

# Universidad Nacional de Quilmes

Departamento de Ciencia y Tecnología  
Ingeniería en Automatización y Control Industrial

## CONTROL AUTOMÁTICO DEL EQUIPO UPDOWN

Olivieri, Ian Paulo

**Director:**

Pernia, Eric Nicolás

**Co-director:**

x

**Jurado:**

Safar, Felix

Juarez, José

y

z

Presentación: Septiembre de 2017  
Quilmes, Buenos Aires, Argentina.

# **Resumen**

Resumen del proyecto (1 carilla)

# Índice de contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>9</b>
1.1	Marco temático . . . . .	9
1.1.1	Esculturas cinéticas . . . . .	9
1.1.1.1	Definición . . . . .	9
1.1.1.2	Aplicaciones y estado actual del arte . . . . .	10
1.1.2	Sistemas de iluminación . . . . .	11
1.1.2.1	Equipos de luces . . . . .	11
1.1.2.2	Consolas de control de luminaria . . . . .	12
1.2	DMX . . . . .	13
1.2.1	Definición e historia . . . . .	13
1.2.2	Capa física . . . . .	13
1.2.2.1	Cableado y conectores . . . . .	13
1.2.2.2	Topología . . . . .	14
1.2.2.3	Señal . . . . .	14
1.2.3	Capa de enlace de datos . . . . .	14
1.2.3.1	Subcapa de control de enlace lógico . . . . .	14
1.2.3.2	Subcapa de control de acceso al medio . . . . .	16
1.3	Updown . . . . .	16
1.3.1	Definición . . . . .	16
1.3.2	Descripción del sistema . . . . .	17
1.3.2.1	Fuente de alimentación . . . . .	17
1.3.2.2	Entrada y salida DMX . . . . .	17
1.3.2.3	Dip-switch . . . . .	18
1.3.2.4	Freno . . . . .	18
1.3.2.5	Fin de carrera . . . . .	18

1.3.2.6	Sistema motor . . . . .	18
1.3.2.7	Placa de control . . . . .	19
1.3.3	Resumen de entradas y salidas del sistema . . . . .	19
1.3.3.1	Entradas . . . . .	19
1.3.3.2	Salidas . . . . .	19
1.4	Justificación del proyecto . . . . .	20
1.5	Objetivos . . . . .	20
1.5.1	REQ-01 . . . . .	20
1.5.2	REQ-02 . . . . .	20
1.5.3	REQ-03 . . . . .	20
1.5.4	REQ-04 . . . . .	21
1.5.5	Otros . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Diseño</b>	<b>22</b>
2.1	Descripción del capítulo . . . . .	22
2.2	REQ-01 . . . . .	22
2.3	REQ-02 . . . . .	23
2.3.1	Esquema de control . . . . .	23
2.3.2	Modelo de la planta . . . . .	24
2.3.3	Procedimiento para el diseño de control . . . . .	25
2.3.4	Relación entre cuentas de encoder y distancia . . . . .	25
2.3.5	Velocidad máxima . . . . .	26
2.4	REQ-03 . . . . .	26
2.4.1	Corte de correa . . . . .	26
2.4.2	Fin de carrera . . . . .	27
2.4.3	Pérdida de DMX . . . . .	27
2.5	REQ-04 . . . . .	27

2.6	Firmware del updown . . . . .	28
2.6.1	Aviso de confidencialidad . . . . .	28
2.6.2	Convenciones . . . . .	28
2.6.3	Librerías de bajo nivel . . . . .	29
2.6.4	Librerías de alto nivel . . . . .	30
2.6.5	Diagrama de módulos . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Desarrollo</b>	<b>32</b>
3.1	Descripción del capítulo . . . . .	32
3.2	Firmware del updown - Librerías de bajo nivel . . . . .	32
3.2.1	DigitalIO . . . . .	32
3.2.1.1	Manejo del periférico . . . . .	32
3.2.1.2	Implementación . . . . .	33
3.2.2	ADC . . . . .	34
3.2.2.1	Manejo del periférico . . . . .	34
3.2.2.2	Implementación . . . . .	35
3.2.3	PWM . . . . .	36
3.2.3.1	Frecuencia . . . . .	36
3.2.3.2	Manejo del periférico . . . . .	36
3.2.3.3	Implementación . . . . .	38
3.2.4	EXINT . . . . .	38
3.2.4.1	Manejo del periférico . . . . .	38
3.2.4.2	Implementación . . . . .	39
3.2.5	UART . . . . .	39
3.2.5.1	Manejo del periférico . . . . .	39
3.2.5.2	Implementación . . . . .	41
3.2.6	Tick . . . . .	41

3.2.6.1	Frecuencia . . . . .	41
3.2.6.2	Manejo del periférico . . . . .	41
3.2.6.3	Implementación . . . . .	42
3.2.7	SUART . . . . .	43
3.2.7.1	Análisis . . . . .	43
3.2.7.2	Implementación . . . . .	44
3.3	Controlador . . . . .	45
3.3.1	Relación entre cuentas de encoder y distancia . . . . .	45
3.3.1.1	Pruebas y resultados . . . . .	45
3.3.1.2	Selección de la función de ajuste . . . . .	45
3.3.2	Determinación de la velocidad máxima . . . . .	47
3.3.3	Obtención del período de muestreo . . . . .	48
3.3.4	Obtención del modelo de la planta . . . . .	49
3.3.4.1	Toma de muestras . . . . .	49
3.3.4.2	Modelos propuestos . . . . .	50
3.3.4.3	Determinación de parámetros . . . . .	52
3.3.4.4	Validación de los modelos . . . . .	53
3.3.4.5	Ánálisis de resultados . . . . .	54
3.3.5	Obtención del controlador . . . . .	54
3.3.5.1	Ánálisis . . . . .	54
3.3.5.2	Controlador de velocidad . . . . .	55
3.3.5.3	Controlador de posición . . . . .	56
3.3.6	Ajuste de los controladores . . . . .	56
3.3.6.1	Condiciones iniciales . . . . .	56
3.3.6.2	Ajuste del controlador de velocidad . . . . .	57
3.3.6.3	Ajuste del controlador de posición . . . . .	57
3.3.6.4	Sistema de control final . . . . .	58

3.4	Dipswitch . . . . .	59
3.5	Firmware del updown - Librerías de alto nivel . . . . .	60
3.5.1	Encoder . . . . .	60
3.5.2	DMX . . . . .	61
3.5.3	Grua . . . . .	61
3.5.4	Controlador . . . . .	61
3.5.5	Dipswitch . . . . .	61
3.6	Firmware del updown - Función principal . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Implementación</b>	<b>62</b>
4.1	Descripción del capítulo . . . . .	62
4.2	Configuración de la HOG . . . . .	62
4.3	Validación . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
5.1	c1 . . . . .	63

# Índice de figuras

1.1	Ejemplo de escultura cinética movida por aire, por Anthony Howe. Fuente: LINK al video . . . . .	9
1.2	Escultura cinética en el museo BMW. Fuente: LINK al video . . . . .	10
1.3	Escultura cinética por parte de Build Up. Fuente: LINK al video . . . . .	11
1.4	Shapeshifter, de High End Systems. Fuente: LINK al video . . . . .	11
1.5	Consola Hog4, de High End Systems. Fuente: LINK a la imagen . . . . .	12
1.6	Cable DMX con conector XLR5. Fuente: wikipedia . . . . .	13
1.7	Conexionado en una red DMX. Fuente: wikipedia . . . . .	14
1.8	Formato de la trama DMX. Fuente: LINK . . . . .	15
1.9	Imagen del Updown, desarrollado por la empresa Blackout . . . . .	16
1.10	Diagrama conceptual del equipo Updown . . . . .	17
1.11	Diagrama del sistema motor . . . . .	18
1.12	Diagrama del sistema motor . . . . .	19
2.1	Esquema de control a implementar . . . . .	24
2.2	Modelo mecánico de la planta . . . . .	25
2.3	Diagrama de uno de los 3 divisores del dipswitch . . . . .	28
2.4	Diagrama de módulos del firmware . . . . .	31
3.1	Diagrama del módulo DigitalIO . . . . .	34
3.2	Diagrama del módulo ADC . . . . .	36
3.3	Ejemplo variación ciclo de trabajo al cambiar ICR1 . . . . .	37
3.4	Diagrama del módulo PWM . . . . .	38
3.5	Diagrama del módulo EXINT . . . . .	39
3.6	Diagrama del módulo UART . . . . .	41
3.7	Diagrama del módulo Tick . . . . .	42

3.8	Forma de la señal en el canal para una 'p' con formato 8N1 . . . . .	43
3.9	Diagrama del módulo SUART . . . . .	45
3.10	Ajuste mediante función cuadrática . . . . .	46
3.11	Ajuste mediante una única recta . . . . .	47
3.12	Ajuste mediante una recta cada 25cm . . . . .	48
3.13	Ajuste mediante una recta cada 100cm . . . . .	49
3.14	Respuestas del sistema en bajada . . . . .	50
3.15	Respuestas del sistema en subida . . . . .	51
3.16	Entrada del sistema para la identificación de parámetros . . . . .	51
3.17	Salida de velocidad del sistema . . . . .	52
3.18	Comparación entre datos predichos con el modelo 2 y los datos reales . .	55
3.19	Resultados para el controlador de velocidad inicial . . . . .	57
3.20	Resultados del equipo 1 para el controlador de velocidad final . . . . .	58
3.21	Resultados del equipo 2 para el controlador de velocidad final . . . . .	59
3.22	Resultados para el controlador de posición inicial . . . . .	60
3.23	Resultados para el controlador de posición final . . . . .	61

# Introducción

## 1.1 Marco temático

### 1.1.1 Esculturas cinéticas

#### 1.1.1.1 Definición

Las esculturas cinéticas (kinetic sculpture en inglés) son estructuras tridimensionales en donde el movimiento es una parte fundamental del conjunto. Para lograr el efecto de movimiento en el espacio estos sistemas se construyen con partes móviles que pueden cambiar de posición ya sea naturalmente por acción del viento, como se ve en la figura 1.1, o de manera forzada.



Figura 1.1: Ejemplo de escultura cinética movida por aire, por Anthony Howe. Fuente: [LINK al video](#)

### 1.1.1.2 Aplicaciones y estado actual del arte

Al ser obras que caen dentro del campo artístico suelen presentarse en museos y utilizarse para fines decorativos ya sea en parques o eventos. Sin embargo, el nivel de ingeniería y diseño que algunas de ellas requieren las tornan un interesante desafío intelectual y creativo.

Las aplicaciones puntuales de estructuras cinéticas a las que se hará foco en este informe, debido a la naturaleza del proyecto final, son aquellas en donde el efecto espacial se logra a través del movimiento en el eje vertical de objetos esféricos mediante motores.

Un ejemplo de aplicación de estas características se puede ver en la figura 1.2. Allí se muestra una escultura presentada en el Museo de BMW, en Munich, Alemania, en donde 714 esferas metálicas son coordinadas para formas figuras como olas, gotas, y hasta la silueta de un auto.

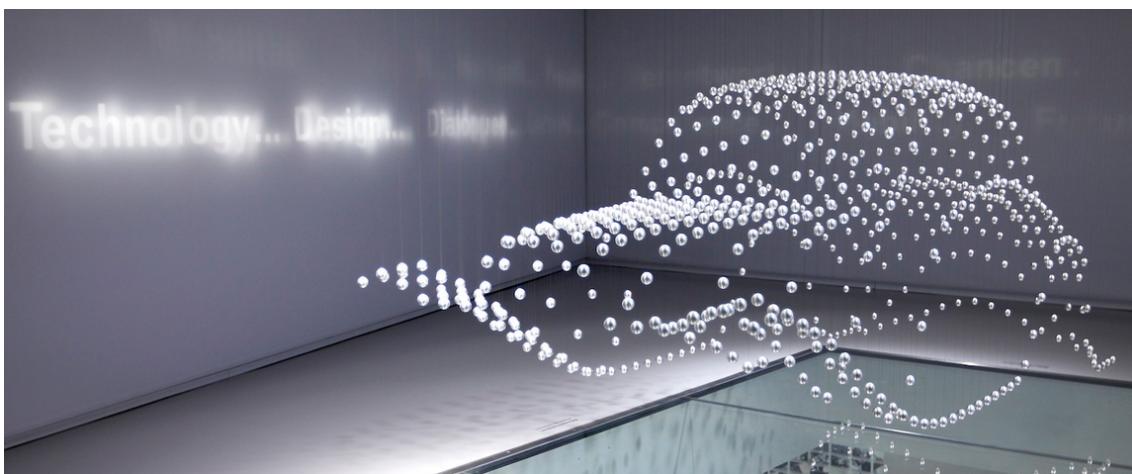


Figura 1.2: Escultura cinética en el museo BMW. Fuente: [LINK al video](#)

Otro ejemplo de aplicación se puede ver en la figura 1.3, en una obra presentada por la empresa Build Up en un centro comercial en Fukuoka, Japón. Allí se instalaron 1000 luminarias esféricas RGB dispuestas en una matriz de 25x40 para generar figuras tridimensionales como planos y gausseanas, entre otras. En este caso los efectos espaciales se logran coordinando el movimiento de cada esfera independientemente, cada una manejada por un equipo motorizado.

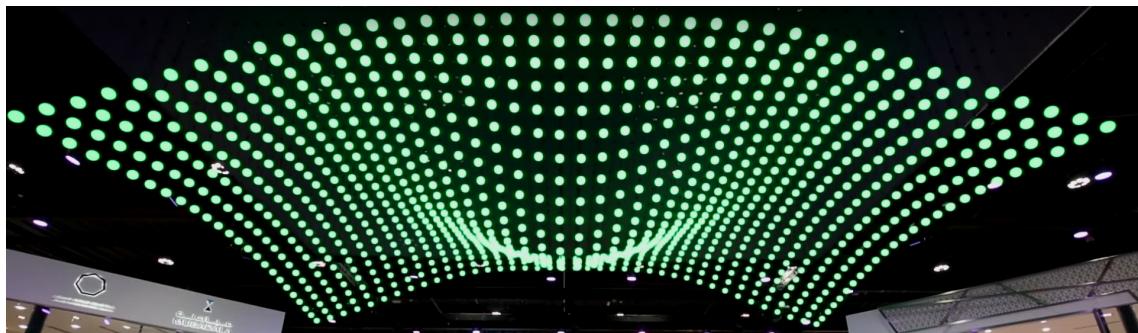


Figura 1.3: Escultura cinética por parte de Build Up. Fuente: [LINK al video](#)

### 1.1.2 Sistemas de iluminación

#### 1.1.2.1 Equipos de luces

En cualquier espectáculo o evento la iluminación es una parte vital del show, y a medida que estos fueron evolucionando también lo hicieron los equipos de luces. Partiendo de aparatos fijos en donde solo se podía variar la intensidad de luz, se pueden conseguir hoy en día dispositivos complejos con decenas de parámetros controlables.

Un notable ejemplo es el **Shapeshifter**, figura 1.4, que cuenta con 7 módulos leds que pueden ser manejados independientemente.



Figura 1.4: Shapeshifter, de High End Systems. Fuente: [LINK al video](#)

En el caso del sistema visto en la figura 1.3, los parámetros controlables de los equipos son la posición, velocidad y colores de cada esfera.

### 1.1.2.2 Consolas de control de luminaria

Para controlar los sistemas de luces es necesario utilizar unas consolas especiales. Estas se comunican con las luminarias utilizando el estándar **DMX** y le indican a cada equipo el valor de sus parámetros en todo momento.

La manera más común para generar un efecto es indicando la progresión de uno o más parámetros desde un tiempo inicial a uno final. Al cambio de los parámetros entre 2 instantes de tiempo se las llama *cues*, o entradas, y cuyo conjunto forma los efectos. Dentro de las consolas que hay en el mercado para este tipo de control de equipos se pueden destacar las **consolas hog 4** de High End Systems, como la que se muestra en la figura 1.5.

Otra manera generarlos es a partir de equipos y softwares, como el **Madrix**, que tienen la capacidad de convertir videos a variaciones de parámetros, lo cual lo hace especialmente útil cuando se quieren crear **efectos lumínicos complejos**.



Figura 1.5: Consola Hog4, de High End Systems. Fuente: [LINK a la imagen](#)

## 1.2 DMX

### 1.2.1 Definición e historia

DMX, de *Digital MultipleX*, es un estándar de comunicación digital ampliamente utilizado para el control de sistemas de iluminación.

El estándar DMX512, donde 512 significa que se envían 512 piezas de información, fue creado por la *United States Institute for Theatre Technology* (USITT) en 1986 y transformado en DMX512/1990 tras una revisión de la USITT. En 1998 la *Entertainment Services and Technology Association* (ESTA) cuadró DMX dentro de los estándares ANSI, modificación que fue aprobada por el instituto (ANSI) en 2004. Finalmente, en 2008 DMX tuvo una nueva revisión y se llegó a la versión actual llamada "E1.11 – 2008, USITT DMX512-A", o simplemente DMX512-A. A pesar de esto, el nombre comúnmente conocido del estándar es simplemente DMX, aunque no es indistinto ya que hay diferencia de compatibilidad entre las diferentes versiones.

### 1.2.2 Capa física

#### 1.2.2.1 Cableado y conectores

DMX emplea el estándar EIA-485 como capa física, por lo que emplea por lo menos 3 líneas; A, B y C, en donde A y B son los datos que se transmiten, y C es masa. Los conectores utilizados son los XLR, tanto de 5 como de 3 pinos. Un ejemplo del cable se puede ver en la figura 1.6



Figura 1.6: Cable DMX con conector XLR5. Fuente: wikipedia

### 1.2.2.2 Topología

La red de DMX consiste en un maestro y varios esclavos, conectados con una topología de bus multidrop (MDB) con nodos conectados entre sí, lo que normalmente se denomina como topología *daisy chain*. En otras palabras, todos los equipos a controlar tienen una entrada y una salida conectadas entre sí, de manera tal de que se puede conectar un equipo y apartir de este equipo conectar el siguiente, y así sucesivamente, como se ve en la figura 1.7. Esto permite que el conexionado sea simple y que la red pueda ser fácilmente extendida.

