

2 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA

2.1 INTRODUCCIÓN

El sistema que ha sido objeto de este proyecto consiste, básicamente, en un elevador neumático en el cual la variable a controlar es la altura que alcanza una plataforma impulsada por la corriente ascendente de aire que genera un ventilador y cuya potencia se ajusta mediante una señal digital que es la variable de control.

El sistema se puede dividir en las siguientes partes, que se describirán con mayor detalle en la secciones posteriores de este capítulo.

2.1.1 El sistema físico

Denominamos así a la parte del sistema que abarca el proceso físico que pretendemos modelar y controlar, sin incluir sensores, actuadores o controladores. Es decir, es la parte del sistema sobre la cual va a actuar la señal de control, provocando un resultado que se reflejará en la lectura del sensor.

Físicamente se trata de un cilindro, cuyas paredes laterales son de plástico. En la cara inferior se encuentra un ventilador que al girar proyecta dentro del cilindro una corriente de aire ascendente. En el interior del cilindro existe una plataforma circular de cartón y plástico atravesada en su centro por el eje vertical del cilindro de manera que sólo posee un grado de libertad, pues sólo puede desplazarse en la dirección vertical siguiendo dicho eje.

La altura de la plataforma será la variable a controlar de este proceso.

En función de la presión ejercida sobre la superficie de la plataforma por la corriente de aire que procede del ventilador, dicha plataforma se elevará hasta una cierta altura dentro del cilindro, hasta alcanzar una posición de equilibrio, en el momento que el peso del disco compense la presión ejercida sobre la cara inferior de la plataforma por la corriente de aire que genera el ventilador.

Dado que el cilindro tiene unas dimensiones, naturalmente finitas, existirán dos alturas límite para la posición de la plataforma que vendrán definidas por la altura del cilindro. En particular el límite inferior servirá de cero para la escala de altura en que se medirá la posición de la plataforma. En el apartado relativo al sistema físico de este capítulo se acompañan todos los datos relativos a las dimensiones de cada uno de los elementos constituyentes del sistema así como de las unidades que se utilizan, y que serán habitualmente las del S.I.

Todo el conjunto de cilindro y ventilador está sujeto y contenido en un prisma de base cuadrada de grandes dimensiones, que actúa a la vez de soporte y de protección y a la cual llamaremos carcasa. La sujeción del cilindro se hace mediante fijaciones metálicas a los travesaños de madera que forman parte de la carcasa.

Además dicha carcasa posee ruedas para facilitar el desplazamiento del sistema, dado que su tamaño y su peso son bastante elevados.

El plástico, que hace el papel de pared del cilindro, tiene el fin de confinar en el interior de éste el aire inyectado por el ventilador para que se pueda producir suficiente presión como para levantar la plataforma, especialmente cuando ésta está en una posición elevada y alejada del ventilador, que está situado en la base inferior.

Sin embargo, la pared lateral no forma una superficie cerrada sino que está abierta a lo largo de toda una franja vertical, cuyo grosor se puede regular mediante unos batientes de madera que sujetan el plástico a cada uno de los lados. Esta abertura es necesaria para que pueda sobresalir en todas las alturas un apéndice sujeto a la plataforma que es obligatorio para que el sensor pueda medir la posición de dicha

plataforma. La necesidad de este apéndice se discutirá en el apartado relativo al sensor de la altura.

En la base superior del cilindro existe otro ventilador, que en este proyecto permanece sin alimentación siempre, y que sirve de soporte al cilindro y a la barra que está en el eje del cilindro y que además permite la salida del aire del cilindro por la parte superior.

2.1.2 El sensor de altura

Para poder medir la altura que alcanza la plataforma se dispone de un sensor de posición que permite obtener una estimación de la altura a la que está la plataforma, tomando como altura nula aquella al mismo nivel que el ventilador.

El sensor del que se dispone es un sensor de tiempo de vuelo, que realiza el proceso de medida mediante ultrasonidos. Se trata de un sensor que estima la distancia del objeto al sensor, utilizando para ello una onda sónica de alta frecuencia.

Este sensor se basa en el mismo principio que todos los sensores basados en el método del tiempo de vuelo. El sensor emite una onda, y espera a recibir el rebote de esa onda en el objeto del cual se pretende medir su distancia al sensor. En función del tiempo que tarda la onda en llegar al objeto, rebotar y volver al sensor se realiza una estimación de la distancia que separa al sensor del objeto.

Las ventajas y desventajas que presenta este método se discutirán posteriormente en un estudio pormenorizado del sensor, en otra sección de la memoria.

Otro aspecto del sensor es que presenta diversas características que obligan a realizar un procesado sobre la señal obtenida.

La primera característica es que la salida del sensor es una señal en corriente, de 4 a 20 mA y dado que, como se verá, la tarjeta captadora de datos mide en voltios, es necesario un circuito adicional que transforme la señal de corriente a una señal en voltios que sea proporcional a la señal de corriente.

Este circuito es muy sencillo y se describe en el apartado correspondiente a elementos del sistema.

La segunda característica es el ruido que añade el sensor a las medidas. Para eliminarlo, en la medida de lo posible, es necesario realizar un filtrado de la señal.

La tercera característica es la respuesta frecuencial limitada del sensor, que será de importancia sólo si puede motivar que los datos sobre la altura de la plataforma se vean falseados por la incapacidad del sensor de responder adecuadamente a los cambios.

La cuarta característica es la no linealidad que presenta el sensor, que sin ser muy acusada, puede significar una desviación significativa entre los datos reales y los derivados de una extrapolación que suponga que el sensor es lineal. Para remediar esto se procesará la señal a través de una función de transferencia estática inversa a la que presenta el sensor, de tal manera que el conjunto de las dos funciones de transferencia en cascada sea lineal.

Todas estas características se estudiarán y analizarán en profundidad en el apartado dedicado al sensor.

2.1.3 La tarjeta de entrada/salida

Tanto para que el ordenador pueda leer la señal procedente del sensor como para que el ordenador pueda enviar al ventilador la señal de control correspondiente, es imprescindible una tarjeta de entrada-salida (E/S) que sirva de interfaz.

La tarjeta de entrada-salida se encarga de muestrear la señal de entrada, es decir, la procedente del sensor, cada vez que el ordenador se lo mande, lo cual debe ser al principio de cada período de muestreo. Esto implica una conversión de analógico a digital, dado que el ordenador usa señales digitales, y la señal que proporciona el sensor es analógica. Es la propia tarjeta E/S la que se encarga de realizar la conversión y enviar al ordenador la señal digital a través de los pines que correspondan del puerto paralelo.

Asimismo, la tarjeta de E/S es la encargada de mantener, en los terminales adecuados del puerto paralelo, la señal analógica que sirve de referencia al elemento modulador para regular la potencia del ventilador. De este elemento modulador se hablará más adelante. En este caso existe una conversión de digital a analógico de la que también se ocupa la tarjeta, usando un mantenedor de orden cero.

Hay que señalar que la conexión entre la salida de la tarjeta que convierte la señal del sensor de corriente a voltaje y los terminales de la tarjeta no es directa, sino que entre la salida del circuito convertidor de intensidad a tensión y la entrada de la tarjeta de E/S existe una tarjeta divisora de tensión, que reduce el nivel de señal en un factor de algo más de tres (3.18 exactamente).

Esta tarjeta divisora es necesaria para conseguir que los niveles de tensión que lea la tarjeta estén dentro de los que puede leer, que están en un rango de -5 a 5 voltios. Como la salida máxima del sensor, una vez transformada de corriente a voltaje, es de 6.8 voltios es obligado introducir el divisor de tensión, que al dividir por 3.18 da una salida máxima de 2.2 voltios a la entrada de la tarjeta, lo que entra dentro de los niveles de tensión en los que trabaja la tarjeta.

En el apartado de elementos del sistema se precisa cómo es el circuito divisor.

2.1.4 El ordenador y el software

El ordenador se encarga de esperar el período de muestreo. Al principio de cada período ordena a la tarjeta E/S muestrear la señal del sensor. Cuando la recibe, ha de procesar la señal recibida del sensor, incluyendo en lo que denominamos procesado el filtrado, la linealización y la compensación de la señal del sensor. Una vez procesada, se encarga de generar la señal de control según algún tipo de algoritmo, y de mandar la señal de control calculada al amplificador a través de la tarjeta de entrada-salida.

El ordenador que se usará será un PC con un programa implementado en C para encargarse de todas las tareas anteriores en tiempo real.

2.1.5 El amplificador-modulador (PWM) y otros elementos

El aparato que llamamos amplificador-modulador es el encargado de generar una señal continua de suficiente potencia que alimente al ventilador, siendo dicha señal proporcional a la referencia que recibe del ordenador mediante la tarjeta E/S.

Es por tanto, un elemento amplificador en cierto modo por cuanto genera una señal de mucha más potencia en función de una referencia de potencia muy limitada.

Es también un modulador en el sentido de que regula la potencia de la señal que envía al ventilador según la misma señal de referencia.

El proceso de amplificación-modulación es bastante sencillo y se basa en la modulación por ancho de pulso (PWM). Dado que utiliza el PWM para trabajar, denominaremos en adelante este elemento por el nombre de PWM para simplificar la lectura de la memoria.

EL PWM se conecta por un lado al ordenador, de donde recibe la señal de referencia, por otro lado al ventilador al que manda la señal que lo alimenta. Por último, necesita una conexión a una fuente de tensión continua de la que extraer la potencia que le hace falta para alimentar al ventilador.

Otros elementos que son necesarios para el funcionamiento del sistema son, por ejemplo, las fuentes de alimentación.

Para alimentar el PWM se usa un fuente de alimentación que proporciona una señal continua de 24 voltios. Esta fuente tiene que tener suficiente capacidad para dar la corriente que pide el PWM, que puede llegar hasta uno ó dos amperios para el sistema levitador.

Para alimentar el circuito conversor de la señal de intensidad del sensor a una señal en voltaje se necesita una fuente de voltaje continuo de 15 voltios.

Además se necesita un circuito que actúe de interface entre el conector de la tarjeta de entrada / salida y la tarjeta conversora de intensidad a tensión y el PWM.

2.2 SITUACIÓN DE PARTIDA

Dado que una parte de este proyecto ha sido la implementación del propio sistema que después se ha estudiado, modelado y controlado, es consecuente detenerse a describir cual era la situación de partida y el estado inicial del que se partía a la hora de “poner en marcha” el sistema.

Los elementos de los que se disponía en principio eran:

el sistema físico:

lo que se denominó en la introducción como la carcasa, es decir, el soporte que sujeta la estructura, estaba hecho. El cilindro de plástico también estaba construido, y los dos ventiladores, el superior y el inferior también estaban. No obstante, el ventilador hubo de ser reemplazado y la estructura rehecha como se contará en el apartado siguiente de la memoria.

El ventilador era de corriente alterna, conectable directamente a la red (220V/50HZ).

el sensor :

estaba montado ya en la estructura. La tarjeta convertora de intensidad a voltaje también estaba ya instalada. No obstante la tarjeta convertora tenía algunas conexiones defectuosas que tuvieron que ser soldadas de nuevo.

el ordenador y la tarjeta E/S :

se disponía de ambos elementos aunque en ambos casos de modelos diferentes a los que se usaron finalmente. El ordenador era un IBM PS/2 bajo MS-DOS y la tarjeta

era el modelo 2901 de DATA TRANSLATIONS. Sin embargo, en parte de los experimentos de identificación del sistema se usaron estos dos elementos, antes de que fueran sustituidos.

Posteriormente se sustituyó el PS/2 por un Pentium II bajo Windows 95 y la tarjeta 2901 por el modelo DT2811 también de DATA TRANSLATION. En consecuencia, hubo que realizar una aplicación informática nueva para el control del sistema levitador.

el modulador:

no se disponía del modulador PWM sino que se pensaba realizar la modulación directa de la velocidad del ventilador en función de la señal de control procedente del ordenador.

Para realizar la regulación se contaba con un inversor de frecuencia, en particular el MICROMASTER modelo MM110/2 de SIEMENS, que ya se encontraba en el laboratorio. Este aparato regula la frecuencia de giro del motor en función de una señal de referencia. El problema que presenta es que sólo sirve para motores trifásicos.

En consecuencia, como no se pudo usar el inversor de frecuencia se eligió el PWM como aparato para controlar el ventilador.

2.3 SUSTITUCIONES, ARREGLOS Y MEJORAS

Este apartado recoge todos los cambios y añadidos que se llevaron a cabo sobre la situación de partida hasta que el sistema estuvo implementado de una forma satisfactoria, que permitiera el estudio y control del sistema.

Se ha explicitado en el apartado anterior, cual era la situación en que se encontraba el sistema cuando se empezó a trabajar en él. Naturalmente, en aquel momento el sistema no funcionaba y fue necesario realizar varios cambios de elementos, así como sustituciones en algunas partes del sistema hasta conseguir un comportamiento satisfactorio.

El primer problema que existía afectaba al inversor de frecuencia. El modelo que se encontraba en el laboratorio es un inversor de frecuencia diseñado para motores trifásicos. El ventilador que se tenía era monofásico.

Si se conecta el inversor de frecuencia a un motor monofásico y no se compensan las otras fases el resultado inmediato es que salta la instalación eléctrica por los armónicos que introduce en la red eléctrica el inversor.

Dado que no se podía conectar únicamente una fase se intentó compensar las otras dos fases conectando a las otros dos terminales del inversor otros ventiladores que tuvieran una carga (impedancia) similar a la del ventilador que pretendíamos controlar.

Como no se disponía de ventiladores idénticos al que queríamos controlar, se intentó compensar las fases con ventiladores que tuvieran una carga lo más parecida posible. Sin embargo, no fue suficiente y los armónicos que introducía el inversor seguían haciendo saltar la instalación.

En consecuencia, se planteó sustituir el ventilador monofásico por uno trifásico, que no habría de presentar problemas de descompensación de las fases. De hecho, se había probado que la instalación no saltaba al conectar el inversor si la carga era un motor trifásico (desgraciadamente, este motor no servía pues no podía adaptarse al uso que se pretendía).

Con el fin de encontrar un motor trifásico adecuado se consultaron catálogos de diferentes casas fabricantes o distribuidoras de ventiladores trifásicos.

Los catálogos que se consultaron fueron los de las siguientes empresas:

Lenze, Electro-Craft, Elmeq, Bühler, Superior Electric, Minimotor y Amidata.

Tras consultar los catálogos se llegó a la conclusión de que no existen en el mercado ventiladores trifásicos para la gama de potencia y de precio que se estaba buscando. Tampoco era factible la compra de un motor trifásico para adaptarlo después como ventilador.

Como consecuencia de no poder comprar ningún ventilador adecuado que fuese trifásico, ni poder adaptar un motor trifásico como ventilador se tuvo que abandonar la idea de usar el inversor de frecuencia como elemento modulador.

Se pensó entonces en utilizar un ventilador alimentado por corriente continua y controlar la potencia del ventilador mediante modulación por ancho de pulso. Una ventaja importante era que estaban disponibles en el laboratorio elementos PWM, de tal manera que el único problema que había que solventar era encontrar un ventilador de D.C. que tuviese la potencia adecuada.

Consultando los mismos catálogos se decidió comprar el modelo de ventilador de 24 V d.c. de la casa Ziehl-EBM, a través de Amidata S.A. como distribuidora.

