

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
LEVITACIÓN NEUMÁTICA**



**JHON ANDERSON DÍAZ FERNÁNDEZ
OSCAR JAVIER QUIÑONES MENESES**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
POPAYÁN
2010**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
LEVITACIÓN NEUMÁTICA**

**JHON ANDERSON DÍAZ FERNÁNDEZ
OSCAR JAVIER QUIÑONES MENESES**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de:
INGENIERO EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL**

**ING. VÍCTOR HUGO MOSQUERA
Director del trabajo de grado**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
POPAYÁN
2010**

NOTA DE ACEPTACION

-

-

-

-

-

-

ING. VICTOR HUGO MOSQUERA
LEYTON
Director trabajo de grado

JURADO

JURADO

Popayán, Agosto 18 de 2010.

Agradecimientos

Hoy al finalizar esta etapa de nuestras vidas manifestamos sentimientos de gratitud a todas aquellas personas que apoyaron incondicionalmente este sueño.

En especial a Dios por guiar nuestro camino y a nuestras familias por el apoyo, la confianza y el amor.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1	LEVITACIÓN.....	1
1.2	INTRODUCCION AL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.....	1
1.3	ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS DE LEVITACION NEUMATICA.....	2
1.3.1	Position Control of a Pneumatic Levitation System.....	2
1.3.2	Levitating Beachballs.....	2
1.3.3	Levitadores Neumáticos Acoplados, Estudios de Estabilidad.....	2
1.4	ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFIA.....	3
2.	DISEÑO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.....	4
2.1	BLOQUE DE SENSADO. SENSOR DE ULTRASONIDO.....	4
2.1.1	Principio de funcionamiento.....	5
2.1.2	El módulo SRF05.....	7
2.2	PLANTA. LEVITADOR NEUMÁTICO.....	11
2.2.1	Ventilador helicoidal.....	11
2.2.2	Direccionador de flujo (Panal de abejas).....	13
2.2.3	Objeto levitante.....	14
2.2.4	Ducto de área variable.....	16
2.2.5	Contractor.....	21
2.3	BLOQUE DE ENTRADA. INGRESO DE DATOS PARA EL VALOR DESEADO DE LA VARIABLE CONTROLADA.....	22
3.	MODELADO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.....	24
3.1	MODELADO DE LA PLANTA.....	24
3.1.1	Preliminares sobre dinámica de fluidos.....	24
3.1.2	Modelado de la planta.....	31
3.1.2.1	Método Ecuaciones Navier-Stokes.....	31
3.1.2.2	Método Dinámica de fluidos computacional.....	32
3.1.2.3	Método Sistema de fuerzas.....	32
3.1.2.3.1	Fuerza de Fricción F_r	34
3.1.2.3.2	Fuerza de propulsión F_P	45
3.1.2.3.3	Fuerza perdidas en la expansión F_{PE}	47
3.2	CARACTERIZACION DEL SENSOR ULTRASONIDO.....	49
3.3	CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR. VENTILADOR HELICOIDAL, DIRECCIONADOR DE FLUJO Y CONTRACTOR.....	50
3.4	MODELADO TOTAL DEL SISTEMA DE LEVITACION.....	52
4.	SIMULACION DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.....	55
4.1	SIMULACIÓN DE LA PLANTA (LEVITADOR NEUMÁTICO).....	55
4.2	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA EN MALLA ABIERTA.....	57
4.3	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA EN MALLA CERRADA.....	59

4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
5.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA.....	62
5.1	IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE DE SENSADO.....	62
5.1.1	Despliegue de la distancia mediante un LCD.....	63
5.1.2	Obtención de la distancia en voltaje.....	64
5.2	IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ENTRADA PARA EL INGRESO DEL VALOR DESEADO DE LA VARIABLE CONTROLADA.....	65
5.2.1	Obtención del valor deseado de altura en voltaje	67
5.2.2	Despliegue de la distancia mediante un LCD.....	68
5.3	IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA.....	68
5.3.1	Ventilador Axial.....	68
5.3.2	Base Ventilador Axial	68
5.3.3	Direccionador de flujo.....	69
5.3.4	Contractor	69
5.3.5	Base del contractor	70
5.3.6	Ducto de área variable.....	70
5.3.7	Circuito de Potencia	71
5.3.8	Circuito restador.....	71
5.3.9	Circuito de tarjeta principal.....	72
5.3.10	Fuente de voltaje.....	74
6.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.....	79
6.1	SINTONIZACIÓN PID.....	82
6.2	PRUEBA DEL CONTROLADOR CON DISTURBIO.....	84
6.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
CONCLUSIONES		
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		
ANEXO A		
ANEXO B		
ANEXO C		
ANEXO D		
ANEXO E		
ANEXO F		
ANEXO G		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de planta – Levitador neumático.....	2
Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.	4
Figura 2.2. Capsula emisora o receptora de un sensor de ultrasonido.....	5
Figura 2.3. Efectos del ángulo de medida del sensor ultrasonido.....	6
Figura 2.4. Efecto de la reflexión en sensor de ultrasonido.	7
Figura 2.5. Sensor de ultrasonido SRF05.....	7
Figura 2.6. Conexiones del SFR05.	8
Figura 2.7. Diagrama de tiempos, sin emplear pin “Modo”.	9
Figura 2.8. Diagrama de flujo para obtención de la salida del sensor de ultrasonido.	10
Figura 2.9. Principales tipos de ventiladores.	11
Figura 2.10. Ventilador helicoidal de 24 VDC	12
Figura 2.11. Flujo de aire vs presión estática	12
Figura 2.12. Geometría del direccionador de flujo.	13
Figura 2.13. Direccionador de Flujo.....	14
Figura 2.14. Formas evaluadas para el objeto levitante.	14
Figura 2.15. Posición del perfil aerodinámico en el interior del ambiente cerrado.	15
Figura 2.16. Objeto levitante, esfera de poliestireno expandido	16
Figura 2.17 Distribución de presión en ductos.....	17
Figura 2.18. Circuito sensor diferencial de presión.....	18
Figura 2.19. Relación de áreas y ángulo de difusión en ducto de área variable.	19
Figura 2.20. Estructura física ducto de diámetro variable.	19
Figura 2.21. Perfil de velocidad, flujo laminar.	20
Figura 2.22. Contractor del sistema de levitación neumática.....	22
Figura 2.23. Conexión de un teclado matricial a un microcontrolador..	23
Figura 2.24. Diagrama de flujo para obtención de la salida del teclado matricial.	23
Figura 3.1. Flujo externo sobre un perfil aerodinámico.....	27
Figura 3.2. Esfera dentro de un ducto horizontal..	27
Figura 3.3. Notación para la condición de frontera en una frontera fija.....	28
Figura 3.4. Notación para la condición de frontera en una frontera móvil.	29
Figura 3.5. Punto de separación y frontera de capa limite.....	30
Figura 3.6. Estela formada detrás de un perfil aerodinámico.....	30
Figura 3.7. Gradiente de velocidad en fluidos.....	31
Figura 3.8. Sistema de fuerzas sobre la esfera.....	33

Figura 3.9. Ducto de área variable. Interacción del fluido con la esfera.....	34
Figura 3.10. Representación capa límite sobre esfera.....	35
Figura 3.11. Espesor de la capa limite.....	35
Figura 3.12. Superficie de contacto entre el fluido y la esfera.	38
Figura 3.13. Proyección del área de no contacto.....	38
Figura 3.14. Área superficial cónica de área de control.	41
Figura 3.15. Puntos de referencia del área superficial cónica del ducto de área variable	42
Figura 3.16. Masa del fluido en el ducto de área variable.....	46
Figura 3.17. Respuesta sensor de ultrasonido.	50
Figura 3.18. Grafica de voltaje vs velocidad. Ventilador 24 vdc.....	52
Figura 3.19. Diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.	53
Figura 4.1. Simulación con velocidad de entrada de 2 m/s.....	55
Figura 4.2. Simulación con velocidad de entrada de 2.8 m/s.....	56
Figura 4.3. Simulación con velocidad de entrada de 3.4 m/s.....	56
Figura 4.4. Simulación con velocidad de entrada de 3.7 m/s.....	57
Figura 4.5 Simulación del Sistema de levitación neumática en malla abierta.	57
Figura 4.6. Simulación del sistema de levitación, velocidad de entrada $v = 3.6$ m/s.	58
Figura 4.7. Simulación del sistema de levitación, voltaje de entrada 8 voltios.....	58
Figura 4.8. Sistema de levitación neumática en malla cerrada.	59
Figura 4.9. Respuesta del sistema de levitación neumática, 10 cm.....	59
Figura 4.10. Respuesta del sistema de levitación neumática, 20 cm.....	60
Figura 4.11 Respuesta del sistema de levitación neumática, 30 cm.....	61
Figura 5.1. Diagrama de tiempos original del sensor de ultrasonido.	62
Figura 5.2. LCD 2x16: está compuesto por 2 líneas de 16.	63
Figura 5.3. Circuito para adquisición de datos del sensor sfr05.	65
Figura 5.4. Teclado matricial 4x3.....	66
Figura 5.5. Circuito para obtención del valor deseado de la variable controlado...	67
Figura 5.6. Ventilador Helicoidal 24 VDC.....	68
Figura 5.7. Soporte para el ventilador helicoidal.	69
Figura 5.8. Direccionador de Flujo	69
Figura 5.9. Contractor de acrílico.....	70
Figura 5.10. Base del contractor y direccionador de flujo.	70
Figura 5.11. Ducto de diámetro variable.	71
Figura 5.12. Circuito restador, circuito de potencia.....	72
Figura 5.13. Tarjeta principal sistema de levitación neumática.....	72

Figura 5.14. Plano eléctrico y componentes de la tarjeta principal.	73
Figura 5.15. Circuito rectificador de voltaje AC a DC.....	74
Figura 5.16. Circuito de la fuente de voltaje.....	75
Figura 5.17. Circuito reductor.....	76
Figura 5.18. Fuente de voltaje.	76
Figura 5.19. Base del sistema de levitación neumática.	77
Figura 5.20. Vista frontal sistema de levitación neumática.	77
Figura 5.21. Vista lateral del sistema de levitación neumática.....	78
Figura 6.1 Respuesta del sistema ante una entrada escalón de 8 voltios.	80
Figura 6.2. Respuesta del sistema ante una entrada escalón de 10 voltios.....	81
Figura 6.3 PID serie para el sistema de levitación neumática.	81
Figura 6.4. Plano eléctrico circuito PID.....	81
Figura 6.5 Circuito controlador PID.....	83
Figura 6.6 Secuencia para un <i>setpoint</i> de 10 cm.....	83
Figura 6.7 Secuencia para un <i>setpoint</i> de 30 cm.....	84
Figura 6.8 Reja de disturbio del sistema de levitación neumática.....	86
Figura 6.9 Secuencia de corrección de disturbio.	85
Figura D 1. Interruptor del sistema de levitación neumática	20
Figura D 2. Tablero de mandos y diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.	21
Figura D 3. Tornillos de ensamble del sistema de levitación neumática	21
Figura D 4. Tarjeta principal del sistema de levitación neumática. Trimers de calibración del sensor y <i>setpoint</i> .	
Figura D 5. Conexionado del sistema de levitación neumática en malla abierta.	
Figura E 1. Anemómetro utilizado para registrar las velocidades a la salida del anemómetro.	
Figura E 2. Pesa para registrar el valor de la masa de la esfera .	
Figura E 3. Transportador utilizado para medir el ángulo de inclinación del ducto.	
Figura E 4. Ángulo de desprendimiento de capa límite, obtenido del CFD.	25
Figura F 1. Controlador PID y sus ganancias.	
Figura G 1. Representación de la interacción entre el fluido y esfera.	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas del sensor SRF05.	8
Tabla 2. Conexiones del SFR05.	9
Tabla 3. Características técnicas de la esfera.	20
Tabla 4. Relación de diámetro y grados del cono para pérdidas por expansión....	48
Tabla 5. Datos en tiempo real del sensor de ultrasonido.	49
Tabla 6. Datos en tiempo real del ventilador. Longitud del ducto: 5 cm.....	51
Tabla 7. Ganancias y rangos del actuador.	512
Tabla 8. Conexión del modulo LCD	64
Tabla 9. Valores de sintonización para el primer rango.	82
Tabla 10. Valores de sintonización para el segundo rango.	83
Tabla 11. Valores de sintonización para el tercer rango.	84

1. INTRODUCCION

1.1 LEVITACIÓN.

Se denomina levitación al efecto por el que un cuerpo u objeto se halla en suspensión estable en el aire, sin mediación de otro objeto físico en contacto con el primero que sustente al que levita o "flota". Para que tenga lugar la levitación en presencia de un campo gravitatorio, es preciso:

- a) Una fuerza que contrarreste el peso del cuerpo (la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto que levita).
- b) Para que se halle en suspensión estable, es necesaria una fuerza adicional que contrarreste cada pequeño desplazamiento del objeto en levitación.

1.2 INTRODUCCION AL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA.

Se conoce que la levitación neumática, consiste en la utilización de la presión de un gas sobre materiales u objetos con el fin de contrarrestar la fuerza gravitatoria, de modo que aquellos se mantengan estables sin necesidad de contacto físico con ninguna parte del contenedor que los aloja. [1]

Este proyecto busca construir un prototipo (sistema de levitación neumática) que aplique el concepto anterior en el cual el objeto a levitar se encuentre en un ambiente cerrado y en suspensión estable; con el fin de controlar la posición del objeto a levitar dentro del ambiente cerrado y proveer una herramienta académica para evaluar estrategias de control.

Finalmente, para lograr construir el prototipo de levitación neumática en ambiente cerrado y suspensión estable, se divide este proyecto en 5 etapas las cuales son: el Diseño, etapa de gran importancia debido a que se debe garantizar la estabilidad de la planta teniendo en cuenta las consideraciones físicas, eléctricas y electrónicas del mismo; Modelado, que determina el modelo de la planta (levitador neumático) y una vez terminadas las 2 primeras etapas se procede a la Simulación de la planta, la Construcción y pruebas de funcionamiento del sistema (prototipo). Cada etapa será presentada en cada uno de los capítulos de este proyecto.

1.3 ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS DE LEVITACION NEUMATICA.

El campo de la levitación neumática es un campo que está en proceso de desarrollo y son muy pocas las aplicaciones en las cuales se han aprovechado sus beneficios. Los siguientes antecedentes están orientados a trabajos académicos de investigación de maestrías, los cuales se presentan en los siguientes ítems:

1.3.1 *Position Control of a Pneumatic Levitation System.*

Este trabajo realizado como un aporte a las XXV jornadas de automática en Ciudad Real España. Presenta un sistema de levitación con una arquitectura que se compone de un ventilador centrífugo accionado por un motor de corriente alterna conectado a un variador de velocidad, que recibe el valor de consigna emitido por un autómata programable; este toma decisiones a partir de la medida de la altura del objeto en movimiento en dirección de la corriente de aire; y esta medida es transmitida por un sistema de visión de máquina que captura imágenes a la salida del sistema. Finalmente el PC se comunica con el autómata programable, transmitiéndole la medida de altura del objeto en movimiento [2]. Este sistema de levitación se puede ver en la figura 1.1.

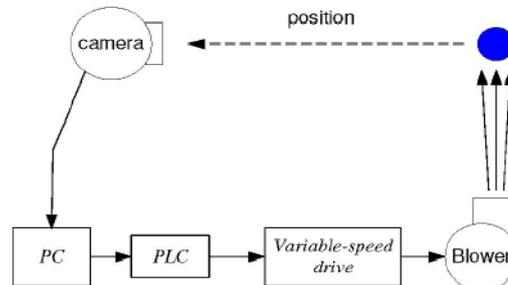


Figura 1.1 Esquema de planta – Levitador neumático. Fuente: ESCAÑO, Juan M. ORTEGA, Manuel G. RUBIO, Francisco R. (2004).

1.3.2 *Levitating Beachballs.*

Este proyecto realizado en Joseph Henry Laboratories, Princeton University, New Jersey, Estado Unidos, consigue modelar el punto de equilibrio en dirección vertical y horizontal de una esfera que levita en ambiente abierto; considerando un caudal de aire incomprensible y laminar. [3].

1.3.3 *Levitadores Neumáticos Acoplados, Estudios de Estabilidad.*

En este trabajo de maestría se modela un sistema compuesto por levitadores neumáticos acoplados y se estudia su estabilidad con el método directo de

Lyapunov, para encontrar la familia de funciones de *Lyapunov* se usan técnicas como la suma de cuadrados. Además, se plantea un posible criterio de estabilidad del sistema en base a teorías de sistemas no lineales. Algunos de los elementos utilizados son ventiladores y tuberías PVC para conectar los levitadores [4].

1.4 ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFIA.

Conociendo el concepto de levitación y los requerimientos del sistema de levitación neumática, este trabajo se divide en los siguientes capítulos teniendo en cuenta las 5 etapas del ítem 1.2; cada etapa se desarrolla en los capítulos de esta monografía, a partir del presente capítulo. El capítulo 2 abarca el diseño del sistema de levitación neumática teniendo en cuenta las consideraciones físicas, eléctricas y electrónicas. Siguiendo con el capítulo 3 que aborda el modelado de la planta (levitador neumático) previamente diseñado. Posteriormente en el capítulo 4 se presenta la simulación del modelo de la planta (levitador neumático) y el Sistema de Levitación Neumática en malla abierta y malla cerrada. Concluidas las anteriores etapas en el capítulo 5 se procede a construir un prototipo, que cumpla con las consideraciones físicas, eléctricas y electrónicas. Este prototipo se evalúa en malla abierta y mediante un controlador PID se evalúa en malla cerrada, en el capítulo 6. Finalmente se analizan los resultados obtenidos.

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA

Para diseñar el sistema de levitación neumática se empezó por estudiar cada uno de los bloques que contempla un sistema de control, ver figura 2.1, los cuales son: bloque de sensado, bloque de ingreso de datos para la señal de referencia, la planta (levitador neumático), y un bloque de control que analizara en detalle en el capítulo 6.

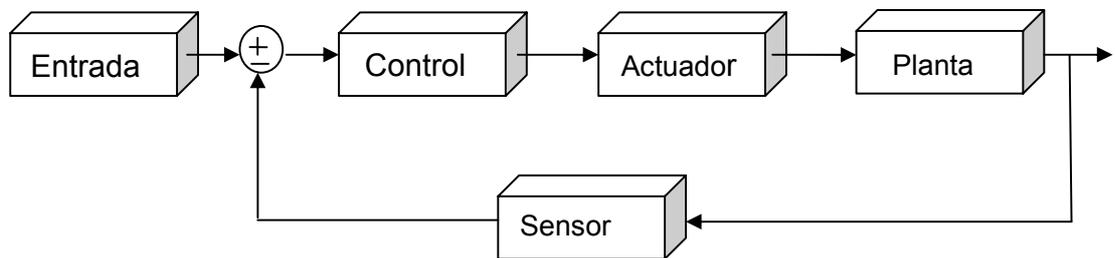


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.

Cada bloque del lazo de control es tratado en los siguientes ítems los cuales expresan los requerimientos que se tuvieron en cuenta para la elección de los componentes que conforman el sistema de levitación neumática; cada uno de los componentes es evaluado en detalle por medio de pruebas y mediciones.

2.1 BLOQUE DE SENSADO. SENSOR DE ULTRASONIDO.

La elección del sensor primario se determina a partir de las características de funcionamiento en el sistema. De las opciones que se analizaron para la elección de este elemento primario se destacan, el sensor laser, el sensor óptico, cámara de video y el sensor de ultrasonido. A partir de estos sensores se determinó que uno de los requerimientos para el funcionamiento de este sensor, era que no necesitara de la conexión con el computador, debido a los retardos en la información, por lo cual la cámara de video, se descartó por este requerimiento. Además, se necesitaba flexibilidad en la calibración, lo cual tanto el sensor laser como el sensor óptico, no proporcionaban esta ventaja, debido a que estos son calibrados por la fábrica que los produce. Por el contrario, el sensor de ultrasonido permite que mediante un microcontrolador el sensor pueda conectarse y comunicarse con el fin de realizar el control del sensor y además permitir que mediante cualquier lenguaje de programación como *Assembler* o *C*, se pueda calibrar el rango de medida, pero con la precisión del fabricante del sensor.

La elección del sensor de ultrasonido en el bloque de sensado se realiza teniendo en cuenta: la flexibilidad en la calibración, rango de medida, instalación sin causar perturbación a la planta (tamaño), bajos costos de operación y sobre todo sin necesidad de conexión con PC ya que generaría retardos de procesamiento en la información. Una fotografía de un sensor de este tipo aparece en la figura 2.2.



Figura 2.2. Capsula emisora o receptora de un sensor de ultrasonido.

2.1.1 Principio de funcionamiento.

Los ultrasonidos son antes que nada sonido, exactamente igual que los que se oyen normalmente, salvo que tienen una frecuencia mayor que la máxima audible por el oído humano. Para este bloque se trabaja con un sensor de ultrasonido a 40 KHz. El funcionamiento básico de los ultrasonidos como medidores de distancia consiste en un transmisor que emite un pulso de ultrasonido sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos. La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la fórmula [5]:

$$d = \frac{1}{2}ct \quad (2.1)$$

Donde d es la distancia al objeto, c es la velocidad del sonido en el aire, y t es el tiempo que tarda la señal desde que se emite hasta que se recibe. La velocidad del sonido depende de la temperatura y se calcula aproximadamente:

$$c = c_0 + 0.6T \text{ m/s} \quad (2.2)$$

Donde T viene dado en grados Celsius y c_0 es la velocidad del sonido al aire libre es 331 m/s. Además, este tipo de sensores tiene unas limitaciones que son necesarias conocer a la hora de utilizar [5]:

a) La velocidad del sonido es variable: la ecuación (2.1) es una aproximación, ya que la velocidad del sonido también viene afectada por la densidad del aire, la humedad y la concentración de polvo en el aire. En entornos típicos la velocidad del sonido puede variar un 2% de un lugar a otro.

b) El tiempo en blanco: Es necesario guardar un pequeño tiempo desde que se emite hasta que se prepara al receptor para recibir, con el objetivo de que no se vea influenciado por la onda que sale del emisor. Este tiempo se denomina tiempo en blanco, y generalmente limita la medida mínima de distancia de 3 a 15 cm dependiendo de la potencia de la señal emitida.

c) La atenuación: La onda ultrasónica que sale del emisor se va dispersando y atenuando según avanza en el medio, de manera que cuanto más tarda el eco en llegar al receptor, más débil se espera que sea. Otro factor que influye en la amplitud del eco es la superficie del objeto. Si se calcula la distancia a un objeto por el tiempo de vuelo de la señal, esta limitación no influye más que en la distancia máxima que se quiere llegar a medir.

d) El ángulo de medida: La señal emitida tiene un perfil de amplitudes complejo, como se muestra en la Figura 2.3.a. Por ello, un eco que vuelve no necesariamente permite calcular de forma precisa la localización del objeto usando simplemente el tiempo de vuelo de la señal, ya que el eco puede provenir de cualquier lugar del espacio que se encuentre en el frente de onda ultrasónico, ver Figura 2.3.b. La frecuencia de la onda que se emite suele ser de unos 40-50kHz. Cuanto mayor sea la frecuencia más direccional es la onda, pero se atenúa más.

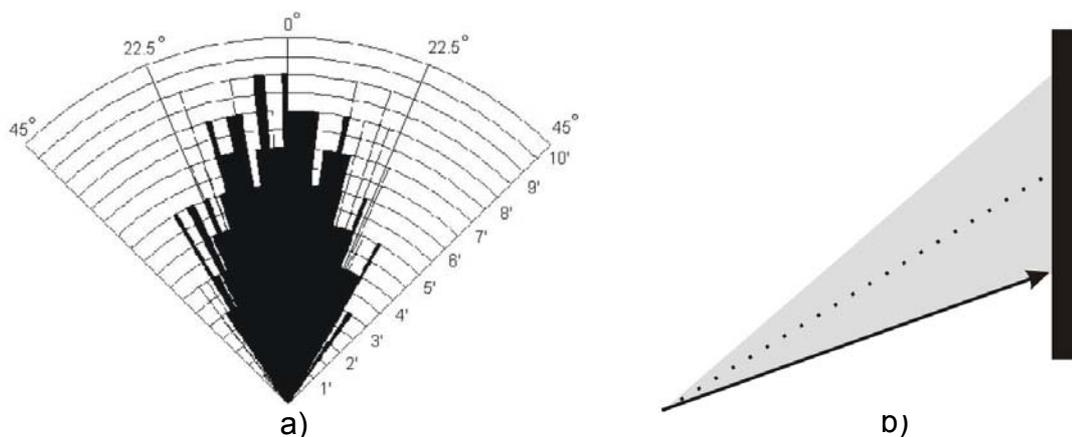


Figura 2.3. Efectos del ángulo de medida del sensor ultrasonido.

e) Las reflexiones: Son el impedimento más serio para poder detectar la posición de un objeto a partir del eco que se recibe. A frecuencias ultrasónicas, la superficie de la mayoría de los objetos reflejan la onda, de manera que una onda acústica que incida de forma muy oblicua en un objeto, se refleja en una dirección diferente a la de retorno hacia el receptor, ver Figura 2.4. Si se recibe un eco, no se puede asegurar que el eco sea un resultado de una serie de complejas reflexiones por el entorno.

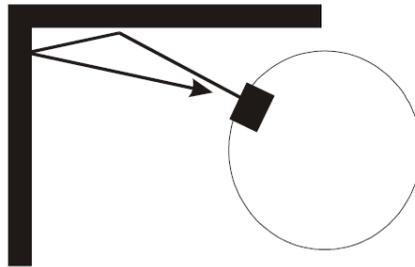


Figura 2.4. Efecto de la reflexión en sensor de ultrasonido.

2.1.2 El módulo SRF05.

Consiste en un medidor ultrasónico de distancias diseñado para aumentar la flexibilidad, aumentar el rango de medida y reducir costos; desarrollado por la firma DEVANTECH Ltd. [5]. Este sensor emplea un microcontrolador PIC12C508 que realiza las funciones de control y dos cápsulas ultrasónicas de 40 KHz, Ver figura 2.5. El rango de medidas para este sensor es desde unos 3 cm hasta unos 3 o 4 m aproximadamente. El sensor SRF05 incluye un breve retardo después del pulso de eco para distinguir la señal recibida.



Figura 2.5. Sensor de ultrasonido SRF05.

a) Características técnicas: En la tabla 1 se resumen las características principales del sensor SRF05:

Tabla 1. Características técnicas del sensor SRF05.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Dimensiones del circuito.	43 x 20 x 17	mm
Tensión de alimentación.	5	Vcc
Frecuencia de trabajo.	40	KHz
Rango máximo.	4	m
Rango mínimo.	1.7	cm
Duración mínima del pulso de disparo (nivel TTL).	10	μs
Duración del pulso Eco de salida (nivel TTL).	100 -25000	μs
Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de la siguiente.	20	ms

- b) Conexión del sensor: Como este sensor es una evolución del módulo SRF04, dispone de un nuevo modo de operación que se selecciona simplemente conectando el pin “Mode” a GND. Dicho modo permite al SRF05 emplear un único pin de E/S que sirve tanto para dar la orden de inicio o disparo, como para obtener la medida realizada (ECO). Cuando el pin de “Modo” no se emplea y se deja sin conectar, el SRF05 trabaja de la misma manera que el SRF04. Esto es, la señal de disparo y la salida de ECO operan por pines diferentes. El módulo emplea 5 conexiones que se pueden realizar soldando directamente 5 cables o bien mediante un conector de 5 vías con paso de 2.54 mm. Ver figura 2.6.



Figura 2.6. Conexiones del SFR05.

Tabla 2. Conexiones del SFR05.

+5Vcc	Tensión positiva de alimentación
ECO	Salida del pulso cuya anchura determina el tiempo del recorrido de la señal ultrasónica.
Disparo	Entrada de inicio de una nueva medida. Se aplica un pulso con una duración mínima de 10 us.
Modo (N.C.)	Sin conexión se selecciona el modo 1 de compatibilidad son SFR04. Conectado a GND se selecciona el modo 2 de trabajo.
GND	Tierra de alimentación.

