

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PATRON PARA CALIBRAR
MEDIDORES DE GAS BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE BOQUILLAS
SÓNICAS

OSCAR ALBERTO CÓMBITA PUERTO
ILBA GEONINE CUADRADO PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2004

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PATRON PARA CALIBRAR
MEDIDORES DE GAS BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE BOQUILLAS
SONICAS

OSCAR ALBERTO CÓMBITA PUERTO
ILBA GEONINE CUADRADO PEÑA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director
JABID EDUARDO QUIROGA MENDEZ
Ingeniero Mecánico

Codirector
JUAN MANUEL ORTIZ AFANADOR
Ingeniero Mecánico
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2004

DEDICATORIA

A Dios por permitirme vivir esta grata experiencia que fortalece y
amplia los horizontes de mi vida,
A mi madre Marlene Peña Viana por confiar en mi, darme todo el
amor que necesito y por ser mi ejemplo a seguir ,
A mi padre Miguel Cuadrado Ariza y hermanos Borish y Helman
por su apoyo y comprensión ,
A mis tíos, primos y abuelos.
A mis compañeros y amigos,
A Oscar Alberto por toda su amistad y apoyo constante,
A Fernando por todo lo que significa para mi.

Ilba Geonine Cuadrado Peña

DEDICATORIA

A Dios,
A mis Padres, Rosa Amelia y Miguel Antonio porque mas
que mis padres, son mis amigos incondicionales, además
por creer en mí y ayudarme siempre a volver todos mis
sueños realidad.
A mis hermanos por ser otro soporte más de mi vida,
A Andrea porque siempre a estado ahí en las buenas
y en las malas,
A Ilba porque mas que mi compañera es un apoyo
Incondicional,
A mis amigos y compañeros, son los mejores.

Oscar Alberto Cómbita Puerto

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas por el apoyo incondicional prestado durante todo el desarrollo del proyecto.

A Adolfo León Arenas, Jabid Eduardo Quiroga Méndez y Juan Francisco Maradey Charris, Ingenieros mecánicos y profesores de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración oportuna y la confianza depositada en nosotros para la realización de este proyecto.

A Juan Manuel Ortiz, Ingeniero de proyección y desarrollo y Henry Abril Blanco Director del Laboratorio CDT de Gas por toda su colaboración y dedicación para sacar este proyecto adelante.

Al Dr. Kazuto Kawakita, Gerente de Proyectos en Óleo y Gas del Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Sao Paulo (Brasil).

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de este proyecto.

Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1.....	2
FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES	2
1.1 GENERALIDADES	2
1.2 LEYES DE LA DINAMICA DE LOS FLUIDOS	4
1.2.1 Ley de la conservación de la masa.....	4
1.2.2 Segunda ley del movimiento de newton	5
1.2.3 Primera ley de la termodinámica	5
1.2.4 Segunda ley de la termodinámica	5
1.3 PARÁMETROS ADIMENSIONALES	6
1.3.1 Número de Mach.	6
1.3.2 Número de Reynolds.	7
1.3.3 Coeficiente isentrópico.	7
1.3.4 Número de Prandtl.	8
1.4 PROPIEDADES DE ESTANCAMIENTO.....	8
1.5 DEFINICION DE FLUJO COMPRESIBLE	11
1.6 VELOCIDAD DEL SONIDO.....	14
1.6.1 Velocidad de propagación de un pulso de presión en un plano.	15
1.6.2 Velocidad del sonido en un gas perfecto.	17
1.6.3 Velocidad del sonido en flujo incompresible.	18
1.7 CLASIFICACIÓN DE FLUJOS COMPRESIBLES.....	18
1.7.1 Elipse del flujo adiabático y estable.....	18
1.8 FLUJO UNIDIMENSIONAL E ISENTROPICO EN TOBERAS.....	20
1.8.1 Efectos de la variación de área de flujo	21
1.8.2 Relaciones matemáticas para las propiedades en el flujo isentrópico.....	24
1.8.3 Flujo de masa y estrangulamiento en el flujo isentrópico.....	25
1.8.4 Operación de toberas bajo variaciones de presión.....	27
1.8.5 Choque normal en flujo isentrópico.....	33
CAPITULO 2.....	42
DISEÑO DEL BANCO PATRON.....	42
2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL BANCO	43
2.2 DETERMINACION DEL SISTEMA DE CALIBRACION	45
2.3 DISEÑO DE BOQUILLAS SONICAS A PARTIR DE LA ISO 9300.....	47
2.3.1 Selección del perfil de la boquilla	48
2.3.2 Determinación de diámetros de las boquillas	51
2.3.3 Definición de montaje de las boquillas.....	56
2.3.4 Diseño del perfil interno y forma externa de las boquillas.	59

2.3.5	SELECCIÓN DE MATERIAL	64
2.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE MONTAJE DE BOQUILLAS.....	65
2.4.1	Tubería	65
2.4.2	Accesorios	69
2.4.3	Plenums.....	70
2.4.4	Acoples	71
2.5	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO	74
2.6	DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	76
2.6.1	Sensores de temperatura	78
2.6.2	Sensores de presión.....	79
2.6.3	Óptico	81
2.6.4	Cronometro	82
2.6.5	Módulos de entradas digitales y entradas análogas	83
2.6.6	Cerebro B-3000	83
2.6.7	Controlador SNAP –LCSX-PLUS.....	84
2.6.8	Base SNAP B16M	85
2.7	SELECCIÓN DEL EQUIPO GENERADOR DE VACIO	86
2.7.1	Condiciones de operación	86
2.7.2	DESCRIPCIÓN DEL ASPIRADOR TIPO ROOTS SERIE SRV-0831	88
CAPITULO 3.....		90
CONSTRUCCION DEL BANCO DE BOQUILLAS SONICAS.....		90
3.1	PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS BOQUILLAS SÓNICAS... 90	
3.1.1	Selección del taller para construcción de las boquillas.	90
3.1.2	Compra del material para la fabricación de las boquillas.....	91
3.1.3	Proceso de maquinado de las boquillas.	92
3.1.4	Pulido de las boquillas.....	96
3.2	CONSTRUCCION DE ACOPLES:	97
3.2.1	Compra del material.....	97
3.2.2	Maquinado.....	98
3.3	TUBERIAS	99
3.4	CONSTRUCCIÓN DE PLENUMS	100
3.4.1	SELECCIÓN DEL TALLER DE METALMECÁNICA	100
3.4.2	PROCESO DE FABRICACIÓN.....	101
3.5	BRIDAS.....	106
3.5	SOLDADURA DE ACOPLES Y TUBOS	107
3.6	ELEMENTOS DE BLOQUEO	108
3.7	UNIONES UNIVERSALES	108
3.8	TOMAS DE PRESION Y TEMPERATURA.....	109
3.9	ENSAMBLE.....	111
CAPITULO 4.....		114
CALIBRACION DE LAS BOQUILLAS SONICAS		114
4.1	GENERALIDADES DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	115
4.2	Descripción del sistema de calibración	116
4.2.1	Sala de calibración y medios de ensayo.....	118
4.3	MÉTODOS DE CALIBRACIÓN.....	118

4.3.1	Ensayo en un punto	118
4.3.2	Ensayo en 2 puntos	119
4.4	CALIBRACIÓN DE BOQUILLAS SÓNICAS DE 150 Y 250 M ³ /H CON PATRÓN TIPO TURBINA.....	120
4.5	CALIBRACIÓN DE BOQUILLAS SÓNICAS DE 100, 50, 25, 12.5 Y 3 M ³ /H CON PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA.	124
4.6	ECUACIONES DE TRABAJO	125
4.6.1	Determinación del valor de referencia de la boquilla $Q_{V,20,tr}$ (ensayo en un punto). 125	
4.6.2	Determinación del valor de referencia de la boquilla $Q_{V,20,tr,1000}$ (ensayo en 2 puntos).126	
4.7	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN	127
4.8	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Y PLAZO DE VALIDEZ DE LA CALIBRACIÓN	130
	RECOMENDACIONES	132
	CONCLUSIONES.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del flujo de fluidos a través de conductos cerrados.	2
Figura 2. Representación del cambio de estado de un fluido a las condiciones de estancamiento.....	9
Figura 3. Diagrama h-s.....	10
Figura 4. Propagación de una pequeña onda de presión (Frente de onda estacionario).	16
Figura 5. Elipse de flujo estable y adiabático.....	19
Figura 6. Cambios de propiedades en función del área	23
Figura 7. Velocidades en una tobera convergente	24
Figura 8. Relaciones entre propiedades de un flujo unidimensional, isentrópico de un gas ideal.	27
Figura 9. Tobera convergente con expulsor.....	28
Figura 10. Regímenes de flujo a través del conducto al variar las relaciones de presión.....	29
Figura 11. tobera convergente-divergente con expulsor.	31
Figura 12. Condiciones alrededor de una onda de choque.	34
Figura 13. Líneas de Rayleigh y Fanno.	36
Figura 14. Representación de frentes de onda formados en tiempos sucesivos mientras un pistón acelera por medio de una serie de impulsos igualmente espaciados.	39
Figura 15. Desarrollo de la formación de ondas de constante intensidad.	41
Figura 16. Esquema general del banco de boquillas sónicas.	45
Figura 17. Esquema del sistema de alta presión en un banco de boquillas sónicas.	46
Figura 18. Esquema del sistema a vacío en un banco de boquillas sónicas.	46
Figura 19. Perfiles cilíndrico (izquierda) y toroidal (derecha) de una boquilla sónica según la ISO 9300.	49
Figura 20. Detalle de perfil de una boquilla toroidal, según la ISO 9300.....	51
Figura 21. Imagen de modelo de cálculo de diámetro de boquillas en Math Cad@.	52
Figura 22. Forma exterior de la boquilla según alternativa roscada.	56
Figura 23. Montaje de la boquilla según alternativa con Clamps.....	57
Figura 24. Forma exterior de la boquilla según alternativa bridada.....	57
Figura 25. Perfil toroidal de la boquilla de 250 m ³ /h, modelado en Solid Edge.	59
Figura 26. Modelamiento de la boquilla de 250 m ³ /h, en Solid Edge.	60
Figura 27. Imagen de plano de boquilla de 250 m ³ /h, generado en Solid Edge.	60
Figura 28. Modelamiento en Solid Edge de diseño de boquillas tipo inserto (derecha)- carcasa (izquierda).	62
Figura 29. Propiedades físicas del acero SAE/ AISI 316L.....	65

Figura 30.Requerimientos de instalación y configuración de la tubería aguas arriba de una boquilla sónica según la ISO 9300.	66
Figura 31.Detalles de la toma de presión según la ISO 9300.	67
Figura 32. Modelamiento en Solid Edge de Válvula de bola (derecha)y junta universal (izquierda).....	70
Figura 33. Modelamiento en Solid Edge de Plenums aguas arriba (izquierda) y aguas debajo (derecha).....	71
Figura 34. Modelamiento en Solid Edge de conexión de boquillas.....	72
Figura 35. Modelamiento en Solid Edge de línea de flujo de boquilla de 100 m ³ /h.	72
Figura 36. Modelamiento en Solid Edge del ensamble de tubos en el banco.	73
Figura 37. Modelamiento en Solid Edge de la estructura del banco.....	75
Figura 38. Modelamiento en Solid Edge del Banco de Boquillas sónicas, se incluyen el equipo generador de vacío y la turbina como medidor en prueba.	76
Figura 39. RTD´s PT100.....	78
Figura 40. Imagen de Barómetro Omega.	80
Figura 41.Imagen Vacuometro marca Cole Palmer.	81
Figura 42. Imagen de sensor óptico.....	82
Figura 43. Imagen de cronómetro digital.....	83
Figura 44.Controlador , de la marca OPTO Control.	84
Figura 45. Base, marca OPTO Control.	85
Figura 46. Diagrama esquemático del conexionado eléctrico.....	85
Figura 47. Imagen de Aspirador tipo Roots, serie SRV-0831	88
Figura 48.Redondos de acero inoxidable AISI 316L para la fabricación de las boquillas sónicas.	91
Figura 49.Máquinas herramientas Torno (izq.) Fresadora (der.) del Taller de Mecánica fina CIC (der.).....	92
Figura 50.Montaje del cilindro en el torno por medio de mordazas.	93
Figura 51.Taladrado de la pieza.....	93
Figura 52.Vista de rosca externa y zona convergente de la boquilla	94
Figura 53.Boquillas de 250 (izquierda), y 100 (derecha) m ³ /h construidas.....	95
Figura 54.Foto de carcasa de la boquilla de 50 m ³ /h construida y los insertos de 3, 12.5 y 25 m ³ /h.	95
Figura 55.Foto de boquillas de 250, 150 y 100 m ³ /h y carcasas de boquillas de 50, 25, 12.5 y 3 m ³ /h construidas.....	96
Figura 56.Foto material acero inoxidable AISI 304, para fabricación de acoples.....	97
Figura 57.Material perforado para la fabricación de acoples.....	98
Figura 58.Material mecanizado parcialmente para la fabricación de acoples para los plenums.	99
Figura 59. Tubería adquirida para la construcción de las líneas de flujo.	100
Figura 60. Corte de lámina para fabricación de plenums y tubos de salida.	101
Figura 61. Imágenes de laminas cortadas para fabricación de plenums.....	102
Figura 62. Proceso de doblado de las láminas de desarrollo de los plenums.....	102
Figura 63.Imágenes de proceso de fabricación de plenums y tubos de conexión a bridas. .	103
Figura 64. Imagen de montaje de placas frontales de los plenums en el torno....	103

Figura 65. Proceso de soldadura de los plenums.	104
Figura 66. Acoples soldados en la cara interna de los plenums.	104
Figura 67. Proceso de esmerilado de las superficies soldadas y cortadas.	105
Figura 68. Imagen de plenums contruidos.	105
Figura 69. Imágenes de proceso de esmerilado (izquierda) y torneado (derecha) de las bridas.	106
Figura 70. Imágenes de las bridas y los tubos para conexión de los plenums.	106
Figura 71. Montaje tubo y acople para soldadura.	107
Figura 72. Válvula 4"	108
Figura 73. Universales 4"	109
Figura 74. Foto de tomas de presión y temperatura.	110
Figura 75. Nivelación de la toma de presión antes de soldarse a los tubos.	110
Figura 76. Imagen de proceso de soldadura de tomas de presión y temperatura en los tubos.	111
Figura 77. Tubos soldados y terminados.	111
Figura 78. Tubería roscada a los accesorios con teflón y silicona.	112
Figura 79. Banco de Boquillas sónicas construido	112
Figura 80. Instalaciones del Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo (Brasil). ...	115
Figura 81. Esquema de la disposición de boquilla a calibrar y patrón.	116
Figura 82. Patrones de calibración de las boquillas sónicas, turbina (izquierda) y campana gasométrica (derecha)	117
Figura 83. Imágenes de bombas de vacío empleadas en la calibración, bomba para boquillas grandes (izquierda) bomba para boquilla de 3 m ³ /h.	117
Figura 84. Instalación para calibración de boquillas con patrón tipo turbina.	120
Figura 85. Contador de pulsos (izquierda) y psicrómetro (derecha) utilizados durante la calibración.	122
Figura 86. Manómetro de columna instalado durante el ensayo de estanqueidad.	123
Figura 87. Imagen de instalación para calibración de boquillas con patrón tipo campana gasométrica.	124
Figura 88. Gráfica de resultados de calibración para la boquilla de 50 m ³ /h.	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Errores de cálculo al considerar un flujo como compresible.....	14
Tabla 2. Regímenes de flujo	30
Tabla 3. Distribución de caudales para las boquillas sónicas	52
Tabla 4. Resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo en Math Cad.	55
Tabla 5. Especificaciones de carcasas e insertos para las boquillas pequeñas.....	63
Tabla 6. Tubería aguas debajo de las boquillas	69
Tabla 7. Características y función de las RTD's seleccionadas.	79
Tabla 8. Alternativas de selección de equipo generador de vacío.	87
Tabla 9. Características de válvulas	108
Tabla 10. Resultados de calibración de las boquillas sónicas	129

LISTA DE APENDICES

APENDICE A.MEDIDORES DE FLUJO DE GAS DISPONIBLES EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS DE CALIBRACIÓN.	138
APENDICE B.CALCULO DE DIAMETROS PARA BOQUILLAS SONICAS A PARTIR DE LA NORMA INTERNACIONAL	147
APENDICE C.DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESTIMADO DE LA MEDICIÓN EN EL BANCO DE BOQUILLAS SÓNICAS.	151
APENDICE D.CALIBRACIÓN DE RTD'S	160
APENDICE E.DATOS DE CALIBRACIÓN DE LAS BOQUILLAS SÓNICAS .	162

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

A	Área.
A_0	Área de la garganta.
c	Velocidad del sonido.
C_p	Calor específico a presión constante.
C_v	Calor específico a volumen constante.
C_d	Coeficiente de descarga.
C_o	Coeficiente de flujo crítico.
d	Diámetro de la garganta.
d_t	Diámetro de la toma de presión.
D	Diámetro de tubería.
f_N	Error de medición del contador patrón.
g	Aceleración gravitacional.
h	Entalpía.
k	Coeficiente isentrópico.
l	Trayectoria libre molecular.
m	Masa.
M	Número de Mach.
$\dot{m}$	Flujo másico.
p	Presión.
Pr	Número de Prandtl.
Δp	Diferencial de presión.
Q_v	Caudal volumétrico.
Q_m	Caudal másico.

Q_{v20tr}	Caudal volumétrico de referencia.
$Q_{v20tr1000}$	Caudal volumétrico de referencia con una presión de 1000 mbar.
q_m	Caudal másico.
Re	Número de Reynolds.
R_u	Constante universal de gas ideal.
R	Constante particular de gas ideal.
R_g	Radio de garganta de la boquilla.
s	Entropía.
t	Tiempo.
T	Temperatura.
V	Velocidad.
V_1	Volumen.
W	Masa molar.
x_v	Fracción molar de vapor.
Z	Factor de compresibilidad.

LETRAS GRIEGAS

α	Difusividad térmica. Absortividad.
β	Coefficiente de expansión térmica volumétrica.
δ	Espesor.
θ	Ángulo, grados o radianes.
λ	Longitud de onda, μm .
μ	Viscosidad dinámica.
κ	Conductividad térmica del gas.

SUBÍNDICES

1, 2, .. Se refiere al cuerpo que se está analizando.

0 Propiedades de estancamiento.

x Condiciones aguas arriba de la onda de choque.

y Condiciones aguas abajo de la onda de choque.

D Condiciones a la entrada de la boquilla.

P Pieza a ensayar.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PATRÓN PARA CALIBRAR MEDIDORES DE GAS BASADO EN LA TECNOLOGÍA DE BOQUILLAS SÓNICAS*

AUTORES:

Oscar Alberto Cómbita Puerto.
Ilba Geonine Cuadrado Peña**

PALABRAS CLAVES:

Patrón, Incertidumbre, Calibración, boquillas sónicas.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo del proyecto es diseñar y construir un banco patrón basado en la tecnología de boquillas sónicas, las cuales cuentan a nivel mundial con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico para la calibración de medidores de gas.

Las boquillas sónicas son fundamentadas en la norma internacional ISO 9300 y ASME / ANSI MCF-/M-1987 y fabricadas con tecnología nacional. El diseño incluye un sistema de tuberías para la conducción del flujo de aire; un sistema computarizado con el cual el metrólogo opera el banco, exhibe las diferentes variables en tiempo real a través de una interfaz gráfica, almacena las variables de la calibración y genera un informe o certificado de calibración del medidor en prueba; un sistema de bloqueo manual para la integración de cada una de las boquillas sónicas al proceso de calibración y la selección de un equipo generador de vacío encargado de generar el flujo crítico necesario para la correcta operación del banco.

Cada una de las boquillas sónicas fue calibrada en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo (Brasil), obteniéndose así bajos niveles de incertidumbre y trazabilidad a patrones internacionales.

El proyecto fue desarrollado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas con el apoyo de Colciencias y la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, con el fin de ampliar la infraestructura metrológica existente en Colombia para la calibración de medidores de gas en un rango dos veces mayor (anterior 250 m³/h, alcanzado 500 m³/h), y a una incertidumbre dos veces menor (anterior 0.7%, alcanzado 0.5%).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabit Quiroga.

SUMMARY

TÍTULO:

PATTERN BANK DESIGN AND CONSTRUCTION FOR GAS METER CALIBRATING IN SONIC NOZZLES TECHNOLOGY*.

AUTHORS:

Oscar Alberto Cómbita Puerto.
Ilba Geonine Cuadrado Peña.**

KEY WORDS:

Pattern, Uncertainty, Calibration, sonic nozzles.

DESCRIPTION:

The project objective is to design and built a pattern bank based in sonic nozzles technology counting with ample recognition world wide in metrology matter for gas meter calibration.

Sonic nozzles are based in ISO 9300 and ASME / ANSI MCF-/M-1987 international standard and manufactured with national technology. The design includes a piping systems for air flow conduction; system used by the metrologist to operate the bank, the bank shows the differents variables in real time through a graphic interface, the bank lays up the calibration variables and yields a tested-meter calibration certificate or report; a manual blocle system for integration of each one of the sonic nozzles to the calibration process and selection of vacuum generator equipment in charge of generating the critical flow necessary for proper bank performance.

Each one of a sonic nozzles was calibrated in the “Instituto de Pesquisas tecnologicas de Sao Paulo (Brazil)” obtaining small uncertainty levels and international patterns trazability.

The project was developed by “Centro de Desarrollo Tecnologico del Gas” supported by Colciencias and “School of Mechanical Engineering of Universidad Industrial de Santander”, intended to enlarge the current metrologic infrastructure in Colombia for a twice larger range gas meter calibration (former 250 m³/h, achieved 500 m³/h), and a twice smaller uncertainty (former 0.7%, achieved 0.5%).

* Degree Project.

** Faculty of Phisical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura metrológica del país para la calibración de medidores de gas requiere de sistemas de medición y personal capacitado para realizar esta labor en un ambiente confiable y seguro con el cual se le brinden garantías suficientes en los procesos de medición para así proteger al pequeño, mediano y gran consumidor y en fin para propiciar un clima de entendimiento entre los transportadores, distribuidores, comercializadores y usuarios del recurso.

Frente a esta situación, el Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, la Universidad Industrial de Santander y en su nombre la Escuela de Ingeniería Mecánica con el apoyo de Colciencias desarrollaron un proyecto como alternativa de solución aportando desarrollo tecnológico y al mismo tiempo contribuyendo a la apropiación de nuevos conocimientos en la rama del flujo de fluidos en Colombia.

El proyecto consistió en diseñar y construir un banco patrón basado en la tecnología de boquillas sónicas, las cuales cuentan a nivel mundial con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico. El diseño de las boquillas sónicas se fundamentó en la norma internacional ISO 9300, fueron fabricadas en Colombia y calibradas con patrones del Instituto de Pesquisas de Sao Paulo (Brasil).

El resultado de este proceso es un banco patrón que está en capacidad de calibrar medidores de gas en un rango de 3 a 500 m³/h (s), pudiendo ser empleado como patrón y obteniendo a partir de él niveles de incertidumbre estándar teórica inferiores a $\pm 0.4\%$.

CAPITULO 1

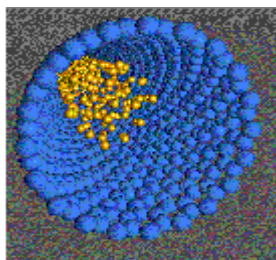
FLUJO DE FLUIDOS COMPRESIBLES

1.1 GENERALIDADES

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando es sometida a un esfuerzo cortante, sin importar la magnitud de dicho esfuerzo, y experimenta movimientos relativos entre sus partes elementales siempre que estos esfuerzos cortantes se encuentren presentes.

El transporte de un fluido se puede llevar a cabo en un canal abierto, que la mayoría de las veces esta expuesto a las condiciones atmosféricas, o en un canal cerrado, siendo esta última opción aquella en la cual se desarrollan la mayoría de las aplicaciones industriales. La forma más comúnmente utilizada es a través de una tubería de sección circular.

Figura 1. Representación del flujo de fluidos a través de conductos cerrados.



Cuando tomamos un punto o una sección transversal de referencia dentro de una tubería, el flujo se considera como la cantidad de fluido, expresada en masa o en volumen, que pasa por esa sección o punto en un lapso de tiempo. Por lo tanto, el parámetro “caudal” Q , se expresa en unidades de volumen o masa por unidad de

tiempo (m^3/h ó Kg/h). Podemos decir entonces que el caudal volumétrico de un fluido es igual al producto de la velocidad media del fluido por la sección transversal de la tubería, así:

$$Q_v = V_{\text{media}} \cdot A_{\text{transversal}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Al mismo tiempo, el caudal másico Q_m es igual al producto entre el caudal volumétrico y la densidad del fluido (ρ).

$$Q_m = Q_v \times \rho \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde la densidad de un fluido (ρ) es la razón entre su masa (m) y el volumen (V) contenido. Es decir,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 3}$$

Esta propiedad puede expresarse como una función de la presión y la temperatura, a través de un manejo matemático es posible derivar dos términos (κ y β) que representan la compresibilidad de un fluido en términos del cambio de la densidad con respecto a estas 2 propiedades, como sigue:

$$\rho = \rho(p, T) \quad \text{Ecuación 4}$$

Al derivar se obtiene:

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p dT \quad \text{Ecuación 5}$$

Dividiendo la expresión anterior por la densidad resulta:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \kappa dp - \beta dT \quad \text{Ecuación 6}$$

El parámetro (β) se denomina “coeficiente volumétrico de expansión térmica”, este coeficiente proporciona una medida de la cantidad por la cual cambia la densidad como respuesta a un cambio en la temperatura mientras la presión permanece constante, y se expresa como:

$$\beta = \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad \text{Ecuación 7}$$

(κ) representa la compresibilidad del fluido, relacionando el aumento o la disminución diferencial de su densidad representa el aumento diferencial de su densidad ocasionada por un aumento unitario en la presión a temperatura constante, se expresa como:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad \text{Ecuación 8}$$

Como en la práctica es difícil llevar a cabo la medición directa de la densidad del fluido, se realizan mediciones de temperatura y presión para inferir el valor de la densidad a partir de estas variables.

1.2 LEYES DE LA DINAMICA DE LOS FLUIDOS

Todos los análisis concernientes al movimiento del flujo de fluidos deben estar fundamentados directa o indirectamente en 4 leyes básicas que gobiernan el movimiento. Estas leyes, independientes de la naturaleza del fluido en particular, son:

1.2.1 Ley de la conservación de la masa

Al referirnos a un sistema de identidad condiciones definidas, este principio establece que la masa permanece constante, sin importar la forma o tamaño, el número de elementos en los cuales pueda dividirse o el intervalo de tiempo durante el cual este es observado.

1.2.2 Segunda ley del movimiento de newton

Esta ley expresa la relación matemática entre las fuerzas aplicadas a un sistema y la rata de cambio del momentum en función del tiempo.

1.2.3 Primera ley de la termodinámica

Relaciona las interacciones de calor y trabajo entre un sistema y sus alrededores con los cambios de estados en el sistema. Es un enunciado del principio de conservación de la energía y afirma que la energía total es una propiedad termodinámica. Este principio de conservación parte de observaciones experimentales y sostiene que ***la energía no puede crearse ni destruirse, solo puede transformarse.***

1.2.4 Segunda ley de la termodinámica

Afirma que los procesos energéticos suceden en determinada dirección y que la energía tiene calidad así como cantidad. Esta ley es útil en la determinación de los límites teóricos en el funcionamiento de sistemas.

Además de estos principios fundamentales, es usualmente necesario incluir en los análisis ciertas leyes relativas a la clase de fluido en particular. Ejemplo de esto son las ecuaciones de gas ideal, la ley de Fourier de calor por conducción y la ley de proporcionalidad entre esfuerzos cortantes y la razón de la deformación en un fluido newtoniano entre otros.

1.3 PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Los parámetros adimensionales profundizan de manera significativa en la comprensión de los fenómenos de flujo de fluidos, permitiendo aplicar resultados experimentales limitados en número a situaciones en las que se tengan diferentes dimensiones físicas y, a veces, diferentes propiedades de fluidos.

Al considerar las ecuaciones físicas que gobiernan el flujo compresible, entre ellas: ecuación de Navier-Stokes, la ecuación de continuidad, la segunda Ley de la termodinámica, y la ecuación de estado, es posible encontrar 4 parámetros adimensionales, los cuales deben ser del mismo orden para dos tipos de flujo similares. Estos son:

1.3.1 Número de Mach.

Se define como la relación entre la velocidad del fluido, V , y la velocidad del sonido c , a las mismas condiciones de presión y temperatura:

$$M = \frac{V}{c} \quad \text{Ecuación 9}$$

Al manipular matemáticamente esta expresión, elevando $\frac{V}{c}$ al cuadrado y multiplicar por $\frac{\rho A}{2}$ en el numerador y denominador, el resultado expresa en el numerador la fuerza dinámica y en el denominador la fuerza dinámica en flujo sónico, encontrándose así una medida de la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas elásticas. También se puede mostrar que el numero de Mach elevado al cuadrado, $\frac{V^2}{c^2}$ puede interpretarse como el cociente entre la energía cinética del fluido y la energía térmica del mismo, ya que la energía cinética es proporcional a V^2 y la energía térmica es proporcional a la temperatura absoluta T , la cual está

directamente relacionada con la velocidad del sonido c , como se demostrará mas adelante.

1.3.2 Número de Reynolds.

El número de Reynolds es la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Esta definido matemáticamente como:

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 10}$$

Siendo V la velocidad, D el diámetro de la tubería y ρ y μ son la densidad y la viscosidad dinámica del fluido respectivamente . Un número crítico de Reynolds hace distinción entre regímenes de flujo, tales como flujo laminar o turbulento en conductos, en la capa límite, o alrededor de objetos sumergidos. El valor particular depende de la situación. En flujo compresible, el número de Mach es generalmente más significativo que el número de Reynolds.

1.3.3 Coeficiente isentrópico.

Es la relación entre la relativa variación de presión y la correspondiente variación de densidad bajo condiciones de transformación adiabáticas y reversibles (isentrópicas). Este coeficiente puede ser determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$k = \frac{r}{\rho} \frac{\frac{dp}{p}}{\frac{d\rho}{\rho}} = \frac{r c^2}{p} \quad \text{Ecuación 11}$$

En gases considerados ideales, k es igual a la relación de calores específicos y en gases monoatómicos por ejemplo, su valor es constante e igual a 1,667. Otros como los diatómicos, incluido el aire, tienen una razón de calores específicos de 1,4 a temperatura ambiente.

1.3.4 Número de Prandtl.

El número de Prandtl, es un número adimensional que relaciona la viscosidad cinemática del fluido, con su conductividad térmica y se representa matemáticamente como:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde μ es la viscosidad cinemática, c_p es el calor específico y k es la conductividad térmica del fluido. El número de Prandtl correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa térmica límite.

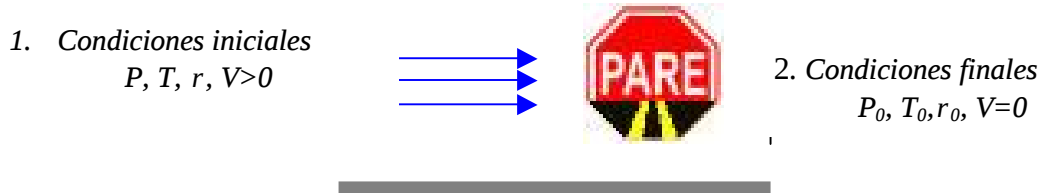
1.4 PROPIEDADES DE ESTANCAMIENTO

Cuando se estudian las propiedades de un fluido que se encuentra en movimiento, se hace necesario contar con un sistema de referencia sobre el cual basar tal estudio. Al analizar un volumen de control en un flujo a alta velocidad, generalmente se considera despreciable la energía potencial, mientras que la energía cinética adquiere gran importancia, por lo cual se considera conveniente combinar la energía cinética con la energía de flujo (entalpía) para representar la energía total del fluido, encontrándose la siguiente expresión:

$$h_1 + V_1^2 = h_0 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde h_0 se denomina entalpía de estancamiento y h_1 entalpía estática. Físicamente podemos decir que la entalpía de estancamiento representa la entalpía de un fluido cuando este se lleva al reposo adiabáticamente. Así mismo las propiedades de temperatura, presión y densidad del fluido al detenerse se denominan propiedades de estancamiento (P_0, T_0, ρ_0).

