

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA NEUMÁTICO PARA LA MEDICIÓN DE RUGOSIDAD

CARLOS IVÁN VÁSQUEZ VALENCIA  
JULIÁN RODRIGO PÉREZ ORDOÑEZ

Trabajo de Investigación

Director

Ph.D German Arturo Bacca Bastidas.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN.  
INGENIERÍA FÍSICA.  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN SIDICO.  
POPAYÁN.  
2014.

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE  
SISTEMA NEUMÁTICO PARA LA MEDICIÓN DE  
RUGOSIDAD**

CARLOS IVÁN VASQUEZ VALENCIA  
JULIAN RODRIGO PÉREZ ORDOÑEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN.  
INGENIERÍA FÍSICA.  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN SIDICO.  
POPAYÁN.  
2014.

## Nota de Aceptación

---

---

---

---

Director \_\_\_\_\_  
Ph.D German Arturo Bacca Bastidas.

Jurado \_\_\_\_\_  
Ph.D Rubiel Vargas Cañas.

Jurado \_\_\_\_\_  
Mg Mario Andrés Cordoba González.

Fecha de Sustentación: **Popayán, 20 de febrero de 2014.**

# Índice general

<b>1. Preliminares</b>	<b>12</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	12
1.2. Justificación . . . . .	13
1.3. Objetivos . . . . .	13
1.4. Contribución . . . . .	14
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción . . . . .	15
2.2. Ecuación de Estado para un Gas Ideal . . . . .	15
2.3. Proceso Politrópico Reversible para un gas Perfecto . . . . .	16
2.4. Flujo de Gas Perfecto a través de un Orificio . . . . .	16
2.4.1. Presión Crítica, velocidad crítica y razón de flujo de gas máxima . . . . .	17
2.4.1.1. Velocidad crítica . . . . .	18
2.5. Fundamento Sobre Superficies Rugosas . . . . .	19
2.5.1. Integridad Superficial . . . . .	20
2.5.2. Textura Superficial . . . . .	20
2.5.3. Defectos Superficiales . . . . .	22
2.5.4. Medición de la Rugosidad Superficial . . . . .	23
2.6. Tipos de Rugosímetros . . . . .	24
2.6.1. Rugosímetro con Patín Mecánico . . . . .	24
2.6.2. Rugosímetro con Palpador Inductivo . . . . .	25
2.6.3. Rugosímetros con Palpador Capacitivo . . . . .	25
2.6.4. Rugosímetro con Palpador Piezoeléctrico . . . . .	26
2.6.5. Rugosímetro con Láser . . . . .	27
<b>3. Sistema de Medición Tobera-Aleta</b>	<b>28</b>
3.1. Introducción . . . . .	28
3.2. Descripción del Sistema de Medición . . . . .	28

3.2.1.	Generación y abastecimiento de aire comprimido . . . . .	28
3.2.2.	Compresor de aire . . . . .	29
3.2.3.	Acondicionamiento de Aire Comprimido . . . . .	30
3.2.3.1.	Filtro de Aire . . . . .	30
3.2.3.2.	Regulador de Presión . . . . .	31
3.2.4.	Tubería . . . . .	32
3.2.5.	Válvulas de control . . . . .	32
3.2.6.	Actuador neumático . . . . .	32
3.2.7.	Aparatos auxiliares . . . . .	32
3.3.	Interfaz Utilizada para la Adquisición de Datos . . . . .	32
3.3.1.	Circuito para la Adquisición de Datos . . . . .	32
3.4.	Sensores de Presión . . . . .	33
3.4.1.	Sensor de Presión de Silicio . . . . .	34
3.5.	Construcción del Elemento de Medición . . . . .	34
<b>4.</b>	<b>Modelo Matemático</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>Caracterización del Sistema de Medición</b>	<b>42</b>
5.1.	Introducción . . . . .	42
5.2.	Caracterización Estática . . . . .	42
5.3.	Función Desplazamiento, Presión. . . . .	43
5.4.	Coeficiente de Descarga . . . . .	43
5.5.	Flujo de Masa . . . . .	47
5.5.1.	Flujo de Masa de Suministro, $G_s$ . . . . .	47
5.5.2.	Flujo de Masa de Restricción Variable, $G_n$ . . . . .	50
5.6.	Caracterización Dinámica . . . . .	52
5.6.1.	Respuesta Dinámica del Sistema. . . . .	52
5.7.	Respuesta en Frecuencia . . . . .	55
5.7.1.	Diagrama de Bode. . . . .	55
<b>6.</b>	<b>Resultados Experimentales Medición de Rugosidad promedio <math>R_a</math></b>	<b>57</b>
6.1.	Introducción . . . . .	57
6.2.	Preparación de Muestras . . . . .	57
6.3.	Montaje Experimental . . . . .	58
6.4.	Obtención de Rugosidad Promedio $R_a$ . . . . .	59

<b>7. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>67</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	67
7.2. Trabajo Futuro . . . . .	69
<b>Anexos</b>	<b>70</b>
<b>A. Anexo I: Interfaz Utilizada</b>	<b>71</b>
<b>B. Anexo II: Planos Sistema Tobera-Aleta</b>	<b>72</b>

# Índice de figuras

2.1. Flujo Permanente de un gas Perfecto a través de un Orificio . . . . .	16
2.2. Curva de relación entre la razón de flujo de masa $G$ y la presión $P_2$ . . . . .	18
2.3. Terminología y Símbolos Normalizados Para Describir Acabado Superficial	21
2.4. Orientaciones Posibles de una Superficie . . . . .	22
2.5. Medición de la Rugosidad Superficial con Estilete . . . . .	24
2.6. Patín mecánico . . . . .	24
2.7. Rugosímetro con Palpador Inductivo . . . . .	25
2.8. Rugosímetro con Palpador Capacitivo . . . . .	26
2.9. Rugosímetro con Palpador Piezoeléctrico . . . . .	26
2.10. Rugosímetro laser de schmitt industries, Inc. . . . .	27
3.1. Compresor de aire utilizado y simbología . . . . .	30
3.2. Unidad de Mantenimiento FRL y simbología . . . . .	31
3.3. Regulador de presión y simbología . . . . .	31
3.4. Circuito para la Adquisición de Datos . . . . .	33
3.5. sensor de presión diferencial MPX2202DP . . . . .	34
3.6. Volumen de control . . . . .	36
3.7. Pieza cónica maquinada. . . . .	36
3.8. Pieza de restricción de suministro fija. . . . .	37
3.9. Sistema Tobera Obturador Real . . . . .	37
3.10. Simbología neumática sistema tobera-aleta . . . . .	38
4.1. Sistema Tobera Obturador . . . . .	40
5.1. Curva Típica Desplazamiento vs Presión. . . . .	43
5.2. Montaje Experimental Tornillo Micrométrico . . . . .	44
5.3. Montaje Experimental . . . . .	44
5.4. Controlador Motor Paso a Paso. . . . .	45
5.5. Tiempo de descarga para diferentes valores de distancia. . . . .	45

5.6.	Validación de coeficiente de descarga para un desplazamiento de 0.02 mm .	46
5.7.	Curva de $c_d$ con respecto a $x$ . . . . .	47
5.8.	Montaje Experimental para Pruebas Dinámicas . . . . .	48
5.9.	Flujo de masa $G_s$ . . . . .	48
5.10.	Datos experimentales, flujo de masa de presurización. . . . .	49
5.11.	Estimación de flujo de masa a través del orificio $G_s$ . . . . .	50
5.12.	Datos experimentales, flujo de masa $G_n$ . . . . .	51
5.13.	Estimación de flujo de masa a través del orificio $G_n$ . . . . .	52
5.14.	Entrada Rampa-Escalón. . . . .	53
5.15.	Estimación Respuesta Dinámica del Sistema. . . . .	54
5.16.	Respuesta Temporal del Sistema Neumático . . . . .	54
5.17.	Diagrama de Bode . . . . .	55
6.1.	Lijas de diferentes tamaños de grano. . . . .	57
6.2.	Barrido de papel de lija P1200 . . . . .	58
6.3.	Montaje experimental para el proceso de medición de $R_a$ . . . . .	59
6.4.	Curva $R_a$ . . . . .	59
6.5.	Ajuste por tramos de la función $x(p)$ . . . . .	60
6.6.	Perfiles de rugosidad papel de lija P1000 y P1200. . . . .	61
6.7.	Perfiles de rugosidad papel de lija P1500 y P2000. . . . .	61
6.8.	Obtención de $R_a$ para lija P1000. . . . .	62
6.9.	Obtención de $R_a$ para lija P1200. . . . .	63
6.10.	Obtención de $R_a$ para lija P1500. . . . .	63
6.11.	Obtención de $R_a$ para lija P2000. . . . .	64
6.12.	Obtención de $R_a$ para lija P600. . . . .	65
A.1.	Interfaz . . . . .	71
B.1.	Plano Cilindro Sensor . . . . .	72
B.2.	Plano Tobera . . . . .	73
B.3.	Plano Chicler . . . . .	74

# Índice de cuadros

3.1. Características de regulador de presión genérico . . . . .	29
3.2. Características de Sensor Diferencial de Presión MPX2202DP . . . . .	33
3.3. Características Amplificador Diferencial AD620 . . . . .	33
3.4. Características Arduino Uno . . . . .	33
3.5. Costo de Materiales para la Construcción (en pesos) . . . . .	35
5.1. Coeficientes de descarga para diferentes distancias. . . . .	46
6.1. Resultados de Rugosidad Promedio Ra . . . . .	65

## Introducción

La palabra neumática proviene del griego "pneuma", que significa respiración, viento y, filosóficamente, alma. El aire es usado como forma de energía desde la antigüedad, sin embargo la neumática es usada en la industria solo a partir de la mitad del siglo XX, empleándola para mejorar procesos de fabricación. Esta tecnología utiliza aire comprimido como medio transmisor de energía, y engloba el conjunto de técnicas para su transmisión, control y regulación. Dicha energía es transmitida a través de una línea y utilizada localmente por acusadores, motores y otros elementos de trabajo para realizar una determinada función.

La técnica neumática junto con la oleohidráulica constituyen hoy en día el complemento de la mecánica en cualquier proceso de producción moderno. Muchos problemas de ingeniería, a lo largo de los años, han sido resueltos mediante la mecánica tradicional, pero con la incorporación de esta tecnología se ha conseguido simplificar las máquinas haciendo más sencillos los movimientos, logrando así, cierto grado de automatización de forma sencilla y económica.

Al trabajar con aire comprimido se encuentran ciertas ventajas y desventajas, entre las ventajas se tiene que es económico, seguro, abundante, rápida respuesta ya que los actuadores pueden trabajar a altas velocidades y no representa contaminación al medio ambiente. Por otro lado, entre las desventajas se hallan, presencia de humedad debido a la condensación, ruido por la operación de los elementos de trabajo, limitación cuando se requiere fuerza mayor a 30.000 N aproximadamente y difícil detección de fugas [1] [2] [3].

Por otra parte, la medición de la rugosidad constituye la clave para establecer la textura ideal del acabado superficial, ya que se pueden controlar parámetros como: grado de fricción, desgaste, resistencia a la fatiga y lubricación de las piezas. La rugosidad en un material es la medida de las variaciones en la superficie de los artículos manufacturados los cuales les confieren aspereza, estas variaciones o errores que pueden ser de tipo macro geométrico o micro geométrico son lo que constituyen el acabado superficial de un cuerpo. Si bien, cabe aclarar que una superficie perfecta es una abstracción matemática ya que cualquier superficie real por perfecta que parezca presenta irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación, estas ondulaciones o imperfecciones en el material pueden ser ocasionadas debido a la flexión de la pieza durante el maquinado; falta de homogeneidad en el material, liberación de esfuerzos residuales, deformación por tra-

tamiento térmico, vibraciones o simplemente porque es necesario en su diseño [4].

En este trabajo, se realizó el diseño, construcción y caracterización de un sistema neumático para la medición de rugosidad en una superficie, esta medición se basa en el cambio de presión en un volumen de control previamente determinado, el cual está directamente relacionado con los cambios de longitud o tamaño que presente la irregularidad que se está midiendo. Estos cambios de presión son censados y procesados por una interfaz la cual grafica la superficie en un dispositivo computacional arrojando consigo datos numéricos del tamaño de la irregularidad medida. Todo esto basado en un transmisor neumático tipo sistema tobera-obturador, que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

# Capítulo 1

## Preliminares

### 1.1. Planteamiento del Problema

El método más usado en la industria para cuantificar la rugosidad se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro. El principio de operación de este equipo es simple: una fina punta en contacto con la superficie a analizar realiza un barrido controlado en línea recta y las variaciones de altura se convierten en señales eléctricas que se registran o grafican en un medio computacional.

Equipos específicamente diseñados están disponibles ya sea para realizar mediciones de tipo manual o automáticamente, permitiendo medir una gran cantidad de piezas en poco tiempo con alta exactitud y repetibilidad usando softwares eficientes. Una de las consecuencias de este gran adelanto tecnológico en esta área de la industria es el elevado costo de los instrumentos medidores de rugosidad, estos manejan un costo que oscila desde los 800 hasta unos miles de euros, con el agravante de que es tecnología extranjera y la manera de tenerlos es importándolos directamente.

Con el fin de reducir los costos, se realizará el diseño, construcción y caracterización de un sistema tobera-obturador, el cual consiste en un tubo neumático sometido a una presión de aire constante  $P_s$  con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya posición depende del elemento a medir, provocando una variación de presión en un volumen determinado, la cual será establecido por un sensor de presión diferencial y finalmente estos datos serán administrados por un sistema computacional, el cual arrojará información referente a la superficie medida, teniendo así, un instrumento neumático medidor de rugosidad con una alta sensibilidad (del orden de las micras) y con un presupuesto de ejecución muy favorable en compara-

ción con los instrumentos utilizados en la actualidad para estos fines.

## **1.2. Justificación**

El sistema tobera - obturador ó sistema neumático medidor de rugosidad que se pretende diseñar, construir y caracterizar en este trabajo, tiene como principal reto la disminución significativa en los costos de producción de un instrumento de este tipo y por ende hacer una reducción en los costos de adquisición del instrumento, además se pretende que el dispositivo adquiera rangos de trabajo acordes con los que manejan instrumentos de última generación los cuales presentan costos de adquisición muy elevados.

Esto con el propósito de realizar un control de calidad rápido y eficiente en piezas producidas en la industria manejando bajos costos de operación, ya que tanto en aplicaciones industriales como en la vida cotidiana, el grado de rugosidad de la superficie es importante, en ocasiones es deseable tener rugosidad alta, y en otras ocasiones esta condición es indeseable. En algunos casos se busca que la superficie del producto terminado presente un mínimo de rugosidad, ya que esto le da brillo, mejora su apariencia y disminuye la fricción de la superficie al estar en contacto con otra, reduciendo el fenómeno de desgaste y la corrosión o erosión de los materiales.

Un caso contrario en la industria, se presenta en la producción de lijas, donde la presencia de rugosidad es necesaria e indispensable, para este tipo de necesidad el control de calidad se hace en base a mantener una uniformidad o simetría en el tamaño o altura del perfil de rugosidad, esto en dependencia directa al calibre de la lija la cual se este produciendo.

## **1.3. Objetivos**

EL objetivo principal de este proyecto es llevar a cabo el diseño, construcción y caracterización de un sistema neumático para la medición de rugosidad. Para lograr este objetivo se han planteado los siguientes objetivos específicos, en primer lugar, determinar las características estáticas y dinámicas del sistema neumático, en segundo lugar, realizar una validación de los modelos matemáticos frente a los modelos experimentales usados en este tipo de sistemas de medición, en tercer lugar, determinar la exactitud en la medida del instrumento, y finalmente determinar los valores entre los cuales oscila el tamaño de las imperfecciones para los diferentes calibres de papel de lija.

## **1.4. Contribución**

Se pretende generar un gran impacto con este proyecto en el campo académico e industrial de la region, ya que se desarrollará una técnica nueva con la cual se pueden obtener datos referentes a rugosidad superficial promedio. Esta técnica tiene como ventaja, ser un método no destructivo de análisis, adicionalmente se busca reducir costos de fabricación del instrumento de medición de rugosidad, por tanto, hacer mas fácil su adquisición.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se expone la ecuación que describe el flujo de gas perfecto a través de un orificio, así como la ecuación de estado para un gas ideal en un proceso politrópico, obteniendo la presión crítica, velocidad crítica y razón de flujo máxima. Además de todo lo referente a superficies, integridad superficial, textura superficial, defectos superficiales y medición de la rugosidad superficial.

Finalmente, se presentan los tipos de rugosímetros utilizados en la actualidad junto con su principio de funcionamiento.

### 2.2. Ecuación de Estado para un Gas Ideal

En cada estado de equilibrio, un sistema cerrado posee ciertos valores de sus variables, volumen  $V$ , presión  $P$  y temperatura  $T$  constantes en todo el sistema. Sin embargo para determinar el estado del sistema bastaría con dar dos de esos tres valores, pues el tercero es función de los otros dos, la cual se define como:

$$PV = nRT \quad (2.1)$$

donde,

$n$ = Moles de gas.

$R$ = Constante universal de los gases ideales.

### 2.3. Proceso Politrópico Reversible para un gas Perfecto

Una transformación politrópica es un cambio de estado en el que varían todas las propiedades (presión, volumen, temperatura, entropía, entalpía, etc.). También en este proceso existe transmisión o transferencia de calor y para su análisis se lo considera a este proceso como internamente reversible. El proceso se relaciona mediante la ecuación:

$$PV^n = C \quad (2.2)$$

En esta ecuación  $n$  y  $C$  son constantes, si  $P_1$  y  $V_1$  son la presión y el volumen en un estado del proceso, y  $P_2$  y  $V_2$  son la presión y el volumen en otro estado del proceso [5], entonces:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k = \text{constante} \quad (2.3)$$

### 2.4. Flujo de Gas Perfecto a través de un Orificio

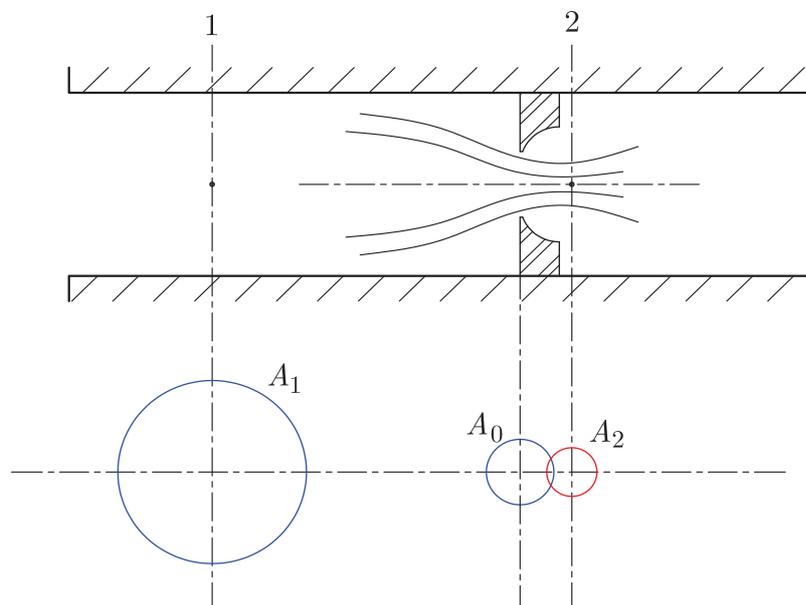


Figura 2.1: Flujo Permanente de un gas Perfecto a través de un Orificio

En primer lugar obtenemos las ecuaciones del flujo de gas a través de un orificio y se mostrara que bajo ciertas condiciones la velocidad del gas a través de este llega a ser igual a la velocidad del sonido. En segundo lugar obtendremos ecuaciones para la razón

de flujo de masa del gas que fluye a través de un orificio.

