

# Control de posición de un sistema de levitación

## Position control for a pneumatic levitation system

Víctor Hugo Mosquera Leyton, Germán Bacca, Oscar Quiñones Meneses, Jhon Anderson Díaz Fernández  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca  
Popayán, Colombia  
{mosquera, gbacca, oscarjavier, jdiazfernandez}@unicauca.edu.co

(Recibido el 7 de Junio de 2012, Aceptado el 10 de Octubre de 2012)

**Resumen** –En este artículo se presenta el diseño, modelado y control de posición de un sistema de levitación neumático, el PID implementado en este trabajo sostiene una esfera a una altura deseada mediante la regulación de la velocidad de un motor, la cual está directamente relacionada con el flujo de aire que contrarresta las fuerzas que se ejercen sobre la esfera; un sensor de ultrasonido permite al sistema en lazo cerrado obtener la información para regular la altura.

**Palabras claves:** *modelado, levitación, control PID y control de posición.*

**Abstract** –This paper presents the design, modeling and control of position of a pneumatic levitation system, the PID is implemented in this work regulate the a sphere height by regulating the speed of a motor, which is directly related to the flow of air and the forces exerted on the sphere, an ultrasonic sensor allows the closed loop system to obtain information for regulate the height.

**Keywords:** *modeling, levitation, PID control and position control.*

### I. INTRODUCCIÓN

El efecto de que un cuerpo se suspenda en el aire sin contacto físico se denomina levitación, la cual es el resultado de una fuerza que contrarresta el peso del cuerpo u objeto levitante. Esta levitación se clasifica según los medios empleados, entre las cuales están, la levitación electrostática, magnética, neumática, acústica y óptica; estas diferentes clases de levitación permiten lograr el mismo efecto de suspender cuerpos en el aire, pero con diferentes características. A partir de lo anterior, este caso de estudio, tratará la levitación neumática; área seleccionada para el desarrollo del modelo en el dominio del tiempo.

Esta clase de levitación opera las variaciones en la presión ejercida por gases, en este caso el aire, para mantener objetos suspendidos en posición estable [1]. Esta levitación debe garantizar los siguientes efectos sobre el objeto: Una fuerza que contrarreste el peso del cuerpo (la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto que levita) y para que se halle en suspensión estable, es necesaria una fuerza adicional que contrarreste cada pequeño desplazamiento del objeto en levitación.

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. Existen algunos trabajos en los cuales se muestra el modelo dinámico de sistemas de

levitación y estrategias de control, como por ejemplo *Position Control of a Pneumatic Levitation System*, trabajo presentado en las XXV jornadas de automática en Ciudad Real España, el cual 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]. El proyecto *Levitating Beachballs* realizado en Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, consigue mediante ecuaciones físico-matemáticas la estabilidad o el punto de equilibrio vertical y horizontal de una esfera levitando en ambiente abierto. Donde se considera un caudal de aire incomprensible y laminar; Pero este trabajo se enfoca solo en modelar y estabilizar en teoría este sistema de levitación neumática [3]. Otro trabajo relacionado con la levitación neumática es el proyecto de los Levitadores Neumáticos Acoplados, el cual se centra en el estudio de la estabilidad, este trabajo de maestría modela un sistema compuesto por levitadores neumáticos acoplados y estudia su estabilidad con el método directo de Lyapunov. Algunos de

los elementos utilizados son ventiladores y tuberías PVC para conectar los levitadores [4].

Este artículo presenta en la segunda sesión los componentes del levitador implementado, el modelo matemático del mismo se puede observar en la sesión 3, posteriormente en la sesión 4 se encuentra la simulación del modelo obtenido en *Matlab/Simulink*, en la sesión 5 se puede observar el sistema de levitación construido y los resultados del sistema de levitación se pueden observar en la sesión y finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

## II. DISEÑO DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA

Para diseñar el sistema de levitación neumática se inicia por estudiar cada uno de los bloques que contempla un sistema de control, los cuales son:

**Bloque de censado:** consiste en un medidor de ultrasonido de distancias *SRF05* de la firma DEVANTECH [5].

**Sistema de levitación (levitador neumático):** conformada por una *esfera* como objeto levitante, la cual es la más adecuada debido a su uniformidad en su geometría; un *ducto de diámetro variable*, como ambiente cerrado, donde la esfera experimenta un cambio de presión ante las corrientes de aire a la entrada de baja presión a alta presión [7]-[10], haciendo que este incremento de presión y el peso del objeto levitante se compense con la fuerza de la velocidad del flujo de entrada y el equilibrio de estas fuerzas permitan controlar la posición de la esfera en el interior del ducto (figura 2a), Además se diseña un direccionador de flujo (figura 2b) y un contractor (figura 2c) que tiene como función principal acelerar el flujo a la velocidad deseada (figura 2b) [6] y [11].

