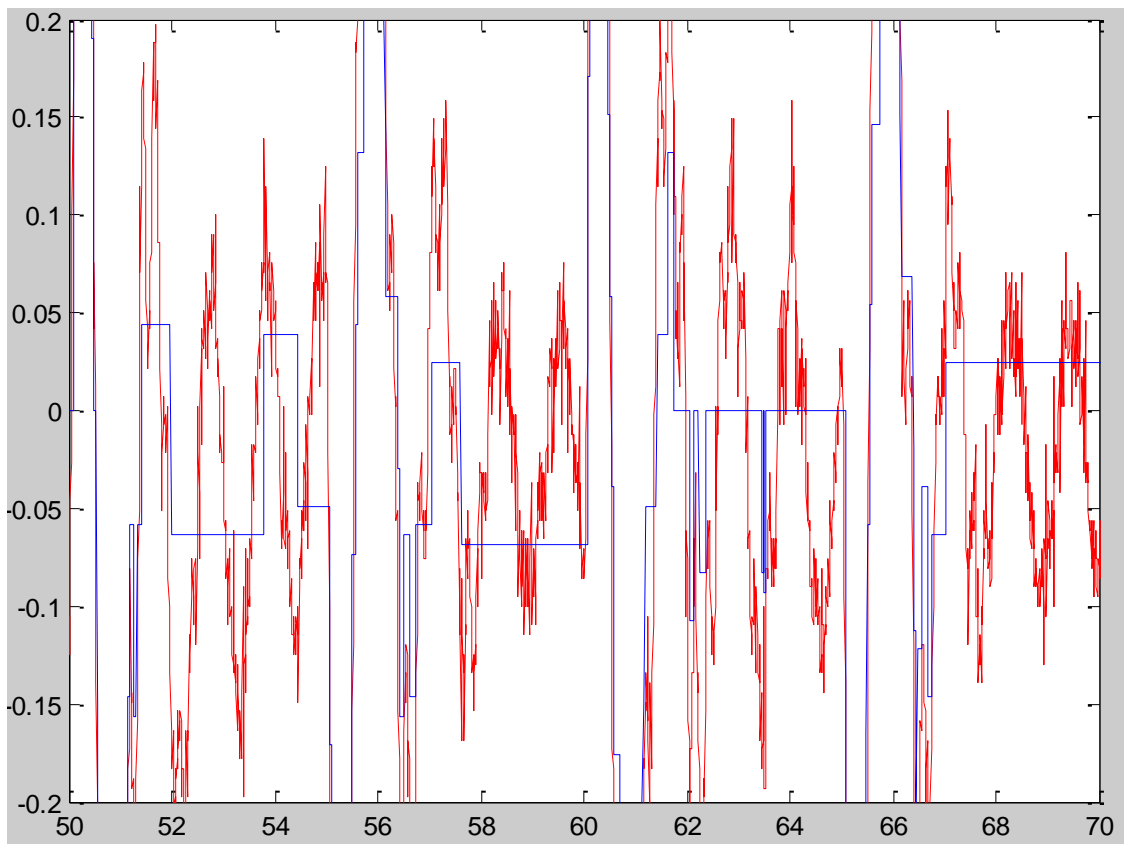


Figura 7.7: Variaciones del ángulo minimizadas gracias a la zona muerta impuesta al péndulo

7.2 Parada de emergencia

Como ya dijimos en el Apartado 4.4, otra solución importante añadida al sistema es un pulsador que actúa como parada de emergencia.

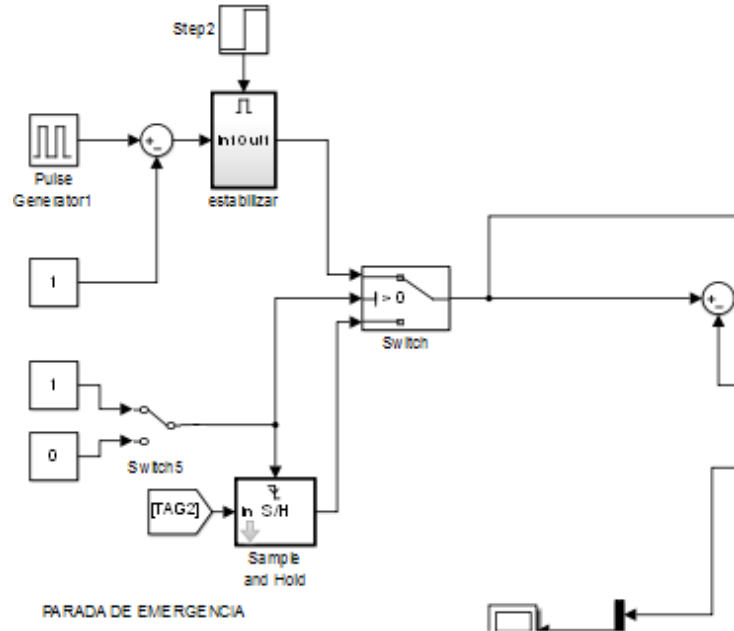


Figura 7.8: Bloques para definir la parada de emergencia y parámetros del bloque Sample & Hold

El péndulo lineal funciona normalmente siempre que la variable de control del bloque *Switch* sea 1. En el momento que activamos el pulsador *Switch5* la variable pasa a ser 0, y con ello, la nueva referencia de posición quedará definida por aquel punto en el que el carro se encuentra cuando pulsamos, ya que el bloque *Sample and Hold* está configurado de tal manera que al llegarle el flanco descendente, y gracias a que la señal viaja por la etiqueta *TAG2*, se captura el valor de dicho punto del recorrido.

Por otra parte, la configuración que controla la entrada *DA2* del Conversor Digital-Analógico la modificamos para que la parada después de la ejecución del programa sea más segura que la que teníamos antes. Esto se consigue con el bloque *Step2*, que produce un escalón en el segundo 80 y hace que la entrada *DA2* cambie automáticamente de 1 a 0.