Para este proyecto el pin de “Modo” no se emplea, entonces el SRF05 trabaja de la misma manera que el SRF04. Este modo emplea conectores separados, uno para aplicar el pulso de inicio o *Trigger* y otro para leer el ancho del pulso del ECO medido. Todos los programas realizados para el SRF04 deben funcionar perfectamente en este modo, que se selecciona simplemente dejando el conector “Mode” sin conectar. Tal como se muestra en el diagrama de tiempos de la figura 2.7, el modo de empleo es muy sencillo. Externamente se aplica, por parte del usuario, un pulso de disparo o *trigger* de 10 μ S de duración mínima. Se inicia la secuencia. El módulo transmite un tren de pulsos o “*burst*” de 8 ciclos a 40KHz. En ese momento la señal de salida ECO pasa a nivel “1”. Cuando la cápsula receptora recibe la señal transmitida como consecuencia de haber rebotado en un objeto (eco), esta salida pasa de nuevo a nivel “0”. El usuario debe medir la duración del pulso de esta señal, es decir, el tiempo en que la señal eco se mantiene a “1”.

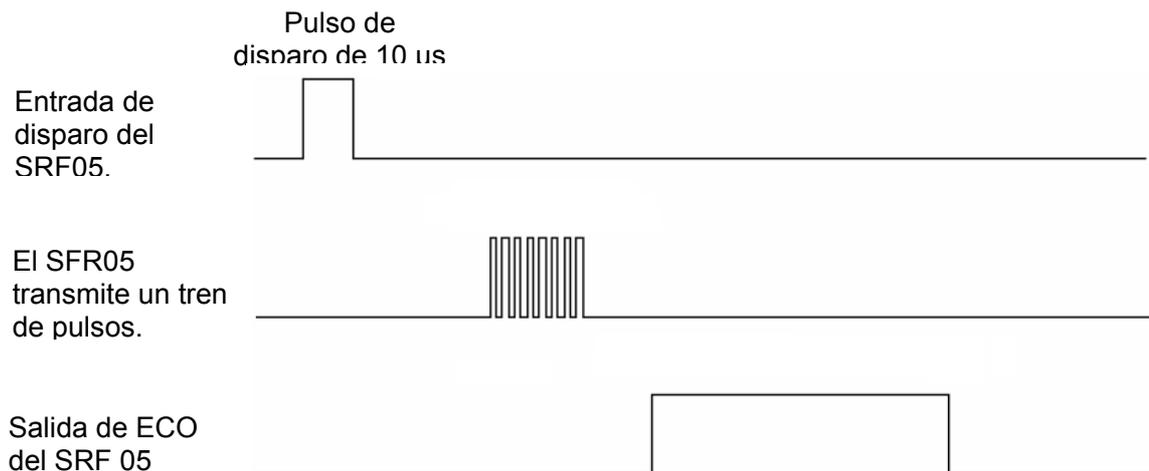


Figura 2.7. Diagrama de tiempos, sin emplear pin “Modo”.

Con el objetivo que el módulo se estabilice, se debe dejar un lapsus de tiempo de unos 20mS mínimo entre el momento en que la señal de eco pasa a “0” y un nuevo pulso de disparo que inicie el siguiente ciclo o medida. Esto permite realizar medidas cada 50ms, o lo que es igual a 20 medidas por segundo. La duración del pulso de eco de salida varía entre 100 μ S y 25mS, en función de la distancia entre las cápsulas del módulo y el objeto. La velocidad del sonido es de 29.15 μ S/cm que, como realiza un recorrido de ida y vuelta, queda establecida en 58.30 μ S/cm. Así pues el rango mínimo que se puede medir es de 1.7 cm (100 μ S/58) y el máximo de 431 cm (25mS/58).

- c) Obtención de la señal de salida del sensor de ultrasonido: después de conectar correctamente el sensor de ultrasonido se optó por diseñar una etapa de adecuación de la señal ECO del sensor para obtener el valor de salida del bloque del sensor y emplearlo en el funcionamiento del sistema, ver figura 2.8.

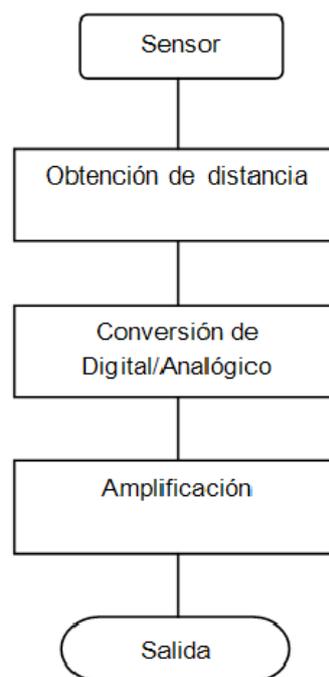


Figura 2.8. Diagrama de flujo para obtención de la salida del sensor de ultrasonido.

Esta etapa de adecuación de señal se explica en detalle en el ítem 5.1 del presente proyecto

2.2 PLANTA. LEVITADOR NEUMÁTICO.

El levitador neumático está constituido por un ventilador, un direccionador de flujo, un contractor, un ducto y una esfera los cuales fueron el resultado de un análisis elaborado entre elementos de su misma clase.

2.2.1 Ventilador helicoidal.

Para diseñar el levitador neumático se tuvo en cuenta muchas consideraciones entre ellas, está el tipo de ventilador. Que en este es de gran importancia ya que dependiendo de la cantidad de caudal de aire y de la velocidad con la que este salga se va a poder controlar la posición del objeto a levitar. Para escoger el tipo de ventilador adecuado se realizó un análisis con diferentes ventiladores entre los cuales están:

- Ventiladores centrífugos.
- Ventiladores helicocentrífugos.
- Ventiladores helicoidales.

De esta manera, para la elección del ventilador se analizó la curva característica de Caudal (Q) vs Presión (P) del tipo de ventiladores que están disponibles en el mercado. Esta curva depende únicamente del ventilador, y solamente puede variar si el ventilador funciona a una velocidad de rotación distinta, ver figura 2.9.

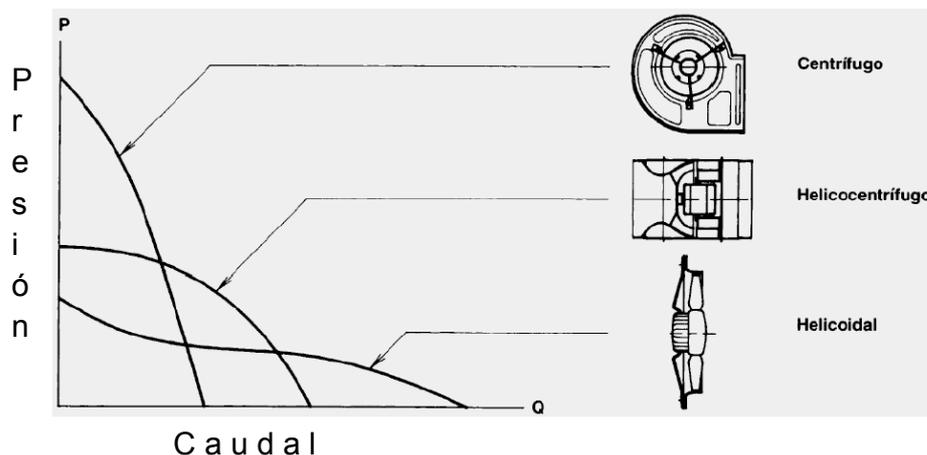


Figura 2.9. Principales tipos de ventiladores. Fuente: SALVADOR ESCODA S.A. (2002)

De acuerdo a la figura 2.9 se observa que el ventilador centrífugo alcanza grandes presiones (P) pero circulando a bajos caudales (Q), caso contrario, al ventilador

helicoidal o axial, en el cual alcanza altas velocidades o caudales (Q) circulando a bajas presiones (P). Teniendo en cuenta estas características se seleccionó el ventilador helicoidal debido a las pocas pérdidas por fricción en el ambiente cerrado y a los grandes caudales que proporcionan, ya que su área de salida de aire, es mayor con respecto a los ventiladores centrífugos; diferencia que beneficia a esta planta por trabajar en un ambiente cerrado.

De acuerdo a la elección del ventilador se realizaron pruebas con ventiladores helicoidales de 5, 9,12 Y 24 voltios DC con diferentes tamaños de aspas, cuyo diámetro variaron entre 1.2 y 6.5 cm. Teniendo en cuenta la elaboración de un diseño portable y flexible en su manejo, se seleccionó el ventilador helicoidal de 24 voltios DC con un tamaño de aspas de 3 cm, el cual proporciona el caudal y el tamaño de área necesario para el libre control del objeto a levitar, ver figura 2.10.



Figura 2.10. Ventilador helicoidal de 24 VDC

El ventilador seleccionado cuenta con un área de 144 cm^2 y genera una presión estática máxima de 25.5 pascales (2.6 mmH₂O) y un caudal máximo de 12500 cm³/s (12.5 l/s) [27], ver figura 2.11.

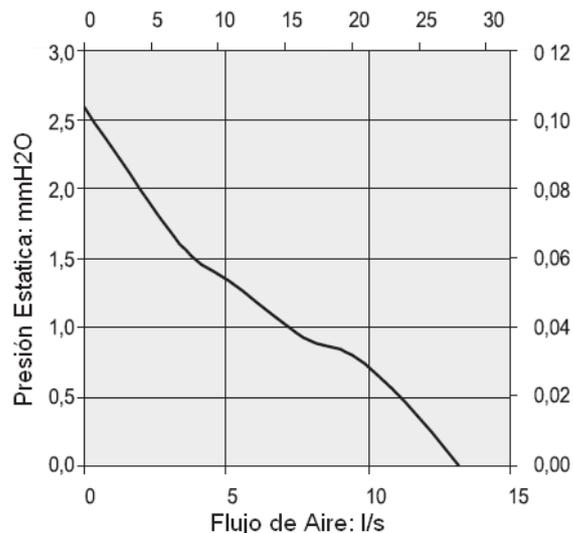


Figura 2.11. Flujo de aire vs presión estática

2.2.2 Direccionador de flujo (Panal de abejas).

Son unos paneles que guardan una figura que asemeja el entramado de un panal. Su función es de filtrado para que el movimiento del aire sea lo más lineal posible, debido a que suprime las no-homogeneidades transversales de la velocidad del aire que introducen las aspas de los ventiladores, así como encausar el flujo de aire según el eje del ducto en una dirección y homogeneizarlo espacialmente volviéndolo relativamente uniforme y estable en el ambiente cerrado. Los panales hacen que la presión tenga una gran caída en el sentido del flujo, lo que reduce de una manera drástica las velocidades altas y de una menos severa las bajas; en ambos casos genera una velocidad axial uniforme [26].

El direccionador de flujo presenta diferentes geometrías, ver figura 2.12, de las cuales se seleccionó la cuadrada, ver figura 2.12.a, ya que este diseño permite un gran flujo uniforme a la entrada del ducto en comparación al direccionador de la figura 2.12.b, ya que no elimina de una manera considerable las componentes axiales del flujo de aire y estos pequeños remolinos pueden formar inestabilidad en el contructor. Además se eligió la flexibilidad en su construcción en comparación al direccionador de la figura 2.12.c.

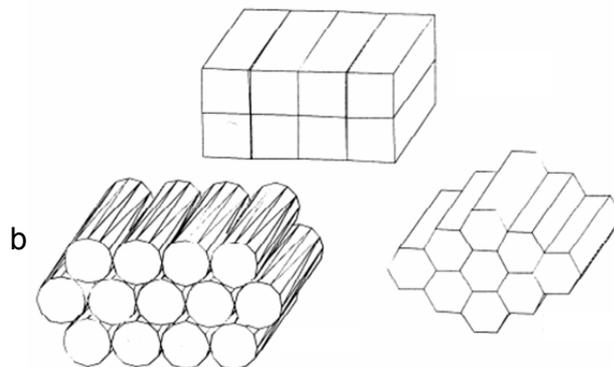


Figura 2.12. Geometría del direccionador de flujo. Ramírez (2000)

Este direccionador debido a su forma involucra pérdidas de energía cuando el flujo de aire lo atraviesa, la cual puede ser cuantificable a través de su coeficiente. Según la geometría del direccionador los coeficientes de pérdidas pueden tomar los siguientes valores de acuerdo a la figura 2.12 a. $k= 0.25$, b. $k= 0.3$ y c. $k= 0.2$. Además, con la geometría seleccionada se diseñó el direccionador de flujo de acuerdo al área cuadrada del ventilador helicoidal la cual es de 144 cm^2 , ver figura 2.13.

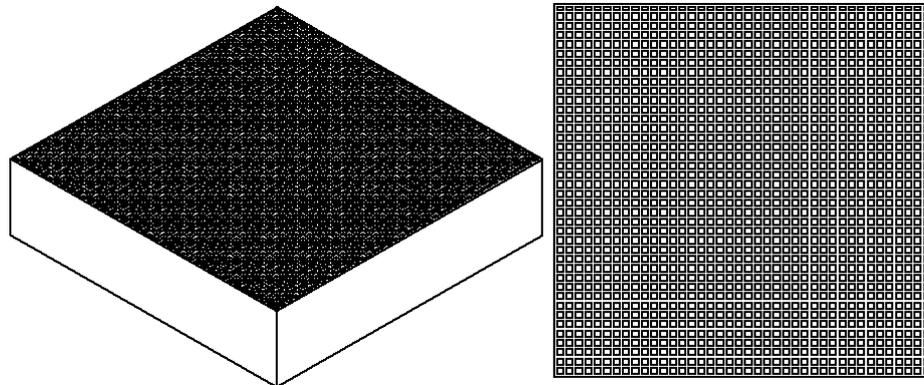


Figura 2.13. Direccionador de Flujo. a. vista en 3 dimensiones. b. vista frontal.

2.2.3 Objeto levitante.

Teniendo en cuenta el propósito de este proyecto y con el fin de lograr la estabilidad que permita controlar la posición del objeto levitante en cualquier posición se evaluó distintas formas para este objeto, las cuales se observan en la figura 2.14.

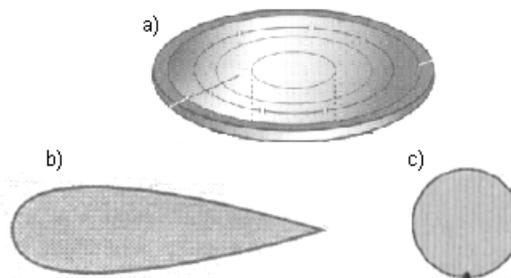


Figura 2.14. Formas evaluadas para el objeto levitante.

La figura 2.14.a muestra un disco el cual presenta problemas de estabilidad en su posición, ya que dependiendo de cómo el flujo de aire golpee al disco este va a adoptar una posición en la cual se generan cambios de presión muy diferentes, esto debido a que cuando se encuentre en posición horizontal el aire va a atravesar el disco y generará un gradiente de presión adverso muy grande en la parte de atrás de este cuerpo, por el cambio tan abrupto de presión cuando el aire se desprende de los bordes. Por otro lado, cuando el disco está en forma vertical se necesita más flujo de aire para poderlo subir, además en esta posición no será fácil que el sensor de ultrasonido lo detecte; de esta manera este cuerpo se descarta debido por la inestabilidad en su posición.

La figura 2.14.b muestra un perfil aerodinámico el cual presenta características de comportamiento similares al cuerpo 2.14a, este cuerpo debe ubicarse en dirección vertical, como se aprecia en la figura 2.15.



2.15. Posición del perfil aerodinámico en el interior del ambiente cerrado.

En este cuerpo la estabilidad depende del lugar donde las corrientes de aire golpeen la superficie del cuerpo; debido a que si no es un punto equidistante el cuerpo se inclinaría hacia los lados, provocando una obstrucción al paso de las corrientes de aire y generando vórtices al interior del ducto. De esta manera este cuerpo se descarta por la estabilidad en su posición.

La figura 2.14.c, muestra una esfera la cual no presenta grandes problemas de estabilidad como los dos anteriores cuerpos, debido a que su forma es uniforme y en cualquier punto donde las corrientes de aire golpeen la superficie esta conservara la posición. Es importante mencionar que la estabilidad en este cuerpo dependerá también de la superficie de la esfera, la cual debe estar bien formada y no debe presentar orificios o deformidades, que provoquen perturbación en el libre paso de las corrientes de aire al sobrepasar la esfera. De esta manera se concluye que todo cuerpo que no presente una uniformidad en su geometría presentara inestabilidad en su posición por lo tanto la forma de la esfera es la más adecuada.

Por otro lado, a partir de la geometría del objeto levitante se evaluó diferentes materiales tales como, plástico, pasta, goma, poliestireno expandido, y debido al caudal y presión que proporciona el ventilador se determinó que el material que más se adecuó al propósito de este proyecto era el poliestireno expandido (icopor), por el peso que este presenta, ver figura 2.16, además este material posee características como su higiene, al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos, es decir, no se pudre, no se enmohece y no se descompone. Además, su ligereza, resistencia a la humedad, la capacidad de absorción de impactos y aislante térmico. Finalmente, este material además de ligereza, también garantiza una superficie lisa y uniforme, lo cual mejora considerablemente

el comportamiento frente a los perfiles de velocidad proporcionados por el ventilador y corregidos por el direccionador de flujo.

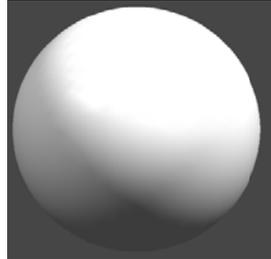


Figura 2.16. Objeto levitante, esfera de poliestireno expandido

Para determinar el correcto tamaño de la esfera se procede primero a determinar el tamaño del ducto de área variable el cual se estudia en el ítem 2.2.4

2.2.4 Ducto de área variable.

Conociendo el propósito de este trabajo el cual es elaborar un prototipo que permita controlar la posición de una esfera a lo largo del ambiente cerrado, se diseñaron dos clases de ductos, un ducto de diámetro constante y otro de diámetro variable. El ducto de diámetro constante presenta enormes cambios en comparación al ducto de diámetro variable debido a que se comportan en forma inversa en cuanto al cambio de presión a lo largo de su longitud. A partir de esto no se elige el ducto de diámetro constante debido a que presenta un cambio de mayor a menor presión, como se observa en la figura 2.17a, lo cual hace que cuando el aire de entrada vence el peso del objeto a levitar, este cuerpo se desplazara hasta la parte superior de ducto y no será posible estabilizarlo en un punto determinado al interior del ducto. Lo contrario sucede en el ducto de diámetro variable donde proporciona un cambio de presión a lo largo del ducto, pasando de una presión menor a una presión mayor, como se observa en la figura 2.17b. Este cambio de presión permite que el cuerpo a levitar pueda estabilizarse en cualquier posición, debido a que a mayor altura que se desee alcanzar se debe imprimir más fuerza en el caudal de aire a la entrada del ducto, para vencer el cambio de presión que se presenta en un punto determinado en la longitud del mismo.

Este comportamiento se expresa en la ecuación 2.3 y 2.4.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.3)$$

Donde,

A_1 : Área base del ducto.

A_2 : Área donde se encuentra la esfera.

V_1 : velocidad de entrada.

V_2 : velocidad del aire en donde se encuentra la esfera.

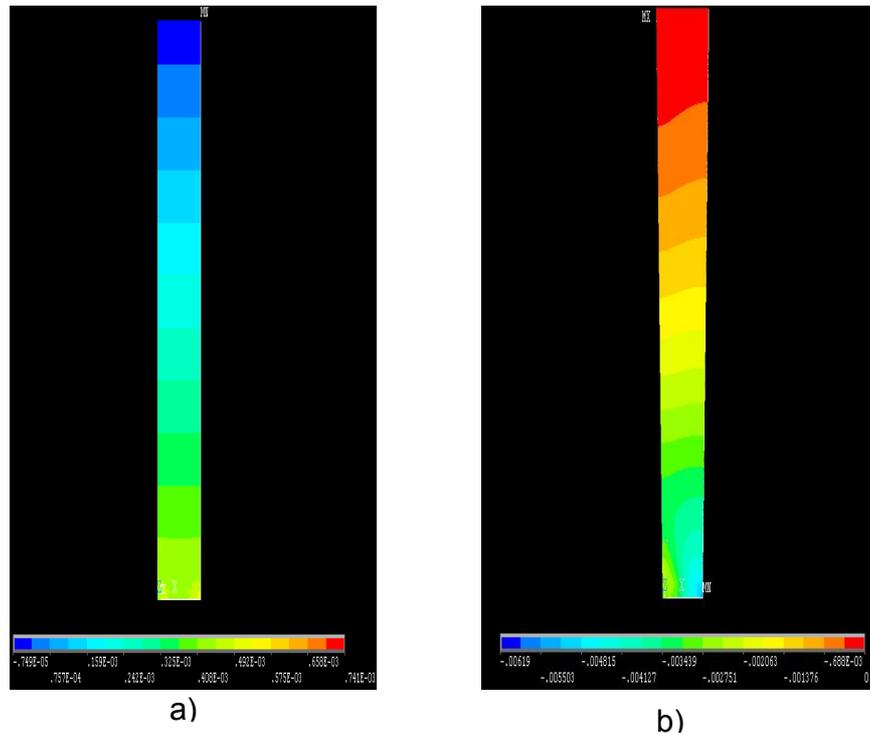


Figura 2.17 Distribución de presión en ductos. a) Ducto de diámetro constante. b) Ducto de diámetro variable.

La anterior figura se obtuvo del software CFD (Dinámica Computacional de Fluidos), el cual permite simular sistemas dinámicos que dependen del movimiento de los fluidos.

Este cambio de velocidad produce un cambio en la presión total del flujo de aire, y conociendo que la presión total es la suma de la presión dinámica más la presión estática, se realizó la medida de la presión estática por medio de un sensor diferencial de presión, con el cual se determinó que la presión estática es muy baja predominando así la presión dinámica, la cual se halla con la ecuación 2.4.

$$P = \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.4)$$

P: presión dinámica.

ρ : densidad del aire.

V: velocidad de entrada.

Es importante mencionar que las mediciones de la presión estática se realizaron por medio de un sensor diferencial de presión embebido en el circuito integrado MPXV5004DP, ver figura 2.18, el cual calcula la diferencia de presión entre la presión del caudal de aire y la presión atmosférica. Esta diferencia de presión es visualizada en una interfaz elaborada bajo el software Labview.

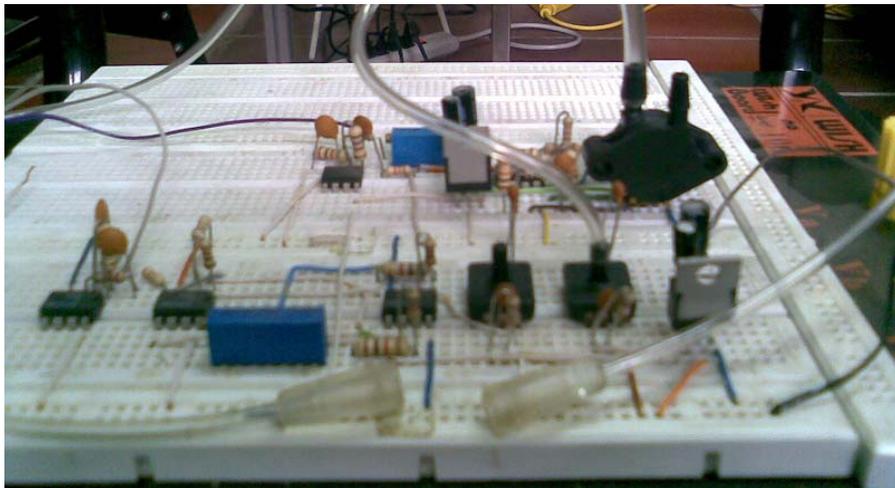


Figura 2.18. Circuito sensor diferencial de presión

Teniendo en cuenta que el ducto seleccionado es de diámetro variable, por medio de pruebas en el laboratorio se determinó la relación de áreas conveniente para este proyecto. Estas pruebas se realizaron a un mismo valor de velocidad de entrada (la entrada del ducto será el diámetro menor, en A_1), para distintos valores del diámetro de salida (diámetro mayor del ducto, en A_2). De esta manera encontramos diferentes comportamientos del flujo dentro del ducto, ya que el flujo a través del ducto depende de la relación de áreas y el ángulo de difusión (2θ), como se observa en la figura 2.19.

Esta relación de áreas limita al sistema a trabajar en un ducto que permita estabilizar la esfera en cualquier posición. Debido a que si el ducto es muy abierto en A_2 , la esfera difícilmente podrá alcanzar la altura máxima del ducto, de igual manera si el ducto es muy cerrado en A_2 , la esfera difícilmente se podrá estabilizar en las alturas próximas a A_1 , debido a las bajas presiones que se generan a esas alturas del ducto.

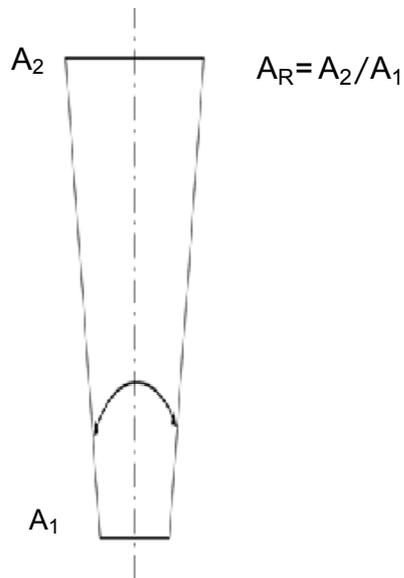


Figura 2.19. Relación de áreas y ángulo de difusión en ducto de área variable.

Todo lo anterior y mediante la visualización en el CFD se determinó la longitud del ducto y la relación de áreas, que se visualizan en la figura 2.20:

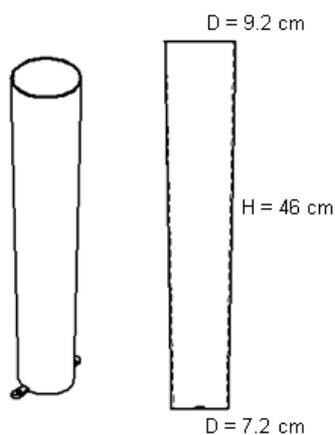


Figura 2.20. Estructura física ducto de diámetro variable.

Conociendo las medidas del ducto de diámetro variable se puede establecer el tamaño correcto de la esfera. Para esto se evaluó el comportamiento de distintos tamaños de esferas dentro del ducto. Estos tamaños variaban entre 1 y 7 cm de diámetro y se observó que las esferas de diámetro inferior a 4 cm de diámetro presentan un comportamiento muy inestable debido a que el perfil de velocidad,

ver figura 2.21, entregado por el direccionador de flujo trasladaba la esfera hacia las paredes del ducto, lo cual dificultaba la medida del sensor de ultrasonido.

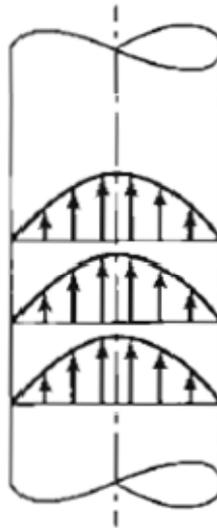


Figura 2.21. Perfil de velocidad, flujo laminar. (FOX, Robert W. 2004)

De esta manera se descartaron estas esferas. La esfera de 7 cm de diámetro se comportaba muy estable pero su dimensión era casi la del diámetro menor del ducto y presentaba un alto rozamiento en el fondo del ducto, que generaba irregularidades en el funcionamiento. La esfera de 5 cm de diámetro presentaba una pequeña oscilación en dirección horizontal, debido al perfil de velocidad a la entrada del ducto. Finalmente la esfera de 6.5 cm presentó un buen comportamiento en la interacción con el perfil de velocidad del flujo, debido a que permanece a largo del ducto en una posición equidistante con las paredes. Es importante mencionar que la esfera presenta algunas oscilaciones en dirección horizontal en alturas mayores a 40 cm, debido a que el ducto a estas alturas experimenta un cambio abrupto de presión, debido a la interacción que hay entre la presión al interior del ducto y la presión atmosférica. Las características técnicas de esta esfera se pueden ver en la tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas de la esfera (material: poliestireno expandido).

Parámetro	Valor	Unidad
Masa	1,96	gr
Densidad	13.63	kg/m ³
Diámetro	6,5	Cm

2.2.5 *Contractor.*

Es una tobera que tiene como función principal acelerar el flujo a la velocidad deseada y adelgazar al máximo la capa límite en las paredes a la entrada del ducto de área variable en todo el ámbito de velocidades de operación, además de reducir la intensidad turbulenta que no ha sido eliminada en el direccionador de flujo [23].

El diseño del contractor, debe contemplar dos restricciones opuestas, la primera restricción que se debe establecer, es que la longitud de la contracción debe ser lo suficientemente larga para no generar disturbios en la uniformidad del flujo.. En contraposición a este requerimiento se establece que la contracción debe ser lo más corta posible para minimizar el crecimiento de la capa límite¹ antes de llegar al ducto de diámetro variable.