Figura 2. Representación del cambio de estado de un fluido a las condiciones de estancamiento.

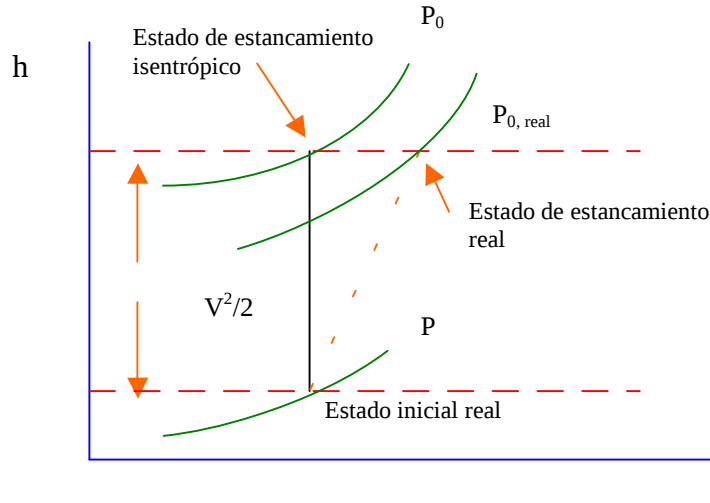


Si se considera un fluido particular, en el cual no exista interacción de calor, trabajo y cualquier cambio en la energía potencial, la entalpía de estancamiento de dicho fluido permanece constante durante un proceso de flujo permanente. Como se puede notar en la ecuación anterior, un aumento en la velocidad del fluido ocasionará una disminución en la entalpía estática.

Es importante tener en cuenta que cuando el fluido se lleva al reposo, la energía cinética que poseía en el estado inicial, se transforma en entalpía (energía interna + energía de flujo), ocasionando que la temperatura y la presión aumenten hasta el estado de estancamiento.

Los procesos de estancamiento reales (irreversibles) e isentrópicos pueden representarse en un diagrama $h-s$ (figura 3) Obsérvese que la entalpía de estancamiento del fluido (y la temperatura de estancamiento, si el fluido es un gas ideal) es la misma en ambos casos. Mientras que la presión de estancamiento real es menor que la presión de estancamiento isentrópica puesto que la entropía aumenta durante el proceso de estancamiento real como consecuencia de la fricción del fluido. Los procesos de estancamiento se aproximan a menudo como isentrópicos, y se hace referencia a las propiedades de estancamiento simplemente como propiedades de estancamiento.

Figura 3. Diagrama h-s.



Para un gas perfecto, con calores específicos constantes, la temperatura y presión de estancamiento pueden relacionarse de la siguiente forma:

$$\frac{p_0}{p} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Cualquier otra propiedad del fluido en las condiciones de estancamiento puede calcularse de la ecuación de estado. Las propiedades de estancamiento pueden ser consideradas como propiedades locales del fluido. Usualmente es más conveniente inferir la temperatura de estancamiento que medir la temperatura T .

Otro sistema de referencia comúnmente utilizado es aquel que corresponde a las condiciones críticas, es decir, aquel donde se alcanza la velocidad local del sonido (número de Mach=1).

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{c^{*2}}{c_0^2} = \frac{2}{k+1} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Ecuación 16

$$\frac{r^*}{r_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Ecuación 17

Estos sistemas de referencia permiten calcular las propiedades de un fluido cuando viaja de un punto a otro. Al medir y conocer las propiedades en un primer punto es posible inferir (a partir del sistema de referencia) por medio de relaciones matemáticas, los valores de las propiedades en un segundo punto donde es imposible medirlas directamente. Tal es el caso de las boquillas sónicas, en las cuales se requiere determinar los valores de P y T en la garganta, pero no es posible medirlos directamente porque se afectaría el comportamiento del flujo al pasar a través de ella.

1.5 DEFINICION DE FLUJO COMPRESIBLE

El flujo se puede clasificar de muchas maneras, tales como turbulento, laminar; viscoso, no viscoso o ideal; reversible, irreversible; estable o permanente, inestable o transiente; uniforme, no uniforme; rotacional, o irrotacional, compresible o incompresible.

Para cada tipo de flujo, existen hipótesis simplificadoras que conllevan a ecuaciones con las cuales es posible analizar casos particulares. Las hipótesis simplificadoras se refieren a las consideraciones relativas a la viscosidad, densidad, compresibilidad, temperatura, presión, y a la energía en sus diferentes formas. En cualquier situación, existen por lo menos tres condiciones que deben considerarse validas:

- (a) La ecuación de continuidad,

- (b) La ley de Newton del movimiento aplicada para cada partícula del fluido en cada instante, y
- (c) El principio de adherencia o no deslizamiento, es decir, la velocidad del fluido es igual a la velocidad del límite sólido con el cual está en contacto. En otras palabras, para un fluido viscoso, la velocidad del fluido relativa a la pared del conducto es cero.

Cuando la hipótesis simplificadora se realiza con base a la densidad es posible clasificar el flujo como compresible o incompresible. El flujo compresible tiene en cuenta las variaciones en la densidad a través del campo de flujo. Variaciones que en la mayoría de los casos son producto de los cambios de presión, mientras que en el flujo incompresible cuando por ejemplo el fluido se mueve a lo largo de una tubería, se desprecian las variaciones de densidad. Estrictamente hablando, ningún fluido es verdaderamente incompresible, dado que hasta los líquidos pueden variar su densidad cuando son sometidos a alta presión. En la práctica, para fluidos en movimiento con número de Mach menor de 0,3 el flujo puede considerarse normalmente incompresible.

En flujo de líquidos, es muy difícil alcanzar Mach igual a 0,3, a causa de la altísima presión requerida para inducir el flujo. Por esta razón, este tipo de flujo es considerado normalmente incompresible. La causa de esto radica en que en un fluido incompresible la velocidad de propagación de un gradiente de presión es muy alta y como se verá mas adelante la velocidad del sonido depende directamente de dicha propagación; mientras que en un fluido compresible la velocidad es menor que para el flujo incompresible.

Sin embargo en algunos problemas de flujo los números de Mach pueden considerarse bajos, pero los efectos de compresibilidad no pueden ignorarse del todo. Al usar expansiones binomiales podemos lograr formas algebraicas simples a

partir de la combinación de varias ecuaciones que describan el comportamiento del flujo, obteniéndose así la correspondiente aproximación en cada caso.

Por ejemplo si queremos deducir el error en el que se incurre al asumir un gas como flujo incompresible, en la determinación de las variaciones de presión, es posible encontrar la siguiente expresión a partir de la combinación entre las ecuaciones de conservación de la energía y la relación entre la presión y el número de Mach:

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{k-1}{2} \left(\frac{V}{c_0} \right)^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde p = presión; p_0 = presión de estancamiento, c_0 = velocidad del sonido en el estancamiento, k = coeficiente isentrópico y V = velocidad del fluido.

Expandiendo los términos del lado derecho de esta expresión por medio de teoremas binomiales, y reorganizando la expresión, obtenemos (si solo los términos arriba de $\left(\frac{V}{c_0} \right)^4$ son incluidos):

$$\frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} \rho_0 V^2} = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{V}{c_0} \right)^2 + \dots \quad \text{Ecuación 19}$$

A partir de esta ecuación podemos inferir que: si el fluido se toma como incompresible (es decir el término $\frac{V}{c_0} \ll 1$), el lado derecho de la expresión anterior se reduce a la unidad, y la ecuación resultante es idéntica a la ecuación de Bernoulli. La desviación de la unidad es entonces una medida del error en el que se

incurre al ignorar la compresibilidad. Este error en el cálculo de los cambios de presión se muestra en la siguiente tabla para varios valores de $\left(\frac{V}{c_0}\right)$.

Tabla 1. Errores de cálculo al considerar un flujo como compresible.

$M = \left(\frac{V}{c_0}\right)$	$\frac{p_0 - p}{\frac{1}{2}\rho_0 V^2} - 1$
0	0
0.1	-0.0025
0.2	-0.01
0.3	-0.0225
0.4	-0.04
0.5	-0.0625

Cabe resaltar entonces que al tratar fluidos considerados compresibles debe tenerse en cuenta las variaciones en su densidad provocadas por la presión y la temperatura. Por lo tanto es necesario adicionar los términos térmicos a la ecuación de Bernoulli para así obtener una ecuación que considere la energía total y no solamente la energía mecánica.

1.6 VELOCIDAD DEL SONIDO

La razón de cambio de la densidad con respecto a la presión es un parámetro importante en el análisis de flujo compresible y se encuentra estrechamente ligado

con la propagación de los disturbios ocasionados por pequeñas ondas de presión. Un claro ejemplo de esta situación es la velocidad del sonido.

La transmisión del sonido a través de cualquier medio se efectúa por el movimiento de pequeñas ondas de presión en el seno del medio, de aquí que la velocidad con la cual el sonido se transmite es precisamente la que corresponde a las pequeñas fluctuaciones de presión y está determinada por las propiedades elásticas del medio.

La velocidad con la que estas pequeñas ondas de presión se pueden propagar en el medio dependen muy estrechamente de la velocidad con la que las partículas del mismo puedan recuperar su posición de equilibrio tras haber sido perturbadas: cuanto más rápidamente vuelvan a su posición de equilibrio, mas rápidamente vuelven a estar en situación para ser perturbadas nuevamente y por tanto con mayor rapidez podemos hacer que esa perturbación se propague. Es por eso que en los medios en los que las fuerzas intermoleculares son más intensas, el sonido podrá propagarse más rápidamente; estos medios son los sólidos, seguidos de los líquidos y en última posición de los gases.

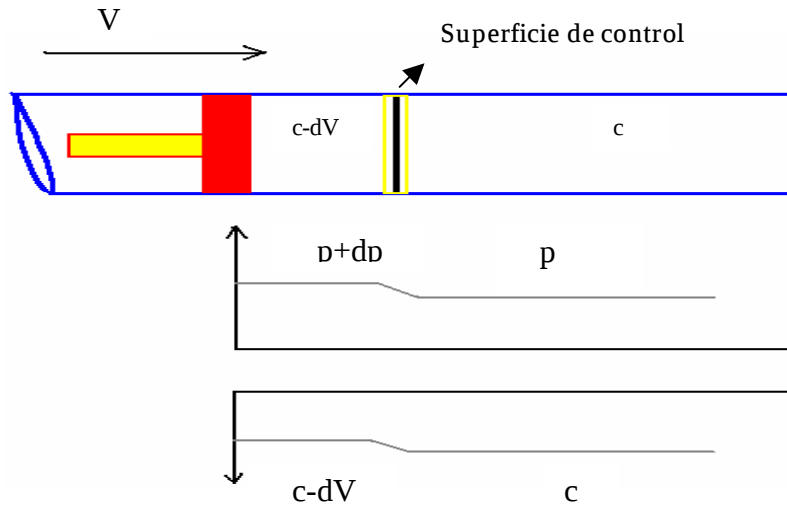
También influirá en la velocidad de propagación de la onda sonora la masa de las moléculas del medio, ya que las moléculas con menos masa se mueven más rápidamente a igual fuerza aplicada, lo cual conlleva a que recuperen también más rápidamente su posición de equilibrio. Así, el sonido se propagará con mayor velocidad en gases más ligeros que el aire, a igual condiciones de temperatura: en Helio a 200K el sonido se propaga a 832 m/s frente a los 284 m/s en el aire a 200K.

1.6.1 Velocidad de propagación de un pulso de presión en un plano.

Es posible calcular la velocidad del sonido en un plano, a través del análisis de una onda de presión infinitesimal que se mueve a lo largo de una tubería de sección

transversal uniforme. Cada onda podría haberse iniciado, por ejemplo, por el ligero movimiento de un pistón de izquierda a derecha en el interior de una tubería.

Figura 4. Propagación de una pequeña onda de presión (Frente de onda estacionario).



En la figura 4 se puede observar un sistema en el cual el observador viaja hacia la derecha con la velocidad c . Al considerar el flujo estable y analizando de derecha a izquierda se nota que la velocidad se reduce de c a $(c - dV)$. Al mismo tiempo la presión se incrementa de p a $(p + dp)$ y la densidad de ρ a $(\rho + d\rho)$.

Las ecuaciones de continuidad y conservación de momento aplicadas al volumen de control mostrado en la figura se expresan como:

Ecuación de momentum: considerando que las fuerzas cortantes son despreciables comparadas con las fuerzas de presión resulta:

$$A \times [p - (p + dp)] = \rho \times [(c - dV) - c] \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde A es el área de la sección transversal y

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A = cte \quad \text{Ecuación 21}$$

Ecuación de continuidad: es aplicada a ambos lados del frente de la onda de presión, nótese que el área a través del conducto se considera constante.

$$r \times c = (r + dr) \times (c - dc) \quad \text{Ecuación 22}$$

Al combinar las expresiones (20) y (22) y despreciando los diferenciales de segundo orden, se encuentra que:

$$c = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_s} \quad \text{Ecuación 23}$$

La relación $\partial p / \partial \rho$ es escrita como una derivada parcial a entropía constante porque el proceso se puede considerar reversible. Además, la rapidez del proceso junto con las pequeñas variaciones de temperatura, permiten que el proceso pueda considerarse adiabático y por lo tanto isentrópico.

Si la perturbación proviene de una fuente puntual, la propagación forma una onda esférica; sin embargo, a cierta distancia de la fuente, el frente de onda debe ser esencialmente lineal o unidimensional. Perturbaciones grandes, por ejemplo la explosión de una bomba, pueden viajar a velocidades mayores que las del sonido.

1.6.2 Velocidad del sonido en un gas perfecto.

Para un gas perfecto la relación entre presión y densidad en un proceso isentrópico está dada por:

$$p / \rho^k = cte \quad \text{Ecuación 24}$$

Expresando esta ecuación en forma logarítmica, diferenciando y teniendo en cuenta la ecuación de estado para un gas ideal, podemos obtener:

$$c = \sqrt{kRT} \quad \text{ó} \quad c = \sqrt{kR_u T / W} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde W es la masa molar y dado que k varia solo entre limites muy estrechos, se puede inferir que, en general, gases con pequeños pesos moleculares tienen una mayor velocidad del sonido y viceversa.

1.6.3 Velocidad del sonido en flujo incompresible.

Por definición el flujo incompresible es aquel que no experimenta cambios de densidad. La ecuación (23), indica que la velocidad del sonido es infinita en este tipo de fluido. Los pulsos de presión que son emitidos en cualquier punto se sienten simultáneamente en todos los demás puntos. Sin embargo esto no es del todo cierto ya que el flujo incompresible es una idealización, en realidad todos los fluidos son compresibles.

La velocidad que alcanza el sonido en líquidos comunes es del orden de 1524 m/s, el cual es un valor que rara vez se puede llegar a obtener en el flujo de un líquido.

1.7 CLASIFICACIÓN DE FLUJOS COMPRESIBLES

De acuerdo con la relación que exista entre la velocidad del fluido y la velocidad que el sonido alcanza en este mismo fluido es posible subdividir el flujo en diferentes categorías tal como se muestra a continuación:

1.7.1 Elipse del flujo adiabático y estable.

Si se considera una corriente estable de fluido a través de un tubo, en el cual el flujo no intercambia calor con los alrededores del tubo, la ecuación de conservación de la energía a lo largo del tubo puede expresarse como:

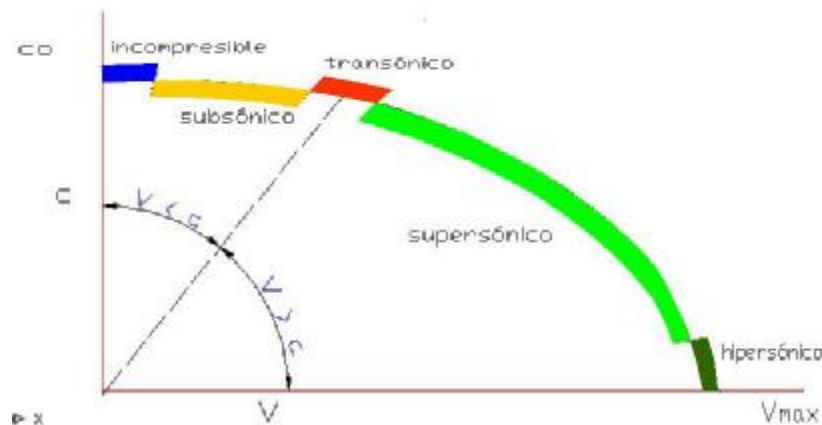
$$\frac{V^2}{2} + h = cte \quad \text{Ecuación 26}$$

Y dado que en un gas ideal, $h = c_p * T$ y $c_p = \frac{kR_g}{k-1}$. Podemos combinar estas ecuaciones, y expresar la ecuación de conservación de la energía como se muestra a continuación:

$$V^2 + \frac{2}{k-1} \times c^2 = cte = \frac{2}{k-1} \times c_0^2 = V_{\max}^2 \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde c_0 es la velocidad del sonido a las condiciones de estancamiento y $V_{\max}$ es la máxima velocidad posible en el fluido (donde la temperatura absoluta es cero). De acuerdo con la ecuación anterior, es posible representar en una grafica llamada “elipse del flujo estable” cuyos ejes coordenados sean c y V , los posibles estados del fluido en el tubo de corriente (ver figura 6). Las diferentes secciones de la grafica representan esquemáticamente las leyes que rigen el flujo compresible, presentándose en cada una de ellas significativas diferencias físicas.

Figura 5. Elipse de flujo estable y adiabático.



- ü **Flujo incompresible:** La velocidad es pequeña comparada con la velocidad del sonido. Los cambios en c son pequeños comparados con los cambios en V .

- ü Flujo compresible subsónico: La velocidad V y velocidad del sonido c son de magnitudes comparables, pero la primera es menor comparada con la segunda. Cambios en el número de Mach ocurren en primer lugar por el cambio en V y en segunda instancia por el cambio en c .
- ü Flujo transónico: La diferencia entre V y c es pequeña comparada con ambos V o c .
- ü Flujo supersónico: La velocidad del fluido y la velocidad del sonido son de magnitudes comparables, pero la primera es mayor que la segunda. Los cambios en el número de mach se presentan a través de grandes variaciones tanto en V como en c .
- ü Flujo hipersónico: La velocidad es muy grande comparada con la velocidad del sonido. Los cambios en la velocidad son muy pequeños, y las variaciones en el número de Mach son exclusivamente dependientes de los cambios en c .

1.8 FLUJO UNIDIMENSIONAL E ISENTROPICO EN TOBERAS

El flujo unidimensional no considera variaciones en las propiedades del fluido a lo largo de la sección transversal a la dirección de flujo y las condiciones se expresan en términos de valores promedios de velocidad, densidad y otras propiedades. El flujo a través de un conducto, por ejemplo, puede en general caracterizarse como unidimensional. Es por eso que de aquí en adelante se asumirá el flujo bajo esta condición ya que simplifica los problemas prácticos de ingeniería y la información que proporciona es bastante aproximada y segura[§].

[§] En metrología sin embargo los resultados obtenidos a partir de las consideraciones de flujo unidimensional no son del todo seguros y es necesario tener en cuenta todos los factores que de esta asunción puedan desviar los resultados de una medición.

El flujo unidimensional puede ser tratado a su vez como isentrópico. El flujo adiabático sin fricción o isentrópico es una idealización que no puede alcanzarse en el flujo de gases reales. Sin embargo, existen situaciones en las cuales el flujo se aproxima a este límite.

El flujo en boquillas y medidores venturi no presenta efectos considerables de fricción debido a las cortas distancias recorridas. Por otro lado la transferencia de calor es mínima ya que los cambios que sufren las partículas son suficientemente pequeños como para no generar gradientes de velocidad y temperatura importantes. En ciertos casos cuando los efectos de fricción y arrastre no son despreciables, un análisis hecho sobre la base de flujo isentrópico nos dará las condiciones ideales y servirá como un modelo de comparación para el problema real de flujo. El flujo isentrópico define las condiciones ideales a utilizar en el cálculo de las eficiencias de los diferentes dispositivos de flujo, tal es el caso de las boquillas y los difusores.

1.8.1 Efectos de la variación de área de flujo

Para desarrollar las ecuaciones que expresen las variaciones de propiedades de las condiciones estáticas hasta las de las de estancamiento con el número de Mach para la presión, temperatura y densidad se relacionaran estas propiedades con la velocidad y el área de flujo bajo la consideración de un flujo isentrópico y unidimensional.

Al diferenciar y combinar las ecuaciones de conservación de la masa (21) y conservación de la energía (26) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - M^2) \quad \text{Ecuación 28}$$

A partir de esta relación podemos describir la variación de la presión en función del área de flujo. Si tenemos presente que ρ , A y V son cantidades positivas, podemos inferir lo siguiente:

- En flujo subsónico ($M < 1$), el término $1 - M^2$ es positivo, por lo tanto los cambios en el área y la presión deben tener el mismo sentido $\frac{dA}{dp} > 0$. Por ejemplo; cuando el área aumenta la presión también aumenta. Esta es la razón por la cual en el flujo subsónico a través de un ducto convergente la presión disminuye cuando el área disminuye (toberas subsónicas) y aumenta en ductos divergentes (difusor subsónico).
- En el flujo supersónico ($M > 1$), el término $1 - M^2$ es negativo, por lo cual dA y dP deben tener signos contrarios $\frac{dA}{dp} < 0$. Es decir, la presión del fluido debe disminuir cuando el área aumenta y viceversa. Por lo tanto a velocidades supersónicas, la presión disminuye en ductos divergentes (toberas supersónicas) y aumenta en ductos convergentes (difusor supersónico).

Otra expresión importante se obtiene si en la ecuación de conservación de la masa se sustituye el término $\rho \cdot V$ por $-dP / dV$:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} (1 - M^2) \quad \text{Ecuación 29}$$

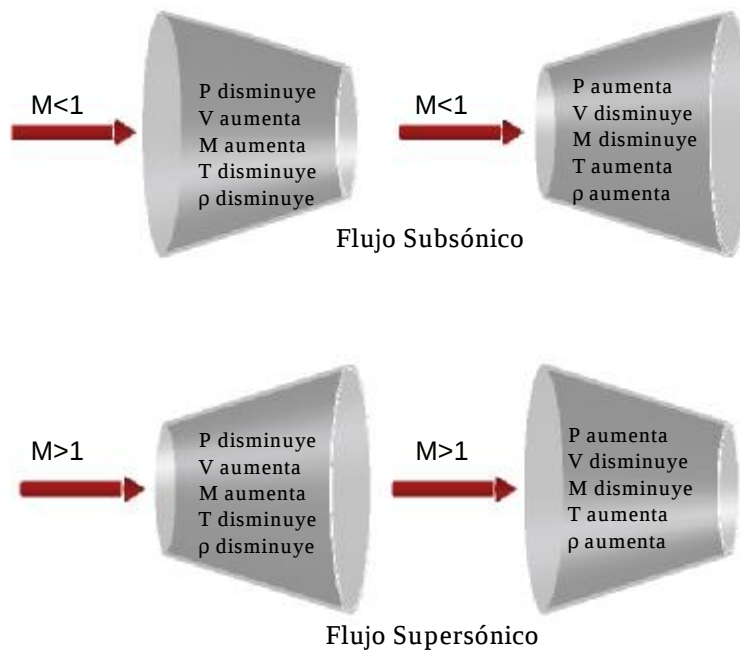
De donde podemos decir que:

- Para el caso de flujo subsónico ($M < 1$), la relación $\frac{dA}{dV} < 0$
- Para el sónico ($M = 1$), la relación $\frac{dA}{dV} = 0$

- Para el supersónico ($M > 1$), la relación $\frac{dA}{dV} > 0$

En la figura 6 se presentan en forma esquemática las variaciones de las propiedades de un fluido en relación al área de flujo para el caso subsónico y supersónico.

Figura 6. Cambios de propiedades en función del área

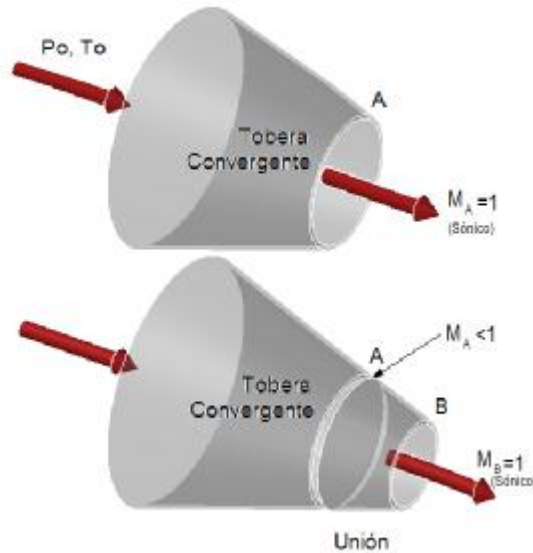


La forma adecuada de una tobera depende entonces de la velocidad más alta deseada en relación con la velocidad del sonido. ***Para acelerar un fluido es necesario utilizar una tobera convergente a velocidades subsónicas y una tobera divergente a velocidades supersónicas.***

Por otro lado con una tobera convergente la velocidad mas alta que se puede conseguir es la sónica, la cual se presentará en la garganta. Alargando la boquilla, no se consigue acelerar mas allá de la velocidad sónica el flujo, la máxima velocidad seguirá siendo la correspondiente a el número de $M=1$, la única diferencia radica en que para una

boquilla más larga con una sección de salida más corta, el flujo másico disminuirá dada la menor área de paso.

Figura 7. Velocidades en una tobera convergente



1.8.2 Relaciones matemáticas para las propiedades en el flujo isentrópico.

A continuación se presentan las relaciones de presión, densidad y temperatura como funciones del número de Mach. Estas expresiones se basan en la consideración de un flujo isentrópico y con calores específicos constantes.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Ecuación 32}$$

Para las propiedades críticas, donde el $M=1$ (la garganta de la tobera), las fórmulas resultantes al reemplazar el valor de $k=1.4$ en el caso del aire son:

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{c^{*2}}{c_0^2} = \frac{2}{k+1} = 0.8333 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.5283 \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.6339 \quad \text{Ecuación 35}$$

Estas expresiones son útiles, ya que a partir de ellas se obtiene una relación teórica entre las propiedades a la entrada y garganta de la tobera para las cuales se alcanza el flujo crítico.

1.8.3 Flujo de masa y estrangulamiento en el flujo isentrópico.

Partiendo de las definiciones de flujo másico ecuación (21), velocidad del sonido ecuación (23) y relaciones entre propiedades estáticas y de estancamiento ecuaciones (30) y (31) es posible encontrar la siguiente expresión:

$$\frac{m}{A} = \frac{p_0 \sqrt{k}}{\sqrt{RT_0}} M \left(\frac{1}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad \text{Ecuación 36}$$

Esta ecuación representa el caudal másico por unidad de área a través de una tobera para un fluido en particular, se aprecia que la relación de flujo de masa es función de las propiedades de estancamiento del fluido, el área de flujo y el número de

Mach. La ecuación anterior es válida en cualquier sección transversal, por lo que $\dot{m}$ puede evaluarse en cualquier punto a lo largo de la longitud de la tobera.

Para un fluido específico (k, R) a unas condiciones de entrada dadas (T_0, p_0, ρ_0), se puede demostrar que la masa por unidad de área tiene un máximo en $M=1$ diferenciando la ecuación anterior respecto a M y haciendo el resultado igual a cero. Es posible expresar esta ecuación en términos de las propiedades críticas, lográndose la siguiente ecuación:

$$\frac{\dot{m}}{A^*} = \frac{p_0 \sqrt{k}}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad \text{Ecuación 37}$$

Y combinando las ecuaciones (36) y (37) resulta:

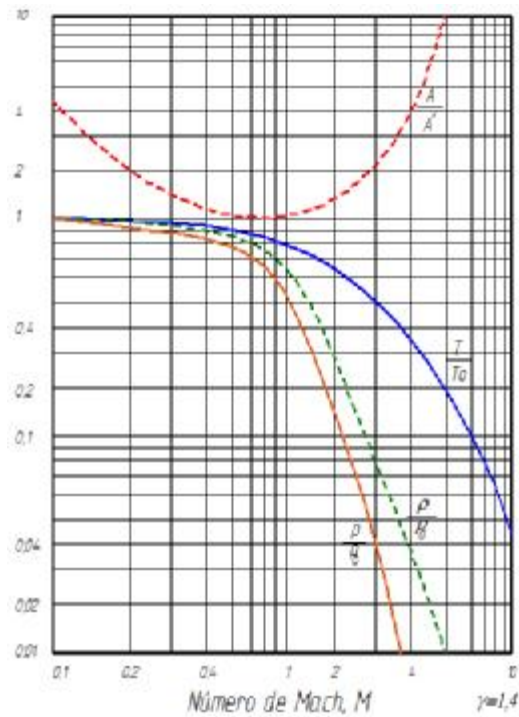
$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \right] \quad \text{Ecuación 38}$$

Esta relación muestra la variación del área de flujo a lo largo de una tobera en relación al área de la garganta A^* .

Expresar las variables de flujo en términos del número de Mach es de gran conveniencia y una manera de hacerlo es graficando o tabulándolas como una función de M para cada k . La siguiente figura presenta las funciones para un gas perfecto $k = 1.4$ **.

** Las tabulaciones para otros tipos de gases (otros k) pueden encontrarse en: Shapiro [1].
otros.

Figura 8. Relaciones entre propiedades de un flujo unidimensional, isentrópico de un gas ideal.

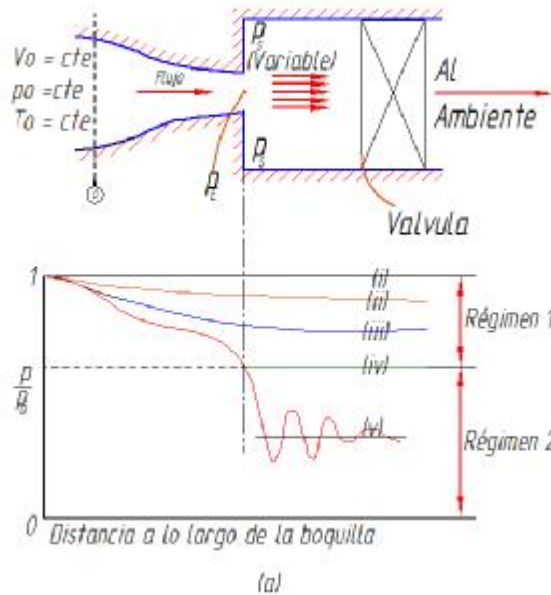


1.8.4 Operación de toberas bajo variaciones de presión.

Bajo las consideraciones de flujo isentrópico y unidimensional se presentarán a continuación las características principales del comportamiento de un fluido cuando pasa a través de una tobera para diferentes relaciones de presión.

