



UNSAM
INSTITUTO DE
LA CALIDAD
INDUSTRIAL

SISTEMA DE REFERENCIA POR TOBERAS DE CAUDAL CRÍTICO EN RÉGIMEN SÓNICO, PARA LA CALIBRACIÓN DE PATRONES VOLUMÉTRICOS DE GAS

TRABAJO FINAL INTEGRADOR
Especialización en Calidad Industrial INCALIN / UNSAM

Año

Cohorte 2013 / 2014

Alumno

Ing. Hernán M. Brenta

Fecha

2 de diciembre de 2014

Índice

- 1) Introducción
- 2) Tecnología de medición
- 3) Mediciones
- 4) Resultados y conclusiones
- 5) Referencias



1) Introducción

Objetivos

El objetivo general es el diseño, construcción y caracterización de un sistema de referencia por toberas de caudal crítico en régimen sónico, para la calibración de patrones volumétricos de gas a condiciones de ambientales de laboratorio.

Los objetivos específicos son:

- Caracterización del banco de calibración y ensayo en el rango de caudal de 0,5 a 10,5 m³/h.
- Calibración de un medidor volumétrico tipo húmedo.
- Calibración de un medidor volumétrico tipo tipo dúo.
- Realizar estudios de magnitudes de influencia.

Alcance

Como planificación estratégica el proyecto se dividió en dos partes, la primera incluye: estudio/diseño, gestión/ejecución de compras, construcción de un tramo de medición, etc. La segunda consiste en el montaje del banco completo, puesta en marcha final, caracterización/ajuste y calibraciones.

Para la realización del TRABAJO FINAL INTEGRADOR de la Especialización en Calidad Industrial INCALIN / UNSAM se utilizó información correspondiente a la primera parte del proyecto.

Consideraciones

Para la definición de los objetivos y alcance del presente trabajo se consideraron como determinantes la integración de la calidad con la metrología y también con los requerimientos de ensayos en la industria el gas natural.

En el Centro de Investigación y Desarrollo en Física y Metrología del INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL se realiza el mantenimiento y diseminación del patrón nacional de volumen de gas.

El Laboratorio de Caudalimetría de la Unidad Técnica Mecánica tiene como función establecer la referencia nacional para las mediciones de gas natural en consumos residenciales, comerciales y de pequeñas industrias.

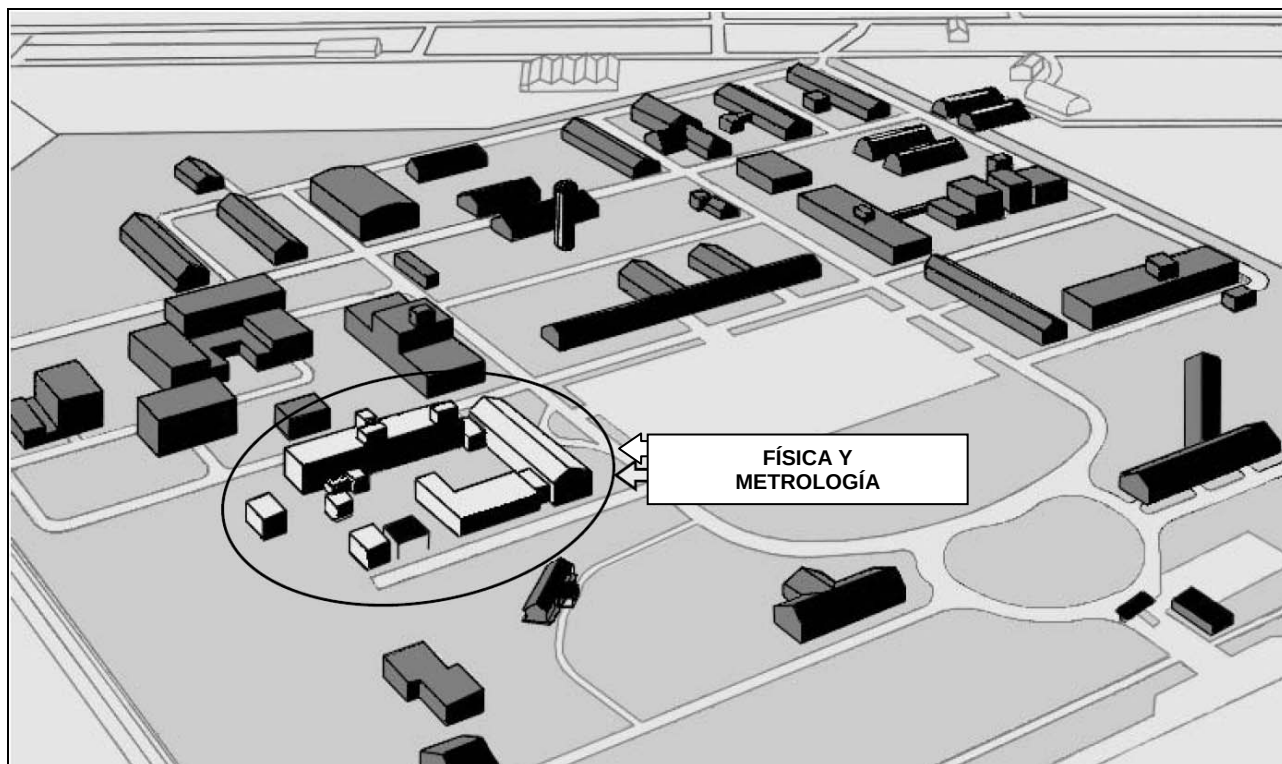
El aseguramiento de la calidad de las mediciones y la demostración de la competencia técnica del laboratorio se requieren. Por ello son aspectos de mayor prioridad la participación en comparaciones internacionales y el contraste directo entre mediciones de la misma magnitud utilizando diferentes metodologías de medición.