Los criterios principales para el diseño son:

- Uniformidad del flujo al final de la contracción, uniformidad del perfil de velocidades.
- Evitar la separación del flujo evitando turbulencias.
- Longitud mínima, altura del contractor.
- Espesor mínimo de la capa límite en la contracción, careciendo de separación de esta en el flujo.

Según conceptos teóricos [22], para la construcción del contractor se sugiere que la relación entre la altura del contractor y el ancho de su base deba ser igual a 1.25. De esta manera y conociendo el ancho de la base igual a 12 cm la altura tendría un valor igual a 15 cm. Esta relación se puede ver en la ecuación 2.5.

$$\frac{\text{Altura}}{\text{Ancho}} = 1,25 \quad (2.5)$$

$$\text{Altura} = \text{Ancho} \times 1,25$$

$$\text{Altura} = 15\text{cm}$$

Además con el diseño del ducto de área variable y con las medidas del direccionador de flujo el contractor debía acelerar el flujo de aire para ganar la velocidad que se perdía en el direccionador de flujo. Por lo tanto se diseño un contractor que cumpliera con los criterios de diseño y que se acoplara a las

¹ Capa limite: La capa límite de un fluido es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. .

medidas del direccionador de flujo y del ducto de área variable. El diseño elaborado se observa en la figura 2.21.

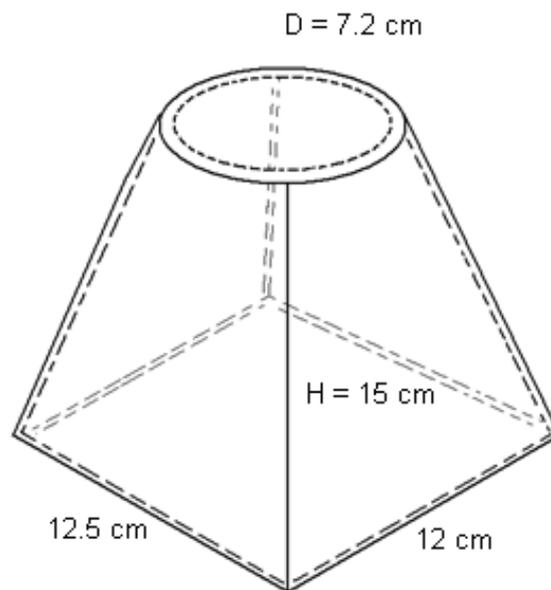


Figura 2.22. Contructor del sistema de levitación neumática.

2.3 BLOQUE DE ENTRADA. INGRESO DE DATOS PARA EL VALOR DESEADO DE LA VARIABLE CONTROLADA.

Para el ingreso de datos del valor deseado de la variable controlada o *setpoint* se implementó un algoritmo el cual es controlado con un teclado matricial de 4x3 (ver figura 2.22), que permite ingresar el valor deseado por el usuario.

Esta entrada actuará para el sistema en modo escalón, la cual su amplitud será el valor de la altura que se quiere alcanzar.

Después de conectar correctamente el teclado matricial al microcontrolador se diseñó una etapa de adecuación de la señal del teclado para obtener el valor de la señal de salida y emplearlo en el funcionamiento del sistema, ver figura 2.23.

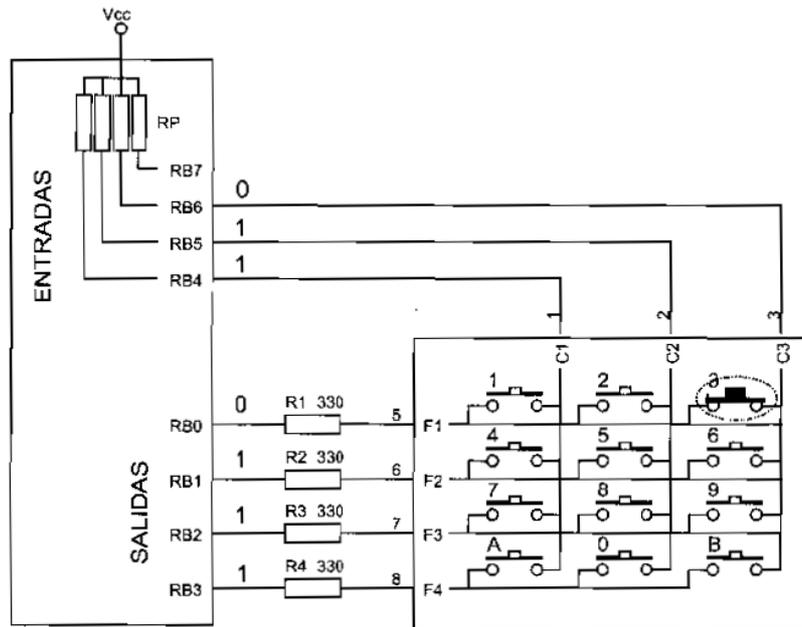


Figura 2.23. Conexión de un teclado matricial a un microcontrolador. Fuente: Palacios M. Enrique, Remiro D. Fernando, López P. Lucas, (2004).

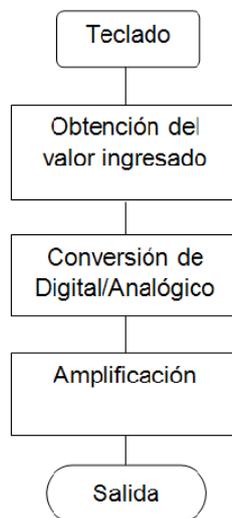


Figura 2.24. Diagrama de flujo para obtención de la salida del teclado matricial.

Esta etapa de adecuación de señal se explica en detalle en el ítem 5.2 del presente proyecto.

3. MODELADO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA

3.1 MODELADO DE LA PLANTA.

Para el modelado de este sistema de levitación neumática, primero se hará un repaso puntualizado de cada uno de los conceptos en dinámica de fluidos que están involucrados en el modelo de la esfera dentro del ducto de área variable. Posteriormente se aplican los conceptos ilustrados y se obtiene el modelo de planta (levitador neumático). Además se caracterizan los elementos restantes del sistema.

3.1.1 *Preliminares sobre dinámica de fluidos.*

La dinámica de fluidos es la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de las leyes de los fluidos en movimiento; Euler fue el primero en reconocer que las leyes dinámicas para los fluidos sólo pueden expresarse de forma relativamente sencilla si se supone que el fluido es incompresible e ideal, es decir, si se pueden despreciar los efectos del rozamiento y la viscosidad. Sin embargo, como esto nunca es así en el caso de los fluidos reales en movimiento, los resultados de dicho análisis sólo pueden servir como estimación para flujos en los que los efectos de la viscosidad son pequeños. Las leyes involucradas en la dinámica de fluidos son enormemente complejas, debido a esto se analizaron conceptos específicos de autores como Robert L Mott [6], Shames [7], Streeter [8], Fox [9], White [10], entre otros, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo del modelo de la planta.

- a) *Fluido*: Es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea ese esfuerzo cortante. Pág. 3 [7].
- b) *Velocidad U* : Es un vector que representa la dirección, sentido y magnitud de la rapidez de movimiento del fluido. Pág. 4 [8].
- c) *Volumen de control*: Se entiende por volumen de control una región fija en el espacio donde puede existir flujo de fluido a través de sus fronteras. Por esta razón, en diferentes instantes, se pueden tener diferentes partículas en el interior del volumen del control. Pág. 121 [7].
- d) *Las leyes de movimiento de Newton*, las cuales deben cumplirse para cualquier partícula en cualquier instante. Pág. 113 [8].

- Una masa permanece en reposo o en movimiento a velocidad constante, a menos que actúe sobre ella una fuerza.
 - La velocidad de cambio de la cantidad de movimiento de una masa es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre ella.
 - Cualquier acción de una fuerza tiene una fuerza de reacción igual en magnitud y contraria en sentido.
- e) *Flujo uniforme*: flujo en el cual las propiedades son independientes del tiempo, y de la posición. Es decir en determinado flujo, en cualquier sección perpendicular a él, todas las propiedades son constantes. Pág. 524 [7].
- f) *Flujo unidimensional*: Es una simplificación en la cual todas las propiedades y características del flujo se suponen como funciones de una sola coordenada espacial u del tiempo. Usualmente, la posición es la localización a lo largo de alguna trayectoria o conducto. Pág. 127 [7].
- g) *Flujo bidimensional*: Se distingue por la condición de que todas las propiedades y características del flujo son funciones de dos coordenadas cartesianas, por ejemplo X, Y y el tiempo; por consiguiente, no cambian a largo de la dirección z en un instante dado. Pág. 128 [7].
- h) *Presión dinámica*: Se puede decir que cuando los fluidos se mueven en un conducto, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica y depende de la velocidad y la densidad del fluido. Pág. 523 [6] Se define según la ecuación 3.1:

$$P = \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$

Donde,

P: presión dinámica en pascales.

ρ : densidad del fluido en kg/m³ (densidad del aire).

v: velocidad del fluido en m/s.

- i) *Flujo laminar*. Es aquel en el cual se mueven las partículas del fluido en capas lisas o láminas. Pág. 38 [9].
- j) *Flujo turbulento*: Es aquel en el que las partículas del fluido se mezclan con rapidez, debido a que a lo largo de la mezcla se presentan fluctuaciones aleatorias tridimensionales de velocidad..Pág. 39 [9].

- k) *Cantidad de movimiento*: La cantidad de movimiento, momento lineal, ímpetu o moméntum es una magnitud vectorial, unidad SI: (kg m/s) que, en mecánica clásica, se define como el producto de la masa del cuerpo y su velocidad en un instante determinado. La cantidad de movimiento obedece a una ley de conservación, lo cual significa que la cantidad de movimiento total de todo sistema cerrado (o sea uno que no es afectado por fuerzas exteriores, y cuyas fuerzas internas no son disipadoras) no puede ser cambiada y permanece constante en el tiempo. Pág. 141 [7].
- l) *Flujo incompresible*: Un flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo, aquellos flujos donde las variaciones en densidad son insignificantes se denominan incompresibles. Los flujos de gases se pueden también considerar como incompresibles si las velocidades son pequeñas respecto a la velocidad del sonido en el fluido; la razón de la velocidad del flujo, v , a la velocidad del sonido, c , en el medio fluido recibe el nombre de número de Mach, M . Pag. 39 [9]. Ver ecuación 3.2:

$$M = \frac{v}{c} \quad (3.2)$$

- m) *Teorema de Bernoulli*: El teorema afirma que la energía mecánica total de un flujo incompresible, uniforme y no viscoso (sin rozamiento) es constante a lo largo de toda la trayectoria del flujo. Puede demostrarse que, a consecuencia de esto, el aumento de la velocidad del fluido se ha de ver compensado por una disminución de su presión. El efecto Bernoulli es simplemente el resultado de la conservación de la energía. Pág. 167 [6].
- n) *Flujo externo*: Flujo externo es el de un fluido sobre o alrededor de un objeto; el cual presenta unas fuerzas generadas cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido en el que se encuentra sumergido. Esta expresión se puede observar en la figura 3.1, la cual muestra un fluido que rodea a un perfil aerodinámico. Pág. 315 [8].

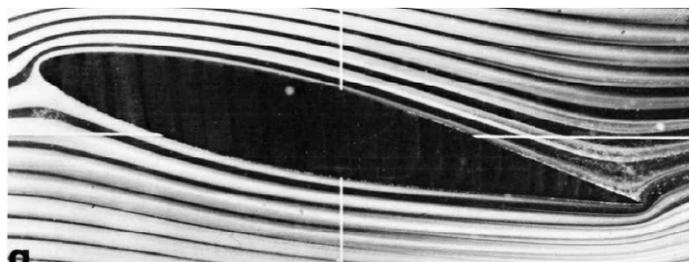


Figura 3.1. Flujo externo sobre un perfil aerodinámico. Fuente: Van Dyke Milton (1982).

o) *Punto de Estancamiento*: El termino punto de estancamiento se emplea para denotar el punto donde la corriente de fluido esta en reposo o estancada. En la figura 3.2, se observa el punto de estancamiento de un fluido a causa de la obstrucción que realiza una esfera en la dirección del fluido, además se puede observar el punto de separación del fluido con respecto a la esfera, y la estela que se origina detrás de la esfera, conceptos que explicaran más adelante. Pág. 522 [6].

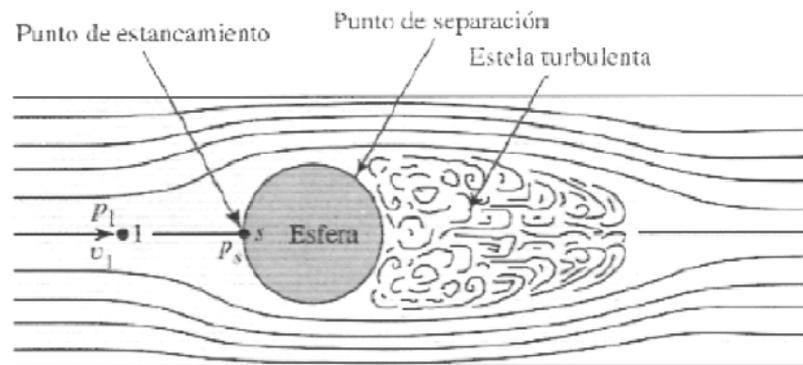


Figura 3.2. Esfera dentro de un ducto horizontal. Fuente: Mott Robert L. (2006).

El punto que identifica el estancamiento se nota con la letra s, que se visualiza en la figura 3.2. Debido a este estancamiento se origina una presión de estancamiento que se nota como P_s . Esta interacción entre la esfera y el fluido genera una serie de expresiones que se tratan en la dinámica de fluidos; la relación entre la presión de estancamiento P_s sobre el cuerpo y la presión de la corriente no perturbada P_1 aguas arriba, es decir, la presión estática del fluido y que se traslada a una velocidad v_1 ; esta relación se encuentra por medio de la ecuación de Bernoulli a lo largo de la línea de corriente y despejando la presión de estancamiento la expresión que la define, se encuentra en la ecuación 3.4:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\gamma} \quad (3.3)$$

Donde, ρ : densidad del fluido
 γ : Peso específico del fluido
 g : Gravedad

Sabiendo que $\rho = \frac{\gamma}{g}$ y al resolver para la presión de estancamiento P_s obtenemos se obtiene:

$$P_s = P_1 + \gamma v_1^2 / 2g$$

$$P_s = P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \quad (3.4)$$

Es evidente que la presión de estancamiento es mayor que la presión estática en la corriente libre por la magnitud de la presión dinámica ($\rho v^2/2$). La energía cinética de la corriente en movimiento se transforma en una clase de energía potencial en forma de presión. De esta manera, el incremento de presión en el punto de estancamiento produce una fuerza sobre el cuerpo, opuesta a su movimiento. Pág. 523 [6].

- p) *Condición de Frontera*: Cuando un fluido atraviesa a un cuerpo, después del punto de estancamiento algunas moléculas se adhieren a la superficie de la esfera y tienen velocidad cero. Esta frontera fija de la componente de velocidad perpendicular a la frontera debe ser cero en cualquier punto de esta. Pág. 357 [8].

Se llama condición de frontera a las moléculas de un fluido que se cuando un fluido atraviesa a un cuerpo y la frontera fija la componente de velocidad perpendicular a la frontera debe ser cero en cualquier punto de esta, ver figura 3.3.

$$qn_1 = 0 \quad (3.5)$$

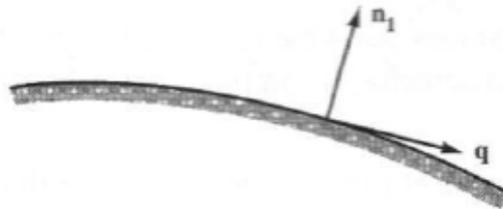


Figura 3.3. Notación para la condición de frontera en una frontera fija.
Fuente: Streeter. (2000).

Donde n_1 es un vector unitario normal a la frontera. En notación escalar esto se expresa fácilmente en términos del potencial de velocidad.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (3.6)$$

En todos los puntos de la frontera. Para una frontera móvil, ver figura 3.4; donde un punto en ella tiene una velocidad v , la componente de la velocidad del fluido perpendicular a la frontera debe ser igual a la velocidad de la frontera normal a ésta; por consiguiente,

$$(q-v)n_1=0 \quad (3.7)$$

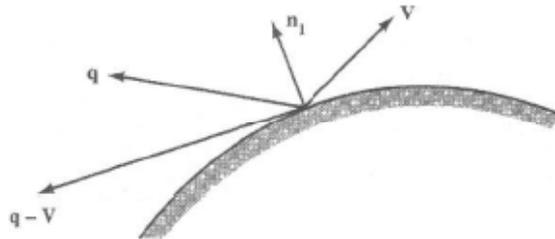


Figura 3.4. Notación para la condición de frontera en una frontera móvil.
Fuente: Streeter (2000)

Para dos fluidos en contacto, se requiere una condición de frontera dinámica, es decir, la presión, debe ser continua en la interface. Una superficie de corriente en un flujo permanente (fronteras fijas) satisface la condición para una frontera y se puede considerar como frontera sólida. Pág. 358 [8].

- q) *Capa Límite*: Cuando un sólido se encuentra en contacto con un fluido de baja viscosidad se produce una capa muy delgada de fluido entre el cuerpo y el flujo de corriente llamada "capa límite". La capa límite se considera la zona en donde el valor de la velocidad de la corriente de flujo tiene un valor de cero en contacto con el sólido hasta un valor del 99% de la velocidad de flujo libre, velocidad que se ve afectada por las tensiones cortantes en la frontera o contorno y en donde se da lugar a todas las pérdidas por fricción. La capa límite es muy delgada en el extremo situado corriente arriba de un cuerpo, y progresivamente adquiere características que la convierten en una capa límite laminar, intermedia y turbulenta, con un progresivo incremento de su espesor. Pág. 571 [7].
- r) *Desprendimiento de capa límite y Estelas*: Para gradientes de presión adversos, es decir, con presiones que se incrementan después del objeto, la capa límite aumenta rápidamente su espesor. El gradiente adverso y el esfuerzo cortante en la frontera disminuyen el momentum en la capa límite, y si ambos actúan sobre una distancia suficiente, hacen que la capa límite se detenga. Este fenómeno se conoce como separación, ver figura 3.5. La línea de corriente de la frontera debe alejarse de la frontera sólida en el punto de separación, y después del cuerpo, en este punto el gradiente de presión adverso produce un flujo hacia atrás cerca de la pared sólida. Esta región aguas debajo de la línea de corriente que se separa de la frontera sólida se conoce como la estela. El efecto de la separación es disminuir la cantidad neta de trabajo que se puede ser hecho por un elemento de fluido sobre el fluido circundante, a costa de su energía cinética, con el resultado neto de que la recuperación de presión es

incompleta y que las pérdidas en el fluido (arrastre) se incrementan. Pág. 606 [7].

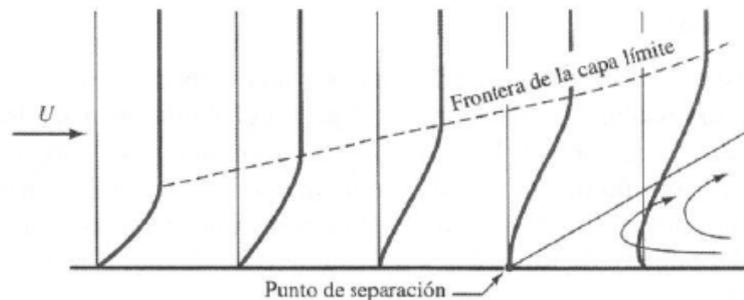


Figura 3.5. Punto de separación y frontera de capa límite.

La separación y la estela que acompañan este fenómeno tienen una influencia profunda en el arrastre de forma sobre los cuerpos. Si se pudiera evitar la separación del flujo sobre un cuerpo, la capa límite permanecería delgada y la reducción de presión en la estela se evitaría, minimizando de esta forma el arrastre de presión. Redondear la cara frontal de los cuerpos para reducir la oportunidad de separación del flujo en los bordes agudos es efectivo. Mas importante aun es dar forma aerodinámica a la porción de cola del cuerpo ver figura 3.6, para asegurar que el punto de separación ocurrirá aguas abajo a lo largo del cuerpo, tanto como sea posible. Pág. 620 [7].

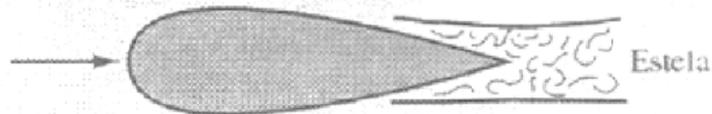


Figura 3.6. Estela formada detrás de un perfil aerodinámico.

- s) *Esfuerzo Cortante*: la figura 3.7, ilustra el concepto de cambio de velocidad en un fluido con el esquema de una capa delgada de fluido entre dos superficies, una de las cuales es estacionaria, en tanto que la otra esta en movimiento. Una condición fundamental, cuando un fluido real está en contacto con una superficie de frontera, es que el fluido tenga la misma velocidad que ésta. En la figura la parte del fluido en contacto con la superficie inferior tienen una velocidad igual a cero, y aquella en contacto con la superficie superior tiene una velocidad v . Si la distancia entre las dos superficies es pequeña, entonces la tasa de cambio de la velocidad con posición y es lineal. Es decir, varía en forma

lineal. El gradiente de velocidad es una medida del cambio de velocidad, y se define como $\Delta v/\Delta y$. También se le denomina tasa cortante. Pág. 27 [6].

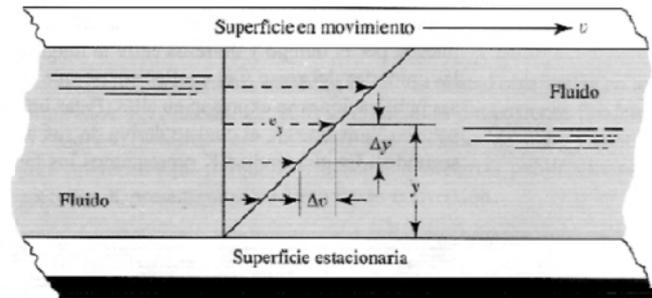


Figura 3.7. Gradiente de velocidad en fluidos.

El hecho de que el esfuerzo cortante en el fluido sea directamente proporcional al gradiente de velocidad se enuncia en forma matemática según la ecuación 3.8:

$$\tau = \mu(\Delta v/\Delta y) \quad (3.8)$$

Donde la constante de proporcionalidad μ se le denomina viscosidad dinámica de fluido en ocasiones se emplea el término viscosidad absoluta. Pág. 27 [6].

3.1.2 Modelado de la planta.

Teniendo en cuenta cada uno de los conceptos referenciados anteriormente, se procede a determinar el modelo del ducto de área variable con la esfera sumergida en el fluido. Es importante mencionar que para el modelado de este sistema, se consideraron tres herramientas posibles en dinámica de fluidos, las cuales se presentan a continuación.

3.1.2.1 Método Ecuaciones Navier-Stokes.

La primera herramienta empleada para encontrar el modelo de este sistema se basa en el modelado a través de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Pero debido a su complejidad en la aplicación y de no disponer de una solución general para este conjunto de ecuaciones, salvo en ciertos tipos de flujo con condiciones físicas determinadas; no es posible hallar una solución analítica [7].

3.1.2.2 Método Dinámica de fluidos computacional.

La segunda herramienta investigada para hallar el modelo se basa en la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de soluciones mediante el ordenador, la cual es denominada dinámica de fluidos computacional (CFD, de su acrónimo anglosajón Computational Fluid Dynamics); las simulaciones que se realizan en la física computacional requieren gran capacidad de cálculo [12]. Es importante mencionar que el modelo obtenido en este software, es una simulación del diseño del sistema real que entrega una gama de resultados en donde se pueden observar las diferentes variables del sistema. Esta herramienta aunque fue descartada para obtener un modelo, fue utilizada para simular el comportamiento de la esfera dentro del ducto de diámetro variable y así poder observar algunas variables que no son posibles medir en tiempo real.

3.1.2.3 Método Sistema de fuerzas.

Descartadas las anteriores herramientas para la obtención de un modelo, la tercera herramienta estudiada es el sistema clásico de la mecánica de fluidos, el cual es un sistema de fuerzas sobre el objeto a levitar. Este sistema de fuerzas, se puede determinar por medio de conceptos teóricos puntuales de la dinámica de fluidos y el cual garantiza obtener un modelo que represente en buena forma el comportamiento del sistema de levitación. Además, este sistema de fuerzas se obtendrá con la ayuda del CFD, el cual visualizaría el comportamiento de la esfera dentro del ducto y permitiría observar aquellas fuerzas que no son posibles analizar en tiempo real.

Este sistema de fuerzas es el resultado de un análisis previo sobre modelos matemáticos de levitadores en un ambiente abierto [2][3]. Además de realizar un estudio sobre flujos externos, flujo alrededor de cuerpos sumergidos, flujo potencial, capa límite, cálculo geométrico de áreas, pérdidas en accesorios (tuberías) y comportamientos de cuerpos en un ambiente cerrado tales como túneles de viento y fuerzas medidas en su interior. Todo esto llevo a recopilar información sobre la interacción entre la esfera, el flujo y el ducto para establecer y cuantificar su relación. Toda la información recolectada en la bibliografía es evaluada mediante el CFD y el software *Matlab* para determinar su validez en el modelo matemático.

Este modelo teórico de la planta se encontró a partir del sistema de fuerzas representado en la figura 3.8, donde se observa las fuerzas que actúan sobre la esfera las cuales pueden ser cuantificables por intermedio de conceptos teóricos.

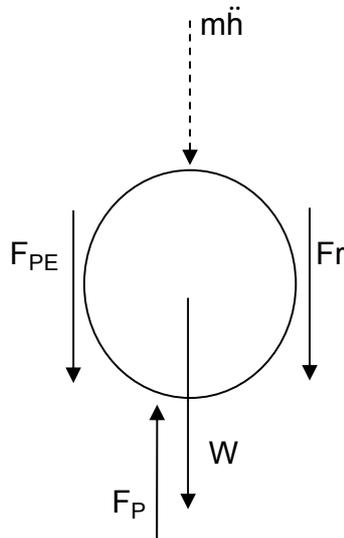


Figura 3.8. Sistema de fuerzas sobre la esfera.

Como se observa claramente en la figura 3.18 existen cuatro fuerzas que actúan sobre la esfera, y planteando las ecuaciones de este sistema, se obtiene la ecuación 3.9.

$$F_r + F_{PE} + W - F_P = m\ddot{h} \quad (3.9)$$

Conociendo la expresión que se determina a partir del sistema de fuerzas, se pretende desarrollar el modelo del sistema de levitación neumática, el cual debido a la complejidad de sus ecuaciones se realizara en base a conceptos teóricos. Las fuerzas que se representan en la figura 3.8, son: el peso (W), la fuerza de rozamiento (F_r), y la fuerza de propulsión (F_P) a la entrada del ducto de área variable. Estas fuerzas generan como resultado un cambio de posición y velocidad del cuerpo, lo cual cumple con la igualdad representada en la segunda ley de Newton (ver ecuación 3.10)

$$F = ma \quad (3.10)$$

La cual expresa que los cambios experimentados en la cantidad de movimiento de un cuerpo son proporcionales a la fuerza motriz y se desarrollan en la dirección de esta; esto es, las fuerzas son causas que producen aceleraciones en los cuerpos. Esta inercia del cuerpo se representa en el sistema de fuerzas con dirección hacia abajo debido a que la posición inicial de la esfera siempre será el fondo del ducto, a causa de la fuerza gravitatoria.

3.1.2.3.1 Fuerza de Fricción F_r .

Una de las fuerzas que se observa en este sistema es la fuerza de fricción F_r la cual está presente en cada posición en la que se estabiliza la esfera. De acuerdo a Mott [6], esta fuerza de fricción depende del esfuerzo cortante, generado por el movimiento del fluido, y la superficie de control, ver figura 3.9, que representa la interacción física de la esfera con el fluido; esta fuerza de fricción se denota en la ecuación 3.11, pág. 154 [24]

$$F_r = \tau A \quad (3.11)$$

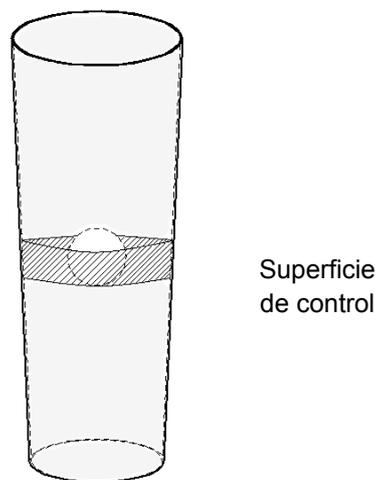


Figura 3.9. Ducto de área variable. Interacción del fluido con la esfera

Cuando el fluido se mueve al interior del ducto se desarrolla el esfuerzo cortante τ , el cual se define como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra [6]. Su magnitud depende de la viscosidad del fluido y la fuerza se mide en unidades de N/m^2 (Pa) o lb/pie^2 .