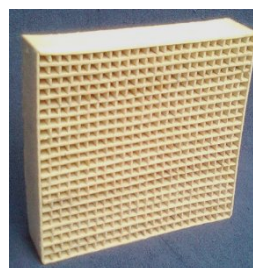
**Bloque actuador:** este bloque conformado por un *ventilador* de 24 voltios DC con un tamaño de aspas de 3 cm, el cual proporciona el caudal y el tamaño de área necesario para el libre control del objeto levitante; el *direccionador de flujo* (Panal de abejas), hace un filtrado para que el movimiento del flujo de 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



a)



b)



c)

Figura 1. Estructura física ducto de diámetro variable.

a) Tubo de levitación, b) Contractor, c) Direccionador (rejilla para laminar el flujo de aire y facilitar el direccionamiento del mismo).

Así mismo encausa el flujo de aire según el eje del ducto en una dirección y homogeneizarlo espacialmente volviéndolo relativamente uniforme y estable en el ambiente cerrado; el *contractor* que acelera el flujo de aire a la velocidad deseada y adelgaza al máximo la capa limite en las paredes a la entrada del ducto de diámetro variable en todo el ámbito de velocidades de operación, donde además reduce la intensidad turbulenta.

**Módulo de entrada:** un *teclado matricial*, que permite ingresar el valor de altura deseado por el usuario.

**Bloque de control:** se implementa en este proyecto un PID paralelo analógico (figura 13).

En la Figura 2. se presenta el sistema de levitación a modelar y controlar.



Figura 2. Levitador neumático.

## III. MODELADO DEL LEVITADOR NEUMÁTICO

### A. MODELO DE FUERZAS SOBRE EL OBJETO LEVITANTE.

Para obtener el modelo teórico de la planta, se determina el sistema de fuerzas que actúan sobre la esfera dentro del ducto,

la figura 4, muestra estas fuerzas las cuales pueden ser cuantificables por intermedio de conceptos físicos (leyes de Newton).

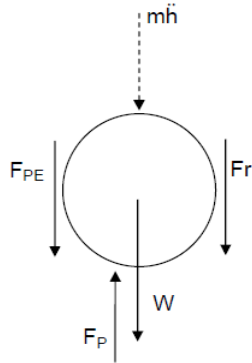


Figura 3. Sistema de fuerzas sobre la esfera.

Las fuerzas que se representan en la figura 4, son: el peso (W), la fuerza de rozamiento (Fr), la fuerza de pérdidas en la expansión (FPE) y la fuerza de propulsión (FP) a la entrada del ducto de diámetro 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.

El modelado consiste en encontrar la relación matemática de las fuerzas que afectan al objeto en función de los parámetros físicos de la planta, a continuación se presenta el cálculo de cada fuerza que actúa en el proceso (Ecuación 1)

$$F_r + F_{PE} + W - F_P = m\ddot{h} \quad (1)$$

Donde  $\ddot{h}$  es la aceleración del objeto levitante.

Para el análisis de las fuerzas que actúan sobre el objeto levitante se tuvo en cuenta la física de fluidos [7]-[9]. Cada una de las fuerzas se analiza a continuación.

**La Fuerza de Fricción ( $F_r$ ),** depende del esfuerzo cortante, generado por el movimiento del fluido, y la superficie de control que se presenta por la interacción entre la esfera y el fluido. Cuando el fluido se mueve al interior del ducto se desarrolla el esfuerzo cortante ( $\tau$ ), el cual se define como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra, la ecuaciones 1 y 2 representan esta fuerza [7].

$$F_r = \tau A \quad (2)$$

Dónde:

$$\tau = \mu (\Delta v / \Delta r) \quad (3)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad dinámica del aire y a una temperatura de 20°C y es igual a  $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ .  $\Delta v$ : 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.  $\Delta r$  espesor de capa límite. El flujo de

aire permanecerá en contacto con la esfera hasta un desprendimiento a este punto se le conoce como capa límite y A es el área de control o el área sobre la esfera en la cual se presenta la fuerzas de fricción (Figura 4).

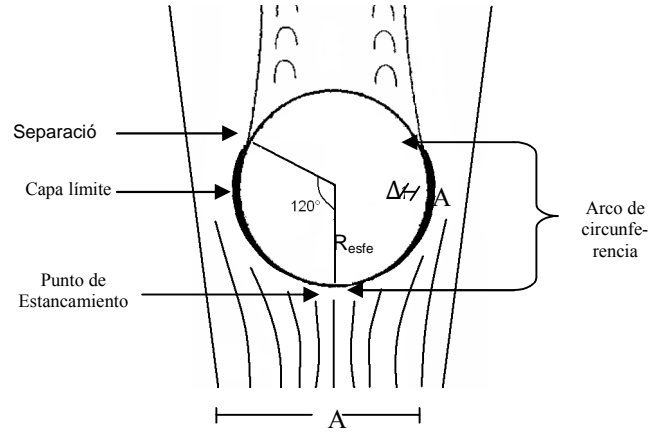


Figura 4. Representación capa límite sobre esfera.