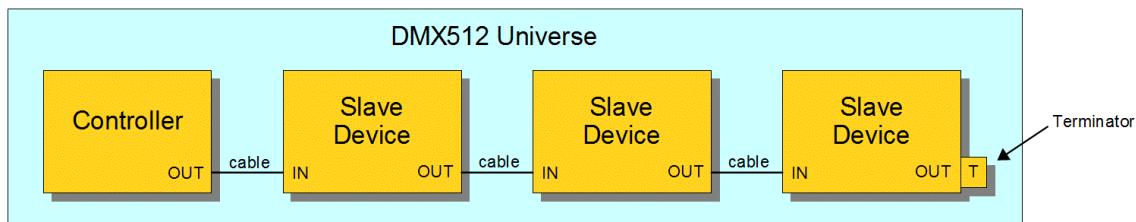


Figura 1.7: Conexión en una red DMX. Fuente: wikipedia

### 1.2.2.3 Señal

La señal de DMX es de tipo diferencial, como es indicado en EIA-485, de 5 Volts de pico, y los datos se envían asincrónicamente de manera serie con una tasa de transmisión de 250Kbits por segundo que equivale a una duración de bit de  $4\mu s$ .

## 1.2.3 Capa de enlace de datos

### 1.2.3.1 Subcapa de control de enlace lógico

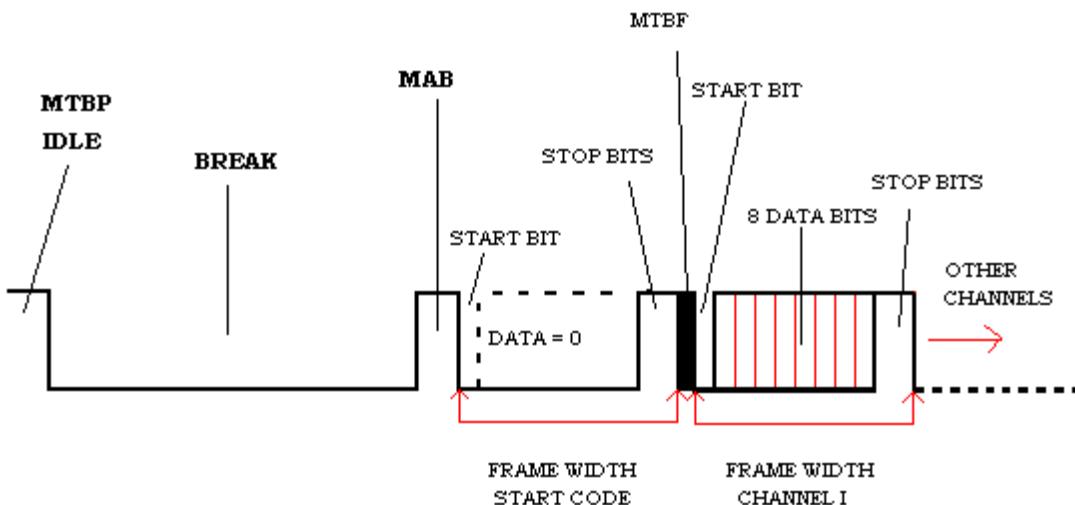
La trama DMX, visible en la figura 1.8 consta de las siguientes partes:

- **Idle** y **MTBP** (Mark Time Between Packets): estado de HIGH en la línea que indica la ausencia de señal de DMX. En caso de que se supere el tiempo máximo de 1 segundo sin datos, se considera que hubo una pérdida en la conexión.
- **Break**: estado de LOW en la línea utilizado para separar las tramas entre sí.
- **MAB** (Mark After Break): estado en HIGH enviado luego de un Break. Este estado suele traer problemas de compatibilidad ya que fue cambiado de una duración de  $4\mu s$  a  $8\mu s$  en la versión de DMX512 de 1990.

- **Slots:** son datos con formato 8N2 (un bit de start (LOW), 8 bits de datos, 2 bits de stop (HIGH) y sin paridad), y pueden ser:
  - **SC** (Start Code): es el Slot 0, enviado luego de un MAB, para indicar el principio del payload. Todos los bits de datos equivalen a LOW en este estado.
  - **Channels:** contienen la información que quiere ser enviada a los equipos de DMX. El conjunto de los 8 bits de datos pueden tomar un valor de 0 a 255. En total pueden haber un máximo de 512 canales enviados.
- **MTBF** (Mark Time Between Frames): estado opcional de HIGH en la linea que puede agregarse antes del bit de start de cada canal.

Señal	Mínima	Máxima	Típica
Idle/MTBP	0	1 seg	No especificada
Break	88μs	1seg	88μs
MAB	-	-	8μs
Bit	-	-	1/250KHz = 4μs
Slot (11 bits)	-	-	44μs
MTBF	0	1 seg	No especificada

Tabla 1.1: Duración de las señales que componen la trama de DMX

Figura 1.8: Formato de la trama DMX. Fuente: [LINK](#)

A cada trama con 512 canales se la llama "universo de DMX". Si se necesitan enviar más de 512 canales se utilizan más universos.

### 1.2.3.2 Subcapa de control de acceso al medio

DMX no implemente ningún mecanismo de control de acceso al medio debido a que el único transmisor es la red es el maestro y todos los esclavos reciben la misma información.

## 1.3 Updown

### 1.3.1 Definición

El **Updown**, que se puede ver en la figura 1.9, es básicamente una grúa que sube y baja una carga conforme a comandos recibidos por una equipo que utilice el protocolo DMX, como puede ser una consola de control de luminaria. La distancia máxima a la que la carga puede bajar es de 4 metros.

Este producto fue concebido en **Blackout**, una empresa productora y proveedora de tecnología cuyo objetivo es generar contenido audiovisual para grandes eventos. Blackout tomó interés en esculturas cinéticas como la de la figura 1.3 pero se encontró con el problema que el costo de importación de los equipos utilizados para tales fines, sumado a su precio unitario, era muy elevado. Por este motivo, decidió comenzar el desarrollo de un producto propio y nacional para alcanzar su objetivo.

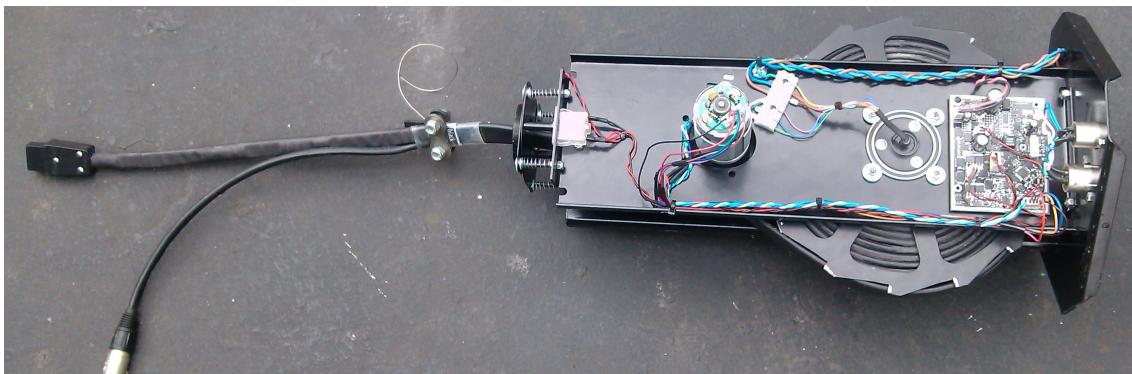


Figura 1.9: Imagen del Updown, desarrollado por la empresa Blackout

### 1.3.2 Descripción del sistema

En la figura 1.10 se presenta el diagrama general del equipo updown. Allí se pueden identificar todos elementos electrónicos y mecánicos que conforman el sistema, los agentes externos del sistema, y la comunicación entre ellos.

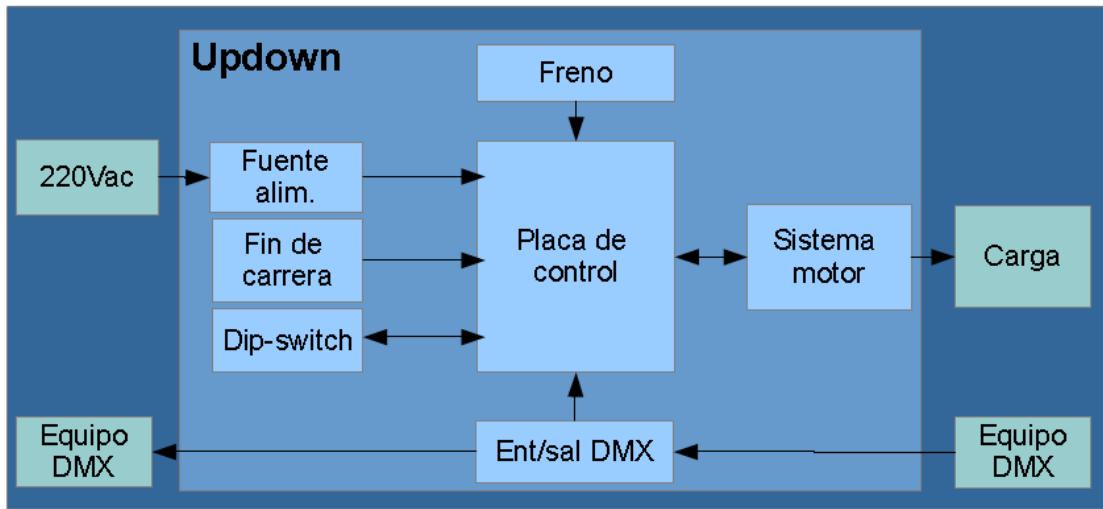


Figura 1.10: Diagrama conceptual del equipo Updown

#### 1.3.2.1 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es la encargada de proveer la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema motor, y de placa de control junto con sus periféricos. Esto lo logra convirtiendo la tensión de red de 220Vac a una señal continua de 24Vcc, entregando 4.5A máximo.

#### 1.3.2.2 Entrada y salida DMX

La señal DMX proveniente del master de la red, otro Updown, o cualquier otro equipo esclavo dentro del mismo universo DMX ingresa al sistema para ser procesada por la placa de control. Su función es indicarle al equipo la referencia de posición y velocidad, y los parámetros que correspondan a la carga.

Además, para cumplir con el estándar DMX, la señal de entrada se replica mediante un puente a una salida para que otro equipo pueda ser conectado a la red.

### 1.3.2.3 Dip-switch

El dipswitch consta con varios divisores resistivos, 10 switchs y un led indicador. Su función es seleccionar el canal inicial de DMX con el que el equipo trabajará.

### 1.3.2.4 Freno

El freno consta de una bobina, desactivada por defecto, que mueve una varilla metálica que traba el carrete que contiene la polea. Al activar la bobina la varilla libera al carrete, permitiendo el libre movimiento de la carga.

### 1.3.2.5 Fin de carrera

El fin de carrera consta de un par de pulsadores en la base del equipo. Eventos como enrollar completamente la polea activa alguno de los pulsadores, dandole aviso a la placa de control.

### 1.3.2.6 Sistema motor

El elemento principal del sistema motor es un motor de continua de 24V con un encoder AB en su eje. Este motor mueve un carrete en donde se enrolla el cable que sostiene la carga, que tiene un peso de 3Kg. El carrete, llamado disco, tiene unas marcas que son sensadas por un encoder en la placa de control para tener una segunda referencia de posición. La dirección de giro del motor se selecciona a través de un puente H.

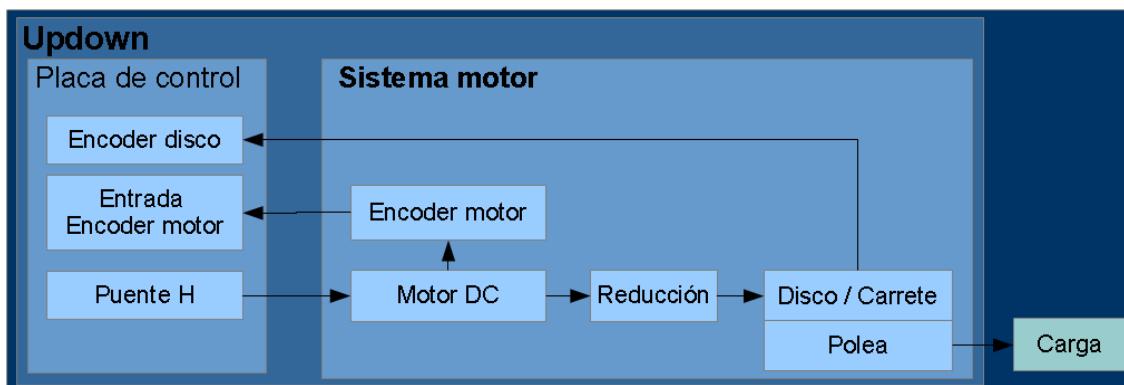


Figura 1.11: Diagrama del sistema motor

### 1.3.2.7 Placa de control

La placa de control contiene electrónica para el manejo de las entradas y salidas del sistema, y un controlador para manejar todos los periféricos siguiendo la lógica deseada.

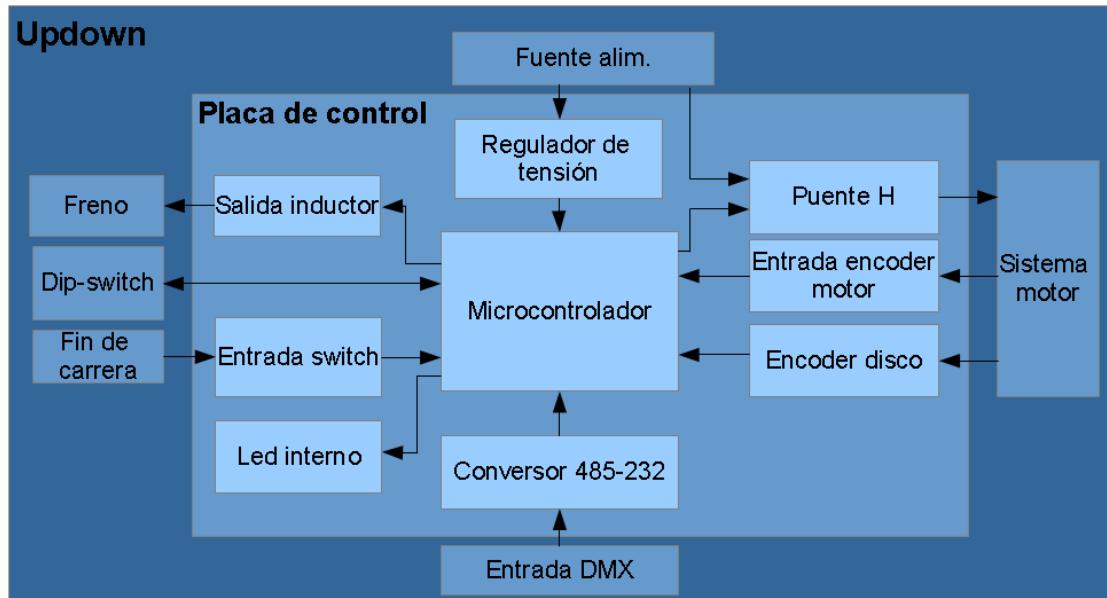


Figura 1.12: Diagrama del sistema motor

### 1.3.3 Resumen de entradas y salidas del sistema

#### 1.3.3.1 Entradas

Señal de DMX, Fin de carrera, Dip-switch, Encoder AB de disco, Encoder AB de motor.

#### 1.3.3.2 Salidas

Freno, Motor, Led interno (led indicador de la Placa de control), Led externo (led indicador del Dipswitch), Puente H.

## 1.4 Justificación del proyecto

Durante el desarrollo del updown la empresa se dió cuenta que con los recursos que contaban, tiempo en particular, no podían concretar los requerimientos que buscaban que el updown tuviera. En esta instancia la mayoría de la mecánica y la electrónica estaba hecha, solo faltaba resolver: el desarrollo de un dipswitch para el direccionamiento de DMX, la programación del microcontrolador para manejar todo el sistema y generación software de prueba para el armado de nuevos equipos.

Por este motivo, Blackout se vió en la necesidad de buscar a alguien externo a la empresa para darle fin al proyecto, lo que presentó la oportunidad de realizar el trabajo de concluir el desarrollo del equipo, que es en lo que este proyecto final se basa.

## 1.5 Objetivos

Para dar conclusión al proyecto se deben cumplir con los requerimientos no resueltos del producto. Estos son:

### 1.5.1 REQ-01

Contar con el software necesario para el manejo de todas las entradas y salidas del sistema.

### 1.5.2 REQ-02

Lograr que las cargas manejadas por los equipos se muevan a la velocidad y posición indicadas mediante una consola DMX.

### 1.5.3 REQ-03

Manejar errores y excepciones de hardware para lograr que el producto sea seguro, siendo que será instalado en eventos con un alto nivel de concurrencia.

Dentro de estos errores se encuentran: corte de correa, pérdida de señal DMX y accionamiento indebido del fin de carrera.

#### **1.5.4 REQ-04**

Concluir el desarrollo del dipswitch.

#### **1.5.5 Otros**

Además, de ser necesario para el cumplimiento del resto de los requerimientos, se deberán plantear, y de ser posible realizar, los cambios mecánicos y electrónicos que hagan falta.

# Diseño

## 2.1 Descripción del capítulo

En este capítulo se analizarán los requerimientos presentados en la sección 1.5 del capítulo 1 con el objetivo de determinar qué se planea hacer para cumplirlos.

## 2.2 REQ-01

Para cumplir este requerimiento se debe contar con herramientas de software que permita el manejo de: freno, leds indicadores, fin de carrera, dipswitch, encoders AB de disco y motor, motor y DMX. Además, como la placa de control no cuenta con un puerto de debug es necesario tener algún canal de comunicación alternativo, como un puerto serie por software. También será necesario temporizar ciertas partes del programa, por lo que se deberá poder manejar un timer.