El flujo de un gas real a través de orificios y toberas puede aproximarse mediante un flujo isentrópico (adiabático y sin fricción) si los efectos de la fricción y la transferencia de calor son despreciables, el modelo matemático se deduce a partir de la ecuación de la energía en forma diferencial para flujo estable sin fricción o ecuación de euler.

Consideremos el flujo estable de un gas perfecto a través de un orificio, como se observa en la figura 2.1 Aquí la sección transversal 1 se ha tomado corriente arriba del orificio. La sección transversal en la vena contracta (donde el área del chorro emitido llega a ser mínimo) se denota como sección 2, el modelo resultante es: [6].

$$G = CA_o \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{R} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2.4)$$

donde,

$P_1$ = Presión aguas arriba.

$P_2$ = Presión aguas abajo.

$C$ =Coeficiente de descarga.

$A_o$ = Área del orificio.

$T_1$ = Temperatura.

$R$ = Constante universal de los gases.

$K$ = Exponente adiabático.

### 2.4.1. Presión Crítica, velocidad crítica y razón de flujo de gas máxima

Para valores dados de  $P_1$ ,  $\rho_1$ ,  $A_o$  y  $C$ , la razón de flujo de masa  $G$  se hace una función solamente de  $P_2$ . En la figura 2.2 se observa una curva que relaciona a  $G$  y a  $P_2$ . La razón de flujo de masa se hace máxima en el punto B. El valor particular de presión  $P_2$  que corresponde al punto B puede obtenerse como la presión  $P_2$  para la cual

$$\frac{\partial G}{\partial P_2} = 0 \quad (2.5)$$

Al denotar este valor particular de  $P_2$  como  $P_c$ , se tiene

$$\left( \frac{P_c}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{2}{k+1} \quad (2.6)$$

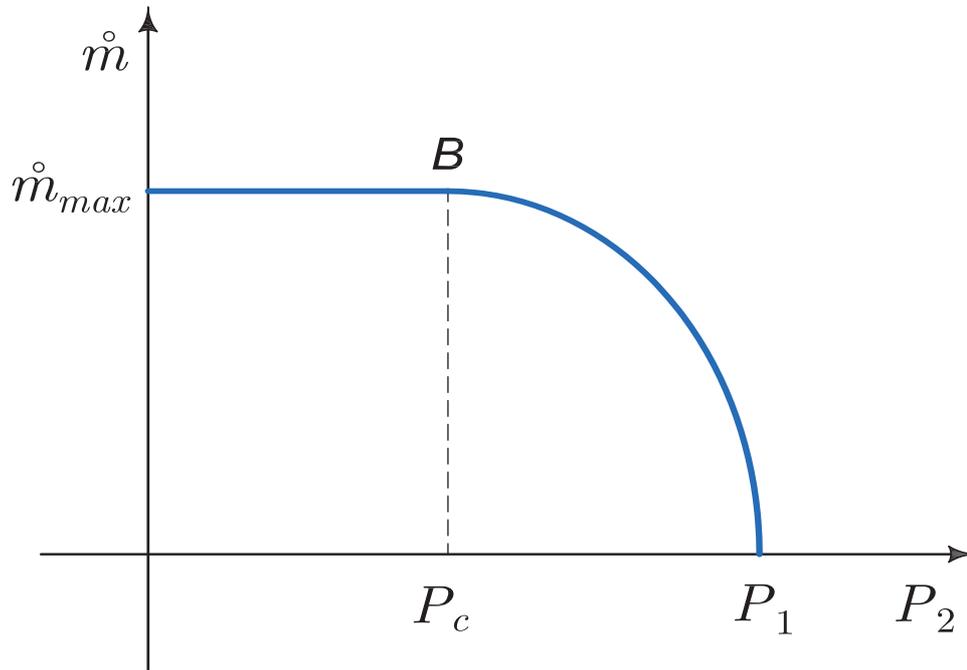


Figura 2.2: Curva de relación entre la razón de flujo de masa  $G$  y la presión  $P_2$ .

o bien

$$P_c = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_1 \quad (2.7)$$

La presión  $P_c$  dada por la ecuación 2.7 se llama presión crítica.

La razón máxima de flujo de masa  $G_{max}$  que ocurre cuando  $P_2 = P_c$  se obtiene sustituyendo  $P_2 = P_c$  en la ecuación 2.4.

$$G_{max} = CA_o \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} P_1 \rho_1} \quad (2.8)$$

#### 2.4.1.1. Velocidad crítica

De igual manera, partiendo de la ecuación de euler se puede definir la velocidad a través de un orificio como

$$V_c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[ 1 - \left( \frac{P_c}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

al sustituir la ecuación 2.7 en la anterior ecuación se llega a la ecuación de velocidad crítica

$$V_c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left(1 - \frac{2}{k+1}\right)}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_1}{\rho_1}} \quad (2.9)$$

Teniendo en cuenta que para el cambio de estado isentrópico

$$\frac{P_1}{\rho_1^k} = \frac{P_c}{\rho_c^k} \quad (2.10)$$

De la ecuación 2.7 se tiene

$$P_1 = P_c \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{-k}{k-1}} \quad (2.11)$$

y así, usando las ecuaciones 2.10 y 2.11, se encuentra que,

$$\frac{P_1^k}{\rho_1^k} = \frac{P_1}{\rho_1^k} P_1^{k-1} = \frac{P_c}{\rho_c^k} P_c^{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-k} = \frac{P_c^k}{\rho_c^k} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-k} \quad (2.12)$$

o bien

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-1} \frac{P_c}{\rho_c} \quad (2.13)$$

Al sustituir esta última ecuación en la ecuación 2.9, la velocidad crítica  $V_c$  se da como

$$V_c = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-1} \frac{P_c}{\rho_c}} = \sqrt{k \frac{P_c}{\rho_c}} = \sqrt{kRT_c} \quad (2.14)$$

Nótese que  $c = \sqrt{kRT}$  es la velocidad del sonido. Por lo tanto, la velocidad  $w_c$  es igual a la velocidad del sonido [6].

## 2.5. Fundamento Sobre Superficies Rugosas

Una superficie es un objeto tal como una parte manufacturada. El diseñador especifica las dimensiones de la pieza, relacionando las distintas superficies una con la otra. Estas superficies nominales representan el contorno relacionado con la superficie de la pieza,

y están definidas por las líneas en el plano de Ingeniería. Las superficies nominales aparecen como líneas absolutamente rectas, círculos ideales, agujeros redondos, otras aristas y superficies que son perfectas en su geometría. Las superficies reales de una pieza manufacturada están determinadas por el proceso utilizado para fabricarla. La variedad de procesos disponibles en la manufactura da como resultado variaciones amplias de las características de la superficie [7].

### 2.5.1. Integridad Superficial

La integridad superficial describe no sólo los rasgos topológicos (geométricos) de las superficies y sus propiedades físicas y químicas, sino también sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. Este concepto se define como un factor que debe considerarse en las operaciones de manufactura, debido a que influye en muchas propiedades como resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y vida útil.

Una característica relevante que se debe tener en cuenta durante la manufactura de componentes, es que diversos defectos superficiales pueden ser responsables de que la integridad superficial sea inapropiada [4].

### 2.5.2. Textura Superficial

La textura de la superficie consiste en desviaciones repetitivas y aleatorias con respecto a la superficie nominal de un objeto, se define por cuatro elementos: rugosidad, ondulación, orientación y fallas [7]. Estas se ilustran en la figura 2.3 .

- **Rugosidad:**

se refiere a desviaciones pequeñas con respecto a la superficie nominal finamente espaciadas que vienen determinadas por las características del material y los procesos que formaron la superficie [7].

- **Perfil Ondulado:**

es una desviación recurrente de una superficie plana, en forma muy parecida a las ondas en la superficie del agua. Se mide y se describe en términos del espacio entre crestas adyacentes de las ondas (ancho de la ondulación) y la altura entre crestas y valles de dichas ondas (altura de la ondulación).

Ocurre debido a la deflexión del material de trabajo, vibración, tratamiento térmico y factores similares. La rugosidad se sobrepone a la ondulación [7].

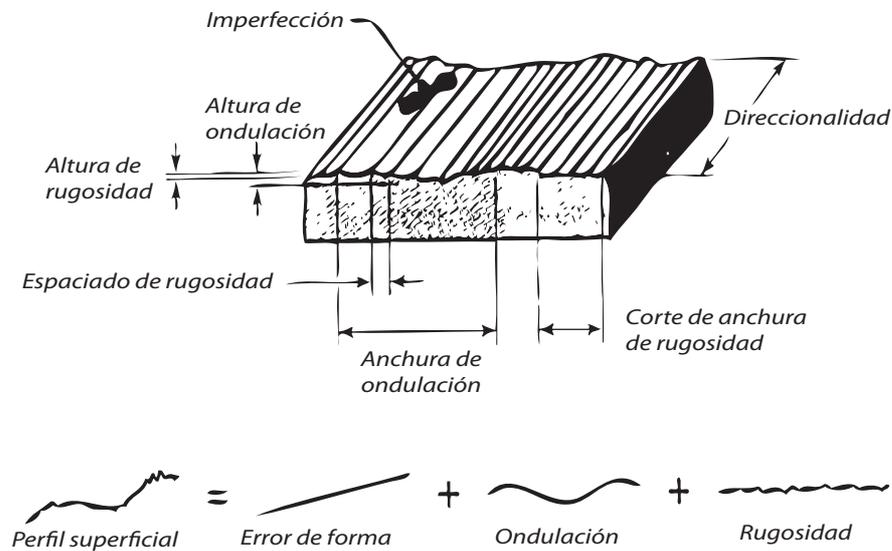


Figura 2.3: Terminología y Símbolos Normalizados Para Describir Acabado Superficial

■ **Orientación o Direccionalidad:**

es la dirección predominante o patrón de la textura superficial y está determinada por los métodos de manufactura usados para crear la superficie, generalmente debida a la acción de las herramientas de corte. La figura 2.4 presenta la mayoría de las posibles orientaciones que puede tomar una superficie y comprenden grietas, rayas, inclusiones y defectos similares en la superficie. Aunque algunas de las grietas se relacionan con la textura de la superficie, afectan también su integridad [7].

■ **Fallas o Defectos:**

son irregularidades aleatorias como rayaduras, grietas, agujeros, depresiones, costuras, rasgaduras o inclusiones [7].

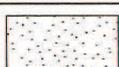
Símbolo de la orientación	Patrón de la superficie	Descripción
=		La orientación es paralela a las líneas que representan a la superficie a que se aplica el símbolo.
⊥		La orientación es perpendicular a la línea que representa la superficie a que el símbolo se aplica.
X		La orientación es angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.
M		La orientación es multidireccional.
C		La orientación es circular en relación con el centro de la superficie para la que se utiliza el símbolo.
R		La orientación es aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie para la que se emplea el símbolo.
P		La orientación es particular, no direccional o protuberante.

Figura 2.4: Orientaciones Posibles de una Superficie

### 2.5.3. Defectos Superficiales

Hay varios defectos causados por la manufactura del componente, que pueden ser responsables de una integridad superficial inadecuada. Estos factores como:

- Defectos en la materia prima.
- Método de producción de la superficie.
- Falta de control adecuado de los parámetros del proceso.

A continuación se presentan las definiciones generales de los defectos Superficiales que se encuentran en la práctica:

- **Ataque Intergranular:**  
es el debilitamiento de los límites de los granos debido a la fragilización y corrosión líquido - metal [4].
- **Cráteres:**  
son depresiones profundas en el material [4].

- **Deformación plástica:**  
deformación superficial severa causada por grandes esfuerzos Debidos a la fricción, geometría de herramientas y matrices, herramientas Desafiladas y por el método de procesamiento [4].
- **Esfuerzos residuales:**  
tensión o compresión sobre la superficie, causados por deformación no uniforme y distribución no uniforme de la temperatura [4].
- **Grietas:**  
separaciones externas o internas con contornos agudos [4].
- **Inclusiones:**  
elementos o compuestos pequeños no metálicos en la superficie [4].
- **Picaduras:**  
depresiones superficiales poco profundas, por lo general resultado de ataque químico o físico [4].
- **Transformación metalúrgica:**  
implican cambios microestructurales causados por los ciclos de temperatura, estos cambios pueden consistir en transformaciones de fase, recristalización. Agotamiento de aleación, descarburación y material fundido y resolidificado o redepositado, como en el maquinado por descarga eléctrica [4].
- **Traslapes, pliegues y costuras:**  
son defectos superficiales resultantes del solapamiento de material durante el proceso [4].
- **Zona afectada por el calor:**  
es la parte de un metal que se somete a ciclos térmicos sin fundirse [4].

#### 2.5.4. Medición de la Rugosidad Superficial

Hay varios instrumentos comerciales disponibles, llamados rugosímetros superficiales, para medir y registrar la rugosidad superficial. Los que se usan con más frecuencia tienen un estilite de diamante que se mueve sobre la superficie siguiendo una línea recta, figura 2.5 [4].

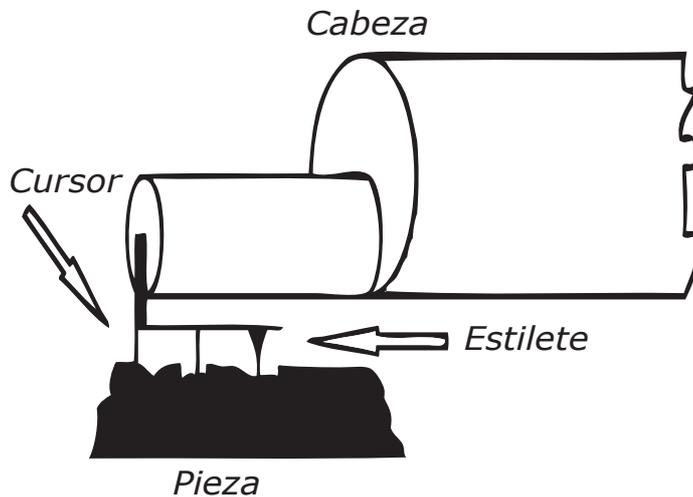


Figura 2.5: Medición de la Rugosidad Superficial con Estilete

## 2.6. Tipos de Rugosímetros

### 2.6.1. Rugosímetro con Patín Mecánico

El patín describe las ondulaciones de la superficie mientras la aguja recorre los picos y valles del perfil. Así se separa mecánicamente ondulación y rugosidad que son simplemente desviaciones respecto de la superficie geométrica con distinta longitud de onda, dicho patín mecánico se presenta en la figura 2.6 [8].



Figura 2.6: Patín mecánico

### 2.6.2. Rugosímetro con Palpador Inductivo

El desplazamiento de la aguja al describir las irregularidades del perfil modifica la reluctancia de un camino de flujo magnético que se traduce en un cambio de voltaje en la salida, en la figura 2.7 se observa la descripción de este rugosímetro [8].

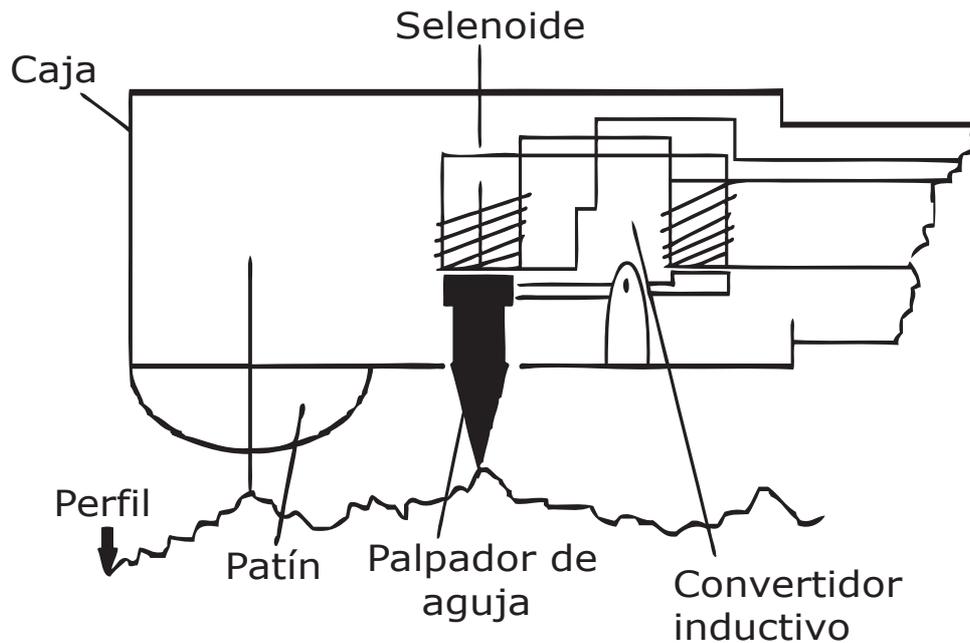


Figura 2.7: Rugosímetro con Palpador Inductivo

### 2.6.3. Rugosímetros con Palpador Capacitivo

El desplazamiento vertical del palpador aproxima las dos láminas de un condensador, modificando su capacitancia y con ella la señal eléctrica, en la figura 2.8 se observa la descripción de este rugosímetro. [8].

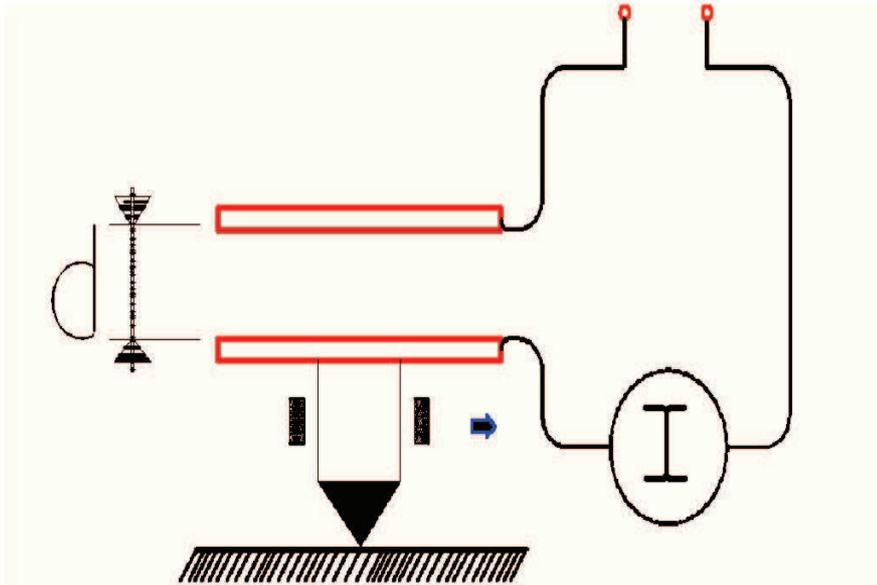


Figura 2.8: Rugosímetro con Palpador Capacitivo

#### 2.6.4. Rugosímetro con Palpador Piezoeléctrico

El desplazamiento de la aguja del palpador deforma elásticamente un material piezoeléctrico, que responde a dicha deformación generando una señal eléctrica, en la figura 2.9 se observa la descripción de este rugosímetro. [8].