El gradiente de velocidad ( $\Delta v$ ): es el gradiente de velocidad definido como la velocidad relativa entre la velocidad del flujo de aire alrededor de la esfera ( $v_a$ ) y la velocidad de la esfera ( $v_e$ ), las cuales se midieron experimentalmente. (Ver ecuación 4)

$$\Delta v = v_a - v_e \quad (4)$$

Espesor de capa límite ( $\Delta r$ ):

$$\frac{\Delta r}{x} = \frac{1}{\sqrt{\text{Re}(x)}} \quad (5)$$

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

Donde x es 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°.

$$x = \theta_{\text{rad}} \times R_{\text{esf}} \quad (6)$$

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

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

$$\text{Re}(x) = \frac{\rho v_2 D}{\mu} \quad (7)$$

Debido a que se tiene el esfuerzo cortante, se procede a encontrar el área superficial de control total ( $A_{\text{sct}}$ ), la cual es la suma de las áreas de contacto ( $A_c$ ) y superficial cónica ( $A_{\text{sc}}$ ):

$$A_{\text{sct}} = A_c + A_{\text{sc}} \quad (8)$$

**Área de contacto (Ac):** 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 (figura 5). Asc es el área en la cual no se presenta la fuerza de fricción.

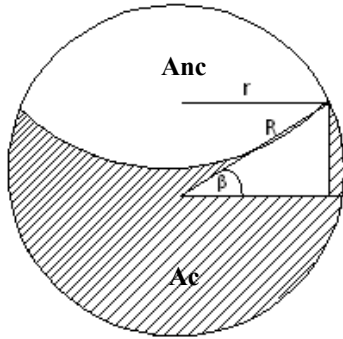


Figura 5. Superficie de contacto entre el fluido y la esfera.

Esta superficie de control se determina mediante el cálculo de la región de la esfera; exactamente un casquete que varía su dimensión según el ángulo  $\beta$ , que se puede apreciar en la figura 6. Este ángulo  $\beta$  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 separa el casquete de la esfera que hace contacto con el fluido (figura 6) y luego proyectando el área de no contacto con el fluido (Anc), la cual se puede apreciar en figura 7.

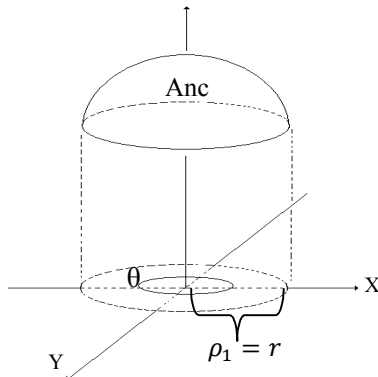


Figura 6. Proyección del área de no contacto.  $\rho_1$ , coordenada radial

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.

Observando la figura 6 y por ecuación trigonométrica se puede calcular el radio  $r$  del área de no contacto (ecuación 9).

$$r = R \cos \beta \quad (9)$$

La superficie mostrada en la figura 7 se calcula mediante la ecuación 10:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (10)$$

Esta ecuación de una esfera, se observa en la ecuación 11:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (11)$$

Luego, la ecuación 11, expresada en el plano  $x, y$  entrega la ecuación que define el área proyectada (ecuación 12).

$$f(x, y) = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (12)$$

Derivando la ecuación 12, con respecto a la variable  $x$  y la variable  $y$ , y teniendo la función en términos de las coordenadas  $x, y$ , la doble integral nos proporciona la región de no contacto:

$$A_{nc} = \iint_{reg} \sqrt{f_x^2(x, y) + f_y^2(x, y) + 1} \, dx dy \quad (13)$$

Donde  $f_x$  es derivada con respecto a  $x$  y  $f_y$  derivada con respecto a  $y$ .