En las gráficas de la página siguiente mostramos la respuesta del proceso cuando entra en modo parada de emergencia, y en la Figura 7.8 aparecen los bloques que definen la nueva parada más segura de la ejecución del programa:

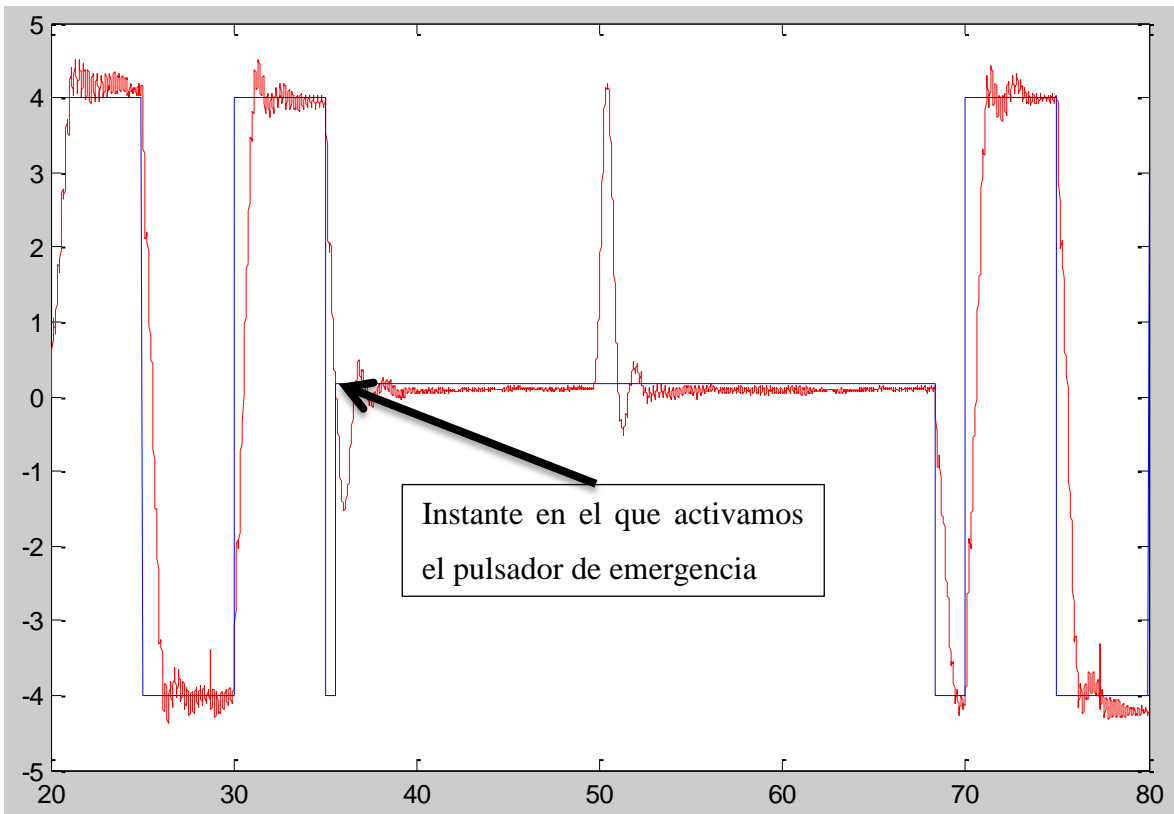


Figura 7.9: Trayectoria del carro frente a la referencia cuando activamos el pulsador de parada