ü Toberas convergentes:

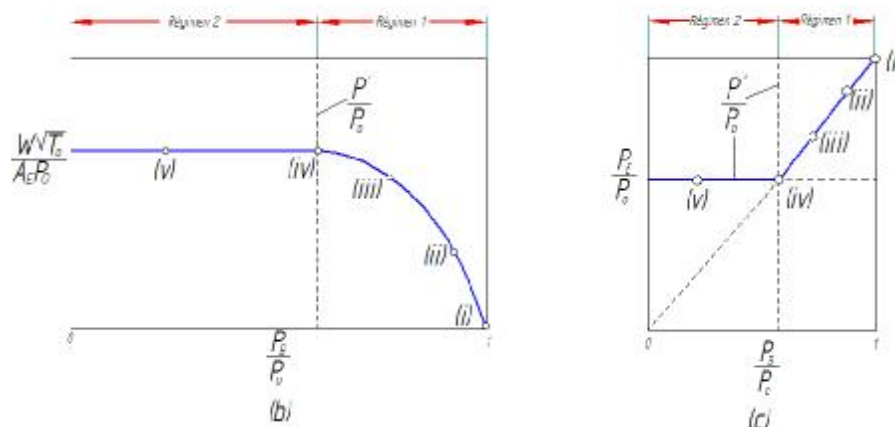
Figura 9. Tobera convergente con expulsor.



La figura 9 muestra un conducto con una entrada larga, en la sección 0 los valores de p_0 y T_0 permanecen constantes (ya que se considera un depósito en el cual la velocidad es cero y el flujo a través de la tobera se asume isentrópico). Lo anterior implica que las presiones y temperatura de estancamiento a través de cualquier sección transversal son iguales a las condiciones de la entrada. La descarga se realiza a una región donde la contrapresión, p_B , es controlable por medio de una válvula.

Si se realizan variaciones en los valores de p_B , y si p_E denota la presión en el plano de la salida de la boquilla, es posible observar los efectos resultantes en la distribución de presión a lo largo de la longitud de la tobera, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Regímenes de flujo a través del conducto al variar las relaciones de presión.



Al manipular los valores de la contrapresión paulatinamente podemos resumir los efectos de la siguiente manera:

- $p_B / p_0 = 1$; se muestra como la condición (i) de la figura 10 La presión es constante y no existe flujo a través de la boquilla.
- Si p_B se reduce a un valor menor que p_0 , como se muestra en la condición (ii), se puede observar un constante decremento en los valores de presión a lo largo de la boquilla.
- Cuando la relación de presiones alcanza un valor critico, condición (iii), el flujo de masa alcanza un valor máximo y el $M=1$ en la garganta.
- Si la reducción en las relaciones de presión continúa, como se muestra en la condición (iv), no se producen cambios en las condiciones del flujo que atraviesa la boquilla y el valor de M sigue siendo igual a la unidad. Por lo tanto las condiciones de presión y de caudal son iguales a las de la condición anterior. La distribución de presión en el plano a la salida no puede predecirse fácilmente y por eso se presenta en la grafica como una onda curva.

De lo anterior cabe destacar varios aspectos, entre ellos el hecho de que se pueden identificar dos tipos de regímenes, si los denotamos como régimen I y régimen II, pueden ser comparados como sigue:

Tabla 2. Regimenes de flujo

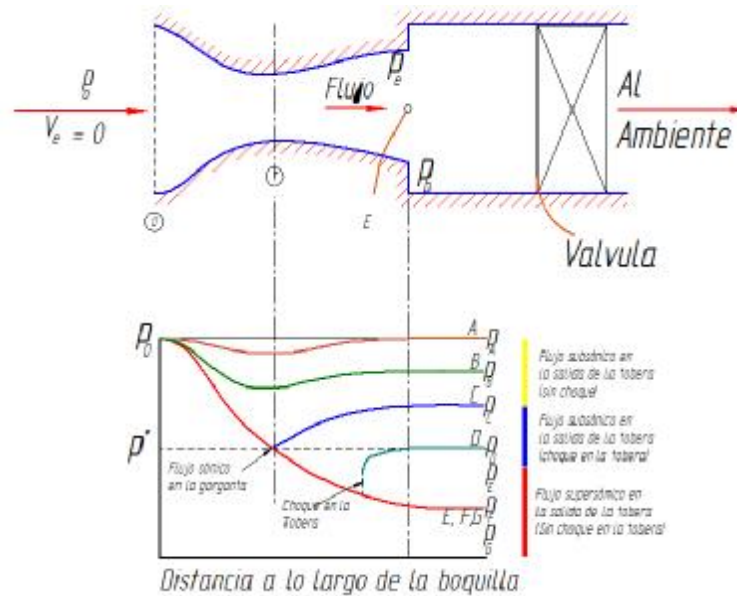
Regimen I	$p_B / p_0 > p^* / p_0$ $p_E / p_0 \cong p_B / p_0 \quad M < 1$	$\frac{w\sqrt{T_0}}{A_g p_0}$ es dependiente de la relación p_B / p_0
Regimen II	$p_B / p_0 < p^* / p_0$ $p_E / p_0 = p^* / p_0 \quad M = 1$	$\frac{w\sqrt{T_0}}{A_g p_0}$ es independiente de la relación p_B / p_0

En el régimen I los valores de p_B y p_E son virtualmente idénticos. Una simple boquilla convergente es utilizada normalmente para acelerar un flujo bajo condiciones en las que p_B / p_0 es menor que la relación crítica, para lo cual el caudal másico estará dado por la ecuación (37) y solamente se requieren las mediciones de p_0 , T_0 y el área de la garganta para realizar el cálculo.

Cuando se requieran mediciones exactas, es necesario que la tobera sea calibrada para así tener en cuenta los efectos de la capa límite y las desviaciones de flujo unidimensional.

ü Toberas convergentes-divergentes:

Figura 11. tobera convergente-divergente con expulsor.



Como ya se demostró la velocidad más alta a la que un fluido se puede acelerar en una tobera convergente es a la velocidad sónica, la cual se presenta en el área de la garganta. Las velocidades supersónicas se pueden alcanzar al unir una sección de flujo divergente a la tobera subsónica en la garganta. Si realizamos los mismos pasos que llevamos a cabo con la tobera convergente, para unas condiciones de entrada dadas y con variaciones en la contrapresión; se obtiene lo siguiente en una sección de flujo convergente divergente:

Al considerar en la figura 11, las condiciones de entrada como las de estancamiento, p_0 , T_0 , $V=0$ y realizar variaciones en la contrapresión resulta:

- $p_B = p_0$, no existe flujo ya que la diferencia de presiones es nula.
- $p_C < p_B < p_0$, si esta condición se cumple en una pequeña cantidad, el comportamiento del flujo es similar a aquel que pasa a través de un tubo venturi, es decir el flujo se acelera en la sección convergente alcanzando un máximo valor

en la garganta, menor que el flujo estrangulado (con $M < 1$) y desacelerando a través del difusor, perdiéndose así la ganancia de velocidad.

- Cuando $p_B = p_C$, el número de Mach en la garganta es igual a la unidad. Pero la sección divergente continúa actuando como un difusor, desacelerando el flujo. ***Cabe resaltar que en la sección convergente no se producirán cambios por mayores reducciones en la contrapresión ni en la relación de flujo de masa que pasa a través de ella ni en el comportamiento del flujo en general, sin embargo si afectará el carácter del flujo en la sección divergente.***
- Cuando $p_C > p_B > p_E$, observamos que el fluido que alcanzó la velocidad sónica en la garganta, continúa acelerándose ahora en la sección divergente cuando la presión disminuye. Sin embargo, esta aceleración terminará repentinamente, cuando una discontinuidad se desarrolle en la sección entre la garganta y el plano de salida, ocasionando una caída repentina en la velocidad hasta niveles subsónicos y un súbito aumento en la presión. El fluido continúa en el resto de la sección divergente desacelerándose. El flujo a través de la discontinuidad, denominada choque es altamente reversible, y por lo tanto no es posible considerarla como isentrópica. A medida que la contrapresión sigue disminuyendo la onda de choque continua moviéndose aguas abajo de la garganta y cuando $p_B = p_E$, el choque se forma en el plano de la salida de la tobera. Ahora entonces el flujo a lo largo de toda la tobera es supersónico y puede considerarse como isentrópico. Sin embargo, la velocidad del fluido cae a niveles subsónicos exactamente antes de abandonar la tobera cuando ocurre el choque normal.
- Cuando $p_E > p_B > 0$, el flujo en la sección divergente es supersónico, y el fluido se expande hasta p_F , en la salida de la tobera, sin que se formen choques normales dentro de ella. Cuando $p_B = p_F$, no suceden choques dentro o fuera de la tobera.

Cuando $p_B > p_F$, la presión del fluido aumenta de p_F a p_B , irreversiblemente en la estela de salida de la tobera, creando los llamados choques oblicuos.

1.8.5 Choque normal en flujo isentrópico.

Para ciertas condiciones definidas en un fluido estable dado, no siempre es posible que las diferentes propiedades del fluido varíen en una forma uniforme y continua. Por ejemplo, para un flujo supersónico en un ducto en el cual la presión de descarga es demasiado alta para permitir que el flujo siga siendo supersónico, experimentará una discontinuidad llamada onda de choque. El fluido experimenta un cambio en todas sus propiedades físicas a través de la onda de choque y particularmente la discontinuidad en la presión hace posible que el fluido tenga la presión de descarga apropiada. Tales discontinuidades (a través de la onda de choque), no son isentrópicas aun en flujos que podrían de otra manera, ser isentrópicos.

Cuando un fluido pasa a través de un frente de choque estacionario incrementa repentina e irreversiblemente la presión y disminuye su velocidad. Esto también produce cambios de dirección excepto para aquellos casos en los que el choque es perpendicular (normal) a la dirección de flujo. Cuando el choque ocurre en este plano normal el fenómeno es más fácil de analizar.

Han sido llevados a cabo varios intentos por entender la naturaleza física del choque, un ejemplo de estos es el empleo de fotografías especiales de los flujos en ductos y alrededor de los proyectiles. Estas fotografías muestran que la discontinuidad en las propiedades del fluido es muy notable. Se tiene la certeza que para un choque normal se encuentran espesores de alrededor de 10^{-5} pulgadas. El choque es tan delgado que es verdaderamente difícil obtener un dato sobre la transferencia de calor y sobre el fenómeno viscoso que se realiza en el interior de la onda de choque. Afortunadamente en la mayoría de los casos es suficiente con determinar la variación (cambio neto) en las propiedades del fluido a través de la

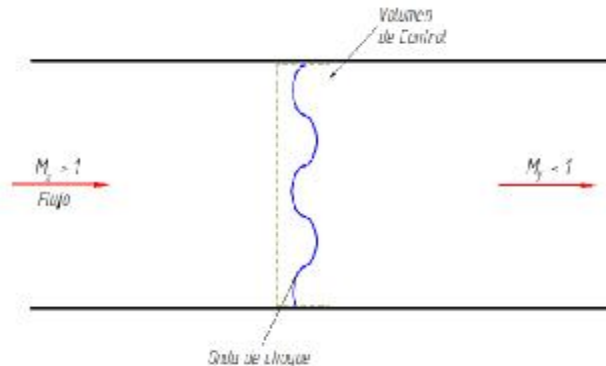
onda de choque. A continuación se presentará una manera de determinar dichas variaciones.

ü Ecuaciones fundamentales para el choque normal:

En un volumen de control como el mostrado en la figura 12 las condiciones aguas arriba y aguas debajo de la discontinuidad se designaran como x y y . Al despreciar la transferencia de calor a través de la superficie de control y asumir el flujo estable, es posible encontrar la siguiente expresión a partir de la aplicación del principio de conservación de la energía:

$$h_x + \frac{V_x^2}{2} = h_y + \frac{V_y^2}{2} = h_0 \quad \text{Ecuación 39}$$

Figura 12. Condiciones alrededor de una onda de choque.



Donde h_0 , es la entalpía de estancamiento a ambos lados de la onda de choque. Si las áreas a lado y lado de la discontinuidad se consideran iguales al aplicar la ecuación de la conservación de la masa resulta la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho_x V_x = \rho_y V_y = \text{constante} \quad \text{Ecuación 40}$$

Además la aplicación del principio de conservación de la cantidad de movimiento a este volumen de control nos da una tercera ecuación básica:

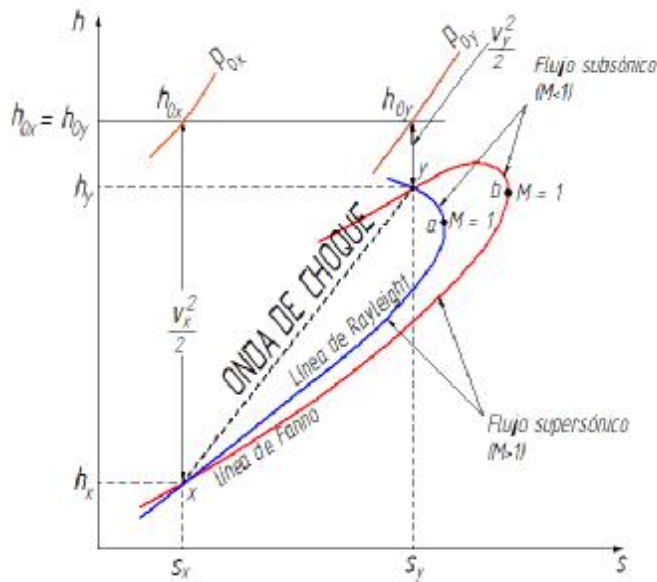
$$p_x - p_y = \frac{\dot{m}}{A} \times (V_y - V_x) \quad \text{Ecuación 41}$$

Estas 3 ecuaciones fundamentales, están expresadas en términos de p, ρ, V y T (implícita en h), sin embargo se hace necesaria una relación mas antes de que las propiedades desconocidas de un lado del choque puedan ser expresadas en términos de las conocidas del otro lado. Una relación conveniente es la ecuación de estado del fluido. La solución de un conjunto de ecuaciones con 4 variables no necesariamente es fácil de realizar. Frecuentemente se utilizan métodos que incluyen aproximaciones, pero en el caso de un gas perfecto, la ecuación de estado es tal, que hace posible la obtención de soluciones exactas.

ü Líneas de Fanno y Rayleigh. Al combinar las ecuaciones de la conservación de la masa y la energía en una sola ecuación y graficarla sobre el diagrama $h-s$, empleando relaciones de propiedades, se obtiene una curva denominada Línea de Fanno, el cual es el lugar geométrico de los estados que tienen el mismo valor de entalpía de estancamiento y de flujo de masa por área de flujo unitaria. En general los efectos producidos por la fricción son los que se requieren para trasladarse sobre la línea de Fanno, desde un estado x hasta cualquier otro estado sobre la línea.

De igual manera, la combinación de las ecuaciones de conservación de la masa y de momentum en una sola ecuación que se grafica sobre un diagrama $h-s$ produce otra curva denominada curva de Rayleigh. Los estados sobre esta línea tienen diferentes valores de entalpía de estancamiento y se alcanzan variaciones entre ellos a través de la línea gracias a los efectos de transferencia de calor. Las dos líneas se presentan en el diagrama $h-s$ de la siguiente figura.

Figura 13. Líneas de Rayleigh y Fanno.



Como es posible demostrar los puntos de máxima entropía en estas líneas se presentan en **a** y **b** y corresponden a un $M=1$. El estado de la parte superior de cada curva es subsónico y en la parte inferior supersónico a partir de los puntos **a** y **b**, Esto debido a que los puntos debajo de ellos tienen entalpías estáticas mucho menores que las entalpías de estancamiento, lo que significa que la mayor parte de la energía con la que cuentan se encuentra representada por la velocidad que lleva el fluido, a diferencia de los puntos superiores, los cuales se encuentran muy próximos a las condiciones de estancamiento y por lo tanto su energía cinética es baja.

Las líneas de Fanno y Rayleigh se intersectan en dos puntos, (puntos x y y) que representan los dos estados en los cuales las tres ecuaciones de conservación se satisfacen. Uno de estos (estado x) corresponde al estado antes del choque, y el otro (estado y) corresponde al estado después del choque. **El flujo es supersónico antes del choque y subsónico después**, por ello el flujo debe cambiar de supersónico a subsónico si ocurre un choque, dado que la segunda ley limita el fenómeno en la dirección de aumento de entropía. Cuanto mayor sea el número de Mach antes del choque, tanto más intenso será este. En el caso limite de $M=1$, la onda de choque viene a ser

simplemente la onda sónica. (Observe de la figura anterior) $s_y > s_x$. Esto se esperaba porque el flujo a través del choque es adiabático, reversible y la segunda ley así lo establece.

ü Choque normal en un gas ideal:

Al aplicar la ecuación de la conservación de la energía (39) en el caso de un gas ideal es posible encontrar las siguientes relaciones entre las propiedades del gas con calores específicos constantes antes y después del choque, en función de los números de Mach:

$$\text{Temperaturas: } \frac{T_y}{T_x} = \frac{1 + \frac{k-1}{2}M_x^2}{1 + \frac{k-1}{2}M_y^2} \quad \text{Ecuación 42}$$

$$\text{Presiones: } \frac{p_y}{p_x} = \frac{M_x \sqrt{1 + \frac{k-1}{2}M_x^2}}{M_y \sqrt{1 + \frac{k-1}{2}M_y^2}} \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\text{Números de Mach: } M_y^2 = \frac{M_x^2 + \frac{2}{k-1}}{\frac{2k}{k-1}M_x^2 - 1} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\text{Cambio de entropía: } s_y - s_x = c_p \ln \frac{T_y}{T_x} - R \ln \frac{p_y}{p_x} = c_p \ln \frac{\frac{T_y}{T_x}}{\left(\frac{p_y}{p_x}\right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad \text{Ecuación 45}$$

Como se mencionó anteriormente si el plano del choque es inclinado un ángulo cualquiera con respecto al la dirección de flujo, el fluido que pasa a través de el no solo sufre cambios en la presión y la velocidad sino también en la dirección. En este

caso el choque se denomina oblicuo y las ecuaciones demostradas anteriormente cambian un poco en su forma para adecuarse a unos nuevos sistemas de referencia.

1.8.6 Formación de ondas de choque

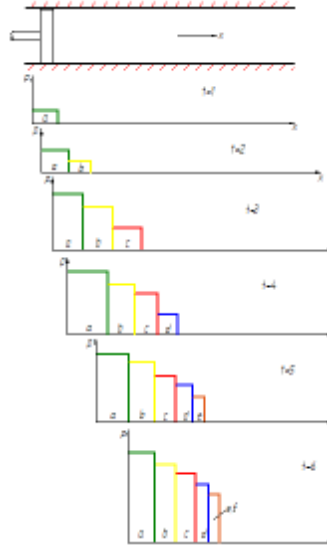
Como se ha demostrado, la segunda ley de la termodinámica implica que las ondas de choque llevan implícitas un aumento en la entropía (o una pérdida en la presión de estancamiento), y que gracias a esto es imposible que el fenómeno ocurra de subsónico a supersónico.

Para explicar de una manera sencilla el mecanismo físico a través de el cual se propagan los choques de compresión, tendremos en cuenta que cada elemento de superficie límite de la corriente del fluido, promueve el movimiento del fluido que lo rodea y de esta manera se hace posible la propagación de un pulso de presión dentro del fluido. También es necesario considerar que un punto que se encuentre en el estado estable es siempre alcanzado a través de una serie de estados de flujo transiente, los cuales alcanzan de manera asintótica el estado estable después de un largo período de tiempo.

Por lo anterior, para explicar la existencia de las ondas de choque en un ducto, es necesario examinar la forma en la cual la condición de estado estable es alcanzada a partir de una condición de no movimiento.

ü Descripción física del desarrollo de una onda.

Figura 14. Representación de frentes de onda formados en tiempos sucesivos mientras un pistón acelera por medio de una serie de impulsos igualmente espaciados.



Basados en la figura 14 consideraremos lo siguiente:

El pistón acelera de izquierda a derecha entre un gas lo cual inicia un pequeño movimiento de este en el ducto. Para propósitos de análisis supondremos que la aceleración gradual es aproximadamente llevada a cabo a través de una serie de incrementos instantáneos de tasa de velocidad que ocurren a igual intervalo de tiempo, con el pistón viajando a una tasa uniforme entre cada par de impulsos de aceleración.

En la figura, la distribución de presión en el ducto se muestra esquemáticamente en varios tiempos después de haberse iniciado el movimiento. El eje vertical indica la posición instantánea del pistón y el horizontal el instante de tiempo t . Después del primer impulso de aceleración del pistón, por ejemplo, en $t=1$, la onda de presión (se muestra como un frente vertical) se mueve hacia la derecha a través del conducto a una corta distancia siendo influenciada la masa encerrada en el espacio “a”. La masa de gas “a” sufre un débil incremento de presión y es movida hacia la derecha con la

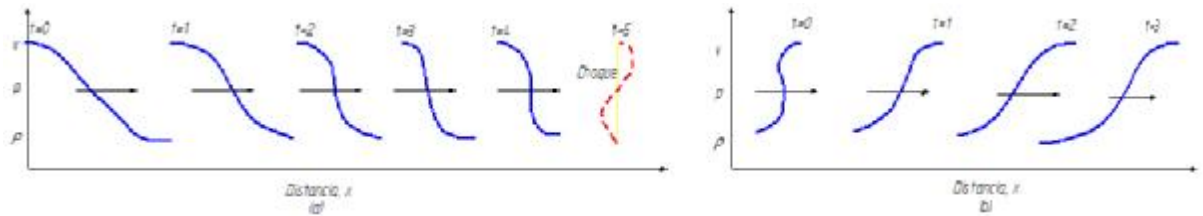
misma velocidad del pistón. Entre $t=1$ y $t=2$, la masa “a” recibe un incremento adicional en velocidad y presión gracias a la segunda aceleración del pistón, y la onda original viaja a lo largo del ducto e imparte presión y velocidad a un pulso de masa “b”. Este proceso continua con cada onda de presión que viaja aguas abajo y las nuevas ondas iniciadas por sucesivas aceleraciones del pistón.

Ahora cada una de esas ondas de presión viaja con la velocidad local del sonido relativa al fluido a través del cual están pasando. Pero las masas más cercanas al pistón tienen movimientos mayores que aquellos que se encuentran mas alejados del pistón. Además, como el proceso es isentrópico, las masas cercanas al pistón tienen mayores velocidades del sonido, en virtud de las mayores temperaturas asociadas con sus mayores valores de presión. Consecuentemente, las ondas de presión más cercanas al pistón tienden a alcanzarse a las ondas que se encuentran mas alejadas de él. Por ejemplo, al referirnos a $t=3$, la onda en la masa “a” viaja mas rápido que la onda en la masa “b”, porque “a” se está moviendo mas rápidamente hacia la derecha y también porque la velocidad del sonido en “a” es mayor que la velocidad del sonido en “b”.

El resultado neto de este proceso es aumentar y aumentar hasta que se llega a un punto como el correspondiente a $t=6$, aquí el gradiente de presión se vuelve infinito. Entonces en $t=6$, una pequeña onda de compresión ha sido formada, el choque continuará creciendo y fortaleciéndose mientras el proceso continúe.

Un análisis similar aplicado al lado izquierdo del movimiento del pistón, por ejemplo, para una onda expansión, indica que las ondas de expansión llegaron a tener una pendiente menor que el tiempo de transito. **Entonces, dada la no-linealidad del movimiento de una onda finita, las ondas de compresión llegan a tener una mayor pendiente y consecuentemente forman una discontinuidad, mientras que las ondas de expansión se propagan hacia fuera y por lo tanto son incapaces de sostener una discontinuidad.**

Figura 15. Desarrollo de la formación de ondas de constante intensidad.



Dado que las ondas de expansión son incapaces de sostener una discontinuidad es posible aplicar este fenómeno a la medición de flujo, ya que al emplear una boquilla sónica convergente-divergente se tienen garantías de que una vez se alcance el flujo critico las discontinuidades generadas aguas debajo de la boquilla no se pueden propagar aguas arriba y por lo tanto el flujo que pasa a través de la garganta no se verá afectado.

En la Figura 15 se muestran en forma sucesiva las apariciones de una onda que se forma a partir de un constante cambio de presión total, correspondiente al caso donde el pistón acelera a una tasa constante y entonces se mueve a una velocidad constante; esto es análogo al caso de un proyectil que arranca desde el reposo y acelera a una velocidad final constante. La forma de la onda en un instante dado es definida como la curva de algunas propiedades del fluido (p , V o ρ) graficadas a una distancia x .

CAPITULO 2

DISEÑO DEL BANCO PATRON

Existen muchos dispositivos empleados como patrones para calibrar medidores de flujo gas, entre ellos las boquillas sónicas a las cuales aplica toda la teoría de flujo compresible presentada en el capítulo anterior. Entre las principales ventajas que destacan a las boquillas sónicas como patrones de calibración frente a los otros tipos de medidores patrones se encuentran:

- § Gran estabilidad a largo plazo, gracias a que el dispositivo primario (boquillas sónicas) no contiene partes móviles y las piezas no sufren desgastes excesivos a través del tiempo de servicio.
- § Bajos valores de incertidumbre, la teoría del flujo de fluidos a alta velocidad, bajo las consideraciones de flujo isentrópico y unidimensional garantiza la no influencia de muchos de los factores que producen disturbios e irregularidades difícilmente cuantificables. Esto gracias a que los disturbios aguas abajo de la boquilla nunca se pueden propagar aguas arriba.
- § Facilidad de operación, dadas las condiciones de funcionamiento de estos dispositivos como medidores de flujo, no se requieren procedimientos especiales ni rigurosos para la determinación de los valores caudal.
- § Recuperación de presión, el diseño del difusor a la salida produce una recuperación de presión a través de la boquilla de la presión absoluta aguas

arriba, dependiendo del tamaño de la boquilla, lo cual disminuye las pérdidas en el sistema y por lo tanto requiere de menores costos.

El método de prueba con el patrón de boquillas sónicas esta basado en el principio de flujo crítico o velocidad crítica; el cual consiste en que un gas fluyendo a través de una boquilla con buen acabado superficial incrementará su velocidad al mismo tiempo que su diferencial de presión a través de la boquilla, hasta llegar a la velocidad crítica o velocidad del sonido en la garganta. Tal como se demostró anteriormente esta es la velocidad máxima a la cual el gas puede viajar esperando un rango de presiones bajo el que muchos medidores son usados y probados.

El “Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas” teniendo en cuenta todas estas razones que sustentan desde el punto de vista metrológico el empleo de la tecnología de boquillas sónicas como patrones de calibración, presentó ante Colciencias un proyecto de investigación titulado “Diseño y construcción de un banco patrón para calibrar medidores de flujo de gas basado en la tecnología de boquillas sónicas”, el cual fue aprobado, financiado por las 2 entidades y desarrollado durante la realización del presente proyecto.

2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL BANCO

Es un banco patrón para calibrar medidores de gas basado en la tecnología de boquillas sónicas, las cuales cuentan a nivel mundial con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico, particularmente como patrones de transferencia.

Las boquillas sónicas están fundamentadas en la norma internacional ISO 9300 y fabricadas con tecnología nacional. Además de las boquillas el banco consta de varios sistemas entre ellos: un sistema de tuberías para la conducción del flujo de

aire y un sistema de adquisición de datos. Con estas características de diseño la proyección de operación del banco es:

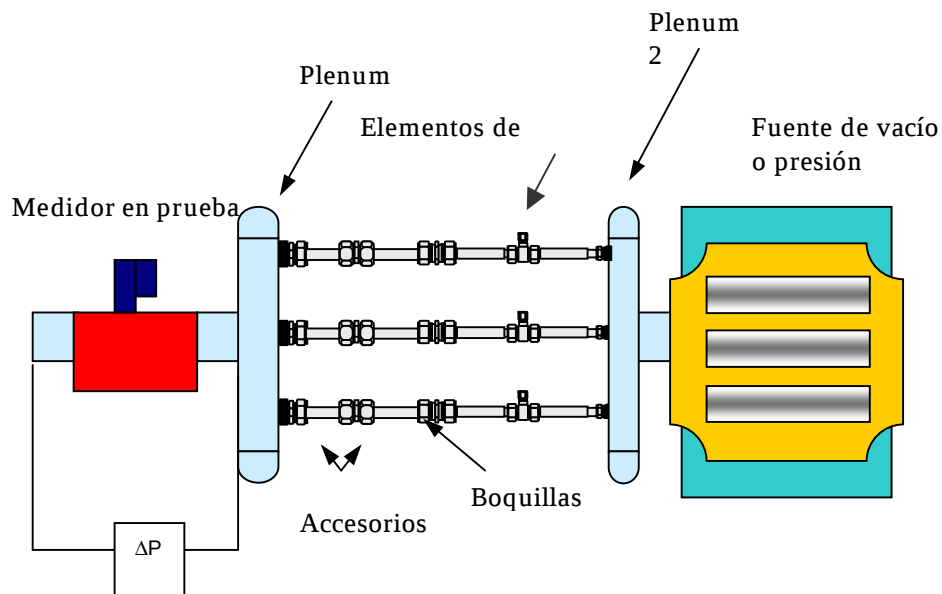
- § Calibrar con aire medidores de flujo de gas cuyo funcionamiento y rango de calibración se encuentre entre 3 y 500 m³/h (s) por la acción de hasta 6 boquillas en paralelo.
- § Realizar calibraciones con una incertidumbre inferior a ± 0.5 %.
- § Contar con trazabilidad a patrones internacionales.

Para cumplir con estas proyecciones el banco requiere de varios elementos que permitan constituirlo como un sistema de calibración, entre los más importantes se encuentran:

- § Dispositivo primario: boquillas sónicas.
- § Tubos de medición: líneas de conducción de flujo donde se instalan las boquillas.
- § Elementos de bloqueo: necesarios para permitir la integración o el aislamiento de cada boquilla al sistema.
- § Sensores y dispositivos empleados en la determinación de las variables durante el proceso de calibración.
- § Equipo fuente de vacío o de presión: para generar el flujo a través del sistema.
- § Estructura: soporte de los elementos del banco.
- § Accesorios: necesarios en el montaje de los elementos al banco.

- § Plenums: encargados de reproducir las condiciones de uniformidad, homogeneidad y mantener las presiones y temperaturas estables aguas arriba de la boquilla.
- § Sistema de adquisición de datos: encargado de servir de comunicación entre los sensores, dispositivos generales y el computador.

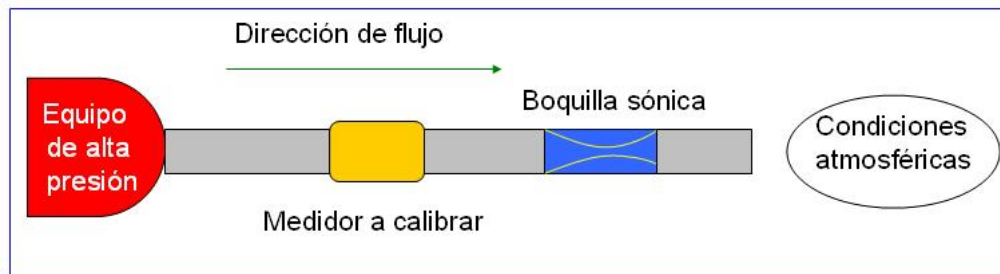
Figura 16. Esquema general del banco de boquillas sónicas.



2.2 DETERMINACION DEL SISTEMA DE CALIBRACION

Para generar el flujo y llevarlo a las condiciones críticas, condición bajo la cual se determina con muy baja incertidumbre el valor del caudal másico que fluye a través del sistema, es necesario cumplir con la relación de presión crítica entre la presión aguas abajo y aguas arriba de la boquilla (teóricamente establecida en 0.528). Esto se puede realizar de dos diferentes formas, a alta presión o a vacío.