Este modelo funciona alimentado por una fuente continua de 24 V d.c. y suministra un flujo de aire máximo de 256 litros de aire por segundo. La velocidad de giro es de 2600 r.p.m. y tiene protección contra polaridad inversa.

Una vez que se recibió el ventilador, hubo que rediseñar la estructura, que estaba pensada para el anterior ventilador, para acomodarla al nuevo ventilador.

A la hora de reajustar la estructura el principal problema era debido a la diferencia de tamaño entre el ventilador anterior y el ventilador actual. Por culpa de eso hubo que eliminar parte de las sujeciones del cilindro de plástico y recortar éste por abajo hasta que el diámetro del cilindro de plástico coincidiera con el del ventilador. También se variaron las fijaciones de los batientes que regulan la apertura que tiene el cilindro.

Una vez que se terminó de instalar el ventilador se empezaron a cambiar o a mejorar otros elementos.

La barra que sirve de eje por el cual sube y baja la plataforma tuvo que ser desmontada y se movieron ligeramente las sujeciones que la sostienen para conseguir que la barra estuviese recta. Además fue necesario limpiar la barra concienzudamente para eliminar la oxidación que presentaba por algunas zonas. Es muy importante mantener la barra limpia de óxido porque introduciría una fricción que desvirtuaría totalmente el comportamiento del sistema y haría mucho menos eficiente el control que se ha diseñado. Es conveniente pues limpiarla regularmente y rociarla con algún antioxidante.

El ventilador superior, que, como dijimos en la introducción, sirve de sujeción al cilindro, no se retiró, pero hubo que variar las sujeciones superiores del cilindro para que el cilindro tuviese el mismo diámetro en la parte superior que en la inferior, ya que, como se recordará, el diámetro de la parte inferior se había ajustado en lo posible al del nuevo ventilador.

La plataforma que sube y baja se cambió completamente. Aunque en principio era solamente un círculo de cartón, se comprobó que este material tenía muy poco peso y no servía dado que con muy poca potencia del ventilador era arrastrado hasta el límite superior. Además, al tener poca masa la plataforma era muy fácil que se quedase atascada en cualquier irregularidad de la barra o en algún punto donde ésta estuviese oxidada.

Para dotarla de más peso se recurrió a un disco de plástico que se añadió al de cartón. Al incrementar la masa de la plataforma se consiguió hacerla menos sensible al rozamiento con la barra, y se redujo un problema, el del rozamiento, que antes era crítico en la dinámica del sistema. Otra consecuencia de añadir el disco de plástico fue incrementar la rigidez de la plataforma, de manera que no se doblase debido a la fuerza de la corriente de aire.

La lengüeta que sale de la plataforma y que sirve para que el sensor pueda medir la altura también se sustituyó.

Como el papel que servía de obstáculo para que rebotasen la ondas que emite el sensor era demasiado flexible las medidas eran malas. El problema residía en que la parte del aire del ventilador que se escapaba por la abertura del cilindro agitaba fuertemente el trozo de papel de manera que las medidas tenían un ruido adicional e incluso eran erróneas en algunos porque el papel se doblaba tanto que la onda que genera el sensor no rebotaba en el papel ya que éste no estaba perpendicular obteniéndose una medida falsa.

Como solución a este problema se sustituyó el papel por plástico. El plástico usado tiene dos propiedades que son necesarias aquí; es rígido, y no se agita, por tanto, por efecto de la corriente de aire; y es poco pesado.

La importancia de que sea poco pesado es debida a que al estar en un extremo de la plataforma, el peso de la lengüeta puede colocar oblicuamente el disco, y no

horizontalmente que es como debe estar. Aún usando plástico hubo que colocar un contrapeso en la parte opuesta del disco para compensar el peso de la lengüeta.

Un problema parecido al de la lengüeta es el del segmento que une en la plataforma el disco y la lengüeta. El material que había era muy flexible y vibraba hacia arriba y abajo, falseando las medidas. Se sustituyó por un segmento de plástico rígido para eliminar esta fuente de ruido.

Sobre el sensor no hubo que hacer cambios. En cambio, sí hubo que sustituir el cableado que lo unía con la tarjeta de conversión de corriente a voltaje. También hubo que cambiar el cableado que salía de la tarjeta de conversión pues algunos cables estaban rotos.

Asimismo, se tuvieron que retocar las soldaduras en algunos terminales de la tarjeta porque no hacían buen contacto.

Una vez que se hubo sustituido el cableado antiguo por uno nuevo y que se hubo revisado el correcto funcionamiento del sensor, de la tarjeta de conversión de corriente a voltaje, y del ventilador, se empezaron a realizar pruebas con el objeto de saber si el sistema presentaba un comportamiento que hiciese interesante su estudio, y que al mismo tiempo, pudiese obtenerse un modelo que aproximase en suficiente medida el sistema.

Como se comprobó que el sistema era un sistema adecuado e interesante, se continuaron los trabajos para ponerlo a punto y empezar la etapa de identificación del sistema.

El siguiente elemento que se introdujo fue el PWM. El modelo que se ha utilizado es el servo amplificador PWM 12A8 de la serie 25A de la marca Advanced Motion Controls.

Aunque las características del PWM se detallan en el apartado dedicado al PWM y otros elementos del sistema, señalamos aquí que este PWM usa como alimentación una fuente de continua que puede tener un valor entre 20 y 80 voltios, pero que ha de ser un valor fijo. El límite de corriente que puede aportar a la carga que se le conecte es de 6 amperios, luego es más que suficiente para alimentar al ventilador, que no consume nunca más de 2 A.

El PWM es un elemento bastante sensible y es necesario tener bastante cuidado al hacer las conexiones, pues es fácil que un cortocircuito casual cause la rotura del PWM.

Por añadidura, detectar el mal funcionamiento del PWM no es sencillo, a menos que se realicen directamente pruebas sobre el PWM, y puede ser una causa oculta de mal comportamiento en el sistema. En particular, el primer PWM que se conectó funcionaba mal, y obligó a revisar todas las partes del sistema una por una hasta que se comprobó que el PWM era el responsable del extraño comportamiento del sistema.

La puesta a punto del sistema terminó tras la sustitución del PWM averiado por uno que funcionaba correctamente. A partir de ese momento se comenzó la segunda parte del proyecto, referida a la identificación del sistema, que se documenta en el siguiente capítulo de la memoria.

Durante la etapa de identificación se llevó a cabo la sustitución del ordenador y la tarjeta que se estaban usando por el ordenador y la tarjeta que se deseaban usar. La ventaja que se obtiene al sustituir estos elementos es que el nuevo ordenador es más potente.

Al sustituir el ordenador es necesario sustituir también la tarjeta, porque modelo 2901, que es la tarjeta que estaba instalada, se comunica con el ordenador a través del bus Microchannel, que ya no existe, sino que ahora los ordenadores usan bus ISA y bus PCI. La tarjeta DT2811, la que se instaló en el nuevo ordenador, usa el bus ISA.

Al cambiar de tarjeta, también se tuvo que realizar el circuito que sirve de interface entre el conector J1 de 50 pines de la tarjeta y los terminales de la tarjeta conversora, de donde viene la señal de posición, y del PWM, a donde ha de ir la señal de control. Además, este circuito se encarga de dividir la señal del sensor para que el rango de dicha señal esté dentro de los valores de entrada permitidos por la tarjeta.

Otra consecuencia de cambiar de tarjeta, y también de cambiar de sistema operativo, de MS-DOS a Windows, fue que el programa que se usaba para los experimentos ya no servía. Fue necesario realizar una nueva aplicación.

La aplicación informática que se desarrolló se describe de manera detallada en su capítulo correspondiente. Aprovechando que había que crear la aplicación desde el principio, se decidió hacer una aplicación que sirviera no sólo para este sistema, sino, en general, para cualquier ordenador que tuviese instalada una tarjeta de la marca DATA TRANSLATION, desde el modelo DT2811 en adelante.

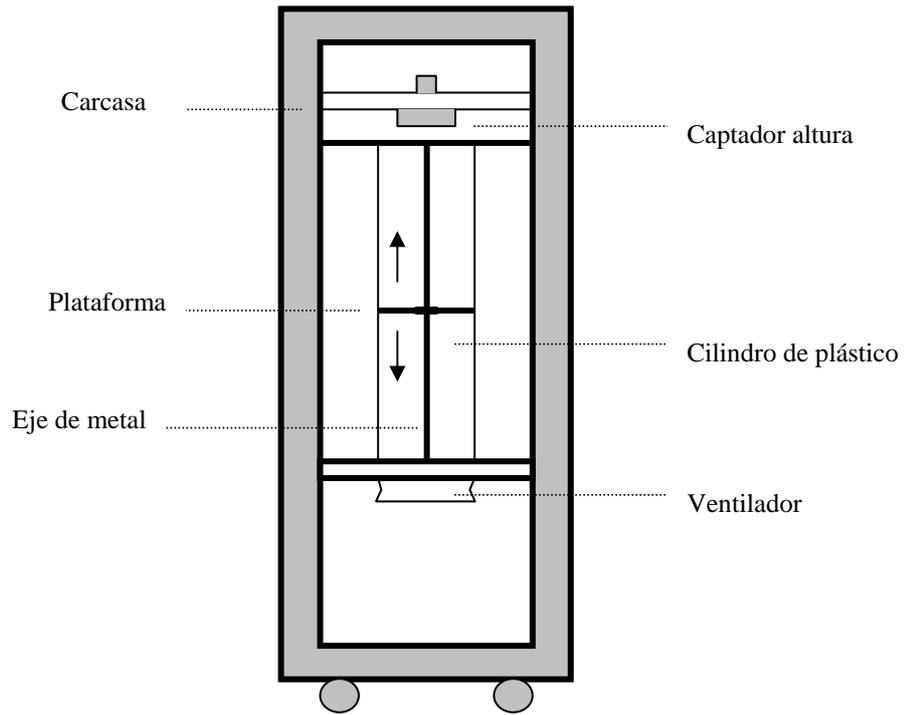
2.4 EL SISTEMA FÍSICO

El sistema levitador neumático construido consiste en un tubo cilíndrico con un eje longitudinal sobre el cual desliza una plataforma en función de la corriente de aire que genera un ventilador situado en la base inferior del cilindro. Es un sistema levitador en tanto que la plataforma está flotando en el aire (levitando) y es neumático en cuanto que la fuerza impulsora es el aire.

El interés que presenta este sistema desde el punto de vista del control automático es que presenta una alta no linealidad, y que los parámetros del sistema varían a lo largo del tiempo, lo que hace que resulte un sistema adecuado para diseñar controladores robustos.

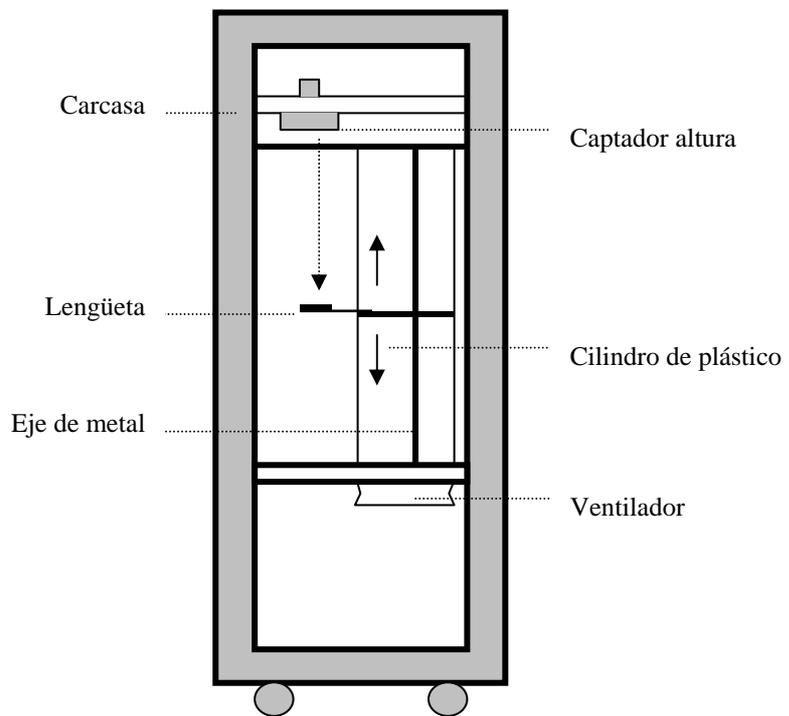
Por otro lado, la dinámica relativamente lenta que posee permite diseñar técnicas de control que necesitan gran cantidad de tiempo de cálculo.

Las siguientes figuras son representaciones del sistema levitador tanto de frente como de perfil, que dan una idea aproximada de su forma.



Vista frontal del sistema levitador

Dibujo 2-1



Vista lateral del sistema levitador

Dibujo 2-2

La carcasa es de madera y dentro de ella se monta todo el sistema puesto que sirve de soporte del cilindro, del ventilador y del sensor.

Las dimensiones de la carcasa son 180 centímetros de alto, 60 centímetros de ancho y 60 centímetros de profundo.

En la parte superior y sujeto a un travesaño se encuentra el sensor que mide la altura de la plataforma.

En la parte inferior de la carcasa, y sujeto a otro par de travesaños de madera, se instala el ventilador para propulsar la plataforma.

Entre las partes superior e inferior está situado el cilindro que sirve para contener el aire propulsado por el ventilador. Las paredes son de plástico (plexiglas) y las dimensiones del cilindro son 96 centímetros de altura y 26 centímetros de diámetro.

En el eje del cilindro existe una barra de acero que sirve de guía para que la plataforma suba y baje en función de la presión del aire que empuja el ventilador, y que al estar encerrado lateralmente por el plástico, sólo puede salir hacia arriba.

En función de la presión ejercida sobre la superficie de la plataforma por la corriente de aire que procede del ventilador, dicha plataforma se elevará hasta una cierta altura dentro del cilindro, hasta alcanzar una posición de equilibrio, en el momento que el peso del disco compense la presión ejercida sobre la cara inferior de la plataforma por la corriente de aire que genera el ventilador.

En la parte inferior de la carcasa existen ruedas para facilitar el desplazamiento del sistema.

Hay dos batientes en la parte frontal del sistema que se pueden abrir más o menos para dejar salir más o menos aire y actuar como perturbaciones en el sistema. Dado que afectan al comportamiento del sistema, es conveniente mantenerlos fijos en

una posición. De hecho, la identificación de un modelo del sistema se llevó a cabo para una apertura fija de los batientes.

En el interior del cilindro se encuentra la plataforma, que es un disco de cartón, al que se le ha añadido otro disco, de plástico duro, para aumentar su peso de manera uniformemente distribuida por toda su superficie. En el centro de la plataforma hay un agujero por el cual pasa la barra de acero que sirve de guía en el movimiento de la plataforma. Para reducir el rozamiento entre la plataforma y la barra existe un rodamiento de bolas entre las dos piezas.

Sobresaliendo de la plataforma, y también del cilindro, está la lengüeta que sirve para que la onda emitida por el sensor rebote y se pueda calcular la altura que alcanza la plataforma.

Las dimensiones de la lengüeta son 16.5 centímetros de largo y 5 centímetros de ancho.