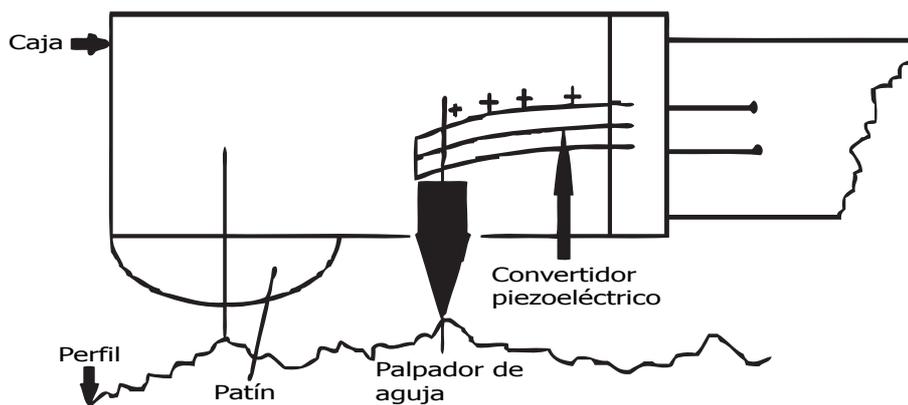


Figura 2.9: Rugosímetro con Palpador Piezoeléctrico

## 2.6.5. Rugosímetro con Láser

Cuenta con un palpador sin contacto, es decir un láser, los cuales analizan la superficie mediante un análisis que se basa en cambios del enfoque de la luz monocromática que corresponde a diferencias de altura en la superficie, en la figura 2.10 se observa la descripción de este rugosímetro.



(a) Sensor laser



(b) Rugosímetro con laser

Figura 2.10: Rugosímetro laser de schmitt industries, Inc.

# Capítulo 3

## Sistema de Medición Tobera-Aleta

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se explica todo lo relacionado con el sistema de medición tobera-aleta, desde un sistema neumático básico, el cual consta de una estación de generación y preparación del aire comprimido formado por un compresor de aire, un depósito, un sistema de preparación de aire dentro del cual se encuentra un filtro, regulador de presión y lubricador, aunque este último no fue utilizado en este sistema. Por otra parte, los sistemas neumáticos se complementan con los eléctricos y los electrónicos lo que les permite tener un alto grado de sofisticación y flexibilidad Utilizando válvulas solenoide, señales de alimentación de interruptores magnéticos, sensores e interruptores eléctricos de final de carrera [1].

Finalmente se muestra la interfaz utilizada para la adquisición de datos, junto con el esquemático del circuito utilizado para dicha adquisición, pasando por el proceso de preparación de las muestras y el proceso de medición.

### 3.2. Descripción del Sistema de Medición

#### 3.2.1. Generación y abastecimiento de aire comprimido

La planta de abastecimiento de aire comprimido para un sistema neumático, debe tener la capacidad apropiada y además, el aire comprimido debe tener la calidad necesaria. Para este tipo de plantas existen dos tipos básicos de compresores:

- **Compresores de desplazamiento positivo:**  
trabajan basados sobre el principio de incrementar la presión de un volumen defini-

do de aire al reducir ese volumen en una cámara cerrada [9].

- **Compresor dinámico o turbocompresor:**

Emplea paletas rotatorias o impulsores para impartir velocidad y presión al flujo de aire que se está manejando. La presión proviene de los efectos dinámicos, como la fuerza centrífuga [9].

El aire es comprimido y guiado hacia el sistema de distribución de aire. Para tener la seguridad que el aire tiene la calidad requerida, se recurre a una unidad de mantenimiento. Esto con el fin de evitar que surjan problemas en el sistema.

### 3.2.2. Compresor de aire

Un compresor es una máquina que eleva la presión de un gas, un vapor o una mezcla de gases y vapores. La presión del fluido se eleva reduciendo el volumen específico del mismo durante su paso a través del compresor. Este es capaz de elevar la presión del gas que maneja [10].

En la industria las funciones de los compresores son:

- Alimentar la red de aire comprimido para instrumentos.
- Proveer de aire para la combustión.
- Recircular gas a un proceso o sistema.
- Producir condiciones idóneas para que se produzca una reacción química.

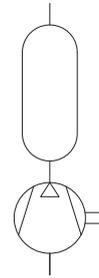
Para el presente trabajo se empleó un compresor genérico el cual se encuentra en la figura 3.1, con las características descritas en el cuadro 3.1:

Cuadro 3.1: Características de regulador de presión genérico

Potencia	2.5 Hp
Litros	25 L
Potencia Eléctrica	1.5 Kwatt
Velocidad Angular	3340 rpm
Desplazamiento de aire	110 lb/min
Presión Nominal	0.8 MPa
Voltaje	110 V



(a) Compresor de aire genérico de 2.5 Hp



(b) Sim-  
bología  
neumática

Figura 3.1: Compresor de aire utilizado y simbología

### 3.2.3. Acondicionamiento de Aire Comprimido

El aire que se succiona en un compresor de aire no está del todo limpio, la presencia de contaminantes puede tener un efecto intensamente dañino sobre las superficies correlativas, finamente acabadas de los componentes neumáticos. También debe estabilizarse por completo la presión de sistema y, si es necesario, el aire debe lubricarse, antes de alimentarlo. Esto se logra por una unidad de mantenimiento FRL, como se aprecia en la figura 3.2. La condensación de agua es otro problema molesto en un sistema neumático. El aire que sale del compresor debe secarse por diversos medios. De donde, los tres elementos principales de una unidad FRL [9], son:

- Filtro de aire
- Regulador de presión
- Lubricador

#### 3.2.3.1. Filtro de Aire

El filtro para aire comprimido tiene la función de eliminar impurezas y condensado de aire a presión que pasa por él. El aire comprimido fluye hacia el vaso del filtro, donde se produce la separación de las partículas de líquido y de suciedad mediante fuerza centrífuga. Las partículas de suciedad se depositan en el fondo del vaso. El condensado tiene que ser evacuado antes de que llegue al nivel máximo, ya que de lo contrario sería alimentado otra vez al flujo de aire [11].

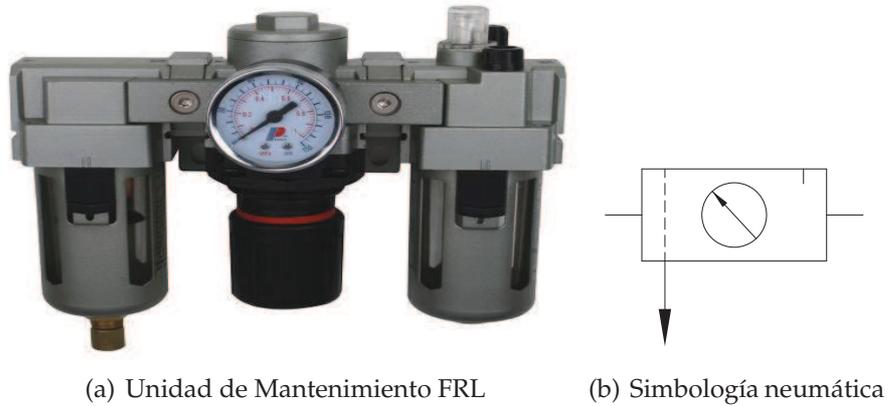


Figura 3.2: Unidad de Mantenimiento FRL y simbología

### 3.2.3.2. Regulador de Presión

El regulador tiene la función de mantener constante la presión de servicio (presión secundaria), independientemente de las oscilaciones que se produzcan en la presión de potencia (presión primaria) y del consumo de aire [11], para este proyecto se utilizó el regulador mostrado en la figura 3.3.

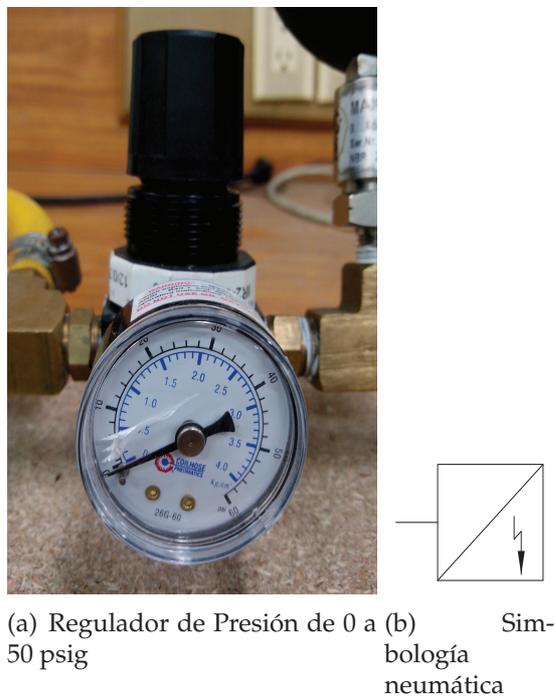


Figura 3.3: Regulador de presión y simbología

### **3.2.4. Tubería**

Debe implementarse un sistema de tubería para el aire comprimido, desde la planta de compresores hasta el punto de consumo de la energía neumática en las diversas secciones de la planta en donde se va a introducir dispositivos y sistemas neumáticos [9].

### **3.2.5. Válvulas de control**

Se usan diversos tipos de válvulas de control para regular, controlar y monitorear la energía neumática, con el fin de controlar la dirección, la presión, el flujo, etc [9].

### **3.2.6. Actuador neumático**

Se utilizan diversos tipos de cilindros y motores neumáticos para realizar el trabajo útil para el cual se diseña el sistema neumático, como usar cilindros para el movimiento lineal de plantillas, artefactos, alimentación de materias primas, etc [9].

### **3.2.7. Aparatos auxiliares**

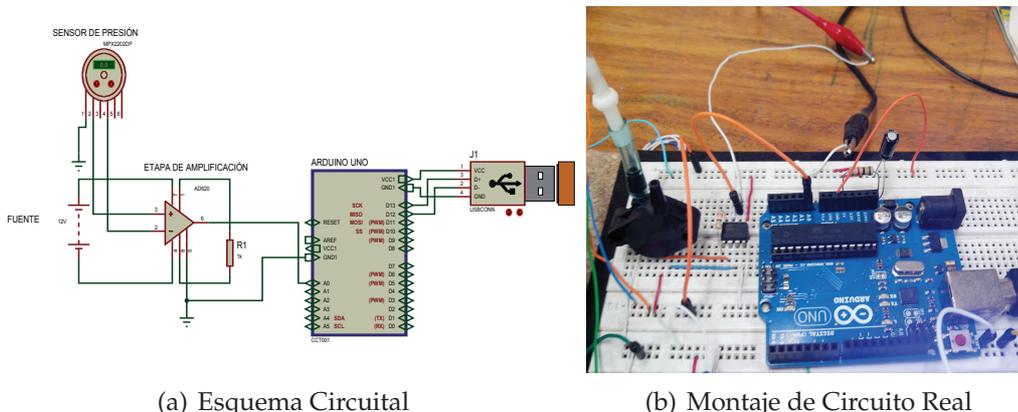
Es posible que deban usar diferentes tipos de equipo auxiliar en el sistema neumático, con el fin de lograr un mejor rendimiento, facilitar el control y obtener una mayor confiabilidad [9].

## **3.3. Interfaz Utilizada para la Adquisición de Datos**

Para la adquisición de datos del sistema tobera obturador, fue necesario el uso de una interfaz mediante labview, la cual consta de dos pantallas donde en una de ellas se muestra el perfil obtenido al barrer la muestra, la otra muestra esta misma señal después de pasar por una etapa de filtrado. así mismo, la interfaz consta de un comando para manejar el motor de corriente continua, dando la posibilidad de controlar velocidad y sentido de giro, la cual se observa en el anexo A en la figura ??.

### **3.3.1. Circuito para la Adquisición de Datos**

Para registrar las variaciones de presión presentes en el volumen de control, se utilizó el circuito mostrado en la figura 3.4 y se presentan los cuadros 3.2, 3.3 y 3.4 con las características de los elementos electrónicos utilizados en el montaje para la adquisición de datos:



(a) Esquema Circuitual

(b) Montaje de Circuito Real

Figura 3.4: Circuito para la Adquisición de Datos

Cuadro 3.2: Características de Sensor Diferencial de Presión MPX2202DP Disponibles para configuraciones de medida en modo absoluto y diferencial
Rango de presión en modo diferencial de 0 a 200 KPa
Compensación de temperatura por encima de 0°C a +85°C
Tensión de salida directamente proporcional a la presión aplicada

Cuadro 3.3: Características Amplificador Diferencial AD620

Ganancia ajustable con una resistencia externa
Ganancia entre 1 y 10.000
Fuente de alimentación de rango $\pm 2.3V$ a $\pm 18V$
Bajo nivel de ruido
15 ms de tiempo de establecimiento

Cuadro 3.4: Características Arduino Uno

Microcontrolador ATmega328
Tensión de funcionamiento 5V
Voltaje de entrada 7 – 12V
Memoria Flash 32 KB
Velocidad de reloj 16 MHz
SRAM de 2 KB
EEPROM de 1 KB

### 3.4. Sensores de Presión

Los sensores de presión son elementos que producen o modifican una señal eléctrica en función de la presión a la que se hallen sometidos [12].

### 3.4.1. Sensor de Presión de Silicio

La serie de dispositivos MPX2202 son piezoresistencias de silicio sensibles a la presión que proporciona una variación de tensión exacta y lineal directamente proporcional a la presión que se le aplica. El sensor consta, de un diafragma monolítico de silicio para la mitad del esfuerzo y una fina película en una red de resistencias integradas en un chip, el sensor utilizado se observa en la figura 3.5. Características del sensor utilizado en la realización del proyecto:

- Rango de presión de 0 a 29 psi (0 a 200 KPa).
- Compensación de temperatura por encima de 0°C a +85°C.
- Disponible para configuraciones de medida en modo absoluto y diferencial.
- La tensión de salida diferencial es directamente proporcional al diferencial de la presión aplicada.



Figura 3.5: sensor de presión diferencial MPX2202DP

## 3.5. Construcción del Elemento de Medición

Para la construcción del sistema neumático para la medición de rugosidad, se emplearon los siguientes materiales y equipos, los cuales, se encuentran en el cuadro 3.5:

Cuadro 3.5: Costo de Materiales para la Construcción (en pesos)

Dispositivo	costo
Aluminio	18.000
Soldadura liquida	6.000
Acoples neumáticos	12.000
Mangueras	4.000
Cinta de teflón	5.000
Brocas	15.000
Regulador de presión de 0 a 50 psig	75.000
Tarjeta de programación Arduino uno	77.000
Fuente de alimentación	22.000
Sensor de presión diferencial MPX2202DP	53.100
Amplificador diferencial AD620	10.000
Total	297.100

En primer lugar, se realizó el maquinado de las piezas, partiendo de una barra de aluminio de una pulgada de diámetro, para esto se utilizó un torno de banco, el cual, como su nombre lo indica, se coloca en un banco de trabajo o mesa. su potencia es baja, por lo general cuentan con avance manual y se utilizan para maquinar pequeñas piezas de trabajo [4]. El diseño de la tobera cuenta de tres componentes o piezas, la primera es un cilindro hueco el cual determina el volumen de control del dispositivo neumático, además de esto, cuenta con un orificio cuyas paredes internas presentan un proceso de machueado el cual se utiliza para la alimentación neumática del sensor diferencial de presión. Dicha pieza, se fabricó mediante un torneado recto, en donde la remoción de material se realiza por el movimiento de la velocidad en la operación, pero la forma de la pieza se determina por el movimiento de avance. La trayectoria de avance puede involucrar variaciones en la profundidad o ancho de corte [7]. En la figura 3.6 se presenta la pieza finalmente maquinada.

En segundo lugar, se construyó una segunda pieza que presenta una forma cónica, la cual se realizó mediante un proceso de torneado ahusado o cónico. En este, en lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación de la pieza, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica [4]. A su vez, esta pieza se perforó mediante una punta sencilla o broca, la cual avanza en línea paralela al eje de rotación, con un diámetro de 1/32 de pulgada. este orificio representa la salida del flujo de aire presente en el volumen de control. En la figura 3.7 se observa la pieza cónica.



Figura 3.6: Volumen de control



(a) Tobera vista desde arriba

(b) Tobera vista lateral

Figura 3.7: Pieza cónica maquinada.

Para concluir la etapa de construcción, se realizó el maquinado de una tercera pieza, la cual tiene una forma cilíndrica como resultado de un torneado recto, es importante resaltar que dicha pieza presenta un orificio de  $1/64$  de pulgada en su eje de rotación. El cual es la restricción de suministro fija descrito en el sistema tobera obturador. En la figura 3.8 se presenta la pieza finalmente maquinada.



(a) Pieza con restricción fija vista desde arriba



(b) Pieza con restricción fija vista lateral

Figura 3.8: Pieza de restricción de suministro fija.

Finalmente se presenta el montaje del sistema tobera-obturador el cual se observa en la figura 3.9, y el esquema neumático completo del sistema anteriormente mencionado, ilustrado en la figura 3.10.



Figura 3.9: Sistema Tobera Obturador Real

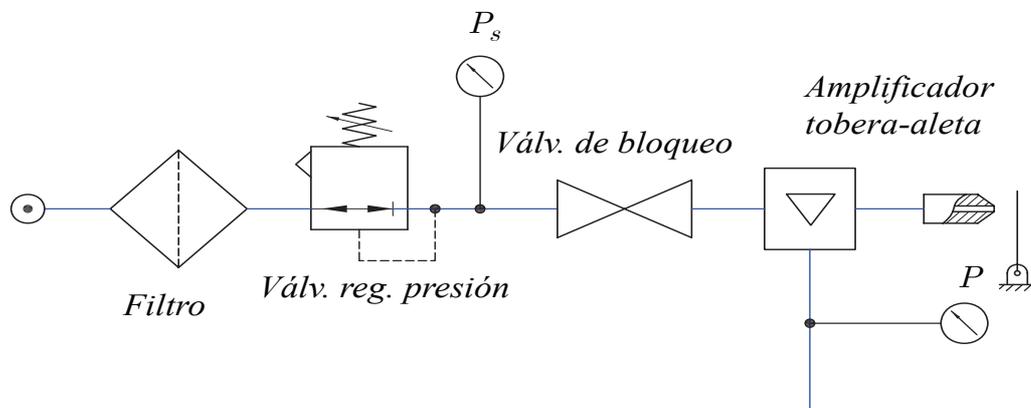


Figura 3.10: Simbología neumática sistema tobera-aleta

Del presente capítulo, cabe resaltar que en la fabricación de la tobera se debió garantizar que la broca avanzara en línea paralela al eje de rotación, ya que un cambio en el diámetro de los orificios afecta directamente la sensibilidad del sistema neumático para la medición de rugosidad, por otra parte, es importante tener en cuenta que al momento de ensamblar el sistema de medición las uniones entre las piezas no deben presentar fugas con el fin de evitar caídas de presión.

## Capítulo 4

### Modelo Matemático

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

El sistema tobera obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante  $P_s$ , con una reducción en su salida en forma de tobera la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador, cuya posición depende del elemento de medida [13]. En la figura 4.1 se observa dicho sistema.