Sustituyendo las derivadas con respecto a los ejes  $x$  y  $y$  en 13 se obtiene:

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

Ahora, si se cambia a coordenadas polares, reemplazando y desarrollando la doble integral, se tiene:

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

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

Haciendo  $r = R \cos(\beta)$

$$A_{nc} = 2\pi R^2 [1 - \sin \beta] \quad (14)$$

De esta manera el área de contacto, se presenta en la ecuación 15:

$$A_c = A_{esf} - A_{nc}$$

$$A_c = 4\pi R^2 - 2\pi R^2 [1 - \sin \beta]$$

$$A_c = 2\pi R^2 + 2\pi R^2 \sin \beta$$

$$A_c = 2\pi R^2 [1 + \sin \beta] \quad (15)$$

**Área superficial cónica (Asc):** se origina entre la esfera y el ducto, la cual hace parte del esfuerzo cortante que se presenta en el fluido (figura 8). Esta área se puede determinar mediante funciones trigonométricas.

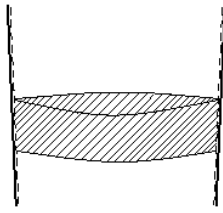


Figura 7. Área superficial cónica de área de control.

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 8:

$h$  es la variable asignada para determinar la altura a la que se posiciona la esfera dentro del ducto,  $h_1$  identifica la altura en la cual, la capa límite del fluido se desprende de la esfera medida desde el punto de estancamiento en  $h_2$ , es decir el punto donde el fluido hace contacto con la esfera.

La altura y el radio para  $h_2$ , en el ducto de área variable, se pueden obtener mediante las expresiones 16 y 17 respectivamente.

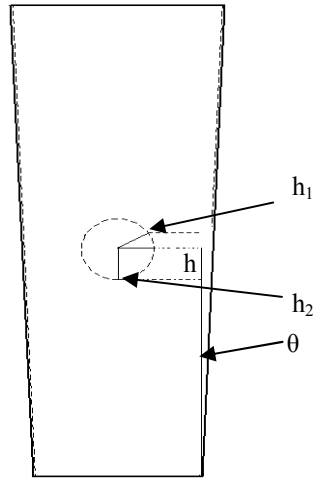


Figura 8. Puntos de referencia del área superficial cónica del ducto de área variable

$$h_2 = h + r_e \sin \beta \quad (16)$$

$$r_2 = h_2 \tan \theta \quad (17)$$

Donde  $h$  es la altura de la esfera,  $r_e$  el radio de la esfera,  $\beta$  el ángulo entre el centro de la esfera y el punto del desprendimiento de la capa límite,  $r_2$  el radio del ducto de área variable en la posición de la esfera en  $h_2$  y  $\theta$  el ángulo entre las paredes del ducto de área variable.

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 18 y 19 respectivamente:

$$r_{c2} = r_b + r_2 \quad (18)$$

$$A_{sc2} = \pi r_{c2} \sqrt{r_{c2}^2 + h_2^2} \quad (19)$$

Donde  $A_{sc2}$  es el área superficial en  $h_2$ ,  $r_{c2}$  es la adición entre los radios de  $r_b$  y  $r_2$  y  $R_b$  el 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 (20) y (21):

$$h_1 = h - r_e \quad (20)$$

$$r_1 = h_1 \tan \theta \quad (21)$$

Donde  $h$  es la altura de la esfera,  $r_e$  el radio de la esfera,  $\beta$  el ángulo entre el centro de la esfera y el punto del desprendimiento de la capa límite,  $r_1$  el radio del ducto de área variable en la posición de la esfera en  $h_1$  y  $\theta$  el ángulo entre las paredes del ducto de área variable.

Para la obtención del área del ducto, la cual se dimensiona desde la posición cero hasta el desprendimiento de la capa límite, se realiza mediante las expresiones (22) y (23):

$$r_{c1} = r_b + r_1 \quad (22)$$

$$A_{sc1} = \pi r_{c1} \sqrt{r_{c1}^2 + h_1^2} \quad (23)$$

Donde  $A_{sc1}$  es el área superficial en  $h_1$ ,  $r_{c1}$  es la adición entre los radios de  $r_b$  y  $r_1$  y  $r_b$ : 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 24:

$$A_{sc} = A_{sc2} - A_{sc1} \quad (24)$$

Sustituyendo 15 y 24 en 2 se obtiene la fuerza de fricción.

**La Fuerza de Perdidas en la Expansión ( $F_{PE}$ )**, se genera debido a la diferencia de áreas en el ducto de diámetro variable, lo cual origina unas pérdidas de energía del flujo de aire en la expansión del ducto, actuando como una fuerza contraria a la dirección flujo de aire, la ecuación 25 presenta esta relación.

$$F_{PE} = h_l A_{superficial} \rho g \quad (25)$$

Donde  $h_l$  es el coeficiente de perdidas, las cuales se calcularon mediante,  $A_{superficial}$  representa el área en la cual el aire golpea la esfera,  $\rho$  la densidad del aire y  $g$  la gravedad.