El microcontrolador utilizado en la placa de control es el Atmega328p, y cuenta con periféricos para manejar todas las entradas y salidas del sistema por lo que es una buena elección para el proyecto. El único inconveniente que presenta es que es un microcontrolador de 8 bits con relativamente baja memoria y sin optimizaciones para operaciones de punto flotante.

En sistemas embebidos, la manera de manejar el hardware del microcontrolador, entre otras cosas, es a través de librerías. Estas son un conjunto de funciones o procedimientos externos a la aplicación a desarrollar que le permiten al usuario manejar ciertos aspectos del sistema de forma más fácil.

Una opción sería utilizar librerías ya desarrolladas, entre las cuales se destacan las de Arduino. Arduino, una plataforma de programación de sistemas embebidos muy popular, utiliza en sus placas microcontroladores de marca Atmel. En particular, el *Arduino UNO* utiliza el Atmega328p, por lo que existen funciones provistas por Arduino para el manejo de los periféricos del microcontrolador que se utiliza en el proyecto.

La otra opción sería hacer librerías a medida para el proyecto, desarrollando las funciones necesarias para el manejo de los periféricos que se necesiten para que se comporten exactamente como uno desea.

En la tabla 2.1 se presenta una comparación entre ambas opciones.

El mayor problema con las librerías de Arduino es que para que cuadren en proyectos grandes como estos requieren modificaciones, y las funciones provistas deben ser analizadas para verificar que no se usen elementos como delays bloqueantes ni operaciones

de punto flotante indiscriminadamente, ya que deterioran el rendimiento.

Como el objetivo es hacer que el sistema sea lo más confiable posible, y teniendo en cuenta que el tiempo de desarrollo no es un factor crítico, **se desarrollarán librerías propias para manejar los periféricos.**

	<b>Arduino</b>	<b>Propia</b>
Pros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Listas para usar</li> <li>- Altamente testeadas</li> <li>- Mantenidas por una comunidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo uso de recursos</li> <li>- Confiabilidad</li> <li>- Predictibilidad</li> </ul>
Cons	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genéricas (poco optimizadas)</li> <li>- Necesitan modificaciones para ser útiles</li> <li>- Requieren análisis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de desarrollo alto por defecto</li> <li>- Investigación y estudio</li> </ul>

Tabla 2.1: Comparación entre el uso de librerías de Arduino vs el desarrollo de unas propias

## 2.3 REQ-02

### 2.3.1 Esquema de control

Para cumplir con este requerimiento la carga se debe mover en respuesta a una referencia de posición y otra de velocidad indicadas por una consola DMX. Para esto se utilizará el esquema de control mostrado en la figura 2.1, siendo:  $p$  la posición,  $v$  la velocidad,  $C_p$  el controlador de posición,  $C_v$  el de velocidad,  $\epsilon_p$  y  $\epsilon_v$  los errores de posición y velocidad,  $u$  la acción de control,  $G$  la planta, y  $rp\_dmx$  y  $rv\_dmx$  las referencias de posición y velocidad dadas por la consola DMX.

La elección de este esquema fue debido a su simpleza: un controlador de velocidad se encarga de mantener la velocidad igual a la referencia, mientras que uno de posición le indica al de velocidad que debe frenar cuando la posición objetivo está por ser alcanzada. Para evitar que el controlador de posición le indique al de velocidad una referencia mayor a la permitida, se utiliza un limitador en la referencia de velocidad. Similarmente, como la acción de control será el ciclo de trabajo del pwm que mueve al motor, se utiliza un segundo limitador para evitar que el ciclo de trabajo supere el 100 %.

La simpleza en el controlador y su modelo son un factor muy importante en este proyecto, ya que el objetivo es controlar el equipo mediante una consola DMX, y los efectos enviados por consola tienen una dinámica que el equipo debe seguir lo más fielmente posible. Introducir mucha dinámica por parte del controlador, por más que haga al sistema más estable, es indeseado en este caso.

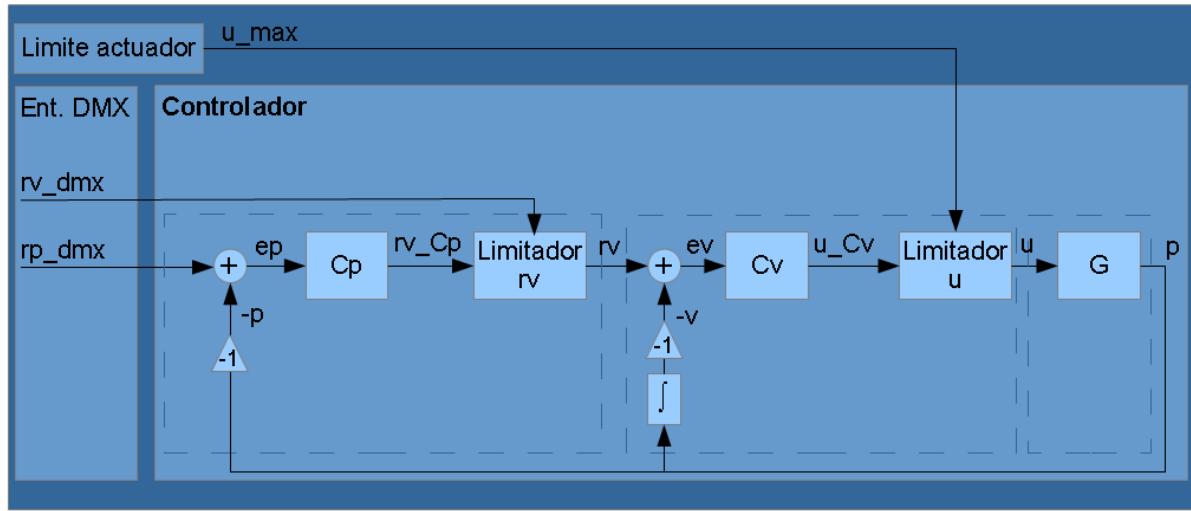


Figura 2.1: Esquema de control a implementar

### 2.3.2 Modelo de la planta

Para este proyecto la planta será considerada como el conjunto motor-transmisión-carga. Un esquema mecánico de la planta se muestra en la figura 2.2. Su funcionamiento es el siguiente: parte de la potencia eléctrica que ingresa al motor se transforma a mecánica y se utiliza para mover el piñón que se encuentra conectado al eje del motor. El piñón, a través de una cadena ANSI 25, transfiere su energía a la corona, que hace girar un disco adosado a ella. Este disco, o carrete, contiene en su interior el cable que sostiene a la carga, enrrollandolo o desenrrollandolo para subirla o bajarla. Como la carga del updown puede necesitar ser alimentada y recibir señal de DMX, el cable utilizado contiene en su interior contine 2 cables con ambas señales.

Ahora, para diseñar el controlador se debe encontrar un modelo matemático de la planta. Una opción es determinar las ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema aplicando la segunda ley de newton, y determinando el modelo matemático de un motor de continua mediante identificación. El problema es que por motivos constructivos del equipo existen muchas piezas que generan roces en diferentes partes del recorrido de la carga, lo que quiere decir que hay una perturbación cuya dinámica es totalmente desconocida y que depende de varios factores, como la distancia y el peso de la carga. Por lo tanto, se abordará el problema con un método más simple: determinar el modelo de todo el conjunto mediante identificación, midiendo la respuesta del sistema ante ciertas entradas. Como el objetivo es que varios updown se comporten lo más parecido posible, se realizarán las pruebas para por lo menos 2 updown.

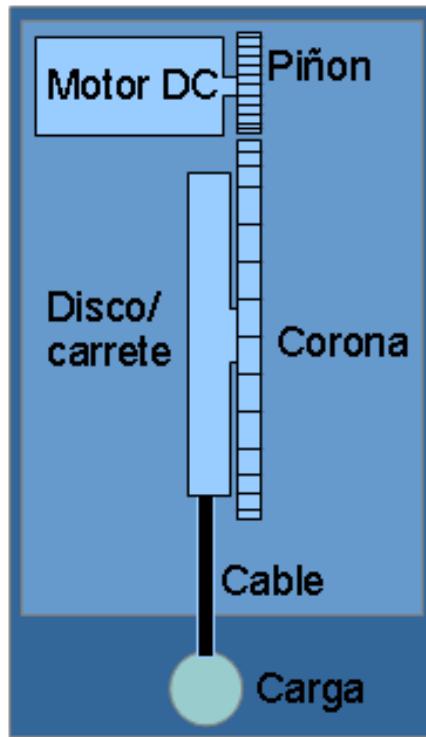


Figura 2.2: Modelo mecánico de la planta

### 2.3.3 Procedimiento para el diseño de control

Primero se determinará el período de muestreo y actuación inyectándole un escalón unitario a planta.

Luego, se obtendrá el modelo de la planta mediante identificación paramétrica, haciendo uso de un método de estimación de tipo offline (no recursivo).

Luego se diseñarán los controladores de posición y velocidad en base al modelo de la planta obtenido

Finalmente se validarán los controladores hayados haciendo pruebas directamente sobre el updown.

### 2.3.4 Relación entre cuentas de encoder y distancia

A medida que el motor gira desenrolla el cable para subir o bajar la carga. El problema es que dependiendo cuán enrrollada está el cable en el disco un mismo número de cuentas de encoder se puede traducir en distintas distancias recorridas por la carga. Por ejemplo, si el cable está completamente enrollada cuando se gira 360 grados el carrete el largo desenrollado será uno, mientras que si el cable se encuentra parcialmente desenrollada

la distancia descendida en un giro de 360 grados del carrete será menor que la anterior. Para determinar esta relación se harán marcas sobre en el cable y para cada una se anotará el valor de cuentas del encoder del motor, que es el que más resolución tiene. Con estos datos se construirá una tabla, se encontrarán varios polinomios que ajusten los datos y se determinará cuál de ellos es el que se implementará en software.

### **2.3.5 Velocidad máxima**

Una tarea a resolver es determinar cuál es la velocidad máxima posible para una carga determinada.

Para determinar este valor se medirá la velocidad para una carga de 3Kg en subida aplicando sobre el motor un PWM con ciclo de trabajo de 100%.

La posición máxima posible queda dada por condiciones de diseño: 4 metros

## **2.4 REQ-03**

Los posibles errores detectables que se pueden tener en el equipo son:

### **2.4.1 Corte de correa**

La transmisión de potencia entre el piñón en el eje del motor y la corona en el disco se hace a través de una correa. El problema es que durante las pruebas, la empresa observó que la correa podría cortarse.

La manera que tiene el equipo de detectar este error es mediante un segundo encoder AB que mide el giro del disco. Como la relación de vueltas entre el disco y el motor es proporcional, cualquier desviación grande de esta proporcionalidad indica que uno se está moviendo más rápidamente que el otro. Esto podría interpretarse como que la correa fue cortada o que alguno de los encoders dejó de funcionar, 2 errores válidos de hardware.

Para poder detectar estos errores lo primero que se hará es determinar la relación entre las cuentas del encoder del disco y las del motor. Luego verificará en el firmware que esta se cumpla en todo momento, bajo un cierto nivel de error aceptable. En caso de no cumplirse se accionará el freno, se detendrá el equipo completamente y se indicará sobre la existencia del error mediante el led de la placa de control (led interno).

### 2.4.2 Fin de carrera

La función principal del fin de carrera, un par de pulsadores en la base del equipo, es indicar cuándo el cable que sostiene la carga está completamente enrollada para determinar la posición 0 o "home" del equipo, dado que este puede estar en cualquier posición al ser encendido.

La función secundaria del fin de carrera es detectar posibles eventos indeseados. Por ejemplo, en su punto más bajo la carga se encontrará a 4 metros por debajo del 0 del updown, por lo que podría comenzar a oscilar debido a fuertes vientos o personas que muevan la carga. Por cómo está construido el fin de carrera si la carga oscila más allá de un ángulo de aproximadamente 30 grados el fin de carrera se accionará dando aviso de esto.

Para poder detectar estos errores se verificará que el fin de carrea no sea presionado fuera de la rutina de calibración de (homing). En caso de que sea presionado en estas condiciones se detendrá el equipo, se esperará un tiempo a que la oscilación baje, y intentarán reanudar las operaciones normales. En caso de que el fin de carrera siga presionado se accionará el freno, se detendrá el equipo completamente y se indicará sobre la existencia del error mediante el led de la placa de control (led interno).

### 2.4.3 Pérdida de DMX

El estándar DMX establece que el tiempo máximo entre un paquete de datos y otro, tiempo de IDLE o MTBP (ver tabla 1.1), es de 1 segundo. Esto quiere decir que si por 1 segundo no me llegaron nuevos datos se considera que se perdió la comunicación con el dispositivo DMX.

Para detectar la pérdida de señal de DMX se verificará constantemente que el último paquete haya llegado hace menos de 1 segundo. En caso de no cumplirse se asumirá que las referencias de posición y velocidad son 0 (equipo parado). Además, por una convención en equipos DMX, se indicará mediante el led en el dipswitch (led externo) cuándo el equipo recibe correctamente la señal de DMX y cuándo no, encendiéndolo y apagándolo rápidamente en el primer caso y lentamente en el segundo.

## 2.5 REQ-04

El propósito del dipswitch en el equipo es poder seleccionar el canal principal de DMX a partir del cual leer las referencias de posición y velocidad, dentro de los 512 canales que tiene un universo DMX. Para lograr esto cuenta con 10 switchs, 9 que determinan el canal de DMX ( $2^9 = 512$ ) y uno extra para ampliaciones futuras. Estos conmutadores

conectan o desconectan resistencias de unos divisores de tensión resistivos, variando el valor entregado por cada uno de ellos. Como el dipswitch cuenta con 3 divisores se tienen 3 salidas analógicas, que dan información de qué switchs están activados y cuales no. El esquema de uno de los divisores se puede ver en la figura 2.3. Para completar con el desarrollo del dipswitch se deben encontrar 5 valores de resistencias ( $R_1, R_2, R_3, R_4$  y  $R$ ).

Para hallar estos 5 valores se simulará el divisor de tensión en Matlab, probando con distintas combinaciones de resistencias hasta que los valores analógicos de la salida para cada combinación de resistencia estén lo suficientemente separados.

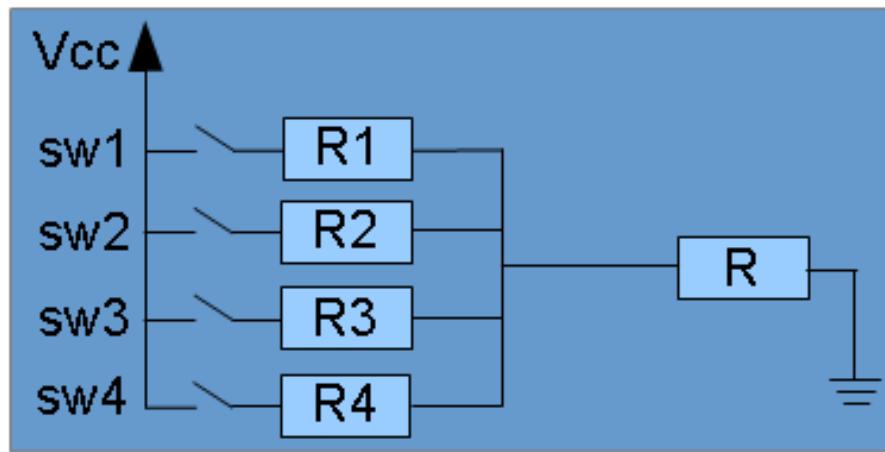


Figura 2.3: Diagrama de uno de los 3 divisores del dipswitch

## 2.6 Firmware del updown

### 2.6.1 Aviso de confidencialidad

Debido a políticas de confidencialidad de la empresa Blackout, el código fuente del firmware desarrollado para este proyecto no puede ser distribuido libremente. Es por este motivo que únicamente se describirá cómo se solucionaron los problemas, sin analizar el código puntualmente.

### 2.6.2 Convenciones

Con el objetivo de maximizar el encapsulamiento, las funciones dentro de los módulos se dividirán en internas y externas. Las internas podrán ser accedidas únicamente por otras funciones dentro del módulo, mientras que las externas también podrán ser accedidas por funciones de otros módulos. Para implementar esto se hará uso del sistema de separación

de información en archivos .c (código) y .h (headers). Los .h tendrán las declaraciones de funciones externas y definiciones para que, al ser incluido por otros módulos, tengan acceso a las mismas.

En cuanto a variables, solo se utilizarán variables internas al módulo. En caso de que tengan que poder ser accedidas externamente se implementarán setters (para escribir un valor en la variable) y getters (para escribir el valor de la variable) según corresponda. Las funciones tendrán su nombre en formato *camelCase* (primera letra minúscula y el resto de las primeras letras de las palabras utilizadas en el nombre en mayúscula), los Define en *MAYUSCULA*, y los módulos en formato PascalCase (como el camel case pero con la primera letra en mayúscula). Finalmente, todas las funciones y definiciones que pueden ser accedidas desde afuera de un módulo llevarán como prefijo el nombre del módulo seguido de un guión bajo.

Además, debido a políticas de Blackout, todo el software desarrollado debe ser entendible por todo el equipo de trabajo. Esto quiere decir que una de las metas para las funciones de las librerías a crear es que permitan un flujo entendible, y que los nombres de las funciones sean parecidas a las de Arduino ya que lo que se acostumbraba a utilizar en la empresa para la programación de sistemas embebidos.

Para lograr este objetivo todas los módulos desarrollados tendrán una función de inicialización llamada "init", y de lectura y escritura, según corresponda, llamadas "read" y "write", respectivamente.

A continuación se presentan algunos ejemplos de las convenciones que se usarán. Función de inicialización del módulo 1: Modulo1\_init(); Define del largo de un buffer genérico del modulo 3: Modulo3\_BUFFERGEnerico.

### 2.6.3 Librerías de bajo nivel

Como se mencionó en la sección 2.2, se desarrollarán librerías para manejar los periféricos del Atmega328p y así poder controlar el hardware del sistema. Esto implica analizar la [hoja de datos del Atmega328p](#) e interactuar con los registros, un lugar de memoria utilizado para guardar información, que correspondan.