Las dimensiones de la plataforma son 23 centímetros de diámetro. Como puede comprobarse esto significa que la plataforma tiene un diámetro tres centímetros menor que el cilindro. En consecuencia, parte del aire se escapa por el espacio existente entre los límites de la plataforma y las paredes de plástico. Es necesario que sea así pues si no escapase de esta manera el aire, la presión ejercida por la corriente de aire que impulsa el ventilador sería demasiado grande y la plataforma acabaría casi todas las veces en el límite superior, con lo cual no habría control posible del sistema.

El ventilador, situado en la parte inferior, es un ventilador de corriente continua de la marca Ziehl – EBM. Se trata de un ventilador axial de gran potencia, pues alcanza un flujo de aire de 256 litros por segundo. Se ha escogido un ventilador tan potente porque se pretende que sea capaz de levantar una plataforma relativamente pesada, puesto que mientras mayor sea la masa de la plataforma menos se verá influida por perturbaciones y por efectos de rozamiento.

La tensión de alimentación son 24 voltios en continua, aunque admite un rango entre 16 y 28 voltios. La velocidad nominal de giro es de 2600 revoluciones por minuto y la potencia es de 50 W.

Las dimensiones del ventilador son de 28 centímetros de diámetro exterior y 225 milímetros de diámetro del rotor, y una altura de 8 centímetros. Se encuentra atornillado a la carcasa para reducir las vibraciones y también tiene atornilladas las agarraderas que sujetan el plástico que sirve de pared.

El motor está protegido contra polaridades inversas mediante un circuito semirectificador entre la alimentación y el motor, y también está protegido contra bloqueo de las aspas.

Una característica importante del motor es que tiene histéresis. El valor de señal de control que hace que comience a girar el ventilador es superior al valor de la señal de control que hace que se pare el motor una vez que está en movimiento. En concreto, se ha utilizado una fuente de tensión para generar una señal de control a voluntad, y se ha ido aplicando una serie de valores constantes de señal y anotando la altura alcanzada por la plataforma. La tabla siguiente recoge esos datos:

Voltaje creciente	Altura (centímetros)	Voltaje decreciente	Altura (centímetros)
10.1	Motor parado	13.7	95
10.6	20	12.6	80
11.0	40	11.9	60
11.9	60	11.0	40
12.6	80	10.3	0
13.7	95	9.5	Motor parado

Tabla 2-1

Las dos columnas de la izquierda representan el voltaje aplicado como señal de control y la altura que alcanza la plataforma para ese valor de señal aplicada.

En este caso, se parte de una señal de control nula y se empieza a aumentar el valor. El motor permanece parado hasta el valor de 10.1 voltios, en que empieza a girar, y no empieza a subir la plataforma hasta que se aplica un valor de 10.6 voltios. Hay que señalar que la subida se produce de golpe porque en la zona muy próxima al ventilador existe una “zona de succión” que retiene la plataforma hasta que fuerza de la corriente de aire es suficiente para elevarlo. Se describe más detalladamente este efecto en el capítulo dedicado a la identificación del sistema.

Luego, a medida que se sigue aumentando el voltaje el valor de la altura crece, hasta que se llega al tope superior del cilindro (95 centímetros).

A partir de aquí, se comienza a rebajar el valor de la señal aplicada. Los datos obtenidos son los de la segunda columna. Ahora la plataforma no cae al tope inferior hasta que no se reduce la señal de control a 10.3 voltios, frente a los 10.6 que eran necesarios antes, y el motor no deja de girar hasta que el valor de tensión no llega a 9.5 voltios, o sea, 6 décimas menos que cuando partía del reposo y empezaba a girar.

En consecuencia, es preferible evitar esta zona de histéresis cuando se intente hacer un control. Por eso es conveniente que la plataforma tenga suficiente peso, para que la zona de trabajo en la que el ventilador comienza a elevar la plataforma esté alejada de la zona de histéresis.

El ventilador es el último elemento que consideramos parte del proceso físico. En los siguientes apartados se abordarán los demás elementos, como sensores, tarjeta de E/S y PWM.

2.5 EL SENSOR DE ALTURA

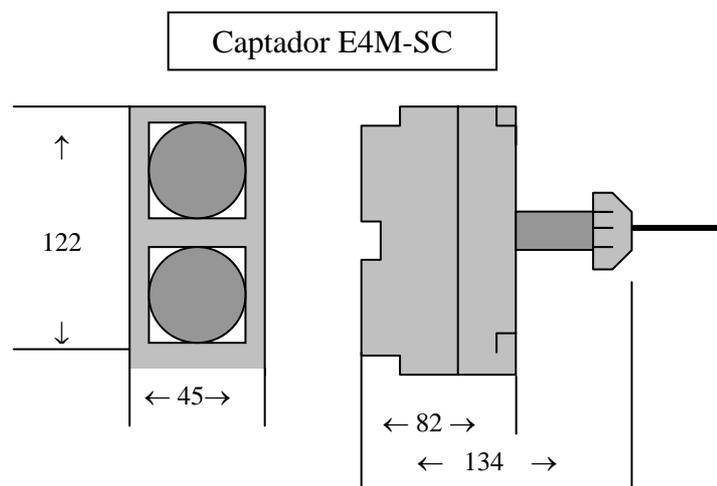
2.5.1 Descripción

Para medir la altura que alcanza la plataforma se dispone de un sensor ultrasónico de posición, en concreto, el modelo E4M de la casa OMRON.

Físicamente consiste en dos bloques conectados por un cable.

El primer bloque es el E4M-SC y contiene dos membranas que generan físicamente la onda ultrasónica y reciben el rebote y actúan como transductores entre la señal sónica y la eléctrica.

La siguiente figura es un dibujo esquemático del bloque E4M-SC, con sus dimensiones en milímetros.



Dibujo 2-3

El segundo bloque es el E4M-3AK, que contiene los elementos electrónicos del sensor y se encarga de regular el proceso de captación de la distancia al objeto. Tiene la forma de un prisma con unas dimensiones parecidas a las del bloque captador, sin embargo, como se puede colocar alejado del captador (mientras estén unidos por el cable) su tamaño no resulta problemático para integrarlo en el sistema.

Este bloque dispone de un pequeño panel frontal para configurar el sensor. Los parámetros que se pueden configurar son fijar los límites inferior y superior de alcance del sensor y ajustar el nivel de cero a la distancia que se desee.

Para la realización del proyecto se fijó el límite inferior de distancia al sensor en 15 centímetros y el límite superior de distancia en 110 centímetros. La salida que da el sensor es en una salida de 4 a 20 mA de intensidad, y el nivel de 4 mA corresponde a la distancia de 110 centímetros (es decir, altura cero de la plataforma) y el nivel de 20 mA a la distancia de 15 centímetros (o altura de 95 cm alcanzada por la plataforma.)

El sensor también incorpora un LED para indicar pérdida de estabilidad del sensor.

El sensor se alimenta directamente de la red de distribución eléctrica, mediante un enchufe y un cable que posee el bloque E4M-3AK.

Es un sensor de tiempo de vuelo, que realiza el proceso de medida mediante ultrasonidos. Para estimar la distancia del sensor al objeto sobre el que realiza la medida utiliza una onda en la banda de frecuencias ultrasónica, y se basa en el mismo principio que todos los sensores que usan el método del tiempo de vuelo. El sensor emite la onda, y espera a recibir la onda resultante del rebote de la onda que emitió sobre el objeto. En función del tiempo que tarda la onda en llegar al objeto, rebotar y volver al sensor se realiza una estimación de la distancia que separa al sensor del objeto.

La principal desventaja de este sensor es su tamaño. Al ser excesivamente grande el captador no se puede introducir en el interior del cilindro sino que debe estar

fuera. Como además el método de estimación de la posición necesita que la onda emitida rebote en el objeto hace necesario que se le añada a la plataforma una lengüeta cuya única finalidad es servir de obstáculo para que la onda rebote. Una desventaja añadida es que para que la lengüeta pueda sobresalir ha de existir una abertura longitudinal en el plástico que sirve de pared del cilindro, lo que provoca perturbaciones en el sistema, ya que el aire escapa por la abertura.

Otra desventaja del sensor es que presenta problemas de ruido y no linealidad que obligan a realizar un procesado sobre la señal que se obtiene del sensor.

Las ventajas principales del sensor son que es más barato, y que ya estaba montado en el sistema del que se partía al iniciar el proyecto.

La salida del sensor es una señal en corriente, de 4 a 20 mA, por lo que es necesario un circuito adicional que transforme la señal de corriente a una señal en voltios que sea proporcional a la señal de corriente, dado que la tarjeta lee valores en voltios.

Este circuito es muy sencillo y se describe en el apartado correspondiente a elementos del sistema.

La señal que da el sensor es proporcional a la altura del disco, pero presenta unos términos de ruido que hacen imposible el uso de la información contenida en dicha señal sin realizar antes un acondicionamiento de la señal.

El acondicionamiento de la señal incluye el filtrado de ésta para eliminar los términos de ruido, la supresión del término de continua correspondiente a la posición de altura nula, y el reescalado de la señal para traducir los valores en voltios a valores en metros o centímetros.

En los siguientes apartados se analizan los diferentes problemas que presenta la señal obtenida del sensor y se muestran y justifican las medidas adoptadas para solucionarlos.

2.5.2 Ruido del sensor

El principal obstáculo a la hora de utilizar la señal del sensor como fuente de información en cuanto a la medida de la altura del disco es la excesiva cantidad de ruido presente en la señal.

La gráfica número 2-1 sirve de ejemplo de la perturbación que ejerce el ruido sobre el valor de la señal.



Gráfica 2-1

La primera de las figuras superiores representa la respuesta del sistema ante una entrada en escalón de magnitud 3 V. Se puede observar como la respuesta del sistema se ve deformada por la presencia de un ruido bastante intenso, que llega a alterar el valor real en una banda de un $\pm 5\%$ aproximadamente.

Aunque pudiera pensarse que las variaciones presentes en la señal del sensor no son debidas al ruido sino a la propia dinámica del sistema considerado, la segunda de las gráficas inmediatamente superiores disipa enseguida y de manera concluyente esa duda. Dicha gráfica representa la señal del sensor ante una entrada nula, es decir, que la señal de control del motor es igual en todo momento a 0 V.

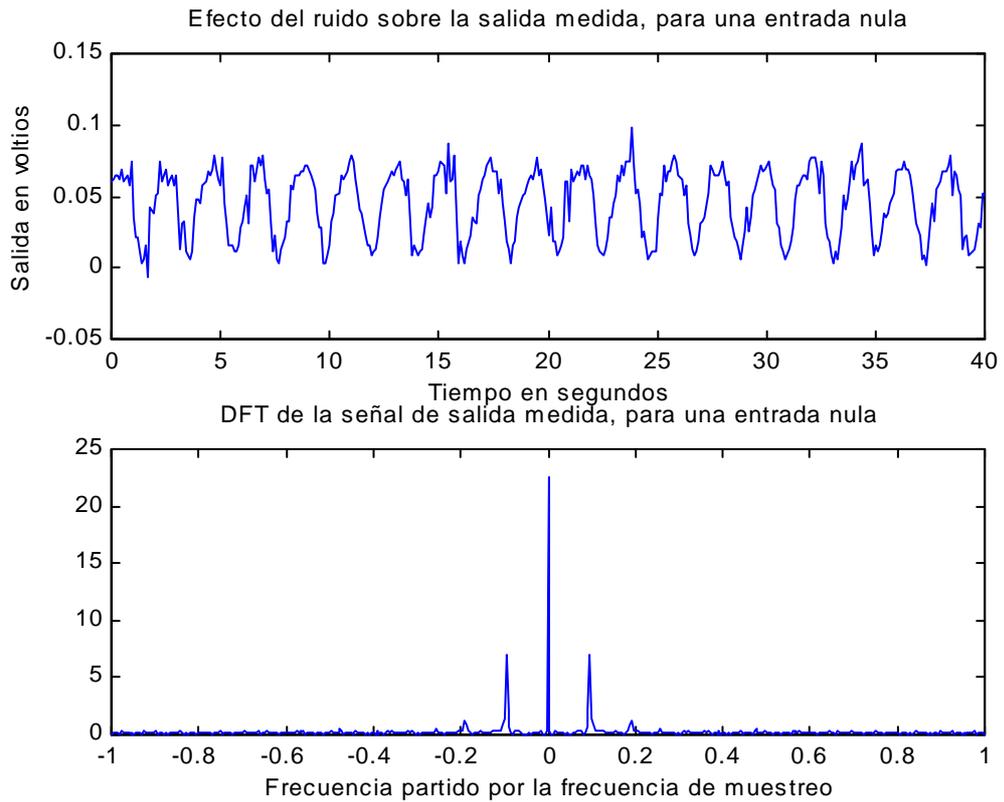
Dado que no hay entrada, no debe haber ninguna salida excepto la nula, y la señal verdadera es una señal constante de valor cero. En cambio, la señal medida no vale cero, sino que fluctúa entre 0 V y 0.1 V, con una media de alrededor de 0.05 V . Por tanto, queda claro que existe un término de ruido que se superpone al valor real y altera las medidas.

Al fijarse con detenimiento en la forma del ruido de la segunda gráfica es evidente que éste presenta un comportamiento oscilatorio que indica que presenta un pico para una frecuencia determinada del espectro. Es razonable pensar que filtrando la señal con un filtro que rechazara dicha frecuencia eliminaría o al menos reduciría notablemente la presencia del ruido.

En cuanto a la magnitud del ruido este se mueve en una franja comprendida entre -0.05 V y 0.05 V en la práctica totalidad de los casos. Dado que para una altura de 0.95 m la señal en voltios que emite el sensor es de 2.1 V podemos por regla de tres calcular que 0.05 V de error corresponden a un error en la medida de 2.25 cm que es un error inaceptable para la calidad pretendida de la medida.

Si se considera aceptable un error en la medida de la posición de menos 0.5 cm como máximo, tenemos que es equivalente a reducir el la franja en que se mueve el error a un intervalo entre -0.01 V y 0.01 V.

Como ya se dijo, el error tiene un espectro en frecuencia caracterizado por un pico a una frecuencia determinada. Si calculamos la transformada discreta de Fourier (DFT) de la secuencia representada en la primera figura de la gráfica 2-2 obtenemos la segunda figura de esta misma gráfica.



Gráfica 2-2

La gráfica superior es la señal medida, representada también en la página anterior, y la inferior es la DFT de dicha secuencia.