Mediante experimentación en los laboratorios de física de la Universidad del Cauca se encontró el coeficiente de perdidas, este procedimiento se basa en la medición del flujo de entra y salida, teniendo como resultado un coeficiente de pérdidas de 0.01.

**La Fuerza de Propulsión ( $F_p$ )** representada la fuerza que desarrolla el ventilador es igual al producto de la masa de aire que arroja en un segundo por la velocidad de los mismos, como se muestra en la siguiente expresión.

$$F_p = \dot{m}v \quad (26)$$

Donde  $\dot{m}$  es cambio de la masa del aire y  $v$  la 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 9.

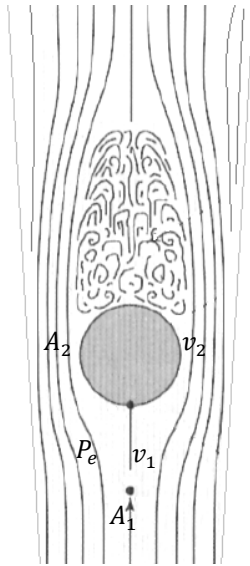


Figura 9. Masa del fluido en el ducto de área variable

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

$$F_p = m_2 v_2 - m_1 v_1 \quad (27)$$

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:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} + \dot{m}_{sal} - \dot{m}_{ent} = 0 \quad (28)$$

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:

$$\dot{m}_1 v_1 = \dot{m}_2 v_2$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

$$F_p = \dot{m}v_2 - \dot{m}v_1$$

$$F_p = (v_2 - v_1)\dot{m} \quad (29)$$

$$\dot{m} = \rho A v \quad (30)$$

Reemplazando la ecuación (30) en la ecuación (29) y simplificando se obtiene:

$$F_p = (v_2 - v_1)\rho A v_1 \quad (31)$$

Donde,  $v_2$  es la velocidad a los lados de la esfera y  $v_1$  la velocidad de entrada, después del contractor.

Reemplazando, las ecuaciones (2), (25) y (31) en la ecuación (1) y Siendo,

$$v_2 = \frac{A_1 v_1}{A_2}$$

Se obtiene el modelo del sistema de levitación neumática.

$$\tau A + F_{PE} + mg - \left( \frac{A_1}{A_2} - 1 \right) \rho A_1 v_1^2 = m \ddot{h} \quad (32)$$

## B. CARACTERIZACIÓN DE LOS MODULOS DEL SISTEMA DE LEVITACIÓN NEUMÁTICA.

a) **La caracterización del sensor de ultrasonido:** se realiza por medio de los datos obtenidos de las mediciones reales que proporciona el sensor de ultrasonido, el sensor es lineal y la distancia se calcula mediante la ecuación 33, donde  $V$  es el voltaje que entrega el sensor.

$$h = 10V \quad (33)$$

b) **La caracterización del actuador (Ventilador helicoidal, direccionador de flujo y contractor):** esta medición se obtiene mediante un anemómetro el cual mide la velocidad de las corrientes de aire a la salida del actuador. Donde el comportamiento no lineal del actuador dificultó obtener su ganancia, y se optó por obtener ganancias en los tramos más significativos y así establecer el comportamiento del actuador para la simulación del sistema. La curva del actuador que relaciona altura con voltaje se presenta en la figura 10.

Esta caracterización se realizó midiendo el voltaje a la entrada del motor y la altura a la cual se encontraba la esfera.

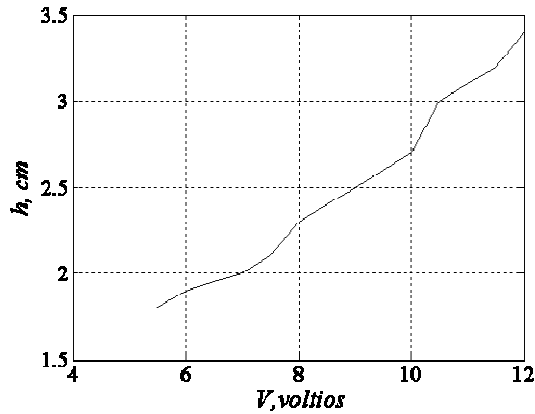
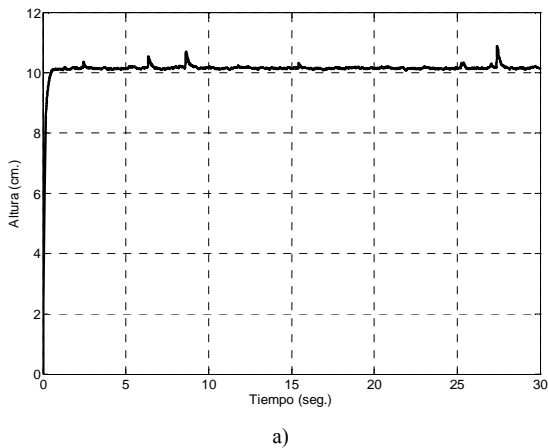


Figura 10: Curva de respuesta del actuador.