Experiencias realizadas en laboratorios metrológicos con toberas críticas en régimen sónico muestran su buen desempeño como referencia de caudal, debido (entre otras ventajas) a la incertidumbre que se logra.

Para el diseño del banco de calibración y ensayo se utilizaron libros de caudalimetría, normas y recomendaciones internacionales, publicaciones técnicas especializadas, diversos textos de relevancia metrológica sobre la tecnología de medición, información técnica de fabricantes y otros.

Como fuente de información se destaca la utilización de la siguiente norma técnica: International Organization for Standardization, Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles, ISO 9300:2005.

El proyecto se realiza en Centro de Investigación y Desarrollo en Física y Metrología, del INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, ubicado en el Parque Tecnológico Miguelete en el edificio identificado como Nro. 3.



Parque Tecnológico Miguelete, INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL



Hipótesis de trabajo

Luego de los análisis previos al inicio del proyecto, en función de la información disponible, se realizó un diseño respetando las recomendaciones de la bibliografía, normas internacionales y reglas del buen arte.

La construcción del Banco de calibración y ensayo se realiza en dos partes, en la primera se incluye un tramo de cañerías, en donde se pretende observar la manifestación de fenómeno físico, evaluar la repetibilidad de la medición y estudiar magnitudes de influencia, por ejemplo:

- Influencia de un acondicionador de flujo, con y sin condición de régimen sónico.
- Influencia de la profundidad de inserción de la vaina de un sensor de temperatura.
- Influencia de la regulación de presión y/o accesorios de proceso en la estabilidad de la medición.
- Influencia de la presión estática aguas abajo y aguas arriba de una tobera para alcanzar la condición de criticidad.

Posteriormente se construye el Banco de calibración y ensayo completo, se verifica la condición de criticidad en las ramas de medición y se caracteriza utilizando un patrón volumétrico.

Finalmente con el Banco de calibración y ensayo operativo se realiza la calibración de dos medidores volumétricos de gas, contrastando diferentes principios de medición.

Los patrones de medición utilizados son tipo húmedo y tipo rotativo dúo. Con ellos se establece una comparación directa con la campana de medición, patrón primario nacional de volumen y caudal de gas.