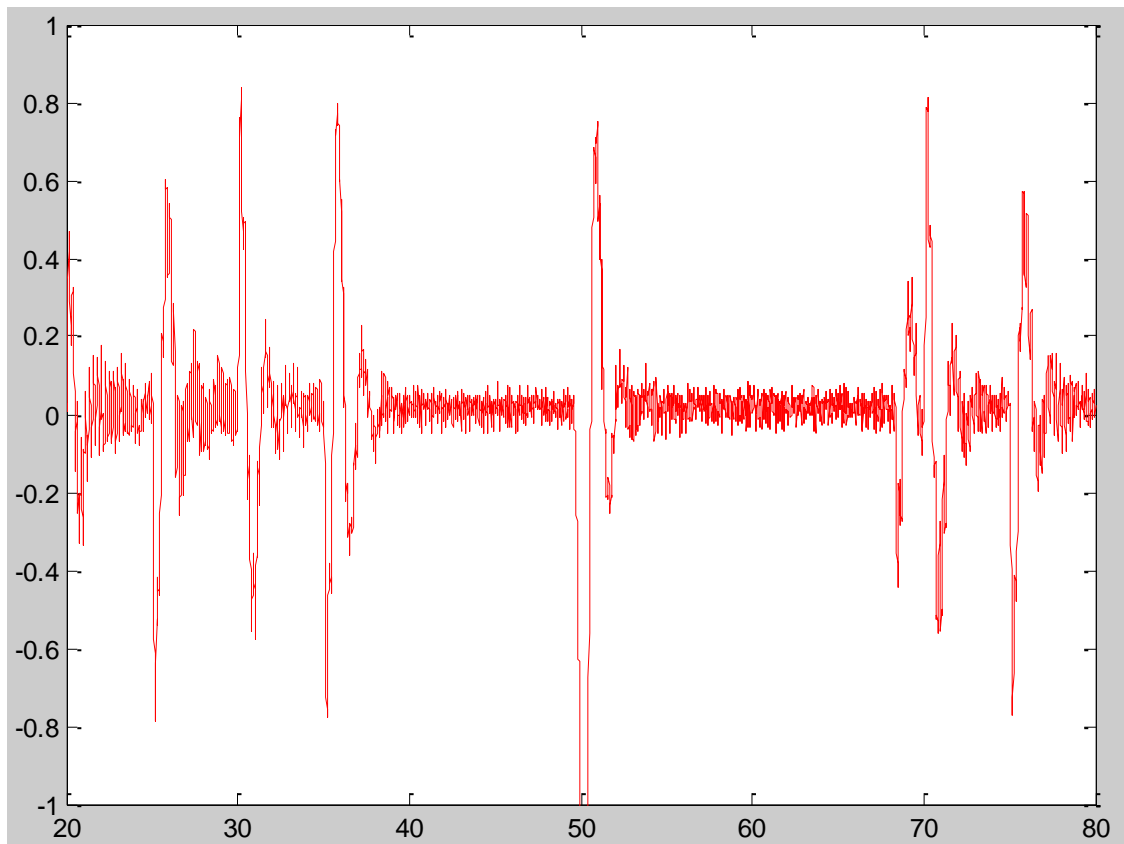


Figura 7.10: Control del ángulo del péndulo en el modo parada de emergencia

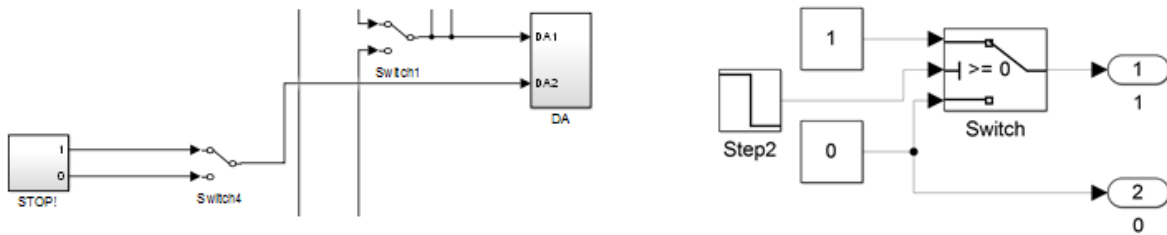


Figura 7.11: Bloques que definen el subsistema *STOP!* Modifican la anterior parada de ejecución

8. Conclusiones

Llegados a este punto nos proponemos analizar los resultados obtenidos con el modelo diseñado y ver si cumplimos los objetivos propuestos al comenzar con el proyecto.

En primer lugar, conseguimos que el péndulo lineal realice un desplazamiento a través de una trayectoria deseada lo más aproximado posible a la referencia de entrada introducida en el sistema, y a su vez, eliminamos también en lo posible el balanceo del péndulo que va unido al carro, el cual porta una carga unida al extremo de éste.

En otras palabras, dada una consigna de posición y partiendo del péndulo inmóvil, el vehículo alcanza esa posición sin producir prácticamente oscilaciones en el péndulo ya que lo intenta frenar una vez se dirige a la posición deseada, es decir, hay un control simultáneo de la posición del carro y del balanceo del péndulo. En las gráficas vemos perfectamente el efecto de aplicar dicho control.

Una vez obtenido lo anterior, diseñamos una estrategia de control en la que se decide cuándo enviar o no los nuevos datos de lectura, a través de una red de comunicación, según difieren respecto a instantes anteriores cierto umbral establecido.

Hay que recordar en este punto el objetivo de nuestro proyecto, que es el de conseguir un ahorro de ancho de banda en el sistema de comunicación sin que la calidad del control de la planta sufra un degeneramiento considerable.

A partir de los datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, se puede observar que efectivamente aplicar un umbral nos permite un ahorro importante en cuanto a uso de ancho de banda de alrededor del 70-75% para los umbrales 0.06, 0.07 y 0.08, elegidos en primera instancia en la realimentación de la posición del carro; y de entre un 70 y un 90% para los umbrales 0.03, 0.06, 0.08 y 0.1, analizados en la realimentación del ángulo del péndulo.

Lo más importante es que este ahorro no ha supuesto ningún aumento del error, por lo que no ha afectado al comportamiento del sistema y hemos podido mantener la estabilidad en la carga.

El uso de la mejor combinación de umbrales combinados de forma simultánea en las dos realimentaciones (0.06 / 0.08) varía ligeramente los datos, algo lógico ya que el error en una de las realimentaciones afecta a la otra y viceversa, pero aun así hemos obtenido valores bastante interesantes, ahorrando un 63% en cuanto a uso de ancho de banda en la realimentación de la posición del carro y un 87% en la del ángulo del péndulo, lo que supone un ahorro del 75% en cuanto al uso total del ancho de banda del sistema. Del mismo modo, apenas afectó al error producido, pues este ahorro no ha supuesto una subida significativa de los errores, cuyos valores varían entre el 3% y el 5%, y que no han afectado a su estabilidad.

Por consiguiente, se puede decir que se ha cumplido el objetivo fijado para este proyecto, pues esta técnica de control no difiere en prestaciones de un control convencional y sí que minimiza el ancho de banda consumido por la red, pudiendo ser aprovechado por otro proceso disponible o simplemente como ahorro en el bus de comunicación.

8.1 Posible aplicación industrial

El modelo diseñado puede ser de gran utilidad en los protocolos y buses industriales que funcionan bajo demanda, es decir, aquellos que transmiten datos cuando el sensor o proceso así los requiere, como por ejemplo los buses CANopen.

CANopen es un protocolo de comunicaciones de alto nivel para uso industrial basado en el bus CAN. Su uso se ha extendido notablemente en la industria.

La base de su funcionamiento es que el usuario designa cierta prioridad a los diferentes sensores y aplicaciones conectadas al bus, así pues, si dos sensores intentan enviar información al mismo tiempo, el que tiene menor prioridad será puesto en cola, dejando el bus libre para el sensor con mayor prioridad.

El inconveniente de CANopen reside en que si el sensor con mayor prioridad requiere un consumo alto de ancho de banda, se puede llegar a la situación en la que el sensor con menor prioridad no pueda mandar información cuando lo solicite, lo que puede llevar al sistema a un mal funcionamiento.

Una posible solución sería la implementación en un microcontrolador del sistema de control por eventos diseñado en este proyecto, conectándolo a los diferentes sensores y buses de datos. Conseguiríamos así mantener las prioridades intactas y además enviar solo datos de interés a través del bus, evitando que un sensor con prioridad alta lo sature.

8.2 Líneas futuras de trabajo

A partir del estudio realizado a lo largo de este proyecto, el cual tenía como objetivo reducir el número de muestras transmitidas, es decir, el consumo de ancho de banda, sin que se produjera una degradación significativa del sistema, pueden derivarse diversas líneas futuras de trabajo buscando mejorar el proceso.

En este proyecto, como solución se optó por el uso de un control basado en eventos mediante un umbral constante consistente en transmitir información solo cuando haya cambios significativos, es decir, mayores que el umbral fijado. Solución que ha dado buenos resultados y permitido un ahorro en el ancho de banda consumido.