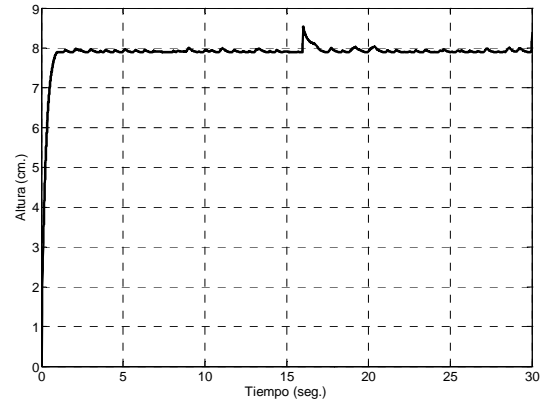
#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La simulación se realiza a través de *Matlab/Simulink*, el cual proporciona la respuesta del sistema a diferentes valores de entrada. Esta respuesta debe entregar la posición de la esfera. La simulación de este sistema se realiza teniendo en cuenta la caracterización del sensor y el actuador, además, el sistema se controla con un PID paralelo. La visualización de la simulación del modelo y del sistema en malla cerrada se puede observar en detalle en [6].

Este sistema entrega la respuesta que se observa en la figura 6 para un valor de *setpoint* de 10 y 8 cm., con ganancias del controlador de  $k_p = 520$ ,  $T_i = 1000$  y  $T_d = 0.15$  en la cual se puede observar que el sistema presenta un error de estado estacionario de aproximadamente 1 cm. Además se puede notar en estado estacionario que la posición de la esfera no es constante y esto debido a las corrientes de aire que generan por turbulencias en la parte superior de la esfera. Es importante resaltar que para la sintonización del controlador PID se realiza por medio del bloque *signal constrain* de Sumilink.



a)



b)

Figura 11. Respuesta del sistema de levitación en malla cerrada. a) *setpoint* de 10 cm. b) *Setpoint* 8 cm.

#### V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El Control PID implementado es el clásico controlador paralelo, el cual se implementó de forma analógica (figura 12), los potenciómetros que se pueden observar en el esquema circuital permiten el ajuste de las constantes del controlador ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ).

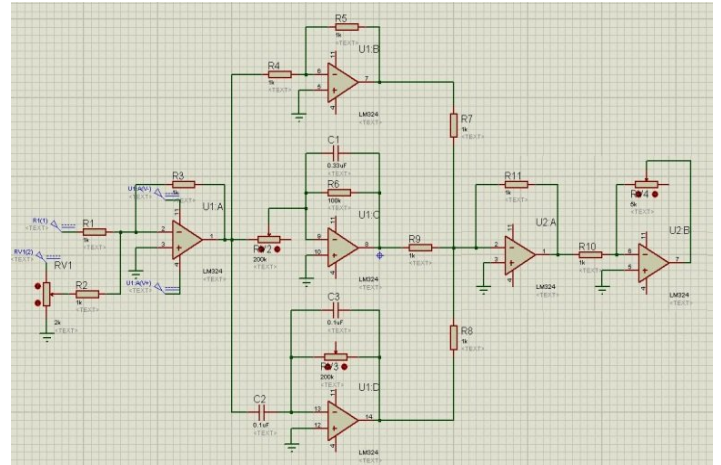


Figura 12. Esquema del controlador PID.

Los circuitos acondicionadores de la señal del sensor, señal de excitación del motor, *setpoint* se realizan por medio de un microcontrolador PIC16F877A, un convertor DAC0808 y demás dispositivos que permiten el funcionamiento de la tarjeta central del sistema, la figura 13 muestra el sistema de levitación con el controlador.

El 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 a la cual está la esfera referenciada desde el fondo de ducto de diámetro variable.



En la figura 14 se muestra una secuencia de imágenes del comportamiento de la esfera cerrada, para una señal de referencia de 10 cm., con error de estado estacionario de 0.5 cm. Es importante recordar que el sistema es no lineal, el controlador PID se sintonizó por ensayo y error ya que en el sistema físico se presentan las fuerzas debido a la turbulencia que no se modelaron, las nuevas constantes del controlador son:  $K_p=2$ ,  $T_i=269.36$  y  $T_d=1.5 \cdot 10^{-4}$ .

El sistema cuenta además con una compuerta para limitar la entrada de aire al ducto, lo cual simula un disturbio, la figura 15 muestra la respuesta del sistema controlado cuando se presenta el disturbio para un *setpoint* de 25 cm.