Para este sistema el esfuerzo cortante se presenta cuando las corrientes de aire chocan con la esfera, ese contacto se conoce como punto de estancamiento. El fluido permanecerá en contacto con la esfera hasta el desprendimiento de la capa límite, donde las corrientes de aire adheridas a la superficie de la esfera son conocidas como fronteras, estas fronteras con respecto al fluido tienen velocidad cero y propician un alto gradiente de velocidad desde la frontera hacia las corrientes de flujo que no son perturbadas, y viajan a la velocidad inicial; propiciando fuerzas de corte cerca de la frontera que reducen la velocidad del fluido a la de la frontera. De esta manera la capa de fluido cuya velocidad ha sido afectada por el esfuerzo cortante es la capa límite, Ver figura 3.10.

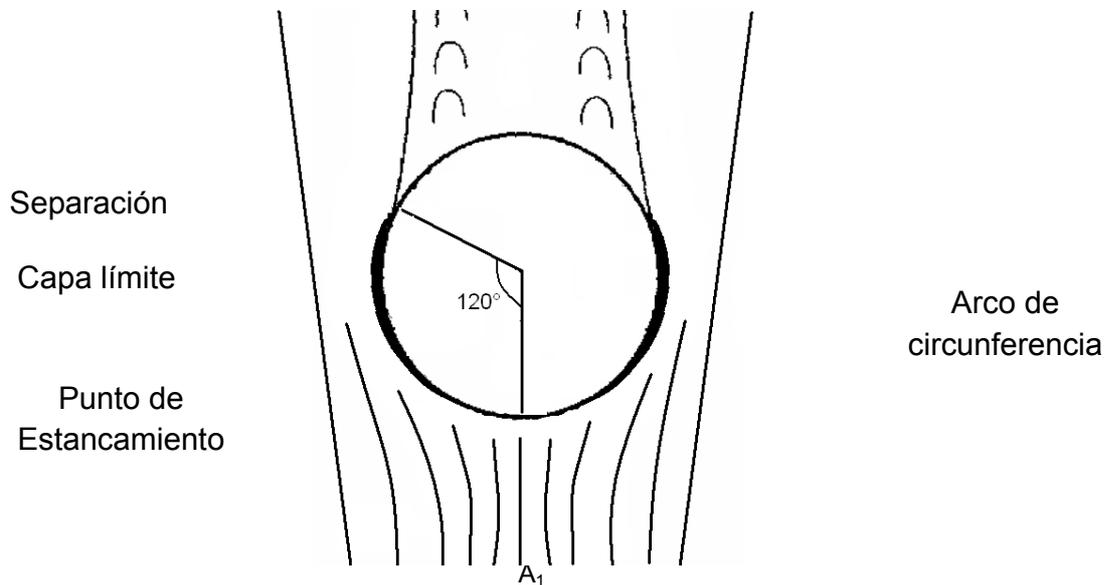


Figura 3.10. Representación capa límite sobre esfera.

La velocidad en la capa límite se aproxima a la velocidad en el flujo principal, en forma asintótica. La capa límite presenta una forma muy delgada ante un cuerpo aerodinámico en reposo sujeto a un flujo uniforme. El gradiente de velocidad y el espesor de la capa límite se puede observar en la figura 3.11.

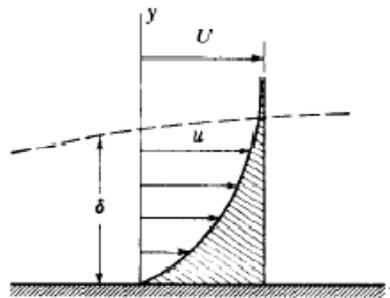


Figura 3.11. Espesor de la capa límite.

Teniendo claro el concepto del esfuerzo cortante a continuación se procede a calcularlo de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \frac{\Delta v}{\Delta r} \quad (3.12)$$

Donde, μ es el coeficiente de viscosidad dinámica del aire y a una temperatura de 20°C es igual a $\mu = 1,8e^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Gradiente de velocidad (Δv): es el gradiente de velocidad definido como la velocidad relativa entre la velocidad del flujo de aire alrededor de la esfera y la velocidad de la esfera. (Ver ecuación 3.13).

$$\Delta v = v_a - v_e \quad (3.13)$$

$$v_a = v_2$$

Espesor de capa limite (Δr):

$$\frac{\Delta r}{x} = \frac{1}{\sqrt{\text{Re}(x)}} \quad (3.14)$$

$$\Delta r = \frac{x}{\sqrt{\text{Re}(x)}}$$

Donde:

(Δr): Espesor de capa limite

x: la distancia entre el punto de estancamiento y el punto de separación; en este caso, es el arco de la circunferencia medido a un ángulo de 120° .

$$x = \theta_{\text{rad}} \times R_{\text{esf}} \quad (3.15)$$

$$\theta = \frac{2}{3}\pi$$

$\text{Re}(x)$: es el número de Reynolds local, que se encuentra en la capa límite.

$$\text{Re}(x) = \frac{\rho v_2 D}{\mu} \quad (3.16)$$

Reemplazando los valores reales en la ecuación 3.13, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\Delta v = \dot{h} - \frac{A_1 v_1}{A_2}$$

$$A_1 = 4.071e^{-3}$$

$$A_2 = \pi(4.37e^{-4}h^2 + 1.5e^{-3}h + 2.398e^{-4})$$

$$A_2 = 1.37e^{-3}h^2 + 4.7e^{-3}h + 7.53e^{-4}$$

$$\Delta_r = \frac{\text{arcox}}{\sqrt{\text{Re}(x)}}$$

$$\text{Re}(x) = \frac{1.0236 \frac{A_1 v_1 0.065}{A_2}}{1.8e^{-5}}$$

$$\text{Re}(x) = \frac{2.7e^{-4}v_1}{2.466e^{-8}h^2 + 8.46e^{-8}h + 1.3554e^{-8}}$$

$$\tau = \frac{\mu \dot{h} - \frac{\mu A_1 v_1}{A_2}}{\frac{1}{\arccos \frac{\sqrt{\text{Re}(x)}}{0.08}}}}$$

$$\tau = \frac{\left(\mu \dot{h} - \frac{\mu A_1 v_1}{A_2} \right) \sqrt{\text{Re}(x)}}{\arccos \frac{\sqrt{\text{Re}(x)}}{0.08}}$$

$$\tau = \frac{\left(1.8e^{-5} \dot{h} - \frac{7.3278e^{-8}v_1}{1.37e^{-3}h^2 + 4.7e^{-3}h + 7.53e^{-4}} \right) \left(\sqrt{\frac{2.7e^{-4}v_1}{2.466e^{-8}h^2 + 8.46e^{-8}h + 1.3554e^{-8}}} \right)}{0.08}$$

Debido a que se tiene el esfuerzo cortante, se procede a encontrar el área superficial de control total (A_{sct}), la cual es la suma de las siguientes áreas:

$$A_{sct} = A_c + A_{sc} \quad (3.17)$$

- a) *Área de contacto (A_c):* el área en la cual interactúa el fluido y la esfera es llamada área de contacto y es una de las áreas en la cual se presenta la fuerza de rozamiento. Ver figura 3.12.

Esta superficie de control se determinó mediante el cálculo de la región de la esfera; exactamente un casquete que varía su dimensión según el ángulo β , que se puede apreciar en la figura 3.12. Este ángulo β depende del desprendimiento de la capa límite en la esfera, la cual varía según la posición en la que se establece dentro del ducto.

Para calcular esta región se separó el casquete de la esfera que hace contacto con el fluido, ver figura 3.12, representado por las siglas A_c y luego proyectando el área de no contacto con el fluido, A_{nc} ; la cual se puede apreciar en figura 3.13.

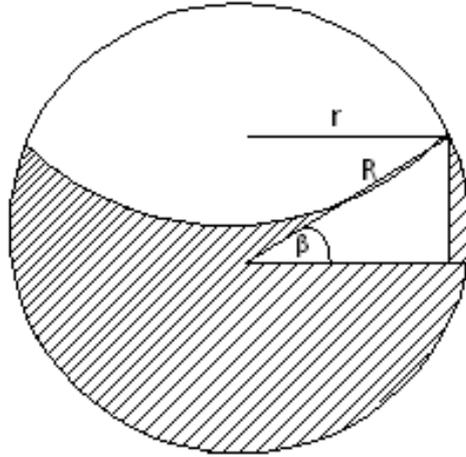


Figura 3.12. Superficie de contacto entre el fluido y la esfera.

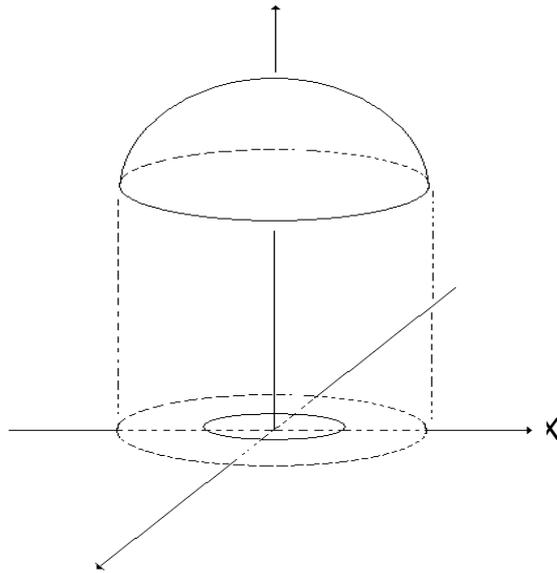


Figura 3.13. Proyección del área de no contacto. ρ_1 , coordenada radial

Definiendo esta región, podemos calcular su dimensión y posteriormente hallar la región de contacto simplemente con la diferencia de la superficie total de la esfera y la superficie del área de no contacto.

$$A_c = A_{esf} - A_{nc} \quad (3.18)$$

Donde, A_c : área superficial de contacto.

A_{esf} : área superficial total de la esfera.

A_{nc} : área superficial de no contacto.

Observando la figura 3.12 y por ecuación trigonométrica se puede calcular el radio r del área de no contacto, el cual está en función del ángulo β . Esta relación se puede observar en la ecuación 3.19:

$$r = R \cos \beta \quad (3.19)$$

Donde, r cambia con respecto a β .

Desde este punto de vista y aplicando la ecuación proyectada en dos dimensiones, la superficie a calcular se presenta en la región, expresada en la ecuación 3.21:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3.20)$$

Esta ecuación expresada en 3 dimensiones, se observa en la ecuación 3.22:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (3.21)$$

Luego, la ecuación 3.21, expresada en el plano x, y y entrega la ecuación que define el área proyectada, ecuación 3.22.

$$f(x,y) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (3.22)$$

Derivando la ecuación 3.22, con respecto a la variable x y la variable y , da como resultado:

$$f_x(x,y) = \frac{-x}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \quad (3.23)$$

$$f_y(x,y) = \frac{-y}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \quad (3.24)$$

Teniendo la función en términos de las coordenadas x, y , la doble integral nos proporciona la región de no contacto:

$$A_{nc} = \iint_{reg} \sqrt{f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y) + 1} \, dx dy \quad (3.25)$$

Factorizando el término del interior de la raíz cuadrada, se tiene:

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2 + 1} = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{R^2 - x^2 - y^2} + 1} = \sqrt{\frac{R^2}{R^2 - x^2 - y^2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}}$$

Partiendo de que f_x y f_y , están definidos en la región $x^2 + y^2 = r^2$, entonces se reemplazan las ecuaciones (3.23) y (3.24) en la doble integral:

$$A_{nc} = \iint_{reg} \frac{R}{\sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} \, dx dy$$

Ahora, si se cambia a coordenadas polares los términos de la doble integral serían:

$$\rho_1^2 = x^2 + y^2 \quad (3.26)$$

$$dx dy = dA = \rho_1 d\rho_1 d\theta \quad (3.27)$$

Reemplazando y desarrollando la doble integral, se tiene:

$$A_{nc} = \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{R}{\sqrt{R^2 - \rho_1^2}} \rho_1 d\rho_1 d\theta = 2\pi R \int_0^r \frac{\rho_1 d\rho_1}{\sqrt{R^2 - \rho_1^2}}$$

$$A_{nc} = 2\pi R \left[-\sqrt{R^2 - \rho_1^2} \right]_0^r = 2\pi R \left[R - \sqrt{R^2 - r^2} \right]$$

Reemplazando el término r , $r = R \cos \beta$

$$A_{nc} = 2\pi R^2 \left[1 - \sqrt{1 - \cos^2 \beta} \right]$$

Terminando el cálculo de esta área de no contacto sería igual a,

$$A_{nc} = 2\pi R^2 [1 - \sin \beta] \quad (3.28)$$

De esta manera el área de contacto, se presenta en la ecuación 3.29:

$$\begin{aligned} A_c &= A_{esf} - A_{nc} \\ A_c &= 4\pi R^2 - 2\pi R^2 [1 - \sin \beta] \\ A_c &= 2\pi R^2 + 2\pi R^2 \sin \beta \\ A_c &= 2\pi R^2 [1 + \sin \beta] \end{aligned} \quad (3.29)$$

- b) *Área superficial cónica (Asc)*: La siguiente área superficial a calcular, sería la que se origina entre la esfera y el ducto, la cual hace parte del esfuerzo cortante que se presenta en el fluido. Esta área superficial, ver figura 3.14, se puede determinar mediante funciones trigonométricas, para posteriormente sumarla con el área de contacto y obtener así la superficie de control en donde se produce el esfuerzo cortante.

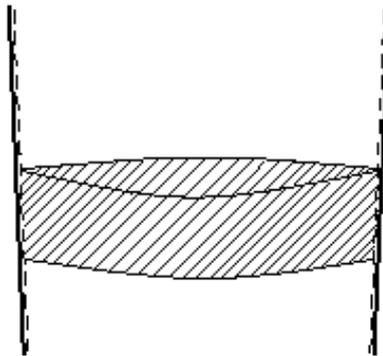


Figura 3.14. Área superficial cónica de área de control.

Para calcular esta área por medio de funciones trigonométricas se referenciará en los puntos h_1 y h_2 del plano x, y , como se muestra en la figura 3.15:

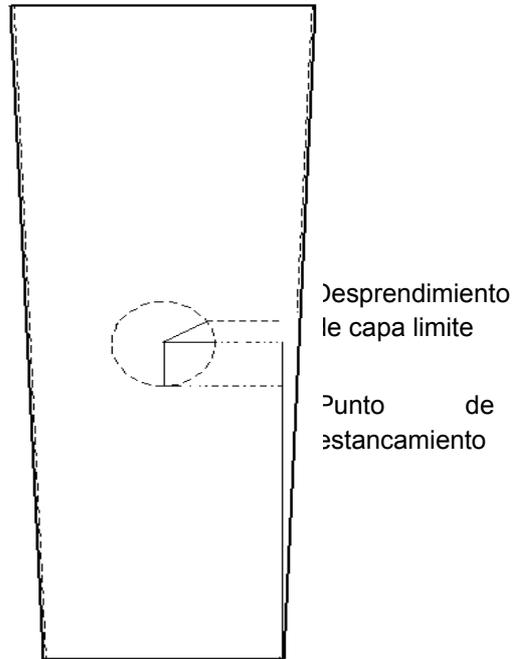


Figura 3.15. Puntos de referencia del área superficial cónica del ducto de área variable

Se emplearán dos alturas h_1 y h_2 , para calcular las áreas que proporcionaran la superficie de control. La variable h , es la variable asignada para determinar la altura a la que se posiciona la esfera dentro del ducto. La variable h_1 , es la variable que identifica la altura en la cual la capa límite del fluido se desprende de la esfera medida desde el punto de estancamiento. Por su parte la variable h_2 , es la variable que determina el punto de estancamiento, es decir el punto donde el fluido hace contacto con la esfera. Cada una de las variables serán empleadas en el siguiente cálculo de las áreas que se necesitan para obtener la superficie de control que rodea la esfera.

Como se mencionó anteriormente, la altura h_2 representa la altura desde la posición cero, para el ducto de área variable, hasta el desprendimiento de la capa límite. La altura y el radio para este punto, en el ducto de área variable, se pueden obtener mediante la expresión:

$$h_2 = h + r_e \sin \beta \quad (3.30)$$

$$r_2 = h_2 \tan \theta \quad (3.31)$$

Donde, h : altura de la esfera.
 r_e : radio de la esfera.

β : Ángulo entre el centro de la esfera y el punto del desprendimiento de la capa límite.

r_2 : radio del ducto de área variable en la posición de la esfera en h_2 .

θ : Ángulo entre las paredes del ducto de área variable, ver figura 3.15.

Para la obtención del área del ducto de diámetro variable, la cual dimensiona desde la posición cero hasta el desprendimiento de la capa límite, se realiza mediante las expresiones 3.32 y 3.33 respectivamente:

$$r_{c2} = r_b + r_2 \quad (3.32)$$

$$A_{sc2} = \pi r_{c2} \sqrt{r_{c2}^2 + h_2^2} \quad (3.33)$$

Donde, A_{sc2} : área superficial en h_2

r_{c2} : es la adición entre los radios de r_b y r_2 .

R_b : radio de la base inferior

Por otro lado, la altura h_1 representa la altura desde la posición cero hasta el punto de estancamiento. Esta altura y el radio para este punto en el ducto de área variable se pueden obtener mediante las expresiones (3.34) y (3.35):

$$h_1 = h - r_e \quad (3.34)$$

$$r_1 = h_1 \tan \theta \quad (3.35)$$

Donde, h : altura de la esfera.

r_e : radio de la esfera.

β : Ángulo entre el centro de la esfera y el punto del desprendimiento de la capa límite.

r_1 : radio del ducto de área variable en la posición de la esfera en h_1 .

θ : Ángulo entre las paredes del ducto de área variable acotado, ver figura 3.15.

Para la obtención del área del ducto de diámetro variable, la cual dimensiona desde la posición cero hasta el desprendimiento de la capa límite, se realiza mediante las expresiones (3.36) y (3.37):

$$r_{c1} = r_b + r_1 \quad (3.36)$$

$$A_{sc1} = \pi r_{c1} \sqrt{r_{c1}^2 + h_1^2} \quad (3.37)$$

Donde, A_{sc1} : área superficial en h_1 .

r_{c1} : es la adición entre los radios de r_b y r_1 .

r_b : radio de la base inferior.

De esta manera el área superficial de control (A_{sc}) del entorno de la esfera en cualquier posición de la esfera se muestra en la ecuación 3.38:

$$A_{sc} = A_{sc2} - A_{sc1} \quad (3.38)$$

Las áreas encontradas, área de contacto y área superficial cónica, se suman con el fin de conformar la superficie de control total, en la cual actúa el esfuerzo cortante.

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.02h - 6.8e^{-4} \\ r_{c1} &= 0.02h + 0.003532 \end{aligned}$$

$$A_{sc1} = \pi \left((0.02h + 0.03532)^2 + 0.036^2 \right) + \pi(0.02h + 0.03532) \left(\sqrt{(h - 0.0325)^2 + (0.02h + 0.03532 - 0.036)^2} \right)$$

$$\begin{aligned} A_{sc1} &= 1.256e^{-3}h^2 + 4.43e^{-3}h + 8.14e^{-3} + \\ &(0.198h + 0.3486) \left(\sqrt{h^2 - 0.0325h + 1.056e^{-3}} \right) \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h + 0.0295 \\ r_2 &= 0.02h + 6.18e^{-4} \\ r_{c2} &= 0.02h + 0.0366 \end{aligned}$$

$$A_{sc2} = \pi \left((0.02h + 0.0366)^2 + 0.036^2 \right) + \pi(0.02h + 0.0366) \left(\sqrt{(h + 0.0295)^2 + (0.02h + 0.0366 - 0.036)^2} \right)$$

$$\begin{aligned} A_{sc2} &= 1.256e^{-3}h^2 + 4.6e^{-3}h + 8.28e^{-3} + \\ &(0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$A_{sct} = A_{sc2} - A_{sc1}$$

$$A_{sct} = 1.7e^{-3}h + 1.4e^{-3} + (0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right) - (0.198h + 0.3486) \left(\sqrt{h^2 - 0.0325h + 1.056e^{-3}} \right) \quad (3.41)$$

Finalmente, el área de control con todas las variables reales se expresa en la siguiente ecuación (3.42)

$$A_c = 0.205$$

$$A = A_c + A_{sct}$$

$$A = 1.7e^{-3}h + 0.207 + (0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right) - (0.198h + 0.3486) \left(\sqrt{h^2 - 0.0325h + 1.056e^{-3}} \right) \quad (3.42)$$

Las constantes presentes en esta fuerza se pueden verificar en el anexo E.

3.1.2.3.2 Fuerza de propulsión F_p .

La fuerza de propulsión que desarrolla el ventilador es igual al producto de la masa de aire que arroja en un segundo por la velocidad de los mismos, es decir: es una fuerza de reacción descrita cuantitativamente por la tercera ley de Newton. Cuando un sistema expelle o acelera masa en una dirección (acción), la masa acelerada causará una fuerza igual en sentido opuesto (reacción). Cuando la hélice que gira empuja el aire, el empuje hacia adelante es proporcional a la masa del aire multiplicada por la velocidad media del flujo de aire. Esta fuerza se representa como el cambio de momento lineal del aire acelerado, y se expresa mediante la ecuación 3.43.

$$P = \dot{m}v \quad (3.43)$$

Donde, P: Fuerza de propulsión del aire.
 \dot{m} : Cambio de masa del aire.
v: Velocidad de la masa del aire.

La fuerza de propulsión es la fuerza encargada de mover la esfera en el interior del ducto y se genera por la reacción de la aceleración de la masa del aire. Conociendo la estructura física del sistema de levitación, se puede apreciar que el ducto de diámetro variable genera un cambio de presión en alturas diferentes y obliga a la fuerza propulsión aumentar o disminuir según el valor de altura

deseado. Esta fuerza explica su función debido a que la esfera se presenta como una obstrucción al libre movimiento del aire lo cual entre la esfera y el fluido se presenta un punto de estancamiento que hace que el flujo rodee la esfera hasta al desprendimiento de la capa límite. En esos instantes se aprecia claramente un cambio de la masa del fluido, ver figura 3.16. Pág. 134 [7].

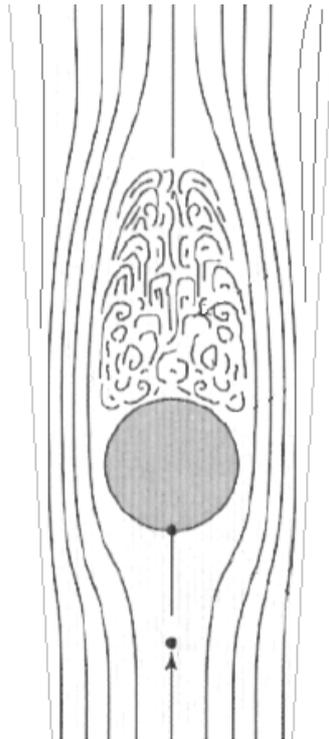


Figura 3.16. Masa del fluido en el ducto de área variable

Es decir en el momento que el fluido sobrepasa la esfera. De acuerdo al cambio de masa del fluido se tiene la siguiente expresión:

$$F_P = m_2 v_2 - m_1 v_1 \quad (3.44)$$

Esta ecuación denominada de la continuidad, expresa el principio de conservación de la masa para un volumen de control. Es decir, la variación de masa dentro del volumen de control, es igual al caudal másico que sale del volumen de control, menos el caudal másico que entra al volumen de control:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} + \overline{m}_{sal} - \overline{m}_{ent} = 0 \quad (3.45)$$

Debido a que $(dm_{vc})/dt = 0$, porque la corriente de aire en el ducto no es afectada por fuerzas exteriores, y cuyas fuerzas internas no son disipadoras por lo tanto cumple el teorema de Bernoulli, entonces:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 v_1 &= \dot{m}_2 v_2 \\ \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m} \\ F_P &= \dot{m} v_2 - \dot{m} v_1 \\ F_P &= (v_2 - v_1) \dot{m} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\dot{m} = \rho A v \quad (3.47)$$

Reemplazando la ecuación (3.47) en la ecuación (3.46) y simplificando se obtiene:

$$F_P = (v_2 - v_1) \rho A v_1 \quad (3.48)$$

Donde, V_2 : velocidad a los lados de la esfera.

V_1 : velocidad de entrada, después del contractor.

ρ : Densidad del fluido.

Reemplazando 3.49 en 3.48,

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2} \quad (3.49)$$

$$F_P = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1 \right) \rho A_1 v_1^2 \quad (3.50)$$

Finalmente, reemplazando las variables reales en la ecuación 3.50, se obtiene la siguiente ecuación.

$$F_P = \left(\frac{4.071e^{-3}}{1.37e^{-3}h^2 + 4.7e^{-3}h + 7.53e^{-4}} - 1 \right) 4.167v_1^2 \quad (3.51)$$

Las constantes presentes en esta fuerza se pueden verificar en el anexo E.

3.1.2.3.3 Fuerza perdidas en la expansión F_{PE} .

Debido a la diferencia de áreas en el ducto de diámetro variable, es decir, $A_2 > A_1$ se generan perdidas de energía del flujo de aire en la expansión del ducto, actuando como una fuerza contraria al flujo de aire. Estas pérdidas se representan

en la ecuación 3.52, las cuales dependen fundamentalmente del coeficiente de pérdidas k, Pág. 286 [6].

$$h_l = k(v^2/2g) \quad (3.52)$$

Donde, K = coeficiente de expansión gradual.

D₁ = diámetro menor = 0.068 m

D₂ = diámetro antes de la esfera o donde se encuentra en punto de estancamiento.

Donde v es la velocidad de entrada en el ducto. La magnitud de k depende de la relación de diámetros D₂/D₁ y el ángulo de cono θ, (ver figura 17). El valor de k se encuentra en la tabla 4.

Tabla 4. Relación de diámetro y grados del cono para perdidas por expansión.

Fuente: King, H.W. y E.F. Brater. 1963. Handbook of Hydraulics, 5ª ed. Nueva York: McGraw-Hill, tabla 6-8.

Ángulo del cono θ												
D ₂ /D ₁	2°	6°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57	0.61
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63	0.68
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65	0.70
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
∞	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72

El valor de pérdidas h_l encontrado esta en metros, para poder ingresar el valor de estas pé

< 4rdidas F_{h1} a la sumatoria de fuerzas multiplicamos h_l por el peso específico (gravedad por densidad del aire) y por el área superficial.

$$F_{h1} = h_l A_{\text{superficial}} \rho g \quad (3.53)$$

Luego, se encontró que el ángulo 2θ es de 2.3° y la máxima relación entre diámetros (D₁ = 0.068 y D₂ = 0.095) es de 1.26 por lo tanto los valores del coeficiente k para las perdidas por expansión es de k = 0.01.

Finalmente, reemplazando las variables reales en la ecuación 3.53, se obtiene la siguiente ecuación.

$$F_{PE} = h_l A_{sc2} \rho g \quad (3.54)$$

$$h_l = 5.12e^{-4} v_1^2$$

$$F_{PE} = (5.117e^{-3} v_1^2) 1.256e^{-3} h^2 + 4.6e^{-3} h + 8.28e^{-3} + (0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right) \quad (3.55)$$

Las constantes presentes en esta fuerza se pueden verificar en el anexo E.

3.2 CARACTERIZACION DEL SENSOR ULTRASONIDO.

La caracterización del sensor de ultrasonido se realizó por medio de los datos obtenidos de las mediciones reales que proporciona el sensor de ultrasonido. El voltaje de salida se obtiene de la salida de la etapa de adecuación del sensor de ultrasonido, ver ítem 2.1.2.c; para corroborar la calibración del sensor se midió externamente con un metro la distancia entregada. Los datos consignados en la tabla 5 proporcionan la curva característica real del sensor de ultrasonido para el sistema de levitación neumática, ver figura 3.17

Tabla 5. Datos en tiempo real del sensor de ultrasonido.

Distancia (m)	Voltaje (voltios)
0.01	0.1
0.04	0.4
0.07	0.7
0.10	1.0
0.13	1.3
0.16	1.6
0.19	1.9
0.22	2.2
0.25	2.5
0.28	2.8
0.31	3.1
0.34	3.4
0.37	3.7
0.40	4.0

0.43	4.3
0.46	4.6
0.49	4.9

Teniendo en cuenta la tabla 4 que proporciona el sensor de ultrasonido, se continúa con la caracterización del sensor de ultrasonido.