Metodología de desarrollo

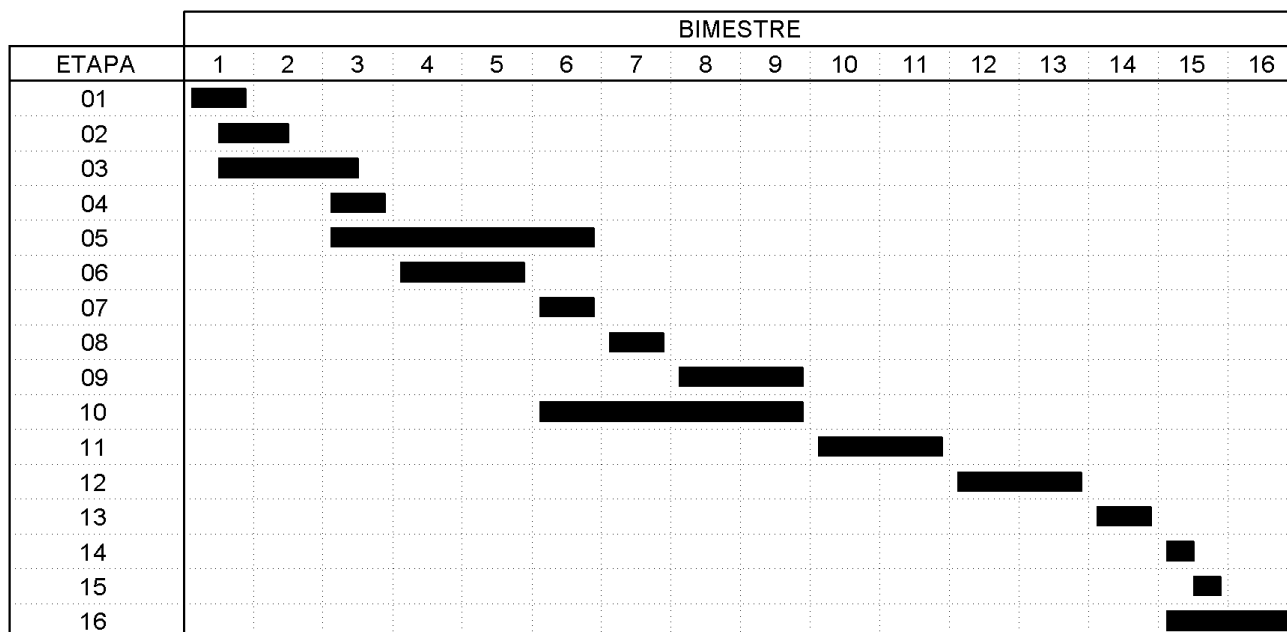
El proyecto se desarrolla en etapas, bien definidas entre sí. Varias de ellas dependen de la finalización de la anterior para su inicio. Las tareas específicas de cada etapa se definen en el inicio del proyecto.

Luego de la finalización de cada etapa se realiza una reevaluación de los pasos a seguir definidos al comienzo, con el objetivo de incluir modificaciones y/o mejoras relevantes.

Cronograma de Trabajo

Se define según las siguientes etapas:

- 01) Definición y alcance
- 02) Gestión inicial
- 03) Ingeniería de proyecto, diseño.
- 04) Estimación de costos y pedido de financiación
- 05) Compras
- 06) Construcción de un tramo de cañería
- 07) Ensayo de un tramo de cañería
- 08) Evaluación Metrológica de los resultados
- 09) Construcción del Banco de calibración y ensayo
- 10) Construcción de un sistema de adquisición de datos de alta exactitud
- 11) Puesta en marcha del Banco de calibración y ensayo
- 12) Caracterización del Banco de calibración y ensayo
- 13) Evaluación Metrológica de los resultados
- 14) Calibración de un medidor volumétrico tipo húmedo
- 15) Calibración de un medidor volumétrico tipo dúo
- 16) Tesis y presentación final.



Duración estimada total del proyecto: 2 años y 8 meses.