Otra prueba realizada fue el comportamiento de la planta en malla abierta para validar los datos de simulación con los datos reales. Para esta prueba se mide el voltaje aplicado al motor y la altura que alcanza la esfera, estos datos se comparan con los datos que se obtienen de la simulación, los cuales muestran el voltaje que debería entregar el sensor de acuerdo con el *setpoint*. Con el prototipo del sistema de levitación neumática se procede a realizar la validación de los rangos de voltaje para las señales de entrada y salida. Se conecta la bornera a la salida del sensor de ultrasonido a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 de *National Instruments* para graficar la señal de salida, en la figura 17 muestra la lectura que presenta el sensor para un *setpoint* de 10 cm.



Figura 13. Sistema de levitación neumática construido.

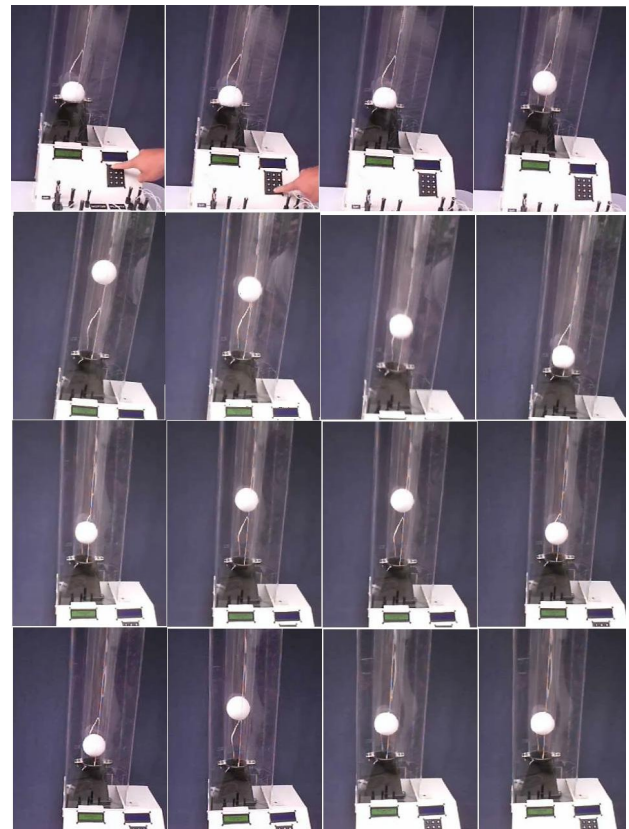


Figura 14. Respuesta del sistema ante un *setpoint* de 10 cm.

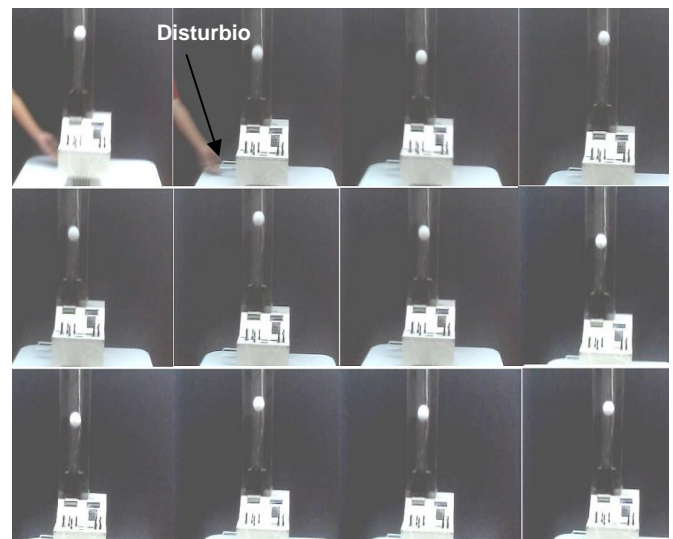


Figura 15. Secuencia de corrección de disturbio.

Teniendo en cuenta los resultados de simulación y los obtenidos en el laboratorio se puede observar la consistencia del modelo del levitador.

En malla abierta el sistema responde rápidamente al ingreso de la señal de entrada, garantizando una suspensión estable en cualquier punto del ducto. Se observa 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 observa una buena respuesta del sensor de ultrasonido para controlar la posición de la esfera, con una rápida y certera medición.