Asociadas a las librerías viene de la mano el concepto de módulo, que tiene que ver con agrupar funciones similares en un mismo paquete para desacoplar dependencias y separar al sistema en varios subsistemas que sean lo más independientes que se pueda. Esto ayuda a que el programa sea escalable y mantenable, por lo que todo el software desarrollado se hará de manera modular.

Entonces, para manejar los periféricos se creará una librería de bajo nivel que constará de los siguientes módulos:

- **Entradas y salidas digitales**, para leer el estado del fin de carrera y comandar el freno, los leds indicadores interno y externo, y el puente H. Este módulo se llamará

*DigitalIO.*

- **Entradas analógicas**, para leer las 3 salidas analógicas del dipswitch y poder determinar la posición de los selectores. Este módulo se llamará *ADC*, por *Analog to Digital Converter*.
- **Interrupciones externas** por cambio de estado de un pin, para llevar cuenta de los cambios de estado de los encoders AB y así saber la posición relativa. Este módulo se llamará *EXINT*, por *EXternal INTerrupts*.
- **PWM**, para el manejo del motor de continua. Este módulo se llamará *PWM*, por *Pulse Width Modulation*.
- **UART**, para la lectura de la señal DMX. Este módulo se llamará *UART*, por *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*
- **UART por software**, una UART implementada en pines genéricos que se utilizará para el debuggeo de la placa. Este módulo se llamará *SUART*, por *Software UART*.
- **Base de tiempo**, un timer utilizado para la temporización tareas y eventos. Este módulo se llamará *Tick*.

#### 2.6.4 Librerías de alto nivel

Hay que tener en cuenta que no es lo mismo obtener un valor analógico leyendo un *registro* (lugar para el almacenamiento de datos) del microcontrolador, que determinar qué conmutadores del dipswitch están activados leyendo 3 valores analógicos. Por lo tanto, se necesita una librería que sea más abstracta que la del manejo de periféricos para poder utilizar el hardware de esta aplicación en particular.  
Entonces, se creará una librería propia de la aplicación que constará de los siguientes módulos:

- **Dipswitch**, que incluye la lectura de las llaves del dipswitch, y la escritura del led indicador externo.
- **Grua**, que incluye el manejo del motor, del led interno, del freno y del fin de carrera.
- **DMX**, para la recepción de datos de la consola DMX.
- **Encoder**, para el manejo de los encoders AB del disco y del motor.
- **Controlador**, para la implementación del sistema de control

### 2.6.5 Diagrama de módulos

De estas 2 librerías se obtiene el diagrama de módulos presentado en la figura 2.4, el cual muestra su relación, dependencia y alcance.

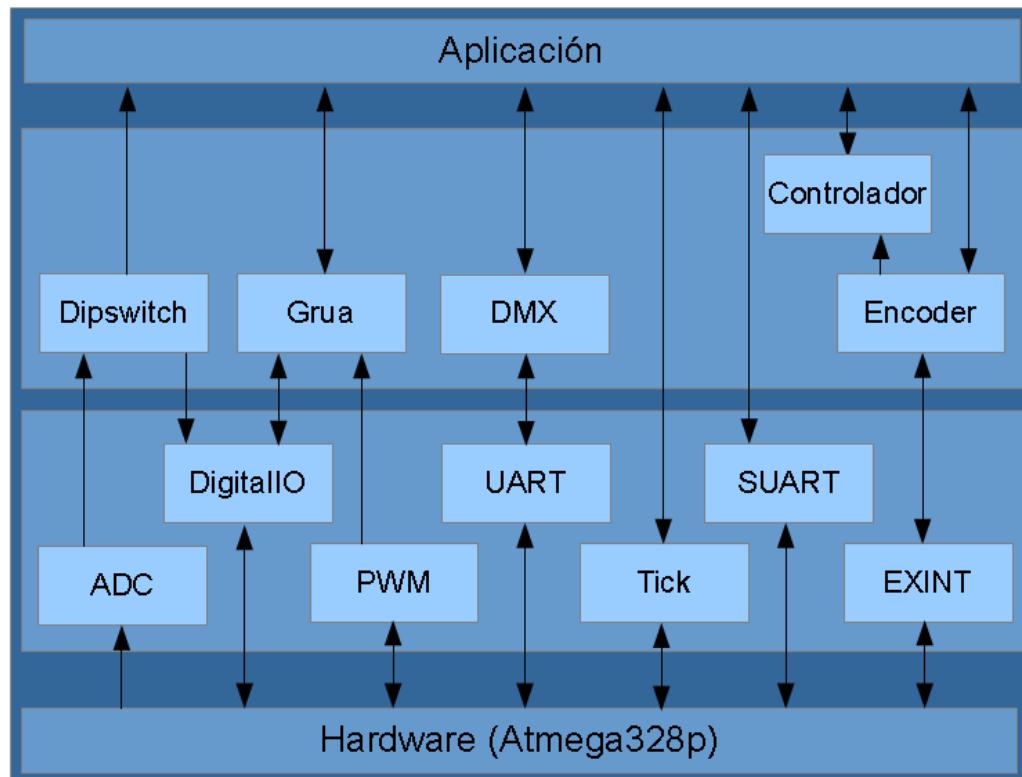


Figura 2.4: Diagrama de módulos del firmware

# Desarrollo

## 3.1 Descripción del capítulo

En este capítulo se desarrollarán las soluciones propuestas en el capítulo de diseño. Esto implica detallar el proceso realizado, describir los cambios que se debieron hacer en caso de que el planteo inicial no haya funcionado, análisis de resultados, etc.

## 3.2 Firmware del updown - Librerías de bajo nivel

### 3.2.1 DigitalIO

#### 3.2.1.1 Manejo del periférico

Las entradas y salidas digitales del Atmega328p se manejan mediante 3 registros: el DDRn (Data Direction Register n), PORTn (Port n Data Register) y PINn (Port n Input Pins Address). La "n" en los registros se refiere al registro específico a ser accedido, que en el caso de este microcontrolador puede ser B, C o D.

Para inicializar un pin como entrada o salida digital primero se elige la dirección del mismo, o sea, si se utilizará como entrada O como salida digital. Para esto se utiliza el registro DDRn, en donde escribir un bit de este registro en 1 significa configurar el pin asociado a este bit como Output (salida) o , mientras que si se escribe en 0 significa configurar al pin como Input (entrada). Para el caso de las entradas se puede optar por habilitar una resistencia pull-up interna del microcontrolador. El pull-up se encuentra deshabilitado por defecto, pero puede ser habilitado escribiendo un 1 en el bit análogo del registro PORTn. Para escribir el valor de un pin configurado como salida se setea su valor mediante el registro PORTn. Un 1 en un bit de este registro significa poner en HIGH (5 Volts) la salida asociada a ese bit, mientras que un 0 es un estado LOW (0 Volts).

La lectura del estado de un pin configurado como entrada se hace a través del registro PINn. Enmascarando un bit específico en el puerto se puede obtener ese valor en particular.

Por ejemplo, si se quiere inicializar el bit 3 del puerto B como entrada con pull-up y el bit 6 del puerto D como entrada en lenguaje C, se tiene:

```

1  /* — Configuracion bit 3 puerto B como Input – Pullup — */
2  // Inicializacion del pin
3  DDRB &= ~(1 << 3); // Inicializacion como entrada
4  PORTB |= (1 << 3); // Habilitacion pullup
5
6  // Lectura del estado del pin
7  estadoBit3PuertoB = PINB & (1 << 3);
8
9  /* — Configuracion bit 6 puerto D como Output — */
10 // Inicializacion del pin como salida
11 DDRD |= (1 << 6);
12
13 // Escritura de un 1 en el pin
14 PORTD |= (1 << 6);

```

### 3.2.1.2 Implementación

Ahora, conocer el bit, puerto y nombres de los registros para cada pin a configurar es muy tedioso. Por lo tanto, para facilitar la lecto-escritura y configuración de los pines se mapearon los bits de los puertos B,C y D a números, como se muestra en la tabla 3.1. El criterio de enumeración fue basado en los pines del Arduino UNO.

Puerto	Bit	Número mapeado
D	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
B	0, 1, 2, 3, 4, 5	8, 9, 10, 11, 12, 13
C	0, 1, 2, 3, 4, 5	14, 15, 16, 17, 18, 19

Tabla 3.1: Mapeo de bits de los puertos a número

Para acceder al módulo se implementaron 3 funciones, una de inicialización, una de lectura y otra de escritura, y 3 definiciones para configurar los pines, entrada, salida y salida con pullup, como se muestra en la figura 3.1. De esta forma, el ejemplo resuelto mediante registros queda de la siguiente manera:

```

1  /* — Configuracion bit 3 puerto B como Input – Pullup — */
2  // Inicializacion del pin como entrada con pullup
3  DigitalIO_init(11, DigitalIO_INPUT_PULLUP); // Puerto B bit 3 = 11
4
5  // Lectura del estado del pin
6  estadoBit3PuertoB = DigitalIO_read(11);
7
8  /* — Configuracion bit 6 puerto D como Output — */
9  // Inicializacion del pin como salida
10 DigitalIO_init(6, DigitalIO_OUTPUT); // Puerto D bit 6 = 6
11
12 // Escritura de un 1 en el pin

```

```
13 DigitalIO_write(6, 1);
```

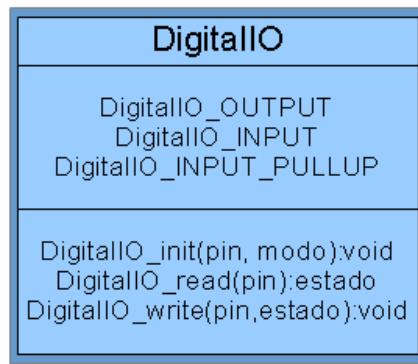


Figura 3.1: Diagrama del módulo DigitalIO

### 3.2.2 ADC

#### 3.2.2.1 Manejo del periférico

El periférico de lectura de entrada analógica del Atmega328p es un ADC por *aproximaciones sucesivas* de 10bits de resolución. Esto quiere decir que la conversión se realiza a una frecuencia determinada, y con una tensión de referencia dada. Además, este microcontrolador cuenta con 1 solo módulo de ADC y 8 canales analógicos, por lo que el usuario debe elegir a qué canal irá el resultado de la conversión mediante un multiplexor de entradas. El diagrama completo del sistema de conversión se encuentra en la figura 28.1 del datasheet del atmega328p.

La inicialización del periférico se logra mediante los registros ADMUX (ADC Multiplexer Selection Register) y ADCSRA (ADC Control and Status Register). Con el primero se selecciona la tensión de referencia, mientras que con el segundo se habilita el periférico y se selecciona la frecuencia de la conversión mediante la selección de un preescalador. Por ejemplo, si se desea utilizar como referencia de tensión la Vcc del micro (5V) y se quiere una frecuencia de 125KHz el código, en lenguaje C, sería:

```
1 /* Selecciono Vref = Vcc */
2 ADMUX = (1 << REFS0);
3
4 /* Habilitacion del adc y seteo del prescaler a 128 => f_adc = 125KHz */
5 ADCSRA = (1 << ADEN) | (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);
```

Cabe aclarar que REFS0 es el bit asociado a la selección de  $V_{ref} = V_{cc}$ . Es el 6to bit del registro ADMUX, por lo que  $REFS0 = 6$ . Similarmente,  $ADEN = 7$ ,  $ADPS2 = 2$ ,  $ADPS1 = 1$  y  $ADPS0 = 0$ .

Luego, para la lectura del valor analógico se debe:

1. Seleccionar el canal mediante el multiplexor de entradas con el registro ADMUX. Los 3 bits menos significativos, llamados MUX0/1/2, de este registro permiten seleccionar los canales: si  $\text{MUX}[2:0] = 000 \Rightarrow$  selecciono el canal 0, si es igual a 001 selecciono el canal 1, y así hasta llegar a 111 para el canal 7.
2. Dar comienzo a la conversión poniendo un 1 en bit 6 (llamado ADSC) del registro ADCSRA.
3. Esperar a que termine la conversión. Cuando la conversión termina ADSC, que había sido seteado en 1, pasa a valer 0.
4. Recuperar el resultado leyendo el registro ADC.

El ejemplo de lectura del canal 2, en lenguaje C, sería:

```

1  /* —— Lectura de un dato del canal 2 —— */
2  // Seleccion del canal que se desea leer conservando el resto de los
   // valores del registro
3  ADMUX = (ADMUX & 0b11111000) | 2; // 2 debido al canal a ser leido
4
5  // Inicio de conversion
6  ADCSRA |= (1<<ADSC);
7
8  // Espera del fin de la conversion
9  while(ADCSRA & (1<<ADSC));
10
11 // Lectura del valor resultante de la conversion
12 valorCanal2 = ADC;

```

### 3.2.2.2 Implementación

Para acceder al módulo se implementaron 2 funciones, una de inicialización y una de lectura, como se muestra en la figura 3.2. De esta forma, los ejemplos resueltos mediante registros quedan de la siguiente manera:

```

1  /* —— Inicializacion del periferico —— */
2  ADC_init();
3
4  /* —— Lectura del canal 2 —— */
5  valorCanal2 = ADC_read(2);

```

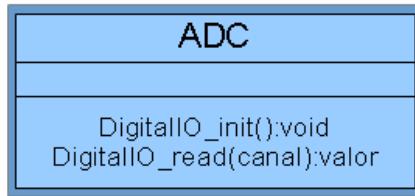


Figura 3.2: Diagrama del módulo ADC

### 3.2.3 PWM

#### 3.2.3.1 Frecuencia

La frecuencia del PWM a generar será de 25KHz, ya que:

- Es lo suficientemente rápida como para que el motor integre la señal y la tome como continua.
- Al encontrarse por encima de 20KHz, que es el tope del rango audible, no provoca ruidos indeseados.
- Es soportada por los mosfets utilizados en el puente H (NTD3055L104).

#### 3.2.3.2 Manejo del periférico

En el Atmega328p no existe un periférico exclusivo para generación de PWM. Por lo tanto, se generará con el periférico Timer del microcontrolador. De los Timers que tiene este microcontrolador, el más potente para generación de PWM es el Timer1, puesto que cuenta con un modo de generación de PWM de fase correcta. Este modo es preferible por sobre el modo de pwm soportado por los otros 2 timers (0 y 2) ya que no provoca corrimientos de fase durante la variación del ancho del pulso, efecto que hay que evitar en el control de motores.

La generación de PWM en modo fase correcta se hace a través de la comparación de un contador (TCNT1) con un valor definido por el usuario (OCR1A). La señal de PWM sale por una salida digital especial llamada OCR1A, y la forma de la señal depende del tipo de comparación. Si el tipo de comparación es no-invertida, OCR1 vale 1 si el TCNT1 es menor a ICR1, y 0 en caso contrario. De esta manera, se puede ajustar el ciclo de trabajo al variar el valor de ICR1. En la figura 3.3 se muestra la señal en OC1A si el timer se encuentra en modo fase correcta con comparación tipo no-invertida, al variar el valor de OCR1A. A medida que este valor sube también lo hace el ciclo de trabajo. La configuración de estos modos de trabajo se hace a través del registro TCCR1A.



Figura 3.3: Ejemplo variación ciclo de trabajo al cambiar ICR1

La frecuencia de la señal se puede elegir mediante el registro ICR1. Su valor depende de la frecuencia del microcontrolador ( $f_{cpu}$ ), de la frecuencia objetivo ( $f_{pwm}$ ) y de un preescalador (N) seleccionable mediante el registro TCCR1B, como se puede ver en la ecuación 3.1. Para este proyecto el atmega328p trabaja a  $f_{cpu} = 16Mhz$ , y la frecuencia objetivo es  $f_{pwm} = 25Khz$ , por lo que tomando un preescalador de N=1 se tiene que ICR1 vale exactamente 320.

$$ICR1 = \frac{f_{cpu}}{2.N.f_{pwm}} \quad (3.1)$$

A continuación se presenta un ejemplo de inicialización del periférico y selección del ciclo de trabajo, en lenguaje C:

```

1  /* — Inicializacion del periferico — */
2  // Inicializacion del pin asociado a OC1A como salida , que es el 9 (
3  // puerto B bit 1).
4  DigitalIO_init(9,OUTPUT);
5
6  // Configuracion para pwm de fase correcta
7  TCCR1A |= (1 << WGM11)|(0 << WGM10); TCCR1B |= (1 << WGM13)|(0 << WGM12);
8
9  // Configuracion para tipo de comparacion no-invertida
10 TCCR1A |= (1 << COM1A1)|(0 << COM1A0)|(1 << COM1B1)|(0 << COM1B0);
11
12 // Configuracion para prescalador = 1
13 TCCR1B |= (0 << CS12) | (0 << CS11) | (1 << CS10);

```

```

13 // Configuracion para frecuencia de 25KHz
14 ICR1 = 320;
15
16 /* — Seleccion de ciclo de trabajo — */
17 // Ciclo de trabajo de x%: ICR1*x/100. Para 50% se tiene
18 OCR1A = 160;
19

```

### 3.2.3.3 Implementación

Para acceder al módulo se implementaron 2 funciones, una de inicialización y una de escritura, como se muestra en la figura 3.4. De esta forma, el ejemplo resuelto mediante registros queda de la siguiente manera:

```

1 /* — Inicializacion del periferico — */
2 // Inicializacion del pin asociado a OC1A como salida , que es el 9 (
3     puerto B bit 1).
4 PWM_init();
5
6 /* — Seleccion de ciclo de trabajo — */
7 PWM_write(50); // ciclo de trabajo a 50%

```

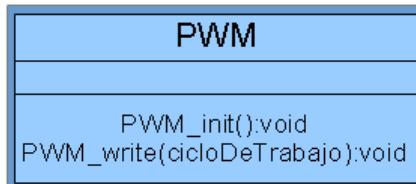


Figura 3.4: Diagrama del módulo PWM

### 3.2.4 EXINT

#### 3.2.4.1 Manejo del periférico

En el atmega328p hay 2 tipos de interrupciones externas:

- Las EXINT, que pueden ser configuradas para que se accionan por cualquier tipo de cambio en un pin (flanco ascendente, descendente y ambos), pero que solo están disponibles en 2 pines.
- y las PCINT que siempre se activan con un cambio en el pin (no se puede elegir como en las EXINT), pero que están disponibles para la mayoría de los pines del microcontrolador.