Se suministra fluido, a una presión regulada, a una restricción de flujo fija y a una restricción de flujo variable conectadas en serie. La restricción de flujo variable es variada moviendo el obturador para cambiar la distancia  $x_i$ . Esto provoca un cambio en la presión de salida  $P$ , la cual, con un intervalo de movimiento limitado es casi proporcional a  $x_i$  y extremadamente sensible a él. Por lo tanto, un dispositivo medidor de presión conectado a  $P$  puede ser calibrado para medir  $x_i$ . En condiciones ideales (cámaras presurizadas rígidas que contienen un líquido incompresible), un cambio repentino de  $x_i$  provoca un cambio instantáneo de  $P$ . En realidad, la dinámica es casi igual a la de un sistema lineal de primer orden con pequeños cambios de  $x_i$ .

Basado en la ecuación que describe el flujo de gas perfecto a través de un orificio presente en el capítulo 2, se analiza el sistema de la figura 4.1 para el caso de un medio gaseoso puesto que la mayoría de las aplicaciones prácticas utilizan aire a baja presión (de 20 a 30 psi) como fluido de trabajo. El principio de conservación de la masa es aplicado al volumen  $V$  estableciendo que durante un intervalo de tiempo  $dt$  la diferencia entre la masa que entra y la que sale debe aparecer como un almacenamiento de masa adicional en  $V$  [14].

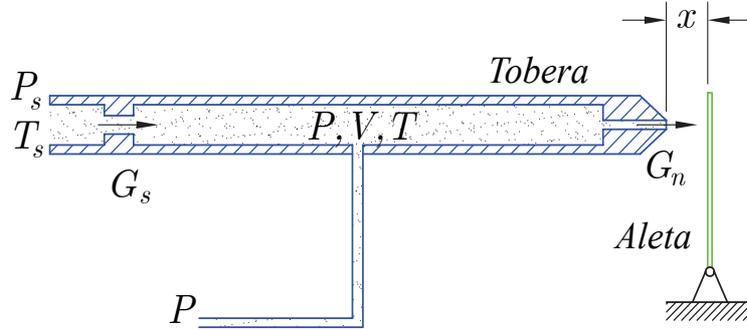


Figura 4.1: Sistema Tobera Obturador

El almacenamiento de masa en el volumen  $V$  puede ser tratado por medio de la ley del gas perfecto  $PV = MRT$ . Se supone que  $VRT$  son constantes. Entonces:

$$P = \frac{R_u T M}{V} \quad (4.1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dM}{dt} \quad (4.2)$$

Por la conservación de la masa durante un intervalo de tiempo  $dt$ .

Masa de entrada - Masa de salida = Masa adicional guardada

$$G_s - G_n = \frac{V}{RT} \frac{dp}{dt} \quad (4.3)$$

despejando  $\frac{dp}{dt}$  se tiene:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} (G_s - G_n) \quad (4.4)$$

La condición de presión a través del orificio  $G_s$  cumple la siguiente condición:

$$G_s = \begin{cases} C_d \pi \frac{D^2}{4} \frac{P_s}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \text{si } P \leq 0.528 P_s, \text{ Flujo Sonico} \\ C_d \pi \frac{D^2}{4} \frac{P_s}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R} \left[ \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & \text{si } P > 0.528 P_s, \text{ Flujo Subsonico} \end{cases}$$

De igual manera para  $G_n$  se cumple la siguiente condición:

$$G_n = \begin{cases} C_d \pi d x \frac{P}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \text{si } P \leq 0.528P_s \\ C_d \pi d x \frac{P}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R} \left[ \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & \text{si } P > 0.528P_s \end{cases}$$

Para el diseño del sistema tobera obturador se trabajó con los siguientes parámetros :

$C_d$  = Coeficiente de descarga, se obtuvo experimentalmente.

$D$  = Diámetro de restricción de suministro fija.

$R$  = Constante universal de los gases ideales (solo aire).

$T$  = Temperatura ambiente.

$k$  = Exponente adiabático.

$P_s$  = Presión de suministro.

$P$  = Presión en el volumen de control.

$P_0$  = Presión atmosférica.

$d$  = Diámetro de restricción variable.

$x$  = Distancia entre el obturador y la restricción de flujo variable.

# Capítulo 5

## Caracterización del Sistema de Medición

### 5.1. Introducción

En el presente capítulo, se exponen las caracterizaciones realizadas al sistema tobera obturador. Todo esto, con el fin de validar el modelo teórico con los datos obtenidos del comportamiento real del instrumento. Por tanto, se obtuvo de manera experimental el coeficiente de descarga, al cual se le realizó una validación mediante métodos numéricos, y con ello, la ecuación que describe su comportamiento conforme varía la distancia del obturador, además se obtuvo el flujo de masa de los orificios  $G_s$  y  $G_n$  con el fin de obtener una estimación con el modelo teórico. Finalmente se realizaron pruebas dinámicas del instrumento de medición frente a una entrada de tipo rampa-escalonada.

### 5.2. Caracterización Estática

Las características estáticas de un instrumento son aquellas que exhibe el instrumento en estado estacionario, es decir, cuando la variable medida se ha estabilizado en un valor y permanece invariante en el tiempo [15].

### 5.3. Función Desplazamiento, Presión.

Esta característica se determina experimentalmente mediante la figura 5.1, donde el desplazamiento se controla mediante un tornillo micrométrico, mostrado en la figura 5.2, se partió de una posición inicial en el tornillo micrométrico de  $0.27mm$  con respecto a la tobera, a una presión de  $5030Pa$  en dicha posición. Seguidamente se llevó el tornillo micrométrico hasta que la tobera estuviese totalmente cerrada, variando  $0.01mm$  alcanzando una presión de  $142.700Pa$ , la cual es equivalente a la presión de suministro. A continuación se presenta la curva típica obtenida para la prueba en mención.

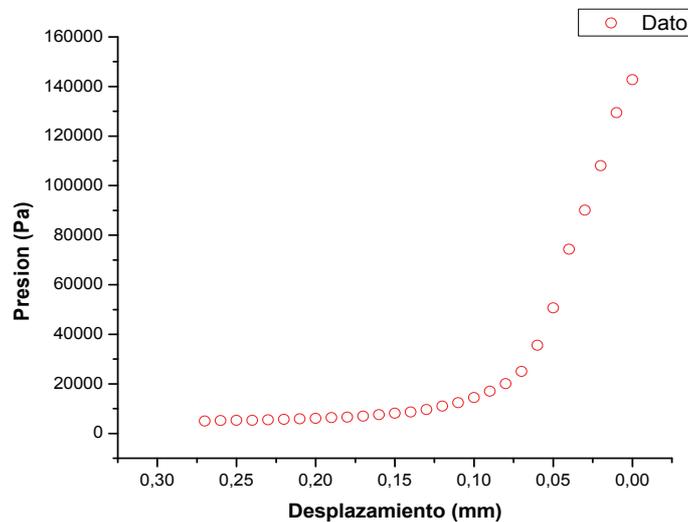


Figura 5.1: Curva Típica Desplazamiento vs Presión.

De la anterior figura se puede inferir que el instrumento neumático presenta un comportamiento lineal entre  $0.0015mm$  y  $0.063mm$ , con una variación de presión de  $142.700Pa$  a  $31554Pa$  respectivamente, la sensibilidad que presenta el instrumento en dicha región es de  $1.805 * 10^6 Pa/mm$ .

### 5.4. Coeficiente de Descarga

El coeficiente de descarga  $c_d$  se define como la relación entre el caudal real y el caudal teórico y es un parámetro adimensional. De esta forma, el coeficiente de descarga sirve como factor de corrección de caudal medido para tomar en cuenta las pérdidas de energía presentes [16]. En la figura 5.3 se presenta el montaje experimental utilizado para la obtención del coeficiente de descarga.



Figura 5.2: Montaje Experimental Tornillo Micrométrico

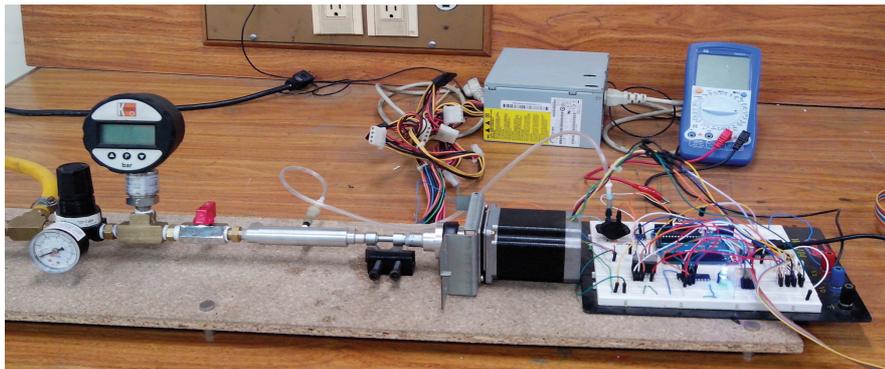
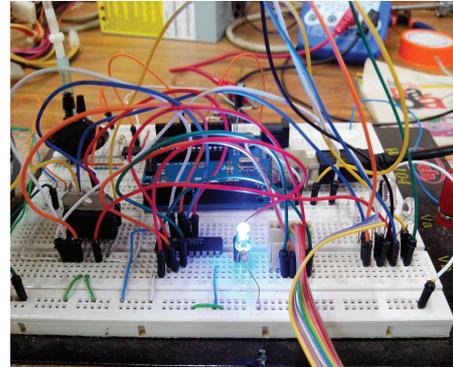
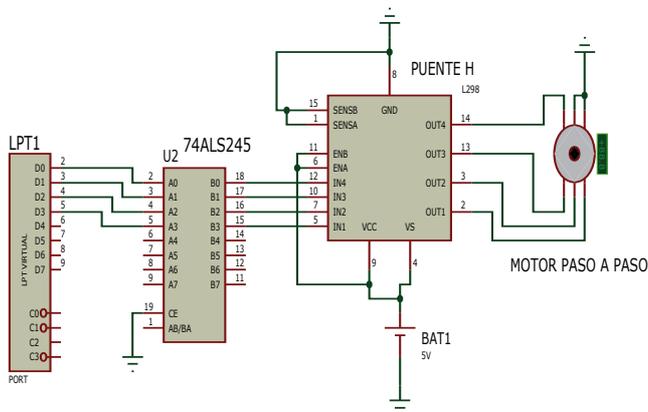


Figura 5.3: Montaje Experimental

Para la obtención del coeficiente de descarga  $c_d$  se realizaron pruebas, las cuales, consistieron en primera instancia, en llenar el volumen de control a la presión de suministro y garantizando que el orificio de restricción variable se encontrara cerrado, en segunda instancia, se cortó la alimentación de presión al volumen de control y simultáneamente se abrió el obturador a diferentes distancias mediante un motor paso a paso bipolar el cual es controlado mediante labview versión estudiantil, el diagrama circuital y el montaje experimental para el control del motor paso a paso se encuentran en la figura 5.4, las distancias se encuentran en un rango de  $0.005\text{mm}$  hasta  $0.04\text{mm}$  incrementando cada desplazamiento en  $0.005\text{mm}$ . En la figura 5.5 se observan las curvas obtenidas para las pruebas anteriormente mencionadas.



(a) Diagrama Circuital controlador motor paso a paso

(b) Montaje Circuital Real

Figura 5.4: Controlador Motor Paso a Paso.

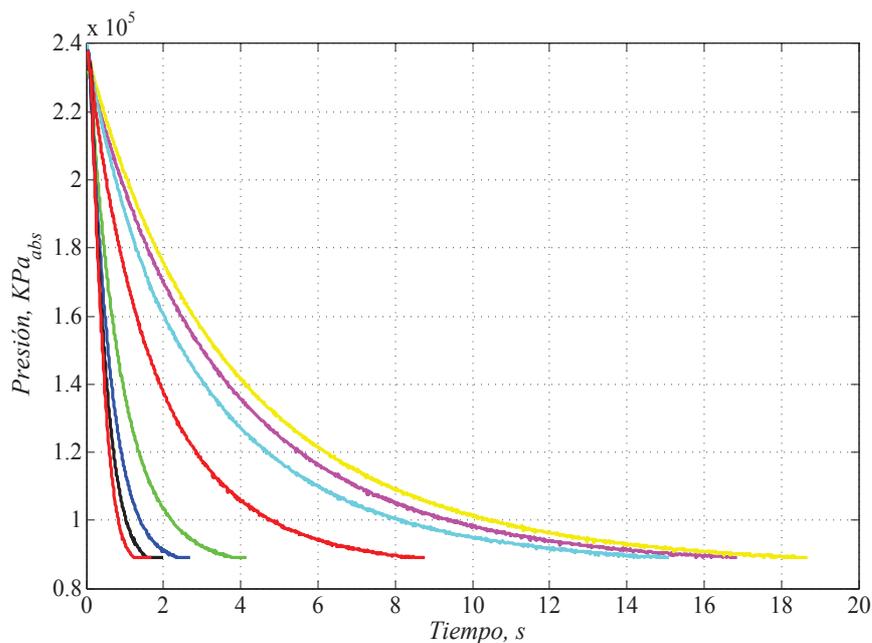


Figura 5.5: Tiempo de descarga para diferentes valores de distancia.

Con las curvas obtenidas, se realizó la validación del coeficiente de descarga  $c_d$  con el modelo teórico mediante un ajuste de mínimos cuadrados, arrojando así, un valor de  $c_d$  para cada desplazamiento. En la figura 5.6 se muestra la validación del coeficiente de descarga para una distancia de  $0.02\text{mm}$  y en el cuadro 5.1, se presentan los coeficientes de descarga hallados dentro del rango de distancias anteriormente mencionado y su error correspondiente.

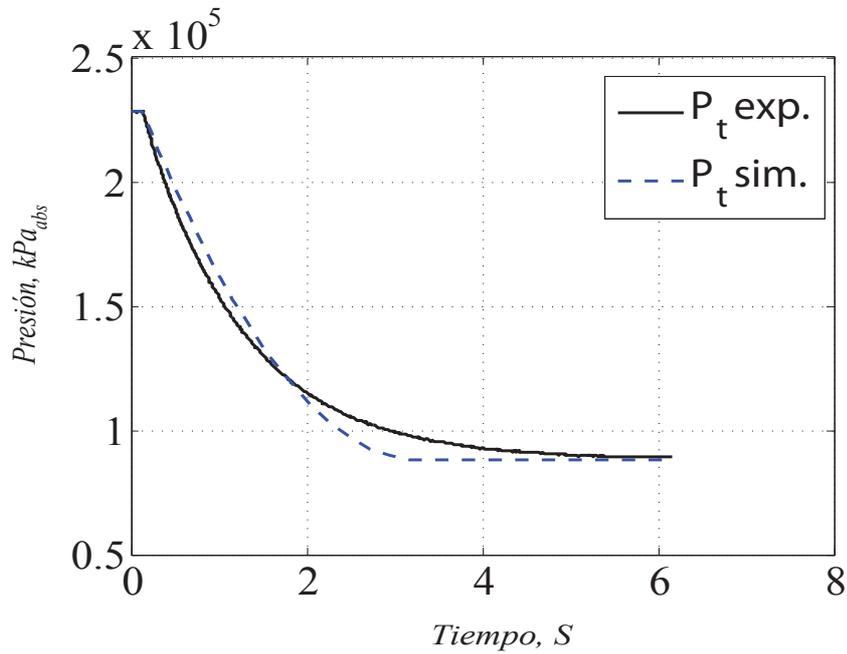


Figura 5.6: Validación de coeficiente de descarga para un desplazamiento de 0.02 mm

Cuadro 5.1: Coeficientes de descarga para diferentes distancias.

Distancia mm	$c_d$	Error kPa
0.005	0.2991	7.4844
0.01	0.1631	7.6361
0.015	0.1390	8.8264
0.02	0.1709	6.4989
0.025	0.2821	6.6442
0.03	0.3653	5.3000
0.035	0.4290	4.7329
0.04	0.4316	2.5697

Finalmente se graficó el comportamiento del coeficiente de descarga  $c_d$  con respecto a las diferentes distancias de las pruebas realizadas. De la figura 5.7 se puede inferir que  $c_d$  presenta un comportamiento de una función cubica, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$c_d = -24097x^3 + 2204x^2 - 50.526x + 0.48935 \quad (5.1)$$

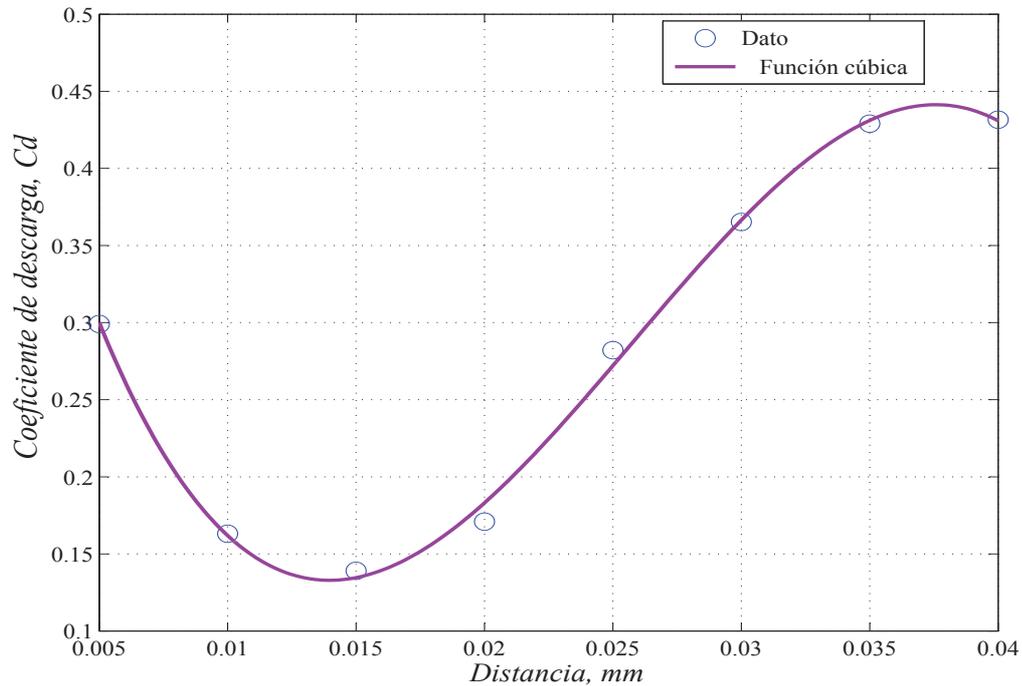


Figura 5.7: Curva de  $c_d$  con respecto a x

## 5.5. Flujo de Masa

Se realizaron pruebas para la obtención del flujo masa para presurización, correspondiente a la restricción de suministro fija con un orificio de 1/64 de pulgada, de igual manera, se efectuaron pruebas con el fin de obtener el flujo de masa cuando el volumen de control se despresuriza a través de la restricción de flujo variable con un diámetro de 1/32 de pulgada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de las caracterizaciones del sistema neumático para la medición de rugosidad. Las cuales, se realizaron de manera experimental.

### 5.5.1. Flujo de Masa de Suministro, $G_s$

Las pruebas realizadas consistieron en cerrar el obturador con el volumen de control a la presión atmosférica, posteriormente, se abre la válvula de bloqueo permitiendo así que el volumen de control alcance una presión próxima a la presión de suministro, la cual es de  $239.2\text{kPa}$  absolutos, para esto se utilizó el montaje experimental expuesto en la figura 5.8.