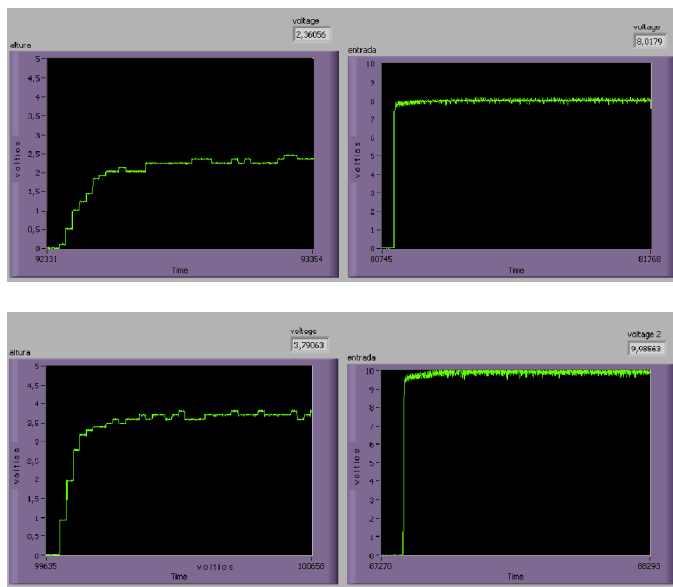


Figura 16. Lectura del sensor para *setpoint* de 8 y 10 cm.

Es importante observar en la figura 16 se evidencia un error de estado estacionario, esto se debe a que el modelo de este trabajo no contempla las fuerzas que se generan sobre la esfera debido a la turbulencia que se presenta cuando el flujo de aire sobre pasa la capa límite, lo cual afecta la dinámica al modelo.

## VI. CONCLUSIONES

Para lograr una suspensión de la esfera fue necesario 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. Además, para lograr un desplazamiento controlado de la esfera se debe garantizar lo mejor posible, un perfil de velocidad laminar, y esto se logró en este proyecto con el uso de un direccionador de flujo.

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.

Las oscilaciones en estado estacionario se deben a fuerzas de turbulencia que se generan debido al choque entre el flujo de aire y la esfera. Para lograr controlar la esfera en todo el rango del ducto (0 a 40 cm) conservando una sola sintonización se necesita de un control más avanzado que contrarreste las no linealidades del sistema.

## REFERENCIAS

- [1]. J. A. Díaz García, "Sistematización del diseño de dispositivos de levitación superconductor por Efecto Meissner", Tesis de Doctor en Ingeniería Mecánica y Organización Industrial. Universidad Carlos III de Madrid; Instituto Leganés, Madrid 2008.
- [2]. J. M. Escaño, M. G. Ortega y F. R. Rubio, "Position Control of a Pneumatic Levitation System", *Emerging Technologies and Factory Automation*, 2005, pp 528-535.
- [3]. K.T. McDonald, "Levitating Beachball", *American Journal of Physics*, Volumen 68, 2000, pp. 388-389.
- [4]. C. Cara, "Levitadores Neumáticos Acoplados: Estudio de Estabilidad", VIII congreso de la ACA, 2009.
- [5]. DEVANTECH Ltd. Página consultada el 15 de mayo de 2010. En: <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf05tech.html>.
- [6]. J.A. Díaz Fernandez y O. J. Quiñones Meneses, "Diseño, Construcción y Control de un Sistema de Levitación Neumática", Trabajo de Grado (Ingeniero en Automática Industrial). Universidad del Cauca; Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayán 2010.
- [7]. R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, sexta edición, Mexico, Pearson Education, 2006, pp. 200 – 300.
- [8]. I. H. Shames, *Mecánica de Fluidos*. Santa Fe de Bogotá. MacGraw Hill, 2005 pp 55- 90.
- [9]. V. L. Streeter, E. Benjamin, K. W. Bedford, *Mecánica de Fluidos*. Santa Fe de Bogotá. MacGraw Hill, 2007, pp. 20 – 50.
- [10]. R. W. Fox, *Introduction to Fluid Mechanics*, Editorial Mg Gill, 2004, pp 200 – 220.
- [11]. R.D.A. Mehta, "Turbulent Boundary layer Preturbed by Screen", *AIAA Journal*. Vol.23, 1985, pp. 1335.

## BIOGRAFIAS

**VÍCTOR HUGO MOSQUERA LEYTON:** Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca (1999), Magister en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, 2009. Áreas de interés, control continuo y discreto y robótica. Docente tiempo completo Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca.

**GERMÁN ARTURO BACCA BASTIDAS:** Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira (1994), Doctor en Ingeniería con énfasis en Automática Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (2011). Áreas de interés, Sistemas dinámicos, instrumentación industrial y automatización de procesos. Docente tiempo completo Departamento de Física, Universidad del Cauca

**OSCAR QUIÑONES MENESES:** Meneses: Ingeniero en Automática Industrial de la Universidad del Cauca (2010).

**JHON ANDERSON DÍAZ FERNÁNDEZ:** Ingeniero en Automática Industrial de la Universidad del Cauca (2010).