Como trabajo futuro proponemos el diseñar un control, también basado en eventos, pero usando un umbral variable que pueda adaptarse a los posibles cambios que se pueden inferir en los valores de error y ancho de banda del sistema, tales como perturbaciones o cambios en la referencia.

Se consigue así un muestreo adaptativo que permitiría al sistema reaccionar frente a posibles perturbaciones exteriores que pueden afectar a su estabilidad, adaptándose y usando más ancho de banda cuando se requiere y evitando así una subida repentina e importante del error que en otro caso podría llevar al deterioro del comportamiento en el sistema.

Mediante este dinamismo del sistema de control se podría disminuir aún más el ancho de banda consumido, quedando optimizado hasta su mínima expresión.

9. Bibliografía

[1] Kuo, Benjamin C. “*Sistemas Automáticos de Control*”. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. Segunda impresión, México, 1986.

[2] Ogata, Katsuhiko. “*Ingeniería de control moderna*”. Madrid: Pearson Educación, 2003.

[3] Casanova Calvo, Vicente F. “*Sistemas de control basados en red. Modelado y diseño de estructuras de control*”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, 2005.

[4] Dormido, S.; Sánchez, J.; Kofman, E. “*Muestreo, Control y Comunicación basados en Eventos*”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Vol. 5, Núm. 1, Enero 2008, pp. 5-26.

[5] Aracil, J.; Gordillo, F. “*El Péndulo Invertido: un Desafío para el Control No Lineal*”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI). Vol. 2, Núm. 2, Abril 2005, pp. 8-19.

[6] http://eupisa.uva.es/laboratorios/pendulo_invertido/introduccion.php

Página web consultada el 23 de Noviembre del 2012.

[7] Bote Ortega, Fernando. “*Modelado y control del péndulo invertido sobre carro mediante sistemas híbridos.*”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[8] Ing. Héctor Sánchez, Ph.D. Iñaki Aguirre, Ph.D. Anna Patete. “*Construcción y Control de un Péndulo Invertido utilizando la Plataforma Lego MINDSTORMS NXT*”. 4to Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica (IV CIBELEC 2010). 5tas Jornadas de Ingeniería Eléctrica (V JIELECTRIC 2010).

[9] Calderón Zavala, Gabriel. “*Control del péndulo invertido usando dos celdas neuronales analógicas.*”. Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Cuernavaca, Morelos, México.

[10] Y. Han, R. Tzoneva member IEEE and S. Behardien member IEEE. “*MATLAB, LabVIEW and FPGA Linear Control of an Inverted Pendulum*”.

[11] Feedback Instruments Ltd. “*Digital Pendulum System: Getting Started (Manual: 33-005-1M5)*”. Feedback Instruments Ltd. Crowborough, East Sussex, UK.

[12] Keremer, Esteban Rafael. “*Diseño e implementación del control de un péndulo sobre carro con un grado de libertad.*”. Universidad Nacional de Quilmes, Otoño del 2004. <http://iaci.unq.edu.ar/materias/proyectointegrador/grua/Grua.htm>

Página web consultada el 9 de Junio del 2015.

[13] Wikipedia. “*Standing*”. <http://en.wikipedia.org/wiki/Standing>

Página web consultada el 26 de Noviembre del 2012.

[14] Hernández Largacha, Alberto; Legaspi Martínez, Marco; Peláez Martín, Jaime. “*Control inteligente del péndulo invertido*”. Proyecto Sistemas Informáticos 2011-2012, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid.

[15] Feedback Instruments Ltd. “*Digital Pendulum System: Teaching Manual (Manual: 33-005-4M5)*”. Feedback Instruments Ltd. Crowborough, East Sussex, UK.

[16] Feedback Instruments Ltd. “*Digital Pendulum System: Installation and Comissioning (Manual: 33-005-0M5)*”. Feedback Instruments Ltd. Crowborough, East Sussex, TN6 2QR, United Kingdom.

[17] Wellstead, Peter E. “*Introduction to physical System Modelling*”. Academic Press Ltd., 1979.

[18] Stimac, Andrew K. “*Standup and Stabilization of the Inverted Pendulum*”. Department of Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, June 1999.

[19] Kheyali, Ouassim. “*Control con umbral adaptativo del péndulo invertido rotacional*”. Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia, Julio de 2013.

[20] MATLAB: El lenguaje de cálculo técnico. Página web consultada el 10 de Diciembre del 2012. <http://es.mathworks.com/products/matlab/>

[21] SIMULINK: Simulación y diseño basado en modelos. Página web consultada el 10 de Diciembre del 2012. <http://es.mathworks.com/products/simulink/>

[22] Sánchez Mendoza, Ismael. “*Diseño y control de un prototipo carro-péndulo basado en LEGO Mindstorms NXT*”. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Marzo de 2009.

[23] Feedback Instruments Ltd. “*Digital Pendulum Datasheet*”. Feedback Instruments Ltd. Crowborough, East Sussex, TN6 2QX, United Kingdom.

[24] Alcaina Acosta, José J. “*Diseño e implementación de un control para el péndulo invertido a través de una realimentación basada en umbrales por TCP/IP minimizando el coste en ancho de banda y la pérdida de prestaciones*”. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universitat Politècnica de València, 4 de Febrero de 2015.

PLIEGO DE CONDICIONES

Tabla de contenido del Pliego de Condiciones

1.	Condiciones generales	129
1.1	Objeto	129
1.2	Normativa y reglamento vigente	130
1.3	Pliego de condiciones facultativas	130
1.3.1	Programación de trabajos	130
1.3.2	Ejecución defectuosa y modificaciones	130
1.3.3	Recepción definitiva	131
1.4	Descripción general del montaje	131
1.5	Pliego de condiciones económicas	132
1.5.1	Fianzas	132
1.5.2	Composición de precios	132
1.5.3	Mejoras	133
1.5.4	Revisión de precios	133
2.	Condiciones particulares.....	133
2.1	Condiciones de los materiales	133
2.1.1	Cableado eléctrico	133
2.1.2	Cables elásticos	133
2.1.3	Cables de alimentación	134
2.2	Condiciones de funcionamiento del sistema	134
2.2.1	Limitaciones por equipo hardware	134
2.2.2	Limitaciones bajo sistemas operativos	135
2.2.3	Control del sistema	135
2.3	Condiciones de la ejecución	135
2.3.1	Condiciones de instalación	135
2.3.2	Condiciones de cara al programa.....	135

2.3.3	Condiciones de mantenimiento del programa informático.....	136
2.3.4	Condiciones de garantía.....	136
2.4	Prueba de servicio	137
2.4.1	Inspección de los módulos.....	137
2.4.2	Pruebas a los programas y a la tarjeta de adquisición de datos	137

1. Condiciones generales

1.1 Objeto

Este documento tiene como objetivo la definición total de las condiciones básicas del proyecto “Control por eventos para la estabilización del péndulo lineal”. Se trata de describir los conceptos técnicos, facultativos, económicos y legales que afectan al proyecto.