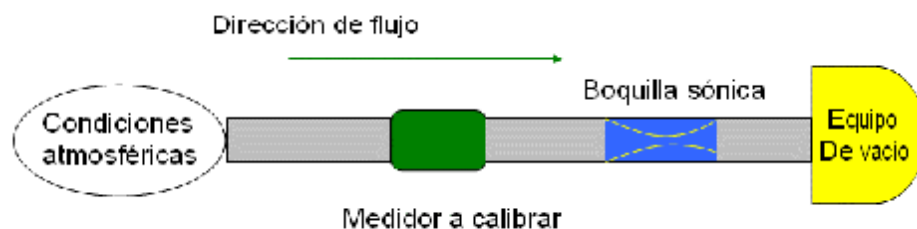
Figura 17. Esquema del sistema de alta presión en un banco de boquillas sónicas.



- ü **Sistema de alta presión:** en este el flujo se genera por las diferencias de presión que se originan cuando aguas arriba de la boquilla se conecta un equipo de alta presión que provee una presión positiva a la entrada, mientras en la salida existe la presión atmosférica.

Tiene como ventaja principal la variabilidad de caudales, ya que para una boquilla de diámetro de garganta fijo, es posible obtener diferentes caudales al variar la presión de entrada. Como desventajas, presenta calentamiento del aire antes de entrar a la boquilla, dificultad para mantener y garantizar un valor de presión a la entrada del sistema y la transmisión de irregularidades del sistema de presión al flujo antes de entrar a la boquilla (pulsaciones). En general es uno de los sistemas más utilizados, especialmente en la industria en general.

Figura 18. Esquema del sistema a vacío en un banco de boquillas sónicas.



- ü **Sistema a vacío:** en este la diferencia de presión se origina entre la presión atmosférica a la entrada de la boquilla y la presión negativa creada por un

equipo de vacío aguas abajo de la boquilla. Es desde el punto de vista metrológico el sistema mas conveniente para el funcionamiento del banco, ya que ofrece las mejores condiciones de estabilidad en los valores de presión y temperatura a la entrada del sistema (esto gracias a que las variaciones de presión y temperaturas atmosféricas son prácticamente despreciables, especialmente en relación con los cortos tiempos de calibración).

Este sistema también evita el calentamiento del aire antes de entrar a la boquilla y al mismo tiempo garantiza que las discontinuidades o irregularidades en las que incurra el equipo de vacío no tendrán ninguna incidencia en el flujo aguas arriba de la boquilla, porque según la teoría del flujo sónico descrita anteriormente, es imposible que los disturbios se propaguen hacia arriba de la boquilla.

Todas las anotaciones anteriores son argumentos suficientes para diseñar el banco de calibración bajo el sistema a vacío, sin olvidar que aunque metrológicamente es lo más conveniente, limita a cada boquilla a un valor de caudal, disminuyendo así las posibilidades de variación de caudal. Sin embargo para los alcances definidos por el proyecto, es por ahora suficiente con las combinaciones que se logran a través de las boquillas a diseñar.

2.3 DISEÑO DE BOQUILLAS SONICAS A PARTIR DE LA ISO 9300

Se utilizan diferentes formas de boquillas que permiten acelerar el flujo de un fluido hasta las condiciones críticas. Estas boquillas poseen geometrías de canal de flujo interior especiales y para ellas son validas las recomendaciones de la norma internacional ISO 9300 “Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles” .

Esta norma internacional especifica la geometría y el método de uso de una boquilla sónica empleada en la determinación del caudal másico que fluye a través de un sistema. Ofrece información sobre el cálculo de caudal y la determinación de la incertidumbre asociada a este valor.

Se tomó este documento como referencia ya que aplica en flujos estables y monofásicos que se aceleran hasta una velocidad crítica. Alcanzándose así la velocidad local del sonido en la garganta. Sin embargo esta norma solo es valida entre unos límites establecidos para relaciones entre diámetros de garganta y números de Reynolds. Cuando esta última relación se encuentra fuera de los límites de la norma, se utiliza el método de calibración directa, con el cual se aseguran un número significativo de pruebas experimentales cuyos resultados ofrecen un respaldo suficiente a los coeficientes, y así se garantiza que la boquilla operará bajo predecibles y aceptables límites de incertidumbre.

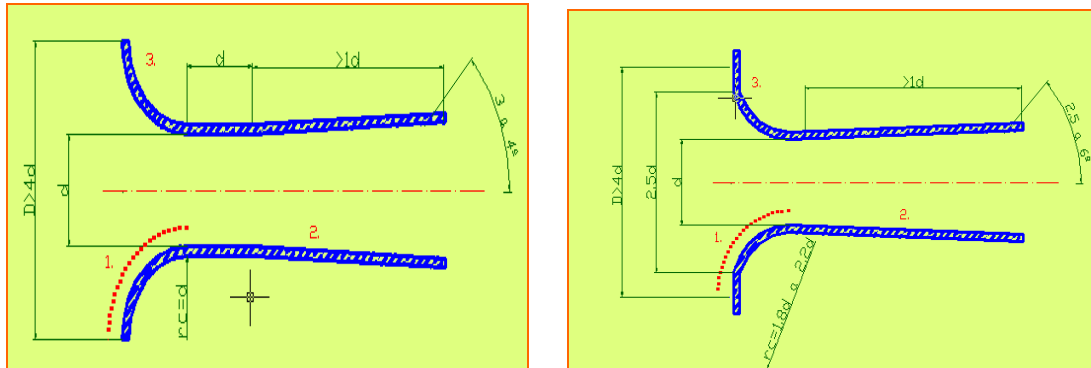
La información que la norma ofrece está basada en las siguientes consideraciones:

- § La tubería aguas arriba de la boquilla sónica es de sección transversal circular, o
- § Es posible asumir que existe un largo espacio aguas arriba de la boquilla sónica.

2.3.1 Selección del perfil de la boquilla

En la figura 17 se ilustran las 2 geometrías interiores de una boquilla sónica. Ambas están constituidas por tres regiones diferentes:

Figura 19. Perfiles cilíndrico (izquierda) y toroidal (derecha) de una boquilla sónica según la ISO 9300.



- ü **Zona convergente:** es la zona de entrada de la boquilla, la cual permite acelerar el flujo que llega a ella hasta la condición sónica. Esta región tiene grandes requisitos de rugosidad y concentricidad, dado que es la encargada de recibir el flujo y de ella depende que se logren condiciones muy cercanas al flujo isentrópico.
- ü **Garganta:** es la zona donde el flujo alcanza como máximo la velocidad sónica. El valor de área de esta sección, determina, para unas condiciones de estancamiento dadas (aguas arriba de la boquilla), el caudal máximo que alcanza el flujo a través de la boquilla, cuando se tienen relaciones críticas de presión.
- ü **Zona divergente:** es la región de salida de la boquilla la cual tiene como objetivo principal la recuperación de presión. Cuando las relaciones de presión son lo suficientemente bajas, esta zona permite la aceleración del flujo hasta la condición supersónica.

Inicialmente las boquillas de perfil cilíndrico eran las más empleadas debido a la facilidad de su construcción y medición dimensional posterior a la manufactura. Por

lo tanto se facilitaba la determinación del diámetro de garganta, un valor importante en su caracterización y en el cálculo de flujo crítico. Sin embargo los avances en el control numérico computarizado (CNC) y la aplicación de tecnologías inteligentes de maquinado hicieron posible la construcción extensiva de boquillas toroidales.

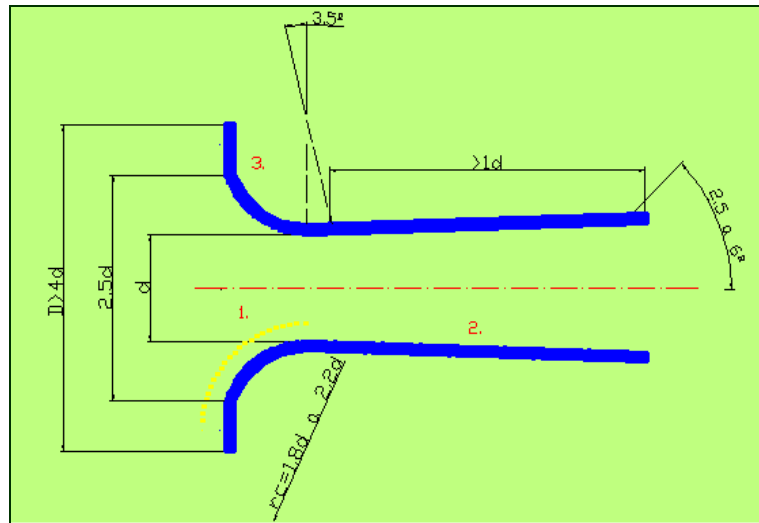
La geometría toroidal es recomendable debido a que se evita la discontinuidad indeseable en la curvatura de la boquilla al final de la sección convergente así como de la sección de área constante. Como señalaron Smith y Matz, los desarrolladores de las boquillas sónicas, la discontinuidad de curvatura infinita al final de la sección convergente en la boquilla cilíndrica resulta en un gradiente de presión adverso que debilita la capa límite y puede llegar incluso a generar separación del flujo local.

Estas y muchas mas formas de boquillas son permitidas mientras todos los parámetros importantes desde el punto de vista metrológico (coeficiente de descarga, relación de presión crítica y eventualmente, dependencia de la presión de entrada) sean determinados para cada boquilla mediante una calibración individual.

Dadas nuestras necesidades de exigente control metrológico, ya que las boquillas serán el dispositivo primario de un banco patrón para calibración, y gracias a que el proceso de fabricación de la geometría toroidal es viable a partir de las maquinas herramientas del sector, se decidió tomar esta alternativa porque con ella se pueden evitar mas fácilmente salientes o rebordes en la zona del cuello de la boquilla debidos a la fabricación los cuales proveen efectos de flujo incontrolables.

La figura siguiente presenta en forma detallada la geometría de una boquilla toroidal, con todos los requerimientos que debe cumplir según las exigencias de la Norma internacional ISO 9300.

Figura 20. Detalle de perfil de una boquilla toroidal, según la ISO 9300.



1. En esta región la Rugosidad superficial promedio R_a no debe exceder de $15 \times 10^{-6}d$ y el contorno no se debe desviar de la forma toroidal mas de $\pm 0.001d$.
2. En esta región la Rugosidad superficial promedio R_a no debe ser superior a $10^{-4}d$.
3. La superficie de entrada de la boquilla debe estar entre esta zona de ataque.

Como se observa en la figura 20 la mayoría de las dimensiones que definen la geometría de la boquilla toroidal dependen del valor del diámetro de garganta, las dos únicas dimensiones independientes de este valor son los ángulos de conicidad de la zona convergente y el ángulo donde se intersecan la zona convergente y la zona divergente.

2.3.2 Determinación de diámetros de las boquillas

Los caudales de operación del banco se definieron en función del rango propuesto ante Conciencias y la Universidad Industrial de Santander, el cual fue de 3 a 500 $m^3/h @ (s)$ y de los caudales de calibración recomendados por las normas ANSI y OIML que aplican a los medidores tipo turbina, rotatorios y diafragma (apéndice A).

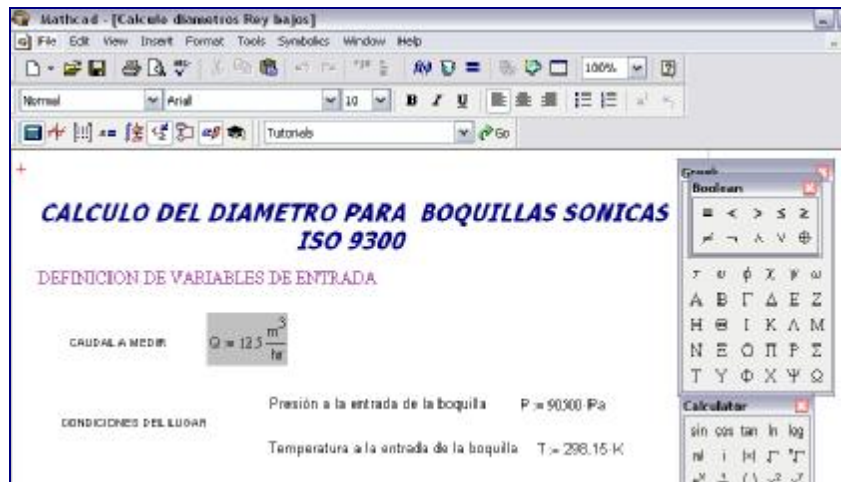
Nota: se determinó que era conveniente contar con 7 boquillas sónicas y no 6 como inicialmente se tenía planeado ya que con este número de piezas es posible abarcar de forma consecutiva los caudales de calibración del tipo de medidores a manejar y el rango propuesto para la operación del banco.

Tabla 3. Distribución de caudales para las boquillas sónicas

Boquilla #	Caudal [$\text{m}^3/\text{h} @ (\text{s})$]
1	3
2	12.5
3	25
4	50
5	100
6	150
7	250

A partir de estos caudales se calcularon los diámetros requeridos para unas condiciones de temperatura y presión promedio aguas arriba de la boquilla (a las condiciones de Piedecuesta). Se desarrollo para ello un método de cálculo en Math Cad®, basado en las ecuaciones del flujo de fluidos a alta velocidad, (Apéndice B).

Figura 21. Imagen de modelo de cálculo de diámetro de boquillas en Math Cad®.



Las ecuaciones principales que permiten determinar el caudal másico o diámetro de una boquilla sónica aplicadas por el modelo de cálculo son:

$$q_m = \frac{A_0 C_d C_0 p_0}{(R_g T_0)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 46}$$

ó,

$$q_m = A_0 C_d C_R (p_0 r_0)^{1/2} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$C_d = a - b \text{Re}^{-n} \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

q_m = caudal másico que pasa a través de la boquilla.

A_0 = área de la garganta de la boquilla, a partir del despeje de este término se obtiene el diámetro de garganta.

C_d = coeficiente de descarga, determinado a partir de calibraciones de la boquilla. Para un primer cálculo se determina de la ecuación (48), utilizando los coeficientes a , b y n recomendados por la norma. Cuando la aplicación de esta formula se encuentra fuera de los alcances de la norma (los límites del número de Reynolds se

sobre pasan) es necesario utilizar valores experimentales proporcionados por las investigaciones que llevan a cabo laboratorios especializados a través de numerosas pruebas.

C_0 = coeficiente de flujo crítico, es solamente función del coeficiente isentrópico (k) como se muestra a continuación:

$$C_0 = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad \text{Ecuación 49}$$

p_0 , T_0 y ρ_0 son la presión, temperatura y densidad de estancamiento respectivamente.
 R_g = constante del gas, en este caso el aire.

$$C_R = \sqrt{C_0 Z_0} \quad \text{Ecuación 50}$$

Siendo Z_0 = factor de compresibilidad en las condiciones de estancamiento a la entrada de la boquilla.

De este modelo de cálculo se puede apreciar que:

- § El flujo a través de la boquilla es independiente de la presión aguas abajo en el rango de presión para el cual la boquilla puede ser usada en la medición bajo la condición de flujo crítico.
- § Solo se requieren las mediciones de presión, temperatura y densidad del gas aguas arriba de la boquilla, ya que es posible determinar con estas las condiciones en la garganta a partir de algunas consideraciones termodinámicas.
- § La velocidad en la garganta de la boquilla sónica tiene un valor máximo posible para unas condiciones de estancamiento a la entrada dadas, por lo

tanto la sensibilidad a los efectos de instalación son minimizados excepto para aquellos causados por remolinos a la entrada de la boquilla, los cuales deben ser eliminados.

- § Cuando se comparan las boquillas sónicas con las subsónicas se puede notar que las primeras son función solamente de la presión de estancamiento a la entrada de la boquilla, mientras que los medidores subsónicos dependen de la raíz cuadrada de la diferencia de presión que ocurre a través de ellos.
- § De la ecuación (47) se infiere que para una boquilla de diámetro de garganta dado, la variabilidad en el caudal se alcanza a partir de la variación de las condiciones de estancamiento a la entrada de la boquilla con las cuales el flujo alcance a ser crítico.

Este modelo de cálculo además de entregar los diámetros de boquilla requeridos para unas condiciones de entradas definidas calcula al mismo tiempo los números de Reynolds y coeficientes de descarga teóricos a través de un proceso iterativo.

Cabe anotar que se desarrollaron dos modelos de calculo, uno en el cual se determina el diámetro de la boquilla en aquellos casos en los cuales se esta dentro de los limites de la norma ***“Determinación de diámetros de boquillas sónicas para Reynolds altos”*** y un segundo en el cual los coeficientes del C_d fueron tomados a partir de los valores recomendados por Flow Systems (empresa fabricante de boquillas) ***“Determinación de diámetros de boquillas sónicas para Reynolds bajos”***, ya que en este caso los valores de números de Reynolds son mas bajos que los definidos por el alcance de la norma.

Los resultados obtenidos después de utilizar la herramienta creada en Math cad son presentados en la siguiente tabla resumen:

Tabla 4.Resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo en Math Cad.

Boquilla #	Caudal (m ³ /h)	Dg(mm)	Re	Cd.
1	3	2.32	26224.18	0.984
2	12.5	4.71	99841.52	0.987
3	25	6.67	99851.84	0.987
4	50	9.43	1.07*10 ⁵	0.988
5	100	13.35	1.52*10 ⁵	0.989
6	150	16.35	1.86*10 ⁵	0.989
7	250	21.1	2.41*10 ⁵	0.99

Una vez determinados los diámetros de garganta de las 7 boquillas, se procedió a modelar el perfil toroidal de cada una de ellas para así obtener los planos con los cuales serían fabricadas. Antes de esto fue necesario definir la forma externa de la boquilla.

2.3.3 Definición de montaje de las boquillas

Existen varias alternativas de diseño para la forma externa de las boquillas, a continuación presentamos algunas de ellas mostrando las ventajas y desventajas de cada una:

ü Alternativa #1: Boquilla roscada exteriormente:

Figura 22. Forma exterior de la boquilla según alternativa roscada.



Esta alternativa consiste en fabricar el cuerpo exterior de la boquilla con roscas a cada lado y con una tuerca en el medio del cuerpo para la manipulación.

Ventajas: es de fácil montaje, fabricación y mantenimiento. Buen alineamiento y concentricidad en los montajes.

Desventajas: propensa a fugas y la vida de la boquilla esta limitada por la durabilidad de la rosca.

ü Alternativa # 2: Clamps

Figura 23.Montaje de la boquilla según alternativa con Clamps.



Esta consiste en la sujeción de la boquilla sobre un plato al que se le fijan unas pinzas, las cuales al enfrentarse a otra cara quedan ajustadas aprisionando entre ellas la boquilla.

Ventajas: buena estanqueidad, excelente presentación y provee un montaje de las boquillas al sistema muy práctico.

Desventajas: ensamble de la boquilla complejo, fabricación y manipulación de gran cantidad de piezas, lo cual incrementa el costo de las boquillas.

ü Alternativa # 3: Bridada:

Figura 24.Forma exterior de la boquilla según alternativa bridada.



Es una de las mas empleadas por los fabricantes de boquillas, consiste en la sujeción de la boquilla por medio de un resalte en su cuerpo a unas especies de bridas que mediante una junta del tipo unión universal se montan a los tubos del sistema.

Ventajas: fácil fabricación, buena estanqueidad

Desventajas: difícil alineamiento

Después de analizar las alternativas propuestas se decidió gracias a la opinión de diseñadores, personal de la empresa CDT de Gas y operarios de máquinas herramientas, que la mejor opción dadas nuestras condiciones es la alternativa (a) con la boquilla roscada porque ofrece la facilidad de fabricación y montaje que requiere el banco, al tiempo que asegura un buen alineamiento y requiere de los menores costos.

En cuanto a las desventajas que este sistema tiene se plantearon soluciones que permitan adoptarla reduciendo al máximo sus efectos negativos, entre ellos: fabricar el exterior de la boquilla con roscas NPT, ya que por ser cónica asegura un mejor sello que la rosca recta asegurándose así que las condiciones de estanqueidad requeridas son cumplidas. El otro aspecto negativo fue desvalorizado ya que con el número de boquillas fabricadas y el número de tubos disponibles en el sistema

aseguran un muy bajo nivel de manipulación por montajes, garantizándose así que la rosca no va a estar propensa a daños prematuros.

2.3.4 Diseño del perfil interno y forma externa de las boquillas.

La figura 25 muestra el diseño del perfil de la boquilla de 250 m³/h, con las dimensiones internas determinadas a partir del diámetro de garganta calculado en Math Cad, por ser una protusión por revolución se presentan las distancias en función del radio:

ü $R_g = d/2 = 10.5 \text{ mm}$

ü $R_c = 2*d/2 = 42.1 \text{ mm}$

ü Radio de entrada a la boquilla: $2.5*d/2 = 26.31 \text{ mm}$

ü Ángulo del cono = 3.5°

ü Longitud del cono = $2.3*d = 54.57 \text{ mm}$

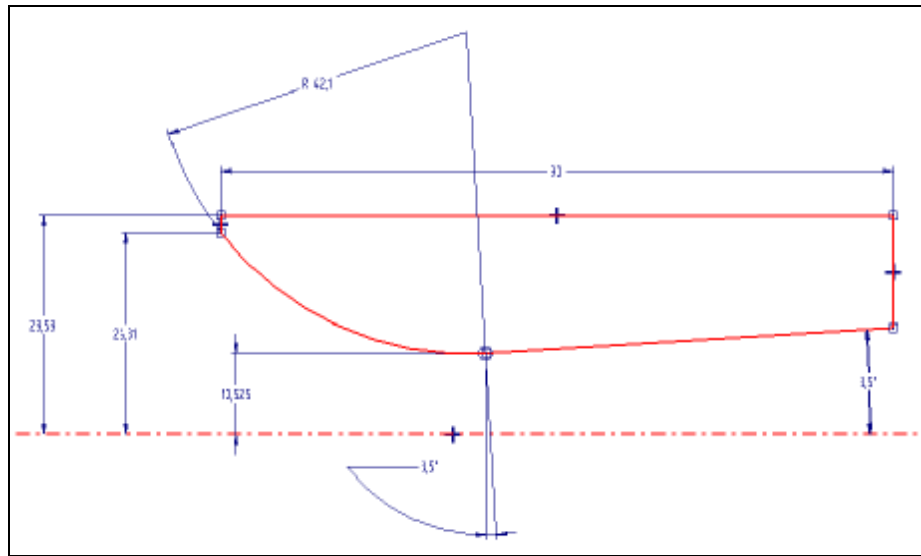
La forma externa fue determinada a partir de las dimensiones comerciales de rosca que mas se adecuaban a las proporciones dadas por el perfil interior. Se seleccionó una rosca NPT de 2" nominal, ya que es la dimensión comercial con la que mas se ahorra material. Al mismo tiempo la longitud total de la boquilla fue determinada por las longitudes mínimas requeridas por este tipo de rosca (al lado y lado de la boquilla) y por la longitud de la tuerca necesaria para la manipulación de la pieza. Con el libro de Casillas^{††} se determinaron las siguientes dimensiones estándar:

ü Longitud total de boquilla = $2*longitud \text{ rosca} + longitud \text{ tuerca} = 90 \text{ mm}$

ü Diámetro exterior de la boquilla = 2" de rosca NPT nominal.

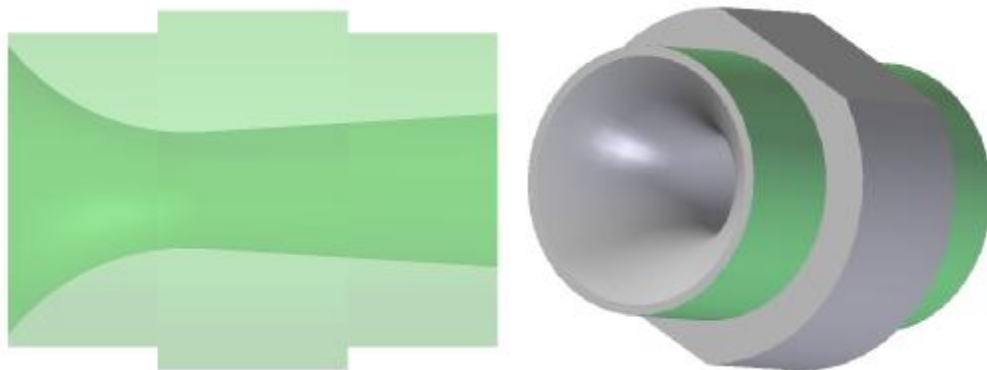
Figura 25. Perfil toroidal de la boquilla de 250 m³/h, modelado en Solid Edge.

^{††} A. L. Casillas, Máquinas. Cálculos de taller.



Con el perfil de la figura 25 modelado en Solid Edge se obtiene una protusión como la mostrada en la figura 26, en esta se observa el perfil interno de la boquilla, la tuerca y las roscas en la pieza.

Figura 26. Modelamiento de la boquilla de $250\text{ m}^3/\text{h}$, en Solid Edge.

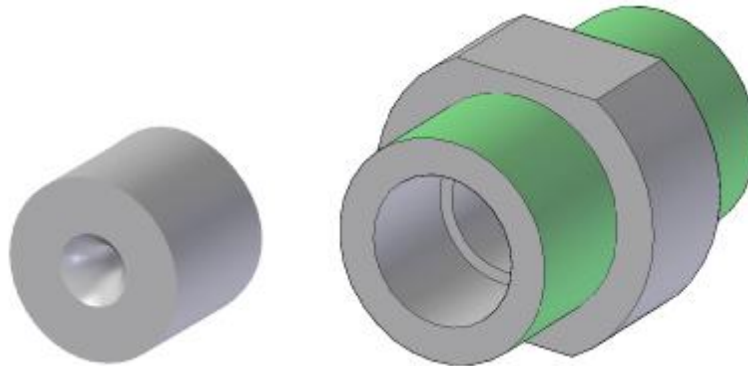


Se generaron con base a la protusión los planos de fabricación de las boquillas en los cuales se especifican los valores de Rugosidad, concentricidad y forma toroidal que debe cumplir el maquinado de acuerdo con la norma ISO 9300 (Estos requerimientos son función del diámetro de garganta) y muestran en detalle todas las dimensiones necesarias para la fabricación.

Figura 27. Imagen de plano de boquilla de $250\text{ m}^3/\text{h}$, generado en Solid Edge.

Por todas las razones expuestas anteriormente se propuso un diseño diferente para estas 4 boquillas, en el cual cada una está constituida por dos partes un inserto y una carcasa.

Figura 28. Modelamiento en Solid Edge de diseño de boquillas tipo inserto (derecha)- carcasa (izquierda).



Como se muestra en la figura 28, las boquillas tipo inserto-carcasa constan de dos partes maquinadas por separado y unidas por un ajuste forzado. Este sistema tiene como ventajas principales la facilidad de maquinado ya que el perfil interno de la boquilla se realiza en una pieza de pequeñas dimensiones lo que permite la utilización de herramientas de corta longitud, disminuyéndose los problemas causados por las vibraciones que se generaban con la propuesta anterior.

Fue sugerido el sistema carcasa y no solo la disminución de la región externa de la boquilla (de forma que fuera proporcional a su diámetro) puesto que el banco estaría

limitado a contar con un tubo para cada boquilla. Es decir, dada la particularidad de cada una de las dimensiones internas de las boquillas, sería necesario tener un acople al sistema para cada una de ellas, lo cual reduciría en gran medida la flexibilidad del montaje y por otro lado la estética y proporcionalidad se verían seriamente afectadas, ya que el banco estaría constituido por tubos muy disparejos.

Se generaron entonces los planos de fabricación de las 4 boquillas pequeñas con el sistema inserto-carcasa, y al igual que en las anteriores se especifican para ellas los límites de rugosidad, concentricidad y forma toroidal en función de cada uno de sus diámetros (Ver anexo 1). Para estas 4 boquillas se definieron las dimensiones externas de la siguiente forma:

Las longitudes totales de las carcasas fueron establecidas a partir de las dimensiones requeridas por las longitudes mínimas de rosca y tuerca. Los insertos fueron dimensionados de tal forma que se asegurara la no modificación de la geometría interna durante el ajuste forzado y el ahorro de material al mismo tiempo.

Tabla 5. Especificaciones de carcasas e insertos para las boquillas pequeñas.

	Carcasa		Insertos	
	Longitud total	Diámetro exterior	Dimensiones internas	Dimensiones externas
Boquillas de 3, 12.5 y 25 m³/h	79 mm	1 ½" de rosca NPT	Proporcionales a cada uno de sus diámetros	Proporcionales a su geometría interna
Boquilla de 50 m³/h	90 mm	2" de rosca NPT		

La boquilla de 50 m³/h fue diseñada con dimensiones externas iguales a las boquillas mayores con el fin de hacerla intercambiable en los tubos de estas y al mismo tiempo cumplir con el requerimiento de la norma sobre el diámetro aguas

arriba del dispositivo primario mayor a 4 veces el diámetro de garganta, ya que con la dimensión externa correspondiente a una rosca de 1 ½" NPT no se cumple con este requisito de diseño. Para más detalles ver planos anexos.

2.3.5 SELECCIÓN DE MATERIAL

La norma Internacional ISO 9300 establece además de los anteriores otros requisitos generales para el diseño de las boquillas sónicas, entre ellos tenemos:

- Ø La boquilla debe ser manufacturada a partir de un material que cumpla con características como: homogeneidad, libre de impurezas y de fácil maquinado y pulimento, para poder alcanzar las especificaciones de rugosidad que este elemento requiere. También es necesario que el material sea dimensionalmente estable y que cuente con un apropiado valor de coeficiente de expansión térmica. (En el caso de que las temperaturas en las que se determine el diámetro y la de servicio sean diferentes, es necesario realizar correcciones).
- Ø Si es necesario el material debe ser expuesto a un tratamiento superficial para evitar la corrosión cuando este en servicio.
- Ø La garganta y la entrada toroidal deben estar limpios de impurezas, películas o cualquier otro tipo de contaminación.
- Ø La forma cónica de la sección divergente de la boquilla sónica debe ser inspeccionada para asegurar que no existen discontinuidades, pasos, irregularidades

Para cumplir con todas especificaciones anteriores, se seleccionó como material para la fabricación de las boquillas el Acero inoxidable SAE/ AISI 316 L el cual tiene las siguientes características:

Este es un acero del tipo austenítico, se distingue de los demás por su presencia de molibdeno, el cual le confiere particularmente una mayor resistencia a la corrosión inter-granular, o picaduras; en este el carbono se encuentra muy reducido, en cantidades no superiores al 0.3% por lo cual se denomina “de bajo carbono”. Otra característica importante es que su estructura permite el fácil pulido, aspecto indispensable para el cumplimiento de los requerimientos de rugosidad en las superficies internas de las boquillas.

Figura 29. Propiedades físicas del acero SAE/ AISI 316L

Referencias					
Propiedades Físicas					
PESO ESPECÍFICO		g/cm ³			
RESISTIVIDAD ESPECÍFICA A 20° C		μ Ω/cm			
CALOR ESPECÍFICO		Btu/100 lb. Cal / Kg °C			
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA		Cal / Cm. Sec. °C			
INTERVALO DE FUSIÓN °C		1370-1400			
Coeficiente de dilatación térmica medio X 10 -6 / K					
20 - 100 °C	20 - 200 °C	20 - 300 °C	20 - 400 °C	20 - 500 °C	
16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	

Cia. General de Aceros S.A. AISI 316L

2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE MONTAJE DE BOQUILLAS

2.4.1 Tubería

La norma ISO 9300 establece como requisito indispensable que la dimensión (diámetro) aguas arriba de la boquilla sea mayor a 4 veces el diámetro de la garganta, por lo tanto se debe seleccionar un diámetro de tubería para la conexión al

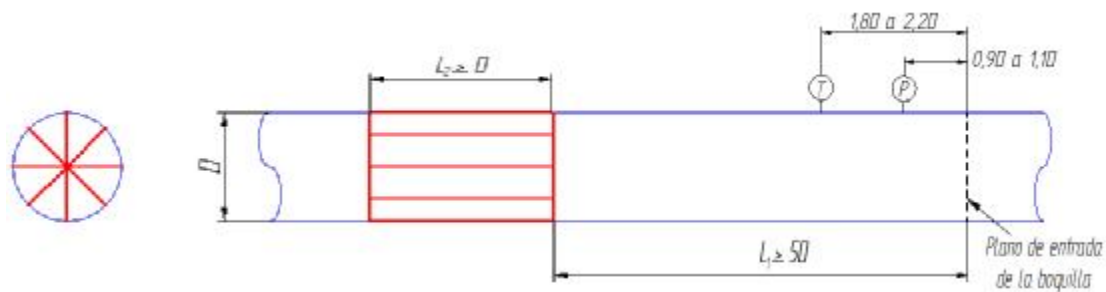
sistema que cumpla con este requerimiento y se encuentre dentro de los existentes en el mercado.