Para inicializar las EXINT simplemente se selecciona el tipo de disparo en el registro EICRA, se habilita la entrada digital correspondiente, y habilita la interrupción en el registro EIMSK.

Para las PCINT simplemente se habilita la entrada digital correspondiente y habilita la interrupción en el registro PCICR.

### 3.2.4.2 Implementación

Para acceder al módulo se implementaron 2 funciones de inicialización, una para EXINT y otra para PCINT, como se muestra en la figura 3.5.

Ambos 2 periféricos generan interrupciones, por lo que al ocurrir el evento disparador se ejecutará la ISR correspondiente. Por este motivo durante la inicialización de una EXINT o PCINT se deberá indicar la función a ejecutar durante la ISR mediante un puntero a función, implementando la siguiente linea en el .h:

```
1 /* — Inicializacion del periferico — */
2 typedef void (*voidFunctionPointer_t)(void);
```

Este nuevo tipo de dato es simplemente un parámetro en las funciones de inicialización en donde el usuario puede decidir qué se ejecuta durante la interrupción.

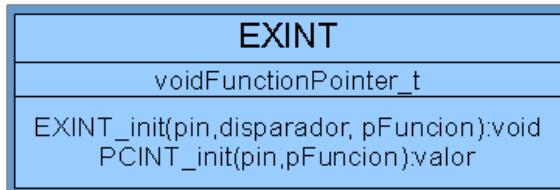


Figura 3.5: Diagrama del módulo EXINT

### 3.2.5 UART

#### 3.2.5.1 Manejo del periférico

El Atmega328p tiene un periférico de UART bastante estándar, en donde se puede configurar su tasa de transmisión (baudrate), modo de operación y formato de trama. Esto se logra por medio de los registros UBRR0, UCSR0A, UCSR0B y UCSR0C.

UBRR0, que se separa en UBRR0H u UBRR0L, sus partes alta y baja respectivamente, de 8 bits cada una, se utiliza para configurar el baudrate. La ecuación 3.2 sirve para

obtener el valor de UBRR0, en donde el 16 pasa a ser 8 si el bit U2X0 en el registro UCSR0A está seteado.

$$UBRR0 = \frac{f_{clk}}{(16.BAUD)} - 1 \quad (3.2)$$

Como DMX trabaja a una tasa de 250KHz y la frecuencia del microcontrolador es de 16MHz tenemos que  $UBRR0 = 3$ , o sea que  $UBRR0L = 3$  y  $UBRR0H = 0$ .

Mediante el registro UCSR0B se habilita o deshabilita la transmisión y recepción de datos. Como los esclavos DMX solo reciben datos, solo hace falta habilitar la recepción, lo cual se logra seteando el bit RXEN0 de este registro. También se pueden habilitar las interrupciones por recepción poniendo en 1 el bit RXCIE0, lo cual es necesario en esta aplicación debido a que durante la interrupción se tiene que analizar la trama DMX. Al igual que para el módulo EXINT, aquí también se utilizará el tipo de dato voidFunctionPointer\_t para que el módulo que llame a este pueda indicar qué función quiere ejecutar durante las interrupciones de recepción.

Finalmente, el registro UCSR0C permite configurar el modo (sincrónico o asincrónico) y el formato de la trama. DMX trabaja en modo asincrónico y con formato de trama 8N2.

En cuanto a la recepción, los datos que llegan por el puerto serie se almacenan en el registro UDR0. Para leerlo se verifica si el bit RXC0 en el registro UCSR0A se encuentra en 1, ya que este bit indica si existen datos no leídos en el buffer de recepción.

A continuación se presenta un ejemplo de inicialización y lectura de datos del periférico, en lenguaje C:

```

1  /* — Inicializacion del periferico — */
2  // Configuracion de tasa = 250KHz
3  UBRR0H = 0;
4  UBRR0L = 3;
5  UCSR0A = (0<<U2X0);

6
7  // Habilitacion de Rx y su interrupcion
8  UCSR0B = (1<<RXEN0)|(0<<TXEN0)|(1<<RXCIE0);

9
10 // Seleccion de modo asincronico, con formato de trama 8N2
11 UCSR0C = (1<<USBS0)|(1<<UCSZ01)|(1<<UCSZ00);

12
13 /* — Lectura de un dato — */
14 // Se espera a que un dato sea recibido
15 while( !(UCSR0A & (1<<RXC0)) );
16
17 // Se saca el dato del buffer de recepcion
18 datoRecibido = UDR0;
```

### 3.2.5.2 Implementación

Para acceder al módulo se implementaron 2 funciones, una de inicialización y otra de lectura, como se muestra en la figura 3.6. De esta forma, el ejemplo resuelto mediante registros queda de la siguiente manera:

```

1  /* — Inicializacion del periferico — */
2  UART_init(funcion);
3  // "funcion" es la rutina a ejecutar durante la interrupcion
4
5  /* — Lectura de un dato — */
6  datoRecibido = UART_read();

```

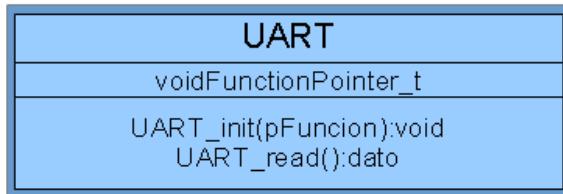


Figura 3.6: Diagrama del módulo UART

## 3.2.6 Tick

### 3.2.6.1 Frecuencia

La base de tiempo será de 1ms, equivalente a una frecuencia de 1KHz, ya que si bien la mayoría de las acciones del equipo serán lentas, la actualización del controlador probablemente será del orden de los milisegundos. En caso de necesitarse otra base de tiempo, más chica o más grande, se modificará este valor.

### 3.2.6.2 Manejo del periférico

Para implementar una base de tiempo como es el módulo Tick es necesario un Timer. El Atmega328p cuenta con 3 timers, de los cuales 1 (el timer 1) ya fue utilizado para el módulo PWM. Los restantes son el 0 y el 2, y ambos pueden generar una señal de 1KHz sin problemas y con mínimo error, por lo que se utilizará el Timer2.

Para generar la base de tiempo se utilizará el modo de comparación (CTC) del timer, seleccionable mediante el registro TCCR2A. En este modo un contador (TCNT2) aumenta hasta igualar un valor definido por el usuario (OCR2A). Cuando esto sucede se reinicia la cuenta y se genera una interrupción si el bit OCIE2A del registro TIMSK2 se

encuentra en 1.

La frecuencia se configura mediante los registros TCCR2B (seteo del prescalador) y OCR2A, siguiendo la ecuación 3.3. Como la frecuencia deseada es  $f_{tick} = 1KHz$  y la del microcontrolador es  $f_{cpu} = 16MHz$ , con un N = 128 se obtiene que OCR2A = 124.

$$OCR2A = \frac{f_{cpu}}{N.f_{tick}} \quad (3.3)$$

A continuación se presenta un ejemplo de inicialización del periférico con una frecuencia de 1KHz e interrupción habilitada, en lenguaje C.

```

1  /* —— Inicializacion del periferico —— */
2  // Configuracion para el modo CTC
3  TCCR2A |= (1 << WGM21);
4
5  // Seteo de la frecuencia a 1KHz
6  TCCR2B |= (1 << CS22) | (0 << CS21) | (1 << CS20); // N = 128
7  OCR2A = 124;
8
9  // Habilitacion de la interrupcion
10 TIMSK2 = (1 << OCIE2A);

```

### 3.2.6.3 Implementación

Durante la interrupción que se genera cuando TCNT2 iguala a OCR2A se incrementa la base de tiempo, contando cada milisecondo que transcurra. Además, con el objetivo de poder implementar un *planificador de tareas* en la capa de aplicación se podrá elegir ejecutar una función durante la interrupción.

Para acceder al módulo se implementaron 2 funciones, una de inicialización y otra de lectura, como se muestra en la figura 3.7.

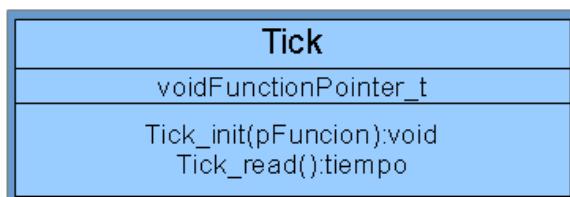


Figura 3.7: Diagrama del módulo Tick

### 3.2.7 SUART

#### 3.2.7.1 Análisis

La idea de una UART por software (SUART) es poder establecer una comunicación serie utilizando 2 pines cualesquiera del microcontrolador, sin hardware adicional como se tiene en el periférico UART. Hay muchas formas de lograr esto, desde polling periódico hasta el uso de múltiples interrupciones para lograr la comunicación con el menor consumo de CPU posible.

Este módulo implementará la SUART haciendo uso del timer 0, que es el único que queda disponible (el 1 genera PWM y el 2 la base de tiempo). La función del timer será generar interrupciones cada cierto tiempo y verificar el estado de los pines asociados a Rx (entrada) y Tx (salida).

Para saber cómo implementar la lógica de lectura y escritura de datos se analiza la forma de la señal en un bus serie. Un ejemplo puede ser la señal del carácter 'a' con formato 8N1, como se ve en la figura 3.8 .

Durante una comunicación serie el canal se encuentra en estado High (1) por defecto, hasta que se envía el bit de stop, que siempre es un estado Low (0). Luego se envían los datos, que en el caso de la 'a' sería 01100001 en binario, empezando por el bit menos significativo (LSB) hasta el más significativo (MSB), y finalmente el bit de stop, que siempre es un estado High (1).

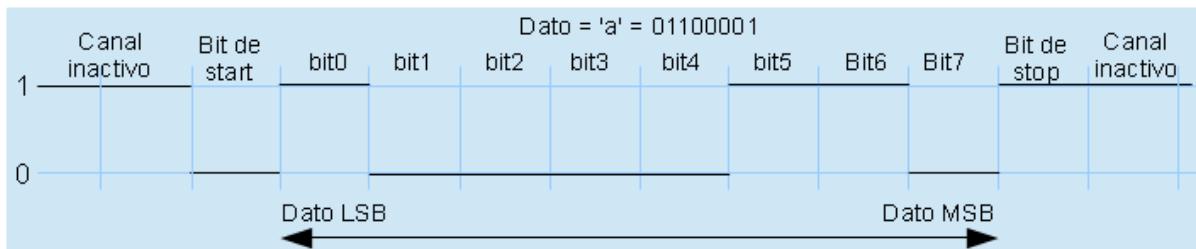


Figura 3.8: Forma de la señal en el canal para una 'p' con formato 8N1

En base a esto, para el envío de datos simplemente se cambia el estado del pin de Tx según el formato de la trama y del dato a enviar. Por ejemplo, si se quiere enviar una 'a', que equivale a 01100001, con una trama 8N1, se enviará 0 (bit de start), luego del bit menos al más significativo del dato (empiezo con 1, luego envío el 0.. etc) y finalmente 1 (bit de stop). Cada cambio de estado debe ocurrir a la tasa de símbolos (baudrate) deseada.

En cuanto a la entrada de datos lo que se hace es muestrear el pin de Rx cada cierto tiempo e ir reconstruyendo el dato. Este muestreo es conveniente realizarlo a la mitad del

tiempo de bit, debido a que se podrían llegar a detectar datos inválidos si la interrupción no se llega a ejecutar a tiempo.

Por defecto el canal se encuentra en 1, por lo que lo muestreo hasta detectar el bit de start (0). Luego de detectado este bit se suele volver a verificar el canal para asegurarse que sea un bit de start y no un error en la línea, error comúnmente conocido como *line glitch*. Luego de verificar que no hubo un error se muestrea el canal a la tasa de símbolos, y una vez recopilados los 8 bits de datos, se verifica que el último bit sea el de stop (1).

### 3.2.7.2 Implementación

La comunicación serie tendrá las siguientes características: formato de trama 8N1 (8 bit de datos, sin paridad, 1 bit de stop) y tasa de símbolos de 9600baudios. Se elige una tasa chica ya que las interrupciones del timer ocurrirán por lo menos 2 veces más rápido que esta tasa, y con interrupciones como la de DMX que tienen una frecuencia de 250Khz los recursos deben cuidarse.

Para la transmisión la tasa podría ser simplemente 9600 baudios, pero para la recepción se necesita una tasa de por lo menos el doble ya que se debe muestrear entre bits para detectar y evitar errores. Por lo tanto, se probó duplicando, triplicando y cuadruplicando la velocidad de muestreo.

Para decidir cuál es la tasa óptima se probó enviandole a la placa de control por puerto serie el carácter 'a' y replicando lo recibido hacia el transmisor. Para 10000 datos enviados los resultados fueron que con la tasa duplicada hubo una alta cantidad de información mal recibida, mientras que para la triplicada y cuadruplicada se recibieron 0 datos erroneos. Para decidir qué multiplicador utilizar se evaluó que el Atmega328p consumen 20 ciclos de clock solo para entrar en y salir de la interrupción, que equivale a  $1.25\mu s$  para una frecuencia de cpu de 16MHz. 9600 triplicado y cuadruplicado es 28800 y 38400, que equivalen a una interrupción cada  $34\mu s$  y  $26\mu s$ , respectivamente. O sea que cuanto mayor es el multiplicador más pesan los 20 ciclos comparativamente. Por lo tanto, como para ambos multiplicadores la cantidad de datos incorrectos recibidos es 0 de 10000, se eligió el multiplicador más chico, quedando la tasa de símbolos en 28800 baudios.

Para acceder al módulo se implementaron 3 funciones, una de inicialización, otra de lectura y otra de lectura, como se muestra en la figura 3.9. En la función de inicialización se indican los pines a utilizar como Rx y Tx, ya que la premisa es que estos pueden ser pines digitales cualesquiera.

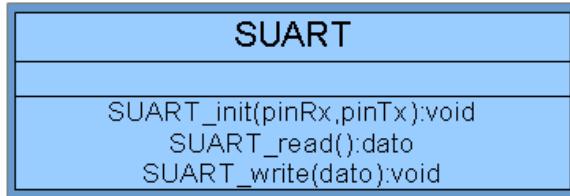


Figura 3.9: Diagrama del módulo SUART

### 3.3 Controlador

#### 3.3.1 Relación entre cuentas de encoder y distancia

##### 3.3.1.1 Pruebas y resultados

Como se mencionó en la sección 2.3, subsección 3, la distancia lineal recorrida por la carga varía según cuán enrollado está el cable en el carrete.

Para determinar la relación entre ambos se marcó el cable que sostiene la carga cada 25cm, tomando como 0 el cable completamente enrollado. Luego, a medida que se desenrollaba el cable se midió el valor de la cuenta de encoder del motor. Los resultados obtenidos se pueden encontrar en la tabla 3.2.

Distancia [cm]	0	25	50	75	100	125	150	175	200
Encoder	0	1130	2250	3430	4630	5830	7130	8400	9730
Distancia [cm]	225	250	275	300	325	350	375	400	
Encoder	11120	12530	14020	15530	17130	18770	20520	22330	

Tabla 3.2: Relación entre cuentas del encoder motor y distancia

##### 3.3.1.2 Selección de la función de ajuste

De la figura 3.10 se puede ver que la relación entre cuentas de encoder y distancia puede ser ajustada con un polinomio de grado 2 (función cuadrática). En dicha figura la función de ajuste cuadrática es  $cuentaEncoder = f(distancia) = 0.0356 * dist^2 + 41.0180 * dist + 101.2797$

. El problema de este método es que la conversión se implementa en un microcontrolador de 8 bits en donde la posición va de 0 a 500 (variable de 16 bits). Esto implica que para obtener las cuentas de encoder una variable de 16 bits, que eventualmente podría tener signo, debe ser potenciada al cuadrado, y luego multiplicada por un número racional, lo

cual implica operaciones de punto flotante o al menos divisiones. En la siguiente [nota de aplicación de ATMEL](#) se puede ver que dichas operaciones no están optimizadas, lo cual implicaría un altísimo costo computacional cada vez que se tenga que calcular la referencia de posición, que como DMX trabaja a 250KHz será muy seguido, haciendo la implementación de una función cuadrática inviable.

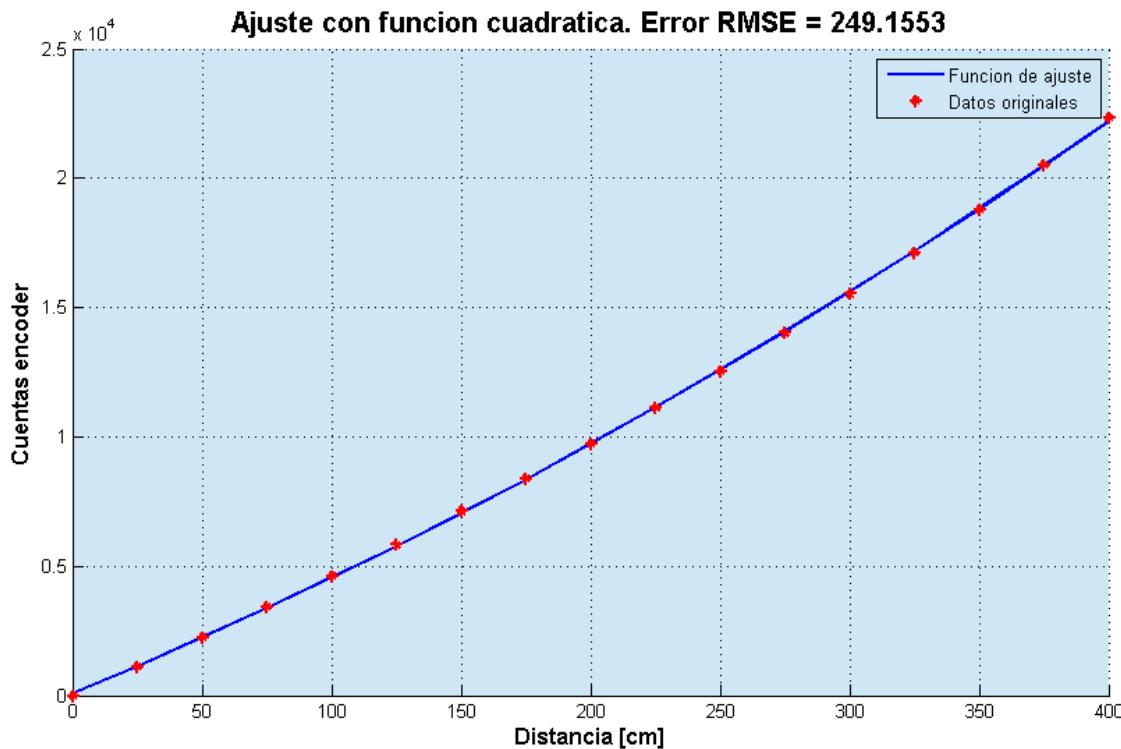


Figura 3.10: Ajuste mediante función cuadrática

La siguiente opción más simple es realizar la conversión mediante polinomios de grado 1. En este caso el costo computacional es mucho más bajo ya que la conversión implica únicamente la multiplicación con un escalar

Los casos extremos serían hacer el ajuste mediante una única recta, como se ve en la figura 3.11, o una recta cada 25cm, como se ve en la figura 3.12. En el primer caso el error es muy alto al ser la aproximación muy grosera, y en el segundo se tiene que se ajustan tanto los datos que también se está ajustando el ruido.