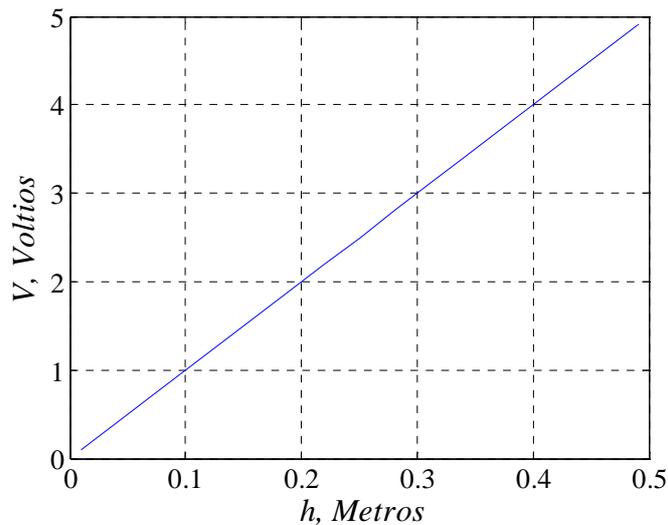


Figura 3.17. Respuesta sensor de ultrasonido. Distancia vs Voltaje.

Esta representación de los datos obtenidos del sensor permite encontrar la ganancia del sensor, mediante el cálculo de la pendiente de la respuesta del sensor:

$$m = \frac{1.6-0.7}{0.16 - 0.07}$$

Finalmente, este sensor entrega una ganancia igual a:

$$m = 10 \text{ Voltios / m}$$

$$\text{Voltaje} = m \times \text{Distancia} \quad (3.56)$$

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR. VENTILADOR HELICOIDAL, DIRECCIONADOR DE FLUJO Y CONTRACTOR.

De igual manera que el sensor, se caracterizó el conjunto formado por el ventilador helicoidal, el direccionador de flujo y el contractor, estos elementos

forman el actuador, el cual entrega la velocidad del flujo que circula a través del ducto en tiempo real. La medición de estos datos se realizó en el laboratorio de neumática del departamento de física de la universidad del Cauca, supervisado por el ingeniero Germán Bacca, donde con un anemómetro se midió la velocidad directamente a la salida del actuador con el fin de registrar las velocidades a la entrada al ducto de diámetro variable (Diámetro menor del ducto). Estos datos se registraron en la tabla 6.

Tabla 6. Datos en tiempo real del ventilador. Longitud del ducto: 5 cm.

Voltaje (voltios)	Velocidad (m/s)
5.5	1.8
6	1.8
6.5	1.9
7	2
7.5	2.1
8	2.3
8.5	2.4
9	2.5
9.5	2.5
10	2.7
10.5	3
11	3.1
11.5	3.2
12	3.4

Los datos se visualizan en la figura 3.18, los cuales representan la velocidad de entrada al ducto de área variable en función del voltaje aplicado al ventilador.

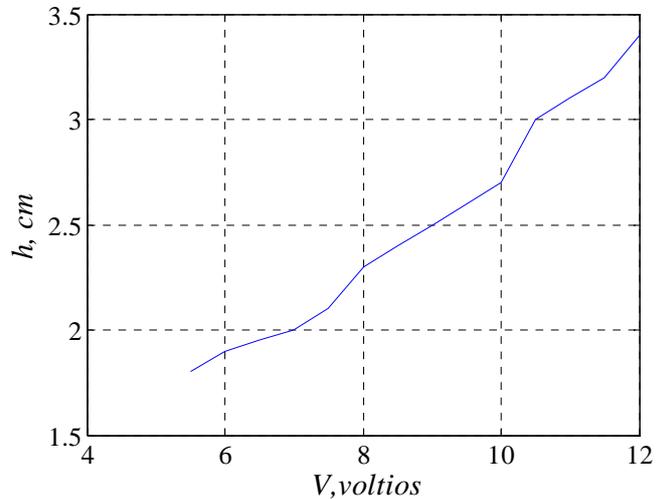


Figura 3.18. Grafica de voltaje vs velocidad. Ventilador 24 vdc.

La figura 3.18 muestra un comportamiento no lineal del actuador, por lo que dificulta obtener su ganancia, de esta manera se opto por obtener ganancias en los tramos más significativos y así establecer el comportamiento del actuador para la simulación del sistema. Los rangos y ganancias se observan en la tabla 7.

Tabla 7. Ganancias y rangos del actuador.

Rango (voltajes)	Ganancia
$5.5 \leq R \leq 7.5$	0.15
$7.5 < R \leq 8$	0.2
$8 < R \leq 9$	0.3
$9 < R \leq 12$	0.36

3.4 MODELADO TOTAL DEL SISTEMA DE LEVITACION.

Conociendo cada uno de los bloques del sistema de levitación neumática, a continuación se representara cada ecuación de cada uno de los bloques en el sistema total., ver figura 3.19.

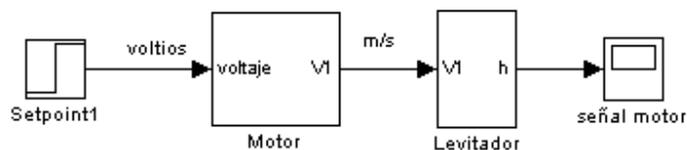


Figura 3.19. Diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.

La ecuación total de la planta obtenida por el sistema de fuerzas, se representa en la ecuación 3.57, que posteriormente se muestra con todas las variables reales del sistema en la ecuación 3.58:

$$F_r + F_{PE} + W - F_p = m\ddot{h} \quad (3.57)$$

Ecuación de la planta (Levitador Neumático), con todas las variables reales del sistema:

$$\left(\frac{\left(1.8e^{-5}\dot{h} - \frac{7.3278e^{-8}v_1}{1.37e^{-3}h^2 + 4.7e^{-3}h + 7.53e^{-4}} \right) \left(\sqrt{\frac{2.7e^{-4}v_1}{2.466e^{-8}h^2 + 8.46e^{-8}h + 1.3554e^{-8}}} \right)}{0.08} \right) -$$

$$(1.7e^{-3}h + 0.207 + (0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right) -$$

$$(0.198h + 0.3486) \left(\sqrt{h^2 - 0.0325h + 1.056e^{-3}} \right))$$

$$(5.117e^{-3}v_1^2) 1.256e^{-3}h^2 + 4.6e^{-3}h + 8.28e^{-3} + (0.194h + 0.115) \left(\sqrt{h^2 + 0.0602h + 8.7036e^{-4}} \right)$$

$$+ 0.0191 - \left(\frac{4.071e^{-3}}{1.37e^{-3}h^2 + 4.7e^{-3}h + 7.53e^{-4}} - 1 \right) 4.167v_1^2 = m\ddot{h} \quad (3.58)$$

La ecuación que representa el motor se muestra en la ecuación 3.59, la cual como se menciona en el ítem 3.3, se obtuvo por medio de una regresión lineal.

$$v = 0.37V - 1.0346 \quad (3.59)$$

La ecuación que representa la ganancia del sensor visualiza en la siguiente ecuación:

$$\text{Ganancia de sensor} = 10 \quad (3.60)$$

4. SIMULACION DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA

Teniendo en cuenta el modelo del levitador neumático, a continuación se simula a través de *Matlab* versión 7.5, el cual proporciona la respuesta del sistema a diferentes valores de entrada. Esta respuesta debe entregar la posición de la esfera y esta posición debe ser compatible en lo máximo posible a la altura de la esfera en tiempo real.

4.1 SIMULACIÓN DE LA PLANTA (LEVITADOR NEUMÁTICO).

El código de Matlab, que se trabaja en este programa se puede observar en detalle en el anexo A. Para esta simulación se tuvieron en cuenta todos los valores reales de la planta, tales como; peso y diámetro de la esfera, área menor del ducto, densidad y viscosidad dinámica del aire, ángulo de inclinación del ducto y cuya entrada es un escalón que representa la velocidad de entrada.

En el anexo A se encuentra la función *Flevitador*, la cual contiene las ecuaciones del modelo del levitador neumático; el programa principal *Levitador* evalúa la ecuación general del modelo, los valores de entrada al sistema y la graficas de las respuestas. Los valores medidos con el anemómetro se introdujeron al programa y se obtuvieron los siguientes resultados.

- a) Prueba 1: la primera simulación se realizó con velocidad de entrada de 2 m/s, la cual estabilizó la esfera a una altura de 22 cm, con un tiempo de estabilización aproximado de 25 segundos que representan las no linealidades presentes en el modelo como la fuerza de rozamiento y las perdidas en la expansión, ver figura 4.1.

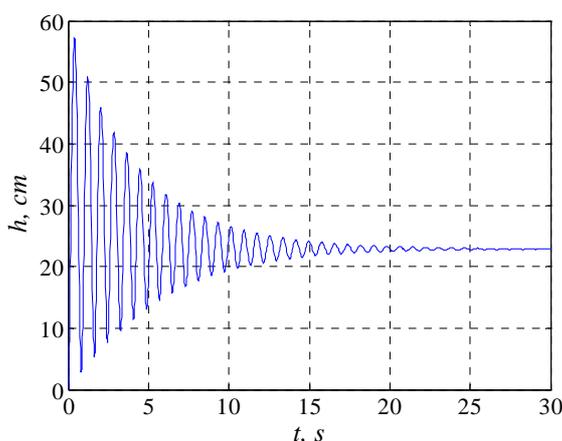


Figura 4.1. Simulación con velocidad de entrada de 2 m/s.

- b) Prueba 2: la segunda simulación se realizó con velocidad de entrada de 2.8 m/s, la cual estabilizó la esfera ha una altura de 32 cm, con un tiempo de estabilización aproximado de 21 segundos, Ver figura 4.2. Esto demuestra que a medida que la esfera sube la fuerza de rozamiento baja su incidencia, debido al cambio de área en el ducto; esto es, cada centímetro que la esfera sube, esta se aleja mas de las paredes del ducto.

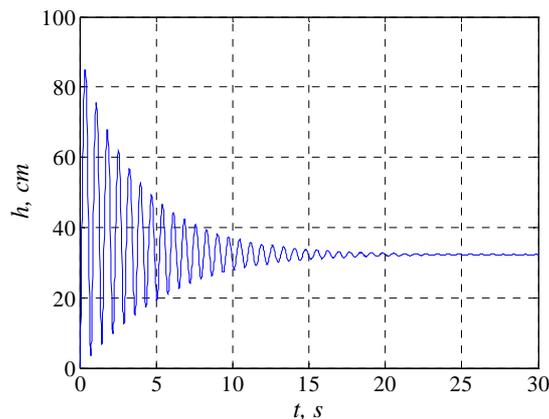


Figura 4.2. Simulación con velocidad de entrada de 2.8 m/s.

- c) Prueba 3: la tercera simulación del modelo se realizó con velocidad de entrada de 3.4 m/s. La cual estabilizo la esfera ha una altura de 36 cm, con un tiempo de estabilización aproximado de 20 segundos, ver figura 4.3. Lo cual confirma lo mencionado en el ítem b.

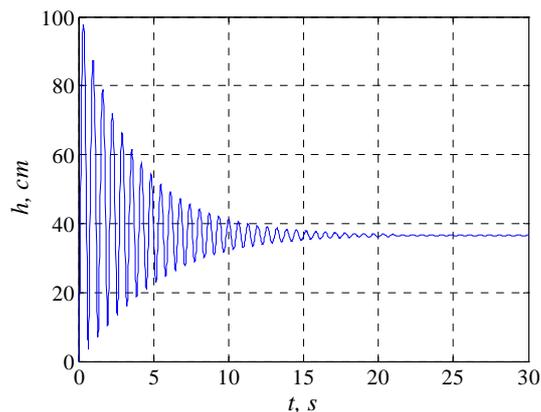


Figura 4.3. Simulación con velocidad de entrada de 3.4 m/s.

- d) Prueba 4: la simulación final del modelo se realizó con velocidad de entrada de 3.7 m/s. La cual estabilizo la esfera ha una altura de 38 cm, con un tiempo

de estabilización aproximado de 18 segundos, ver figura 4.4, evaluando de esta manera el rango completo del ducto real.

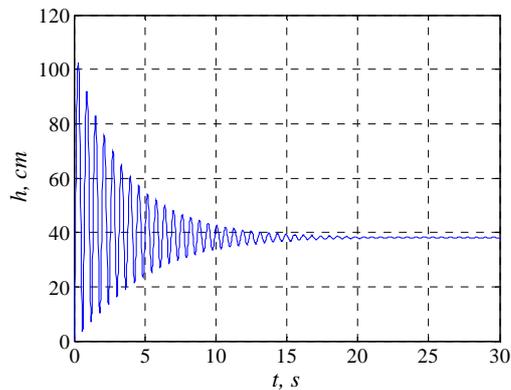


Figura 4.4. Simulación con velocidad de entrada de 3.7 m/s.

4.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA EN MALLA ABIERTA.

En la figura 4.5 se observa el sistema de levitación neumática en malla abierta.

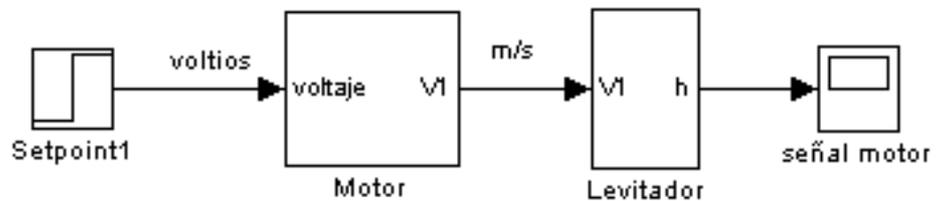


Figura 4.5 Simulación del Sistema de levitación neumática en malla abierta.

En la figura 4.6 se observa la respuesta en lazo abierto del sistema de levitación neumática ante una entrada de 10 voltios.

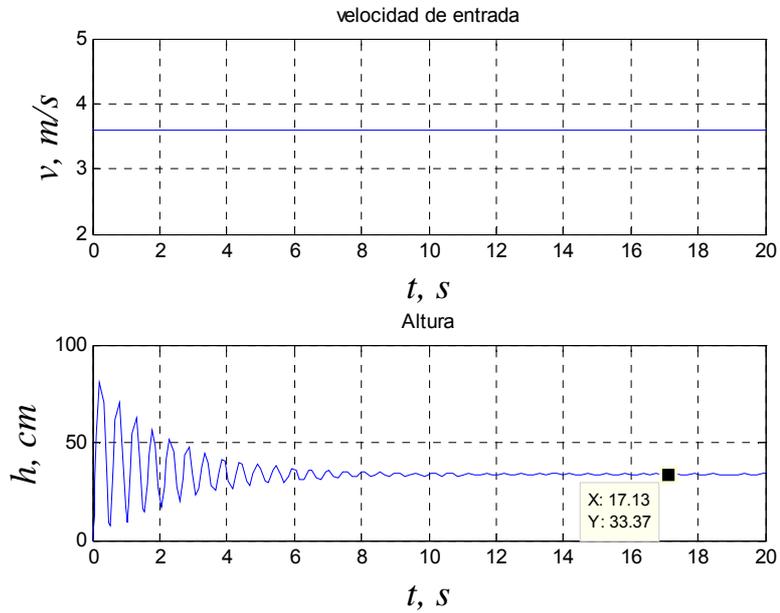


Figura 4.6. Simulación del sistema de levitación, velocidad de entrada $v = 3.6$ m/s.

En la figura 4.7 se observa la respuesta en lazo abierto del sistema de levitación neumática ante una entrada de 8 voltios.

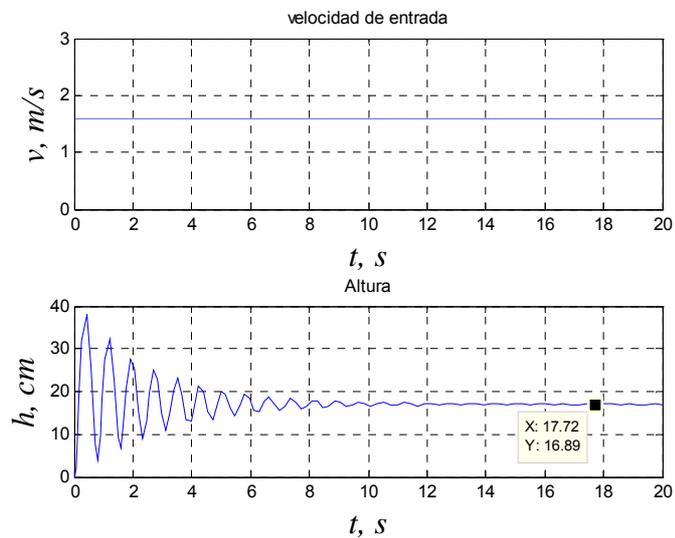


Figura 4.7. Simulación del sistema de levitación, voltaje de entrada 8 voltios.

4.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA EN MALLA CERRADA.

En la figura 4.8 se observa el lazo cerrado del sistema de levitación neumática, controlado mediante un PID.

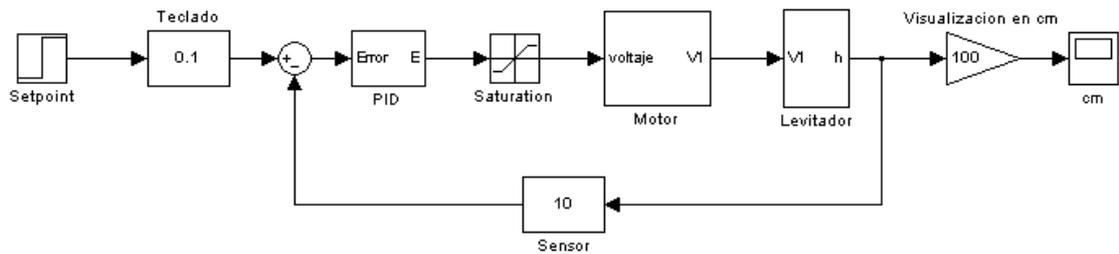


Figura 4.8. Sistema de levitación neumática en malla cerrada.

- a) Prueba 1. Este sistema entrega la respuesta que se observa en la figura 4.9 para un valor de setpoint de 10 cm, con ganancias del controlador de $k_p = 100$, $T_i = 100000$ y $T_d = 0.2$. Ganancias que comprenden un rango de 0 cm a 15 cm.

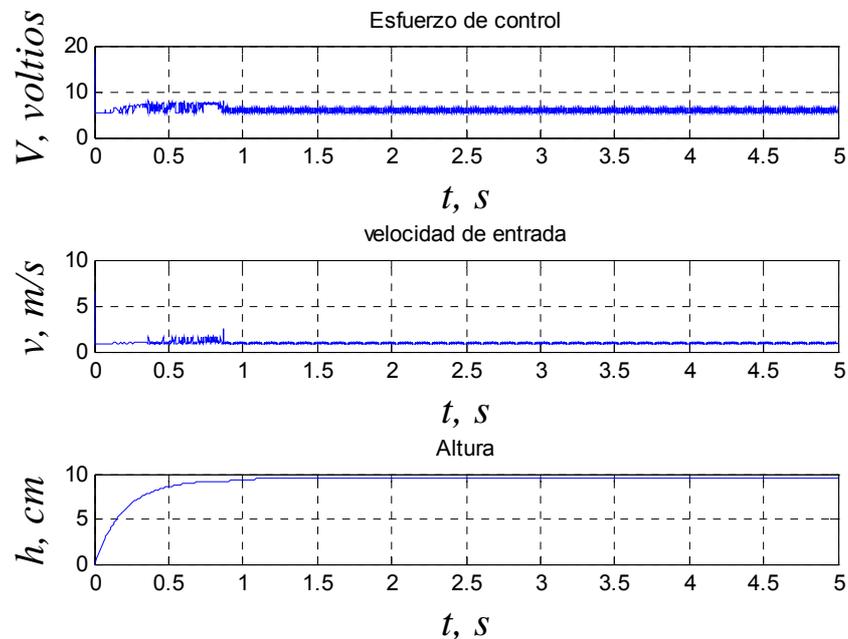


Figura 4.9. Respuesta del sistema de levitación neumática, 10 cm.

b) Prueba 2. Se sintonizo el PID para un rango entre 15 cm y 25 cm, cuyas ganancias fueron de $k_p = 130$, $T_i = 100000$ y $T_d = 0.15$, ver figura 4.10.

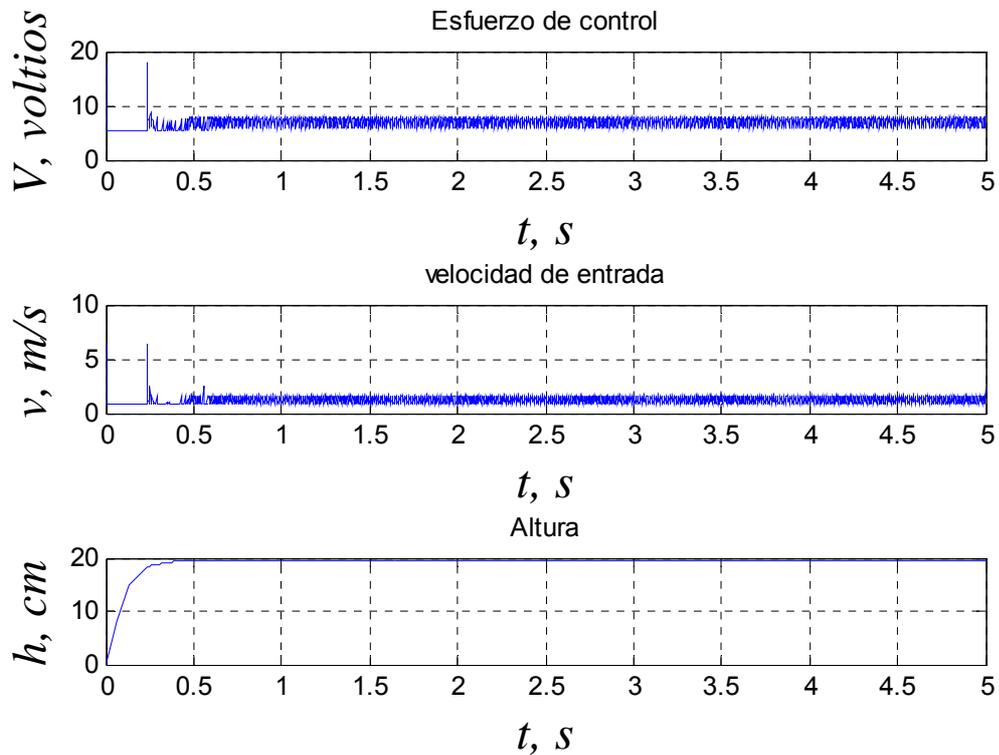


Figura 4.10. Respuesta del sistema de levitación neumática, 20 cm.

c) Prueba 3. Se sintonizo el PID para un rango entre 25 cm y 35 cm, cuyas ganancias fueron de $k_p = 160$, $T_i = 100000$ y $T_d = 0.3$, ver figura 4.11.

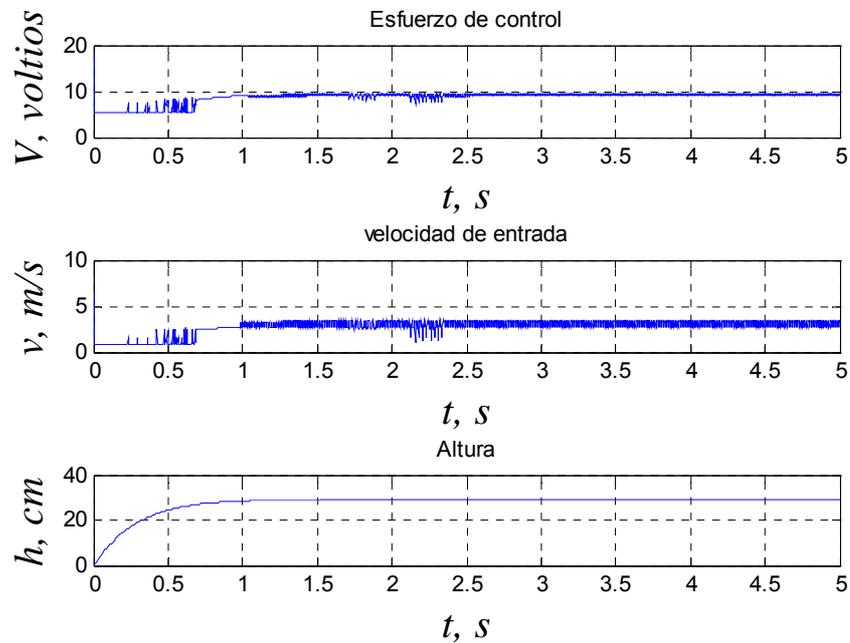


Figura 4.11 Respuesta del sistema de levitación neumática, 30 cm.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con las pruebas de simulación realizadas se observó que efectivamente en malla abierta el modelo elaborado garantiza una suspensión estable en cualquier posición dentro del ducto, representado en su estado estacionario. En su estado transitorio se presentan oscilaciones que en teoría no deberían presentarse debido a que el ducto de diámetro variable garantiza un cambio proporcional de presión que permite que se establezca la esfera en cualquier posición del ducto sin presentar oscilación alguna.

Con esta simulación se corroboró que los rangos de trabajo establecidos en la etapa de diseño son los esperados, tales como, rango de traslación de la esfera (0 – 40 cm) y velocidades de salida no mayores a 5 m/s en el actuador y un esfuerzo de control menores a 24 voltios.

Con la simulación del PID, se observó que la ganancia proporcional no alcanza todos los rangos del ducto, haciendo que la sintonización se establezca por rangos de altura. Consiguiendo un error de estado estable casi nulo y una respuesta rápida para cada rango determinado.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA

La implementación del sistema de levitación neumática se realiza por bloques. El primer bloque es el del sensado, el segundo bloque es la entrada para ingreso de datos para el set point de la variable controlada y el tercero es la planta.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL BLOQUE DE SENSADO.

Para implementar la etapa de sensado se usó como elemento primario de medición el sensor de ultrasonido SFR05, para trabajar este dispositivo de ultrasonido se utilizó un microcontrolador, el cual genera el pulso de excitación y recibe el eco para calcular internamente la distancia a la cual se encuentra la esfera, la distancia es visualizada mediante un LCD y para obtener el valor de la distancia en voltaje se utiliza un conversor digital analógico. Este voltaje es la señal de referencia para el lazo de control.

Teniendo en cuenta que se usó un microcontrolador para coordinar las funciones del sensor SFR05 se implementó el programa "SENSOR_SFR05.asm" el cual se puede ver en detalle en el anexo B. este programa inicia su funcionamiento enviando un impulso a nivel alto de disparo con una duración mínima de 10 μ s al pin 3 del sensor, la cual corresponde al disparo. Después que el sensor ejecuta el disparo, lee el pulso que sale por el pin 2 del sensor que corresponde al Eco y se mide su longitud que es proporcional al eco recibido. Después de obtener la distancia a través de la relación de tiempos, ver figura 5.1, se envía ese valor para visualizarlo en el LCD.

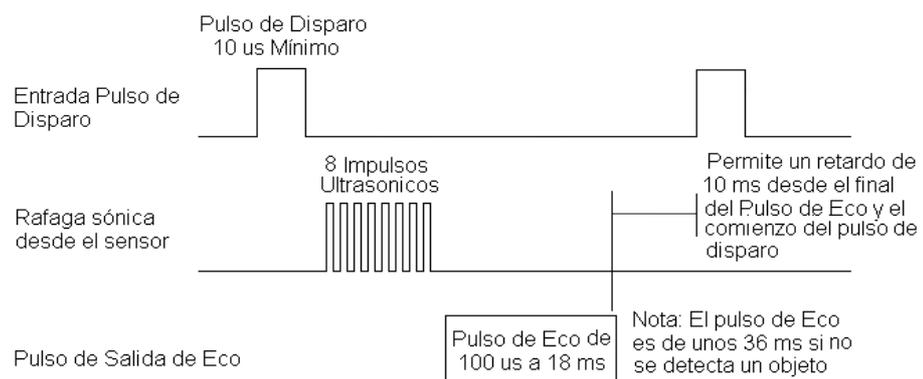


Figura 5.1. Diagrama de tiempos original del sensor de ultrasonido. Fuente: Palacios M. Enrique, Remiro D. Fernando, López P. Lucas, (2004).