La boquilla de 250 m³/h requiere de un diámetro mínimo aguas arriba de $d \cdot 4 = 21.06 \cdot 4 = 84.24$ mm y de acuerdo con las dimensiones de tubería comercial, lo mas conveniente es la de 4" de diámetro nominal Schedule 10, ya que su diámetro interno es de 108.5 mm > 84.24. La boquilla de 150 m³/h requiere de $16.33 \cdot 4 = 65,32$ mm siendo suficiente entonces una tubería de 2 ½" de diámetro nominal Schedule 10, la cual cuenta con un diámetro interno de 66.92 mm. Para las demás boquillas se seleccionaron también tubos de 2 ½" de diámetro puesto que así se contribuiría a la uniformidad, equilibrio y estética del banco mientras se cumplen con las especificaciones de la norma, ya que los diámetros mínimos requeridos para las demás boquillas son mucho menores que el diámetro interno de esta tubería.

Nota: los valores de diámetros internos y rugosidades en las superficies internas de los tubos de acero inoxidable fueron verificados en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), encontrándose que para una tubería de 2 ½" nominal y 66.92 mm de diámetro interno (D) la Rugosidad promedio es de 4.85 µm, valor inferior al exigido por norma y que corresponde a $0.0001 \cdot D$. Este resultado se extiende también a la tubería de 4".

ü Longitudes de tubería, tomas de presión y temperatura: las longitudes de los tubos aguas arriba de las boquillas así como las distancias de las tomas de presión y temperatura al plano de entrada de cada una de ellas se basan en los datos recomendados por la norma internacional ISO 9300, la cual establece los siguiente:

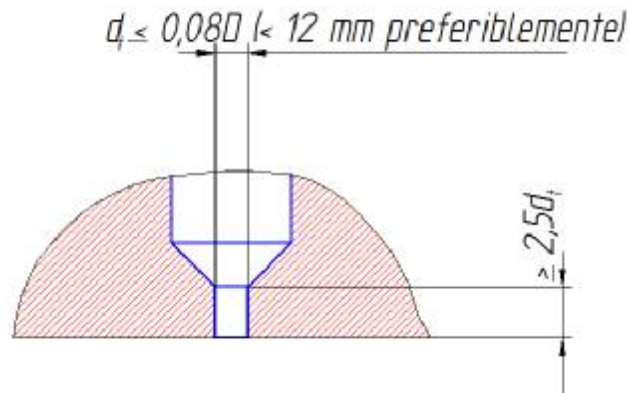
Figura 30.Requerimientos de instalación y configuración de la tubería aguas arriba de una boquilla sónica según la ISO 9300.



La norma establece como mínimo una longitud de $5Dt + 1 Dt$ con la adecuación de un rectificador de flujo para la tubería aguas arriba de la boquilla, sin embargo se estableció en el diseño una distancia de $6 Dt$ para este tramo de tubería pero sin la utilización de rectificadores, ya que la instalación de estos elementos se hace necesaria cuando aguas arriba de los dispositivos primarios se encuentran cambios bruscos en la dirección del fluido, en este caso aguas arriba de la boquilla el flujo no sufrirá cambios de dirección por lo que es posible obviar este elemento. Al realizar el cálculo para el diámetro de tubería mayor (4") resulta una longitud de tubería de 600 mm. Por efectos de montaje se decidió dar la misma longitud a todos los tubos del banco.

La localización de la toma de presión se estableció a 1 diámetro de tubería (Dt) desde el plano de entrada de la boquilla y el orificio de la toma se diseñó según las especificaciones mostradas en la figura 31:

Figura 31. Detalles de la toma de presión según la ISO 9300.



Las tomas de temperatura se localizaron a $2 D_t$ el diámetro del sensor aunque es recomendado por norma con dimensiones inferiores a $0.04 D_t$, no fue posible adquirirlo sino de 3.175 mm cumpliéndose solamente con el tubo de 4". Sin embargo se consideró que los efectos negativos que estos elementos pueden provocar se verán compensados por las calibraciones realizadas con las boquillas y los sensores en los tubos como un sistema.

Cabe resaltar que en el proceso de fabricación de los orificios requeridos para las tomas de presión y temperatura se recomienda prevenir cualquier reborde en la superficie interna de los orificios y así mismo asegurar la perpendicularidad entre las superficies. Esto con el fin de evitar que se genere cualquier tipo de obstrucción al flujo a la entrada de la boquilla.

Para las tuberías aguas abajo no existen mayores requisitos, excepto el evitar restringir el flujo cuando pasa a través de este tramo ya que una obstrucción al flujo en esta zona puede llegar a evitar el flujo crítico. Por esta razón la tubería destinada para cumplir esta labor se seleccionó de igual diámetro que la tubería aguas arriba de la boquilla.

Nota: los tramos de tubería aguas debajo de las boquillas están formados por tubos de 2 ½" para las 5 líneas de flujo y de 4" para 1 línea de flujo. las dimensiones y características son presentadas en la tabla 6.

Tabla 6. Tubería aguas debajo de las boquillas

Ubicación	Cantidad	Longitud	Características
Tubo boquilla-válvula	5 niples de 2 ½” y 1 de 4 ”	≤ 15 cm	Soldado a un acople en un extremo y roscado en el otro. (soldadura TIG y Rosca NPT)
Tubo válvula-universal	5 niples de 2 ½” y 1 de 4 ”	15 cm	Roscado a ambos lados (Rosca NPT)
Tubo universal-plenum	5 niples de 2 ½” y 1 de 4 ”	15 cm	Roscado a ambos lados (Rosca NPT)

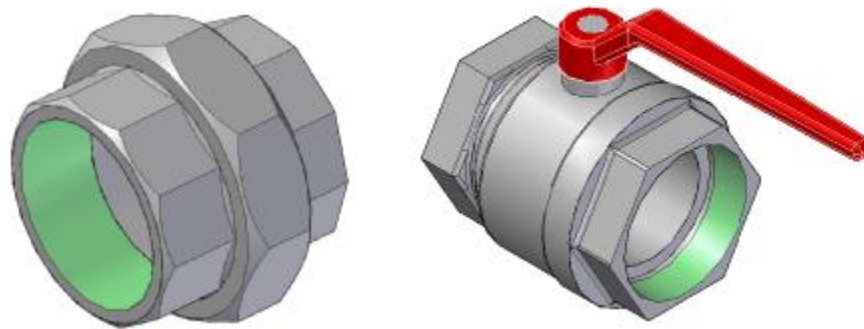
La longitud del tubo boquilla-válvula se estimo en aproximadamente 15 cm, sin embargo este valor será definido por el montaje de todos los elementos de la línea de flujo. La dimensión de este tramo de tubería permite compensar las desigualdades existentes entre las longitudes de todas las líneas de flujo al momento de soldar, es decir servirá como elemento de cierre.

2.4.2 Accesorios

Dadas las expectativas de operación del banco fue necesario escoger un elemento de bloqueo con el cual se aislara o incluyera cada una de las boquillas durante un proceso de calibración y así se lograra la variar los caudales en la forma deseada. Para esto se seleccionaron válvulas de bola de cierre rápido ya que ofrecen la facilidad de operación y hermeticidad que se requiere en esta aplicación. Las dimensiones de estas se encuentran de acuerdo con las requeridas por los diámetros de tubería y son: 5 válvulas de 2 ½” y 1 de 4” NPT de bronce cromado.

Otro elemento incluido en el diseño fueron las uniones universales necesarias para facilitar el montaje. Estas se seleccionaron según las dimensiones de la tubería, es decir 5 uniones de 2 ½” y 1 de 4”. El material de estas es acero inoxidable AISI 304 y la conexión al sistema viene dada por roscas internas NPT de 2 ½” y 4” nominal.

Figura 32. Modelamiento en Solid Edge de Válvula de bola (derecha) y junta universal (izquierda).



2.4.3 Plenums

Su función es ofrecer las condiciones de homogeneidad y baja velocidad aguas arriba de las boquillas (diseñado para reproducir lo más fielmente posible según la practicidad, las características de un reservorio infinito, donde la velocidad del fluido se considera cero y las condiciones de temperatura y presión estables).

Para la determinación del área frontal de los plenums se tuvo en cuenta el cálculo de la velocidad a través del plenum de la entrada con el máximo flujo (500 m³/h con la combinación de las 6 boquillas más grandes en paralelo) y gracias a que de igual forma estos elementos sirven de soporte a todos los tubos, se buscó la proporcionalidad entre este y el montaje.

Estos elementos además permiten la conexión de cada tubo de calibración al equipo generador de vacío y al medidor en prueba^{##} razón por la cual se le adecuaron unas bridas de 6" tipo ANSI 150-FF, las cuales serán soldadas en las caras exteriores para así cumplir con las dimensiones máximas posibles en el montaje del medidor más grande aguas arriba (6" para un medidor de turbina del tipo 6GT (150mm)).

Figura 33. Modelamiento en Solid Edge de Plenums aguas arriba (izquierda) y aguas debajo (derecha).



El diseño final de estos elementos resultó en 2 cilindros de acero inoxidable, con lámina de 1/8" para el desarrollo y lámina de 1/4" para las tapas frontales, a los cuales se le adecuaron unas placas soportes con las que se fijarán a una superficie horizontal perteneciente a la estructura del banco. Para dar flexibilidad al montaje se diseñó el soporte del plenum aguas abajo con un sistema de fijación tipo corredera, en el cual la placa soporte se ajusta a la posición deseada.

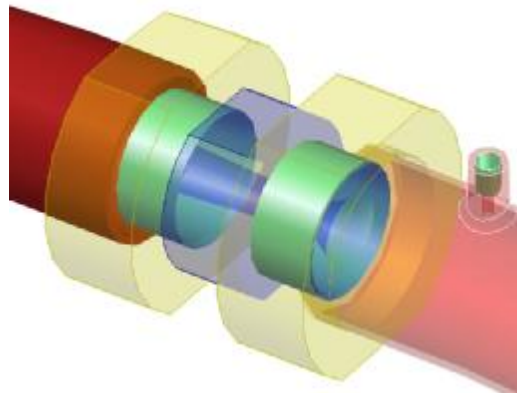
2.4.4 Acoples

Partiendo de los diámetros de tubería y los demás elementos de la línea de flujo seleccionados se diseñó el mecanismo de montaje para las boquillas, válvulas y uniones universales al sistema. Se diseñaron para esta labor acoples a los cuales se

^{##} La disposición del banco con respecto al equipo de vacío y el medidor a ensayar será determinado por las características del medidor en prueba y de su incidencia en el flujo a través de la boquilla.

les definieron dimensiones según la posición en el banco y la conexión destinada para cada uno. El material seleccionado para la fabricación de estos fue el acero inoxidable SAE/ AISI 304. Dada la naturaleza del material y el diseño de montaje de los acoples fue necesario utilizar soldadura tipo TIG porque es la mas empleada en el acero inoxidable.

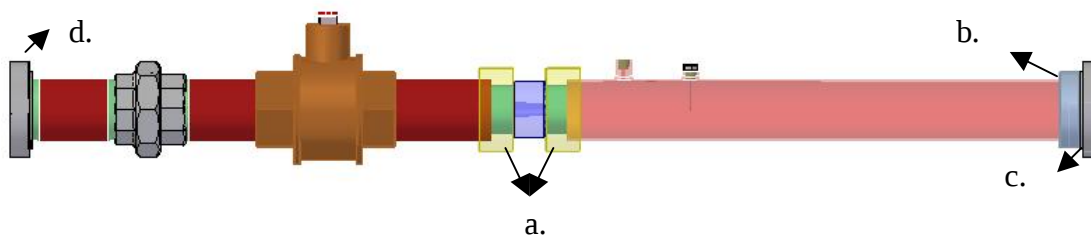
Figura 34. Modelamiento en Solid Edge de conexión de boquillas.



En la figura 34 se puede observar la disposición del montaje de las boquillas al sistema, la boquilla (azul y verde) se monta a través de sus dos roscas a los acoples (amarillos) roscados interiormente y soldados por el otro extremo a las tuberías aguas abajo y aguas arriba.

En la figura 35 se muestra en detalle una de las líneas de flujo, donde se indican las posiciones de los diferentes acoples y la disposición que todos los elementos que la integran tendrán en el banco.

Figura 35. Modelamiento en Solid Edge de línea de flujo de boquilla de 100 m³/h.



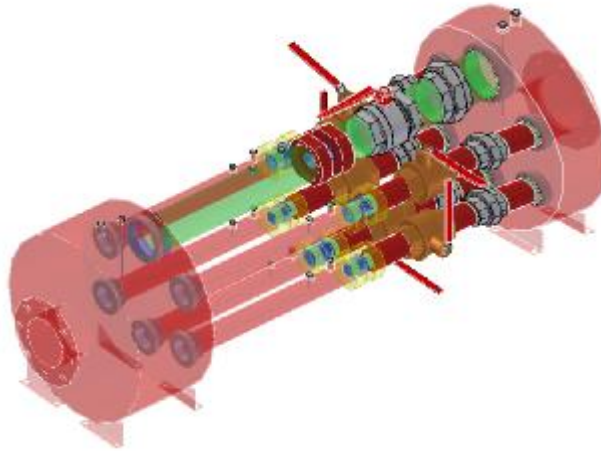
En la figura 35 se notan un total de 5 acoples por tubo distribuidos así:

- a. Dos Acoples del tipo boquilla-tubería: Los cuales tienen rosca interna del mismo tipo de las boquillas, estos van soldados a cada tubo aguas arriba y aguas abajo de cada una de ellas.
- b. Un acople del tipo tubo-acople: ubicado aguas arriba de la boquilla, soldado al tubo y roscado exteriormente para conexión al acople del plenum aguas arriba.
- c. Un acople del tipo acople-plenum: ubicado aguas arriba de la boquilla, con rosca cónica interior para la conexión del acople anterior y soldado por dentro el plenum.
- d. Un acople del tipo tubo-plenum: ubicado aguas debajo de la boquilla, soldado por dentro del plenum y con rosca recta para la conexión del tubo.

Una vez dimensionados e identificados todos los elementos integrantes de las líneas de flujo y las disposiciones que todos ellos tendrán en el sistema se modelo en Solid Edge el conjunto donde se representa el montaje final.

En la figura 36 se presenta el modelamiento en Solid Edge de todos los elementos constitutivos de las líneas de flujo desde el plenum aguas arriba hasta el plenum aguas abajo.

Figura 36. Modelamiento en Solid Edge del ensamble de tubos en el banco.



2.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO

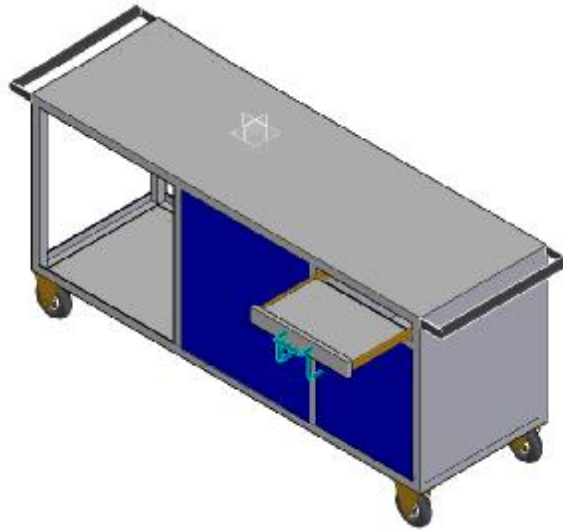
La estructura del banco es la encargada de soportar todos los elementos constitutivos de este, exceptuando el equipo generador de vacío y el medidor en prueba. Sobre esta estructura base, descansa también el computador, desde el cual el metrólogo opera el banco, exhibe las diferentes variables en tiempo real a través de una interfaz gráfica, almacena las variables de la calibración y genera un informe o certificado de calibración del medidor en prueba.

Las características que este diseño debe cumplir son:

- o Resistencia a un peso total del sistema estimado en 350 kg.
- o Movilidad, para el fácil traslado del banco de un lugar a otro.
- o Espacios disponibles para la ubicación del computador, impresora y de todo el sistema de adquisición de datos (módulos, bases, fuentes, sensores de presión y conexiones eléctricas en general).

Para satisfacer todos los requerimientos anteriores se planteó el diseño mostrado en la figura 37.

Figura 37. Modelamiento en Solid Edge de la estructura del banco.

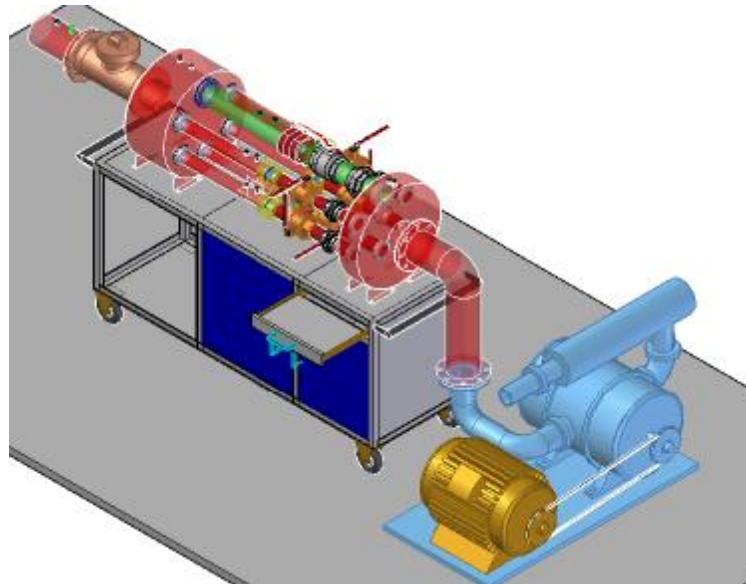


El diseño consiste en un esqueleto formado por perfiles cuadrados de $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$ en los párales verticales y el resto en perfiles angulares de $1\frac{1}{2}'' \times 1\frac{1}{2}''$, sobre estos van soldadas varias laminas de acero HR: una calibre 3mm en la parte superior, una calibre 2 mm en la parte inferior, y las láminas verticales calibre 16 . Sobre la lámina superior se atornillan las placas soporte de los plenums.

Consta además de dos gavetas principales limitadas por 3 láminas soldadas verticalmente a la parte interna de la estructura además de una repisa móvil sobre la cual se monta el computador durante el tiempo de calibración, una de estas gavetas (lado izquierdo) es destinada al resguardo de los componentes del sistema de adquisición de datos, y la otra al montaje de la impresora y resguardo del computador. A una de las láminas verticales se le diseñaron unas rejillas para refrigerar el espacio destinado a la ubicación de los módulos y aparatos electrónicos y a su vez lograr la comunicación a través de cables desde el computador y la impresora (gaveta derecha) hasta la gaveta izquierda donde se ubican las fuentes de alimentación y todo lo referente al conexionado eléctrico.

La estructura consta además de 4 ruedas giratorias INSA diámetro 8" serie 5PR45A para carga de 200 Kg c/u que permiten su movilidad de un lugar a otro. Estas son seleccionadas de acuerdo al peso total a soportar.

Figura 38. Modelamiento en Solid Edge del Banco de Boquillas sónicas, se incluyen el equipo generador de vacío y la turbina como medidor en prueba.



2.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de calibración diseñado requiere de la determinación de las condiciones de operación de las boquillas y del medidor en prueba con el fin de llevar los valores de caudal medidos por el dispositivo primario a las del medidor. Para esto fue necesario seleccionar un sistema de adquisición de datos que se encargue de captar las variables de proceso (presión, temperatura y tiempo), transformarlas a un lenguaje binario y procesarlas para la presentación de resultados en forma continua al metrólogo durante las calibraciones.

Aunque existen varios paquetes que contienen los elementos y software requeridos para esta labor se seleccionó el sistema Factory Floor de la empresa OPTO 22, ya que

el personal del CDT de Gas tiene experiencia en el manejo de esta y las ventajas económicas y de garantías que sugiere son bastante grandes comparadas con otros paquetes.

Las variables de proceso que el sistema de adquisición de datos requiere fueron identificadas con base a la teoría de flujo compresible y sustentadas por el análisis que resultó de la determinación del mejor estimado de la medición en el banco.

El mejor estimado de la medición es una medida representativa de los valores teóricos de incertidumbre bajo los cuales operará el banco, estos valores deben ser inferiores a 0.5% según lo planteado en los objetivos del proyecto. Tal como se especifica en el apéndice C dentro de las variables que influyen en los valores de incertidumbre teórica del banco se encuentran la determinación de los valores de presión, temperatura, humedad del aire y caudal de referencia (caudal determinado durante calibración de la boquilla para unas condiciones de referencia). Razón por la cual la cantidad y características técnicas de los sensores encargados de determinar los valores correspondientes a estas propiedades fueron seleccionados con base a la influencia que la incertidumbre individual de cada uno de ellos tiene sobre el valor de la incertidumbre total de la medición.

En conclusión se requiere de la determinación de las siguientes variables :

- o 6 Temperaturas de entrada, ubicadas aguas arriba de cada boquilla.
- o 2 Temperaturas en el psicrómetro: una de bulbo húmedo y otra de bulbo seco.
- o Temperaturas en el medidor a calibrar: la cantidad a emplear depende del tipo de medidor en prueba. Como máximo se requiere de dos mediciones en el caso de un medidor tipo turbina y como mínimo una medición de temperatura en el de turbina.
- o 2 Temperaturas, una en cada plenum.

- o 1 Presión barométrica, para determinar las condiciones ambiente.
- o 1 Presión, en el plenum aguas arriba de las boquillas.
- o 1 Presión de vacío, en el plenum aguas debajo de las boquillas, empleada en la verificación de las relaciones de presión crítica.
- o 1 Tiempo, para el cálculo del caudal a través del medidor en prueba.
- o 1 contador de pulsos, para determinar las revoluciones por minuto a las que gira el medidor en prueba.

Para determinar todos los datos provenientes de las variables anteriores se seleccionaron los siguientes elementos:

2.6.1 Sensores de temperatura

Encargados de tomar la variable física de temperatura y transformarla en una señal eléctrica. Para esta labor se seleccionaron todos los sensores RTD's del tipo PT 100 , la única diferencia entre todos los seleccionados es la geometría, ya que esta depende de la instalación de cada uno en el sistema .

Figura 39. RTD's PT100



- ü Descripción: RTD's (Resistance Detector Temperature), PT 100, elaboradas de platino. Diámetro de 1/8", de tres hilos y 2 m de cable en teflón para conexión.
- ü Características: alta exactitud. Rango de operación: 0-100° C.
- ü Proveedor: TERMOCUPLAS Ltda. Medellín.
- ü Costo: \$ 150.000 cada una.
- ü Cantidad y función:

Tabla 7. Características y función de las RTD's seleccionadas.

Cantidad	Longitud	Función
2	10"	determinación de temperaturas en los plenums aguas arriba y aguas debajo de las boquillas
6	1 ¼"	determinación de temperaturas en la tubería aguas arriba de cada boquilla
2	2 ½",	Medición de temperaturas de bulbo húmedo y seco.
2	2"	Medición de temperatura a la entrada y salida del medidor en prueba. (caso de medidores de diafragma)
1	3"	Medición de temperatura a la entrada y salida del medidor en prueba. (caso de medidores de turbina)

Nota: las 6 RTD's seleccionadas para la determinación de temperatura aguas arriba de la boquilla fueron calibradas en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo contra un patrón de baño de termostático (los resultados de esta calibración se presentan en el apéndice D).

2.6.2 Sensores de presión

Encargados de tomar la variable física de presión y transformarla en una señal eléctrica, específicamente de corriente (4 a 20 mA). A pesar de que el diseño

contempla la determinación de presión aguas arriba de cada boquilla, inicialmente no se tomará en cuenta esta variable dentro del monitoreo, ya que los costos por la compra de 6 sensores de presión son muy altos, y dadas las recomendaciones del asesor del proyecto Kazuto Kawakita^{§§} es posible realizar una extrapolación de los valores de presión tomados en el plenum aguas arriba de las boquillas. Por lo tanto se seleccionaron en definitiva los siguientes sensores de presión:

A. Barómetro:

Figura 40. Imagen de Barómetro Omega.



- ü Descripción: barómetro electrónico de alta exactitud, fabricado en acero inoxidable, del tipo cable conector. Referencia PXM02MD0-541 MBARAI.
- ü Características: alta exactitud, compensado por temperatura en un rango de -18 a 66°C. Rango de operación: 541-1080 mbar.
- ü Proveedor: OMEGA INTERNATIONAL, USA.
- ü Costo: \$ 3.000.000 c/u incluido impuestos de importación.
- ü Cantidad: 2
- ü Función: uno de ellos determina la presión en el plenum aguas arriba de las boquillas y el segundo determina la presión absoluta en los alrededores del banco (presión atmosférica).

B. Vacuometro

^{§§} Kazuto Kawakita, Director del laboratorio de Pesquisas Tecnológicas do Sao Paulo, Brasil (IPT), y

Figura 41. Imagen Vacuometro marca Cole Palmer.



- ü Descripción: sensor de presión de vacío, Referencia 68848-00
- ü Características: encerramiento NEMA 4. Rango: -14.7 a 0 psig. Exactitud: $\pm 1\%$ escala completa. Intervalo de temperatura compensada de -40 a 100 °C. Intervalo de temperatura de operación de -40 a 121 °C.
- ü Proveedor: COLLE PALMER, con la representación en Colombia de LANZETTA RENGIFO & CIA.
- ü Costo: \$ 1.000.000 incluido impuestos de importación.
- ü Cantidad: 1
- ü Función: necesario para la verificación de la relación de presión crítica a través del sistema. Ubicado en el plenum aguas debajo de las boquillas.

2.6.3 Óptico

Se compone de un sensor de fibra óptica que envía una señal de voltaje a un amplificador donde se amplifica la señal enviada por el sensor y de desde allí se transmite al módulo digital cuando ha encontrado el reflectivo. Este elemento es el

asesor del proyecto Banco de boquillas sónicas.

encargado de monitorear las revoluciones a la que giran los medidores en prueba durante una calibración y de transformar esta información a pulsos.

Figura 42. Imagen de sensor óptico



- ü Referencia: UZFRT8
- ü Proveedor: SINCRON, Cali.
- ü Costo: \$745.000
- ü Cantidad: 1
- ü Función: se requiere para la determinación de las revoluciones del medidor en prueba.

2.6.4 Cronometro

Es el dispositivo encargado de determinar el tiempo de calibración requerido en el cálculo del caudal que pasa a través de el medidor en prueba. Para esta labor se escogió un Electronic Digital Timer ofrecido por la empresa ABTEK CONTROLS.

- ü Referencia : TA0801-RS232.
- ü Rango de aplicación: de 1 mS a 9 999 999 horas
- ü Potencia de salida: 12 V DC
- ü Display de 7 dígitos

Figura 43. Imagen de cronómetro digital



2.6.5 Módulos de entradas digitales y entradas análogas

Estos módulos reciben y acondicionan las señales eléctricas provenientes de los sensores de temperatura, presión (en forma analógica) y el óptico (en forma digital). La clase de módulos seleccionados son: Modulo Temperatura o SNAP AIRTD, de presión o SNAP AIMA y modulo óptico o SNAP IDC5 FAST , cada uno de ellos consta de 2 canales que reciben la señal de los sensores.

2.6.6 Cerebro B-3000

Es usado para el control de módulos de entradas y salidas digitales y análogas, debe ser usado con el controlador en una comunicación serial.

Características:

- ü Alimentación : 5 Voltios
- ü Temperatura de operación : 0 y 70C
- ü Interfases de comunicación : RS 485 / 422 a dos o 4 cables.
- ü Velocidades de transmisión de 115200 baud.

2.6.7 Controlador SNAP –LCSX-PLUS

Es el dispositivo donde reside el programa de control e intercambia continuamente datos con el cerebro B3000, este último recibe la información de los módulos para enviarlos al controlador.

Figura 44. Controlador , de la marca OPTO Control.



- ü Alimentación de 5 Voltios,
- ü comunicación con el PC por un puerto serial RS 232 (puerto HOST).
- ü Puerto de comunicación con el cerebro.
- ü Velocidades de transmisión de 115200 baud.
- ü Modo de comunicación : binario o ASCII.

2.6.8 Base SNAP B16M

Soporta y comunica todos los módulos con el cerebro, contiene tanto al cerebro como a los módulos de entradas y salidas, posee 16 posiciones en las cuales permite módulos mezclados análogos y digitales.

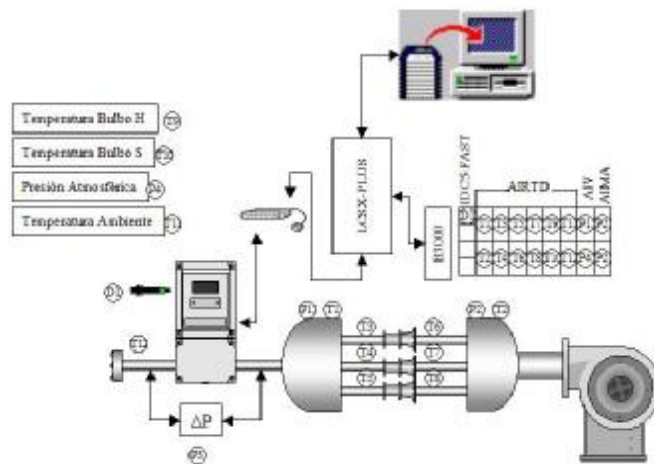
Figura 45. Base, marca OPTO Control.



Una vez identificados los elementos requeridos para el sistema de adquisición de datos, se procedió a identificar la polarización de cada uno de ellos, la forma de conexión y la distribución de las diferentes fuentes de alimentación.

La distribución de cada una de las variables de proceso y la conexión del sistema en general se puede ver en la figura

Figura 46. Diagrama esquemático del conexionado eléctrico.



2.7 SELECCIÓN DEL EQUIPO GENERADOR DE VACIO

El sistema generador de vacío es el encargado de producir la diferencia de presión a través de la boquilla necesaria para que el flujo de aire alcance las condiciones críticas cuando pasa a través de ella.

2.7.1 Condiciones de operación

La selección de este equipo tuvo en cuenta las condiciones de operación a las cuales trabajará el banco dadas las características atmosféricas del lugar donde funcionará.

- ü Fluido de trabajo: aire
- ü Condiciones de entrada al sistema: $T_e = 25^\circ\text{C}$, $P_e = 90500\text{ Pa}$ y $H_r : 50\%$
- ü Condiciones a la salida del sistema: $P_s = 0.528 \cdot P_e = 47784\text{ Pa}$, este valor se calcula considerando que no existe recuperación de presión a través de la sección divergente de las boquillas.
- ü Altura sobre el nivel del mar: 1000 msnm
- ü ΔP mínimo requerido: 42716 Pa
- ü Caudal: $500\text{ m}^3/\text{h} @ (s)$

La selección tuvo en cuenta los criterios de garantía, economía y asesoría en la instalación y durante el funcionamiento del equipo que ofrecen los proveedores existentes.