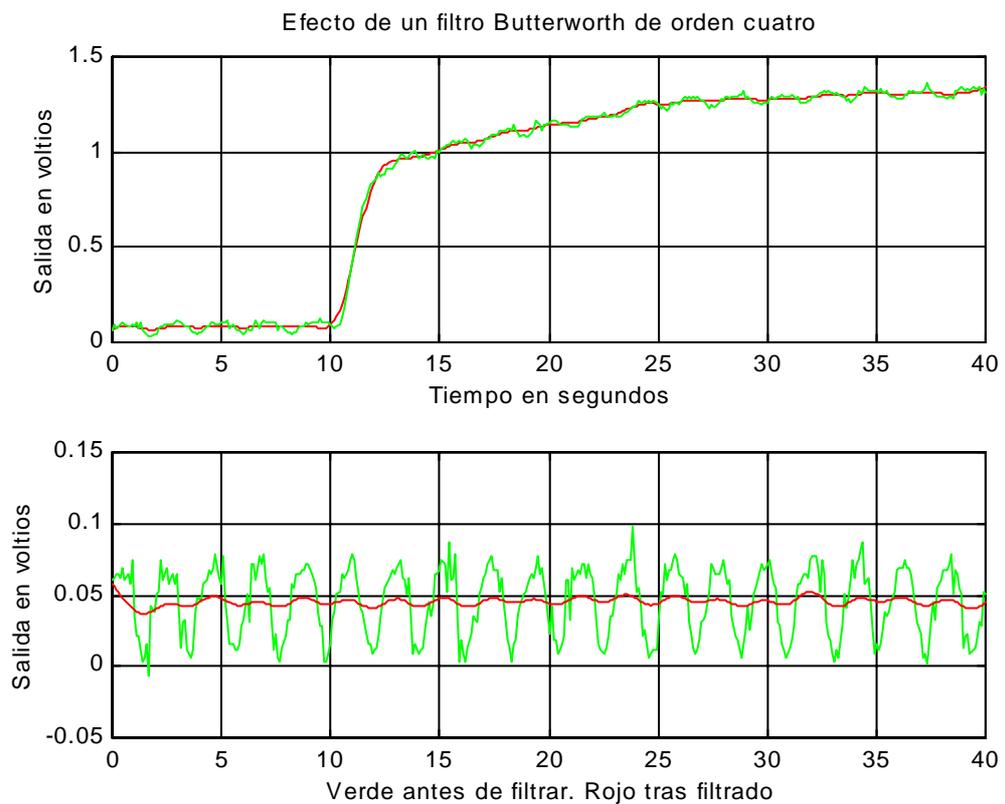
A través de la DFT podemos saber a qué frecuencia hemos de poner el filtro que eliminará el ruido de alta frecuencia.

Además del pico que existe en cero, es decir, componente de continua, que es debida a la salida que da el sensor para $y=0$ y que posteriormente se suprimirá, existe un pico para la frecuencia $f=0.09 * F_s$ siendo F_s la frecuencia de muestreo, que para este caso es de 0.1 s.

Para eliminar este pico se usará un filtro. Como además la dinámica del proceso es mucho más lenta, podemos usar un filtro paso de baja sin falsear nuestras medidas sobre el proceso.

Como filtro se escoge un filtro Butterworth de cuarto orden y con retraso de fase lineal. La frecuencia de corte del filtro se sitúa en 0.08 de la frecuencia de muestreo F_s .

La gráfica siguiente, número 2-3, presenta en dos figuras (pues son dos señales distintas) la señal filtrada (en color rojo), pudiéndose comparar en ambos casos con la señal sin filtrar (en color verde) y comprobar la sensible mejora que se consigue.



Gráfica 2-3

Se puede observar, especialmente en la figura inferior, la reducción del ruido desde los niveles inaceptables de antes a los niveles que se han supuesto como válidos, es decir, que el ruido se mantenga en una banda entre ± 0.01 V que se corresponde con una banda inferior a ± 0.5 cm y que ofrece una medida suficientemente precisa.

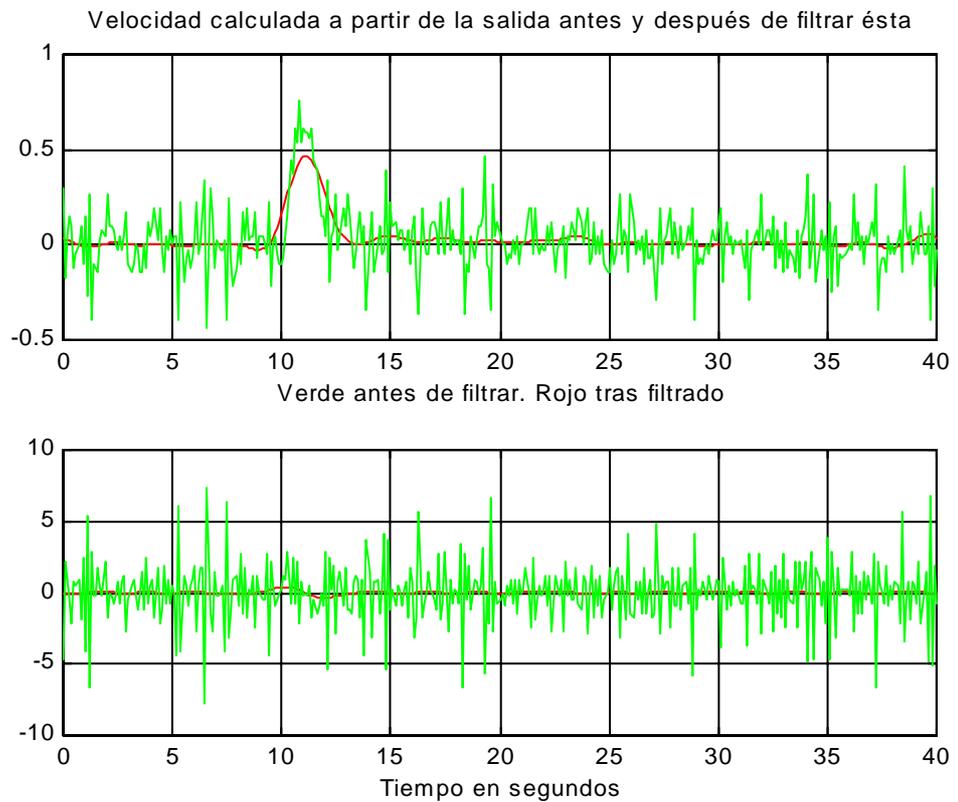
Una razón aún más importante que la necesidad de tener fijada la posición de manera precisa para aplicar un filtrado a la señal de salida del sensor es la derivada de que el cálculo de la velocidad del disco, y sobre todo, de la aceleración del disco se hace a partir de la señal de posición. Si se mantuvieran los niveles de ruido anteriores el cálculo de ambas quedaría totalmente desvirtuado y conduciría a resultados erróneos.

Ello sería debido no sólo a la magnitud del ruido sino a que éste posee una dinámica mucho más rápida que la del sistema de manera que su importancia relativa dentro del conjunto de la medida es más alto a mayores frecuencias. En consecuencia, al derivar, que significa aplicar un filtro que crece linealmente con la frecuencia, el ruido adquiere un mayor papel hasta invalidar por completo el resultado obtenido.

Al aplicar el filtro y eliminar las componentes frecuenciales a partir de una cierta frecuencia, superior a las de la dinámica del sistema, conseguimos mejorar de manera considerable el comportamiento del ruido.

El filtro no sólo mejora el cálculo de la velocidad, sino que también permite mejorar el cálculo de la aceleración, en cuanto derivada de la velocidad. A pesar de que la aceleración no se usa, puede ser interesante su uso en un modelo futuro del sistema.

Para ilustrar las mejoras obtenidas en el cálculo de la velocidad y de la aceleración se presentan las figuras de la gráfica número 2-4 donde se muestran la velocidad y la aceleración calculadas a partir de la posición con filtrado (en rojo) y sin filtrado (en verde) :



Gráfica 2-4

Como se puede observar el efecto del filtrado es crítico para poder calcular la velocidad y la aceleración del disco de una forma correcta o al menos aproximada. En caso de no haber realizado un filtrado los resultados habrían sido totalmente incongruentes y no habrían servido para nada.

2.5.3 Escalado de la medida

La señal que emite el sensor, y que mide la tarjeta A/D está en voltios y varía entre algo más de 0 V para $y=0$ y 2.19 V para $y = 0.95$ m . Dado que se quiere la señal de posición y en metros, será necesario traducir los valores de voltios a metros.

El término de continua que hay que eliminar es el correspondiente a la señal que emite el sensor cuando el disco está en la posición $y = 0$, es decir, en reposo. La manera más sencilla de obtener ese valor es calculando la media de la señal obtenida del sensor cuando la señal de entrada es nula.

La segunda figura de la gráfica 2-4, que se presentó anteriormente, está en este caso. Si calculamos la media de la señal, el valor obtenido es de 0.05 V.

Para obtener una mayor seguridad se realizaron varios experimentos en estas condiciones y se obtuvieron las medias respectivas. Tras calcular la media de esas medias y su desviación estándar, se obtuvo como media 0.05 V y como desviación estándar 0.01 V.

Para el límite superior el valor que se obtiene de diferentes experimentos es de 2.187 V de media y 0.002 V de desviación estándar.

2.5.4 Dinámica del sensor

El siguiente aspecto que se analiza dentro de la problemática que presenta el sensor se refiere a la respuesta dinámica del sensor, que no es una respuesta ideal sino que presenta unas características dinámicas que alteran la medida real respecto a la medida que se obtendría con un sensor ideal.

Un sensor con una respuesta ideal presenta una respuesta inmediata en la lectura a los cambios que se producen en la variable objeto de la medida. Sin embargo, un sensor real presenta una serie de limitaciones que se traducen en la existencia de un retardo y de un tiempo característico de respuesta a la variaciones de dicha variable.

En particular, el sensor que forma parte de este sistema tiene una característica frecuencial que se puede representar mediante una función de transferencia de primer orden, es decir, de la forma:

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

donde $G(s)$ representa una función de transferencia hipotética donde la señal de entrada sería la medida ideal correspondiente al valor instantáneo de la variable medida, y la señal de salida es la medida que realmente se obtiene del sensor.

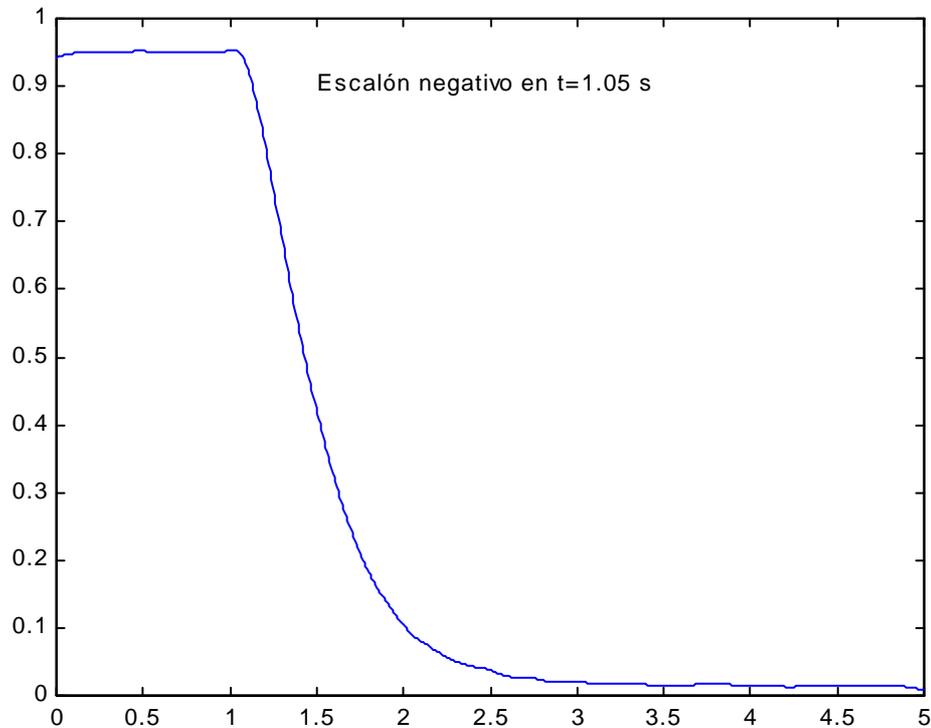
Hay que recalcar que si bien no se supone ninguna ganancia estática del sistema, ha sido porque es evidente que este sistema ha de tener ganancia estática unidad, ya que el modelo sólo es un 'truco' para tratar el hecho constatado de que el sensor no es capaz de responder inmediatamente a los cambios en la variable que mide, sino que sigue una cierta dinámica más o menos compleja, pero naturalmente el valor que alcanza al final es el mismo que marcaría un sensor ideal.

Escoger este tipo de función de transferencia para el sensor está justificada al estudiar la respuesta que ofrece el sensor a una variación instantánea de la variable a medir.

Para obtener dicha respuesta se realizó la siguiente prueba. Con el objeto de simular un escalón en la variable a medir se colocó un obstáculo a la mínima distancia del sensor, que equivale a la máxima salida del sensor.

Se comenzó a leer las medidas del sensor y, en un instante dado, se retiró el obstáculo de manera que, en un caso ideal, el sensor debería dar una salida nula. Se sabe que un sensor ideal daría una salida nula porque la altura correspondiente a cero metros de altura en la escala que estamos usando debe traducirse en un voltaje nulo a la salida

del sensor ideal, el cual no tiene problemas de “offset”. Sin embargo, las medidas que se leyeron del sensor fueron las que aparecen en la gráfica siguiente:



Gráfica 2-5

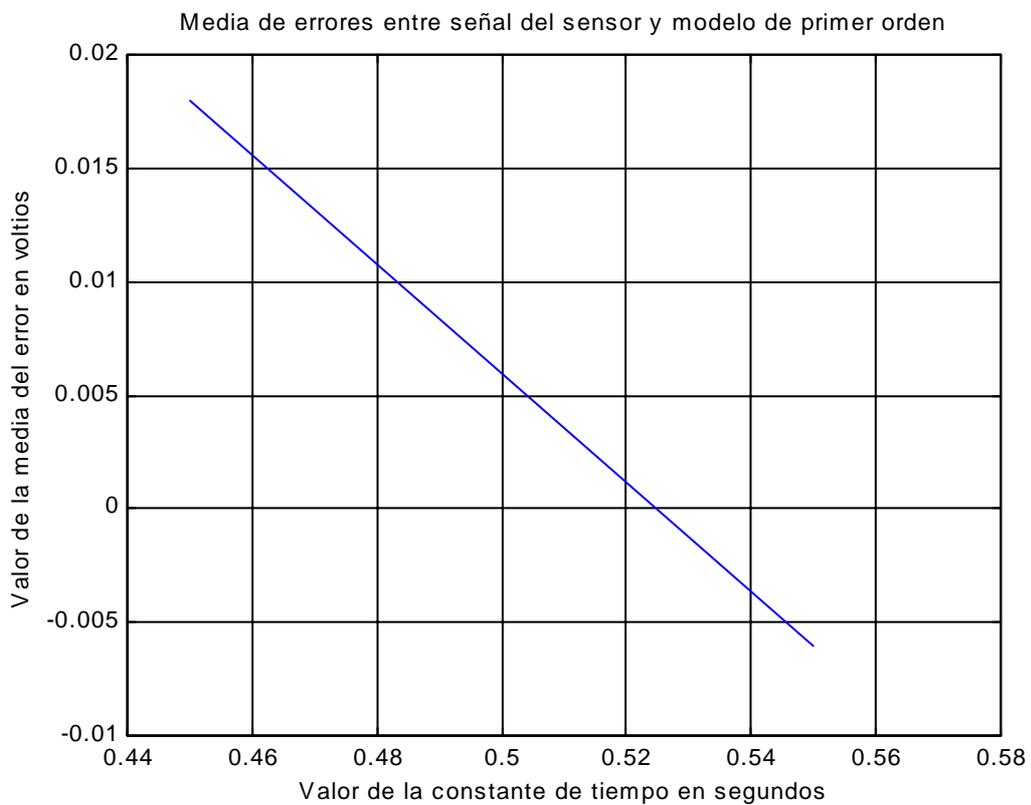
Como se puede observar, la respuesta del sensor es perfectamente asimilable a la respuesta típica de un sistema de primer orden. En consecuencia, la elección de éste como función de transferencia propia del sensor queda justificada.