Se trata de un proyecto de investigación, por lo que abarcará únicamente aspectos referidos a la programación y puesta en marcha de los distintos dispositivos, quedando excluidos trabajos de preparación, mantenimiento y adecuación de la planta.

Todo lo que afecte a la ejecución del proyecto deberá seguir las normas y condiciones técnicas establecidas en este documento, en lo que se incluye:

- Normativa legal que afecta a los materiales usados, la forma de usarlos, los procesos a seguir y las personas que estén sujetas a la constitución del proyecto.
- Seguridad del proyecto. Esto es, para que el proyecto no sufra daños ni se los provoque a personas o instalaciones que estén en contacto directo con el proyecto durante y después de su ejecución.
- Descripción exacta de los materiales a utilizar en la ejecución del proyecto, incluyendo características técnicas de los mismos. En este apartado se tendrá sumo cuidado ya que afecta a la compra del material necesario y, a su vez, al presupuesto del proyecto.
- La calidad con la que se efectuará el montaje del proyecto, pues se describirán minuciosamente los procesos de ejecución a seguir.

Este documento no deberá tenerse en cuenta aislado del resto de documentos del proyecto. Además, se deberán de tener en cuenta todas las referencias a otros documentos del proyecto.

1.2 Normativa y reglamento vigente

Aquí se describen las condiciones y normas de carácter general de obligado cumplimiento en la ejecución del proyecto. Las normas de carácter particular se referenciarán según el apartado que corresponda.

Referente a los elementos, componentes o aparatos incluidos en la instalación electrónica o eléctrica utilizados para el desarrollo del proyecto se seguirán las normas establecidas por el “Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión” (REBT), por estar conectados a la red de suministro eléctrico de 220V, así como las normas UNE y DIN que se detallan a continuación.

- BT-19 – “Instalaciones interiores o receptoras. Prescripciones generales”
- BT-22 – “Protección contra sobrintensidades”
- BT-24 – “Protección contra los contactos directos e indirectos”
- UNE 20315-1-1:2004 – “Bases de toma de corriente y clavijas para usos domésticos y análogos”

1.3 Pliego de condiciones facultativas

Como principales obligaciones, al cliente se le exige conocer:

- Las leyes.
- El proyecto en su totalidad.

1.3.1 Programación de trabajos

El programador se compromete a realizar el proyecto según lo expuesto en la memoria y a entregarlo dentro de los plazos acordados con el cliente después de una revisión exhaustiva del mismo.

1.3.2 Ejecución defectuosa y modificaciones

El cliente tiene la responsabilidad de revisar el funcionamiento del programa suministrado y comunicar los aspectos que, a juicio de él, no estén bien, extendiéndose dicha responsabilidad a aquellos defectos no detectados pero existentes.

Si hubiera cualquier desperfecto en lo que se refiere a la fabricación del sistema a modelar, el proyectista se abstiene de cualquier responsabilidad, siendo como único causante del problema el mismo fabricante.

Las modificaciones que el cliente crea oportuno realizar se verán, en cualquier caso, agravadas por su correspondiente incremento de precio, ya que se considerarán como cambios no imprescindibles para el normal funcionamiento del programa y realizados por sus gustos particulares. Atendiendo a esta última razón, el proyectista se compromete a alterar el contenido del programa siempre que no perjudique su ejecución.

Las tarifas a aplicar, en caso de modificaciones, serán las mismas que para el resto del proyecto, siguiendo las normas publicadas en el Boletín Oficial del Estado.

En el improbable caso de que las anomalías detectadas se deban a una mala o defectuosa programación, el proyectista se compromete a realizar las modificaciones que estime convenientes para subsanarlas, sin que esto origine coste económico alguno para el comprador.

1.3.3 Recepción definitiva

Terminado el plazo de ejecución del proyecto se procederá a la recepción definitiva del mismo.

1.4 Descripción general del montaje

A continuación se describen de forma escueta los pasos a realizar en la ejecución del proyecto.

Todas estas etapas se ejecutarán bajo las normas y reglas vigentes que el país en el que se vayan a ejecutar tenga para el montaje de equipos electrónicos.

- Adquisición del material
- Configuración del microcontrolador
- Interconexión de dispositivos y microcontrolador
- Comprobación de parámetros
- Instalación del software
- Control de calidad

1.5 Pliego de condiciones económicas

Seguidamente se describen las relaciones económicas que deben regir entre el cliente y el proyectista para cada uno de los siguientes apartados:

- Fianzas.
- Composición de precios.
- Mejoras.
- Revisión de precios.

1.5.1 Fianzas

Las condiciones de pago del proyecto realizado son las siguientes:

El comprador depositará, en el momento de adjudicación del proyecto y antes del inicio de los trabajos de programación, una fianza como garantía por una cantidad equivalente al 5% del valor total del presupuesto del proyecto.

En caso de demora en el abono de la fianza, esta se incrementará en un 5% semanal. El resto del valor total del proyecto será abonado una vez realizada la instalación y comprobación del correcto funcionamiento del programa por el usuario.

Tras la concertación del período máximo de realización del proyecto entre el proyectista y el cliente, se ha acordado que el proyectista abone una cantidad del 0.5% del valor total del proyecto por cada día de demora sobre la fecha acordada con el cliente.

Se ha estimado conveniente realizar un mantenimiento conjunto del programa informático durante un período de tres años después de la entrega del mismo.