Una solución intermedia es ajustar los datos con una recta por cada 100cm (1 metro), como se ve en la figura 3.13. Esta trae como ventaja: error comparable con el del ajuste cuadrático, bajo costo computacional, solo se necesitan 4 mediciones por equipo (una por metro). Por estos motivos, **el ajuste de distancia a cuentas de encoder se realizará con 4 rectas**, una por metro.

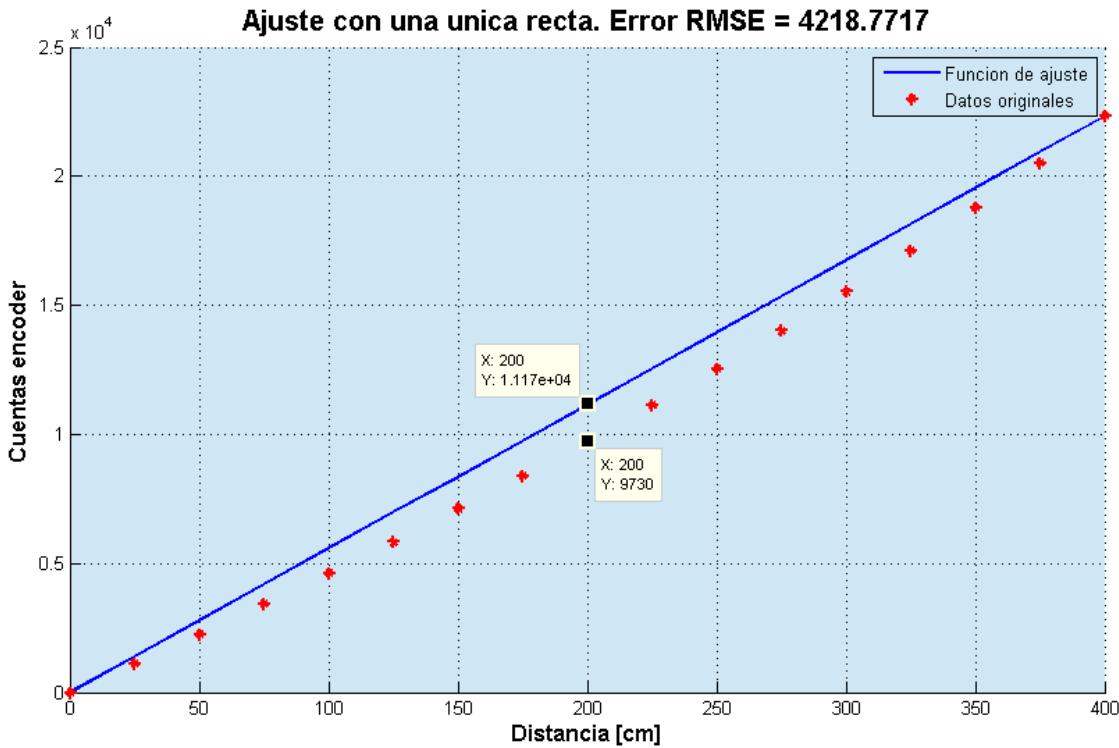


Figura 3.11: Ajuste mediante una única recta

Nota: todos los gráficos fueron obtenidos utilizando el script de Matlab *relacionEncoderDistancia.m*, adjuntado con este informe.

### 3.3.2 Determinación de la velocidad máxima

El método utilizado para determinar la velocidad máxima a la que el equipo puede funcionar es hacer subir una carga de 3Kg inyectándole al driver del motor un PWM de ciclo de trabajo de 100%. Es necesario que la prueba sea en subida y no en bajada ya que la máxima velocidad posible debe ser igual en ambos casos, y en bajada seguro necesito menos fuerza para alcanzar la máxima velocidad en subida, por lo que la limitante es la segunda.

Luego, se mide cada cierto tiempo, que en este caso será de 50ms, cuantas cuentas del encoder del motor se tienen, y se calcula la velocidad como  $velocidad = \Delta posicion / \Delta tiempo$ .

Del experimento se obtuvo que cada 50ms se tienen 100cuentas, por lo que la velocidad máxima es  $vel = 2cuentas/ms$ .

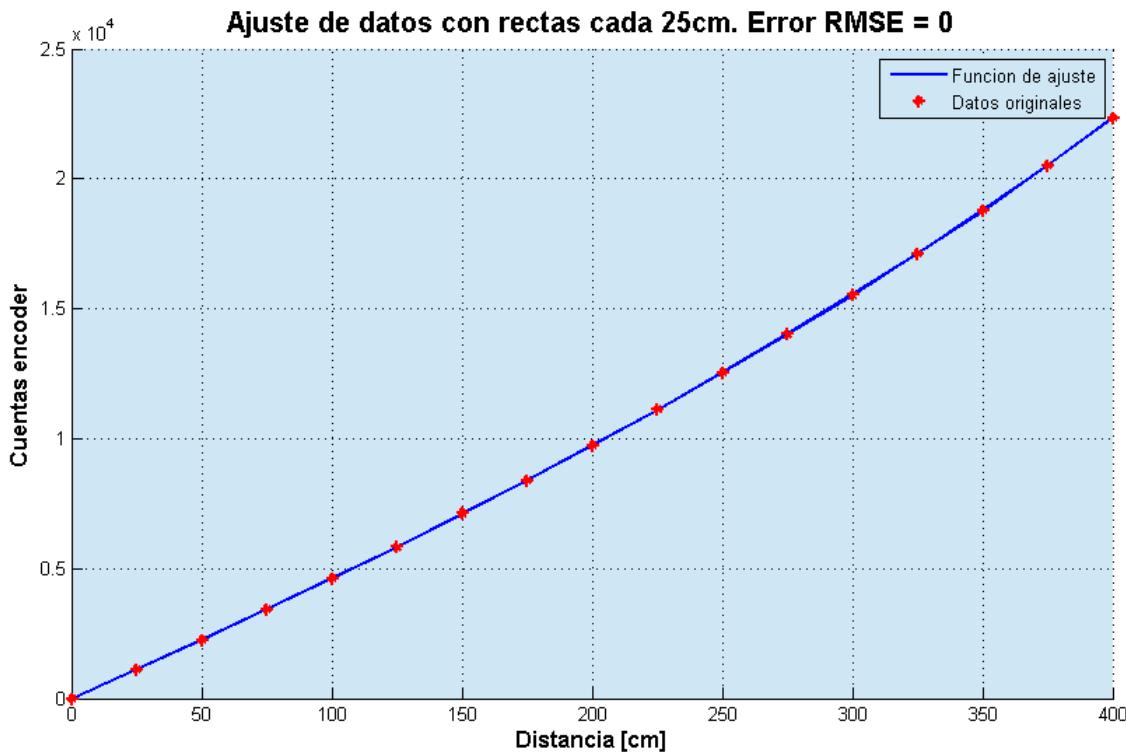


Figura 3.12: Ajuste mediante una recta cada 25cm

### 3.3.3 Obtención del período de muestreo

Para poder diseñar los controladores de posición y velocidad el primer paso es determinar el período de muestreo.

Para esto se realizaron varias pruebas tomando como 0 de posición 2000 cuentas de encoder (aproximadamente 50cm según la tabla 3.2): 2 pruebas en bajada, en donde las cuentas aumentan ya que el positivo se define para abajo, y 2 pruebas en subida. La fuerza aplicada al motor es de 15 y 33% del máximo de fuerza posible en bajada, y de 66 y 100% en subida.

Los resultados de estas pruebas se pueden ver en las figuras 3.14 y 3.15. Allí se ve que durante la bajada la salida se estabiliza a los 250ms, mientras que para la subida lo hace a los 50ms. Esto genera un problema, ya que el período de muestreo suele tomarse de 5 a 10 veces más rápido que el tiempo de establecimiento del sistema, y aquí tenemos 2 tiempos distintos.

Como la solución no es directa se probarán distintos períodos de muestreo durante la caracterización de la planta y diseño del controlador para determinar cuál es el indicado.

Nota: todos los gráficos fueron obtenidos utilizando el script de Matlab *graficos1entrada.m*,

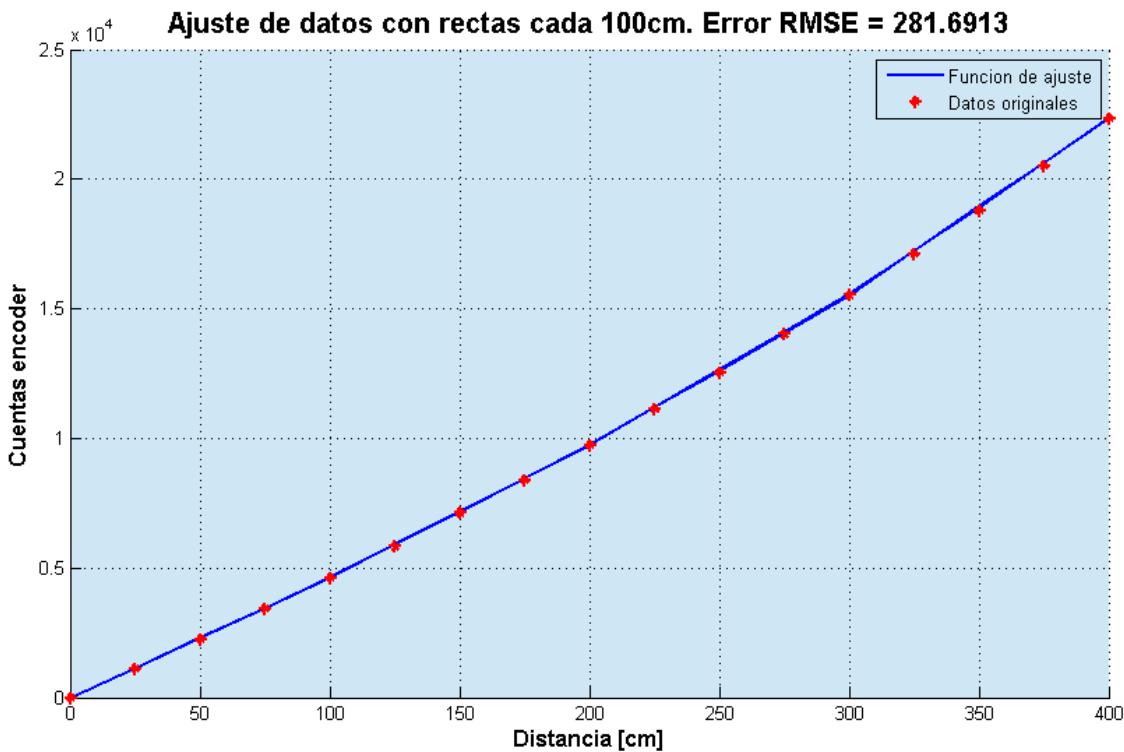


Figura 3.13: Ajuste mediante una recta cada 100cm

adjuntado con este informe.

### 3.3.4 Obtención del modelo de la planta

#### 3.3.4.1 Toma de muestras

El modelo de la planta a obtener tiene que ser tal que su salida sea de velocidad para poder diseñar el lazo de control interno de velocidad del modelo propuesto en la figura 2.1.

Para obtener este modelo se le inyecta al equipo la entrada mostrada en la figura 3.16, en donde la fuerza es positiva cuando el motor hace bajar la carga y negativa cuando la hace subir. La carga del equipo es de 3Kg

De esta entrada se midió la velocidad de salida en 2 pruebas separadas con el fin de obtener un set de datos para identificación y otro para validación. Estas respuestas se muestran en la figura 3.17.

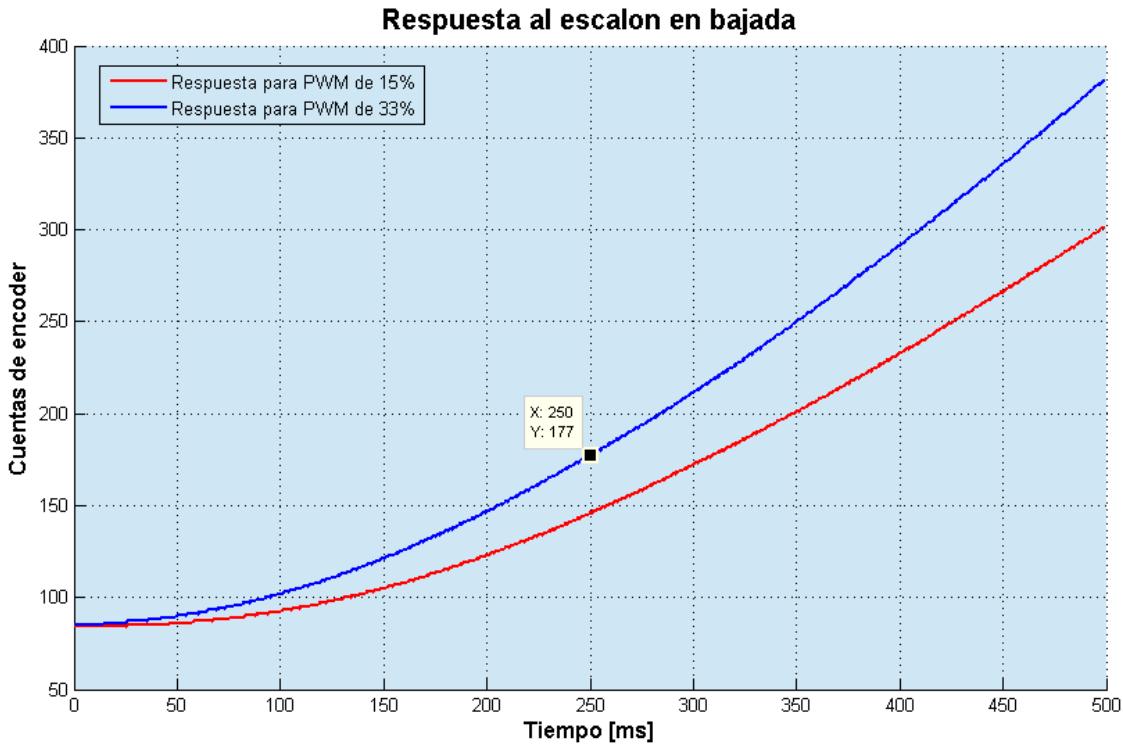


Figura 3.14: Respuestas del sistema en bajada

### 3.3.4.2 Modelos propuestos

Para realizar la identificación de la planta se propusieron 12 modelos discretos de la forma  $v(k) = \theta \cdot \phi(k)^T$ :

- Modelo 1:  $y(k) = -a1 * y(k-1) + b1 * u(k-1) = [-a1, b1] * [y(k-1), u(k-1)]^T = \theta \cdot \phi(k)^T$
- Modelo 2:  $y(k) = -a1 * y(k-1) + b1 * u(k-1) + c$
- Modelo 3:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) + b1 * u(k-1)$
- Modelo 4:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) + b1 * u(k-1) + c$
- Modelo 5:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) + b1 * u(k-1) + b2 * u(k-2)$
- Modelo 6:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) + b1 * u(k-1) + b2 * u(k-2) + c$
- Modelo 7:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) - a3 * y(k-3) + b1 * u(k-1)$
- Modelo 8:  $y(k) = -a1 * y(k-1) - a2 * y(k-2) - a3 * y(k-3) + b1 * u(k-1) + c$