Nótese que al final sigue habiendo un cierto valor de voltaje de salida del sensor. Ese voltaje es el offset que se ha mencionado que tiene el sensor, como todos los sensores reales. Este offset ya se ha comentado y no es relevante ahora, ya que se tratará al estudiar la función de transferencia estática del sensor, dentro del apartado de no linealidad del sensor, y no influye en el cálculo de la respuesta dinámica del sensor.

El siguiente paso es obtener el valor de la constante de tiempo ' τ ' que mejor se ajusta a la respuesta del sistema.

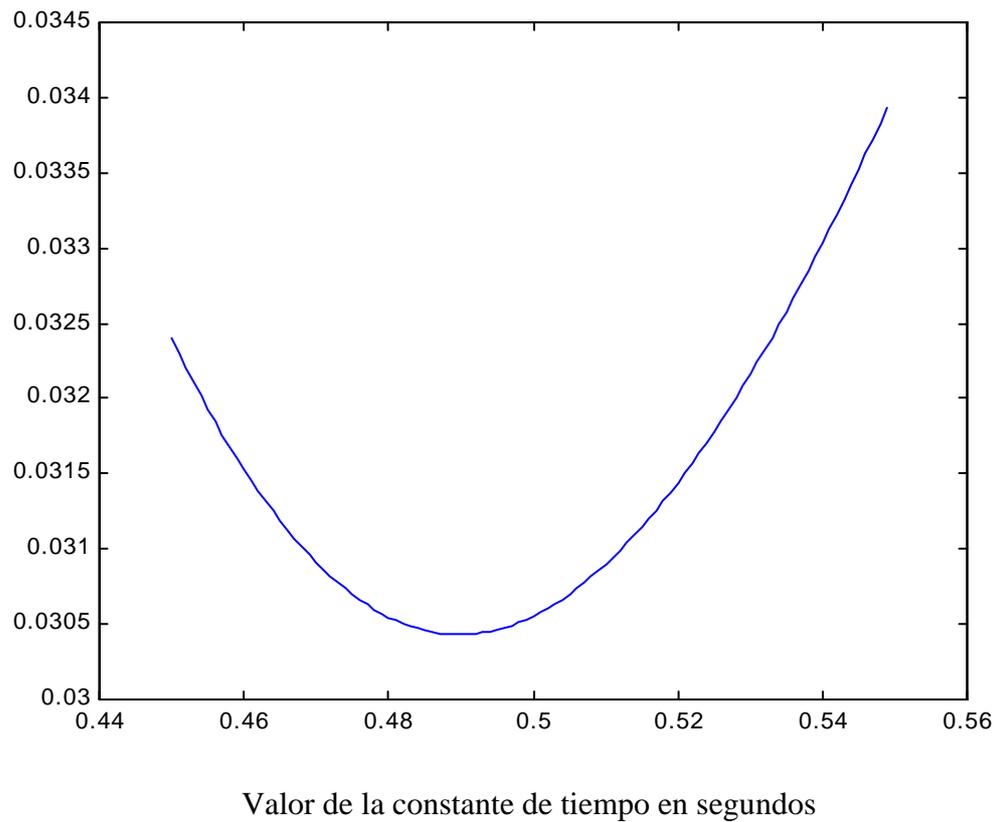
Para ello se realizaron varios experimentos iguales al descrito anteriormente con objeto de tener bien definido el comportamiento del sensor. A continuación, se simuló en MATLAB la respuesta de un sistema de primer orden para diferentes valores de la constante de tiempo. Se obtuvo el error existente para cada simulación entre la simulación y la característica real del sensor, y se obtuvieron gráficas de la media del error y de su desviación estándar en función del valor que adopta la constante de tiempo.

Las gráficas de error medio y desviación estándar del error son las dos siguientes:



Gráfica 2-6

Desviación del error entre la señal del sensor y modelo de primer orden



Gráfica 2-7

Observando las gráficas se comprueba que existe un valor de τ que consigue que la media del error entre el sistema de primer orden que simula el comportamiento del sensor y el comportamiento en la realidad del sensor. Este valor es igual a 0.52 segundos.

Por otro lado, la desviación estándar no ofrece una variación significativa en función del valor de la constante de tiempo, al menos, en el intervalo considerado, dado

que no varía más de un 15 % de su valor mínimo. Nótese que la escala del eje de ordenadas es extremadamente pequeña, y por eso la forma curva que muestra la gráfica es enormemente exagerada, y, en realidad, la curva es casi plana. Por tanto, en cuanto a minimizar la desviación estándar no ofrece suficiente diferencia tomar cualquier valor de un intervalo bastante grande alrededor de 0.5 segundos.

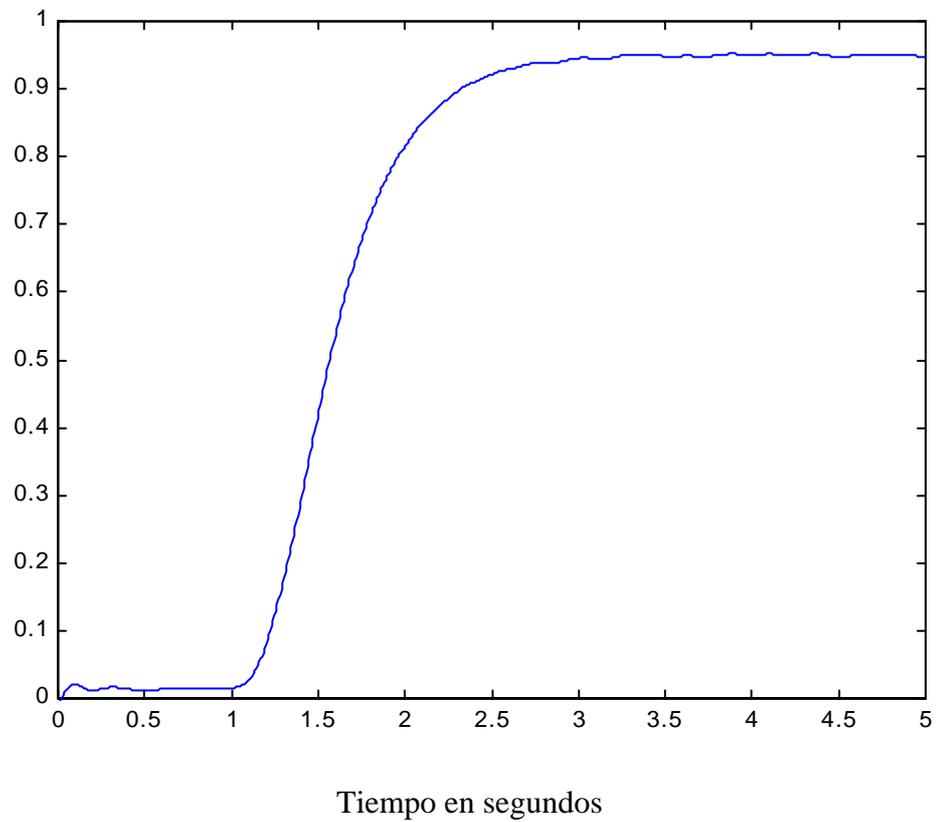
En consecuencia, se escogió como valor de la constante de tiempo aquél que anulaba la media del error, y que corresponde a un valor de 0.52 segundos, quedando como característica dinámica del sensor :

$$G(s) = \frac{1}{1 + 0.52 \cdot s}$$

Un segundo punto a estudiar es el referente a si la dinámica del sensor es la misma en los casos en que los cambios en la variable se producen en sentido positivo y no negativo.

Para contestar a esta cuestión se realizaron experimentos análogos a los anteriores pero en los cuales se partía de una situación en la que el sensor daba un valor de señal nulo, y en un momento dado se introducía un obstáculo para que diese un valor de señal máximo. La gráfica número 2-8 presenta el resultado obtenido:

Respuesta del sensor ante un escalón positivo



Gráfica 2-8

Repitiendo las mismas actuaciones que en el caso del escalón negativo, se obtiene que el valor de 0.52 segundos como constante de tiempo ajusta de una manera adecuada también en esta situación.

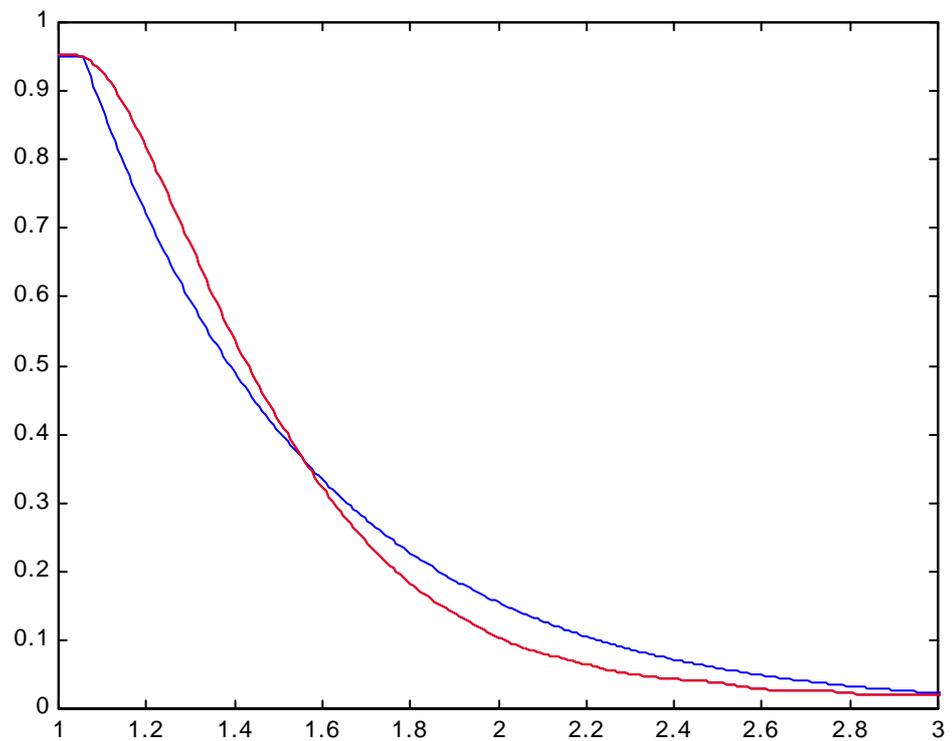
Ahora se representa la respuesta al escalón negativo que aparecía en la gráfica número 2-5 junto a la respuesta que se obtiene mediante el modelo supuesto para el sensor.

Aunque las dos curvas no se ajustan de manera completa, lo más importante es el hecho de que en los dos casos la respuesta al escalón sigue una curva bastante

parecida donde el modelo utilizado para la simulación de la curva en azul es de lo más sencillo.

La ventaja de poseer este modelo que ajusta de una manera bastante exacta la dinámica del sensor estriba no tanto en poder conocer esos valores intermedios que presenta el sensor entre un valor estacionario y otro valor estacionario, que al fin y al cabo no tienen existencia real, sino en poder conocer una estimación del ‘ancho de banda’ del sensor, para poder saber de antemano si las medidas realizadas corresponden sólo a la dinámica del sistema que se está estudiando o, por el contrario, se ven enmascaradas por la respuesta del sensor que está cortando una parte sustancial de la riqueza frecuencial del sistema.

Comparación entre la respuesta real y la simulada para el sensor



Azul=Simulación, Rojo=Real Tiempo en segundos

Gráfica 2-9

2.5.5 No linealidad del sensor

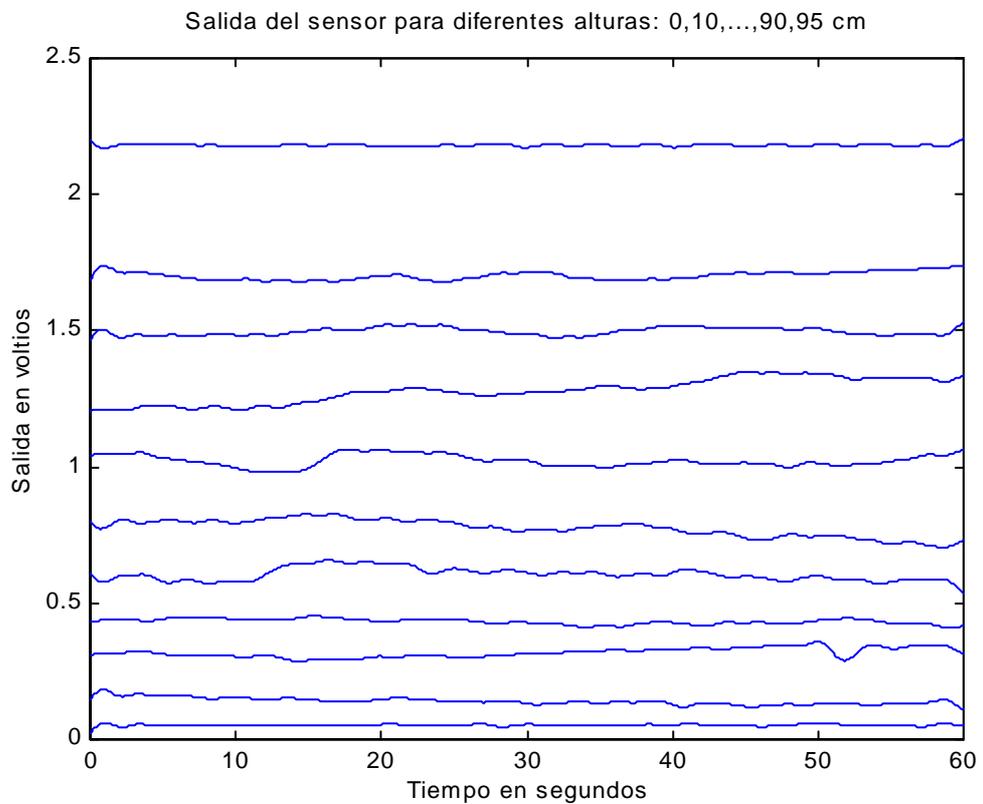
Otra cuestión a tener en cuenta para poder utilizar el sensor es la característica de no linealidad que presenta éste.

Dado que se busca un sensor que ofrezca una característica lineal de voltaje de salida frente a la variable que mide, será necesario eliminar dicha no linealidad procesando la señal leída del sensor según una curva inversa a la de éste.

Se debe buscar pues una función que relacione los valores de salida, en voltios, que ofrece el sensor con las alturas correspondientes del disco, en metros, y que sea la función inversa de la que relaciona los valores de altura de la variable a medir con los valores de voltaje de salida del sensor.

Para conseguir esta curva realizamos una serie de experimentos en los cuales fijamos la plataforma a una determinada altura, conocida, y medimos el valor que da el sensor. En principio, se limitó a diez alturas distintas con el fin de obtener una curva lineal a trozos como aproximación a la curva del sensor.