Figura 5.8: Montaje Experimental para Pruebas Dinámicas

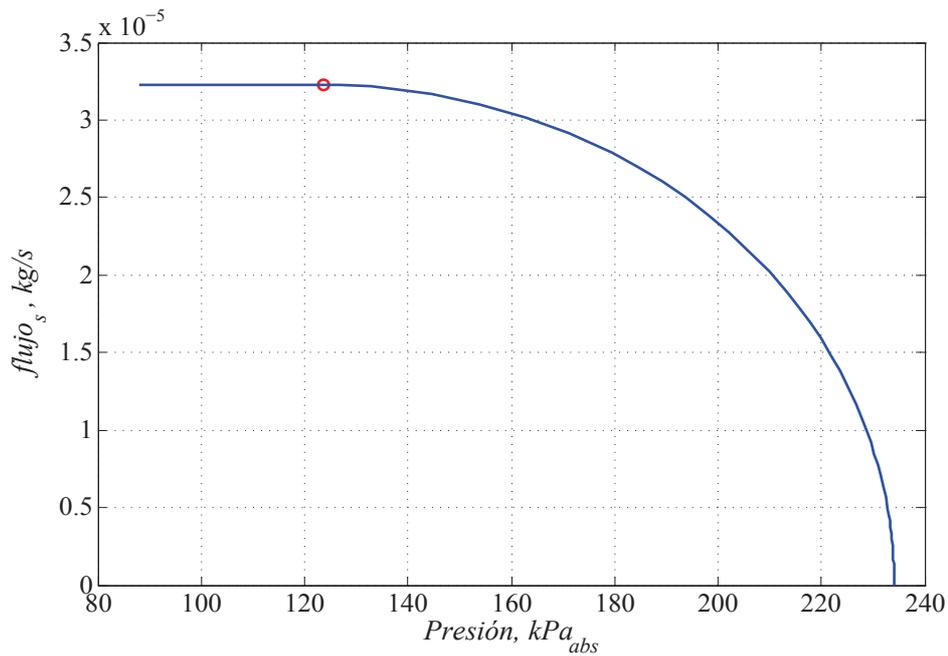


Figura 5.9: Flujo de masa  $G_s$ .

En la figura 5.9 se observa la gráfica obtenida para el flujo de masa  $G_s$ . Al analizar dicha gráfica se encuentra que cuando la presión en el volumen de control es menor a  $126.3kPa$ , lo cual corresponde al 52.8% (circulo rojo en el gráfico)de la presión de suministro, la velocidad del flujo de aire a través del orificio es la velocidad del sonido, por el contrario,

si la presión en el volumen de control es mayor a 52.8% la velocidad del flujo de aire a través del orificio es subsónica, y alcanza un flujo de masa cero cuando la presión de suministro y la presión en el volumen de control son semejantes.

A continuación se expone la curva que representa la variación del flujo de masa conforme varía la distancia y por tanto la presión presente en el volumen de control.

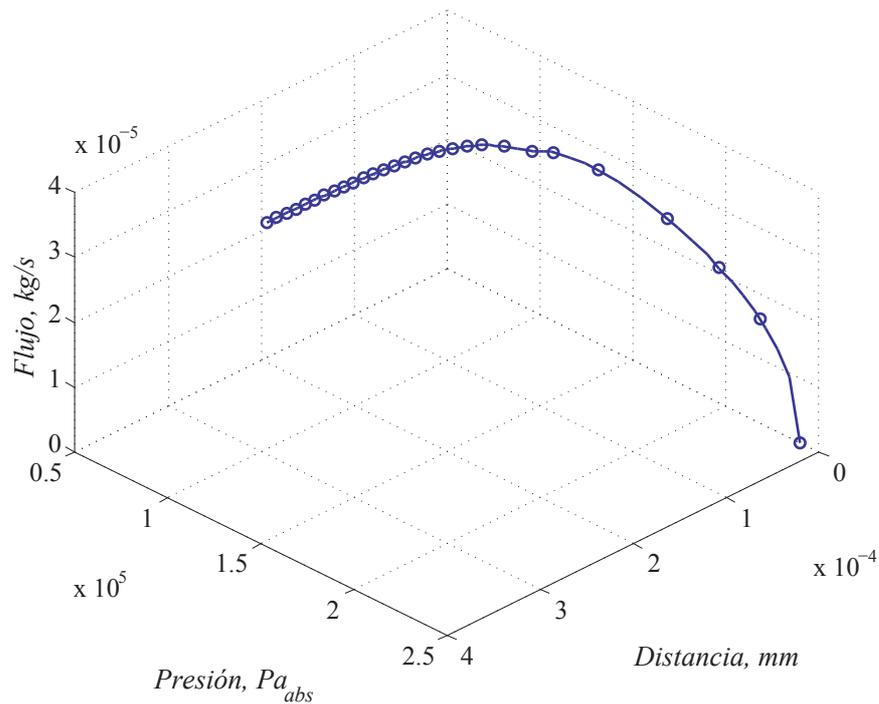


Figura 5.10: Datos experimentales, flujo de masa de presurización.

Al analizar la figura 5.10, en primer lugar, se puede inferir que cuando la distancia es cero, el flujo de masa a través de la restricción de flujo fija es cero y la presión en el volumen de control es máxima siendo igual a la presión de suministro. En segundo lugar, cuando la distancia es máxima el flujo es máximo con un valor de  $3.031 * 10^{-5} Kg/s$  y la presión en el volumen de control se encuentra alrededor de la presión atmosférica.

Por último, se presenta una estimación del flujo de masa teórico con los datos obtenidos experimentalmente, donde la curva de color azul representa los datos experimentales, esta curva se puede observar detalladamente en la figura 5.11, mientras que la superficie representa los posibles valores para el flujo de masa  $G_s$ .

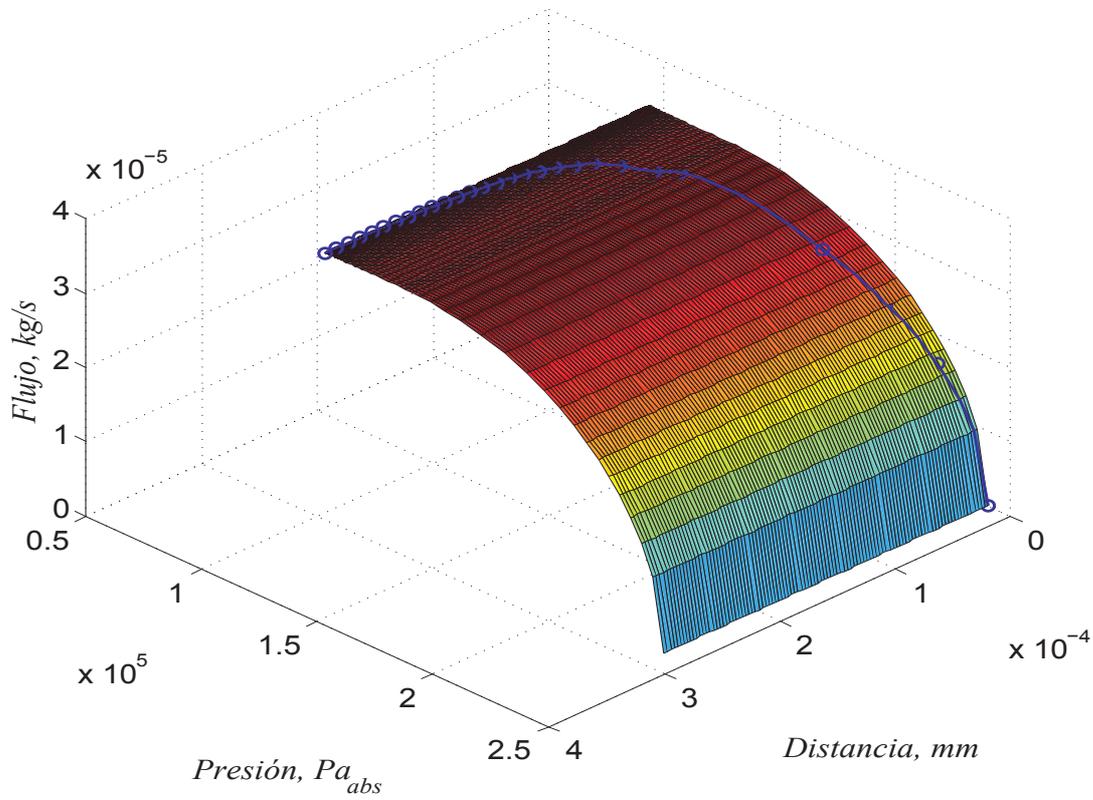


Figura 5.11: Estimación de flujo de masa a través del orificio Gs.

### 5.5.2. Flujo de Masa de Restricción Variable, G<sub>n</sub>

Para la estimación del flujo de masa a través del orificio  $G_n$  de restricción variable, se realizaron pruebas las cuales consistieron en abrir la tobera mediante el motor paso a paso a una distancia la cual Permitted que el volumen de control se descargara totalmente, donde las condiciones iniciales están dadas por una presión igual a la de suministro en el volumen de control y una distancia igual a cero. A continuación en la figura 5.12 se presentan los datos experimentales obtenidos para el flujo de masa a través del orificio  $G_n$ .

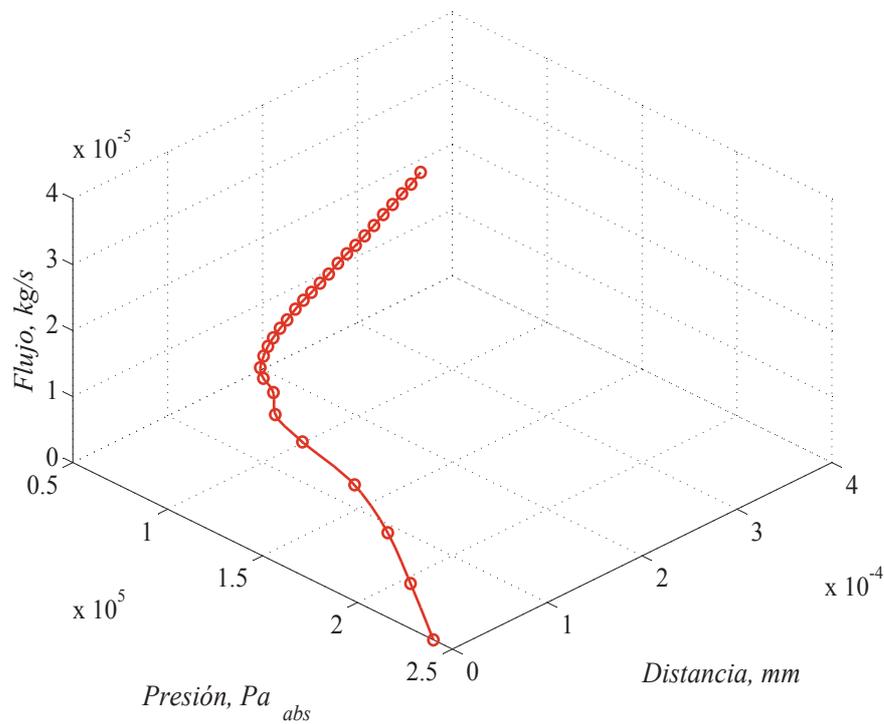


Figura 5.12: Datos experimentales, flujo de masa Gn.

Al detallar la figura 5.12 se puede inferir que el flujo de masa para descarga a través del orificio es máximo con un valor de  $3.329 \times 10^{-5} \text{ Kg/s}$  cuando la distancia del obturador con respecto a la tobera tiene un valor de  $280 \mu\text{m}$  y la presión se encuentra alrededor de la atmosférica, por el contrario, este es cero cuando el sistema tobera-obturador presenta una distancia igual a cero y una presión semejante a la presión de suministro en el volumen de control.

Para terminar, en la figura 5.13 se presenta una estimación del flujo de masa  $G_n$  teórico con los datos obtenidos experimentalmente, donde la curva de color rojo representa los datos experimentales, mientras que la superficie representa los posibles valores para el flujo de masa  $G_n$  presentes en el sistema neumático.

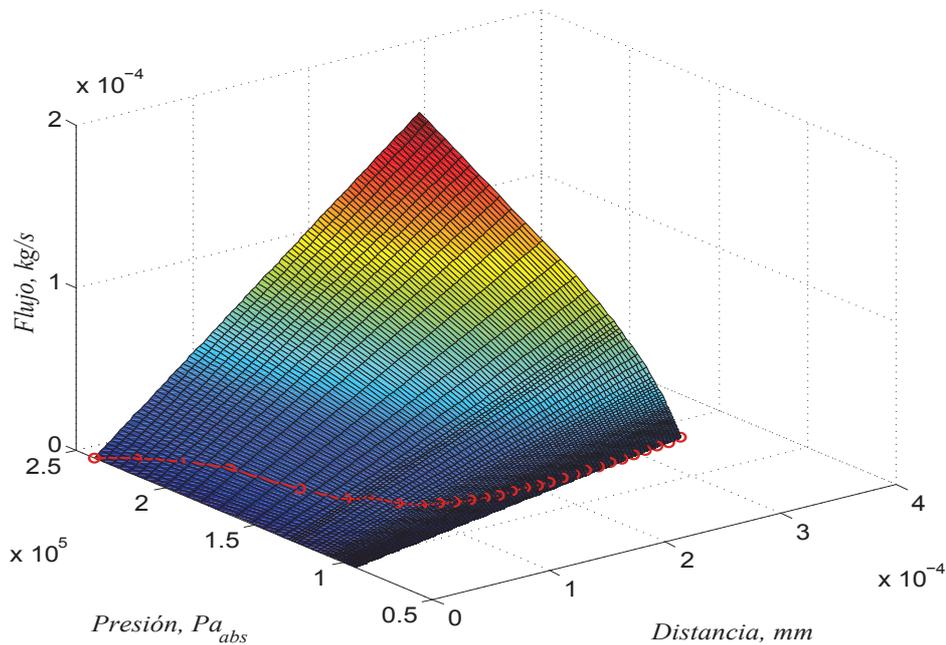


Figura 5.13: Estimación de flujo de masa a través del orificio Gn.

## 5.6. Caracterización Dinámica

Las características dinámicas de un sistema de medida describen su comportamiento ante una entrada variable en el tiempo. Este comportamiento es distinto al que presentan los sistemas cuando las señales de entrada son constantes debido a la presencia de inercias (masas, inductancias), capacidades (eléctricas, térmicas) y en general elementos que almacenan energía. El tipo de entrada puede ser transitoria (impulso, escalón, rampa), periódica (senoidal) o aleatoria (ruido blanco). La elección de una u otra depende del tipo de sensor [17].

Para la realización de las pruebas dinámicas, se procedió de dos maneras, la primera consistió en obtener la respuesta dinámica del sistema cuando el volumen de control se presuriza y la segunda cuando el volumen de control se despresuriza.

### 5.6.1. Respuesta Dinámica del Sistema.

Para adquirir la respuesta dinámica de carga del sistema, se realizaron pruebas donde las condiciones iniciales fueron una distancia del obturador de  $0.1\text{mm}$  con respecto a la tobera, y una presión inicial de  $1.588 \times 10^5 Pa_{abs}$  en el volumen de control debido a que la

llave de paso se encuentra abierta y por tanto hay una presión de suministro constante de  $2.432 * 10^5 Pa_{abs}$ . Seguidamente se varia la distancia del obturador mediante un motor paso a paso hasta alcanzar un valor de cero y una presión en el volumen de control igual a la de suministro. Se utilizó el mismo montaje experimental presentado en la figura 5.8 para la realización de las pruebas dinámicas, donde se utilizó una entrada rampa escalonada representada en la figura 5.14.

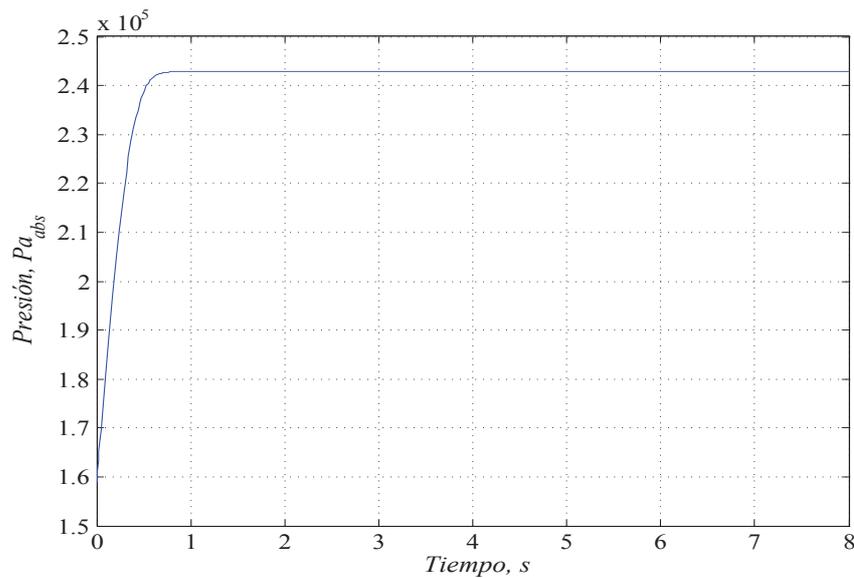


Figura 5.14: Entrada Rampa-Escalón.

De la figura 5.14, Se puede inferir que entre  $0.00s$  y  $0.097s$  se tiene una entrada rampa la cual responde a la ecuación  $u = xi \pm 0.665t$ , donde esta representa una recta con pendiente de  $0.065$  hasta alcanzar un valor cercano a la presión de suministro. A partir de este instante, la gráfica presenta un valor constante de presión y se comporta como una entrada escalón.

Finalmente, en la figura 5.15 se presenta la validación del modelo frente a la entrada rampa-escalonada, se observa una buena correspondencia entre los datos teóricos línea azul y los datos experimentales línea roja, cabe resaltar que el sobreimpulso que se observa no corresponde a la dinámica del sistema, por el contrario, corresponde a la inercia que posee el regulador de presión utilizado la cual es inherente a el.