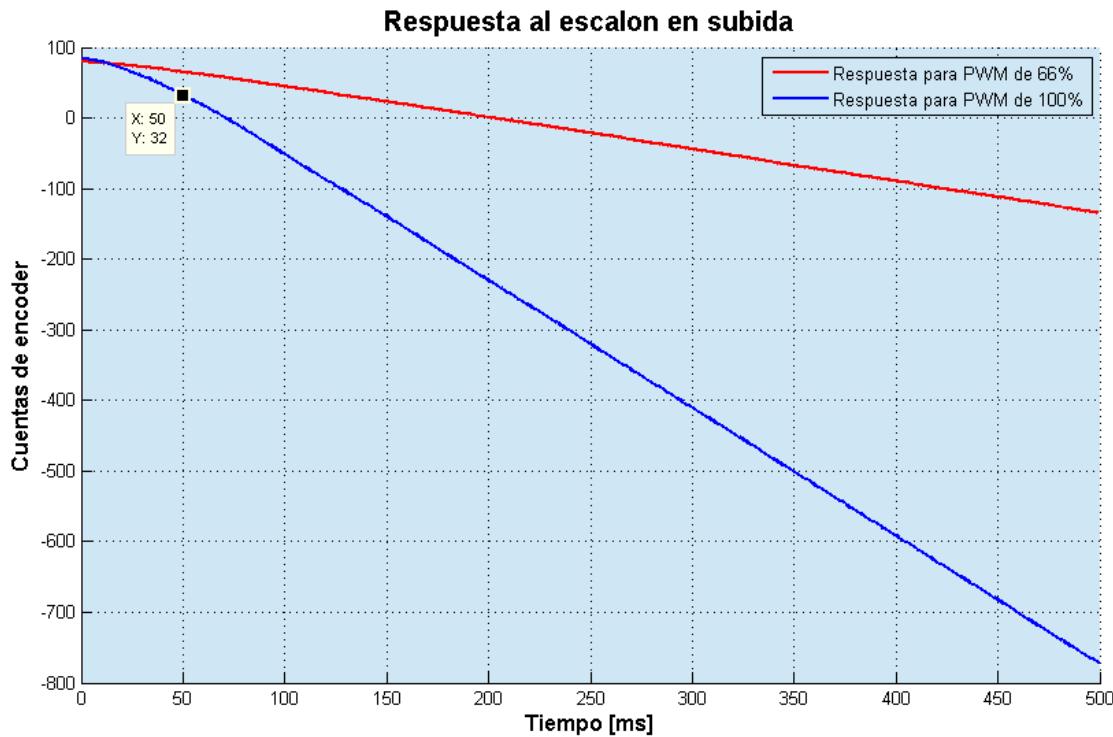


Figura 3.15: Respuestas del sistema en subida

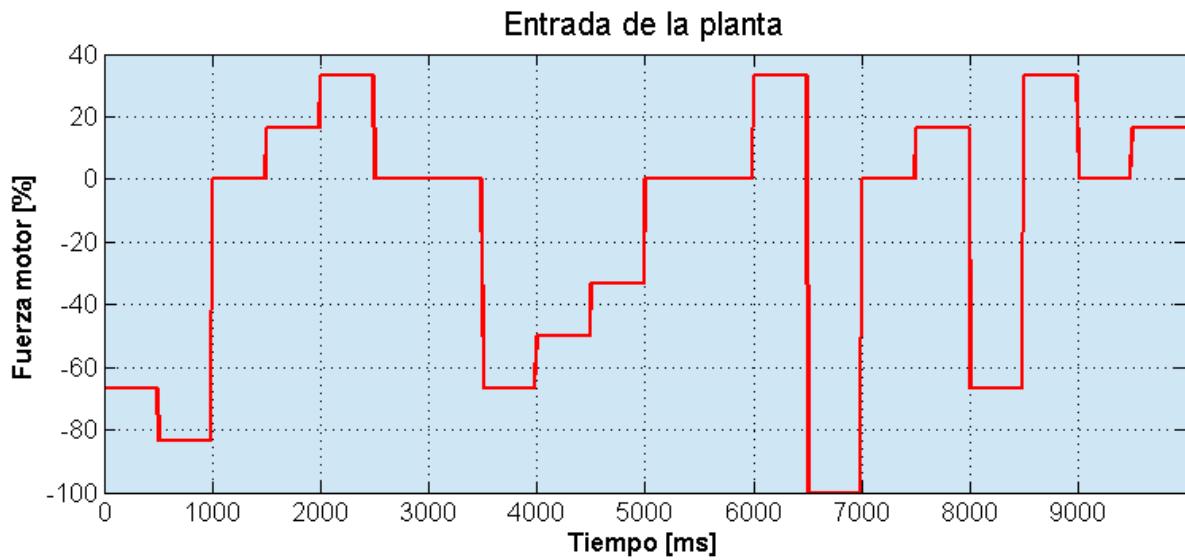


Figura 3.16: Entrada del sistema para la identificación de parámetros

- Modelo 9:  $y(k) = -a1*y(k-1) - a2*y(k-2) - a3*y(k-3) + b1*u(k-1) + b2*u(k-2)$
- Modelo 10:  $y(k) = -a1 * y(k - 1) - a2 * y(k - 2) - a3 * y(k - 3) + b1 * u(k - 1) +$

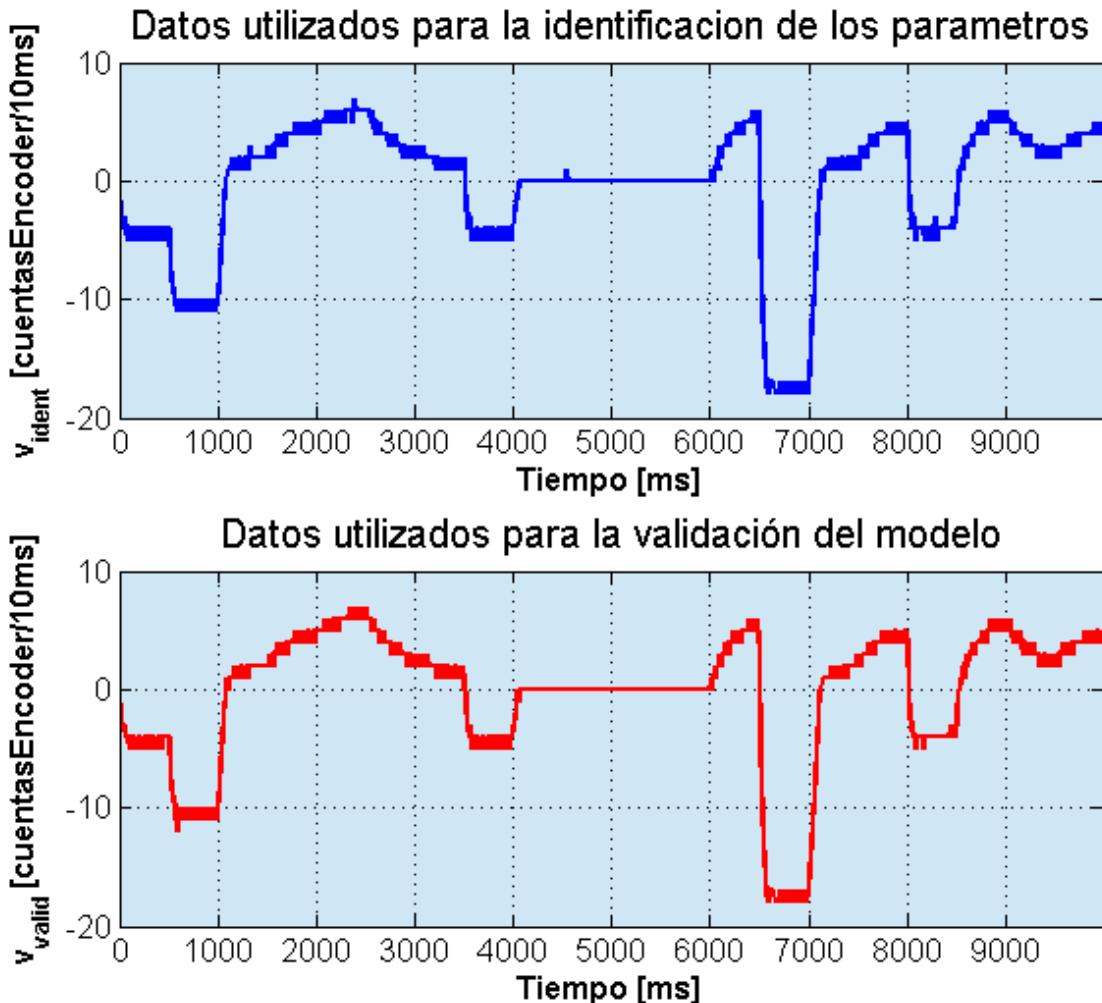


Figura 3.17: Salida de velocidad del sistema

$$b2 * u(k - 2) + c$$

- Modelo 11:  $y(k) = -a1 * y(k - 1) - a2 * y(k - 2) - a3 * y(k - 3) + b1 * u(k - 1) + b2 * u(k - 2) + b3 * u(k - 3)$
- Modelo 12:  $y(k) = -a1 * y(k - 1) - a2 * y(k - 2) - a3 * y(k - 3) + b1 * u(k - 1) + b2 * u(k - 2) + b3 * u(k - 3) + c$

### 3.3.4.3 Determinación de parámetros

La forma de determinar los parámetros es mediante un método de estimación de tipo offline basado en el principio de mínimos cuadrados tal que minimiza el funcional de error cuadrático  $J = (\|\varepsilon\|^2)$ . La solución al problema de mínimos cuadrados que minimiza el

funcional J es la ecuación 3.4, en donde V y  $\Phi$  se construyen con las  $v(k)$  y  $\phi(k)$  de los modelos discretos propuestos.

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot V \quad (3.4)$$

$$V = [v(1), v(2), \dots, v(\text{cantMuestras})]^T$$

$$\Phi = [\phi(1), \phi(2), \dots, \phi(\text{cantMuestras})]^T$$

Con esta ecuación se obtuvieron los siguientes resultados de la tabla 3.3

Modelo	a1	a2	a3	b1	b2	b3	c
1	-0.9383	0	0	0.0028	0	0	0
2	-0.9183	0	0	0.0039	0	0	0.1643
3	-0.7233	-0.2289	0	0.0021	0	0	0
4	-0.6938	-0.2399	0	0.0032	0	0	0.1376
5	-0.6540	-0.2980	0	0.0118	-0.0094	0	0
6	-0.6201	-0.3115	0	0.0120	-0.0085	0	0.1520
7	-0.8079	-0.3914	0.2296	0.0011	0	0	0
8	-0.7946	-0.3851	0.2207	0.0017	0	0	0.0751
9	-0.7257	-0.4101	0.1701	0.0069	-0.0055	0	0
10	-0.7038	-0.4031	0.1551	0.0073	-0.0051	0	0.0964
11	-0.6485	-0.4890	0.1710	0.0122	-0.0043	-0.0062	0
12	-0.6230	-0.4819	0.1541	0.0123	-0.0040	-0.0057	0.1090

Tabla 3.3: Parámetros obtenidos para los 12 modelos propuestos

#### 3.3.4.4 Validación de los modelos

Para validar los modelos se utiliza el set de datos de validación (figura 3.17). Simplemente se calcula iterando la salida del sistema utilizando los parámetros encontrados y se contrastan los resultados con este set de datos. Para medir el grado de relación entre los datos obtenidos con los modelos propuestos y los de validación se calcular el error RMSE para cada caso, resultados que se pueden ver en la tabla 3.4.

Modelo	Error RMSE
1	3.6939
2	2.945
3	4.2602
4	3.452
5	4.0055
6	3.1642
7	4.461
8	3.8115
9	4.1403
10	3.4381
11	3.8415
12	3.084

Tabla 3.4: Error RMSE para los 12 modelos propuestos

### 3.3.4.5 Análisis de resultados

De los resultados se puede ver que el error RMSE es muy grande, ya que la señal real del sistema toma amplitudes de como mucho 20, y el error es de por lo menos 3, un 15% de error (aprox). Esto que indica que la identificación no fue buena, por lo que no es recomendable diseñar los controladores basandose en los datos obtenidos.

Un ejemplo gráfico se puede ver en la figura 3.18 en donde se contrastan la salida predicha con los parámetros identificados para el modelo 2 (que es el que menor error RMSE tuvo), con los datos de validación.

## 3.3.5 Obtención del controlador

### 3.3.5.1 Análisis

Como la planta identificada no se ajusta al modelo diseñar los controladores basado en ella no tiene mucho sentido. Como se mencionó en la sección 2.3, subsección 1, el controlador debe ser lo más simple posible, así que propondrán controladores estándar (PID) y se ajustarán empíricamente mediante prueba y error.

También es importante recordar que el Atmega328p no tiene optimizadas las operaciones de punto flotante, por lo que cualquier multiplicación por números no enteros tendrá que ser aproximada. En el caso de las divisiones se hará mediante la operación corrimiento (bit shift). Esto tiene como ventaja que se reduce mucho el uso del CPU, pero se pierde resolución y cambiar el código se hace complicado.

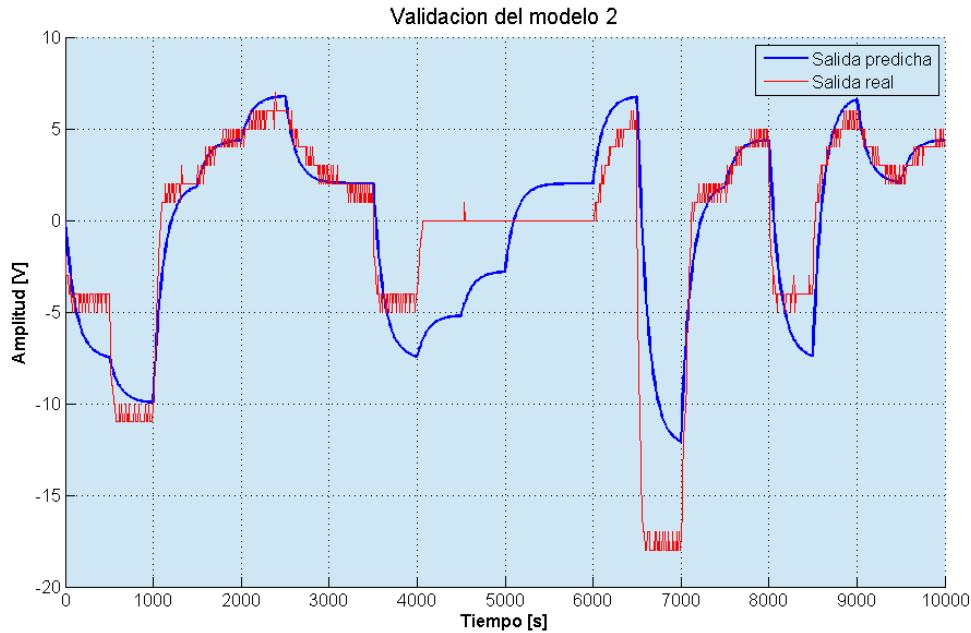


Figura 3.18: Comparación entre datos predichos con el modelo 2 y los datos reales

En cuanto al período de muestreo, se comenzará con un valor de 50ms y se ajustará dependiendo los resultados que se vayan obteniendo.

### 3.3.5.2 Controlador de velocidad

Basándose en la figura 2.1, el controlador de velocidad tiene como entrada el error de velocidad y como salida el ciclo de trabajo del pwm que irá al motor. Si bien el ciclo de trabajo no puede ser negativo, a términos prácticos un valor negativo indicaría que el motor sube la carga y uno positivo que la baja.

El rango de la variable de entrada es de  $\pm 20$ , siendo  $+20$  velocidad de descenso y  $-20$  de ascenso, como se vió en la sección 3.3 subsección 2, en donde se determinó la velocidad máxima. Por otro lado, el valor de la salida puede ser cualquiera, no necesariamente  $\pm 100\%$  por ser un ciclo de trabajo, pero estará acotado por el limitador.

Basándose en esta información y en el esquema de control planteado en la sección 2.3 subsección 1, se propone como controlador de velocidad inicial la siguiente ecuación en diferencias:

$$u\_Cv[k] = u\_Cv[k - 1] + (ev[k] \gg 1) - (ev[k] \gg 2)$$

Donde  $u[k]$  es la salida del controlador,  $ev[k]$  el error de velocidad, y " $x \gg n$ " es el

operador corrimiento, que equivale a  $\text{floor}(x/2^n)$ .

### 3.3.5.3 Controlador de posición

Basándose en la figura 2.1, el controlador de posición tiene como entrada el error de posición y como salida la referencia de velocidad.

El error de posición está relacionada con las cuentas del encoder del motor, por lo que su rango es de aproximadamente  $\pm 20000$  (basándose en la tabla 3.2). Por otro lado, el valor de la salida puede ser cualquiera, no necesariamente  $\pm 20$  por ser la velocidad máxima permitida, pero estará acotado por el limitador según lo que indique la referencia dada por DMX.

Basándose en esta información y en el esquema de control planteado en la sección 2.3 subsección 1, se propone como controlador de posición inicial la siguiente ecuación en diferencias:

$$\text{rv\_Cp}[k] = (\text{ep}[k] >> 4)$$

Donde  $\zeta(\text{rv\_Cp}[k])$  es la salida del controlador,  $\text{ep}[k]$  el error de posición, y " $x \gg n$ " es el operador corrimiento, que equivale a  $\text{floor}(x/2^n)$ .

### 3.3.6 Ajuste de los controladores

#### 3.3.6.1 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales para el sistema de control son un controlador de posición con la forma  $\text{rv\_Cp}[k] = \text{ep}[k] >> 4$ , un controlador de velocidad con la forma  $\text{u\_Cv}[k] = \text{u\_Cv}[k - 1] + (\text{ev}[k] >> 1) - (\text{ev}[k] >> 2)$ , y un período de muestreo  $T = 50\text{ms}$ .

Como el objetivo es calibrar el controlador de velocidad, se mide su entrada (solamente la velocidad) y su salida (ciclo de trabajo del pwm después del limitador).

Para obtener estos datos se setea manualmente la referencias de velocidad en  $40\% = 40\text{cuentas}/50\text{ms}$  ( $100\% = 2\text{cuentas}/\text{ms}$ ) y la de posición que alterne entre 0 y 1 metro, cambiando apenas se alcance una. La carga utilizada tiene un peso de 3Kg.

Bajo estas condiciones se obtiene la respuesta de la figura 3.19, en donde se ve que la velocidad de la carga nunca llega a estabilizarse. Esto sucede en parte porque el período de muestreo no ayuda a estabilizar el sistema, por lo que .