Durante este período la garantía del producto será total.

1.5.2 Composición de precios

Los precios aplicados al proyecto están en consonancia con los dispositivos generales acordados en los convenios en los que tiene ámbito. Así, las tarifas empleadas por la mano de obra corresponden a las vigentes para un Ingeniero Técnico Industrial realizando tareas de control. Todo ello se especifica detalladamente en el documento adjunto "Presupuesto".

1.5.3 Mejoras

Las ampliaciones y mejoras que el cliente estime oportuno realizar en el programa supondrán un aumento en el importe total del proyecto de acuerdo con el total que supusiese realizarlas y las tarifas ya estipuladas.

1.5.4 Revisión de precios

Como el tiempo que puede transcurrir en la redacción de este proyecto y su entrega y aceptación por parte del cliente puede ser largo, si transcurre el período de tiempo tabulado por el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Valencia, se procederá a una revisión de precios en el acto de entrega del mismo. Para ello se utilizarán las fórmulas y tablas dispuestas a tal fin en el Boletín Oficial del Estado del año correspondiente.

2. Condiciones particulares

2.1 Condiciones de los materiales

2.1.1 Cableado eléctrico

No es necesario ningún tipo de protección especial para ningún tipo de conductor, pues todos deben montarse en un lugar protegido de la intemperie.

No obstante se exige una protección mínima y suficiente a los usuarios frente a descargas, por lo que estos cables vendrán protegidos, para lo cual se necesitará una cubierta de material aislante de PVC o similar, ya sea rígido o elástico, según obliga la norma.

La sección de los diferentes cables vendrá determinada por los tres parámetros básicos: tensión, intensidad y potencia a soportar.

2.1.2 Cables elásticos

Se usarán los cables proporcionados por el fabricante tanto de la tarjeta de adquisición de datos como del péndulo para conectar el computador a la tarjeta y la tarjeta a la etapa de potencia y el péndulo.

Si estos requirieran de un recambio y no estuviesen disponibles por el fabricante, en todo momento deberán utilizarse cables con el mismo identificador de modelo.

2.1.3 Cables de alimentación

Para la alimentación de la tarjeta se utilizará el cable de alimentación al PC proporcionado por el fabricante, mientras que la etapa de potencia se alimentará mediante un cable común a la red de 220 V y el péndulo se alimentará a través de la etapa de potencia con el conector determinado en el párrafo anterior.

2.2 Condiciones de funcionamiento del sistema

Incluye los mínimos exigidos para el correcto funcionamiento del programa en cuanto a hardware y software, así como la configuración básica del equipo.

2.2.1 Limitaciones por equipo hardware

Todos los datos que se nombran en las siguientes líneas son especificaciones mínimas:

- Microprocesador Pentium 4, 2.4 GHz.
- Memoria RAM 512MB.
- Monitor y tarjeta de vídeo, será SVGA o superior con al menos 8MB de RAM de vídeo, capaces de trabajar con una resolución de 1024 por 768 píxeles a 256 colores
- Lector de CD-ROM, una unidad a cualquier velocidad de lectura.
- Espacio libre de 100MB en el disco duro después de haber instalado MATLAB®.
- Periféricos, Teclado y Ratón.
- Advantech PCL-812PG Enhanced Multi-Lab Card o equivalentes como RT-DACs

Estos requisitos son los mínimos requeridos para el correcto funcionamiento del programa incluyendo las operaciones de simulación que realiza, por tanto, los que se deben incluir en el Pliego de Condiciones como información al Cliente.

2.2.2 Limitaciones bajo sistemas operativos

Los requisitos de software son los siguientes:

- Windows XP versión de 32 bits.
- MATLAB 8.4 (R2014b) o posterior, indispensable para el correcto funcionamiento de la aplicación, además de necesitar Simulink.

2.2.3 Control del sistema

Se realizará de la forma más sencilla posible, el sistema vendrá predefinido con unos parámetros de regulador y de umbrales previamente acordados entre el diseñador y el contratista. Dichos parámetros podrán ser modificados siempre bajo la supervisión del diseñador.

2.3 Condiciones de la ejecución

2.3.1 Condiciones de instalación

Los programas serán instalados por el proyectista, ya que precisa de conocimientos del programa que el cliente podrá desconocer. El cliente podrá instalar el programa pero siempre bajo la supervisión del diseñador.

2.3.2 Condiciones de cara al programa

La adjudicación del proyecto da derecho exclusivamente a una licencia del mismo. Cada licencia consta de un disquete o CDROM, el cual contiene los programas en su totalidad.

Si el usuario precisa de otra copia del programa a parte de la suministrada por razones ajenas al funcionamiento de la misma, está terminantemente prohibida la transferencia o copia de un computador a otro. En este caso, se deberá proceder a la compra de otra licencia de venta por parte del usuario al técnico realizador del proyecto.

En el precio de esta/s nueva/s copia/s se valorarán los coste directos de producción del software sin tener en cuenta desplazamientos y horas de puesta en marcha, siempre y cuando la instalación se realice por parte del cliente. En dicho caso, cualquier anomalía en la instalación que produzca un funcionamiento incorrecto del programa, anula el derecho de garantía posventa de la copia.

2.3.3 Condiciones de mantenimiento del programa informático

El programa informático no necesita revisión por parte de ningún técnico, salvo en el caso de modificaciones en la configuración del hardware o del software. Así mismo, si se actualiza o modifica la versión del equipo y procediera modificar alguna característica o ubicación del programa, dicha revisión deberá efectuarse por parte de un técnico designado por el realizador del proyecto. En este caso regirá el apartado económico. “5.3 Mejoras” para tasar el coste asignado, y además devengarán derechos por desplazamiento al lugar donde esté ubicado el equipo, y si procediera, dietas, tal como establece la ley vigente para este tipo de instalaciones.

Queda terminantemente prohibida la alteración del programa y, si se comprobara que este ha sido modificado, ello acarrearía la pérdida total de la garantía del producto así como cualquier derecho sobre actualizaciones, mejoras y/o revisiones.