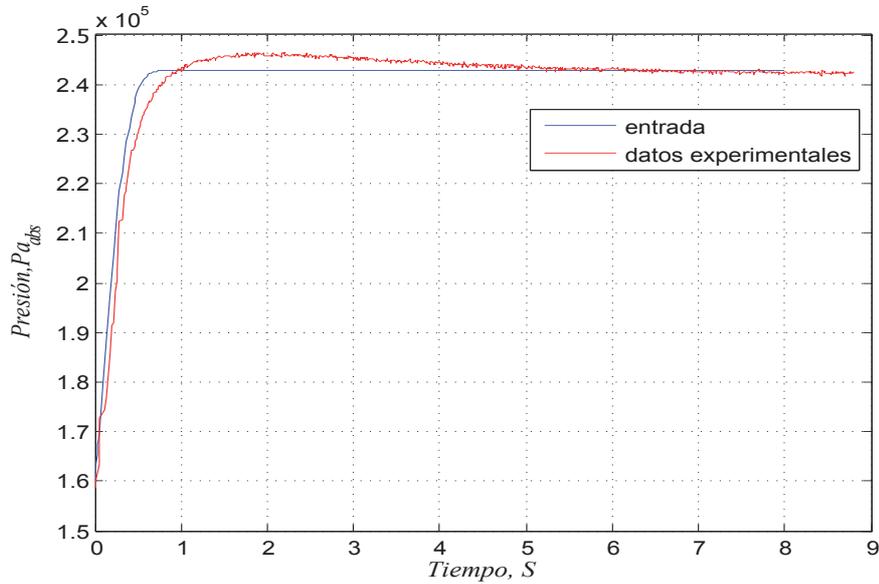
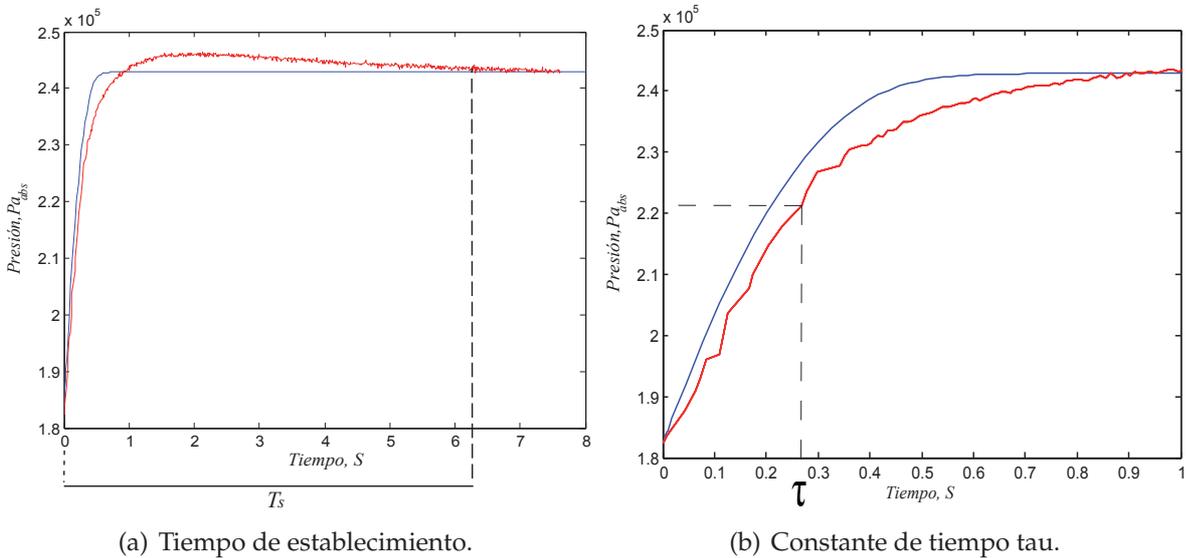


Figura 5.15: Estimación Respuesta Dinámica del Sistema.

Basándose en la caracterización de un modelo lineal, la constante de tiempo,  $\tau$  es de 0.26 s tomando como el 63.212 % del valor final y un tiempo de establecimiento  $t_s = 6.2s$ , estos valores se pueden observar en la figura 5.16.



(a) Tiempo de establecimiento.

(b) Constante de tiempo tau.

Figura 5.16: Respuesta Temporal del Sistema Neumático

## 5.7. Respuesta en Frecuencia

El término respuesta en frecuencia, se refiere a la respuesta de un sistema en estado estable a una entrada senoidal. En los métodos de la respuesta en frecuencia, la frecuencia de la señal de entrada se varía en un cierto rango, para estudiar la respuesta resultante [18].

### 5.7.1. Diagrama de Bode.

Es común usar gráficas logarítmicas de la respuesta en frecuencia en lugar de gráficas lineales. Las gráficas logarítmicas se denominan diagramas de bode en honor de H.W.Bode, quien las utilizó ampliamente en su trabajo. Un diagrama de bode es una gráfica de los valores de la ganancia logarítmica y del ángulo de fase contra la frecuencia, en la que se utiliza un eje horizontal logarítmico para la frecuencia. El uso de logaritmos amplía el intervalo de las frecuencias representadas en el eje horizontal [19].

A continuación en la figura 5.17 se presenta una estimación teórica del diagrama de bode, teniendo en cuenta el modelo matemático del sistema tobera-obturador.

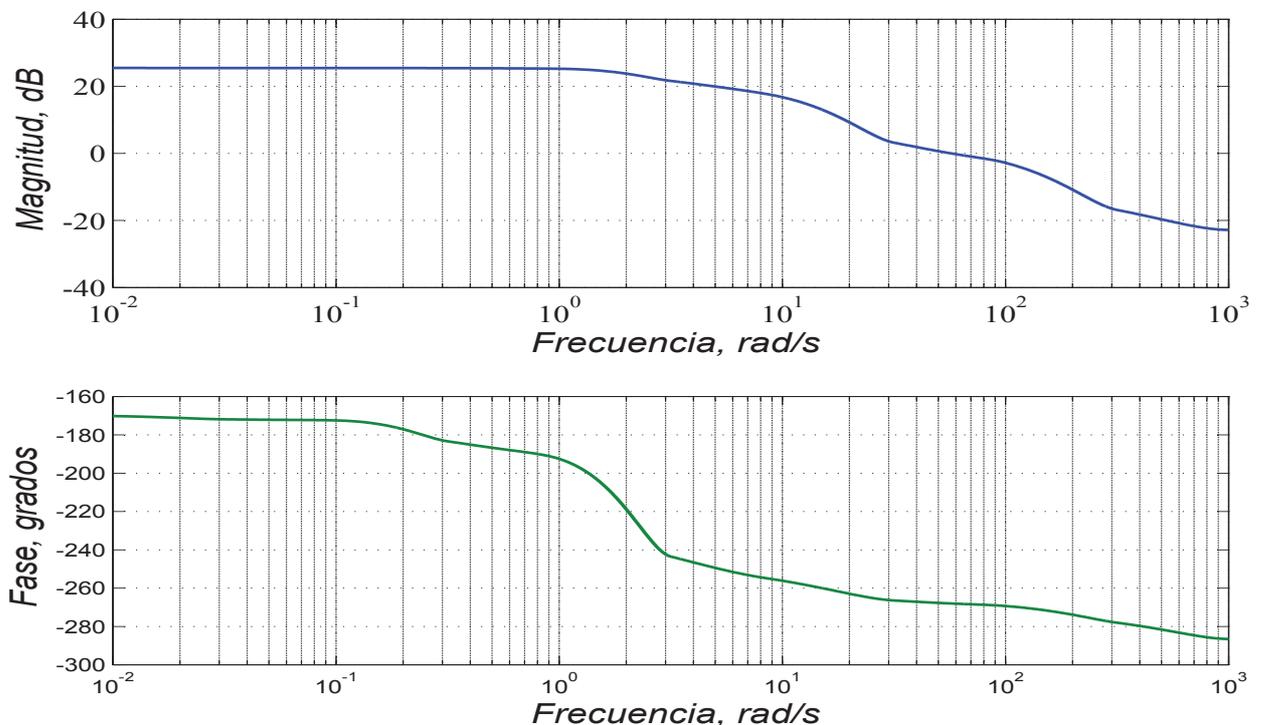


Figura 5.17: Diagrama de Bode

Del anterior diagrama, se puede inferir que el instrumento presenta una respuesta en frecuencia similar a la de un sistema lineal de primer orden, con una frecuencia de corte  $w_c = 1.28rad/s$  y un comportamiento asintótico aproximadamente de  $-20dB/dec$ , por otra parte, se presenta un desfase de  $-170^\circ$  a frecuencias bajas debido al sensor de presión, y un comportamiento asintótico aproximado a  $-300^\circ$  para las frecuencias altas.

Del presente capítulo, cabe destacar que para la realización de las caracterizaciones tanto estáticas como dinámicas, se presentaron conflictos al momento de realizar la adquisición de datos y controlar el motor paso a paso de forma simultanea con la arduino uno, por tanto, se utilizó el puerto paralelo para controlar el motor paso a paso y la tarjeta arduino para la adquisición de datos, finalmente, en las superficies obtenidas para el flujo de masa de suministro  $G_s$  y el flujo de masa para el orificio de restricción variable  $G_n$  se obtuvo una buena correspondencia de los datos experimentales con el modelo teórico.

## Capítulo 6

# Resultados Experimentales Medición de Rugosidad promedio Ra

### 6.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de rugosidad promedio  $Ra$  a partir de las mediciones realizadas a los diferentes tipos de papel de lija desde una lija P600 hasta una P2000.

### 6.2. Preparación de Muestras

En primera instancia se cortó acrílico de forma rectangular, con una medida de  $2 \times 3 \text{ cm}$  con el fin de colocar el papel de lija sobre este, para garantizar una superficie uniforme. en segunda instancia, se adhirió cinta doble faz en ambas caras del acrílico. por un lado se pega el papel de lija y por la otra cara se adhiere al sistema de barrido el cual es controlado mediante un motor dc con caja reductora. en la figura 6.1 se pueden observar las muestras utilizadas.

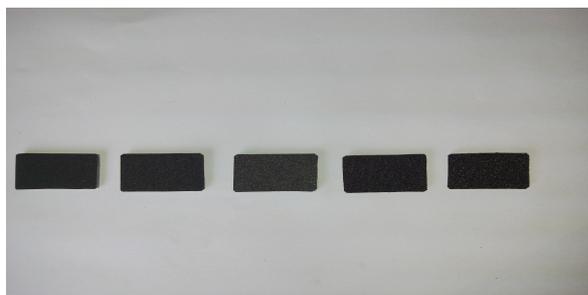


Figura 6.1: Lijas de diferentes tamaños de grano.

### 6.3. Montaje Experimental

Para la realización de las pruebas para la medición de la rugosidad promedio Ra; se utilizó el montaje experimental presentando en la figura 6.3, el cual es un sistema de barrido controlado por un motor de corriente continua con caja reductora con una relación de 9 : 1 y una velocidad de  $1.45\text{mm/s}$ , el cual traslada la muestra perpendicularmente al sistema tobera obturador, el cual se encuentra a una distancia de  $0.038\text{mm}$  con respecto a la muestra, para garantizar dicha distancia se usó un calibrador de galgas. Las variaciones de presión en el volumen de control al momento de realizar el barrido de la muestra son proporcionales a las variaciones del tamaño de grano presentes en los diferentes tipos de lijas, estos valores de presión son registrados mediante la interfaz de usuario, desde la cual se controla el sentido de giro del motor dc y la captura de los datos de las variaciones de presión. En la figura 6.2 se presenta una de las curvas de presión contra desplazamiento, donde el desplazamiento viene dado por la velocidad del motor y el tiempo que transcurre en el barrido de la muestra.

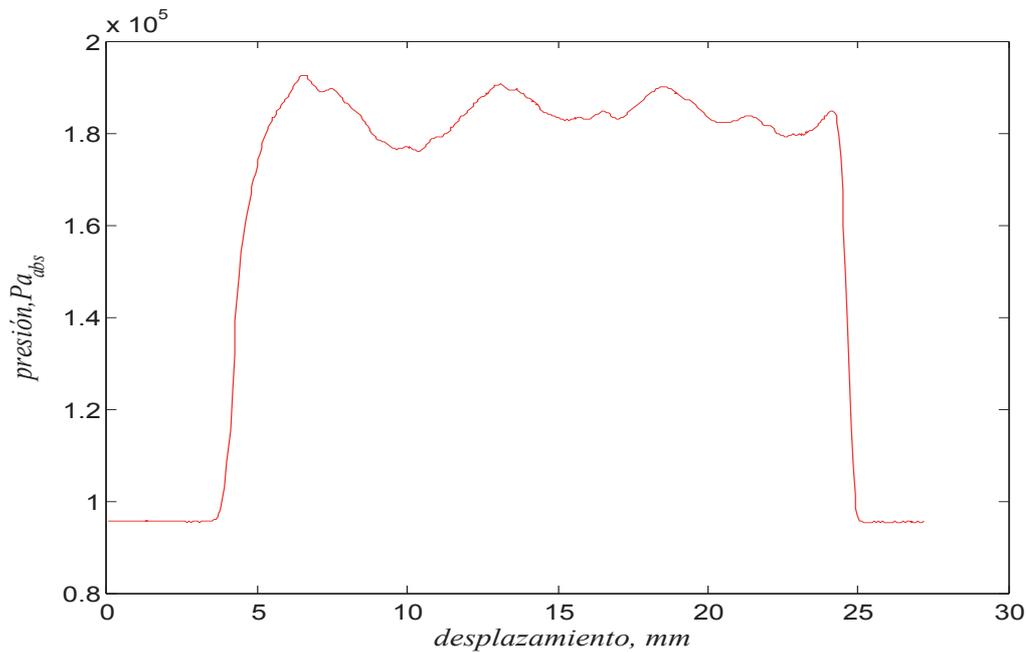
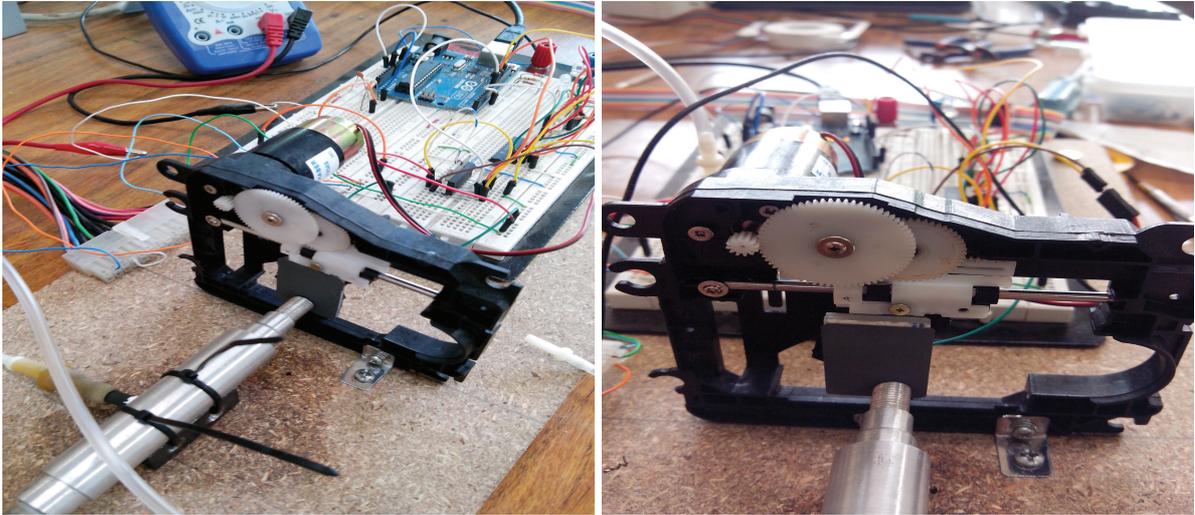


Figura 6.2: Barrido de papel de lija P1200



(a) Montaje experimental

(b) Barrido de la muestra

Figura 6.3: Montaje experimental para el proceso de medición de Ra

## 6.4. Obtención de Rugosidad Promedio Ra

La rugosidad promedio Ra, se define como la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil, en los límites de la longitud básica L, tal como se observa en la siguiente figura.

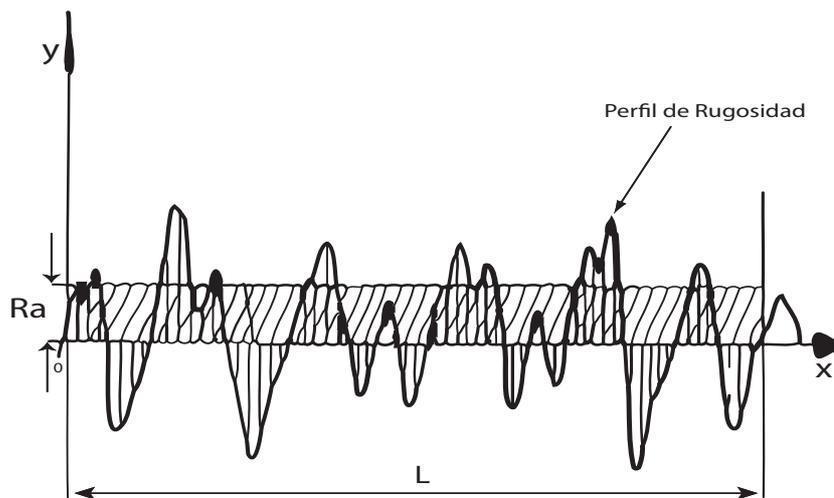


Figura 6.4: Curva Ra.

Donde:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (6.1)$$

Con el fin de obtener los valores de rugosidad promedio  $Ra$ , en primera instancia se partió de la caracterización estática de la figura 3.3, la cual representa la presión en  $Pa$  en función del desplazamiento en  $mm$ , ya que al realizar el barrido de las muestras los datos que se obtuvieron fueron variaciones de presión, se debe relacionar dichas variaciones con el desplazamiento obteniendo así una función  $x(p)$  a la cual se le realizó un ajuste por tramos con el fin de obtener la mejor curva. A continuación se presentan las curvas correspondientes a dicho ajuste.

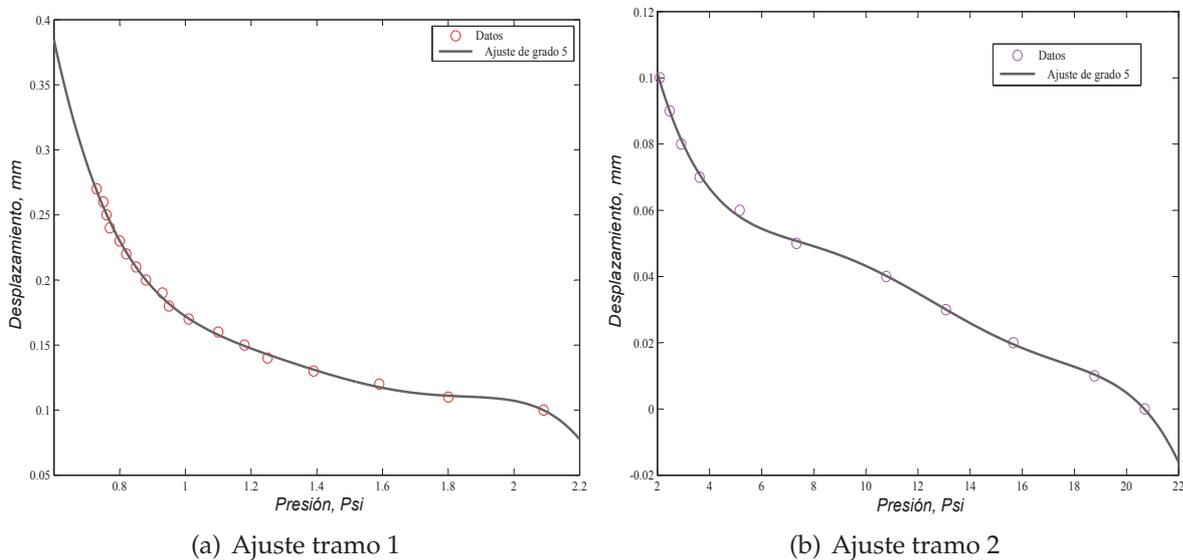


Figura 6.5: Ajuste por tramos de la función  $x(p)$ .