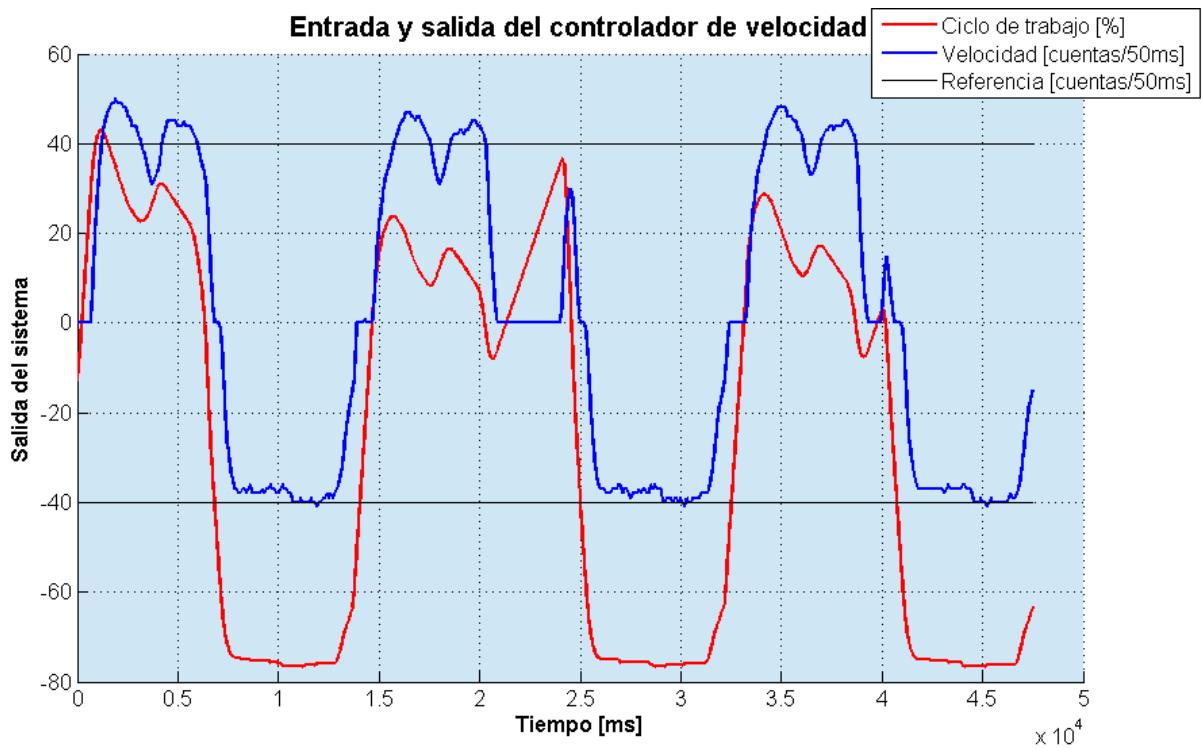


Figura 3.19: Resultados para el controlador de velocidad inicial

### 3.3.6.2 Ajuste del controlador de velocidad

Luego de varios procesos de ajuste del período de muestreo y controlador de velocidad se alcanzó una combinación cuyo desempeño es aceptable: un período de muestreo de 20ms y un controlador de velocidad de la forma  $u\_Cv[k] = u\_Cv[k - 1] + (ev[k] \gg 1)$ .

Para verificar esta nueva configuración se efectúa nuevamente la prueba con la referencia de velocidad al 40% y la de posición que alterna entre 0 y 1 metro. En este caso, sin embargo, se realizó la prueba con 2 equipos distintos, ambos con una carga de 3Kg. La respuesta del equipo 1 y 2 se presentan en las figuras 3.20 y 3.21, en donde se puede ver que ahora la referencia de velocidad se sigue exitosamente y de manera similar para ambos equipos, y que la salida del controlador no es tan errática.

### 3.3.6.3 Ajuste del controlador de posición

Una vez ajustado el controlador de velocidad se pasa a ajustar el de posición. Igual que en los casos anteriores se realiza una prueba con una referencia de velocidad del 40%, y una de posición que alterna entre 0 y 1 metro (que equivale a aproximadamente 4600 cuentas según la tabla 3.2). La diferencia en este caso es que se pasa a analizar la entrada

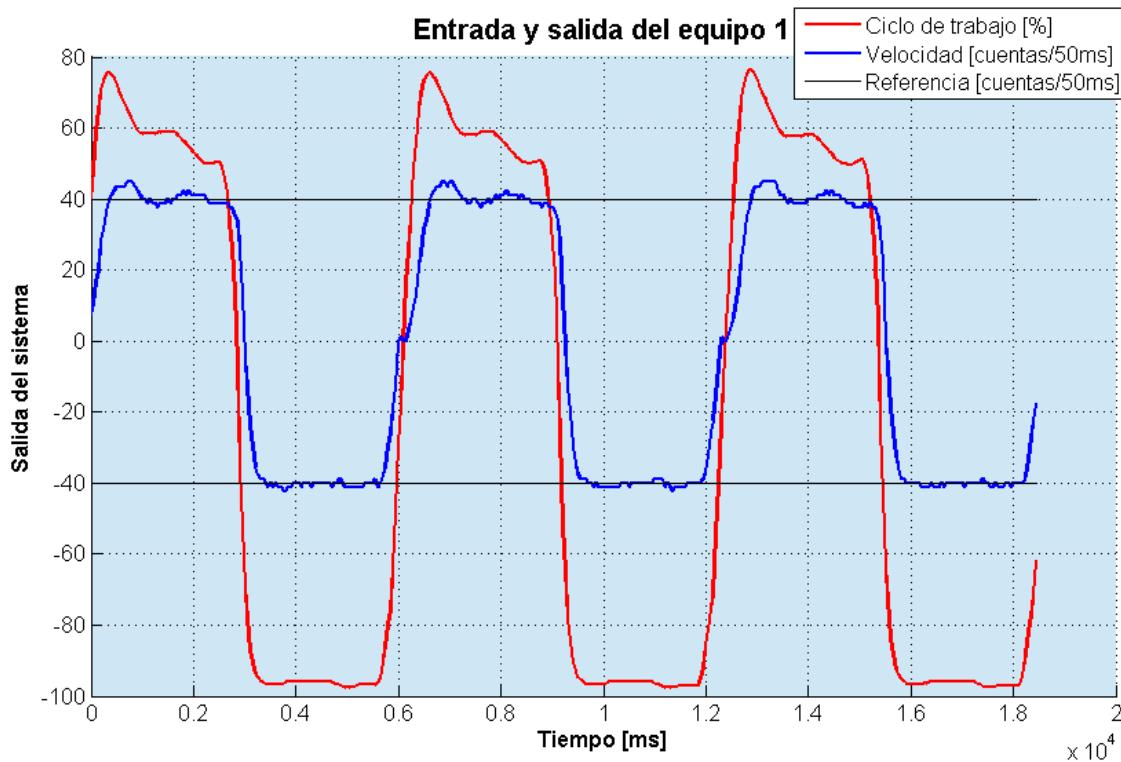


Figura 3.20: Resultados del equipo 1 para el controlador de velocidad final

(posición únicamente) y salida (referencia de velocidad rv) del controlador de posición.

Los resultados de esta prueba, conservando el controlador de posición inicial y utilizando el de velocidad y ciclo de trabajo ajustados, se pueden ver en la figura 3.22. Allí se observa que el controlador necesita un poco menos de ganancia para eliminar el sobre error.

Luego de varios procesos de ajuste del controlador se encontró que el siguiente controlador  $rv\_Cp[k] = (ep[k] \gg 4) - (ep[k] \gg 5)$  mejora el rendimiento del sistema, como se ve en la figura 3.23

### 3.3.6.4 Sistema de control final

En conclusión, el sistema de control consta de:

- Período de muestreo:  $T = 20\text{ms}$
- Controlador de velocidad:  $u\_Cv[k] = u\_Cv[k - 1] + (ev[k] \gg 1)$
- Controlador de posición:  $rv\_Cp[k] = (ep[k] \gg 4) - (ep[k] \gg 5)$

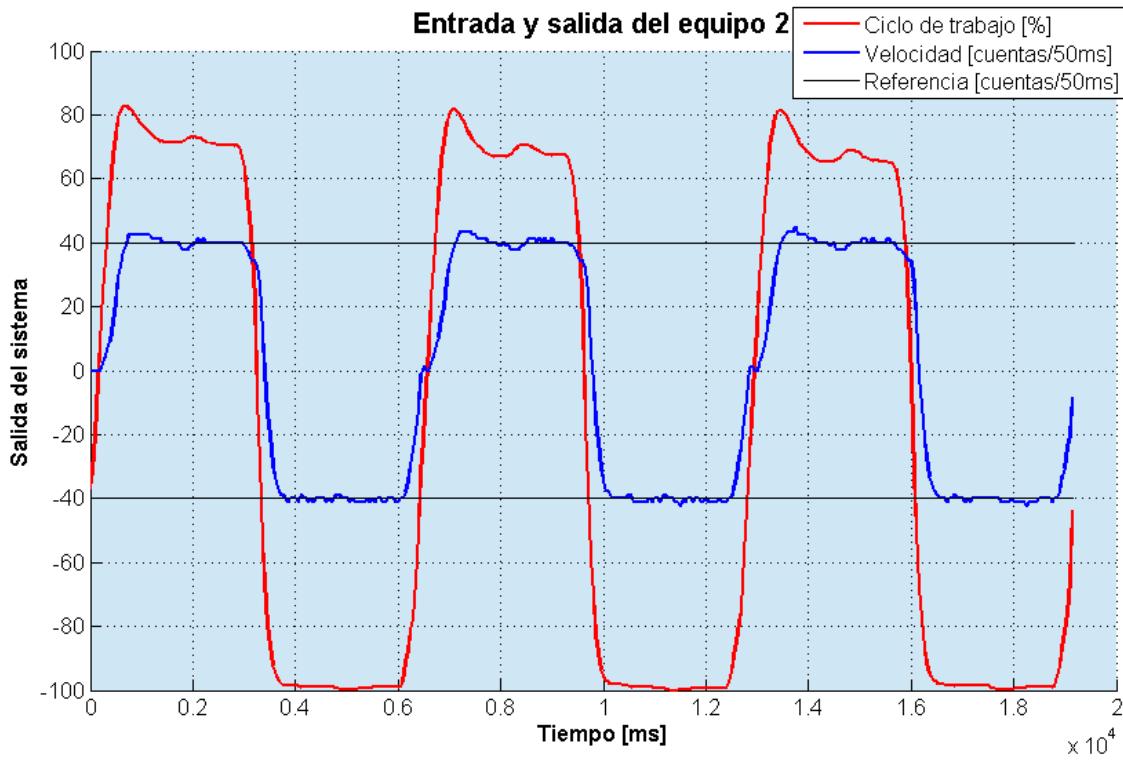


Figura 3.21: Resultados del equipo 2 para el controlador de velocidad final

### 3.4 Dipswitch

Como se mencionó en la sección 2.5, la obtención de los valores del dipswitch se hace mediante una simulación en Matlab.

El procedimiento para determinar una posible combinación de R1, R2, R3, R4 y R (ver figura 2.3) es el siguiente: se propone un valor para cada resistencia y se calcula la caída de tensión en la resistencia R, que llamaremos Vo, para cada combinación de R1, R2, R3 y R4. Como son 4 resistencias hay 16 posibles combinaciones, por lo que se obtendrán 16 valores de Vo.

Ahora, lo importante es encontrar R1, R2, R3, R4 y R tales que los 16 valores de Vo encontrados sean distintas y estén lo más separados posibles

Como el método propuesto es de prueba y error se establece una diferencia mínima que todas las Vo deben tener entre sí. Como el canal analógico del microcontrolador tiene una resolución de 10 bits (1024) y el rango de tensión de entrada va de 0 a 5V el paso más chico que puede medir el ADC es de  $5V/1024 \approx 5mV$ . Entonces, se elige como diferencia mínima 10 unidades del ADC, que equivalen a aproximadamente 50mV.

Utilizando el script de Matlab "calculoresistenciasDip.m", adjuntado junto a este docu-

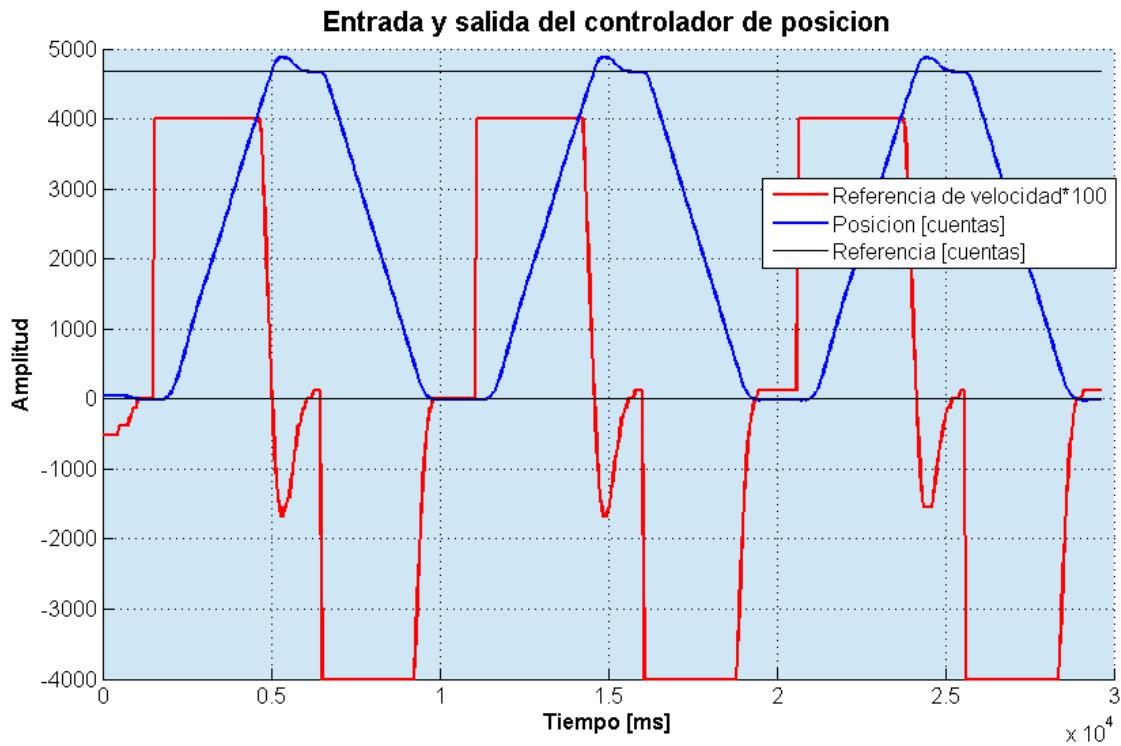


Figura 3.22: Resultados para el controlador de posición inicial

mento, se encontró que la combinación de resistencias  $R_1=10K\Omega$ ,  $R_2=4,7K\Omega$ ,  $R_3=2,2K\Omega$ ,  $R_4=1K\Omega$  y  $R_m=K\Omega$  la mínima diferencia entre todas las  $V_o$  es de 67mV, que supera el mínimo aceptable.

## 3.5 Firmware del updown - Librerías de alto nivel

### 3.5.1 Encoder

Por como están conectado los componentes electrónicos en la placa de control, el encoder del motor está asociado a las EXINT y el encoder del disco a las PCINT.

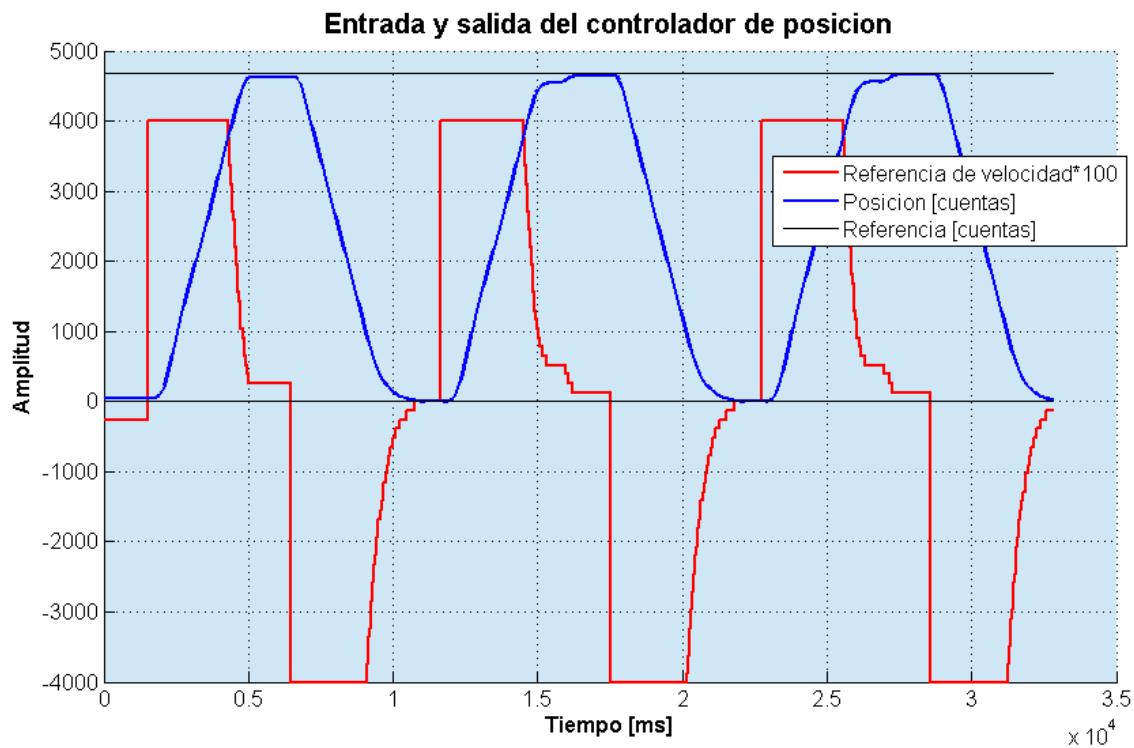


Figura 3.23: Resultados para el controlador de posición final

### 3.5.2 DMX

### 3.5.3 Grua

### 3.5.4 Controlador

### 3.5.5 Dipswitch

## 3.6 Firmware del updown - Función principal

# **Implementación**

## **4.1 Descripción del capítulo**

En este capítulo se pondrá a prueba todo lo desarrollado en el capítulo anterior. Para esto se describirán los pasos que se hicieron para hacer las pruebas y cómo se validaron.

## **4.2 Configuración de la HOG**

## **4.3 Validación**

# Conclusiones

5.1 c1