La gráfica 2-10 presenta los resultados de estos experimentos:



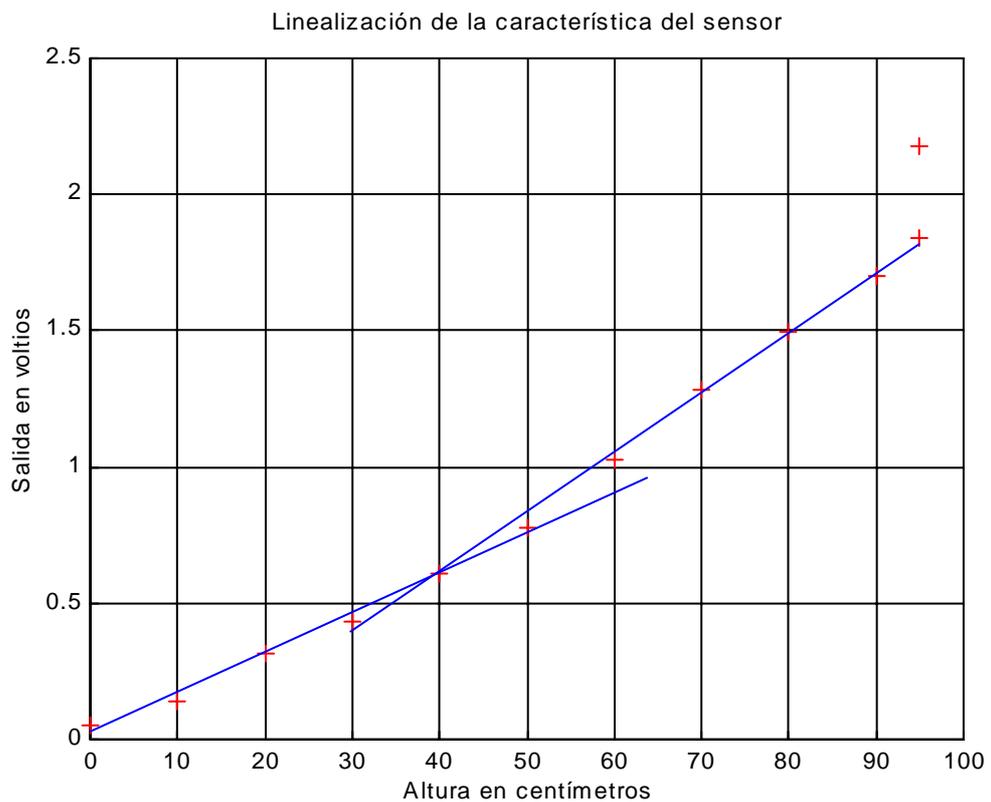
Gráfica 2-10

Como puede verse las salidas varían bastante a lo largo del tiempo. Se debe a que aunque el sistema está estacionado alrededor de un cierto punto, en cada uno de los casos, siempre existen perturbaciones (debidas a la variación irregular del flujo de aire) que mueven la plataforma y también la lengüeta unos centímetros arriba y abajo.

Para obtener con exactitud los valores de salida del sensor a diferentes alturas prefijadas será preferible no utilizar la plataforma sino otro objeto que no se vea perturbado tan fácilmente.

La gráfica número 2-11 presenta con cruces rojas los valores obtenidos del sensor a diferentes alturas, desde 0 cm hasta 90 cm yendo de 10 en 10 cm más un último

valor, a la altura de 95 cm que es la altura máxima que alcanza la plataforma cuando llega al tope superior.



Gráfica 2-11

Con líneas azules se representan las dos líneas que ajustan la característica del sensor.

Nótese que existen dos puntos distintos para la altura de 95 centímetros. Esto no es un fallo, sino que realmente el sensor presenta un valor muy distinto para una ligeramente inferior a 95 cm que para uno ligeramente superior a 95 cm. Es decir, que en un intervalo de menos de un centímetro alrededor de los 95 centímetros la salida del sensor varía en más de 0.3 voltios, desde 1.84 voltios hasta 2.19 voltios. Esto no significa un problema si se decide considerar que cualquier valor superior a 1.84 voltios

equivale a 95 centímetros de altura de la plataforma, que es el límite superior para la altura que puede alcanzar ésta.

Como se puede ver, con sólo dos tramos se ajusta de manera muy exacta la curva del sensor. Las dos rectas se han calculado mediante regresión lineal para ajustar cada una a una serie de puntos.

La primera recta ajusta la curva del sensor desde la altura de 0 cm (límite inferior) hasta la altura de 40 cm. En esta zona de trabajo es donde la curva del sensor tiene una pendiente menos pronunciada, lo cual significa que se necesita mayor diferencia de alturas en esta zona que en la otra para una variación igual del voltaje de salida. En consecuencia, las medidas de esta zona son las más imprecisas, aunque esto no debe preocupar pues la resolución del sensor es más que suficiente para la calidad del control que se pretende.

La ecuación que describe la recta de la primera zona es ésta:

$$\text{Voltaje (Voltios)} = 0.0681 + 1.46 \cdot \text{altura (metros)}$$

La segunda recta ajusta la curva del sensor desde la altura de 40 cm hasta la altura de 95 cm. En esta segunda zona existe una pendiente mayor lo que permite más precisión que en la zona anterior, aunque ya se ha comentado que la resolución del sensor no presenta un problema, y se discutió en el apartado sobre ruido en las medidas cual era el grado de precisión de las medidas del sensor.

La ecuación correspondiente a la recta de esta segunda zona es la siguiente:

$$\text{Voltaje (Voltios)} = -0.21 + 2.16 \cdot \text{altura (metros)}$$

Ahora que con estas dos rectas se tiene un ajuste adecuado de la curva de transferencia del sensor, es posible calcular la curva de transferencia inversa del sensor, de manera que para un voltaje dado sepamos cuál es la altura correspondiente.

Para calcular la curva hallamos las rectas inversas a las que tenemos.

Puede calcularse fácilmente que estas rectas son:

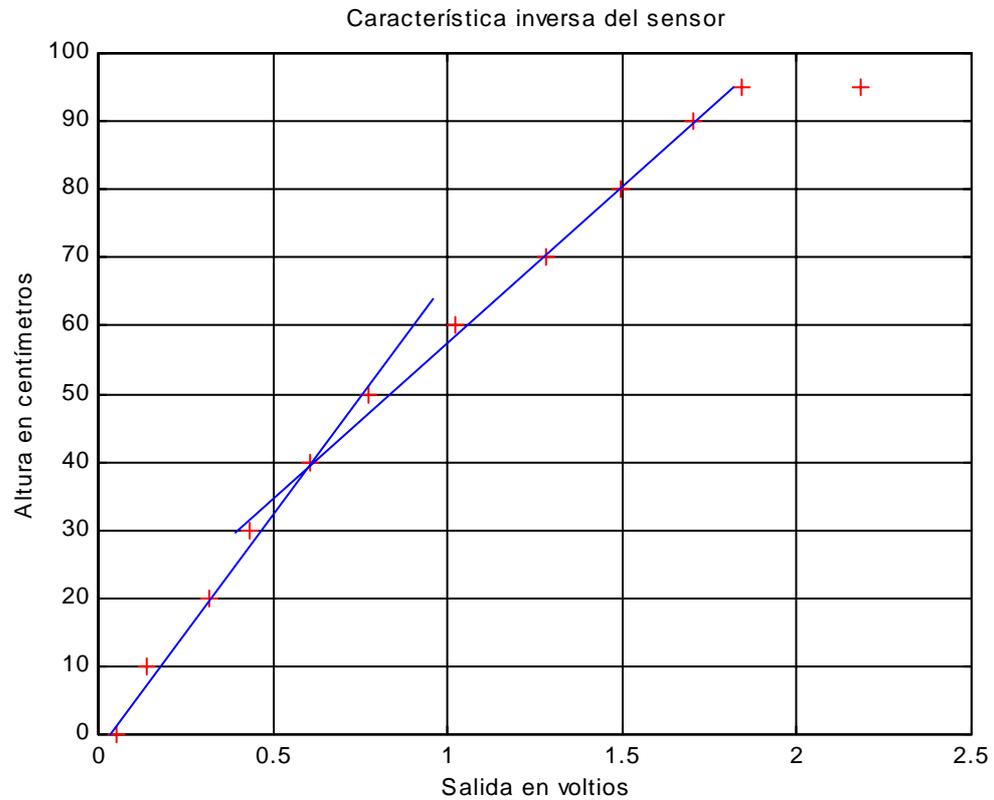
$$\textit{Altura (metros)} = -0.0466 + 0.6849 \cdot \textit{voltaje (voltios)}$$

para el intervalo: $0.068 < \textit{voltaje leído} < 0.648$ voltios

$$\textit{Altura (metros)} = 0.0972 + 0.463 \cdot \textit{voltaje (voltios)}$$

para el intervalo: $0.648 < \textit{voltaje leído} < 1.842$ voltios

En la gráfica número 2-12 se presenta la característica inversa representando con líneas azules las dos rectas, inversas de las anteriores, que ajustan dicha característica inversa.



Gráfica 2-12

Con el estudio de esta última particularidad del sensor, se termina el análisis de éste, en el cual se han abordado en profundidad los diferentes aspectos del problema que presenta un sensor real a la hora de obtener medidas fiables de éste.

En este caso particular se pueden observar los tres problemas más frecuentes que puede presentar un sensor real, y que son:

- presencia de ruido en las medidas.
- característica dinámica del sensor limitada en frecuencia.
- no linealidad del sensor.

Las soluciones a los problemas anteriores se han estudiado en los apartados pasados y son, respectivamente:

- utilización de filtros, paso de baja en este caso.
- utilización de una función de transferencia inversa, que no es posible en tiempo real (ya que es no causal).
- Utilización de una característica inversa que linealice el sensor.

No obstante, se debe tener en cuenta que estas soluciones no proporcionan un sensor ideal, y que las medidas realizadas con un sensor real siempre vendrán afectadas por un error. El objeto de dichas soluciones no es otro que mantener ese error por debajo de los límites necesarios para poder aprovechar la información que ofrecen las medidas y utilizarla a la hora tanto de obtener un modelo del sistema como de aplicar métodos de control que utilicen los datos suministrados por el sensor.

2.6 LA TARJETA DE ENTRADA/SALIDA

2.6.1 Descripción. Instalación

La tarjeta de entrada/ salida se utiliza para que el ordenador pueda leer datos del sistema y mandar datos al controlador. La tarjeta que se instaló fue el modelo DT2811 – PGH de la marca DATA TRANSLATION.

El modelo DT2811 es una tarjeta de gama baja puesto que es la que menos prestaciones ofrece de toda la familia de tarjetas de entrada / salida de esta marca. Sin embargo, cumple sobradamente con los requerimientos necesarios y es la más barata al ser la más sencilla. Por tanto, se ha elegido esta tarjeta por adecuarse a las necesidades del sistema.

Los modelos DT28xx se conectan al ordenador a través de ranuras ISA y ofrecen menor velocidad y capacidad que la siguiente familia, la DT30xx, que utiliza bus PCI para la comunicación con el procesador. Aunque en los modelos actuales de ordenador existen ranuras de ambos tipos, en los modelos antiguos no existe bus PCI lo que constituye una razón adicional para elegir una tarjeta de la familia 28xx, dado que la velocidad que se alcanza mediante un bus ISA es muy superior a la necesaria para este sistema.

Se ha elegido un modelo de la marca DATA TRANSLATION porque es el fabricante del cual hay un mayor número de tarjetas instaladas en el laboratorio de departamento, y ofrece más garantías al ser un producto ya conocido.

El modelo DT2811 permite llevar a cabo conversiones analógico/digital, digital/analógico y también posee canales digitales de entrada y salida.

Esta tarjeta y, en general, todas las tarjetas de entrada/salida de esta marca, se vende junto con los controladores necesarios para instalarla en ordenadores que posean Windows 3.x, Windows 95 o Windows NT. Para cada caso difiere la forma de instalación.

El ordenador en que se instaló para la realización del proyecto utilizaba Windows 95 como sistema operativo. Se describen a continuación los pasos necesarios para la instalación de la tarjeta en un ordenador con Windows 95.

Pasos a seguir para instalar la tarjeta:

1. Instalar la tarjeta en un ranura libre. Encender el ordenador e iniciar Windows.
2. Colocar el disquete con el controlador en la unidad de disco.
3. Abrir el **Panel de Control** y pulsar en **Añadir Nuevo Hardware**.
4. Pulsar no en detección automática de nuevo hardware y pulsar **Siguiente**.
5. Seleccionar **Controladores Multimedia** y pulsar **Desde Disco...**
6. Elegir de los ficheros de la unidad de disco el fichero “DT2811~1.inf” y pulsar OK.
7. Seguir los pasos automáticos de instalación.

Al instalar la tarjeta, se le pondrá un nombre, que, por defecto, es DT2811 y que más tarde servirá a la aplicación de control del sistema para identificar la tarjeta. Es conveniente no variar esta nombre, a menos que también se varíe en la aplicación, puesto que, si no coinciden, la aplicación no encontrará la tarjeta y no podrá trabajar.

Una vez instalada, la tarjeta se puede configurar como otro dispositivo cualquiera desde el panel de control de Windows. Se debe tener en cuenta sin embargo, que cambiar la configuración de la tarjeta desde el panel de control no es suficiente, sino que también deben colocarse los conmutadores de la tarjeta en las posiciones físicas correspondientes a esa configuración.

Los conmutadores de la tarjeta son una serie de pequeños interruptores que sirven para configurar físicamente la tarjeta. Se utilizan para seleccionar los rangos de los canales de entrada y de salida, para fijar la dirección base de la tarjeta, o para fijar el nivel de petición de interrupción de la tarjeta. Están configurados de fábrica y, en general, no es necesario variar esta configuración.

En concreto son 30 interruptores, del W1 al W30, y en el apartado referido a las capacidades de la tarjeta se detalla la función de los más importantes, y cómo se deben configurar.

Se pueden instalar múltiples tarjetas en un mismo ordenador, siempre que se les reserven posiciones distintas de memoria, y distintos canales de DMA (acceso directo a memoria) y de IRQ (interrupciones) En el caso del modelo DT2811 que no posee capacidad de DMA, no es necesario especificar un canal de DMA.

Naturalmente, hay que tener en cuenta el resto de dispositivos que tenga instalado el ordenador, y elegir un canal de DMA y un nivel de IRQ que no coincida con los elegidos por estos dispositivos. De hecho, muchos problemas de funcionamiento de dispositivos se producen por conflictos entre dos dispositivos que tienen asignados el mismo canal DMA o el mismo nivel de IRQ.

2.6.2 Capacidades. Funcionamiento

Una tabla con el listado de las capacidades de la tarjeta DT2811 se encuentra en el apéndice de este proyecto. Se comentan en este apartado las más importantes.

El modelo DT2811 posee los siguientes canales:

- 16 canales de entrada A/D en modo SE u 8 canales en modo DI. Más adelante se explica qué son los modos SE y DI.

- 2 canales de salida D/A.
- 8 canales de entrada digital.
- 8 canales de salida digital.

La tarjeta se divide en subsistemas. Existen cuatro subsistemas en la tarjeta:

- A/D : para las operaciones de entrada de señales analógicas al ordenador.
- D/A : para las operaciones de salida de señales analógicas desde el ordenador.
- DIN : para las operaciones de entrada de señales digitales al ordenador.
- DOUT : para las operaciones de salida de señales digitales desde el ordenador.

Las tarjetas de gama superior de esta familia tienen además de estos subsistemas un subsistema de entrada/salida en serie y un subsistema de contador/temporizador.