Teniendo esta relación de tiempos, entre el objeto, el emisor y receptor del ultrasonido, se procede a encontrar mediante el desbordamiento del timer0 el tamaño del pulso que determina la distancia a la que está el objeto. De esta manera se puede especificar mediante líneas de código el desbordamiento del timer0, el cual para este caso por cada centímetro de distancia la anchura del pulso se incrementa en 60 μ s.

5.1.1 Despliegue de la distancia mediante un LCD.

Para visualizar la distancia medida por medio del sensor de ultrasonido se utilizó un modulo LCD, ver figura 5.2. Este modulo se configuró en el mismo programa, "SENSOR_SFR05.asm", con el cual trabaja el sensor de ultrasonido. Para trabajar con el modulo LCD se inicializó con las instrucciones que deberán ser ejecutadas por el modulo LCD antes de su funcionamiento normal. Las instrucciones que están dentro de la inicialización solamente se ejecuta después que se enciende el modulo LCD y no podrán ser cambiadas posteriormente. Con la inicialización ejecutada, se procede a utilizar los bits de configuración para habilitación del modulo. Estos bits básicamente son los encargados de dejar que el modulo lea o escriba datos de una fuente externa, en este programa se uso el pin RA0 para la para habilitación de lectura y escritura y el pin RA2 para habilitar las instrucciones de configuración del modulo y que este siempre este en funcionamiento. La distancia calculada en el microcontrolador PIC16F877A es convertida en una palabra en formato BCD de 4 bits mediante las funciones de la librería BIN_BCD.INC. Esta palabra es enviada por los pines RB4 A RB7 a los pines DB4 A DB7 respectivamente del LCD. La configuración total del LCD se describe en la tabla 8.

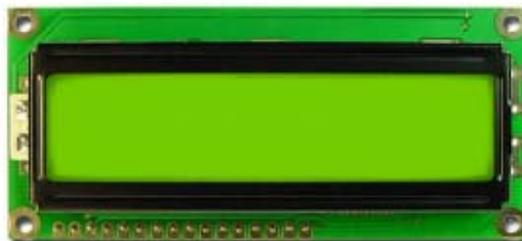


Figura 5.2. LCD 2x16: está compuesto por 2 líneas de 16.

La configuración utilizada para usar el modulo LCD es la siguiente:

Tabla 8. Conexión del modulo LCD.

Pin N	Sismología	Nivel	I/O	Función
1	VSS	-	-	0 Vlts. Tierra (GND).
2	VCC	-	-	+ 5 Vlts. DC.
3	Vee = Vc	-	-	Ajuste del Contraste. 0 Vlts. Tierra (GND).
4	RS	0/1	I	0= Escribir en el modulo LCD. 1= Leer del modulo LCD línea RA0
5	R/W	0/1	I	0= Entrada de una Instrucción. 1= Entrada de un dato. 0 Vlts. Tierra (GND).
6	E	1	I	Habilitación del modulo LCD línea RA2
7	DB0	0/1	I/O	Sin conexión
8	DB1	0/1	I/O	Sin conexión
9	DB2	0/1	I/O	Sin conexión
10	DB3	0/1	I/O	Sin conexión
11	DB4	0/1	I/O	Pin RB4
12	DB5	0/1	I/O	Pin RB5
13	DB6	0/1	I/O	Pin RB6
14	DB7	0/1	I/O	Pin RB7
15	A	-	-	Sin conexión
16	K	-	-	Sin conexión

5.1.2 Obtención de la distancia en voltaje.

La distancia calculada en el micro controlador PIC16F877A es enviada internamente al puerto C del mismo microcontrolador, estas salidas son conectadas a las entradas del DAC0808 para poder hacer la conversión de la palabra binaria en un voltaje analógico. El DAC0808 es un integrado que convierte una palabra binaria de 8 bits en un voltaje analógico, con una palabra binaria de 8 bits se puede obtener $2^8=256$ combinaciones para representar un numero en decimal, así mismo este integrado si tiene un voltaje de referencia (pin numero 14)

igual a -2.56 voltios y en su salida (pin numero 4) tiene una resistencia de 10k que entrega 0.01 voltios por cada valor binario de entrada. Para este trabajo se manejan rangos de 0 a 40 cm lo que equivale a la salida del DAC0808 un voltaje de salida entre 0 y 0.4 voltios, este voltaje es muy pequeño por lo tanto necesitamos amplificarlo en un valor de 10 para que el valor de salida tenga un rango mas confiable al manejar. Se decidió dejar un voltaje de referencia con valor de 5 voltios, lo que hace que el DAC0808 tenga un valor de salida negativo y entregue 0.02 voltios por cada valor binario de entrada, esto nos da a entender que el valor de salida esta amplificado al doble, por lo tanto solo necesitamos tener una ganancia de -5 para que así ya tengamos en total una ganancia de 10 como se necesita. Para implementar esta ganancia se introdujo en el circuito un amplificador inversor con ganancia de 5, así logramos obtener 0.1 voltios por cada cm que el sensor de ultrasonido entregue, ver figura 5.3.

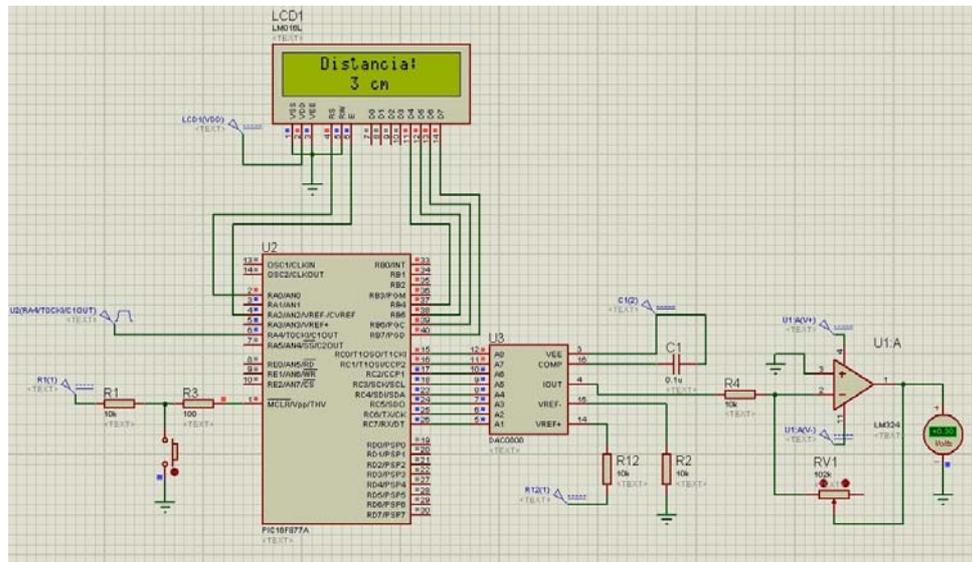


Figura 5.3. Circuito para adquisición de datos del sensor sfr05.

5.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE ENTRADA PARA EL INGRESO DEL VALOR DESEADO DE LA VARIABLE CONTROLADA.

Para la implementación de esta etapa se desarrollo un programa en un microcontrolador el cual controla los datos enviados por el teclado matricial. Este programa presenta las siguientes características, las cuales se pueden observar en detalle en el anexo C.

Teniendo en cuenta que existe la comunicación entre el teclado y el microcontrolador, las teclas se conectaron al puerto B, las cuales como se represento en la figura 2.22, cada fila se conecta a las líneas de la parte baja del

puerto B configuradas como salidas; del mismo modo, las columnas del teclado se conectan a las líneas de la parte alta del puerto B del microcontrolador configuradas como entradas.

Para detectar si hay una tecla pulsada se aplica a las filas un nivel bajo y tres altos. De esta manera si se presiona alguna tecla con la fila por la que se aplica el nivel bajo, ese nivel bajo aparecerá en la columna correspondiente con la que ha hecho el contacto. Así, la exploración del teclado debe deducir el “orden” de la tecla pulsada sin importar lo serigrafiado de ésta. Cada tecla tiene asignado el número de orden indicado en la figura 5.4 y que se va contabilizando en la variable “tecla” del programa empleado para este fin. Además este programa emplea una serie de librerías encargadas de convertir cada una de las teclas pulsadas en un valor decimal, y el cual se opera para definir el *setpoint* introducido.



Figura 5.4. Teclado matricial 4x3. JENNIC (2009).

La figura 5.4, muestra la representación exacta que se emplea para conectar en el microcontrolador. El programa empleado para controlar la entrada de datos fue llamado “Teclado Set Point.asm”, el cual proporciona el *setpoint* cumpliendo las siguientes recomendaciones:

- a) La primera tecla introducida, es interpretada por el programa como la decena, la cual su única restricción es no superar la altura máxima del ducto que es 50 cm; de esta manera los valores habilitados para tal fin son los siguientes: 0, 1, 2, 3 y 4. Los cuales representan para el programa, 0, 10, 20, 30 y 40 respectivamente. Las demás teclas serigrafiadas en el teclado, no están contempladas para el valor de la primera tecla. De este modo el programa visualizará el mensaje ERROR, el cual debe ser interpretado por el usuario como un sobrepaso al valor de altura permitido el cual debe estar en el rango de 0 – 49 cm.
- b) La segunda tecla introducida, es interpretada como la unidad; la cual se adiciona con el valor de la primera tecla y ambos valores tecleados conforman finalmente el *setpoint*. Como a cada tecla le corresponde un valor y esta

serigrafado en el teclado, es claro que las teclas # y *, no tienen valor decimal y no se contemplan en este programa.

- c) La tercera tecla introducida, que puede ser cualquiera de las serigrafadas en el teclado, clarea el LCD pero no modifica el valor del *setpoint* logrado en el paso anterior. Lo cual garantiza que mientras no se presione una nueva tecla el valor del *setpoint* se conservará.

5.2.1 Obtención del valor deseado de altura en voltaje.

El *setpoint* calculado en el micro controlador PIC16F877A es enviada internamente al puerto C del mismo microcontrolador, estas salidas con conectadas a las entradas del DAC0808 para poder hacer la conversión de la palabra binaria en un voltaje analógico. El procedimiento seguido para obtener el valor deseado de la variable controlada en voltios es el mismo empleado en la obtención de la altura entregada por el sensor convertido a voltios. Por lo tanto por cada cm que el usuario ingrese en el teclado se tendrá 0.1 voltios de salida Ver figura 5.5.

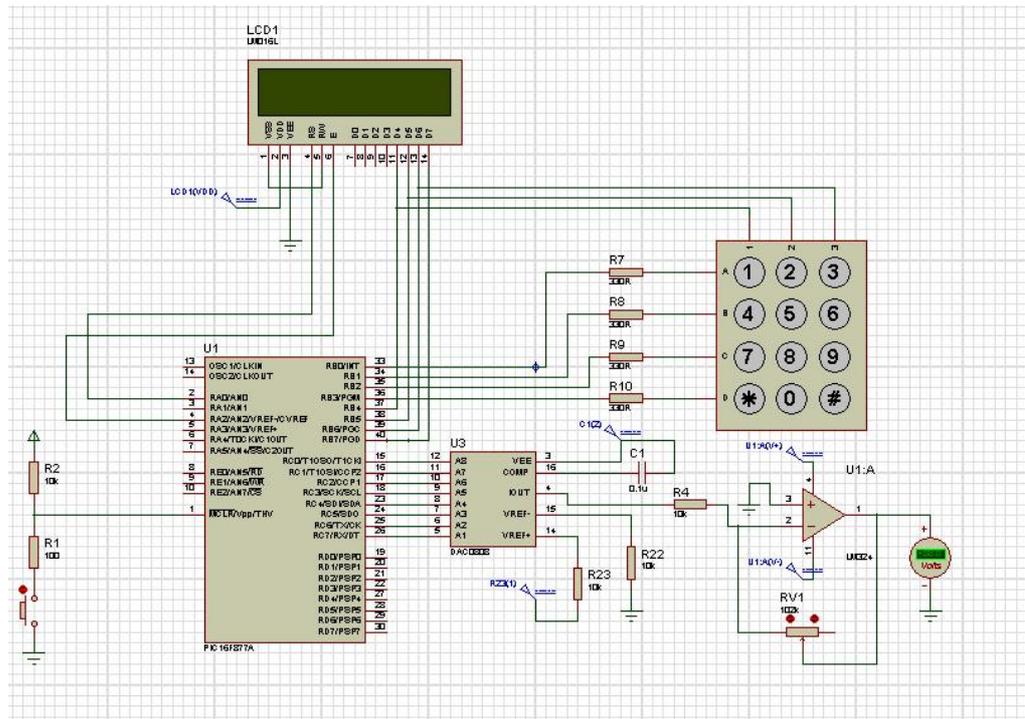


Figura 5.5. Circuito para obtención del valor deseado de la variable controlado.

5.2.2 Despliegue de la distancia mediante un LCD.

La configuración utilizada es la misma que se uso para desplegar la distancia captada por el sensor de ultrasonido, la única diferencia radica en que para el LCD utilizado con el teclado se configuró el contraste con una resistencia de 2k ohm. En el pin 3 del modulo, esto se hizo debido a que este modulo es más oscuro que el usado para la distancia del sensor.

5.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA.

El levitador neumático se implementó en el mismo orden en el cual se realizó su diseño. Donde este se puede observar en los siguientes ítems:

5.3.1 Ventilador Axial.

Se obtuvo el ventilador axial que cumpliera con las características de tamaño, peso y rango de voltaje en el cual se desarrollara el caudal requerido para mover la esfera de poliestireno expandido. Este caudal se comprobó experimentalmente, a diferentes tamaños y tipos de ventiladores, obteniendo finalmente el tamaño del ventilador adecuado, Ver figura 5.6.



Figura 5.6. Ventilador Helicoidal 24 VDC.

5.3.2 Base Ventilador Axial.

Para este ventilador se implementó una base, fabricada en acrílico de color negro, que soportara el peso del ventilador. La cual se observa en la figura 5.7.



Figura 5.7. Soporte para el ventilador helicoidal.

5.3.3 *Direccionador de flujo.*

El direccionador de flujo se elaboró en cartón paja debido a su tamaño y forma, ya que cada celda es muy pequeña para construir en materiales Como la lámina y el acrílico, los cuales se emplean para trabajos de mayor dimensión con respecto al tamaño de las celdas., Ver figura 5.8.

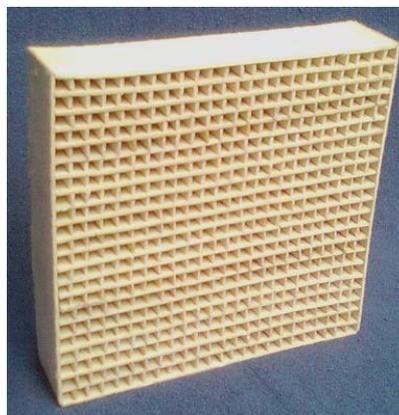


Figura 5.8. Direccionador de Flujo, numero de celdas: 529

5.3.4 *Contractor.*

El contractor se construyo en acrílico de color transparente, debido a su uniformidad en la superficie, lo cual garantiza bajas pérdidas por fricción, Ver figura 5.9. Además, este contractor cuenta con 6 pestañas que se emplean de la

siguiente manera: dos pestañas superiores para el ensamble con el ducto de diámetro variable y cuatro inferiores para asegurar el mismo contractor a su base.



Figura 5.9. Contractor de acrílico

5.3.5 Base del contractor.

La base que soportara al contractor y al direccionador de flujo, se construyo en acrílico, Ver figura 5.10.



Figura 5.10. Base del contractor y direccionador de flujo.

5.3.6 Ducto de área variable.

El ducto de diámetro variable se construyo en acrílico transparente para poder observar el movimiento y la posición de la esfera. Además, de su uniformidad en la superficie lo cual genera bajas perdidas por fricción, ver figura 5.11.



Figura 5.11. Ducto de diámetro variable.

5.3.7 Circuito de Potencia.

Para poder mover el motor del ventilador con los voltajes que sean enviados se necesita implementar una etapa de potencia que deje pasar el voltaje enviado pero que amplifique corriente, porque como ya es conocido el ventilador contiene un motor DC el cual consume corrientes que alcanzan el valor de un amperio. Para implementar esta etapa de potencia se decidió usar un Tip 31, el cual teóricamente amplifica corrientes hasta de 3 A, lo cual es suficiente para mover el ventilador seleccionado.

5.3.8 Circuito restador.

Para completar la elaboración de la planta se elaboro un circuito restador (ver figura 5.12, para poder terminar el lazo de control y poder obtener el valor del error entre el valor deseado de altura y el valor de distancia capturado por el sensor de ultrasonido.

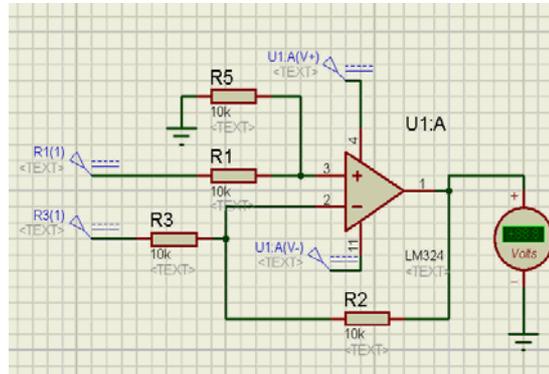


Figura 5.12. Circuito restador, circuito de potencia.

5.3.9 Circuito de tarjeta principal.

Todos los circuitos elaborados para la implementación del sistema de levitación neumática fueron impresos en una sola tarjeta (tarjeta principal), para facilidad de manejo y ubicación en la base del sistema, ver figura 5.13.

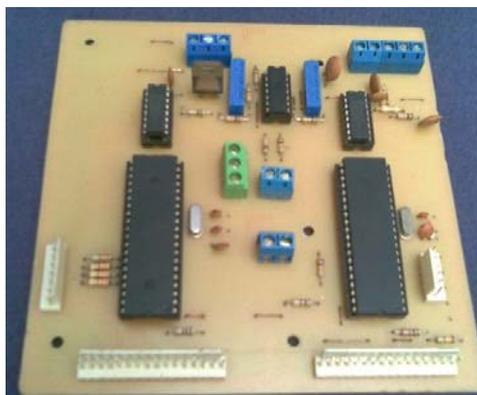


Figura 5.13. Tarjeta principal sistema de levitación neumática.

El plano eléctrico de esta tarjeta se observa en la figura 5.14.

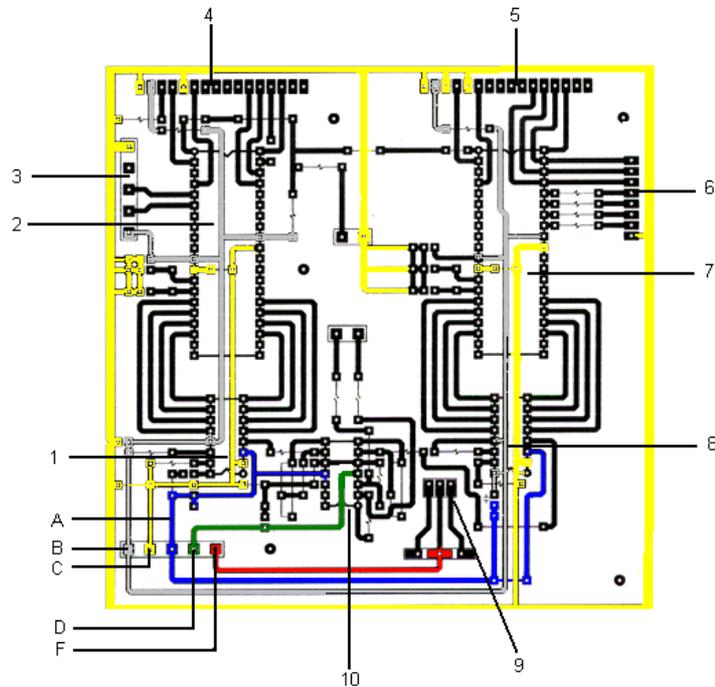


Figura 5.14. Plano eléctrico y componentes de la tarjeta principal.

La polarización de la tarjeta madre es la siguiente:

- A. -12 voltios
- B. 5 voltios
- C. GND
- D. 12 voltios
- E. 24 voltios.

Los elementos en la tarjeta principal son los siguientes:

- 1. DAC0808
- 2. PIC16F877
- 3. Conector sensor de ultrasonido
- 4. Conector LCD
- 5. Conector LCD
- 6. Conector teclado
- 7. PIC16F877
- 8. DAC0808
- 9. TIP 31
- 10. LM324

5.3.10 Fuente de voltaje.

Para este trabajo se elaboro una fuente con todas las etapas de un circuito rectificador de voltaje AC a DC, ver figura 5.15, que alimentara todo el circuito incluyendo los tipos de controladores implementados.

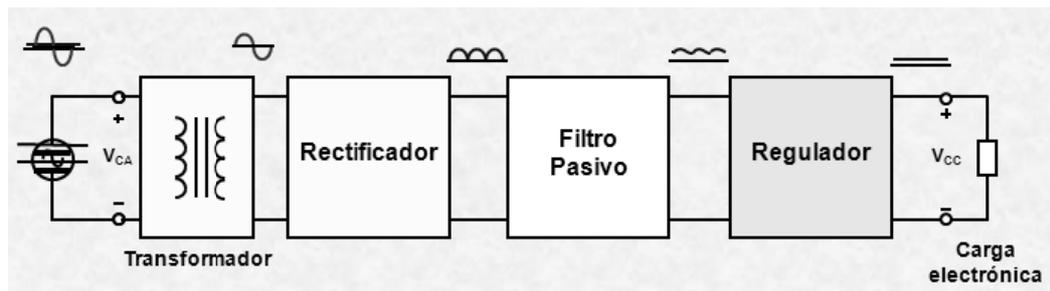


Figura 5.15. Circuito rectificador de voltaje AC a DC.

Primero se construyo una fuente dual de 21 voltios para lo cual se utilizo un transformador, un rectificador y 2 dos condensadores, La entrada de la fuente es el primario del transformador, que se conecta a la red de 110 voltios AC, el transformador necesario, ha de disponer de dos secundarios y se encarga de reducir la tensión de red a 17 voltios de corriente alterna por cada secundario. Este voltaje se lleva a un puente rectificador de media onda formado por los cuatro diodos, tendremos presente una tensión continua algo mayor a 19 voltios y los condensadores de 3300uF forman el circuito de filtrado que se encarga de suavizar la señal. El valor de estos condensadores es debido a que se sigue una regla empírica, la regla empírica que se suele aplicar, suele estar sobre los 2.000 μF por amperio de salida y la tensión del doble del valor superior estándar al requerido, o sea, según esto, para una fuente de 1.5 A a 24 V, el condensador electrolítico debe ser al menos de 3.000 $\mu\text{F}/35\text{V}$.

A la salida de los condensadores tendremos una tensión continua de 21.5 y -21.5 voltios, este voltaje se utilizara para alimentar el circuito regulador para obtener voltajes más pequeños y también se tomaran directamente para alimentar el circuito de potencia para el actuador.

El voltaje a la salida de los condensadores es entregado a un circuito regulador lo que indica que puede mantener un voltaje estable en la salida ante variaciones del voltaje de entrada y las condiciones de la carga. La regulación se hace a través de los circuitos integrados LM7812 el cual entrega 12 voltios de salida, el LM7912 que entrega -12 voltios y el LM7805 que entrega 5 voltios, estos voltajes se utilizan para la polarización de los elementos de la tarjeta principal.

Con esto se logra tener una fuente la cual nos arroja diferentes voltajes, los cuales son 21v,-21 v ,12v, -12v, 5v así como se muestra en la figura 5.16.

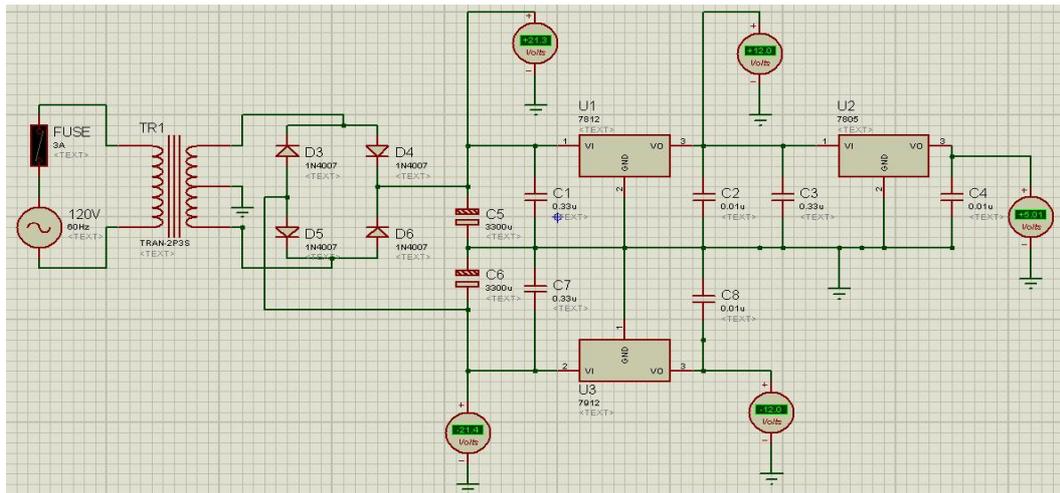


Figura 5.16. Circuito de la fuente de voltaje.

El circuito de conversión de voltaje AC a DC, el cual entrega -21.5 voltios, 21.5 voltios y la referencia GND, se pueden identificar con los siguientes colores:

- Negro: GND
- Rojo: 21.5 voltios
- Naranja: -21.5 voltios.

Con estos voltajes se alimenta el circuito regulador, ver figura 5.17, el cual entrega 5 voltios, -12 voltios, 12 voltios y se pueden identificar con los siguientes colores:

- Amarillo: 5 voltios.
- Morado: 12 voltios.
- Fucsia: -12 voltios.

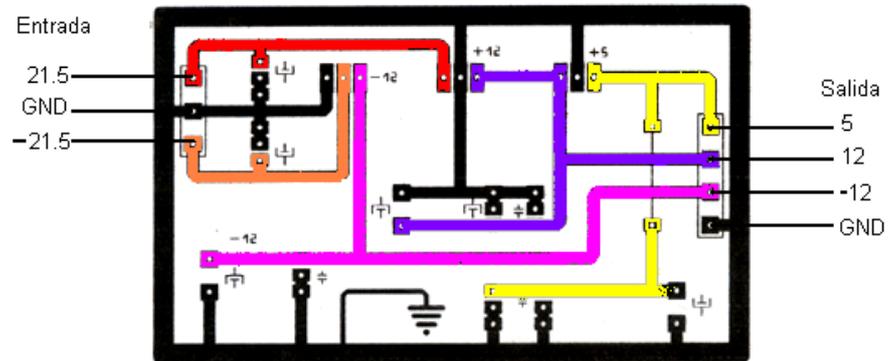


Figura 5.17. Circuito reductor.

La estructura física completa de la fuente de voltaje se observa en la figura 5.18.

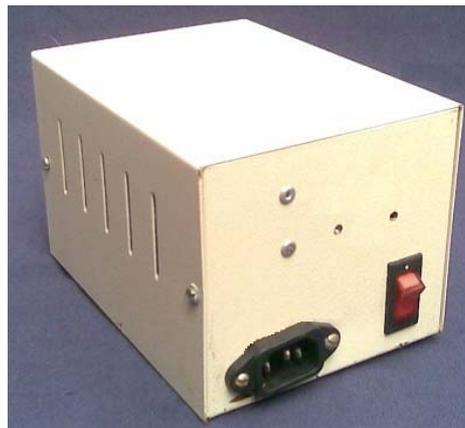


Figura 5.18. Fuente de voltaje.

El circuito de conversión de voltaje AC a DC, el cual entrega -21.5 voltios, 21.5 voltios y la referencia GND, se pueden identificar con los siguientes colores: Finalmente, la base del sistema de levitación neumática se elaboro en lamina en la cual descansaran todos lo elementos del prototipo. Ver figura 5.19.



Figura 5.19. Base del sistema de levitación neumática.

El sistema de levitación neumático completo se observa en las figuras 5.20 y 5.21.



Figura 5.20. Vista frontal sistema de levitación neumática.



Figura 5.21. Vista lateral del sistema de levitación neumática.

6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE LEVITACION NEUMATICA

El prototipo del sistema de levitación neumática implementado proporciona suspensión estable de la esfera en cualquier parte del ducto de diámetro variable. El elemento primario de medición el cual es el sensor de ultrasonido también arroja los valores de distancia verdaderos a la cual está la esfera referenciada desde el fondo de ducto de diámetro variable. Para validar esta estabilidad y la medición del sensor la cual se observa en el LCD, se aplico un escalón de entrada y se midió con una cinta métrica la posición de la esfera.