Cabe destacar que el equipo operará en un tiempo máximo aproximado de 2 horas en forma continua, y en número de veces tanto como lo requieran los servicios que de él se soliciten. Como proyección se tienen 5 o 6 calibraciones al mes.

Entre las alternativas encontradas para cumplir con los requisitos de este sistema se encuentran varios equipos en el mercado. La selección de proveedores final se realizó con base a las siguientes opciones:

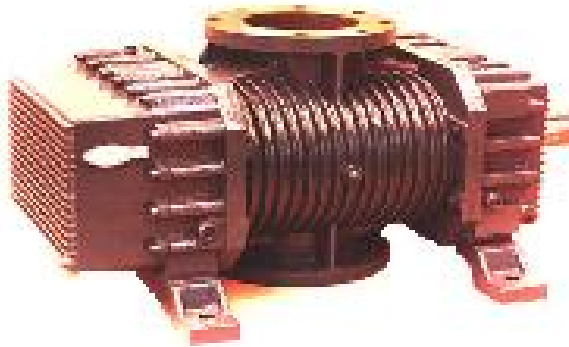
Tabla 8. Alternativas de selección de equipo generador de vacío.

Equipo	Nombre	Cyclo blower (tornillos)	Aspirador tipo Roots	Soplador multietapas
	Referencia	5 CDL-9	SRV- 0831	VHRG 0235-6D
Condiciones de operación	Q (m ³ /h) a @ 760 mmHg y 20°C y 60% humedad relativa	623,5 m ³ /h	600	500
	ΔP (kPa)	61	54	51.4
	Potencia HP	25.47	20	32.85
	Eficiencia %	35	37	37
Características Generales	Nivel de Ruido a 1 m de distancia en dB	84.1	90	93
	Precio \$	39'846.602 + impuestos	29'113.680	39'400.000 + impuestos
	Proveedor	Garden Denver	OMEL	Piller

Después de analizar las alternativas anteriores se seleccionó el equipo Aspirador tipo roots, el cual es ofrecido por la empresa brasilera OMEL. Dentro de las opciones este equipo es el mas económico, cumple con todos los requerimientos de operación y ofrece los mejores servicios de asesoria en el montaje y mantenimiento ya que cuenta con una empresa representante de esta marca en la ciudad de Bogotá (MELEC S.A.). A continuación se presentan las características principales de este equipo.

2.7.2 DESCRIPCIÓN DEL ASPIRADOR TIPO ROOTS SERIE SRV-0831

Figura 47. Imagen de Aspirador tipo Roots, serie SRV-0831



Es un compresor compuesto por dos lóbulos en forma de ocho que giran en direcciones opuestas. Cuando cada lóbulo pasa por la entrada del compresor almacena una cantidad de aire que corresponde a un cuarto del desplazamiento total del mismo. Este ciclo ocurre cuatro veces por rotación desplazando el gas contenido entre el lóbulo y la cámara hasta la salida del compresor.

El volumen de aire conducido es prácticamente constante, es función de la presión y proporcional a la velocidad de rotación. La presión está determinada por las resistencias existentes en la instalación. El movimiento de los lóbulos es regulado por engranajes sincronizados y la no existencia de fricción entre las partes evita el

empleo de lubricantes en la operación, razón por la cual el aire que fluye libre de aceites.

ü Materiales:

Carcasa, laterales y otros componentes en: fundición gris ASTM A-48 CI 30.

Lóbulos: en fundición nodular ASTM A395.

Ejes: acero bonificado SAE 4340

Engranajes: acero bonificado SAE 4340, forjados, templados y rectificadas.

Refrigeración: es normalmente enfriado por el aire ambiente, pero cuando la temperatura de salida del aire supera los 130°C, es necesario utilizar serpentines aletados con el fin de que la temperatura de este se mantenga en un nivel tolerable para los elementos de la máquina.

CAPITULO 3

CONSTRUCCION DEL BANCO DE BOQUILLAS SONICAS

Una vez finalizada la fase de diseño del banco fue necesario realizar un estudio que permitiera seleccionar los talleres en los cuales se desarrollara el proceso de construcción. Los criterios de selección fueron en todo momento centrados en la consecución de garantías, seguridad y bajos costos, teniendo presente el cumplimiento de los requerimientos exigidos por norma en los casos en los que hubiere lugar.

3.1 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS BOQUILLAS SÓNICAS.

Para llevar acabo la fabricación de las boquillas según las especificaciones dadas por planos anexos en concordancia con el estándar ISO 9300 fue necesario realizar los siguientes pasos:

3.1.1 Selección del taller para construcción de las boquillas.

El centro de mecanizado escogido fue el taller de mecánica fina de la Corporación para la Investigación en Corrosión (CIC), ubicado en el Parque Tecnológico de Guatimar (Piedecuesta-Santander), dada la tecnología y la calidad de sus máquinas de control numérico computarizado (CNC), la experiencia del personal que las opera y su compromiso con el desarrollo de trabajos enmarcados en proyectos de investigación y desarrollo tecnológico. El taller ofrece excelentes garantías de acabado, concentricidad y contorno geométrico, sumado a que en relación

costo/beneficio, el taller del CIC presentó los mejores resultados respecto a sus competidores en Bucaramanga, Bogotá y Medellín.

Con la realización de los trabajos de construcción en este taller se da cumplimiento a una de las expectativas planteadas para el desarrollo del proyecto, la cual consistió en la fabricación de las boquillas con tecnología nacional, comprobándose así que en el sector existe la maquinaria y personal capacitado para llevar a cabo trabajos de este tipo que contribuyen con el desarrollo tecnológico del país.

3.1.2 Compra del material para la fabricación de las boquillas

El material seleccionado para fabricar las boquillas fue el acero inoxidable AISI 316 L, el cual se adquirió a través de la Compañía General de Aceros en cilindros con los diámetros externos y las longitudes especificadas por los planos aumentadas en algunos milímetros para garantizar que después del maquinado las dimensiones externas cumplieran con los requerimientos de diseño.

Figura 48. Redondos de acero inoxidable AISI 316L para la fabricación de las boquillas sónicas.



3.1.3 Proceso de maquinado de las boquillas.

El procedimiento de maquinado de las piezas se realizó en dos máquinas herramientas de Control Numérico Computarizado (CNC), un torno paralelo y una fresadora universal.

Figura 49. Máquinas herramientas Torno (izq.) Fresadora (der.) del Taller de Mecánica fina CIC (der.)



Gracias a la facilidad y exactitud que el funcionamiento de este tipo de máquinas ofrece, fue posible programar por medio de funciones cada una de las operaciones requeridas para maquinar el perfil interno de la boquilla y así mismo crear las roscas y las superficies planas de la parte exterior de cada una de ellas. A continuación se describe en forma general el procedimiento llevado a cabo en el maquinado de una boquilla.

- Ubicación del material en la copa de mordazas auto-centrantes del torno CNC.

Figura 50.Montaje del cilindro en el torno por medio de mordazas.



- Centrado del material con la ayuda de un indicador de carátula para garantizar el alineamiento del material con respecto a la máquina.
- Cilindrado pequeño para fijar los puntos de referencia o ceros relativos de la máquina.

Figura 51.Taladrado de la pieza



- Centrado de la pieza con una broca de centros y taladrado para obtener un agujero a lo largo de la longitud total de la pieza.

- Programación de la máquina herramienta para que realice el proceso de roscado desde uno de los extremos de la pieza y del proceso de maquinado de la parte interna convergente, el cual consiste en un círculo en revolución al que se le introducen los datos de: diámetro de entrada de la boquilla y diámetro de salida de la zona convergente. Se corre el programa y la máquina ejecuta el trabajo.

Figura 52. Vista de rosca externa y zona convergente de la boquilla



- Programación de la zona divergente, llamada cono, para este se definen los diámetros de entrada, salida y longitud, la máquina utiliza una plantilla predeterminada para hacer conos.
- Por último la pieza se prensa en la fresadora para maquinar las superficies planas. La máquina cuenta con una plantilla determinada para realizar superficies planas.

Mediante la ejecución de los pasos anteriormente descritos fue posible maquinar las boquillas de 250, 150 y 100 m³/h según las dimensiones y especificaciones de cada una de ellas.

Figura 53.Boquillas de 250 (izquierda), y 100 (derecha) m³/h construidas.



Sin embargo para el maquinado de las otras 4 boquillas fue necesario realizar una pequeña variación en el procedimiento, la cual consistió en el maquinado de la geometría interna toroidal en un cilindro de acero de pequeñas dimensiones por un lado y por otro el maquinado de la carcasa con las dimensiones externas según las especificaciones de planos y la geometría interna requerida para el ajuste forzado del inserto.

Figura 54.Foto de carcasa de la boquilla de 50 m³/h construida y los insertos de 3, 12.5 y 25 m³/h.



El resultado final de este proceso es la fabricación de 3 boquillas de una sola pieza y 4 del tipo inserto carcasa como lo muestra la figura No 55.

Figura 55. Foto de boquillas de 250, 150 y 100 m³/h y carcasas de boquillas de 50, 25, 12.5 y 3 m³/h construidas.



3.1.4 Pulido de las boquillas

Una vez finalizado el maquinado de las boquillas se llevó a cabo un pulido de las superficies internas para mejorar el acabado superficial que produjo la máquina herramienta y así cumplir con los requerimientos de rugosidad superficial en la zona convergente y divergente de la boquilla. Este procedimiento se realizó en dos etapas:

- ü Pulido con lija fina: se montaron las boquillas de nuevo en el torno y se realizó una pasada con lija 600 a una alta velocidad y con la misma programación para el perfil interno, lográndose un buen acabado superficial. Este proceso fue efectivo en las boquillas más pequeñas.

ü Pulido con pasta pulidora: Ya que no es recomendable que la geometría toroidal y en general todo el perfil interno de la boquilla sufra cambios por la acción abrasiva de lijas, se prosiguió con la aplicación de una crema abrasiva (brilla metal) con la ayuda de una herramienta para pulir, obteniéndose mejores resultados a simple vista.

Nota: todos los requerimientos de rugosidad y dimensiones internas de las boquillas fueron corroboradas en el laboratorio del IPT en Brasil, ya que en Colombia no se cuenta con los dispositivos necesarios para cumplir estas labores.

3.2 CONSTRUCCION DE ACOPLES:

La empresa seleccionada para esta labor fue el Centro de Investigación en Corrosión, debido a todas las ventajas anteriormente expuestas, sumadas al beneficio en el que se incurre al fabricar las boquillas y los acoples que permiten su conexión al sistema en el mismo lugar, evitándose así posibles problemas en el ensamble y montaje.

3.2.1 Compra del material

El material de los acoples fue comprado a la Compañía General de Aceros seccional Bucaramanga en cilindros de acero inoxidable AISI 304, con las dimensiones requeridas para cada uno de los tipos de acoples diseñados.

Figura 56.Foto material acero inoxidable AISI 304, para fabricación de acoples



El acero inoxidable AISI 304 fue seleccionado para este propósito debido a que es el acero inoxidable más económico que existe en el mercado y además cumple con todas las especificaciones técnicas requeridas.

3.2.2 Maquinado

Este material fue transformado mediante una serie de procesos en las maquinas de control numérico del CIC, los cuales se describen a continuación:

- ü Cilindrado interior: En el torno cada pieza de acero fue cilindrada interiormente para darle las dimensiones a la zona interna, según especificaciones de planos y requerimientos de cada rosca.

Figura 57. Material perforado para la fabricación de acoples



- ü Cilindrado exterior: dada la geometría de algunos de los acoples fue necesario cilindrarlos exteriormente para dar las dimensiones y características definidas en el diseño.

Figura 58. Material mecanizado parcialmente para la fabricación de acoples para los plenums.



- ü Roscado exterior e interior: en el torno CNC se roscaron interior y exteriormente todos los acoples para permitir la conexión de estos con cada uno de los elementos a ensamblar.
- ü Fresado: En la fresadora CNC se elaboraron las superficies planas de los acoples que lo requerían, según las especificaciones indicadas en los planos anexos. Estas superficies planas permitirán el agarre de los acoples por parte de una herramienta para su montaje en el banco.

Al final se obtuvieron 30 acoples en total, cada uno con las dimensiones externas, internas y roscas según sus especificaciones de diseño.

3.3 TUBERIAS

Se compró la tubería de acero inoxidable schedule 10 a la empresa Sanitubo, después de haber realizado las pruebas de rugosidad en el ICP y comprobado que los valores obtenidos para el tipo de tubería que ellos ofrecen se encuentran por debajo de los requeridos por norma. Las siguientes son las dimensiones de la tubería adquirida.

- 1 tubo de 2 ½" de diámetro y 6 m de largo: del cual se obtuvieron los 5 tubos aguas arriba de las boquillas y 15 niples requeridos aguas abajo, tres para cada una de las líneas de flujo.
- 1 tubo de 4" de diámetro y 1.3 m de longitud: del cual se obtuvieron el tubo aguas arriba para la boquilla de 250 m³/h y los tres niples aguas debajo de esta.

Figura 59. Tubería adquirida para la construcción de las líneas de flujo.



La tubería fue cortada en el CIC con sierra mecánica para darles las dimensiones requeridas a los tubos aguas arriba y a los niples. Mientras se fabricaban los acoples la tubería permaneció en el taller para la continua prueba de dimensiones necesarias para la soldadura posterior.

3.4 CONSTRUCCIÓN DE PLENUMS

3.4.1 SELECCIÓN DEL TALLER DE METALMECÁNICA

Después de una extensa búsqueda y estudio de los talleres de metalmecánica de la región, se estableció que dados los bajos costos, la disponibilidad de un gran número de maquinas herramientas, personal capacitado y la experiencia del CDT de Gas en

trabajos anteriores con Metalteco S.A. esta empresa representa la mejor alternativa para llevar a cabo los trabajos de corte, soldadura, rectificado y taladrado que la construcción de varios de los componentes del banco requieren.

3.4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN

Se fabricaron los plenums a partir de 2 cilindros formados por 3 láminas de acero inoxidable, una de ellas de 1/8" de espesor para el desarrollo y dos tapas laterales de 1/4" de espesor. Paralelo a estos elementos se fabricaron los tubos y bridas que serán empleadas en la conexión de la tubería y medidor en prueba así como en la instalación del compresor. Para la fabricación de estos componentes fue necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

- ü Corte: Se realizaron dos tipos de corte uno para las láminas del desarrollo de cada cilindro y tubo llevados a cabo en una cizalla mecánica, y otro para la elaboración de las tapas laterales con un equipo de corte por plasma.

Figura 60. Corte de lámina para fabricación de plenums y tubos de salida.



La geometría de los desarrollos se obtuvo a partir de una lámina de dimensiones comerciales (2m*1 m) resultando dos secciones de lámina con las dimensiones correspondientes a los desarrollos de cada cilindro: uno de (0,400m*0,605m), otro de

(0,204m*0,605m) para los plenums y dos de (0,2m*0,6m) para los tubos de salida de los plenums.

Las tapas laterales se cortaron de una lámina de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " de espesor resultando 4 tapas en forma circular de radio 600 mm y con los orificios descritos según planos para el montaje de los tubos en las caras frontales, y las bridas en las traseras.

Figura 61. Imágenes de laminas cortadas para fabricación de plenums



ü Doblado: en este proceso las laminas de los desarrollos de cilindros tanto para los plenums como para los tubos de las bridas, fueron pasadas por la enrolladora de lámina, en la cual a partir de la presión aplicada por el juego de 3 rodillos se generaba la deformación suficiente para en forma progresiva ir logrando la forma cilíndrica deseada.

Figura 62. Proceso de doblado de las láminas de desarrollo de los plenums



ü Soldadura: se aplicó soldadura tipo TIG, con material de aporte, ya que este tipo es la más empleada con el acero inoxidable debido al poco calentamiento que produce en el material. Con ella se unieron los dos extremos de la lamina del desarrollo, así como los extremos de los tubos de unión a las bridas.

Figura 63. Imágenes de proceso de fabricación de plenums y tubos de conexión a bridas.



Con el fin de garantizar un buen alineamiento entre todos los orificios al ser enfrentados los plenums de entrada y de salida se maquinaron simultáneamente las tapas frontales en el torno, para lo cual fue necesario colocar puntos de soldadura entre las dos tapas y al mismo tiempo sobre el plato giratorio previniéndose así las vibraciones y problemas durante el maquinado.

Figura 64. Imagen de montaje de placas frontales de los plenums en el torno.



Con este procedimiento se asegura un contacto perpendicular entre la superficie de cada tapa y los acoples a soldar sobre ellas.

Se soldaron las tapas frontales y posteriores de los plenums con un cordón de soldadura completo después de una previa punteada de las superficies en contacto para prevenir posibles deformaciones durante el proceso.

Figura 65. Proceso de soldadura de los plenums.



Fue necesario soldar los acoples que corresponden a la unión plenums- tubería por dentro de los cilindros antes de soldar las tapas.

Figura 66. Acoples soldados en la cara interna de los plenums.



- ü Esmerilado: después de cada soldadura aplicada se esmerilaron las superficies para que los acabados fueran más suaves y no existieran rebordes o filos que también son producto del corte de las láminas.

Figura 67. Proceso de esmerilado de las superficies soldadas y cortadas.



- ü Pulido: con el fin de mejorar aun mas los acabados y la presentación en general se realizó un pulimento con disco de lija en una pulidora. Este disco retiró los elementos indeseables en la superficie externa de los plenums dando un acabado superficial bueno.

Figura 68. Imagen de plenums contruidos.



3.5 BRIDAS

Estos elementos se fabricaron en lámina HR, fueron cortados con plasma inicialmente según las especificaciones de planos anexos y esmeriladas para mejorar los acabados del corte. Posteriormente se sometieron aun maquinado superficial para garantizar la planicidad de sus caras y luego a un proceso de galvanizado para prevenir el prematuro envejecimiento por corrosión.

Figura 69. Imágenes de proceso de esmerilado (izquierda) y torneado (derecha) de las bridas.



Las bridas una vez terminadas se soldaron a los cilindros previamente doblados y soldados para luego unirlos a las tapas traseras de los plenums.

Figura 70. Imágenes de las bridas y los tubos para conexión de los plenums.



3.5 SOLDADURA DE ACOPLES Y TUBOS

Se empleo soldadura MIG y como material de aporte acero AISI 304 en la unión de todos los acoples a los tubos, el procedimiento llevado a cabo es el siguiente:

- ü Montaje de los acoples en el tubo: para garantizar la perpendicularidad entre los acoples y el tubo se utilizó un dispositivo roscado con platos en sus extremos, estos platos reciben los acoples y por medio de una tuerca permiten ejercer la presión necesaria para asegurar la correcta posición de los elementos a unir durante todo el proceso de soldadura.

Figura 71.Montaje tubo y acople para soldadura



- ü Punteado con soldadura: este procedimiento se realiza para fijar parcialmente las piezas con el fin de rectificar la posición entre las piezas a soldar antes de aplicar el cordón de soldadura completo. Este proceso se realizó sin material de aporte.
- ü Aplicación del cordón de soldadura: se efectúa con material de aporte garantizándose con este la hermeticidad, continuidad y la no aparición de poros que puedan generar fugas en el sistema.

3.6 ELEMENTOS DE BLOQUEO

De acuerdo con lo establecido en la fase de diseño se seleccionaron 6 válvulas de bola tipo pesado con las características enunciadas en la siguiente tabla.

Tabla 9. Características de válvulas

DIÁMETRO NOMINAL	2 ½"	4"
Material	bronce cromado	bronce cromado
Rosca	NPT	NPT
Marca	VIR	Bugatti
Proveedor	Ferretería Sanitubo	TCL

Figura 72. Válvula 4"

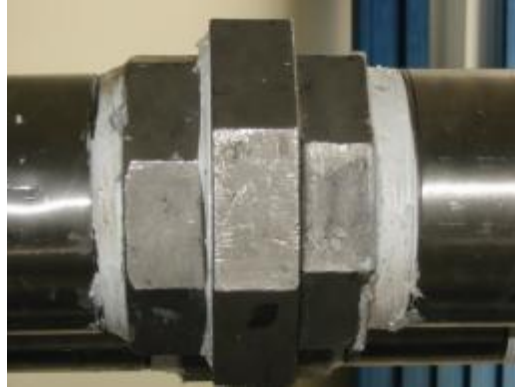


3.7 UNIONES UNIVERSALES

Las uniones universales se seleccionaron según las dimensiones de la tubería, es decir 5 uniones de 2 ½" y 1 de 4". El material de estas es acero inoxidable AISI 304 y la conexión al sistema viene dada por roscas internas NPT de 2 ½" y 4" nominal. El

proveedor de estos elementos fue la Ferretería Sanitubo, gracias a las garantías y bajos costos.

Figura 73. Universales 4"



3.8 TOMAS DE PRESION Y TEMPERATURA

El material para la fabricación de las tomas se compró en cilindros de acero SAE 304 de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y una longitud de 40 cm en la Compañía General de acero y fueron maquinadas en la empresa Metalmecánica Murillo.

El proceso de fabricación de las tomas de presión se realizó en un torno paralelo, en el cual se cilindraron internamente y se roscaron con un macho de roscar de tipo $\frac{1}{4}$ " NPT.

En cuanto a las tomas de temperatura, estas fueron adquiridas en la ferretería Sanitubo en forma de uniones de $\frac{1}{4}$ " NPT de acero inoxidable, y posteriormente divididas en dos partes, cada una siendo una toma de temperatura.

Figura 74. Foto de tomas de presión y temperatura.



Después de contar con las tomas de temperatura y presión construidas se procedió con la soldadura de estos a los tubos. Este proceso se realizó sin material de aporte ya que de esta manera el tubo sufría menor calentamiento y por lo tanto menores deformaciones en su superficie interna.



Figura 75. Nivelación de la toma de presión antes de soldarse a los tubos.

Antes de soldar las tomas de presión y de temperatura en los tubos, estos últimos se roscaron en los plenums con el fin de conocer la posición exacta en la que quedarían después del ensamble. Una vez conocida la posición con ayuda de un nivel se ubicaron las tomas a soldar, garantizándose así la perpendicularidad entre las superficies.

Figura 76. Imagen de proceso de soldadura de tomas de presión y temperatura en los tubos.



El resultado final de este proceso fueron los 6 tubos con los acoples y las tomas de temperatura y presión soldados en el lugar correspondiente.

Figura 77. Tubos soldados y terminados



3.9 ENSAMBLE

Una vez contruidos, seleccionados y comprados todos los elementos constitutivos del banco se procedió a realizar el ensamble completo. Inicialmente se roscaron todas las piezas que conforman la línea aguas arriba y aguas debajo de la boquilla

por separado, utilizando en cada unión teflón y silicona para garantizar la hermeticidad del sistema.

Figura 78. Tubería roscada a los accesorios con teflón y silicona.



Después se montaron los plenums sobre la estructura. El plenum aguas arriba se fijo a la placa superior de la estructura por medio de tornillos, seguidamente se montaron las líneas de flujo aguas arriba con la boquilla roscada y sellada a través de un oring, y posteriormente la línea aguas abajo junto con el plenum de salida, la flexibilidad del montaje la dieron las uniones universales. El resultado final es el banco mostrado en la figura 79.

Figura 79. Banco de Boquillas sónicas construido



CAPITULO 4

CALIBRACION DE LAS BOQUILLAS SONICAS

El banco patrón basado en la tecnología de boquillas sónicas, tiene como objetivo principal la determinación de caudales de referencia, a partir de los cuales es posible lograr la calibración de diferentes tipos de medidores de gas por medio de la comparación entre los valores especificados por el patrón y los resultantes del medidor en prueba.

Es necesario entonces conocer o determinar de la mejor manera los caudales de referencia obtenidos a partir del patrón, para ello se hace necesario conocer el verdadero valor de la magnitud a medir (caudal en este caso) y dado que este verdadero valor es imposible de determinar, lo que se hace es estimar los límites dentro de los cuales la probabilidad de que se encuentre es muy alta, al mismo tiempo se estima un valor esperado, que para efectos prácticos se asignará como verdadero.

La imperfección natural de la realización de las mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de la magnitud a medir es por eso que toda medición lleva implícita una incertidumbre, que de acuerdo al VIM^{***}, es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente a dicha magnitud.

La trazabilidad se considera como la propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, en virtud de la cual ese resultado se puede relacionar con

referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas incertidumbres determinadas.

El diseño y la construcción del banco de boquillas sónicas tuvo en cuenta los parámetros que influyen y determinan los valores de incertidumbre de las mediciones. Los resultados de este análisis son presentados en el calculo de “Mejor estimado de la medición” (ver apéndice C).

4.1 GENERALIDADES DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Las boquillas, elementos que constituyen el dispositivo primario del banco fueron calibradas en el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo (Brasil) con la ayuda de patrones aceptados internacionalmente y bajo el procedimiento sugerido por el Reglamento de Prueba del PTB, tomo 25^{†††}.

Figura 80. Instalaciones del Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo (Brasil).



*** Vocabulario internacional de metrología.

††† Reglamento de Prueba del Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB, Laboratorio Aleman), Medidores de Gas –Bancos de pruebas con toberas críticas- 1998.

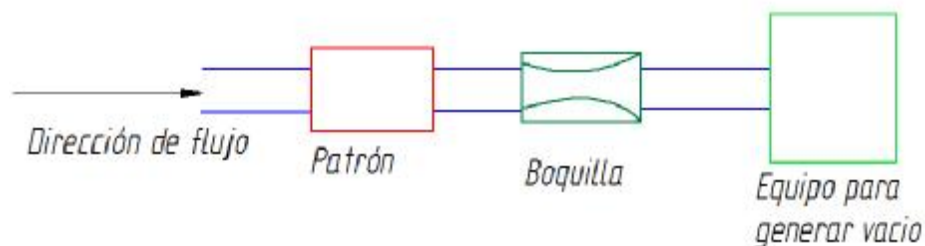
Durante la calibración, el flujo a través de la boquilla en condiciones de flujo crítico fue determinado por comparación con un patrón adecuado y convertido al estado especificado por las condiciones del flujo. El estado de referencia tomado está basado en las siguientes condiciones:

- ü Presión de entrada a la boquilla: 1000 mbar
- ü Temperatura de entrada a la boquilla: 20 °C
- ü Humedad relativa del aire de ensayo: 0%.

4.2 Descripción del sistema de calibración

La instalación del sistema de calibración de cada una de las boquillas sónicas consistió en una distribución como la presentada en la figura 81, en la que se muestra la interconexión básica de boquilla y patrón.

Figura 81. Esquema de la disposición de boquilla a calibrar y patrón.



Las boquillas de 150 y 250 m³/h se calibraron con el empleo de una turbina del PTB como patrón, mientras que las boquillas de 100, 50, 25, 12.5 y 3 m³/h se calibraron con una campana gasométrica.

Figura 82. Patrones de calibración de las boquillas sónicas, turbina (izquierda) y campana gasométrica (derecha)



En ambos casos la boquilla se ubicó aguas abajo del patrón dada la facilidad de montaje y considerando que el flujo cuando pasa a través de la turbina y de la campana no sufre mayores perturbaciones, por lo tanto el comportamiento aguas arriba de la boquilla no se ve considerablemente afectado.

Todas las instalaciones de calibración contaron con la adecuación de una bomba de vacío aguas abajo de la boquilla para la generación del flujo de aire. Las 6 boquillas mas grandes utilizaron una de gran capacidad y con la de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ se empleó una de baja capacidad, ya que el flujo a manejar era muy bajo.

Figura 83. Imágenes de bombas de vacío empleadas en la calibración, bomba para boquillas grandes (izquierda) bomba para boquilla de $3 \text{ m}^3/\text{h}$.



4.2.1 Sala de calibración y medios de ensayo

La temperatura de la sala de prueba se mantuvo constante con variaciones no mayores a 0.5°K por hora pudiéndose considerar estable con respecto al tiempo y lugar.

Los medios de ensayo comprenden los sensores, entre los empleados se encuentran:

- Presión atmosférica: este valor es empleado en el cálculo de la fracción molar de vapor de agua necesario para la determinación de la humedad del aire. El dato fue tomado constantemente durante cada prueba.
- Cronómetro: fue empleado en la determinación de los volúmenes y definió el tiempo de toma de datos por parte del software.
- Temperatura: fueron empleados RTD's. Entre ellos, los requeridos aguas arriba de la boquilla, en el patrón y en los alrededores del sistema para las lecturas de las condiciones atmosféricas (temperatura de bulbo húmedo y seco ubicadas en un psicrómetro).

Estos elementos fueron debidamente calibrados en el laboratorio de metrología del IPT, el cual se encuentra certificado por INMETRO y forma parte de la red brasileña de calibración.

4.3 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

Existen 2 tipos de ensayos para la calibración de las boquillas sónicas:

4.3.1 Ensayo en un punto

Las boquillas son calibradas solamente para las condiciones de presión atmosféricas que hay en el momento de la prueba, en este tipo de prueba es necesario realizar por

lo menos 3 tomas de datos individuales. Estas mediciones son evaluadas separadamente, y de los resultados se determina un valor promedio para el valor de referencia buscado.

Este método solo tiene en cuenta la dependencia de la velocidad del sonido con la temperatura y la de la función de flujo crítico con la humedad del aire de ensayo mientras desprecia la de la presión de entrada en el caudal de referencia. Este método es válido siempre y cuando ofrezca valores de incertidumbre dentro del rango esperado y además del tamaño de la boquilla y ante todo de la gama de presión disponible a la entrada que sean esperadas.

4.3.2 Ensayo en 2 puntos

Se toman en consideración todas las dependencias del valor de referencia de la boquilla. Sin embargo la dependencia de la presión de entrada solo puede ser determinada con ayuda de mediciones adicionales, ejecutadas con diferentes presiones de entrada.

Para este ensayo hay que ejecutar como mínimo las siguientes mediciones en el orden indicado:

- Dos mediciones bajo condiciones de presión atmosféricas
- Dos mediciones con presión de entrada reducida (al menos 50 mbar debajo de la presión atmosférica)
- Una medición de repetición bajo condiciones de presión atmosféricas.

Para el empleo posterior de las boquillas calibradas según el método de medición en puntos, además de la dependencia del caudal de la boquilla de la presión de entrada, que es supuesta como aproximadamente lineal y válida para el alcance de la presión realmente ensayada, también es permitida una extrapolación lineal para presiones de entrada mayores, siempre que estas presiones estén dentro del marco de las

variaciones normales de la presión atmosféricas y no que no fue posible determinarlas durante el ensayo mismo debido a las condiciones que existían.

Según los estudios realizados por el PTB en las boquillas de diferentes diámetros, la influencia de la presión de entrada se puede despreciar en el caso de boquillas que trabajen con caudales mayores a los $25 \text{ m}^3/\text{h}$ y por lo tanto pueden ser calibradas bajo el criterio de ensayo en un punto, mientras que en las mas pequeñas si se hace indispensable la realización del ensayo en dos puntos. Por esta razón las boquillas mayores e iguales a $25 \text{ m}^3/\text{h}$ solo contarán con la toma de datos correspondiente a mínimo 3 mediciones bajo condiciones atmosféricas y varias a diferentes relaciones de presión, para la verificación de la relación de presión crítica.

4.4 CALIBRACIÓN DE BOQUILLAS SÓNICAS DE 150 Y 250 M^3/H CON PATRÓN TIPO TURBINA.

Figura 84.Instalación para calibración de boquillas con patrón tipo turbina.