Dentro de un subsistema se pueden utilizar todos los canales que se quieran de los que estén destinados al tipo de operaciones que realiza el subsistema. Así, por ejemplo, dentro del subsistema A/D pueden usarse los canales que se deseen de los 16 canales de entrada de la tarjeta que existen en el modo SE.

La ventaja que presenta la división en subsistemas es que se tratan de forma independiente, tanto desde el punto de vista “hardware” como “software”. Un fallo en un subsistema no afecta a los demás subsistemas.

De los cuatro subsistemas que posee la tarjeta, durante el proyecto se han utilizado dos de ellos, el subsistema A/D y el subsistema D/A.

Las principales características del subsistema A/D son:

- 16 canales de entrada en modo SE (single-ended) u 8 canales de entrada en modo DI (differential). En el primer caso, todos los canales tienen una misma tierra. En el segundo, existe un terminal positivo y un terminal negativo diferentes para cada canal. Por defecto, la configuración es SE, y hay que cambiar los conmutadores de la tarjeta para cambiar la configuración. No se pueden tener canales DI y canales SE al mismo tiempo.
- Máxima velocidad de conversión A/D : 100 Hz. El modelo DT2811 no puede tomar más de 100 muestras por segundo. Esta velocidad es suficiente para el sistema de levitación, que tiene una dinámica lenta. La razón de su baja capacidad de muestreo es que no posee capacidad de DMA (acceso directo a memoria). Otras tarjetas de la misma familia sí poseen DMA.
- Mínima velocidad de conversión A/D : 1 Hz.
- Codificación de los datos en binario: el valor muestreado se codifica en binario. Tarjetas superiores de esta familia permiten elegir codificación en binario o en complemento a 2.
- Resolución no programable de 12 bits. Tarjetas de prestaciones superiores de esta familia incluyen programación de la resolución del conversor A/D de la tarjeta.
- Ganancia programable: puede programarse la ganancia para aumentar el rango de lectura de la tarjeta. Los valores permitidos son 1, 2, 4 y 8.
- Rango de lectura programable : pueden programarse tres rangos distintos: +5V/-5V, -2.5V/-2.5V y +5V/0V. También en este caso es necesario colocar los conmutadores de la tarjeta físicamente en la posición correcta antes de hacer el cambio a través del panel de control de Windows.

Las características de subsistema D/A son:

- 2 canales de salida con conversión D/A.
- Máxima velocidad de salida de datos: 50 kHz. La señal que envía el ordenador puede variar cada 20 millonésimas de segundo. Para este sistema es varias órdenes de magnitud superior a la velocidad necesaria.
- Mínima velocidad de salida: 1 Hz. Este valor se refiere a operaciones en modo continuo. En operaciones simples, el valor mandado permanece todo el tiempo como salida hasta que se sustituye por otro o se cierra la tarjeta.
- Ganancia no programable.
- Rango de salida programable : pueden programarse los mismos tres rangos que para el subsistema A/D, es decir, +5V/-5V, +2.5V/-2.5V y +5V/0V. Como los subsistemas son independientes, el rango programado en el subsistema A/D puede ser distinto al programado en el subsistema D/A.
- Resolución no programable : es aplicable lo dicho para el subsistema A/D.

Todas las capacidades del modelo DT2811 están o son ampliadas en los modelos superiores de esta familia de tarjetas, tanto en los DT28xx como en los DT30xx, y la tarjeta instalada para este proyecto puede ser sustituida por cualquier otra tarjeta de estas familias sin necesidad de modificar las conexiones o el programa.

La tarjeta permite dos modos diferentes de operación, que se denominan modo “single-value” y modo “continuous”.

En el modo “single value” se necesita mandar una orden a la tarjeta cada vez que se quiera muestrear un valor por el subsistema A/D o se quiera sacar un valor por el subsistema D/A. En el caso de sacar un valor, este valor permanece en el canal hasta que se sustituya por un nuevo valor con una nueva orden, o se mande una orden de cerrar la tarjeta, que resetea los registros.

En el modo “continuous”, se da una única orden para empezar a muestrear a una frecuencia previamente definida, y se sigue muestreando hasta que se recibe orden de terminar.

El modo que se utiliza para este proyecto es el modo “single value”, que permite muestrear la señal del sensor y sacar la señal de control cuando se desee, llevando a cabo la gestión del tiempo el programa de control.

Las tarjeta DT2811 se conecta al ordenador mediante un puerto ISA, y presenta al exterior un conector J1 de 50 pines. En el apéndice aparece una tabla con la función de cada uno de ellos, aunque se reseñan aquí los que se usaron durante la realización del proyecto:

- Pin 1, **Canal 0 A/D** : canal 0 de entrada a la tarjeta. Se conecta al terminal positivo de la salida del conversor I/V a través de la tarjeta interface.
- Pin 17, **Tierra analógica** : tierra común a los canales A/D. Se conecta al terminal negativo de la salida del conversor I/V a través de la tarjeta interface.
- Pin 22, **Salida DAC 0** : terminal positivo de la salida del conversor D/A 0 de la tarjeta. Se conecta al pin 4 (+REF IN) del PWM a través de la tarjeta interface.

- Pin 23, **Tierra DAC 0** : terminal negativo de la salida del conversor D/A 0 de la tarjeta. Se conecta al pin 5 (-REF IN) del PWM a través de la tarjeta interface.

La tarjeta interface se describe en el apartado referente a otros elementos. A pesar de que existen en el mercado tres paneles de conexiones que sirven para el DT2811, que son los modelos DT707, DT750 y DT752, se ha preferido realizar uno propio en el laboratorio.

La razón de no utilizar uno de los paneles comerciales no es sólo económica, dado que no ofrecen prestaciones que justifiquen su precio, sino que además, para este proyecto sólo es necesario realizar las conexiones de unos pocos terminales y un conector pequeño puede realizar la misma función que estos paneles, que en cambio ocuparían más espacio que la propia tarjeta de entrada/salida.

Los conmutadores que posee la tarjeta, y que definen su configuración, son 30 en total. En el apéndice se incluye una tabla con la función de cada conmutador (“jumper”) y su configuración de fábrica.

En concreto, los conmutadores W1 a W4 seleccionan el rango de salida del conversor D/A número cero. Los conmutadores W5 a W8 hacen lo mismo para el conversor D/A número 1. Vienen configurados de fábrica para que el rango de salida de ambos conversores sea de $-5V/+5V$.

Los conmutadores W9 a W15, W18, W22 y W30 seleccionan el rango y el modo de entrada para los canales A/D. Todos los canales A/D han de tener el mismo rango y el mismo modo de entrada puesto que no se pueden configurar por separado.

Por defecto, el rango de entrada de los canales A/D es de $-5V/+5V$, y el modo de entrada es SE (single-ended)

Los conmutadores W19 a W21, W23, W24 y W27 seleccionan la dirección base en que se sitúa la tarjeta dentro del espacio de direcciones de entrada/salida del ordenador. La tarjeta necesita ocho localizaciones contiguas y la dirección base apunta a la primera de ellas. Por defecto, la dirección base es la 218 en hexadecimal, con lo que la tarjeta ocupa de la 218 hasta la 21F en hexadecimal.

Por último, los conmutadores W25 a W26 y W28 a W29 seleccionan el nivel de petición de interrupciones (IRQ). Vienen configurados de fábrica para que el nivel de interrupción sea el 2.

Todos los conmutadores son fácilmente accesibles en la tarjeta. Para identificarlos en la tarjeta basta con buscar la inscripción correspondiente al conmutador buscado, que será W_i siendo i el número del conmutador. Para cambiar el estado del conmutador sólo hay que desplazarlo a la posición contraria a la que tiene actualmente

2.6.3 Software complementario. Programación de la tarjeta

Con la tarjeta vienen incluidos los controladores para Windows 3.x, Windows 95 y Windows NT. Con los controladores, la tarjeta puede ser instalada en cualquier ordenador que funcione bajo estos sistemas operativos.

Sin embargo, no existen órdenes para poder programar operaciones con la tarjeta. La única manera de mandar órdenes a la tarjeta es acceder directamente a los registros de la tarjeta a través del puerto correspondiente del ordenador. Naturalmente, esto es engorroso, y además se añade la dificultad de que Windows 95, y especialmente, Windows NT son sistemas operativos que controlan de manera muy restrictiva el acceso a los puertos que realizan los programas que se ejecutan. A diferencia de MS-DOS, el sistema operativo, no deja nunca de tener el control del sistema y puede no permitir un acceso directo a los registros.

Por tanto, si bien puede ser factible realizar una aplicación de control del sistema que realice la programación de la tarjeta mediante un acceso directo a sus registros, no es recomendable hacerlo.

Otra razones que aconsejan no realizar el acceso a la tarjeta de manera directa es la posibilidad de acceder de manera equivocada a los registros, con los peligros que conlleva si la tarjeta no está protegida contra sobretensiones.

Para facilitar la programación de la tarjeta, DATA TRANSLATION vende de manera separada un conjunto de bibliotecas DLL denominado *DataAcq SDK* (de “software development kit” : herramienta de desarrollo de programas) que encapsulan todas las operaciones que se pueden realizar con la tarjeta. De esta forma, el programa de control no accede directamente a los registros, sino que llama a las funciones de las bibliotecas DLL para que realice la tarea deseada.

Un archivo DLL es una biblioteca de enlace dinámico (del inglés, dynamic link library) y contiene una serie de funciones. Estos archivos *.dll* se encuentran en el directorio *system* de Windows.

Un biblioteca de enlace dinámico (DLL) tiene generalmente la extensión **.dll**, pero no es necesario que cumpla siempre esta regla. De hecho, es normal encontrar DLL como archivos con extensión **.ocx** y **.vbx**.

Una DLL realiza una función equivalente a la que tenían las bibliotecas de funciones en C, pero con más ventajas. En una biblioteca DLL se encuentran implementadas unas serie de funciones que realizan una serie de tareas, como puede ser, como en este caso, acceder a los registros de un dispositivo para configurarlo y manejarlo. Desde un programa se puede llamar a alguna función de la DLL para que realice la tarea que se desea.

La principal ventaja de las DLL es que se enlazan dinámicamente, es decir, el archivo *.dll* está en el subdirectorio “system” del directorio “Windows” (o también

puede estar en el mismo directorio que la aplicación), y no se carga en memoria hasta que una aplicación la llame, y es entonces cuando se incluye en el programa que llamó y se ejecuta la función pedida. Naturalmente, las DLL pueden ser compartidas por muchas aplicaciones, lo que permite ahorrar código y memoria. Por el contrario, es necesario asegurarse que el sistema operativo posea todas las DLL a las que haga referencia el programa que se quiere ejecutar, o el programa generará un mensaje de error.

Las DLL están en un formato estándar y pueden ser llamadas por cualquier programa, independientemente de que el programa se desarrolle en uno u otro lenguaje. No obstante, hay que conocer la sintaxis de las funciones de la DLL para poder hacer la llamada.

El DataAcq SDK contiene bibliotecas DLL para Windows 3.x, Windows 95 y Windows NT, y además incluye algunos programas de ejemplo en C++ para ilustrar su uso.

Las DLL para Windows 95 incluidas en DataAcq SDK son:

- Graph32.dll
- Oldaapi32.dll
- Olmem32.dll
- Oldaapi.dll
- Olmem.dll
- Olmemt16.dll
- Oldath16.dll
- Vdtdad.386

Estos ficheros deben estar en el directorio system de Windows del ordenador en el que se ejecute el programa de control del sistema o en el mismo directorio donde esté dicho programa.

Además de las DLL también se incluyen programas de ejemplo que ilustran la manera de llamar a las funciones de estas bibliotecas desde un programa en C++, y un manual con la sintaxis en C++ y el significado de todas las funciones de las bibliotecas y los procedimientos a seguir para operar con la tarjeta. Además se asegura por parte del fabricante que las bibliotecas han sido probadas con éxito para el compilador de C++ de Microsoft. Por esta razón el programa de control se desarrolló en Visual C++.

Utilizar el Data Acq SDK proporciona tres ventajas fundamentales sobre programar accediendo directamente a los registros.

La primera ventaja es la seguridad. Las DLL han sido desarrolladas por los mismos fabricantes de la tarjeta y probadas para tener la seguridad de que son correctas. No se corre peligro de acceder de manera errónea a los registros, con lo cual se elimina una potencial fuente de errores en el programa.

La segunda ventaja es que el programa resultante es independiente del modelo de tarjeta dentro de las familias DT28xx y DT30xx puesto que las funciones y su sintaxis son las mismas para todas las tarjetas. En caso de programar directamente los registros, el programa sólo sería válido para la tarjeta DT2811. Como esta tarjeta es la de menos prestaciones es razonable pensar que será la primera en ser descatalogada y no estaría disponible en el mercado.

La tercera ventaja es la sencillez en la programación. Al tener unas funciones con una sintaxis definida, sólo hay que llamarlas en la manera especificada sin necesidad de estudiar el funcionamiento interno de la tarjeta para poder programarla.

2.6.4 Ventajas y limitaciones

El modelo DT2811 es el de menores prestaciones de toda la gama de tarjetas de DATA TRANSLATION tanto en el número de subsistemas que posee como en las capacidades de cada uno de ellos, pero dado que dichas prestaciones son suficientes para el sistema objeto del proyecto se ha preferido a las demás tarjetas por ser la más económica.

Una ventaja de esta familia de tarjetas es que la programación a través del software Data Acq SDK hace independiente el programa de la tarjeta que esté instalada. Naturalmente, la tarjeta que esté instalada tiene que soportar las capacidades que le exija el programa. Como la tarjeta DT2811 es la más sencilla, se tiene la seguridad de que el programa que se ha desarrollado funcionará con las demás tarjetas puesto que éstas tienen mayores prestaciones, aunque es posible que el programa no aproveche todas las capacidades de una tarjeta superior.

Otra ventaja de esta familia de tarjetas es que pueden usarse en sistemas con Windows NT. Hoy día, el número de dispositivos con controladores para Windows NT es aún muy bajo debido a las grandes restricciones que existen en este sistema con el fin de garantizar su fiabilidad y seguridad, y que un dispositivo funcione bajo Windows NT representa una ventaja. Más aún, cuando en el laboratorio existen varios ordenadores que utilizan Windows NT.

Una desventaja de usar el modelo DT2811 es que no sirve para sistemas de dinámica rápida, dado que la máxima tasa de muestreo que puede alcanzar es de 100 muestras por segundo. Modelos superiores, en especial, los de la familia DT30xx sí son capaces de alcanzar un régimen de muestreo muy elevado gracias al uso de DMA.

Otra desventaja del modelo DT2811 es que no puede usar acceso directo a memoria. Esto representa una desventaja no sólo porque impide tener tasas de muestreo altas, sino porque cargan el uso del microprocesador en las tareas de lectura y escritura.

De nuevo hay que repetir que se ha elegido esta tarjeta porque el sistema levitador que se ha implementado y estudiado tiene una dinámica lenta, con lo cual los

procesos de lectura y escritura de la tarjeta no representan un porcentaje significativo del tiempo de CPU del ordenador.

2.7 EL AMPLIFICADOR – MODULADOR (PWM)

2.7.1 Descripción

El servo amplificador PWM es el aparato encargado de regular la intensidad que se proporciona al motor, con el fin de controlar la velocidad de giro del ventilador, aunque sea de un modo indirecto.