Se midió en malla abierta la estabilización de la esfera con el voltaje de entrada para validar los datos de la simulación con los datos reales, los cuales presentaron una similitud de resultados. Estos valores validan los datos del capítulo de simulación con los datos de las pruebas al prototipo, ver tabla 8.

Tabla 8. Relación de voltaje aplicado al ventilador y la altura de estabilización.

Voltaje (V)	Altura (cm)
7	2
7.2	4
7.3	8
7.5	12
7.8	18
8	20
8.3	24
8.5	26
8.8	30
9.2	31
9.5	34
9.7	36
10	36
10.5	38
11	40

Con el prototipo del sistema de levitación neumática terminado se procedió a realizar la validación de los rangos de voltaje para las señales de entrada y salida, este experimento se llevo a cabo en el laboratorio de Automática Industrial de la facultad de ingeniería electrónica. Se conectaron las borneras de los voltajes de entrada y salida a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 de National

Instruments para graficar la señal de salida con dos diferentes señales de voltaje de entrada, para demostrar la estabilidad del sistema y además para mostrar los resultados similares entre el modelo matemático y el prototipo. La figura 6.1 muestra la respuesta del sistema frente a una entrada de 8 voltios.

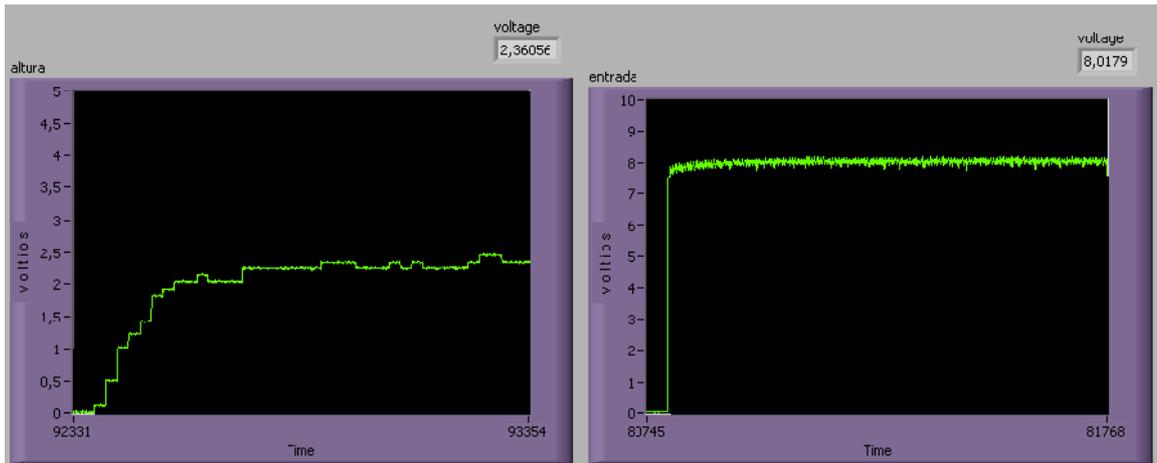


Figura 6.1 Respuesta del sistema ante una entrada escalón de 8 voltios.

La figura 6.1 muestra la respuesta del sistema con un valor de voltaje constante a la entrada del motor. Como se observa en cada una de las graficas de la señal de salida (altura) el sistema muestra una pequeña oscilación la cual es debida a la falta de uniformidad perfecta de la esfera, esto hace que ella tenga un error de estabilización con un rango de 1 centímetro por encima y por debajo del valor esperado. La figura 6.2, muestra la respuesta del sistema ante una entrada de 10 voltios.

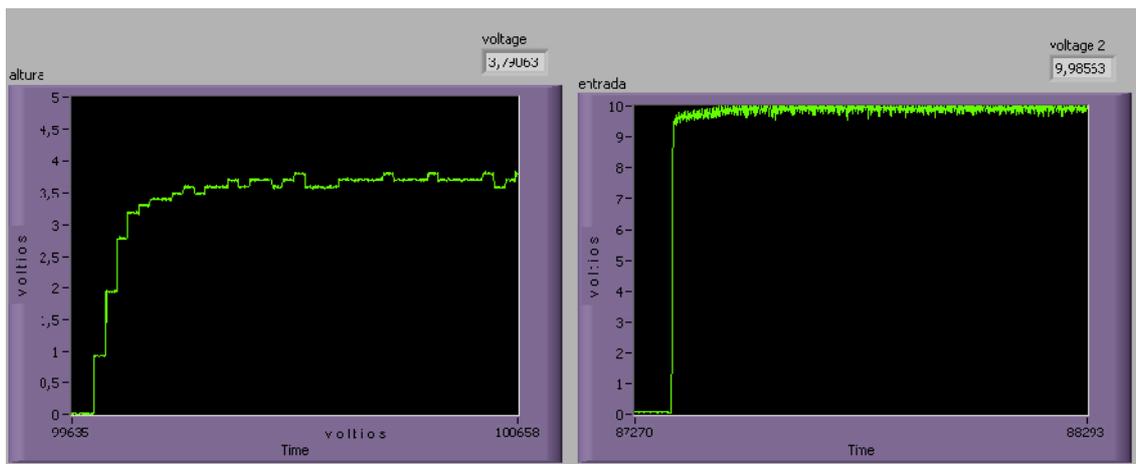


Figura 6.2. Respuesta del sistema ante una entrada escalón de 10 voltios.

Con la estabilidad del prototipo, se validó el control automático de la posición de la esfera por medio de un control PID. El levitador neumático es un sistema altamente no lineal debido a las fuerzas de rozamiento y a las pérdidas de energía debidas a la expansión del ducto de área variable, por lo tanto el control PID al ser lineal, funcionara adecuadamente por rangos.

El controlador PID implementado es un controlador PID serie, ver figura 6.1, este garantiza un buen desempeño en el tiempo de estabilización y en el error de estado estacionario. Presentando pequeñas oscilaciones de 1 cm por arriba y por debajo del valor deseado de posición.

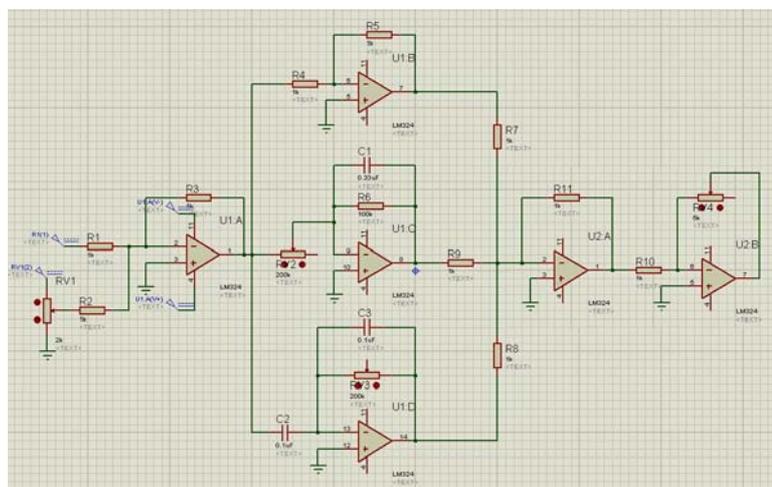


Figura 6.3 PID serie para el sistema de levitación neumática.

La figura 6.2 se el plano eléctrico del circuito del controlador PID y en la figura 6.3 se muestra el circuito impreso del controlador a PID.

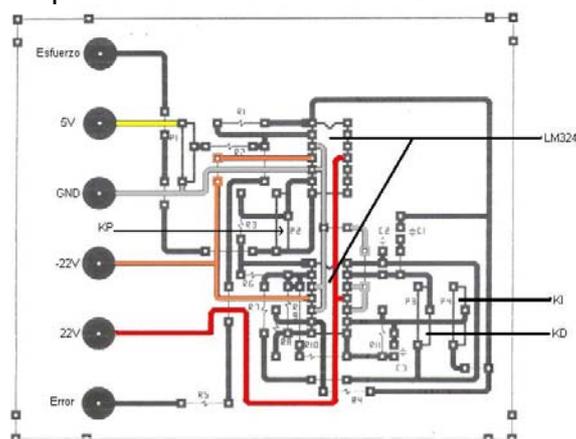


Figura 6.4. Plano eléctrico circuito PID.

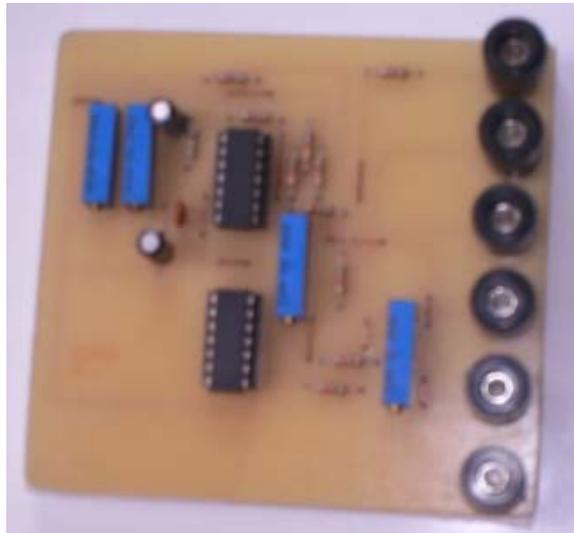


Figura 6.5 Circuito controlador PID.

6.1 SINTONIZACIÓN PID.

La sintonización del controlador PID se realizó mediante un ajuste manual debido a la alta no linealidad del modelo matemático y conociendo que el ajuste experimental es un método de sintonización válido. Por lo tanto referenciados en [28] y con pruebas experimentales se encontró un procedimiento para la sintonización del PID, el cual se observa en el anexo F. De acuerdo a esta sintonización los resultados de las pruebas del sistema de levitación neumática fueron los siguientes:

- a) Primer rango : la primera prueba se sintonizó el PID de manera que permitiera la estabilización de la esfera en el rango de 0 a 15 cm. Cuyas ganancias fueron las siguientes

Tabla 9. Valores de sintonización para el primer rango.

kp	Ti (1 / R x C)	Ki (Kp /Ti)	Td (RxC)	Kd (Kp x Td)
1.4	$1 / (49000 \times 0.33 \mu\text{f}) = 61.84 \text{ min}$	$1.4 \times 61.84 = 86.58$	2e-5 min	2.8e-6

En la figura 6.4 se muestra una secuencia de imágenes que muestran la estabilización de la esfera en malla cerrada, para una señal de referencia de 10

cm, con error de estado estacionario de 1 cm, por encima y por debajo del set point.

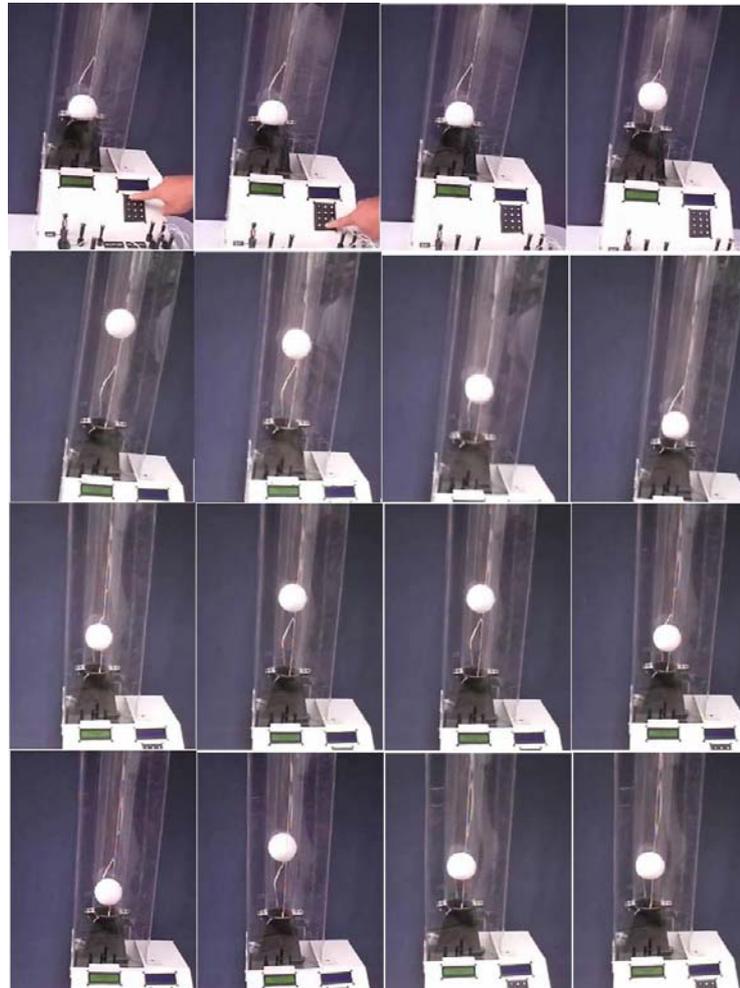


Figura 6.6 Secuencia para un *setpoint* de 10 cm.

b) Segundo rango: la segunda sintonización se realizó para un rango de 15 cm a 25 cm, y los valores de las constantes son las que se visualizan en la tabla 10.

Tabla 10. Valores de sintonización para el segundo rango.

k_p	$T_i (1 / R \times C)$	$K_i (K_p / T_i)$	$T_d (R \times C)$	$K_d (K_p \times T_d)$
1.54	$1 / (53000 \times 0.33 \mu\text{f}) = 57.17$ min.	$1.54 * 57.17 =$ 88.05	$60000 * 0.1 \mu\text{f} = 6e-3$ 3 min	$9.24e-3$

c) Tercer rango: los valores de las constantes para el tercer rango de 25 cm a 38 cm se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Valores de sintonización para el tercer rango.

kp	Ti (1 / R x C)	Ki (Kp /Ti)	Td (RxC)	Kd (Kp x Td)
2.94	1 / (56000*0.33uf) = 54.08 min.	2.94 * 54.08 = 159.01	2.4e-7 min	7.056e-7

En la figura 6.5 se muestra una secuencia de imágenes que muestran la estabilización de la esfera en malla cerrada, para una señal de referencia de 35 cm, con error de estado estacionario de 1 cm por encima o por debajo.

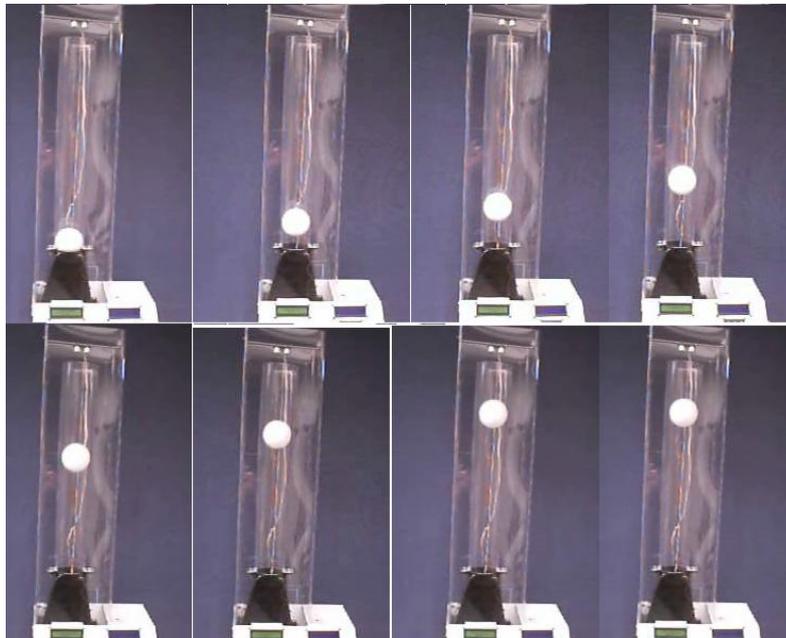


Figura 6.7 Secuencia para un *setpoint* de 30 cm.

6.2 PRUEBA DEL CONTROLADOR CON DISTURBIO.

En el prototipo se implemento un pequeño disturbio, ver figura 6.6. El cual consiste en una reja que obstruye el libre paso de aire para alimentar el ventilador y garantizar el flujo de entrada al ducto de diámetro variable se reduzca. Esta reducción se midió con el anemómetro, arrojando un valor aproximado de 0.4 m/s a la salida del actuador

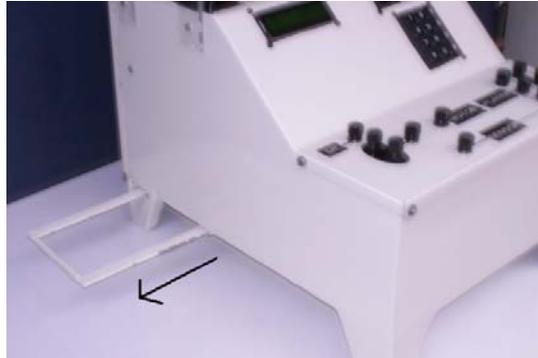


Figura 6.8 Reja de disturbio del sistema de levitación neumática.

Se realizo una prueba para evaluar la acción de control frente a disturbios, obteniéndose excelentes resultados en corrección a errores de altura. Ver figura 6.7. La prueba inicio estabilizando la esfera en una posición de 25 cm, posteriormente se aplico el disturbio cerrando la reja, y se observo la respuesta del sistema, la cual fue muy satisfactoria. Además esta señal rectifica la señal de disturbio y se estabiliza en el *setpoint* con un error de estado estacionario de 1 cm por encima y por debajo.

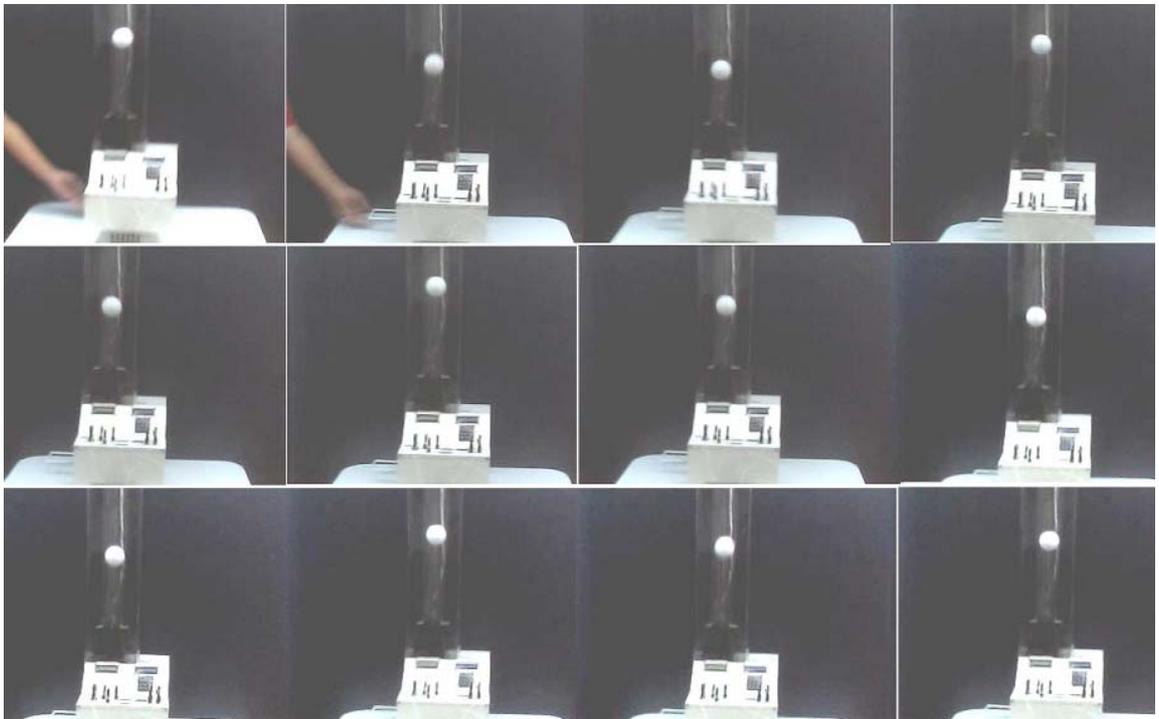


Figura 6.9 Secuencia de corrección de disturbio.

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Con las pruebas realizadas se corrobora la estabilidad del sistema de levitación neumática en malla abierta y en malla cerrada. En malla abierta el sistema responde rápidamente al ingreso de la señal de entrada, garantizando una suspensión estable en cualquier punto del ducto. Se observó que efectivamente el ducto de diámetro variable garantiza la estabilidad del sistema, así como el direccionador de flujo que elimina componentes radiales del flujo de aire uniformizándolo para el control adecuado de la esfera dentro del ducto. De igual manera se observó una buena respuesta del sensor de ultrasonido para controlar la posición de la esfera, con una rápida y certera medición.

En malla cerrada el sistema con el controlador PID responde por rangos debido a su alta no linealidad haciendo que el controlador PID se vea limitado a no poder trabajar en todo el rango (0 a 40 cm), pero corrigiendo dentro de sus rangos la señal de disturbio introducida al sistema.

En malla abierta y en malla cerrada se corrobora la simulación con el funcionamiento de la planta, donde el modelo y la caracterización de los elementos del sistema en simulación con respecto a los resultados obtenidos, muestran una alta similaridad en su estado estacionario; no fueron exactamente iguales debido a la dificultad en la medición de la presión dentro del ducto, debido a su bajo valor. Además, se observó que hubo una cierta diferencia con la simulación en malla abierta en el estado transitorio debió a las oscilaciones presentadas ante el escalón de entrada, oscilaciones que no se presentan en el sistema real, debido a que en el modelo se realizó una aproximación de las algunas variables de las fuerzas presentes en la planta.

CONCLUSIONES

1. La mayoría de las fuerzas presentes en el modelo de la planta en ambiente cerrado se generan por la interacción de la esfera con el ducto y el aire; específicamente por la interacción entre las fronteras del ducto y la esfera generadas en ambas superficies por el movimiento del flujo de aire. Además estas no están presentes en ambiente abierto.
2. Para lograr una suspensión estable fue necesario para este proyecto la implementación de un ducto de diámetro variable. Debido a que contrarresta el desplazamiento vertical del objeto levitante con una caída de presión constante, efecto necesario para controlar la posición de la esfera a largo del ducto. Lo que no garantizaba el ducto de diámetro constante, ya que presenta un cambio de mayor a menor presión a lo largo del ducto. Además, Para lograr un desplazamiento controlado de la esfera se debe garantizar lo mejor posible un perfil de velocidad laminar, y esto se logro en este proyecto con el uso de un direccionador de flujo.
3. El modelo del levitador neumático es altamente no lineal debido a las fuerza de rozamiento y a las perdidas en la expansión por la cercanía de la esfera con la paredes del ducto.
4. La forma del objeto levitante debe ser uniforme y simétrica o este debe mantener una posición fija al contacto con el aire para lograr controlar su posición de manera adecuada, de lo contrario se perdería estabilidad y se generarían altos vórtices.
5. El objeto levitante a medida que sube dentro del ducto de diámetro variable pierde interacción con la fuerza de rozamiento debido a que se aleja de las paredes del ducto, y esto permite que la capa limite se desprenda mas rápido de la esfera.
6. El actuador (ventilador, direccionador de flujo y contractor) presenta un comportamiento no lineal, por lo tanto se linealizaron los rangos mas relevantes de su dinámica para obtener la velocidad de entrada al ducto de diámetro variable y obtener los resultados esperados.
7. Para lograr controlar la esfera en todo el rango del ducto (0 a 40 cm) conservando una sola sintonización se necesita de un control no lineal que contrarreste las no linealidades del sistema.

8. El controlador implementado presenta limitaciones en su control debido a la no linealidad del sistema, lo cual no permite un manejo adecuado de la altura de la esfera en toda la longitud del ducto. Esto debido, a que la ganancia proporcional K_p sintonizada para un rango determinado no alcanza a cubrir distancias fuera de ese rango.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] DIAZ GARCIA, José A., “Sistematización del diseño de dispositivos de levitación superconductor por Efecto Meissner”, Departamento/instituto Leganés, Universidad Carlos III De Madri. (2008)
- [2] ESCAÑO, Juan M., ORTEGA, Manuel G., RUBIO, Francisco R., “Position Control of a Pneumatic Levitation System”, Departamento de Electricidad y Automática, Centro Tecnológico Altaír. Departamento de Ingeniería de sistemas y Automática, Universidad de Sevilla. (2004)
- [3] McDONALD, K.T., (1994) “Levitating Beachball”, Joseph Henry Laboratories, Princenton University. (1994)
- [4] CARO, Catalina “Levitadores Neumáticos Acoplados: Estudio de Estabilidad”, Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia. (2009)
- [5] DEVANTECH Ltd. <http://www.robot-electronics.co.uk/html/srf05tech.html>
- [6] MOTT, Robert L. “Mecánica de Fluidos”, Faculty of Engineering and Applied Science State University of New York at Buffalo. Sexta edición, Ed. Pearson. (2006)
- [7] SHAMES, Irving H. “Mecánica de Fluidos”, University of Dayton. Tercera Edición, Ed. McGraw Hill Interamericana S.A, (1995)
- [8] STREETER, Victor L., WYLE, E. Benjamin, BEDFORD, Keith W. “Mecánica de Fluidos”, University of Michigan. Ed. McGraw Hill Interamericana, S.A, (2000)
- [9] FOX, Robert W. “Introduction to Fluid Mechanics”, University of Michigan. Sexta Ed. John Wiley & Sons, Inc. (2004)
- [10] POTTER, B. YOUNG, Th. OKIISHI. “Mecánica de Fluidos”, Ed. Prentice Hall, (1998)
- [11] MUNSON, B. YOUNG, Th. Okiishi. “Fundamentos de mecánica de fluidos”, Universidad Estatal de Iowa. Ed. Limusa Wiley, (1999)
- [12] WHITE, Frank M. “Fluid Mechanics”, University of Rhode Island. Ed. McGraw Hill series in Mechanical Engineering. Fourth Edition.

- [13] DYKE, Milton Van. “*An Album of Fluid Motion*”, Department of Mechanical Engineering Stanford University, Stanford, California. (1988)
- [14] ANSYS(R) Product Launcher Release 12.0.1. <http://www.ansys.com/>
- [15] SALVADOR ESCODA S.A. “*Manual Practico de ventilación*”, SALVADOR ESCODA S.A. Barcelona – España. Segunda Edición.
- [16] SILVA TREVIÑO, Carlos Jerónimo. “*Diseño y Construcción de un Túnel de viento Bidimensional Subsónico de Circuito Abierto por Inyección*”, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima. (2005)
- [17] TOLENTINO ESLAVA, René. “*Medición de Capa Limite y turbulencia en un Túnel de viento para Calibración de Instrumentos de Medición de Velocidad*”, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. (2003)
- [19], BENSON, Tom “*General thrust Equation*” <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/thrsteq.html>. (2008)
- [20] REAL RAMÍREZ, César Augusto. “*Estudio Computacional de Flujo en Quemadores Rectangulares*”, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. (2004)
- [21] MEDINA, César. “*Patrones de Flujo según diferentes marcos de referencia*”, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. (2005)
- [22] Mehta, R. D., Bradshaw, P., Design rules for low speed wind tunnels. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society. November 1979.
- [23] Metha, R.D. A Turbulent Boundary Layer Perturbed by a Screen. AIAAJ. Vol.23, Pag. 1335. (1985).
- [24] McCabe Warren L., Smith Julián C. “Operaciones básicas de ingeniería química”, Volumen 1, Barcelona España 2003.
- [25] James W Daily. Donald R.F. Harleman. Dinamica de fluidos con aplicaciones en ingeniería. Mexico 1975
- [26] Silva Treviño, Carlos Jerónimo. “Diseño y Construcción de un Túnel de Viento Bidimensional Subsónico de Circuito Abierto por Inyección”. Colima 8 de Agosto, 2005.

[27] ETRI, <http://www.etrinet.com/>. serie 158D, 24 vdc.