2.3.4 Condiciones de garantía

Si por cualquier razón se produjera una pérdida accidental de algún fichero se podrá, previa autorización del proyectista, copiar de nuevo sólo los citados ficheros, o si fuese durante los tres años a partir de la fecha de adjudicación del proyecto dada la limitación de los discos flexibles convencionales, el programador se compromete a suministrar otra copia del paquete completo en un plazo máximo de 6 días hábiles a partir de la fecha de notificación de la pérdida por parte del cliente, a la que deberán acompañar los discos estropeados para su comprobación.

De todo ello se desprende, por tanto, que el período de vigencia de la garantía es de 3 años. Más allá, el proyectista no se hará cargo de los gastos ocasionados por posibles anomalías, por otra parte lógicas por el paso del tiempo. Si transcurrido este plazo se requiriera otra copia del programa, se deberá renegociar el acuerdo, aunque por condiciones del cliente, se otorgarán importantes beneficios en forma de descuentos y rapidez de entrega. Por último señalar además, que la garantía se establece automáticamente en el momento de la firma del contrato de compraventa, sin ningún otro tipo de trámite por parte del comprador del producto de software objeto del proyecto.

Conviene recordar que cualquier cambio o variación en el programa por parte del cliente, así como su copia, préstamo o instalación no autorizada, anula completamente cualquier condición de garantía, expuesta anteriormente. Esto incluye también la utilización indebida del disco y/o sus ficheros, bien sea por trabajar bajo condiciones, entornos o configuraciones no recomendadas o por negligencia en su utilización.

El programador no se hace responsable, en ningún caso, de los perjuicios que se pueden desprender de la utilización indebida del programa informático, tanto materiales como daños a terceras personas.

2.4 Prueba de servicio

En los siguientes capítulos se explican las pruebas que se realizarán antes del montaje o programación de los computadores.

2.4.1 Inspección de los módulos

Previamente al montaje de los componentes se inspeccionarán los distintos módulos que componen el sistema por separado para comprobar que están en correctas condiciones.

Una vez montado se comprobará a su vez que el montaje de componentes es correcto y que ninguno de los cables crea cortocircuito en la tarjeta de adquisición de datos, péndulo o módulo de potencia. En caso contrario se subsanará el error.

2.4.2 Pruebas a los programas y a la tarjeta de adquisición de datos

En la memoria descriptiva se describe el proceso a realizar para la correcta configuración por software del sistema del péndulo. Este se deberá seguir detalladamente.

En cuanto al sistema de conexiones comprobaremos que la entrada de la tarjeta de adquisición de datos funciona correctamente, conectando los cables destinados a ello en un puerto del ordenador. Éste debería reconocer el dispositivo externo al conectarse.

PRESUPUESTO

Tabla de contenido del Presupuesto

1.	Introducción.....	142
2.	Coste de materiales	142
2.1.	Coste de la tarjeta de adquisición de datos.....	142
2.2.	Coste del sistema del péndulo	143
2.3.	Coste total de los materiales.....	143
2.4.	Coste total de los materiales. Imprevistos	143
3.	Coste de la mano de obra.....	144
3.1	Coste de la mano de obra directa	144
3.1.1	Determinación del coste-hora del ingeniero	144
3.1.2	Coste de mano de obra directa por tiempos de ejecución.....	144
3.1.3	Coste de la mano de obra por pagos a la seguridad social.....	145
3.1.4	Determinación del coste total de la mano de obra directa	146
3.2	Coste de la mano de obra indirecta	146
3.3	Coste total de la mano de obra	146
4.	Costes por amortizaciones	146
4.1	Amortización del Hardware	147
4.2	Amortización del Software.....	147
4.3	Amortización general	148
4.4	Total amortizaciones	148
5.	Cesión de fuentes.....	148
6.	Presupuesto final	149

1. Introducción

Este documento tiene como objetivo el cálculo del presupuesto estimado para la elaboración del proyecto “CONTROL POR EVENTOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL PÉNDULO LINEAL”.

Este documento no deberá tenerse en cuenta aislado del resto de documentos del proyecto. Además, se deberán tener en cuenta todas las referencias a otros documentos del proyecto.

El proyecto se ha considerado realizado íntegramente por un ingeniero técnico especializado en electrónica industrial. A partir de esta consideración se va a realizar el presupuesto total del proyecto considerando 4 factores.

- Coste de materiales
- Coste de mano de obra
- Amortizaciones
- Cesión de fuentes

2. Coste de materiales

En este apartado se verá el coste de los materiales necesarios para construir el prototipo, donde los precios de las siguientes tablas están sacados de la medida encontrada en los distintos comercios consultados y, por lo tanto, son precios orientativos que pueden sufrir variaciones debido a fluctuaciones en el mercado.

Todos los precios están expresados en euros y no se les ha añadido el valor de I.V.A., éste se añadirá al final.

2.1. Coste de la tarjeta de adquisición de datos

Nótese que no se agregan los cables de interconexión de la tarjeta de adquisición de datos al péndulo y al computador ya que vienen incluidos en el precio de la tarjeta.

DESCRIPCIÓN	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI-1711 L	350 €	1	350 €
<u>TOTAL:</u>			350 €

2.2. Coste del sistema del péndulo

DESCRIPCIÓN	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Feedback Digital Pendulum	1250 €	1	1250 €
<u>TOTAL:</u>			1250 €

2.3. Coste total de los materiales

DESCRIPCIÓN	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Tarjeta de adquisición de datos Advantech PCI-1711 L	350 €	1	350 €
Feedback Digital Pendulum	1250 €	1	1250 €
<u>TOTAL:</u>			1550 €
<u>IVA (21%):</u>			325,50 €
<u>TOTAL IVA INCLUIDO:</u>			1875,50 €

2.4. Coste total de los materiales. Imprevistos

Los imprevistos son costes adicionales debidos a problemas con los materiales. Éstos se calculan como un porcentaje del valor total de los materiales.

$$\mathbf{\underline{IMPREVISTOS} = 2\% \text{ COSTE TOTAL DE MATERIALES} = 37,51 \text{ €}}$$

De esta forma, el coste total de los materiales, incluidos imprevistos, queda como se refleja en la tabla siguiente:

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Coste total de los materiales IVA incluido	1875,5 €
Imprevistos 2%	37,51 €
<u>TOTAL:</u>	1913,01 €

3. Coste de la mano de obra

En los siguientes apartados se incluyen los costes generales por el Ingeniero Técnico en Electrónica Industrial en la realización del proyecto.