De las anteriores figuras se obtuvieron los polinomios característicos de cada curva:

- **Tramo 1:** Para este tramo se tiene un rango de presión de 0.73 a 2.09psi del cual se halló el siguiente polinomio de grado cinco.

$$x = -0.3924P^5 + 2.928P^4 - 8.634P^3 + 12.64P^2 - 9.294P + 2.928 \quad (6.2)$$

- **Tramo 2:** Para este tramo se tiene un rango de presión de 2.09 a 20.7psi del cual se halló el siguiente polinomio de grado cinco.

$$x = -6.646e-7P^5 + 4.167e-5P^4 - 0.0009901P^3 + 0.01103P^2 - 0.06052P + 0.1856 \quad (6.3)$$

Aplicando el ajuste anterior a los datos de presión obtenidos para cada papel de lija desde la P600 hasta la P2000, se obtienen una curva la cual relaciona el desplazamiento total del barrido que se le realizo a la muestra y la variación de la distancia  $x$  que representa el perfil de rugosidad del papel de lija en estudio. A continuación se presentan los perfiles obtenidos para los diferentes papeles de lijas.

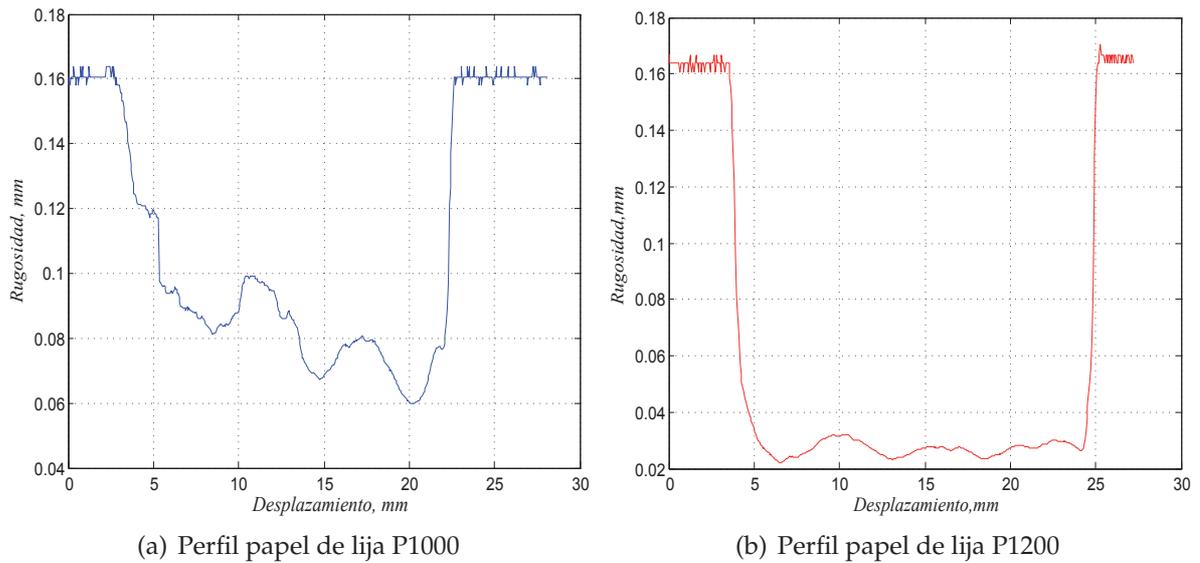


Figura 6.6: Perfiles de rugosidad papel de lija P1000 y P1200.

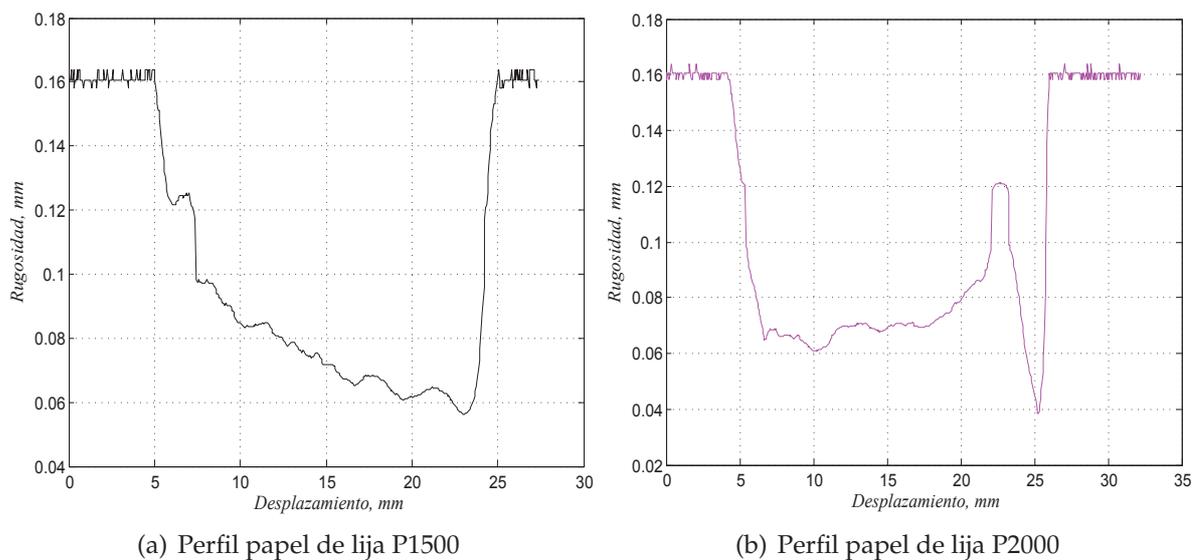


Figura 6.7: Perfiles de rugosidad papel de lija P1500 y P2000.

Seguidamente, para obtener los valores de rugosidad promedio Ra del papel de lija en estudio, se procedió de la siguiente manera, en primera instancia, se analiza el perfil de rugosidad obtenido, con el fin de definir los límites de integración donde se presenta la rugosidad, en segunda instancia se halló el punto medio del perfil de rugosidad con el fin ajustarlo al eje y, posteriormente, se calcula el área bajo la curva y este valor de área se divide sobre la distancia que corresponde a longitud del barrido  $L$  y finalmente se obtuvo el valor promedio de la rugosidad Ra.

El anterior procedimiento se realizó para cada papel de lija en estudio desde la P600 hasta la P2000, cabe resaltar que se realizó un total de cuatro (4) barridos para cada tipo de papel de lija, obteniendo así un valor promedio de la rugosidad Ra presente en la muestra de estudio. Finalmente se presentan los gráficos obtenidos desde el perfil registrado hasta la obtención de la rugosidad promedio Ra para cada una de las lijas utilizadas.

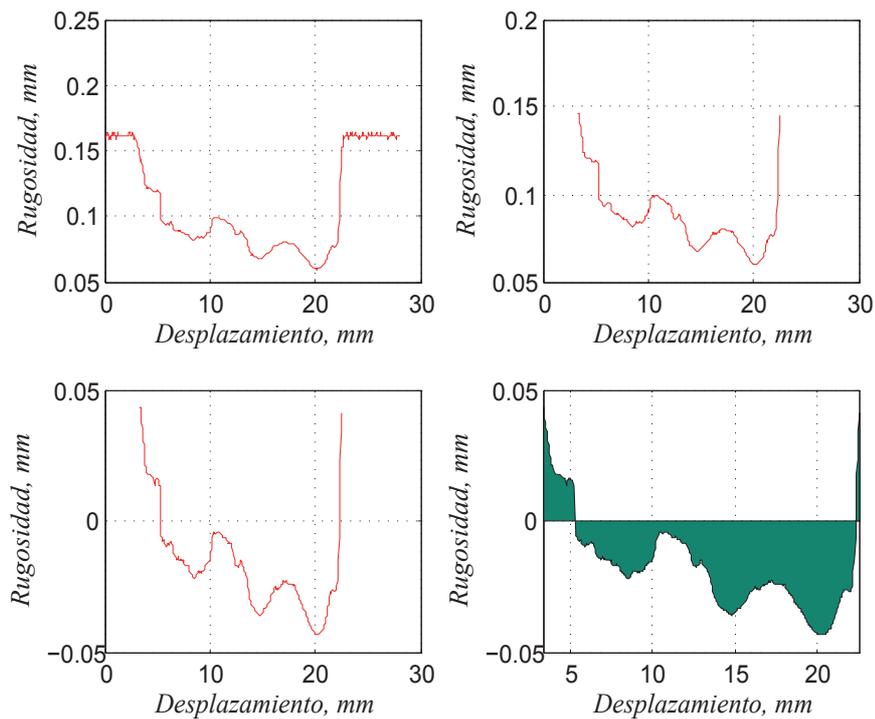


Figura 6.8: Obtención de Ra para lija P1000.

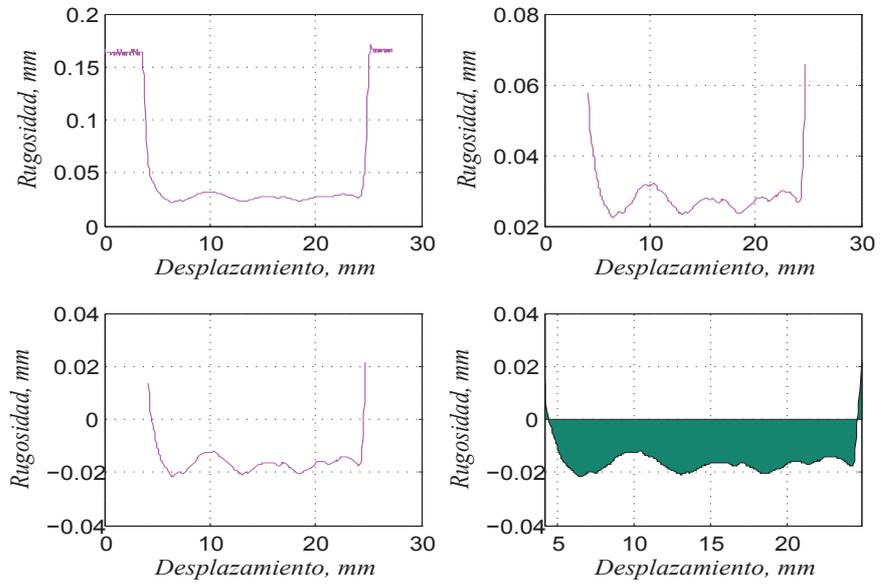


Figura 6.9: Obtención de Ra para lija P1200.

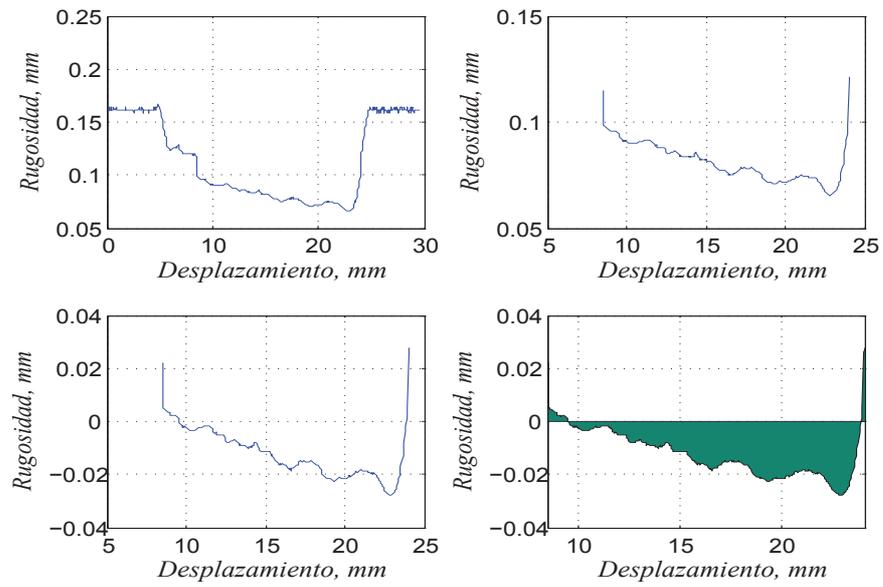


Figura 6.10: Obtención de Ra para lija P1500.

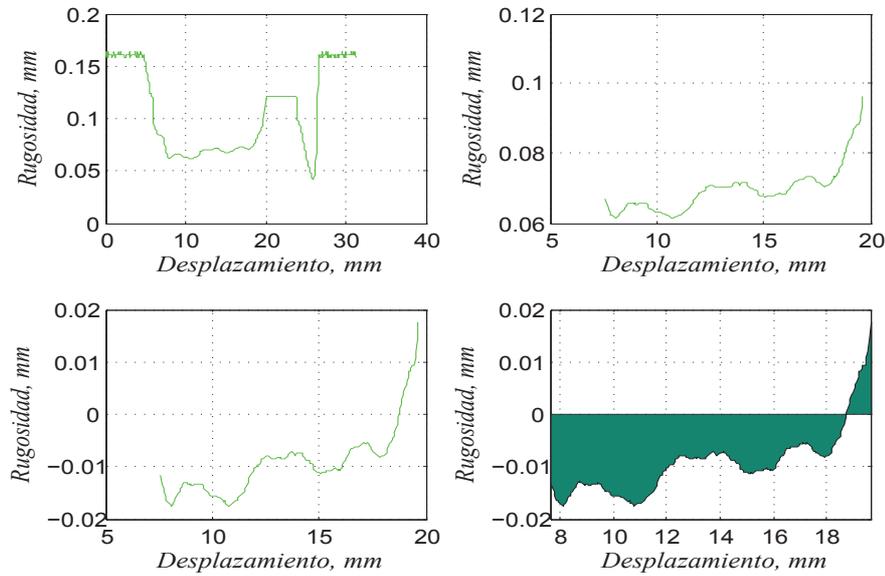


Figura 6.11: Obtención de Ra para lija P2000.

Cabe resaltar, que para el papel de lija P600 el valor de rugosidad Ra encontrado con el sistema tobera-obturador no se encuentra en el rango determinado por la norma FEPA 43-2-2006. Esto debido a que el espesor mínimo de la galga utilizada es de  $38\mu m$  y el tamaño de grano promedio para una lija P600 es de  $25.8\mu m$  según la norma FEPA, por tanto los valles presentes en el perfil de rugosidad se encuentran a una distancia aproximada de  $63.8\mu m$  lo cual se encuentra por fuera de la región lineal de trabajo del sistema neumático.

A continuación se presenta el perfil obtenido para la lija P600.

Según los valores de la norma FEPA 43-2-2006, para un papel de lija P600 el tamaño de grano se encuentra en un rango de  $24.8$  a  $26.8\mu m$  lo cual no corresponde al valor promedio obtenido de la rugosidad Ra el cual fue de  $13.4\mu m$ .

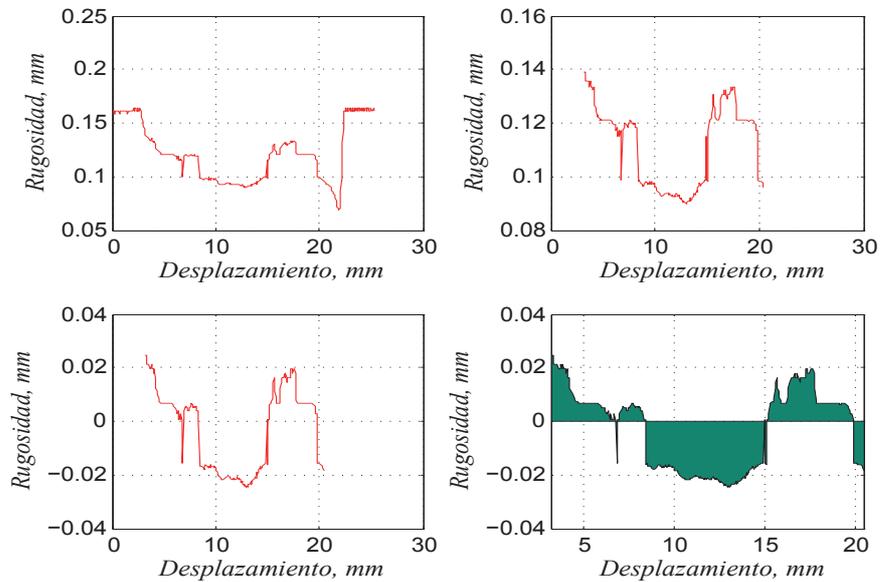


Figura 6.12: Obtención de Ra para lija P600.

Finalmente se presenta la tabla con los valores obtenidos de rugosidad promedio Ra para cada tipo de papel de lija desde la P1000 hasta la P2000 y la validación con los valores de tamaño de grano estandarizados por la norma FEPA 43-2-2006 la cual constituye la rugosidad promedio Ra de la muestra en estudio.

Cuadro 6.1: Resultados de Rugosidad Promedio Ra

TipodeLija	Ra( $\mu\text{m}$ )	RaPromedio( $\mu\text{m}$ )	IntervaloFEPA( $\mu\text{m}$ )
P1000	18.9	18.80	19.3
	17.0		
	17.0		
	22.3		
P1200	16.3	15.85	16.3
	14.1		
	16.3		
	16.7		
P1500	13.1	12.93	13.6
	13.5		
	10.5		
	14.6		
P2000	9.1	9.73	11.1
	10.4		
	9.0		
	10.4		
			9.5

Del presente capítulo, cabe resaltar que las pruebas realizadas a los papeles de lija desde la P1000 hasta la P2000 se encuentran en el rango de medición del instrumento, por el contrario, el papel de lija P600 se encuentra por fuera del rango de medición del instrumento ya que presenta un tamaño de grano mayor con respecto a los papeles de lija anteriormente mencionados.

# Capítulo 7

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 7.1. Conclusiones

- El sistema neumático para la medición de rugosidad realizado en este proyecto, presenta una ventaja frente a los rugosímetros con palpador, ya que constituye un método no destructivo de análisis de las muestras en estudio, al no presentar contacto físico con ellas.
- Fue necesario emplear un regulador de presión con un rango de medición entre 0 y 50 *Psig*, con el fin de garantizar una mayor precisión para la obtención del coeficiente de descarga  $C_d$  y una presión de suministro constante para que el volumen de control se descargue a partir de un mismo valor de presión, donde se utilizó un tanque de almacenamiento de aire, el cual se ubico entre el compresor y el regulador de presión, lo cual compenso las pequeñas caídas de presión que se presentaron durante las pruebas realizadas del sistema neumático.
- Se estableció una ganancia de 263 con el amplificador diferencial AD 620, con el fin de establecer un rango de voltaje de 0 a 4.38V para no saturar la salida digital de la tarjeta arduino uno, además se utilizó un filtro pasivo RC de primer orden con el fin de minimizar el ruido eléctrico en las medidas.
- En la caracterización estática del instrumento se usó el tornillo micrométrico, ya que este garantizó una variación mínima de distancia de aproximadamente 0.005mm por cada paso dado por el motor, con el fin de minimizar el error sistemático que se produce al realizar el proceso manualmente; por lo tanto esta caracterización arrojó valores de  $C_d$  erróneos, ya que se presentaron conflictos al capturar datos y mover el motor paso a paso con la arduino simultáneamente, por consiguiente se controló el

motor mediante el puerto paralelo y así se obtuvieron los coeficientes de descarga  $C_d$  lógicos para las diferentes distancias desde  $0.005mm$  a  $0.04mm$  estos valores hallados presentan un error promedio de  $4.4\%$  equivalentes a  $6.211Kpa$ , los cuales presentaron un comportamiento cúbico que solo se ajusta a las distancias anteriormente mencionadas. Finalmente se observó que el coeficiente de descarga  $C_d$  a partir de  $0.08mm$  este se hace constante.