ANEXO A

Programa de simulación “levitador neumático.” En Matlab/Simulink

```
clc
clear all
close all
```

```
global Vis m D1 Desf theta P1 R T1 ui uf tpasso A1 beta
```

```
% -----*** Parametros del Sistema***-----
```

```
R=287;                % N-m/kg-K Constante del aire Según Norma ISO 6358
T1=21+273.15;        % K,
P1=87200;            % Pa abs
m=1.96e-3;           % kg
D1=0.072;            % m
A1=pi*D1^2/4;        % m^2
Desf=0.065;          % m
theta=1.3*pi/180;    % rad
Vis=1.8e-5;          % N-s/m viscosidad dinamica a 20°C
beta=55*pi/180;
```

```
% -----* Parametros de entrada *-----
```

```
tpaso=0;
ui=0;
uf=3.7;
```

```
%-----** evaluación de la ecuacion del modelo **-----
```

```
x0=[0;0];            %condición inicial
```

```
options = odeset('NormControl','on','RelTol',1e-4, 'Abstol',1e-5, 'OutputFcn',@odeplot, 'OutputSel',1);
[t,y]=ode15s(@flevitador,[0 30],x0,options);
```

```
w1=y(:,1);
w2=y(:,2);
```

```
for j=1:length(t)
if t(j)<=tpaso
    u(j)=ui;
```

```

else
    u(j)=uf;
end
end

%-----** Visualización de la altura **-----

%subplot(2,1,1)
plot(t,w1*100,'linewidth',1);grid
set(gca,'fontname','times','fontsize',15);
ylabel('\fontname{times}\sl h, cm','fontsize',18);

% subplot(2,1,2)
% plot(t,w2,'linewidth',1);grid
% set(gca,'fontname','times','fontsize',15);
% xlabel('\fontname{times}\slt, s','fontsize',18);
% ylabel('\fontname{times}\sl v, m/s','fontsize',18);

Function Flevitador
function xdot =flevitador(t,x)

global Vis m D1 Desf theta P1 R T1 ui uf tpasso A1 beta          % Variables
globales

%-----* Entrada Paso *-----

if t<=tpaso
    u=ui;
else
    u=uf;
end

%-----* Calculo de área de contacto*-----

k1=P1*A1/(R*T1);
A2=pi*((D1^2-Desf^2)/4+D1*tan(theta)*x(1)+x(1)^2*(tan(theta))^2);      % Area
para la velocidad V2.
Ac=(pi*(D1^2)/2)*(1+sin(beta));          % Area de contacto
entre la esfera y el aire.

%-----* Calculo de área superficial cónica*-----

```

```

h2=x(1)+(Desf/2)*sin(beta); % Punto donde se
desprende la capa limite.
r2=tan(theta)*h2;
rb=D1/2;
rc2=rb+r2;
Asc2=pi*((rc2^2)+(rb^2))+pi*(rc2+rb)*((h2^2+(rc2-rb)^2)^0.5); % Area en
h2.
h1=x(1)-(Desf/2); % Altura hasta el punto de
estancamiento.
r1=tan(theta)*h1;
rc1=rb+r1;
Asc1=pi*((rc1^2)+(rb^2))+pi*(rc1+rb)*((h1^2+(rc1-rb)^2)^0.5); % Area en
h1
Asct=Asc2-Asc1;
% Area superficial conica
%-----* Calculo de área de control*-----

A=Ac+Asct; % Area superficial de control.
%-----* Calculo de fuerza de rozamiento*-----

Rex=(1.0236*((A1*u)/A2)*Desf)/1.8e-5; % Numero de
reynolds local en la capa limite.
arcox=0.08; % Arco de circunferencia.
Distancia de contacto de la capa limite
deltar=arcox/(Rex^0.5); % Espesor de la capa
limite.
tao=Vis*(x(2)-((A1*u)/A2))/deltar; % Esfuerzo cortante
Fr=tao*A; % Fuerza de rozamiento

%-----* Calculo de las perdidas en la expansión*-----
facexp=0.01; % Factor de expansión para
un angulo de 3°
hl2=facexp*(u^2)/19.5212; % Coeficiente de
perdidas en la expansion.
per=hl2*1.0236*9.7606*Asc2; % Perdidas en la
expansion.

%-----* Funciones (ecuaciones diferenciales) *-----

xdot=[x(2);1/m*(k1*(u^2)*((A1/A2)-1)-Fr-per-m*9.7606)]; % Modelo en
el dominio del tiempo

% Planta Levitador Neumatico.

end

```

ANEXO B

Programa *SENSOR_SFR05.asm*

```
__CONFIG __CP_OFF & __WDT_OFF & __PWRTE_ON & __XT_OSC
LIST P=16F877A
INCLUDE <P16F877A.INC>

CBLOCK 0x20
Distancia
nuevadistancia ; Se expresará en centímetros.
ENDC

banco0 macro
    bcf STATUS,RP0
    bcf STATUS,RP1
endm

banco2 macro
    bsf STATUS,RP0
    bcf STATUS,RP1
endm

#DEFINE Disparo PORTA,3 ; Disparo para iniciar la medida.
#DEFINE Eco PORTA,4 ; Pulso cuya anchura hay que medir.

MinimaDistancia EQU .0
MaximaDistancia EQU .44
TMR0_Carga60micros EQU -d'27' ; Valor obtenido experimentalmente con la
; ventana Stopwatch para una interrupción del
; Timer 0 cada 60 µs. Si no mide correctamente

por
; las tolerancias de los componentes habrá
; que hacer un ajuste fino de este valor,

comprobándolo
; sobre las condiciones reales.

ORG 0
goto Inicio
ORG 4
goto ServicioInterrupcion

Mensajes
    addwf PCL,F
```

MensajeDistancia
DT " Distancia: ", 0x00
MensajeCentimetro
DT " cm", 0x00

Inicio

```
bsf STATUS,RP0
bcf STATUS,RP1
movlw b'00000110' ; Líneas del Puerto A
movwf ADCON1 ; configuradas como digitales.
bcf STATUS,RP0
```

```
call LCD_Inicializa
bsf STATUS,RP0
bcf Disparo
bsf Eco
movlw b'00000000' ; Prescaler de 2 para el TMR0.
movwf OPTION_REG
bcf STATUS,RP0
bcf Disparo ; Inicializa línea de disparo en bajo.
```

Principal

```
clrf Distancia ; Inicializa el registro.
bsf Disparo ; Comienza el pulso de disparo.
call Retardo_20micros ; Duración del pulso.
bcf Disparo ; Final del pulso de disparo.
```

Espera_Eco_1

```
btfss Eco ; Si ECO=0, espera el flanco de subida de la
señal
```

```
goto Espera_Eco_1 ; de salida del sensor.
movlw TMR0_Carga60micros ; Ya se ha producido el flanco de subida.
movwf TMR0 ; Carga el Timer 0.
movlw b'10100000' ; Autoriza interrupción del TMR0 (TOIE).
movwf INTCON
```

Espera_Eco_0

```
btfsc Eco ; Espera flanco de bajada de la señal de la salida
goto Espera_Eco_0 ; del SRF04.
clrf INTCON ; Se ha producido el flanco de bajada. Prohíbe
```

interrup.

```
call Visualiza ; Visualiza la distancia.
call Retardo_500ms ; Espera un tiempo hasta la próxima medida.
```

Fin goto Principal

; Subrutina "ServicioInterrupcion" -----

;
; Se ejecuta debido a la petición de interrupción del Timer 0 cada 60 µs que es el incremento
; de la anchura de pulso por centímetro de distancia medido. La variable "Distancia" contiene el
; valor de la distancia expresada en centímetros.
;

ServicioInterrupcion

movlw TMR0_Carga60micros ; Carga el Timer 0.

movwf TMR0

movlw .1 ; Se utiliza instrucción "addwf", en lugar de "incf"

addwf Distancia,F ; para posicionar flag de Carry.

movlw MaximaDistancia ; En caso de desbordamiento carga su máximo

valor.

btfsc STATUS,C

movwf Distancia

call restadistancia

sigal

movwf nuevadistancia

bcf INTCON,T0IF

retfie

; Subrutina "Visualiza" -----

;
; Visualiza la distancia expresada en centímetros. Se hace de manera que cuando haya que
; visualizar un número mayor de 99 las decenas siempre se visualicen aunque sean cero.
; Y cuando sea menor de 99 las decenas no se visualicen si es cero.

Visualiza

call LCD_Borra ; Borra la pantalla anterior.

movlw MinimaDistancia ; Va a comprobar si es menor del mínimo

admisibile.

subwf nuevadistancia,W

btfss STATUS,C ; ¿C=1?, ¿(W) positivo?,

¿(Distancia)>=MinimaDistancia?

goto DistanciaMenor ; No ha resultado menor, y salta al mensaje de

error.

movf nuevadistancia,W

sublw MaximaDistancia ; (W)=MaximaDistancia-(Distancia)

```

    btfsc STATUS,C          ; ¿C=0?, ¿(W) negativo?,
¿MaximaDistancia<(Distancia)?
    goto DistanciaFiable    ; No, la medida de la distancia entra dentro
del rango.

```

```

DistanciaMayor
    movlw MinimaDistancia
    movwf nuevadistancia
    movlw MensajeDistancia
    goto VisualizaDistancia

```

```

DistanciaMenor
    movlw MinimaDistancia ; La distancia es menor del mínimo fiable.
    movwf nuevadistancia
    movlw MensajeDistancia
    goto VisualizaDistancia

```

```

DistanciaFiable
    movlw MensajeDistancia
VisualizaDistancia

```

```

    call LCD_Mensaje
    movlw .5                ; Centra la medida de la distancia en la segunda
línea
    call LCD_PosicionLinea2 ; de la pantalla.
    movf nuevadistancia,W
    call BIN_a_BCD          ; Lo pasa a BCD.
    movf BCD_Centenas,W    ; Primero las centenas.
    btfss STATUS,Z         ; Si son cero no visualiza las centenas.
    goto VisualizaCentenas
    movf nuevadistancia,W
    call BIN_a_BCD          ; Lo pasa a BCD.
    call LCD_Byte           ; Visualiza las decenas y unidades.
    goto Visualiza_cm

```

```

VisualizaCentenas
    call LCD_Nibble        ; Visualiza las centenas.
    movf nuevadistancia,W
    call BIN_a_BCD          ; Lo pasa a BCD.
    call LCD_ByteCompleto ; Visualiza las decenas (aunque sea cero) y
Visualiza_cm                ; unidades.
    movlw MensajeCentimetro
    call LCD_Mensaje

```

```
call enviabinario
siga
    return
```

```
enviabinario
```

```
banco2
clrf TRISC
banco0
    movfw Distancia
    sublw .44
btfsc STATUS,C
goto positivo
goto negativo
```

```
siga3
siga2
goto siga
```

```
positivo
movwf PORTC
goto siga3
```

```
negativo
movlw .0
movwf PORTC
goto siga2
```

```
restadistancia
```

```
movfw Distancia
sublw .44
goto siga1
```

```
INCLUDE <RETARDOS.INC>
INCLUDE <LCD_4BIT.INC>
INCLUDE <LCD_MENS.INC>
INCLUDE <BIN_BCD.INC>
END
```

ANEXO C

Programa Teclado Set Point.asm

```
__CONFIG _CP_OFF & _WDT_OFF & _PWRTE_ON & _XT_OSC
LIST P=16F877A
INCLUDE <P16F877A.INC>

    valortecla2      EQU .20
    valortecla1      EQU .25
    primervalor      EQU .50
    tecla            EQU .20
    teclaLCD         EQU .22
    setpoint         EQU .24
    contadorteclas   EQU d'147'
    valorpuertoc     EQU .00
    CBLOCK 0x20
    ENDC
banco0 macro
    bcf STATUS,RP0
    bcf STATUS,RP1
endm

banco2 macro
    bsf STATUS,RP0
    bcf STATUS,RP1
endm

    ORG 0
    goto Inicio
    ORG 4
    goto ServicioInterrupcion

Mensajes
    addwf PCL,F
MensajeTeclee
    DT "SP:", 0x00
MensajeClaveIncorrecta
    DT "Error", 0x00
MensajeInicio
    DT "Rango 0 - 40", 0x00
Inicio
```

```

bsf STATUS,RP0
bcf STATUS,RP1
movlw b'00000110'           ; Líneas del Puerto A
movwf ADCON1                ; configuradas como
                             ; digitales.
bcf STATUS,RP0
banco2
clrf TRISC
banco0
movlw .0
movwf PORTC
movlw .0
movwf contadorteclas

    call LCD_Inicializa
    call Teclado_Inicializa ; Configura las líneas del teclado.
    call InicializaTodo1    ; Inicializa el resto de los registros.
    siga1
    siga3
    call LCD_Inicializa
    call Teclado_Inicializa ; Configura las líneas del teclado.
    call InicializaTodo2
    movlwb'10001000'        ; Habilita la interrupción RBI y la
general.
    movwfINTCON
Principal
    sleep                   ; Espera en modo bajo
consumo que pulse alguna tecla.
    goto Principal

; Subrutina "ServicioInterrupcion" -----
;

ServicioInterrupcion
    call Teclado_LeerHex    ; Obtiene el valor hexadecimal de la tecla
pulsada
    movwf teclaLCD
    movwf tecla
    incf contadorteclas,1

;***** PRINCIPAL COMPARA VALOR DEL CONTADOR *****
;
    movwf tecla

```

```
movlw .3
subwf contadorteclas,w
btfss STATUS,Z
    goto sondos
    goto sontres
```

```
sondos
movlw .2
subwf contadorteclas,w
btfss STATUS,Z
    goto restaincorrecta
    goto restacorrecta
return
```

```
sontres
```

```
movlw .0
movwf contadorteclas
movlw .0
movfw primervalor
goto siga1
return
```

```
restaincorrecta
movlw .0
subwf tecla,w
btfss STATUS,Z
    goto noescero
    goto escero
```

```
escero
```

```
movlw .0
movwf primervalor
```

```
goto siga
```

```
return
```

```
noescero
```

```
movlw .1
subwf tecla,w
btfss STATUS,Z
    goto noesuno
    goto esuno
```

```
return
```

esuno

```
    movlw .10
    movwf primervalor
```

```
    goto siga
```

return

noesuno

```
    movlw .2
    subwf tecla,w
    btfss STATUS,Z
    goto noesdos
    goto esdos
```

return

esdos

```
    movlw .20
    movwf primervalor
```

```
    goto siga
```

return

noesdos

```
    movlw .3
    subwf tecla,w
    btfss STATUS,Z
    goto noestres
    goto estres
```

return

estres

```
    movlw .30
    movwf primervalor
```

```
    goto siga
```

return

noestres

```
    movlw .4
    subwf tecla,w
    btfss STATUS,Z
    goto noescuatro
    goto escuatro
```

return

escuatro

```
    movlw .40
    movwf primervalor
```

```
    goto siga
```

return

noescuatro

```
    movlw .0
    movwf contadorteclas
    movlw .0
    movfw primervalor
    goto ClaveIncorrecta
```

return

restacorrecta

```
    movfw primervalor
    addwf tecla,w
```

call enviabinario

```
    goto siga
```

return

siga

```
    movfw teclaLCD
    call LCD_Nibble
    goto FinInterrupcion
tecleado.
```

; No, pues lee el siguiente carácter

InicializaTodo1

```
    movlw MensajeInicio
la clave.
```

; Aparece el mensaje para que introduzca

```
    call LCD_Mensaje
    call LCD_Lineas2
```

línea.

; Los asteriscos se visualizan en la segunda

```
    call Retardo_2s
    goto siga3
```

InicializaTodo2

 movlw MensajeTeclee ; Aparece el mensaje para que introduzca
la clave.

 call LCD_Mensaje
 call LCD_Linea2 ; Los asteriscos se visualizan en la segunda
línea.

FinInterrupcion

 call Teclado_EsperaDejePulsar
 bcf INTCON,RBIF
 retfie

ClaveIncorrecta

 movlw MensajeClaveIncorrecta
 call LCD_Mensaje
 call Retardo_2s ; Espera a que se estabilicen los niveles de
tensión.

 goto siga1
return

enviabinario

movwf PORTC

INCLUDE <BUS_I2C.INC>
INCLUDE <TECLADO.INC>
INCLUDE <LCD_4BIT.INC>
INCLUDE <LCD_MENS.INC>
INCLUDE <RETARDOS.INC>

END

ANEXO D

MANUAL DE USUARIO SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA.

a) **Encendido del sistema de levitación neumática:** para empezar a interactuar con el sistema de levitación neumática se debe encender el sistema presionando el interruptor ubicado en la parte de atrás, ver figura D1. Al encenderse el sistema debe visualizar un mensaje de “0 cm” en el LCD de la izquierda (LCD de Pantalla verde), el cual muestra la altura a la cual esta la esfera. Además, de visualizar un mensaje “SP” en el LCD de la derecha (LCD azul), el cual visualiza el setpoint o valor de consigna que se introduce por medio del teclado matricial.



Figura D 1. Interruptor del sistema de levitación neumática

Posteriormente se prueba con un multímetro el valor de los voltajes de alimentación externos entregados por el sistema (-22, 22, -12, 12, 5) referenciados a tierra, ver figura D2, con el fin de corroborar que están siendo entregados de forma correcta.

También se debe verificar los voltajes entregados en las borneras del *setpoint* y del sensor, ver figura D2. En la bornera del *setpoint* se mide el voltaje entregado y este debe corresponder al valor de la altura digitada en el teclado, en una relación de 10, es decir si en el teclado se presionaron 10 cm en la bornera debe medirse 1 voltio. De igual forma se verifica el valor entregado por el sensor.



Figura D 2. Tablero de mandos y diagrama de bloques del sistema de levitación neumática.

b) **Calibración del sistema de levitación neumática:** en caso de que los valores entregados por las borneras no sean correctos, se debe destapar la cubierta principal hacia arriba, soltando los tornillos (T1, T2, T3, T4) ubicados alrededor de la misma, ver figura D3.



Figura D 3. Tornillos de ensamble del sistema de levitación neumática

Después de abrir la cubierta, se procede a extraer el circuito de la tarjeta principal, en la cual se encuentran 2 *timers*, ver figura D4, donde cada uno regula la ganancia de salida entregada por el teclado y el sensor de ultrasonido. Para

calibrar la salida en las borneras del *setpoint* y del sensor se deben mover los *trimer* según la señal que se desee calibrar.

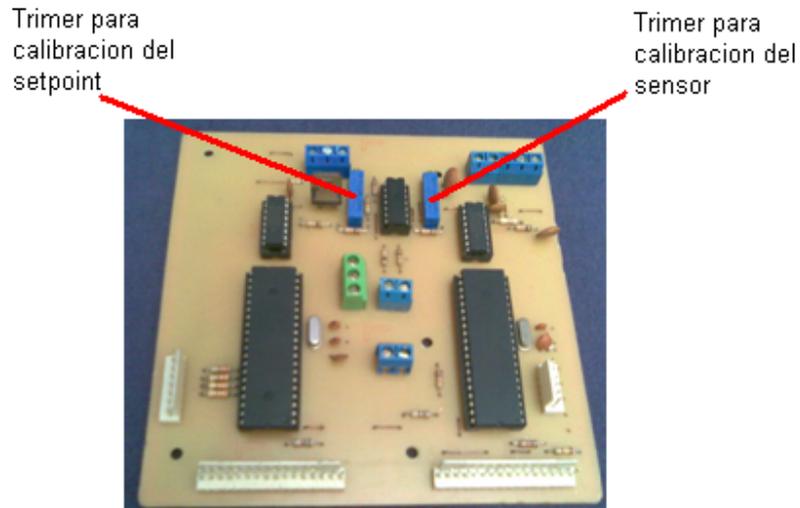


Figura D 4. Tarjeta principal del sistema de levitación neumática. Trimers de calibración del sensor y *setpoint*.

c) **Conexión del sistema de levitación neumática:** con el paso anterior ejecutado y con la cubierta principal en su lugar se procede a conectar el sistema de levitación neumática para su funcionamiento. Para empezar se cierra la reja del disturbio que esta en el costado izquierdo del armazón del sistema, la cual representa la señal de disturbio y posteriormente se conecta la bornera del *setpoint* con la señal positiva del sumador y bornera del sensor con el punto negativo del mismo sumador, de esta manera se puede comprobar la salida del restador.

Para comprobar el funcionamiento del ventilador se debe conectar la señal de 12 voltios a la señal del esfuerzo de control, ver figura D5, este procedimiento debe arrojar como resultado el movimiento de la esfera y la estabilización de la misma dentro del ducto. Posteriormente se desconecta esta salida.

Conectar la señal de 12 voltios a la señal del esfuerzo de control, ver figura D5. Posteriormente se desconecta esta salida.

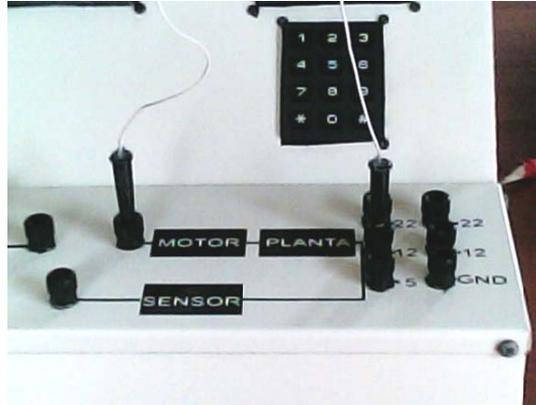


Figura D 5. Conexión del sistema de levitación neumática en malla abierta.

Con todas las señales verificadas y los elementos funcionando se conecta el módulo del PID analógico implementado. Con ayuda del plano eléctrico del PID, ver figura 6.2, se conectan los voltajes, la señal de salida del restador del sistema de levitación al la señal de error del PID y la señal de esfuerzo de control a la bornera de entrada al motor.

- d) **Cambio en el valor de *setpoint*:** para ingresar un nuevo valor de *setpoint* se deben seguir los siguientes pasos:
- *Clarear LCD:* presionar la tecla * o #, las cuales permiten, clarear la pantalla de LDC.
 - *Setpoint menor a 10:* para ingresar valores menores a un valor de 10 cm, se debe presionar primero la tecla cero y después la tecla del valor deseado. Este valor se debe mostrar de la siguiente manera: 05 equivale a 5 cm.
 - *Setpoint mayor a 10 y menor 40:* para valores mayores a 10 y menores de 40 se debe presionar la distancia de manera normal.
 - *Setpoint mayor a 40:* recordar que el sistema no admite valores mayores a 50 cm, en caso de ingresar un igual o superior al mencionado se visualizara el mensaje "ERROR", y automáticamente se clareará el LCD y el sistema estará listo para recibir un setpoint adecuado.

ANEXO E

INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Gran parte de las constantes del modelo matemático de la planta, se obtuvieron experimentalmente con la ayuda de diferentes instrumentos.

a) Procedimiento 1. Obtención del valor de la velocidad de entrada a la planta. Para la obtención de este valor se tomaron muchas mediciones por medio de un anemómetro a la salida del actuador, todos los valores medidos fueron verificados en diferentes oportunidades en el laboratorio del departamento de física. Donde, el resultado final de estas mediciones se encuentra en la tabla 6, estos valores se emplean en el modelo matemático, los cuales también permiten encontrar el valor de la velocidad (V_2) que interactúa con la esfera.



Figura E 1. Anemómetro utilizado para registrar las velocidades a la salida del actuador.

b) Procedimiento 2. Obtención del valor del peso de la esfera. Este valor se obtuvo pesando la esfera en las instalaciones del laboratorio de mecánica del departamento de física, la medición de la masa de la esfera arrojó un valor de 1.96 gramos.



Figura E 2. Pesa para registrar el valor de la masa de la esfera.

c) Procedimiento 3. Obtención del ángulo θ .

Conociendo las medidas del ducto de diámetro variable se midió experimentalmente mediante un transportador el ángulo de inclinación del ducto, midiendo el ángulo en la proyección de las paredes del ducto. Además se corrobora este dato en un software de diseño asistido por computador (CAD), *Solid Edge* versión 11. Ambos métodos nos arrojó un dato aproximado de 1.4 grados.



Figura E 3. Transportador utilizado para medir el ángulo de inclinación del ducto.

d) Procedimiento 4. Obtención del ángulo del desprendimiento de capa límite β .

Para la obtención de este ángulo se realizó un procedimiento experimental y un procedimiento en CFD. El procedimiento experimental consiste en introducir humo a la corriente de aire que está dentro de la planta y observar el comportamiento del humo alrededor de la esfera y de esta manera obtener un valor aproximado del ángulo de desprendimiento de capa límite. Este dato se corrobora mediante la simulación en el CFD del modelo con las características físicas del sistema, obteniendo un valor aproximado de 120 grados

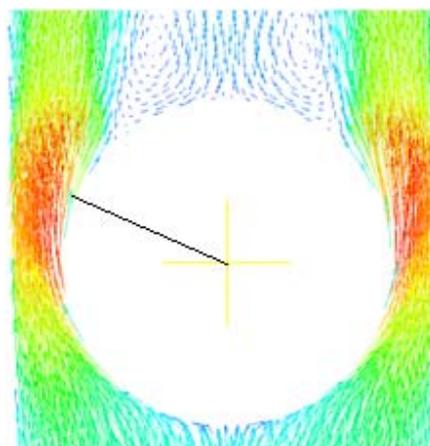


Figura E 4. Ángulo de desprendimiento de capa límite, obtenido del CFD.

Las restantes constantes que complementan el modelo, son constantes teóricas las cuales se obtienen de las diferentes referencias bibliográficas tales como densidad del aire (ρ), viscosidad dinámica (μ), el arco de circunferencia viene dado por el ángulo del desprendimiento de capa límite, el coeficiente de pérdidas en la expansión, es también teórico y depende del ángulo θ .

ANEXO F

GUÍA PARA SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID

Después de conectar correctamente el controlador PID al sistema de levitación neumática, establezca el rango para la sintonización del PID. Para este caso el rango de sintonización es de 0 – 10 cm. La figura E1, muestra los mandos de cada una de las ganancias del PID.

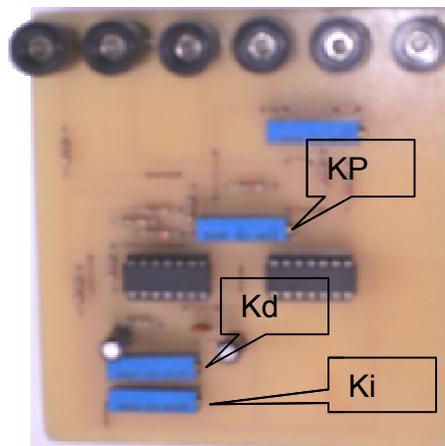


Figura F 1. Controlador PID y sus ganancias.

Recuerde que los *trimers* de calibración de las ganancias aumentan su valor si giran en sentido de las manecillas del reloj, y disminuyen en sentido contrario. Primero disminuya K_i y K_d a valores mínimos, a continuación, incremente K_P hasta que la esfera alcance el valor máximo del rango. Luego establezca P a aproximadamente la mitad del valor configurado previamente, con el fin de alcanzar los valores mínimos del rango. Después ingrese el valor del set point, incremente K_i hasta que el proceso se ajuste en el tiempo requerido. Finalmente, incremente K_d , si se necesita para disminuir las oscilaciones y también para que el lazo sea lo suficientemente rápido para alcanzar su referencia tras una variación brusca del *set point*.

ANEXO G

DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS CFD

La dinámica computacional de fluidos es la rama de la mecánica de fluidos que mediante soluciones numéricas en ordenador utiliza algoritmos basados en aproximaciones numéricas de las ecuaciones físicas empleadas en la dinámica de fluidos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Permite la incorporación de software que reduce la velocidad de cálculo como así también el margen de error al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

En este proyecto utiliza CFD para simular el comportamiento de la esfera dentro del ducto y analizar las características de esta interacción, ver figura G1, como la caída de presión en el ducto, el desprendimiento del fluido con la esfera, ver figura G2 los gradientes de velocidad alrededor de la esfera y el ducto y evaluar numéricamente el valor de las fuerzas encontradas teóricamente para el modelo matemático.

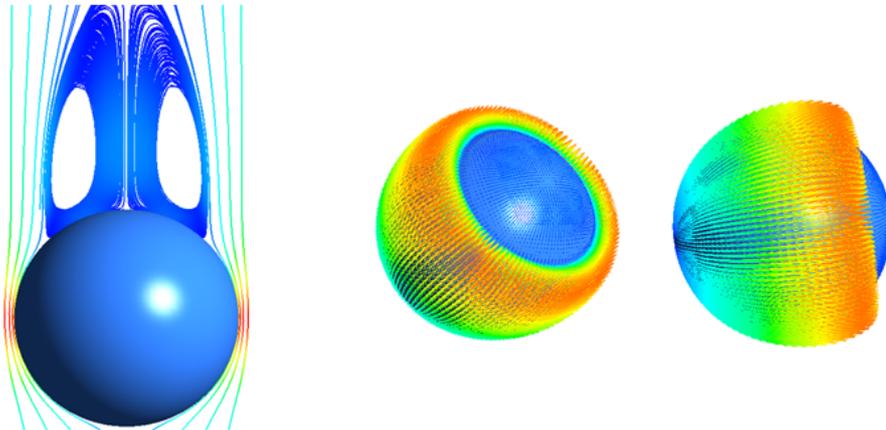


Figura G 1. Representación de la interacción entre el fluido y esfera.