El PWM que se ha utilizado es el modelo 25A8E de la serie 25A de la marca ADVANCED MOTION CONTROLS. Este modelo necesita como alimentación una fuente de continua de entre 20 y 80 voltios y posee una corriente de pico de 25 A con 15 W de potencia de disipación. En el apéndice aparecen las características técnicas del modelo especificadas por el fabricante.

El método que sigue el PWM para regular la corriente que suministra al motor es la modulación de ancho de pulso (PWM en inglés). En esta modulación se produce un pulso de tensión fija (24 V) pero de duración variable. La duración del pulso determina el nivel de corriente de manera que el PWM ajusta la duración de los pulsos en cada momento para que la intensidad consumida por el motor sea igual a la intensidad deseada.

2.7.2 Conexiones. Modo de funcionamiento

El modelo 25A8E consta de un conector de 16 pines más cinco conectores aparte.

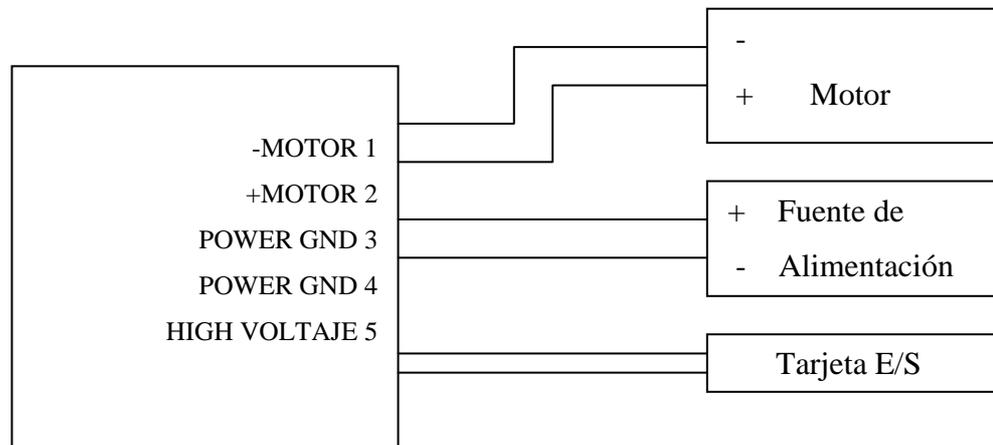
De los 16 pines del primero sólo es necesario conectar dos. Los dos pines son:

- Pin 4, **+REF IN**. Se debe conectar a la referencia positiva de la señal de tensión que sale de la tarjeta de E/S.
- Pin 5, **-REF IN**. Se debe conectar a la referencia negativa de la señal de tensión que sale de la tarjeta de E/S.

Los otros cinco conectores se utilizan todos, y son éstos:

- Conector 1, **-MOTOR**. Ha de conectarse al terminal negativo del motor.
- Conector 2, **+MOTOR**. Ha de conectarse al terminal positivo del motor.
- Conector 3, **POWER GND**. Ha de conectarse a la tierra de la fuente de alimentación. Es recomendable conectar también la tierra del motor si existe.
- Conector 4, **POWER GND**. Equivalente al conector 3. Permite tener más sitio donde conectar cables.
- Conector 5, **HIGH VOLTAJE**. Ha de conectarse al terminal positivo de la fuente de alimentación.

Dado que por los cables conectados a estos cinco terminales puede pasar una intensidad elevada para evitar accidentes es conveniente asegurarse que los cables tengan un grosor suficiente y que en las conexiones no quede el conductor al aire.



Dibujo 2-4

El PWM puede funcionar en varios modos, dependiendo de la posición de cuatro conmutadores que posee:

- modo corriente
- modo voltaje
- compensación IR
- modo tacómetro

El modo que se debe utilizar para controlar el motor, que es de corriente continua, es el modo de corriente. En este modo el PWM proporciona una intensidad de corriente que es proporcional a una señal de tensión de referencia. La señal de tensión le será suministrada al PWM por la tarjeta de E/S. Se garantiza que la intensidad suministrada no depende de la carga del motor gracias a un bucle interno de realimentación en el PWM.

Para que funcione en modo corriente se deben poner en posición “off” los dos primeros conmutadores y en “on” el tercero, siendo indiferente la posición del cuarto:

Conmutadores 1 y 2 : off

Conmutador 3 : on

El PWM incorpora además cuatro potenciómetros que son los siguientes:

- Potenciómetro 1, **LOOP GAIN**. No se usa en el modo “current mode”.
- Potenciómetro 2, **CURR LIMIT**. Ajusta el límite tanto de la corriente continua como de la corriente de pico (ya que una es el 50% de la otra) El límite aumenta girando el tornillo del potenciómetro en sentido horario.
- Potenciómetro 3, **REF IN GAIN**. Ajusta la ganancia respecto a la referencia, es decir, la razón existente entre la señal de entrada (voltaje) y la señal de salida (corriente). Se incrementa girando el tornillo en sentido horario.
- Potenciómetro 4, **TEST / OFFSET**. Ajusta el nivel de offset de la señal de referencia.

Los potenciómetros se ajustaron a niveles adecuados mediante pruebas en sucesivos experimentos. Para evitar que se moviesen accidentalmente se les colocó una protección. Sin embargo, en caso de ser necesario ajustarlos se puede hacer, con la ayuda de un voltímetro, de la siguiente manera:

Primero se ajustará el potenciómetro cuatro, correspondiente al nivel de offset. Para ello se debe mandar al PWM una señal de referencia (terminales +REF IN y –REF IN) de cero voltios. Para dicha señal, el valor de tensión continua que se mide entre los terminales +MOTOR y –MOTOR ha de ser de –0.23 voltios. Se irá moviendo el tornillo correspondiente al potenciómetro de offset, el cuatro, hasta que el voltímetro, conectado a los terminales +MOTOR y –MOTOR marque –0.23 voltios.

A continuación se procederá a ajustar el potenciómetro tres, que controla la ganancia respecto a la referencia. Para ello, se aplicará una señal de referencia de 2

voltios, y se debe mover el tornillo del potenciómetro tres hasta que el voltímetro marque 1.15 voltios. Eso significa una ganancia de $1.15 - (-0.23)$ dividido entre 2, que resulta 0.69.

Para comprobar el ajuste se puede aplicar una señal de referencia de cuatro voltios y se verificará que el voltímetro marca $4 * 0.69 - 0.23 = 2.53$ voltios.

Nótese que se habla de valor de continua y no de alterna. Naturalmente, la salida del PWM es una onda compuesta por pulsos positivos y negativos de 24 voltios y -24 voltios, respectivamente. El voltímetro lo único que hace es medir el valor de continua de esa señal, que será distinto de cero en cuanto que los pulsos positivos tienen una duración distinta a los pulsos negativos.

Al usar los valores de continua para realizar el ajuste simplemente se está aprovechando la correspondencia unívoca entre la duración de los pulsos positivos de una señal de este tipo frente a la de los negativos y el valor de continua de dicha señal.

Mediante un osciloscopio también podría realizarse un ajuste basado en la duración de los pulsos, pero el sería más complicado y se conseguiría un resultado equivalente.

2.7.3 Ventajas y limitaciones

El PWM presenta dos ventajas importantes derivadas de que realice la regulación mediante la modulación por ancho de pulso, y es que la regulación es rápida ya que la frecuencia de la onda modulada es de 22 kHz, y que el consumo de energía es reducido porque sólo se suministra la potencia que es tomada por el motor. También es una ventaja el gran rango de tensiones de alimentación que permite, desde 20 a 80 V.

Otras ventajas adicionales son su coste y su tamaño reducido. Y más particularmente es también una ventaja que existan varios PWM en el laboratorio, lo que facilita una eventual sustitución en caso de fallo.

La principal desventaja de este modelo es la dificultad de detectar un fallo en el PWM, como, por ejemplo, un fallo en el bucle de realimentación interna, puesto que aunque el PWM incorpora un LED que pasa de verde a rojo para indicar si está fallando o si existe algún cortocircuito, este LED puede estar en verde y funcionar mal el PWM.

En casos de fallo en el sistema se recomienda comprobar de nuevo el comportamiento del sistema sustituyendo el PWM existente por otro.

2.8 OTROS ELEMENTOS

2.8.1 Tarjeta conversora I/V

La tarjeta conversora de intensidad a tensión consiste en un circuito que transforma una señal de entrada en intensidad que está comprendida en un rango de entre 4 y 20 mA a una señal en tensión proporcional a la señal de intensidad.

Para una entrada de 4 mA la salida de la tarjeta es de 0 V y para una entrada de 20 mA la salida de la tarjeta es de 6.88 V. Este valor de salida es bastante arbitrario y obliga a incluir después un divisor de tensión para que los valores que le lleguen a la tarjeta estén dentro del rango que permite ésta.

La razón de utilizar esta tarjeta a pesar del inconveniente anterior es que ya estaba instalada en el sistema lo que evitaba tener que diseñar y fabricar una nueva exclusivamente para el sistema.

Otra ventaja de esta tarjeta es que en el laboratorio del departamento se han venido utilizando habitualmente tarjetas idénticas sin que diesen problemas.

Para que funcione correctamente se necesita alimentar la tarjeta con una fuente de tensión continua de 15 voltios.

2.8.2 Interface entre tarjeta y PWM y sensor

Aunque existen placas conectoras en el mercado diseñadas expresamente para la tarjeta de entrada / salida, como sólo se necesita conectar físicamente con cuatro de los pines de la tarjeta resulta sencillo y más barato hacer un conector específico que sirva de interface entre la tarjeta y el PWM y entre la tarjeta y el sensor (concretamente entre la tarjeta y el conversor I/V.)

De todas maneras era necesario hacer un circuito para implementar el divisor de tensión que reduce el rango de salida de la tarjeta convertora a unos niveles aceptados por la tarjeta.

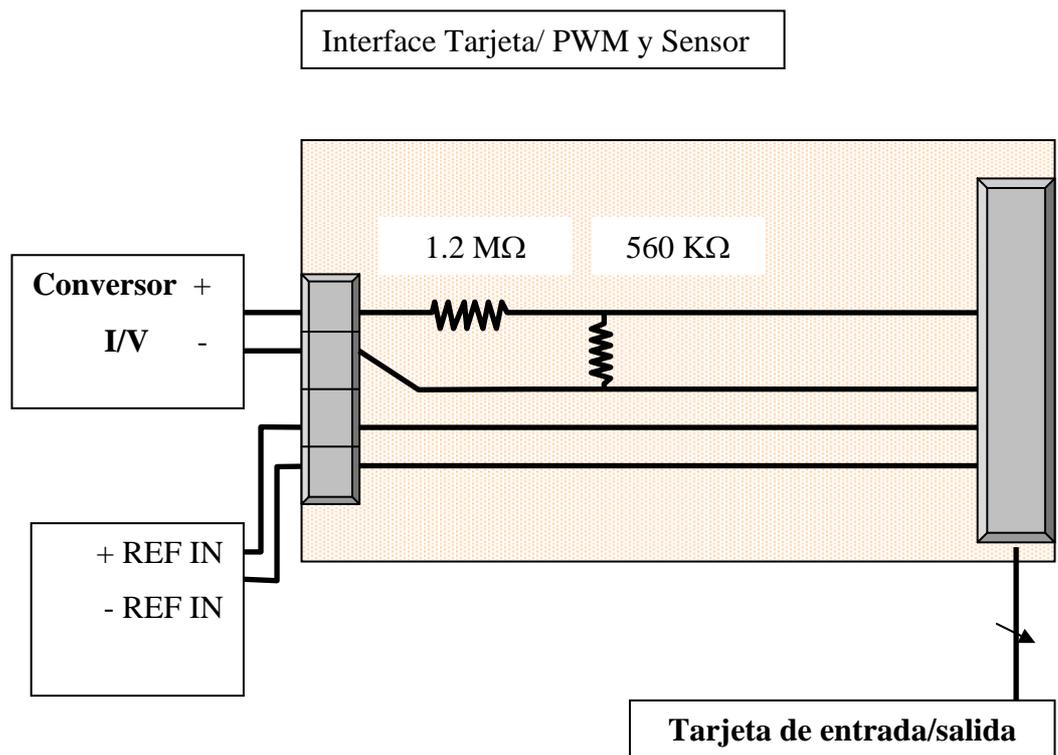
El conector que usa la tarjeta es un conector tipo J1 con 50 pines que ya se describió en el apartado referente a la tarjeta. De esos 50 pines se utilizan estos:

- Pin 1, **Canal 0 A/D**. Terminal positivo del canal de entrada 0 al conversor A/D. Debe conectarse con el terminal positivo de la salida de la tarjeta que convierte la señal de intensidad del sensor en señal de tensión.
- Pin 17, **Tierra analógica**. Tierra común para todos los canales de entrada al conversor A/D. Debe conectarse al terminal negativo de la salida de la tarjeta convertora.

- Pin 22, **Salida DAC0**. Terminal positivo del canal de salida del conversor D/A número 0 de la tarjeta. Debe conectarse al pin 4 (**+REF IN**) del PWM.
- Pin 23, **Tierra DAC0**. Tierra del canal de salida del conversor D/A número 0 de la tarjeta. Debe conectarse al pin 5 (**-REF IN**) del PWM.

Además entre la salida de la tarjeta conversora y el canal A/D debe estar el divisor.

Por tanto , la tarjeta tiene el diagrama siguiente:



Dibujo 2-5

El relación que introduce el divisor de tensión entre la salida del conversor I/V y la tensión que hay en el canal 0 del conversor A/D es:

$$v_{sal} = \frac{560}{(560 + 1200)} \cdot v_{ent} = 0.318 \cdot v_{ent}$$

El valor máximo que leerá la tarjeta será $v_{\max} 0.318 \cdot 6.88 \text{ V} = 2.19 \text{ V}$

2.8.3 Fuentes de alimentación

Aparte de la red general de distribución se utilizan dos fuentes de alimentación adicionales.

La primera fuente sirve para alimentar el PWM y proporciona la potencia necesaria para que el ventilador gire. Es una fuente de tensión continua de la marca Grelco. Da una tensión continua de 24 V estabilizada y puede suministrar una intensidad de hasta 20 A, que es más que suficiente para alimentar el PWM.

También está protegida contra cortocircuitos y además lleva un fusible de protección.

La ventaja de esta fuente es que puede dar una tensión estable sin presentar problemas por la carga que se le conecte. El inconveniente que presenta es su gran tamaño que hace imposible integrarla dentro la carcasa que contiene el sistema.

La segunda fuente que se utiliza es el modelo PE 1542 de Philips, que es una fuente variable de tensión (entre 0 y 15 V) o de intensidad (entre 0 y 1 A) en dos de sus salidas, con una tercera salida que sirve como fuente variable de tensión (entre 0 y 7 V) o de intensidad (entre 0 y 3 A).

Esta fuente alimenta el circuito conversor de intensidad a corriente, y también se ha utilizado para realizar pruebas conectándola directamente como señal de referencia

para el PWM. En ambos casos se ha utilizado una de las dos primeras salidas, como fuente de tensión continua.

No se debe usar esta fuente para alimentar el PWM porque no puede suministrar la corriente que pide el PWM en los momentos en que se produce un pico de corriente.