- El tiempo de descarga empleado por el volumen de control para la obtención de  $C_d$  es inversamente proporcional a la distancia del obturador con respecto a la tobera, lo que hace que el flujo de gas a través del orificio sea mayor y por tanto se descargue mas rápido.
- Se concluye que a través de los orificios  $G_n$  y  $G_s$ , los flujos de masa experimentales tanto para presurización y despresurización se encuentran dentro de los posibles valores de flujos de masa teóricos.
- Debido a que la entrada escalón presenta un tiempo de subida muy corto con respecto a la constante de tiempo presente en el sistema tobera-obturador, fue necesario la inclusión de una entrada rampa-escalonada, entonces resulta que, el valor de la constante de tiempo obtenida en la simulación fue  $0,24s$  para el sistema tobera-obturador, mientras que el valor experimental fue  $0,26s$ , por tanto, se observa una buena correspondencia entre el dato teórico y el experimental y cabe aclarar que, al momento de obtener la respuesta dinámica del sistema neumático este presentó un sobrepaso de la señal experimental con respecto a la entrada, debido a la inercia presente en el regulador de presión la cual es inherente a el.
- Para el barrido de la muestra se trabajó con un motor dc con caja reductora, el cual garantizó una baja velocidad, obteniendo así una mejor adquisición de datos, después en la medición de la rugosidad promedio  $Ra$  se concluye que, los valores adquiridos para los papeles de lija comprendidos desde la  $P1000$  hasta la  $P2000$ , se encuentran dentro del intervalo de la norma FEPA 43-2-2006, por el contrario, al obtener el perfil del papel de lija  $P600$ , se pudo inferir que a raíz de la suma del tamaño promedio de grano y el espesor de la galga utilizada, esta lija se encuentra por fuera del rango de trabajo del instrumento.
- Se concluye que el instrumento neumático presenta una región lineal entre  $0.0015$  y  $0.063mm$ , lo que indica la región de trabajo del sistema, por lo tanto, los valores anteriormente mencionados, limitan el rango de medición con respecto a los tamaños de grano presentes en los diferentes tipos de lija estudiados.

- Fue indispensable garantizar la perpendicularidad entre la tobera y la superficie de la muestra que se está censando, teniendo en cuenta que la muestra no presente ondulaciones, ya que al no ser así, los datos resultarían inesperados.

## **7.2. Trabajo Futuro**

En un futuro a mediano ó corto plazo, se plantea optimizar la selección de los límites de integración de los perfiles obtenidos para los diferentes tipos de papel de lija, debido a que en este proyecto se realizó de forma manual, por ende, se propone una mejora en la interfaz de usuario la cual efectúe el tratamiento matemático y despliegue en pantalla los perfiles de rugosidad así como el valor de la rugosidad promedio Ra.

Finalmente se propone construir toberas con orificios de diferentes diámetros, ya que un cambio en dicho diámetro afecta la sensibilidad del instrumento y el rango de medida de este, por tanto, se pueden realizar mediciones con otros tipos de papel de lija.

# Anexos

# Anexos A

## Anexo I: Interfaz Utilizada

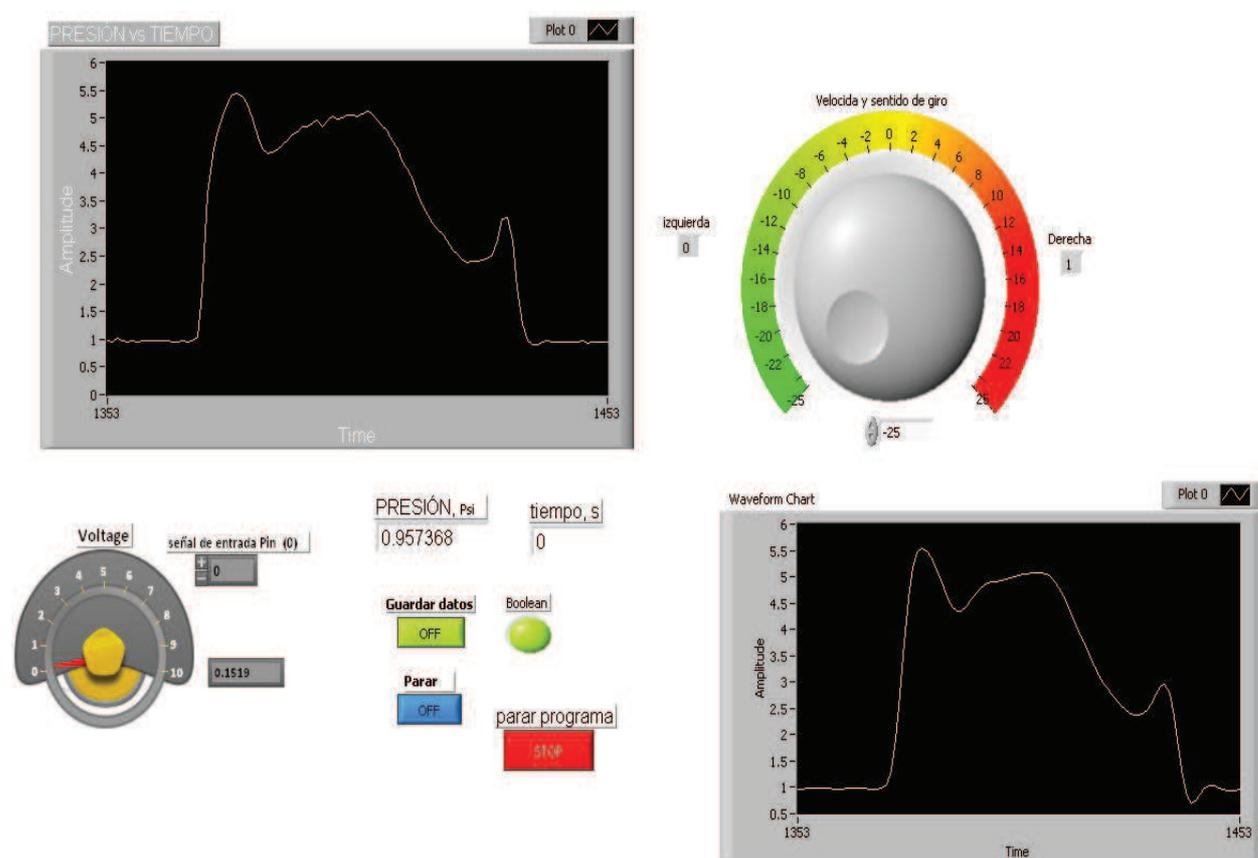


Figura A.1: Interfaz

# Anexos B

## Anexo II: Planos Sistema Tobera-Aleta

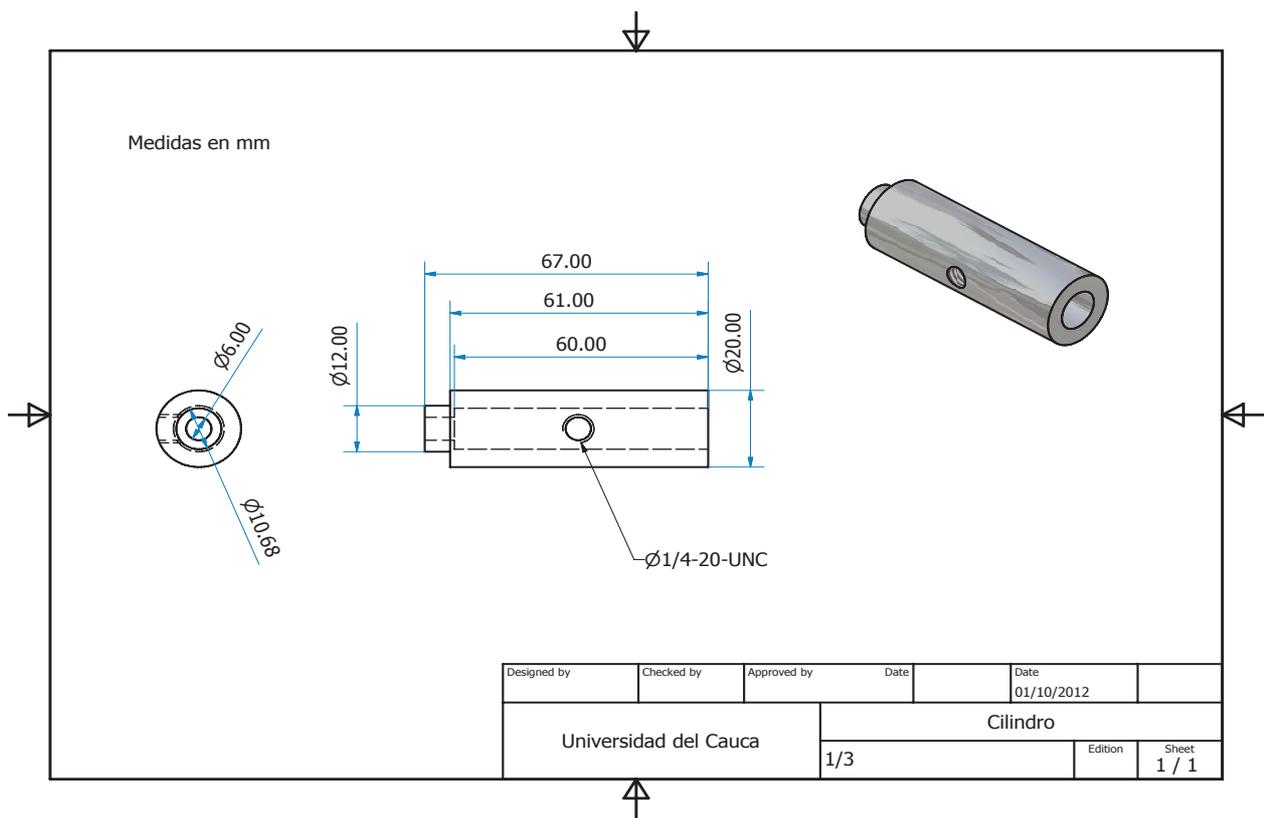


Figura B.1: Plano Cilindro Sensor

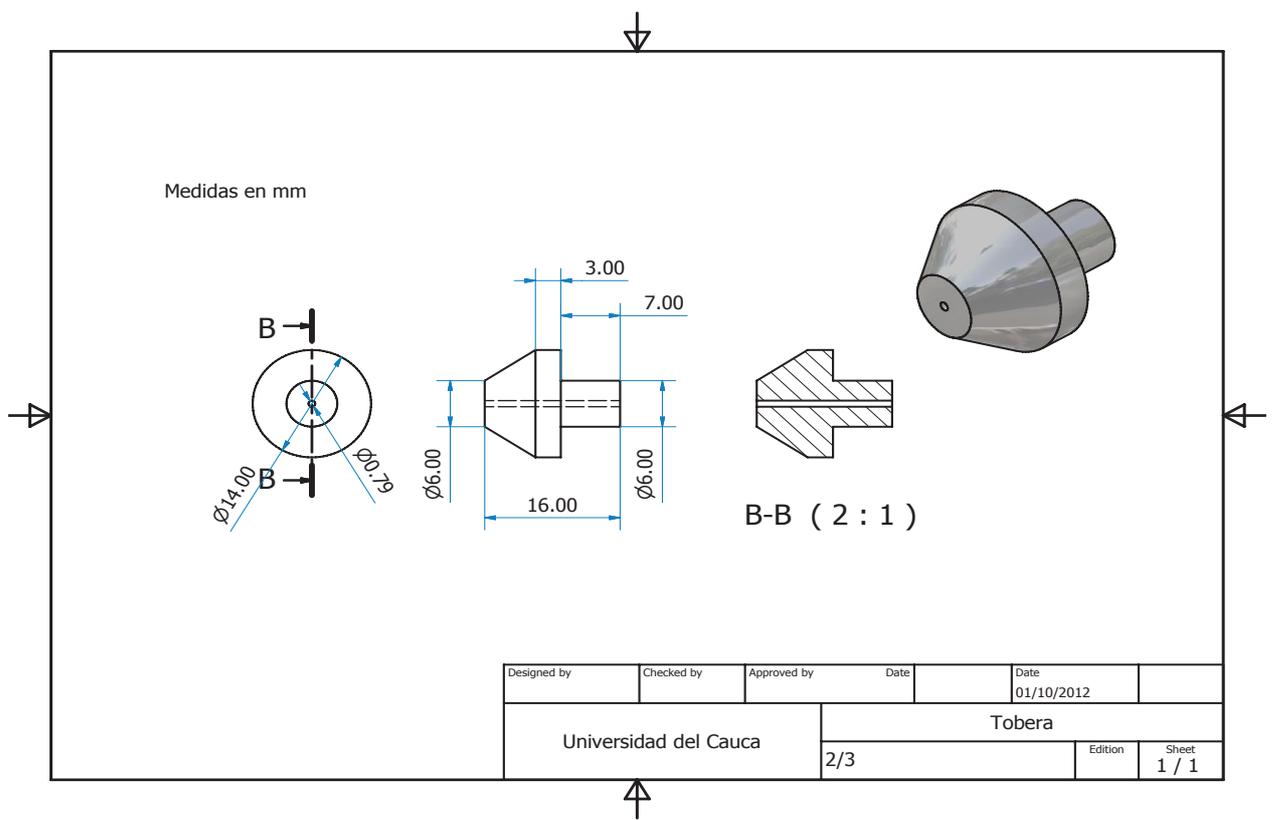


Figura B.2: Plano Tobera

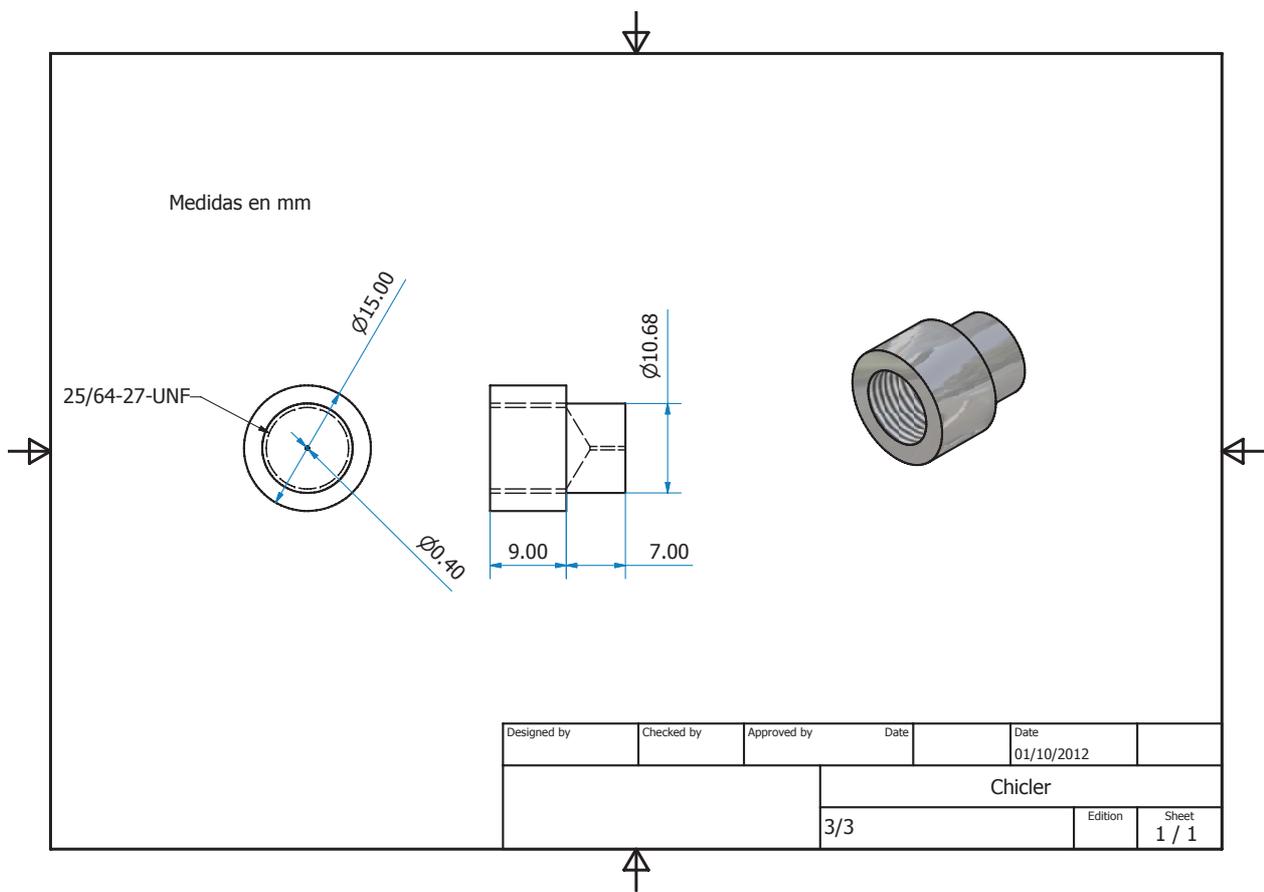


Figura B.3: Plano Chicler

# Bibliografía

- [1] Antonio Creus Solé. *Neumática e Hidráulica*. Alfaomega, Grupo editorial, primera edición, 2007.
- [2] Antonio Serrano Nicolás. *Neumática Práctica*. Paraninfo, primera edición, 2009.
- [3] Salvador de las Heras Jiménez. *Instalaciones Neumáticas*. Editorial UOC, primera edición, 2003.
- [4] Serope Kalpakjian y Steven R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. McGraw-Hill, quinta edición, 2008.
- [5] Alarcón Gonzales Rodolfo Alejandro y Corona Cadenas Mario Alberto. *Proceso politrópico*.
- [6] Katsuhiko Ogata. *Dinámica de Sistemas*. Pearson, Prentice-Hall, primera edición, 1987.
- [7] Mikell P. Groover. *Fundamento de manufactura moderna, materiales, procesos, y sistemas*. McGraw-Hill, tercera edición, 2007.
- [8] Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras Área 7 Universidad Nacional del Sur. Laboratorio de medidas eléctricas 2 (cod.2774).
- [9] S. R. Majumdar. *Sistemas Neumáticos, Principios y Mantenimiento*. McGraw-Hill, primera edición, 1998.
- [10] Apontes Santos y Juan E. Cubias y Marvin A. Romero y William Guillermo. *Fundamentos del motor alimentado por aire comprimido*. 2010.
- [11] Ricardo-Franco Mendoza-García. *Sistemas de sensores y actuadores*. 2012.
- [12] Joan Antoni Rosmarin y Oscar Barrera Doblado. *Sistemas eléctricos y de seguridad y confortabilidad*. Ediciones Paraninfo, S,A, primera edición, 2011.

- [13] Antonio Creus. *Instrumentación Industrial*. Alfaomega, Grupo editorial, sexta edición, 1997.
- [14] Ernest E. Doebelin. *Sistemas de Medición e Instrumentación*. McGraw-Hill, quinta edición, 2005.
- [15] Juan Calderón y Yamilet Sánchez Montero. Mediciones e instrumentación industrial. pages 38–39.
- [16] Gerardo Marín García. *Determinación de Coeficientes de Descarga en Vertedores de Cresta Redondeada*. Universidad de Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería civil.
- [17] F.J. Ferrero. *Fundamentos de los Sistemas de medida*. Universidad de Oviedo, 2006.
- [18] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Pearson, Prentice Hall, 2003.
- [19] Richard C. Dorf y James A. Svoboda. *Circuitos Electricos*. Alfaomega, sexta edición, 2006.