Tal como se muestra en la figura 84 se acondicionó una línea de flujo en la cual se instalaron todos los elementos requeridos en el sistema de calibración, ellos son (de derecha a izquierda):

- ü Tubería de 4" con una longitud de 10 veces el diámetro, ubicado aguas arriba de la turbina. Este tramo es requerido para la estabilización del perfil de flujo antes de entrar a la turbina.
- ü Rectificador de flujo: elemento insertado en la tubería aguas arriba de la turbina para contribuir en el acondicionamiento del flujo a la entrada.
- ü Turbina G650: medidor patrón del PTB que a través de los pulsos emitidos por los giros de su rotor da una medida del volumen que pasa a través del sistema y a partir del tiempo de calibración el caudal. Este dispositivo puede ser empleado bajo un rango de 50 a 1000 m³/h.
- ü Tramos de tubería y accesorios: fue necesario utilizar una reducción de la sección de área entre la tubería de la turbina y la de boquilla dadas las diferencias entre las bridas de estos dos elementos.
- ü Tubo de calibración de boquilla: conformado por la tubería aguas arriba de la boquilla, la cual hará parte del sistema de calibración bajo el cual operará el banco (de tal forma que estas condiciones correspondan en gran parte a las condiciones esperadas para las aplicaciones posteriores en el banco de pruebas); la boquilla a calibrar; el sensor de temperatura y de presión ubicados aguas arriba de la boquilla.
- ü Sensor de presión aguas debajo de la boquilla: necesario para la verificación de la relación de presión crítica a través de la boquilla.
- ü Bomba de vacío y conexiones para el montaje de esta al sistema.

Nota: las condiciones de flujo a través del patrón fueron determinados a través de un sensor de presión instalado en el cuerpo de la turbina y la temperatura de salida de esta fue considerada igual a la temperatura en la entrada de la boquilla.

Se emplearon otros elementos como el cronometro, contador de pulsos y psicrómetro, para determinar las demás variables de proceso requeridas en el cálculo de flujo volumétrico, así como el computador y software necesario para la adquisición de datos.

Figura 85. Contador de pulsos (izquierda) y psicrómetro (derecha) utilizados durante la calibración.



Una vez dispuesto el montaje se prosiguió con la realización de varios pasos que llevados a cabo en forma sucesiva permitieron la determinación de todos los valores de las propiedades y magnitudes requeridas en los cálculos. El método de ensayo seguido para estas boquillas fue el de un punto dadas las dimensiones de las boquillas.

Cada una de las 2 boquillas fue sometida al siguiente procedimiento:

- a. Ensayo de estanqueidad: consistió en la presurización de la línea de flujo y la instalación de un manómetro de columna en uno de los puntos de toma de

presión. A través de la variación de la columna de agua en el manómetro se verificaba la existencia de fugas en el sistema siendo el criterio de evaluación lo establecido para este tipo de ensayos : “máxima variación en la columna de agua igual a 2 mm por minuto”.

Figura 86. Manómetro de columna instalado durante el ensayo de estanqueidad.



- b. Encendido de la bomba de vacío y circulación del flujo durante 30 minutos, esto con el fin de lograr la estabilización del flujo a través de la boquilla y el patrón así como de las condiciones ambientales leídas con el psicrómetro.
- c. Toma de datos con el software cada 5 segundos durante 10 minutos, esto incluye lecturas de presión atmosférica, temperaturas de bulbo húmedo y seco, temperatura a la entrada de la boquilla, presiones a la entrada y salida de la boquilla, presión en la turbina, tiempo y pulsos.

Nota: el paso (c) se llevó a cabo varias veces bajo la mínima relación de presión alcanzada con la bomba en cada boquilla y 1 vez para diferentes relaciones de presión .

4.5 CALIBRACIÓN DE BOQUILLAS SÓNICAS DE 100, 50, 25, 12.5 Y 3 M³/H CON PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA.

Figura 87. Imagen de instalación para calibración de boquillas con patrón tipo campana gasométrica.



El sistema de calibración constó de:

- ü Campana gasométrica, medidor patrón del IPT con un rango de operación de 0.1 a 120 m³/h. Ubicada aguas arriba de la boquilla con los elementos necesarios para su conexión al sistema de calibración (válvulas, bridas y tubería).
- ü Sensores de presión y temperatura en la campana, para la determinación de las condiciones del aire en el patrón.
- ü Tubo de calibración de boquilla, con las características definidas para las boquillas calibradas con turbina.
- ü Sensor de presión aguas debajo de la boquilla: necesario para la verificación de la relación de presión crítica a través de la boquilla.

ü Manguera y válvula para conexión de la Bomba de vacío al sistema.

Se utilizaron también el cronometro, contador de pulsos, psicrómetro, el computador y software necesario para la adquisición de datos.

Los pasos llevados a cabo durante la calibración de estas boquillas fueron iguales a los anteriormente descritos excepto por las consideraciones que hubo que tener en cuenta en la operación de la campana, entre ellas el esperar un tiempo entre toma y toma de datos ya que era necesario asegurar que el aceite en la campana escurriera completamente.

Por otro lado la toma de datos para el caso de las boquillas menores a $25 \text{ m}^3/\text{h}$, tuvo en cuenta la reducción de la presión a la entrada de la boquilla en concordancia con lo establecido por el ensayo en dos puntos.

4.6 ECUACIONES DE TRABAJO

Las ecuaciones utilizadas a continuación son derivadas de la teoría de flujo critico aplicada a boquillas, aquí las condiciones de estancamiento del gas para presión P_0 y temperatura T_0 , son sin embargo, reemplazados por los valores de P_D y T_D medidos en la entrada de la boquilla. Los subíndices N son referidos a las condiciones del patrón.

Como resultado del proceso de calibración se determinó para cada boquilla un valor de referencia de flujo volumétrico.

4.6.1 Determinación del valor de referencia de la boquilla $Q_{V,20,tr}$ (ensayo en un punto).

En este caso las ecuaciones de trabajo utilizadas fueron las siguientes:

$$Q_{v,20,tr} = \frac{r_N}{r_D} \frac{1}{(1 + 0.169x_v)} \sqrt{\frac{293.15}{T_D}} Q_N \quad \text{Ecuación 51}$$

$$\text{con} \quad Q_N = \frac{V_N}{t} \frac{1}{(1 + f_N / 100)} 3600s \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde f_N representa el error de medición del contador patrón. En la ecuación (52), para $Q_{v,20,tr}$, se realiza la conversión del estado termodinámico del medidor patrón a la boquilla con ayuda de la densidad relativa apropiada. El segundo factor de esta ecuación toma en consideración la dependencia del caudal de la boquilla a la humedad (conversión a una humedad relativa de 0%). El tercer factor hace la conversión de temperatura a una referencia de 20°C.

La respectiva densidad ρ_i y el factor de compresibilidad Z_i (para el patrón y la boquilla) son calculados a partir de las formulas recomendadas por el BIMP⁺⁺⁺ para la determinación de densidad de aire húmedo. Dentro de las fórmulas de cálculo de la densidad y el factor de compresibilidad se encuentra la fracción molar de vapor x_v , la cual se determinó a partir de las condiciones ambiente en la sala de medición de la que se aspiró el aire de ensayo. Se supone que el aire húmedo no se condensó en la sala de medición o en el dispositivo de medición y que la porción molar del vapor de agua no cambió. El valor para x_v fue calculado a partir de la humedad relativa del aire h.

Los valores de temperatura y presión ambiente utilizados en estos cálculos fueron medidos cerca de la entrada de aire del sistema de calibración.

4.6.2 Determinación del valor de referencia de la boquilla $Q_{v,20,tr,1000}$ (ensayo en 2 puntos).

⁺⁺⁺ Bureau International des poids et mesures.

Como se mencionó este ensayo si incluye la dependencia del caudal con respecto a la presión de entrada. El valor de referencia de la boquilla es convertido en la presión de referencia de 1000 mbar y denominado como $Q_{v,20,tr,1000}$.

El cálculo se realizó como se describe a continuación:

- $Q_{v,20,tr,pmax}$ calculado con $p_{D,max}$, mediante las 2 mediciones ejecutadas al principio, y con la medición de repetición realizada después de las tomas de datos a presión reducida.
- $Q_{v,20,tr,pmin}$ calculado con $p_{D,min}$, mediante las 2 mediciones realizadas a presión reducida a la entrada de la boquilla.

Con estos valores se calculó lo siguiente:

$$c' = \frac{Q_{v,20,tr,pmax} - Q_{v,20,tr,pmin}}{p_{D,max} - p_{D,min}} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$Q_{v,20,tr,1000} = Q_{v,20,tr,pmax} - c'(p_{D,max} - 1000) \quad \text{Ecuación 54}$$

$$c_{PE} = \frac{c'}{Q_{v,20,tr,1000}} \quad \text{Ecuación 55}$$

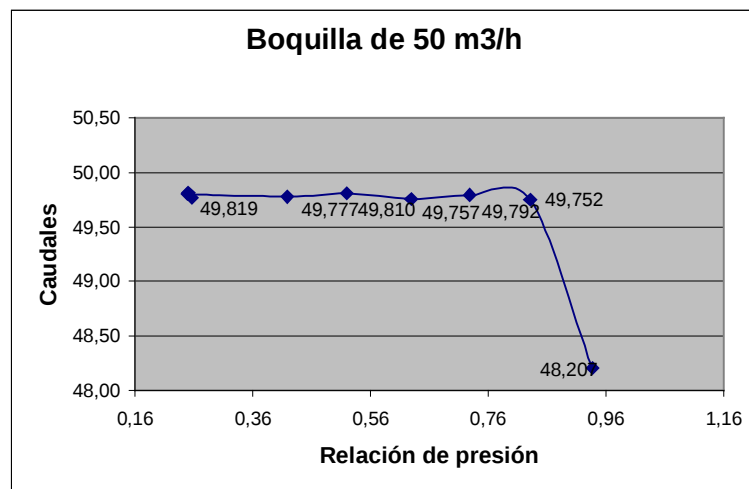
4.7 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Los resultados de la calibración de todas las boquillas sónicas son presentados en el apéndice E, en este es posible observar los datos tomados durante cada prueba (tiempos, temperaturas, pulsos y presiones) y los valores de cada una de las propiedades calculadas (densidad, humedad absoluta y factor de compresibilidad). Varias de estas propiedades fueron determinadas con base a el programa de cálculo

“pshycro” elaborado a partir de las ecuaciones planteadas por el ASHRAE^{§§§}, este modelo de cálculo garantiza la aplicabilidad de las formulas para el rango de trabajo utilizado, ya que abarca un rango de temperaturas que va -100 a 200 °C y de presiones desde 0 a 500 Kpa.

De los resultados de la calibración se obtuvieron las graficas que describen el comportamiento del flujo a través de cada boquilla para diferentes relaciones de presión, mostrándose en ellas a su vez la dispersión de los datos con los cuales fue posible calcular el valor de incertidumbre asociado a cada valor de referencia promedio obtenido.

Figura 88. Gráfica de resultados de calibración para la boquilla de 50 m³/h.



En la figura 88, se muestra la gráfica que contiene los resultados de la calibración de la boquilla de 50 m³/h, en esta se observa que el caudal a través de la boquilla se mantiene prácticamente constante para todas las relaciones de presión menores a 0,93 y que para relaciones mayores el caudal se reduce ya que la boquilla vuelve a la

^{§§§} American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

condición de flujo subsónico. Este comportamiento lo presentan todas las curvas de calibración correspondientes a las demás boquillas.

Por otro lado se puede apreciar que la recuperación de presión para todas las boquillas en general es muy buena ya que a altas relaciones las boquillas se encuentran bloqueadas y el flujo que pasa a través de ellas se considera sónico, facilitándose de esta forma la operación del equipo generador de vacío ya que las exigencias sobre este serán limitadas.

Cabe anotar también que los valores de incertidumbre calculados para las boquillas se encuentran dentro de los límites establecidos por los criterios de diseño, es decir menores a 0.5%. Factor muy importante en el cálculo total de la incertidumbre bajo el cual operará el banco.

El resumen de los resultados de la calibración para todas las boquillas son presentados en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de calibración de las boquillas sónicas

Boquilla (m ³ /h)	Patrón	$Q_{V,20,tr}$	$Q_{V,20,tr,1000}$	Incertidumbre	Rel. de presión crítica máx.
250	Turbina	252.33	-	0.016%	0.91
150		153.46	-	0.018%	0.95
100	Campana Gasométrica	100.86	-	0.017%	0.97
50		49.79	-	0.018%	0.93
25		29.57	-	0.023%	0.96
12.5		14.24	18.00	0.023%	0.96
3		4.42	4.93	0.143%	0.91

De la tabla anterior podemos concluir que todas las boquillas cuentan con un caudal de referencia muy próximo a los valores nominales establecidos por el diseño para cada una de ellas. Sin embargo no es valido comparar estas dos magnitudes porque es necesario tener en cuenta la desviación producida por el cambio de condiciones a las cuales se calculó el caudal de referencia (20°C, 0% de humedad relativa y 1000 mbar) y las condiciones bajo las cuales se realizó el diseño (50% de humedad, 905 mbar y 25°C).

Cuando las boquillas sean utilizadas como patrones de calibración se procederá a realizar una conversión del caudal de referencia de cada una de ellas a las de la pieza a ensayar. La ecuación 57 muestra como calcular el caudal de la boquilla en el estado termodinámico del medidor en prueba ($Q_{V,P}$). Hay que tener en cuenta que los subíndices D se refieren a la boquilla y los subíndices P indican los de la pieza a ensayar.

$$Q_{V,P} = \frac{r_D}{r_P} \cdot (1 + 0.169 \cdot x_v) \cdot \sqrt{\frac{T_D}{293,15}} \cdot [1 + C_{PE} \cdot (p_D - 1000 \text{ mbar})] \cdot Q_{V,20,tr,1000}$$

Ecuación 56

Es necesario tener presente que al aplicar esta ecuación en el caso de las boquillas grandes el valor de $Q_{V,20,tr,1000}$ es el mismo $Q_{V,20,tr}$ calculado para ellas y que C_{PE} es igual a 1.

4.8 CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Y PLAZO DE VALIDEZ DE LA CALIBRACIÓN

Gracias al trabajo realizado en el IPT las 7 boquillas fueron calibradas y certificadas con patrones certificados por el PTB y reconocidos internacionalmente. Lográndose de esta forma constituir al banco como un patrón de calibración en Colombia que cuenta con niveles de incertidumbre

teórica inferiores a 0.4% (este valor es calculado a partir del modelo elaborado en Math Cad ® teniendo en cuenta todas las fuentes de incertidumbre teorica).

De acuerdo con algunas entidades reglamentarias de verificación como el PTB existe en promedio un plazo de validez para estos procedimientos de calibración de 10 años. Este límite abarca las boquillas mayores de 2 m³/h. Para boquillas menores que este valor se considera adecuado un plazo de validez de 5 años. Por lo tanto todas las boquillas diseñadas y construidas durante el desarrollo de este proyecto tienen 10 años de validez en sus certificados.

RECOMENDACIONES

- ü Cuando el banco opere se recomienda ubicar los medidores a calibrar dependiendo de su naturaleza aguas arriba o aguas debajo de la boquilla, con el fin de evitar la perturbación del flujo a la entrada de la boquilla. Por ejemplo los medidores tipo rotativo no es aconsejable ubicarlos aguas arriba ya que transmiten a la boquilla pulsaciones y efectos no deseables. Los medidores tipo turbina y diafragma pueden ser ubicados aguas arriba ya es posible despreciar los efectos que estos producen.
- ü Es conveniente que antes de realizar cualquier calibración con el banco, se realice una prueba de estanqueidad en todo el sistema para asegurar la hermeticidad de las conexiones y la inexistencia de fugas.
- ü Seguir el Reglamento del PTB como guía de trabajo para los modelos de cálculo y consideraciones sobre las condiciones del recinto y medios de ensayo.
- ü Profundizar en el estudio de las ondas de choque y realizar experiencias que permitan observar su comportamiento en el banco.
- ü La adquisición de sensores que permitan determinar la presión aguas arriba de cada boquilla con el fin de disminuir la contribución de esta variable dentro de la incertidumbre total.
- ü Continuar realizando proyectos de investigación financiados por COLCIENCIAS que permitan la apropiación de conocimientos y desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas al área de la metrología.

CONCLUSIONES

Después de desarrollar el presente proyecto podemos concluir que:

- ü Se logró fortalecer el vínculo existente entre la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander y el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, obteniéndose excelentes resultados a nivel personal y profesional, reflejados en el conocimiento adquirido por ambas partes en la rama del flujo de fluidos compresibles y en el cumplimiento a cabalidad del proyecto presentado ante colciencias titulado “Banco patrón para calibrar medidores de flujo de gas basado en la tecnología de boquillas sónicas”.
- ü Con el banco se amplió la infraestructura existente en Colombia para la calibración de medidores de gas en un rango dos veces mayor (actual 250 m³/h, alcanzado 500 m³/h), y a una incertidumbre dos veces menor (actual 0.7%, alcanzado 0.4%).
- ü Se comprobó que en las empresas del sector existen las herramientas y personal capacitado para fabricar elementos que cumplan con exigentes requerimientos dimensionales, como es el caso de las boquillas sónicas.
- ü La calibración realizada en Brasil permitió constituir el banco de boquillas sónicas como un patrón de calibración con bajos niveles de incertidumbre (inferiores a 0.4%) y trazabilidad a patrones internacionales (turbina del PTB).

- ü El uso de la herramienta CAD Solid Edge facilitó la etapa de diseño al permitir la visualización de diferentes alternativas de montaje y la obtención de los planos necesarios para la construcción de los elementos constitutivos del banco.
- ü Fue posible corroborar cada uno de los enunciados establecidos por la teoría de flujo compresible aplicada a las boquillas sónicas, entre ellas:
 - ü El caudal a relaciones de presión menores que la crítica se mantiene prácticamente constante.
 - ü La zona divergente de la boquilla provee una recuperación de presión a la salida de esta, ya que los valores alcanzados como relaciones de presión crítica son como mínimo de 0.85.
 - ü Cuando el flujo es subsónico a través de la boquilla las perturbaciones aguas abajo se propagan aguas arriba. Esto se pudo notar en el ruido que se presentaba en el sistema una vez la boquilla era desbloqueada.
- ü Los sensores y dispositivos seleccionados para el sistema de adquisición de datos cuentan con las especificaciones necesarias para que el banco opere bajo los niveles de incertidumbre proyectados.
- ü Se llevó a cabo el diseño y la construcción del banco en general, obteniendo como resultado un patrón de calibración que cumple con las expectativas planteadas durante la fase inicial del proyecto.
- ü Se seleccionó el equipo generador de vacío tipo roots el cual satisface los requerimientos necesarios para llevar el fluido a través de la boquilla a las condiciones críticas.

- ü Los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto serán publicados en la revista ION de la Escuela de Ingeniería Química de La Universidad Industrial de Santander.

BIBLIOGRAFÍA

- ü Çengel Yunus, Boles Michael. Termodinámica, Tomo II. Segunda edición. Editorial McGrawHill. Capitulo 16.
- ü Frössi Franz, Wendt Gudrun. Reglamentos de Prueba del PTB. Tomo 25, Medidores de Gas – Bancos de pruebas con toberas críticas- 1998. Editorial Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB). METREX S.A. Dirección de gestión de Calidad.
- ü Philip G. Hill, Peterson Carl. Mechanics and thermodynamics of propulsion. Addison-Wesley Publishing Company, INC. 1965. USA, capitulo3.
- ü Shapiro, Ascher. The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. Volume 1. Jhon Wiley & sons Inc, New York, 1953, Capitulo 1, 2, 4, 5.
- ü Victor L. Streeter. Mecánica de Fluidos. Tercera Edición. McGraw-Hill Interamericana de México, México, 1988, Paginas 3, 84-90.

NORMAS

- ü ANSI B109.1, 2000, Diaphragm Type Gas Displacement Meters, American Gas Association.
- ü ANSI B109.2, 2000, Diaphragm Type Gas Displacement Meters, American Gas Association

- ü ANSI B109.3, 2000, Rotary Type Gas Displacement Meters, American Gas Association
- ü INTERNATIONAL ESTÁNDAR, ISO 9300. First edition 1990-08-15. Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
- ü AMERICAN NATIONAL STANDARD. Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles. ASME/ ANSI MFC-7M –1987.

APENDICES

APENDICE A.MEDIDORES DE FLUJO DE GAS DISPONIBLES EN EL MERCADO Y SUS CARACTERÍSTICAS DE CALIBRACIÓN.

A.1 INTRODUCCION

Los medidores han sido desde hace muchos años un elemento fundamental en cada una de las fases que componen la cadena de la industria del gas. Entre los mas empleados se encuentran los de diafragmas, rotatorios, turbinas, y platinas de orificio; cada uno sirve a un propósito definido y cumple con requerimientos específicos.

Los cuatro tipos de medidores mencionados anteriormente pueden clasificarse en dos categorías diferentes: los de desplazamiento positivo y los inferenciales. Los medidores de diafragma y rotatorios están dentro de la categoría de los medidores de desplazamiento positivo debido a que estos tienen compartimientos de volumen definido que se llenan y vacían alternativamente. Conociendo el volumen desplazado en cada movimiento e instalando una relación de engranajes adecuada, el medidor ofrecerá la lectura directamente en unidades volumétricas.

Por otra parte, los medidores de turbina y de orificio, no tienen compartimientos para contener y liberar el gas. Estos medidores se denominan inferenciales puesto que el volumen de gas que fluye a través de ellos es “inferido” mediante la observación o la medición de alguna característica física.

En vías de proveer una base común para la calificación de la capacidad de varios fabricantes de medidores de gas, varias normas establecen un conjunto de directrices para medidores de diafragma, turbina y rotatorios entre ellas las ANSI y las DIN.

El banco de boquillas sónicas fue diseñado bajo la proyección de la calibración de los medidores de flujo de gas del tipo diafragma , turbina y rotativos en general ya que estos abarcan un amplio rango de mediciones que actualmente no se encuentran cubiertos por patrones en el país. Entre los criterios de diseño tenidos en cuenta se encuentran las especificaciones dadas por norma para la calibración de este tipo de medidores.

A.2 MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO DIAFRAGMA.

Son medidores volumétricos de gas en los cuales la medida de gas suministrado se efectúa por medio de cámaras medidoras con diafragmas deformables.

Figura A.1.Medidor de diafragma



A.2.1 COMPONENTES

- § Un cuerpo que contiene el gas presurizado y forma parte de los compartimientos que miden el gas.
- § Diafragmas que se mueven conforme la presión del gas fluctúa de cada lado.
- § Válvulas y asientos que controlan el flujo de gas hacia cada lado del diafragma.
- § Mecanismo articulado que conecta el diafragma con las válvulas y el indicador.

- § Un indicador u odómetro que registra el número de revoluciones del mecanismo.

A.2.2 FUNCIONAMIENTO

Un medidor de diafragma se puede comparar con un motor de dos pistones de doble acción, en el cual los diafragmas corresponden a los pistones y el cuerpo del medidor a los cilindros. Cada carrera del diafragma desplaza un volumen fijo de gas y los diafragmas operan con un desfase de 90° de forma que cuando uno está en el final de su carrera, el otro está a la mitad de su desplazamiento.

Esto proporciona un flujo uniforme del gas a la salida del medidor y garantiza que el medidor siempre se pondrá en marcha independientemente de su posición estática. Cuando existe una demanda de gas aguas abajo del medidor, se origina una caída de presión a través del medidor y sus diafragmas. Este diferencial, que puede ser por ejemplo 25 Pa, proporciona la fuerza para accionar el medidor.

A.2.3 NORMAS

Existen 2 normas que aplican a los medidores tipo diafragma las ANSI y las OIML. Las ANSI se dividen en dos categorías según el rango de aplicación, la ANSI B109.1 que cubre los medidores de hasta 14.16 m³/h y la ANSI B109.2 para medidores con caudales mayores a este valor.

En las tablas A.1, A.2 y A.3 se presentan las denominaciones y los caudales de operación, calibración y pilotos**** establecidos para los tipos de medidores existentes en el mercado.

**** El caudal piloto es el mínimo caudal requerido por el medidor para funcionar bajo condiciones aceptables de exactitud.

Tabla. A.1.Caudales de operación y calibración para medidores tipo diafragma según la ANSI 109.2

CLASE	MAX. FLUJO	MIN. FLUJO	PILOTO	CAUDALES DE CALIBRACIÓN		
	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr
500	14,2	25,5	0,028	1,4	2,8	11,3
900	25,5	39,6	0,051	2,5	5,1	20,4
1400	39,6	65,1	0,079	4	7,9	31,7
2300	65,1	99,1	0,13	6,5	13	52,1
3500	99,1	158,5	0,198	9,9	19,8	80,7

Tabla. A.2.Caudales de operación y calibración para medidores tipo diafragma según la ANSI 109.1

CLASE	MAX. FLUJO	MIN. FLUJO	PILOTO	CAUDALES DE CALIBRACIÓN		
	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr	m3/hr
50	1,4	4,93	0,07	0,14	0,25	1,13
175	5	7,05	0,07	0,42	0,85	4,2
250	7,1	11,29	0,07	0,57	1,13	5,7
400	11,3	14,13	0,28	0,85	1,7	8,5

La norma ANSI exige que el error de medición de los diafragmas nuevos esté dentro del rango $\pm 1.0\%$ y $\pm 2.0\%$ luego de los ensayos de desgaste acelerado.

Normativa OIML:

Tabla. A.3.Caudales de operación y calibración para medidores tipo diafragma según la OIML R-31

DESIG.	QMAX	QMIN	CAUDALES DE CALIBRACION m3/hr
--------	------	------	-------------------------------

	m3/hr	m3/hr	Qmin	3*Qmin	0.1*Qmax	0.2*Qmax	0.4*Qmax	0.7*Qmax	Qmax
0,6	1	0,016	0,016	0,048	0,1	0,2	0,4	0,7	1
1	1,6	0,016	0,016	0,048	0,16	0,32	0,64	1,12	1,6
1,6	2,5	0,016	0,016	0,048	0,25	0,5	1	1,75	2,5
2,5	4	0,025	0,025	0,075	0,4	0,8	1,6	2,8	4
4	6	0,04	0,04	0,12	0,6	1,2	2,4	4,2	6
6	10	0,06	0,06	0,18	1	2	4	7	10
10	16	0,1	0,1	0,3	1,6	3,2	6,4	11,2	16
16	25	0,16	0,16	0,48	2,5	5	10	17,5	25
25	40	0,25	0,25	0,75	4	8	16	28	40
40	65	0,4	0,4	1,2	6,5	13	26	45,5	65
65	100	0,65	0,65	1,95	10	20	40	70	100
100	160	1	1	3	16	32	64	112	160
160	250	1,6	1,6	4,8	25	50	100	175	250
250	400	2,5	2,5	7,5	40	80	160	280	400
400	650	4	4	12	65	130	260	455	650
650	1000	6,5	6,5	19,5	100	200	400	700	1000

A.3 MEDIDORES TIPO TURBINA

Como medidor de tipo inferencial, el medidor tipo turbina compite con los medidores de desplazamiento positivo, dada su versatilidad y exactitud sobre un amplio rango de condiciones de flujo. A diferencia de estos medidores, los medidores de turbina ofrecen una menor caída de presión a caudales equivalentes. Así mismo, suministran una salida de pulsos digitales para usar como entrada en computadores de flujo y dispositivos de lectura local.

Figura A.1. Medidor tipo turbina



A.3.1 Componentes

El medidor de turbina consta de tres elementos básicos:

- q El cuerpo
- q El mecanismo de medición
- q El instrumento de lectura o salida

A.3.2 Funcionamiento

Este tipo de medidores determinan el volumen censando la velocidad del gas a través de una sección de área conocida, midiendo la velocidad de giro de un rotor de turbina inmerso en la corriente.

Cuando el gas entra al medidor, es conducido a un espacio anular que es aproximadamente $1/3$ del área del cuerpo del medidor. La reducción de área, mediante un deflector de flujo o “nose cone”, incrementa la velocidad del gas, preparando el flujo para impactar los alabes del rotor, suministrando un mayor torque y, por consiguiente, mejorando el desempeño del medidor a bajos caudales.

A.3.3 Normas

La norma que rige el diseño, construcción, instalación, operación y calibración de los medidores tipo turbina es el AGA^{†††} Report No. 7. Las designaciones y caudales de calibración se presentan en la tabla A.4 ya que para medidores de turbina y rotativos se establecen los mismos valores.

A.4 MEDIDORES DE TIPO ROTATORIO

El medidor de desplazamiento positivo tipo rotatorio ha existido por más de 75 años. Su confiabilidad, rango de, exactitud a largo plazo, y facilidad en la instalación, mantenimiento y ensayo han hecho que este medidor sea uno de los más utilizados en los escenarios de producción y transporte.

Figura A.3. Medidor rotatorio



A.4.1 Componentes

Estos tipos de medidores están constituidos principalmente por:

- § Cuerpo
- § Lóbulos
- § Conductos de entrada y salida de fluido.

^{†††} American Gas Association, 1985.

§ Instrumento de lectura

A.4.2 Funcionamiento

El medidor de gas rotatorio con lóbulos consiste de dos impulsores con forma de “8”, posicionados a 90° uno respecto al otro, los cuales rotan en sentidos opuestos en el interior de un cilindro de volumen constante. Al fluir el gas a través del medidor ocasiona que los impulsores giren, creando una cámara de medición entre el impulsor, el cilindro y las tapas laterales. Este volumen conocido es descargado posteriormente y otro volumen de gas idéntico es recibido por el otro impulsor, cilindro y tapas. El gas es admitido y descargado alternadamente, cuatro veces por cada revolución del impulsor.

El gas desplazado por revolución se multiplica por el número de revoluciones del impulsor para determinar el volumen de gas que pasó a través del medidor. Un sistema de engranajes se usa para totalizar el volumen desplazado por el medidor y arrojar lecturas en unidades de ingeniería (por ejemplo, metros cúbicos).

A.4.3 Normas

La norma ANSI B109.3 cubre los medidores de gas de desplazamiento positivo tipo rotatorio.

En la tabla A.4 se presentan las designaciones, caudales máximos y mínimos de operación de este tipo de medidores, así como también los caudales de calibración recomendados por norma.

Tabla. A.1.Caudales de operación y calibración para medidores tipo turbina y Rotativos^{###}.

DESIG.	Q Max	Qmin				CAUDALES DE CALIBRACION								
G	m3/hr	m3/hr				m3/hr								
		1:10	1:20	1:30	1:50	1:10 1:20 1:30								01:50
16	25	2,5	1,3	0,8	0,5	0,125	0,065	0,04	2,5	6,25	10	17,5	3,75	
25	40	4	2	1,3	0,8	0,2	0,1	0,065	4	10	16	28	6	
40	65	6	3	2	1,3	0,3	0,15	0,1	6,5	16,25	26	45,5	9,75	
65	100	10	5	3	2	0,5	0,25	0,15	10	25	40	70	15	
100	160	16	8	5	3	0,8	0,4	0,25	16	40	64	112	24	
160	250	25	13	8	5	1,25	0,65	0,4	25	62,5	100	175	37,5	
250	400	40	20	13	8	2	1	0,65	40	100	160	280	60	
400	650	65	32	20	13	3,25	1,6	1	65	162,5	260	455	97,5	
650	1000	100	50	32	20	5	2,5	1,6	100	250	400	700	150	
1000	1600	160	80	50	32	8	4	2,5	160	400	640	1120	240	

Los caudales sombreados hacen parte del rango abarcable por el banco de boquillas sónicas, con base a estos se definieron los caudales a manejar por cada una de las boquillas sónicas.

^{###} Los valores 1:10;1:20; 1:30; 1:50 en la tabla se refieren a las relaciones entre los caudales máximos y mínimos bajo los cuales operan los medidores.