Se divide en:

- Coste de la mano de obra directa
- Coste de la mano de obra indirecta

3.1 Coste de la mano de obra directa

3.1.1 Determinación del coste-hora del ingeniero

Para calcular este coste se ha tomado como referencia los datos que aporta la Consejería de Trabajo y Asuntos Sociales, por la que se regulan los sueldos base según categorías profesionales. Dichos datos marcan que, en la categoría de Ingeniero Técnico Industrial, el coste-hora es de 25€.

3.1.2 Coste de mano de obra directa por tiempos de ejecución

La estimación del tiempo de programación se ha realizado teniendo en cuenta los costes de dicho trabajo de acuerdo con el rendimiento habitual en empresas de software.

El tiempo de realización del proyecto se puede dividir en 3 fases:

- Estudio y análisis
- Diseño, cálculos y programación
- Pruebas y depuración

- Además de una fase final de inspección y ajustes finales, en la que se comprueba que el proyecto se encuentra funcionando correctamente y se ajusta para que no tenga ningún tipo de errores, una vez montado.

Las horas empleadas en la realización del proyecto quedan determinadas en la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	TIEMPO
Estudio y análisis	20 h
Diseño, cálculos y programación	100 h
Pruebas y depuración	80 h
Inspección y ajustes finales	5 h
<u>TOTAL:</u>	205 h

Y por tanto, el coste de la mano de obra directa por tiempo de ejecución es:

DESCRIPCIÓN	TIEMPO	PRECIO	TOTAL
Ingeniero Técnico Electrónico	205 h	25 € / h	5125 €
<u>TOTAL:</u>			5125 €

3.1.3 Coste de la mano de obra por pagos a la seguridad social

En el cálculo de este coste se ha tenido en cuenta la cotización a la seguridad social por categoría profesional, publicada por el ministerio del trabajo y seguridad social.

El coste de la mano de obra directa por pagos a la S.S. se obtiene multiplicando el nº de horas de la mano de obra directa por la base mínima de cotización a la S.S. por categoría profesional.

DESCRIPCIÓN	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Horas de cotización	5,48 €	205 h	1123,4 €
<u>TOTAL:</u>			1123,40 €

3.1.4 Determinación del coste total de la mano de obra directa

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Coste de la mano de obra directa por tiempos de ejecución	5125 €
Coste de la mano de obra directa por pagos a la seguridad social	1123,40 €
<u>TOTAL:</u>	6248,40 €

3.2 Coste de la mano de obra indirecta

Los costes por mano de obra indirecta se calculan como un porcentaje del coste total por mano de obra directa. Este porcentaje se ha calculado como el 5%.

COSTES M.O.I. = 5% COSTE TOTAL M.O.D. = 312,42 €

3.3 Coste total de la mano de obra

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Coste total M.O.D.	6248,40 €
Costes M.O.I. (5%)	312,42 €
<u>TOTAL:</u>	6560,82 €

4. Costes por amortizaciones

Dentro de este apartado se van a tratar los tipos distintos de material utilizado en la elaboración del proyecto, del mobiliario y de los gastos bancarios que pueda suponer la Oficina Técnica. Estos son:

- Amortizaciones del Hardware
- Amortizaciones del Software
- Amortización general

4.1 Amortización del Hardware

Se ha considerado un periodo de amortización del hardware de 5 años. Los equipos de hardware empleados son los siguientes:

- 2 ordenadores portátiles ASUS X550LDV-XX501H. 2 x 517 €

Valor total del hardware amortizable = 1034 €

Teniendo en cuenta una amortización a 5 años y que la duración del proyecto ha sido de 6 meses.

Amortización del hardware del proyecto = $1034 * 6 / (5 * 12) = 103,40 €$

4.2 Amortización del Software

Se ha considerado un periodo de amortización del software de 3 años. Para la realización del proyecto han sido necesarios los siguientes programas de los cuales se detallan los costes de adquisición.

DESCRIPCIÓN	PRECIO	CANTIDAD	TOTAL
Microsoft Windows XP Professional	100 €	2	200 €
Microsoft Office 2010 Professional	120 €	1	120 €
Matlab 8.4 + Simulink	2000 €	2	4000 €
<u>TOTAL:</u>			4320 €

Por lo tanto, el total del valor de la amortización del software es:

Amortización del software del proyecto = $4320 * 6 / (3 * 12) = 720 €$

4.3 Amortización general

Se ha considerado un periodo de amortización general, es decir, de mobiliario y gastos bancarios, de 10 años. El coste de adquisición y gastos en estos conceptos son los siguientes.

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Mobiliario	1500 €
Gastos bancarios	500 €
<u>TOTAL:</u>	2000 €

Por lo tanto, el total del valor de la amortización general es:

$$\text{Amortización general del proyecto} = 2000 * 6 / (10 * 12) = 100 \text{ €}$$

4.4 Total amortizaciones

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Amortización Hardware	103,40 €
Amortización Software	720 €
Amortización General	100 €
<u>TOTAL:</u>	923,40 €

5. Cesión de fuentes

En el siguiente apartado se incluye el coste por cesión de fuentes al comprador del proyecto, el cual incluye la licencia de una copia. Para posteriores copias solicitadas el comprador deberá pagar una licencia a parte por cada una de ellas.

El precio de cada licencia, que será de 100€, no se incluirá en el presupuesto del proyecto, ya que dependerá del número de copias que el comprador solicite. El total de este apartado asciende a:

$$\text{Total cesión de fuentes} = 250 \text{ €}$$

6. Presupuesto final

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Coste total de los materiales + Imprevistos	1913,01 €
Coste total de la mano de obra	6560,82 €
Coste total amortizaciones	923,40 €
Coste total cesión de fuentes	250 €
<u>TOTAL:</u>	9647,23 €

El presente proyecto asciende a la cantidad de nueve mil seiscientos cuarenta y siete euros con veintitrés céntimos (#9647,23#).

En Valencia, a 22 de Julio de 2015

El ingeniero:

Fdo. Marco Contreras Gallardo