**APENDICE B.CALCULO DE DIAMETROS PARA BOQUILLAS
SONICAS A PARTIR DE LA NORMA INTERNACIONAL
ISO 9300**

El presente es un modelo de cálculo elaborado en Math Cad ®, con el cual es posible a partir de la definición de las variables de entrada, entre ellas las condiciones ambientales, el caudal a manejar y diámetros de tubería aproximados aguas arriba de la boquilla, calcular el diámetro de garganta requerido, el numero de Reynolds y el coeficiente de descarga teóricos.

A continuación se presenta el modelo aplicado a la boquilla de 250 m³/h.

DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA

NOMBRE	DESIGNACIÓN	VALOR
Caudal a medir	Q	$250 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$
Presión a la entrada de la boquilla	P	90500*Pa
Temperatura a la entrada de la boquilla	T	298.15·K
Coeficiente isentrópico del gas	K	1.4
Constante del gas	R	$R := 287 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Diámetro de tubería aguas arriba de la boquilla	Dt	88.6*mm

CORRECCION SOBRE LA MEDIDA DE TEMPERATURA Y PRESION AGUAS ARRIBA DE LA BOQUILLA.

Área de la tubería aguas arriba de la boquilla

$$A_t := \pi \cdot \frac{D_t^2}{4} \quad A_t = 6.165344 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \blacksquare$$

Velocidad máxima en la tubería:

$$V := \frac{Q}{A_t} \quad V = 11.263677 \frac{\text{m}}{\text{s}} \blacksquare$$

Velocidad del sonido en el fluido a las condiciones aguas arriba de la boquilla.

$$V_s := \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad V_s = 346.116556 \frac{\text{m}}{\text{s}} \blacksquare$$

Número de Mach en la tubería

$$Ma := \frac{V}{V_s} \quad Ma = 0.032543 \blacksquare$$

Densidad del aire a P y T

$$\rho := \frac{P}{R \cdot T \cdot Z} \quad \rho = 1.057958 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \blacksquare$$

PROPIEDADES DE ESTANCAMIENTO

$$\begin{array}{ll} \text{Presión} & P_o := P \cdot \left[1 + \frac{(k-1) \cdot Ma^2}{2} \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad P_o = 9.050067 \times 10^4 \text{ Pa} \blacksquare \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Temperatura} & T_o := T \cdot \left[1 + \frac{(k-1) \cdot Ma^2}{2} \right] \quad T_o = 298.150632 \text{ K} \blacksquare \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Densidad} & \rho_o := \frac{P_o}{T_o \cdot R \cdot Z} \quad \rho_o = 1.057964 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \blacksquare \end{array}$$

Viscosidad $\mu_0 := 1.846 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$

DEFINICION DE CONSTANTES

En el cálculo del coeficiente de descarga se requieren las constantes a, b y n, estas son definidas para diferentes números de Reynolds. La norma ISO 9300 recomienda los valores de:

$$a := 0.9935 \quad b := 1.525 \quad n := 0.5$$

Para números de Reynolds considerados altos $3.5 \cdot 10^5 < \text{Re} < 2.6 \cdot 10^6$

Para números de Reynolds menores se toman los valores recomendados por Flow Systems (fabricante de boquillas sónicas)

$$a := 0.99738 \quad b := 3.053 \quad n := 0.5$$

VARIABLES DE SALIDA

Valores iniciales del Loop-iteración

Diámetro de garganta $d := 22\text{mm}$

Reynolds $\text{Re} := 10000$

Ecuaciones de la iteración

$$q_m = \pi \cdot \frac{d^2 \cdot \left[\left[a - b \cdot (\text{Re})^{-n} \right] \cdot C_o \cdot P_o \right]}{4 \cdot (R \cdot T_o)^{0.5}}$$

Caudal másico

$$\text{Número de Reynolds} \quad \text{Re} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot d \cdot \mu_0}$$

Coeficiente de descarga $Cd := a - b \cdot (Re1)^{-n}$

RESULTADOS

$$\begin{pmatrix} d1 \\ Re1 \end{pmatrix} := \text{Find}(d, Re)$$

Diámetro de garganta de la boquilla

$$d1 = 21.069227 \text{ mm}$$

Número de Reynolds

$$Re1 = 2.405115 \times 10^5$$

Coeficientes de descarga

$$Cd = 0.99039$$

Los resultados obtenidos al ejecutar este modelo de cálculo para las 7 boquillas sónicas a construir son presentados en la tabla siguiente^{§§§§}:

Tabla. A.2.2. Resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo para las boquillas sónicas.

BOQUILLA	CAUDAL	DIAMETRO	REYNOLDS	Cd
	m3/h	mm		
1	3	2,32	26175,77848	0,97851
2	12,5	4,73	53594,5800	0,984191
3	25	6,68	75875,8000	0,986296
4	50	9,43	107447,0000	0,98806
5	100	13,36	152030,9000	0,989588
6	150	16,32	186277,3000	0,989966
7	250	21,06	240475,1000	0,99039

^{§§§§} Para aplicar el modelo de cálculo remitirse a el archivo anexo titulado “Determinación de diámetros para reynolds bajos” o “Determinación de diámetros para reynolds altos” en el CD de memorias.

APENDICE C.DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESTIMADO DE LA MEDICIÓN EN EL BANCO DE BOQUILLAS SÓNICAS.

Existen varias formas de determinar el valor de una magnitud junto con su incertidumbre de medición, sin embargo se tomaron como referencia los lineamientos establecidos por la “GUIA PARA ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDICION” CENAM , la cual a su vez se basa en las especificaciones de la GUM****, considerada esta ultima como la referencia maestra.

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada y en otras ocasiones como incertidumbre expandida. La incertidumbre estándar (u) representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad de 68% y la incertidumbre expandida (U) es la que resulta al multiplicar la incertidumbre estándar por un factor de cobertura (k), esto porque generalmente se desea una probabilidad mayor, lo cual se obtiene expandiendo el intervalo.

Con el fin de determinar la influencia de cada una de las variables que intervienen en el cálculo del caudal, en el banco de boquillas sónicas, se desarrolló un modelo matemático en Math Cad ® en el cual es posible evaluar la incertidumbre teórica o “mejor estimado de la medición del banco”.

El modelo de calculo desarrollado se empleo inicialmente en la etapa de diseño con variables de entrada tomadas de referencias y catálogos de sensores comerciales. A

**** Guide Uncertainty of Measurement.

partir del resultado obtenido se determinó que las variables más influyentes sobre el valor de incertidumbre total son la presión, temperatura y caudal de referencia, por lo tanto se seleccionaron sensores con bajos niveles de incertidumbre y el caudal de referencia se obtuvo a partir de la calibración de las boquillas con patrones que permiten obtener también bajos valores de incertidumbre asociados a esta variable.

Una vez determinadas todas las incertidumbres finales de cada variable se empleó nuevamente el modelo con el fin de conocer los valores de incertidumbre alrededor de los cuales operará el banco, encontrándose un máximo valor de 0.4%.

A continuación se presenta el modelo de cálculo con los valores finales de operación para la boquilla de 50 m³/h.

CARACTERISTICAS DEL CONJUNTO DE BOQUILLAS QUE CONSTITUYEN EL BANCO.

La siguiente tabla recopila la información de las 7 boquillas diseñadas, con los datos necesarios para la ejecución del modelo de cálculo.

Tabla.C.1. Tabla de información de las boquillas sónicas.

CAUDAL	DIAMETRO	Q _{v,20,tr}	Q _{v,20,tr,1000}	U _{qv}	c _{pE}
m ³ /h	mm	m ³ /h	m ³ /h	%	
3	2,32	4,42	4,93	0,14	1,2220E-03
12,5	4,73	14,24	18	0,023	2,2255E-03
25	6,68	29,57	29,57	0,023	0
50	9,43	49,79	49,79	0,018	0
100	13,36	100,86	100,86	0,017	0
150	16,32	153,46	153,46	0,018	0
250	21,06	252,33	252,33	0,016	0

Los valores de U_{qv}, c_{pE}, Q_{v,20,tr} y Q_{v,20,tr,1000} son tomados de los resultados obtenidos durante la calibración de las boquillas (ver apéndice E).

VARIABLES DE ENTRADA.

Temperatura aguas arriba de la boquilla $T_b := 298.15\text{K}$

Presión en el plenum $p_b := 90500\text{Pa}$

Humedad relativa $h := 0.5$

(calculada a partir de las temperaturas de bulbo húmedo y seco leídas en el psicrómetro)

Caudal de referencia $Q_{v20tr1000} := 49.79 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

Factor de corrección $cpE := 0$

Temperatura en el medidor $T_m := 296$

Presión en el medidor $p_m := 90500$

Presión atmosférica $p_a := 90500\text{Pa}$

Temperatura ambiente $T_a := 298.15\text{K}$

PROPIEDADES DEL GAS (AIRE)

Coeficiente isentrópico $k := 1.4$

Constante universal de los gases $R_u := 8.314472 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

Masa molar del vapor $M_v := 18.015 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

Masa molar del vapor $M_a := 28.9635 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

Las constantes para realizar el cálculo de la densidad del aire fueron tomadas del artículo EQUATION FOR THE DETERMINATION OF THE DENSITY OF MOIST AIR (1981). P Giacomo, International Bureau of weights, F-92310 Sevres, France.

MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DETERMINACION DEL MENSURANDO.

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, en este caso “el caudal” al que se denomina mensurando. Este de acuerdo al VIM es un atributo sujeto a medición como fenómeno que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Teniendo en cuenta las ecuaciones planteadas en el capítulo 4 la expresión a partir de la cual se calcula el caudal de la boquilla ($Q_{v,m}$) en función de todas las variables de entrada se muestra a continuación⁺⁺⁺⁺:

⁺⁺⁺⁺ La ecuación corresponde al resultado de expresar todos los términos en función de las variables P, T y caudal de referencia. Dada la complejidad de la fórmula solo es posible visualizarla completamente en el archivo de Math Cad ® titulado “Determinación del mejor estimado” anexo en el CD.

$$Q_{vm}(Ma, Ru, Tm, pm, Tb, cpE, pb, Q_{v20tr1000}, Ta, pa, h) := \frac{pb \cdot Ma \cdot \left[\sqrt{\frac{Tm}{293.15}} \cdot \left[1 + cpE \cdot \left(\frac{pb}{100} - 1000 \right) \right] \cdot Q_{v20tr1000} \right]}{\left[1 - \frac{pb}{(Tb)} \cdot 0.000162419 + \dots \right]} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{pm}{(Tm)} \cdot 0.000162419 + \dots \right]}$$

FUENTES DE INCERTIDUMBRE:

La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas, otras dependen del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionados para la medición.

En el banco de boquillas sónicas, se identifican las siguientes fuentes de incertidumbre:

- Resultados de la calibración de los instrumentos de medición: en los sensores de presión y temperatura.

Temperatura y presión del fluido a la entrada de la boquilla (Tb) y (pb)

Temperatura y presión del fluido en el patrón (Tm) y (pm)

Temperatura ambiente (Ta)

Presión atmosférica (pa)

Humedad relativa (h) implícita en Tb y Tm

- Incertidumbre del patrón: corresponde la incertidumbre asociada al caudal de referencia para cada boquilla determinado durante la calibración.

Caudal de referencia ($Q_{v,20,tr,1000}$)

La repetibilidad^{####} de las lecturas, la reproducibilidad^{§§§§§} de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos y las variaciones de las condiciones ambientales no son evaluadas ya que para esto es necesario realizar pruebas de campo que permitan tomar diferentes mediciones en diferentes condiciones.

DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD

Es necesario asociar a cada fuente de incertidumbre un porcentaje de influencia sobre el valor total de la incertidumbre, para ello se calculan los coeficientes de sensibilidad, los cuales se obtienen a partir de la derivada parcial de cada una de las variables en la ecuación del mensurando en función del caudal.

Como ejemplo se muestra a continuación el coeficiente de sensibilidad obtenido para la variable “temperatura del fluido a la entrada a la boquilla, Tb”

$$c_{Tb} := \frac{d}{dTb} Q_{vm}(Ma, Ru, Tm, pm, Tb, cpE, pb, Q_{v20tr1000}, Ta, pa, h)$$

$$c_{Tb} = -5.802 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \blacksquare$$

INCERTIDUMBRE ASOCIADA A CADA VARIABLE

A cada variable se le asocian los valores de incertidumbre correspondiente a las especificaciones de fichas técnicas o resultados de calibración.

^{####} La repetibilidad según el VIM se define como la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición.

^{§§§§§} La reproducibilidad de los resultados según el VIM se define como la cercanía de las mediciones de la misma magnitud por medir, efectuadas bajo condiciones diferentes.

- ü Temperaturas: a partir de la calibración en el IPT se toma un valor de $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$ y dado el carácter digital de este instrumento la probabilidad se asocia a la mitad del rango de la resolución (se aplica un factor de 0.5). Por tratarse de un valor de incertidumbre expandida se divide también por el factor de cobertura ($k=2$) para así obtener la incertidumbre estándar.

$$u_{Tb} := \frac{0.9 \cdot 0.5}{2} \quad u_{Tb} = 0.225 \blacksquare$$

- ü Presiones: se calcula según la información ofrecida por el catalogo del sensor "High accuracy electronic Barometer" OMEGA : Accuracy 0.25% Full Scale, en cuyo valor se encuentran la linealidad, histéresis y repetibilidad combinadas. Dado el carácter digital de este instrumento la probabilidad se asociará a la mitad del rango de la resolución (aplicamos un factor de 0.5). Adicionalmente asocia una distribución rectangular***** dado el poco conocimiento de esta variable, lo cual se representa en la división por $\sqrt{3}$.

$$u_{pb} := \frac{270 \cdot 0.5}{\sqrt{3}} \quad u_{pb} = 77.942 \text{Pa} \blacksquare$$

- ü Humedad relativa: el valor se tomó de la recomendación del Standar Test Method for measuring humidity whit a Psychrometer (the measurement of Wet- and dry-bulb temperatures), para el caso de psicrómetros de aspiración, el cual establece 0.3% teniendo en cuenta que las temperaturas de bulbo húmedo y seco se encuentran por debajo de los limites establecidos en el documento.

$$u_h := h \cdot u_h\% \quad u_h = 1.5 \times 10^{-3} \blacksquare$$

***** En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo.

ü Caudal de referencia: fue calculada a partir de la dispersión de los datos obtenidos durante la calibración en el IPT, obteniéndose un valor para cada boquilla como lo muestra la tabla anterior.

$$u_{Qv20tr1000} := 0.00018 \frac{m^3}{hr}$$

INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA

Se calcula a partir de la combinación de todas las incertidumbres individuales afectadas por el coeficiente de sensibilidad.

$$u_t := \sqrt{(u_{pb} \cdot c_{pb})^2 + (u_{pm} \cdot c_{pb})^2 + (u_{pa} \cdot c_{pa})^2 + (u_{Tb} \cdot c_{Tb})^2 + (u_{Tm} \cdot c_{Tm})^2 + \dots}$$

$$u_t = 0.081 \frac{m^3}{hr}$$

y expresada en porcentaje

$$u_t \cdot \frac{100}{Q_{vm}(Ma, Ru, Tm, pm, Tb, cpE, pb, Q_{v20tr1000}, Ta, pa, h)} = 0.164\%$$

Cabe resaltar que aunque el mayor coeficiente de sensibilidad encontrado es el correspondiente a la variable $Q_{v,20,tr,1000}$, la contribución de esta es baja gracias al bajo valor de incertidumbre estándar asociada a este valor es muy pequeño gracias a los resultados obtenidos durante la calibración.

Este modelo de cálculo fue elaborado con el fin de visualizar la tendencia de los resultados de incertidumbre teórica obtenibles con las boquillas, pero no es aceptable presentar resultados porque los valores de calculo obtenibles dependen de las variables de temperatura y presión tanto en la boquilla como en el patrón y por lo tanto de las condiciones particulares bajo las cuales se realice la calibración.

Sin embargo es posible concluir que los valores mas altos de incertidumbre se presentan en la boquilla de 3 m³/h, lo cual era de esperar ya que su geometría es la menos garantizada dada la dificultad de su maquinado.

APENDICE D.CALIBRACIÓN DE RTD'S

Las RTD's fueron calibradas con un patrón de baño termostático en el Instituto de pesquisas tecnológicas de Sao Paulo obteniéndose resultados como los mostrados en las tablas siguientes⁺⁺⁺⁺⁺ :

Tabla D.1.RTD : TL 68-721

REFERENCIA	PATRON			TRANSMISOR			ERROR		
[C]	1	2	3	1	2	3	1	2	3
15	15,13	15,13	15,14	15,45	15,51	15,52	0,320	0,380	0,380
20	20,13	20,13	20,13	20,72	20,72	20,73	0,590	0,590	0,600
30	30,07	30,06	30,07	30,03	30,02	30,04	-0,040	-0,040	-0,030

Tabla D.2. RTD: TL 68-722

REFERENCIA	PATRON			TRANSMISOR			ERROR		
[C]							1	2	3
15	15,12	15,12	15,14	15,58	15,6	15,61	0,460	0,480	0,470
20	20,13	20,13	20,13	20,72	20,725	20,72	0,590	0,595	0,590
30	30,06	30,07	30,07	30,28	30,29	30,3	0,220	0,220	0,230

La referencia son las temperaturas escogidas como base para la toma de datos durante la calibración. Se realizaron 3 lecturas simultáneas en el patrón y en la RTD para cada una de estas temperaturas de referencia. A partir de los resultados

⁺⁺⁺⁺⁺ Los resultados son mostrados en su totalidad en el archivo titulado "Calibración de RTD's" anexo en el CD.

obtenidos se calculó el error para cada temperatura encontrándose un máximo valor entre todas las RTD's de 0.9°C el cual fue tenido en cuenta en el calculo del “mejor estimado de la medición” para la incertidumbre asociada a las temperaturas.

APENDICE E.DATOS DE CALIBRACIÓN DE LAS BOQUILLAS SÓNICAS

Los datos de la calibración de las boquillas sónicas se presentan en 3 secciones, la primera consta de la toma de datos, la segunda los cálculos en un punto donde se calcula el $Q_{v,20,tr}$, y la tercera los cálculos en 2 puntos donde se determina el $Q_{v,20,tr,1000}$. Este último valor se calcula solamente para las boquillas de 3 y 12.5 m³/hr.

A continuación presentamos los datos correspondientes a la boquilla de 3 m³/hr, para mas detalles sobre las demás boquillas remitirse al los archivos titulados “Calibración de boquillas” anexo en el CD.

Tabla E.1 .Datos boquilla de 3 m³/h calibrada con campana gasométrica.

		Boquilla sónica			Medidor Patrón					Condiciones Ambientales				
		Pent.	Temp	Psalida	Inicio	Fin	Tem.	Tiempo	P.	Patm	Tbs	Tbh	Tbs	Tbh
		[mA]	[°C]	[mA]	[pulsos]	[pulsos]	[°C]	(s)	mmH 20	mmH g	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Prueba 1	1	8,11	20,76	14,42	0	2790	19,59	120,29	194,41	701	19,32	15,64	19,30	15,75
	2	8,11	20,80	14,43	0	2769	19,61	120,54	194,46	701	19,24	15,60	19,35	15,75
	3	8,11	20,82	14,42	0	2766	19,61	119	194,43	701	19,33	15,61	19,30	15,60
	4	8,12	20,85	14,42	0	2789	19,63	119,43	194,49	702	19,10	15,44	19,20	15,45
Prueba 2	5	15,57	20,88	14,05	0	2558	19,64	121,12	194,56	702	19,45	15,70	19,25	15,62
	6	15,60	20,93	14,05	0	2568	19,64	120,41	194,59	702	19,46	15,77	19,60	15,80
Prueba 3	7	8,12	21,10	14,46	0	2911	19,65	125,48	194,52	702	19,19	15,52	19,37	15,60
	8	8,11	21,13	12,93	0	2830	19,65	122,04	194,29	702	19,42	15,74	19,45	15,65
	9	8,11	21,11	11,45	0	2776	19,64	119,52	194,33	702	19,48	15,82	19,82	16,00
Prueba 4	10	8,11	21,14	9,93	0	2812	19,65	121,47	194,34	702	19,83	15,99	19,80	16,30
	11	8,12	21,10	8,40	0	2788	19,74	119,56	194,50	702	19,35	15,67	19,40	15,80
	12	8,11	21,13	6,96	0	2792	19,72	120,69	194,28	702	19,65	15,87	19,80	15,90
	13	8,11	21,13	5,43	0	2564	19,72	121,14	194,31	702	19,66	15,89	20,00	16,00

Las pruebas corresponden a:

- ü Prueba 1: datos tomados con presiones a la entrada de la boquilla cercanas a la atmosférica con la mínima relación de presión alcanzada.
- ü Prueba 2: datos tomados a presión reducida, es decir, con presiones a la entrada de la boquilla menores a las tomas anteriores. Estos son necesarios para el cálculo del ensayo en 2 puntos.
- ü Prueba 3: toma de datos bajo las mismas condiciones de la prueba 1.
- ü Prueba 4: toma de datos para varias relaciones de presión entre la entrada y la salida de la boquilla.

Los datos tomados corresponden a las condiciones del fluido a la entrada de la boquilla, en el patrón y a las ambientales. Para cada una de estas tomas se utilizaron contadores de pulsos y diferentes sensores de presión y temperatura.

Las unidades correspondientes a estas tomas de datos se pueden observar en la tabla anterior, notándose en ésta que los valores de presión para varios sensores están dados en mA debido a que el sistema de adquisición de datos obtenía las variables de salida de los sensores en corriente y era necesario aplicar fórmulas (establecidas por la calibración de cada uno de ellos) para determinar los valores de presión en unidades consistentes.

E.2.CALCULOS EN 1 PUNTO

Para el cálculo del caudal de referencia $Q_{v,20,tr}$ fue necesario tener en cuenta el error de la campana gasométrica (cuya denominación es VG-02) el cual es establecido por un k , una escala y un polinomio de grado 6 al que le corresponden las siguientes constantes:

Tabla E.2. Coeficientes del polinomio que caracteriza el error del patrón tipo turbina.

x0	-0,23
x1	0,00
x2	0,00
x3	0,00
x4	0,00
x5	0,00
x6	0,00
Escala	1,22
Kpatrón	0,00

Tabla E.3. Resultados de cálculos de calibración con el ensayo en 1 punto.

MEDIDOR PATRON					BOQUILLA SONICA			CONDICIONES AMBIENTALES				
Qind	Qreal	P	T	Tiempo	P. ent.	T. ent.	P. sal.	Patm	Tbs	Tbh	HR	H ABS
[m ³ /h]	[m ³ /h]	[mbar]	[°C]	[s]	[mbar]	[°C]	[mbar]	[mbar]	[°C]	[°C]		
4,42	4,43	916,00	19,59	120,29	915,92	20,76	287,68	935,08	19,30	15,75	0,70	0,01
4,37	4,38	915,97	19,61	120,54	915,89	20,80	287,11	935,05	19,35	15,75	0,70	0,01
4,42	4,44	915,98	19,61	119,00	915,90	20,82	287,45	935,06	19,30	15,60	0,69	0,01
4,45	4,46	916,18	19,63	119,43	916,10	20,85	287,79	935,26	19,20	15,45	0,69	0,01
4,02	4,03	916,26	19,64	121,12	880,79	20,88	310,97	935,35	19,25	15,63	0,70	0,01
4,06	4,07	916,23	19,64	120,41	880,64	20,93	310,87	935,33	19,60	15,80	0,69	0,01
4,42	4,43	916,35	19,65	125,48	916,26	21,10	285,89	935,43	19,38	15,60	0,69	0,01
4,41	4,42	916,35	19,65	122,04	916,26	21,13	380,69	935,41	19,45	15,65	0,69	0,01
4,42	4,43	916,34	19,64	119,52	916,26	21,11	472,79	935,41	19,83	16,00	0,69	0,01
4,41	4,42	916,41	19,65	121,47	916,32	21,14	566,79	935,47	19,80	16,30	0,71	0,01
4,44	4,45	916,46	19,74	119,56	916,37	21,10	661,83	935,54	19,40	15,80	0,70	0,01
4,40	4,41	916,81	19,72	120,69	916,72	21,13	751,80	935,87	19,80	15,90	0,68	0,01
4,03	4,04	916,79	19,72	121,14	916,70	21,13	847,02	935,85	20,00	16,00	0,67	0,01

En la tabla anterior se presentan los cálculos realizados para transformar los datos adquiridos en valores con unidades consistentes. El Qind, es el caudal indicado por el patrón, directamente obtenido al dividir los pulsos en el tiempo de calibración, mientras Qreal es el valor de caudal indicado corregido por la función que contiene

el polinomio de la campana. HR y H ABS representan las humedades relativa y absoluta del aire respectivamente. Esta última fue calculada a partir de un programa llamado “pshycro” elaborado con base a los datos del ASRAHE.

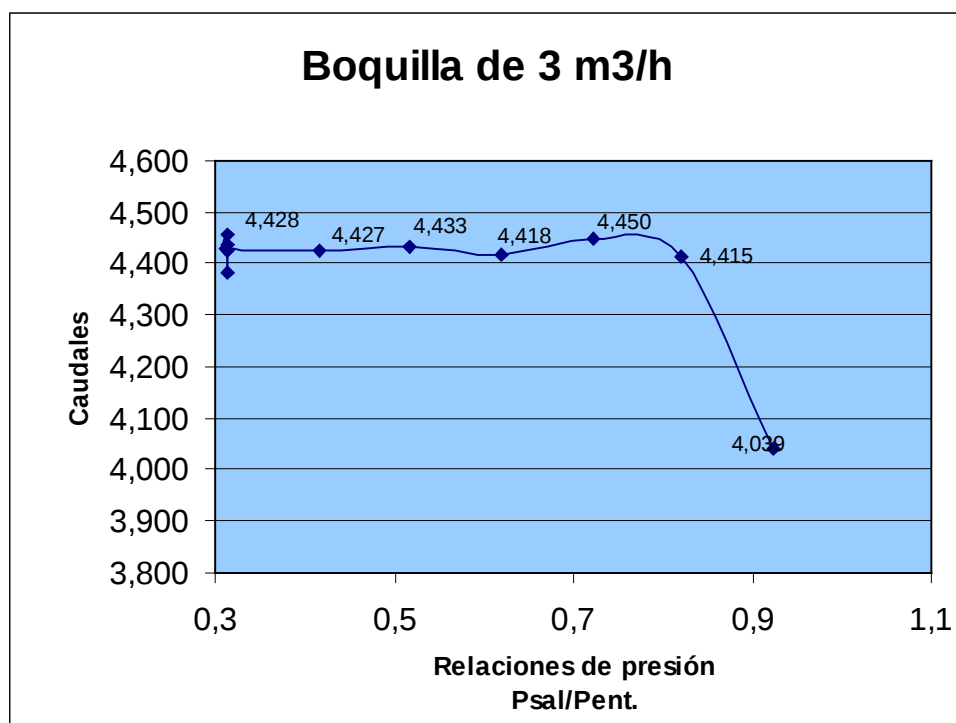
Tabla E.4. Resultados de calibración con el ensayo en 2 puntos.

Cálculos									
xv	Z _{patron}	Z _{boquilla}	• patron	• boquilla	Q _{v,20,tr}	Q _{prom}	P. Prom	Rel. P crit.	Rel. Caud.
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,43	4,43	916,02	0,31	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,38			0,31	0,99
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,44			0,31	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,46			0,31	1,01
0,02	1,00	1,00	1,09	1,04	4,19	4,21		0,35	0,95
0,02	1,00	1,00	1,09	1,04	4,23			0,35	0,96
0,02	1,00	1,00	1,09	1,08	4,43			0,31	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,08	4,43			0,42	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,08	4,43			0,52	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,08	4,42			0,62	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,45			0,72	1,01
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,41			0,82	1,00
0,02	1,00	1,00	1,09	1,09	4,04			0,92	0,91

En la tabla anterior se muestran los cálculos finales de las propiedades del aire a la entrada de la boquilla y en la campana, las cuales son necesarias en el cálculo del caudal del patrón a las condiciones de la boquilla $Q_{v,20,tr}$.

Al graficar los datos tabulados se obtienen gráficas como la mostrada en la siguiente figura, en la que se observa la clara tendencia de mantener un caudal constante a bajas relaciones de presión hasta el valor de la relación de presión crítica, al cual como se puede observar se encuentra cerca de 0.92

Figura E.1. Grafica de los resultados obtenidos durante la calibración de la boquilla.



Cuando la dispersión de los datos se calcula es posible determinar la incertidumbre asociada al valor de caudal promedio, los resultados se muestran en la tabla a continuación:

Tabla E.5. Resultados de incertidumbre obtenidos durante la calibración.

DESVIACION ESTANDAR TOTAL
[m ³ /h]
0,02004394
0,4527502%
INCERTIDUMBRE STANDAR
0,143%

Este mismo procedimiento se llevó a cabo para todas las boquillas, sin embargo para las de 3 y 12.5 m³/h fue necesario realizar un calculo adicional, como el mostrado a continuación, de donde se obtiene el caudal de referencia $Q_{v,20,tr,1000}$, el cual tiene en cuenta la incidencia de la presión de entrada a la boquilla en el valor del caudal:

Tabla E.6. Resumen de resultados de calibración con el ensayo en 2 puntos.

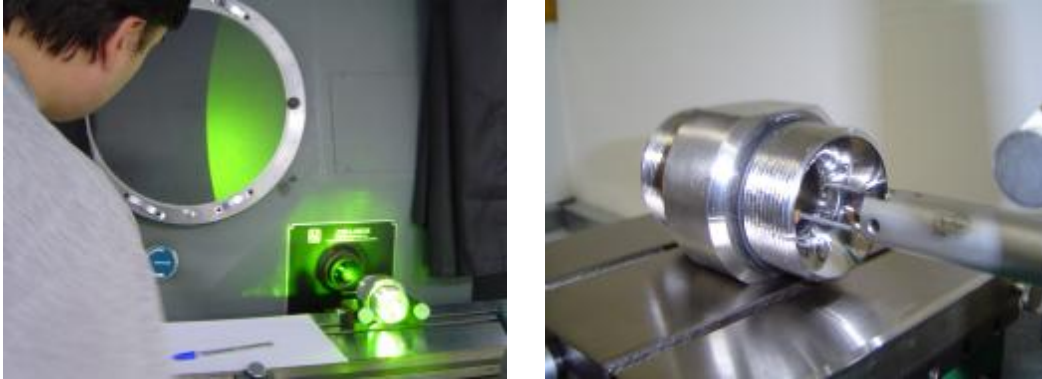
Dif. Caudal	Dif. Presión	c'	$Q_{v,20,tr,1000}$	cpE
[m ³ /h]	[mbar]	[m ³ /h / mbar]	[m ³ /h]	1 / mbar
0,2127	35,2970	0,0060	4,9318	1,2220E-03

Además del proceso de calibración en el IPT fue posible también determinar los diámetros reales de cada una de las boquillas y la rugosidad en 3 de ellas, encontrándose los siguientes resultados :

Tabla E.7. Resultados de la determinación de diámetros de garganta y rugosidades (Ra) en las boquillas.

Boquilla	Diámetro	Ra μ m	Incertidumbre
3	2.853		0.005
12.5	5.084		0.008
25	7.286	2.4	0.005
50	9.48		0.008
100	13.511	2.9	0.008
150	16.605		0.011
250	21.289	1.4	0.005

Figura E.2. Imágenes de medición de rugosidad y diámetros de las boquillas realizadas en el laboratorio de metrología dimensional del IPT.



Del proceso anterior se puede concluir que los límites de rugosidad en las boquillas ensayadas cumplen con los requisitos establecidos por la ISO 9300 y que los diámetros alcanzados con el maquinado son muy cercanos a los valores de diseño.

ANEXOS

PLANOS