2) Tecnología de medición

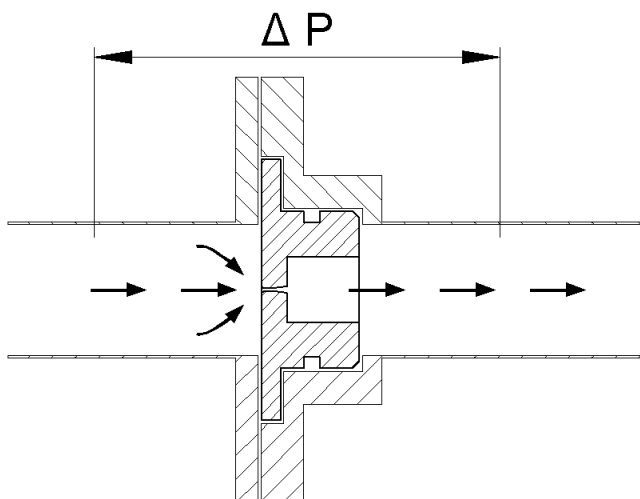
Tobera

Una tobera es una pieza metálica con un orificio y dimensiones preestablecidas.

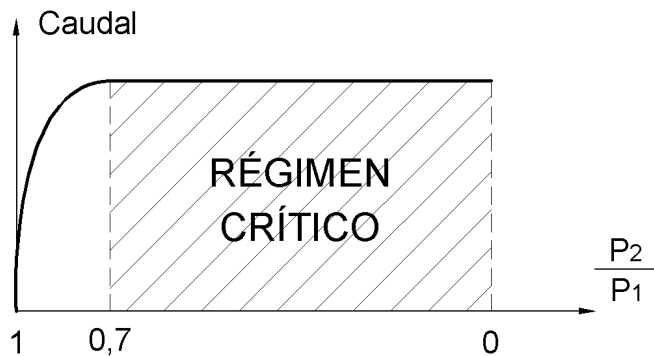


Principio de medición

La Tobera impone una restricción fija al pasaje del fluido. Se genera una depresión (vacío) a la salida. Al circular el fluido a través de la restricción (orificio) se acelera hasta llegar al régimen crítico, es decir, la velocidad del sonido. Dado que la condición alcanzada depende un límite físico, por más que se incremente el vacío *el caudal no se incrementará*.



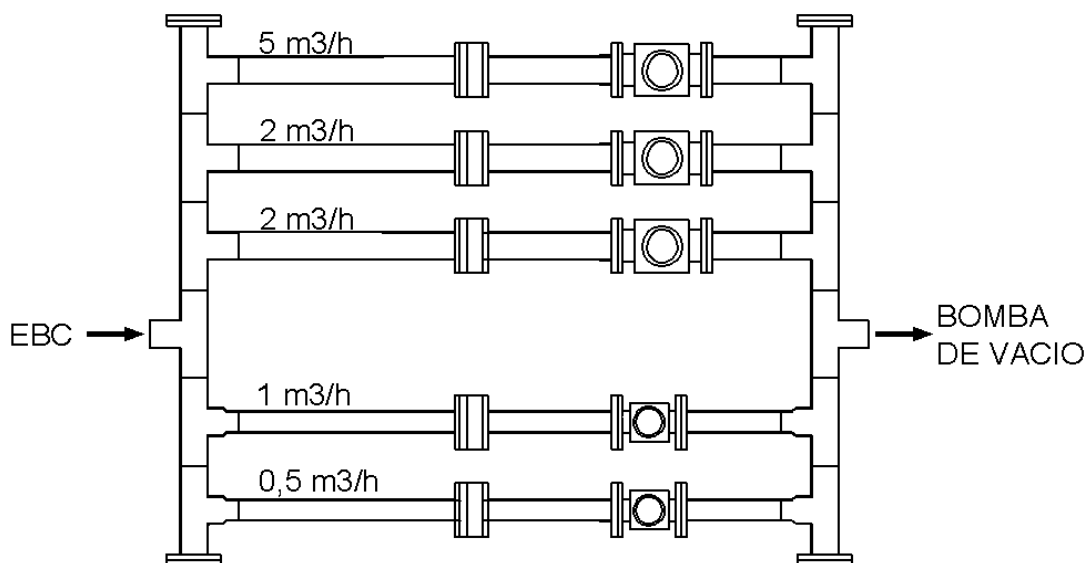
En el caso de una Tobera funcionando en Regimen Sónico lo que se busca es generar una diferencia de presión controlada. Se incrementa la diferencia de presión y por consecuencia el fluido aumenta su velocidad en la restricción hasta que se llega a un límite físico, la velocidad del sonido. De ahí el nombre de Regimen Sónico ó Regimen Crítico.

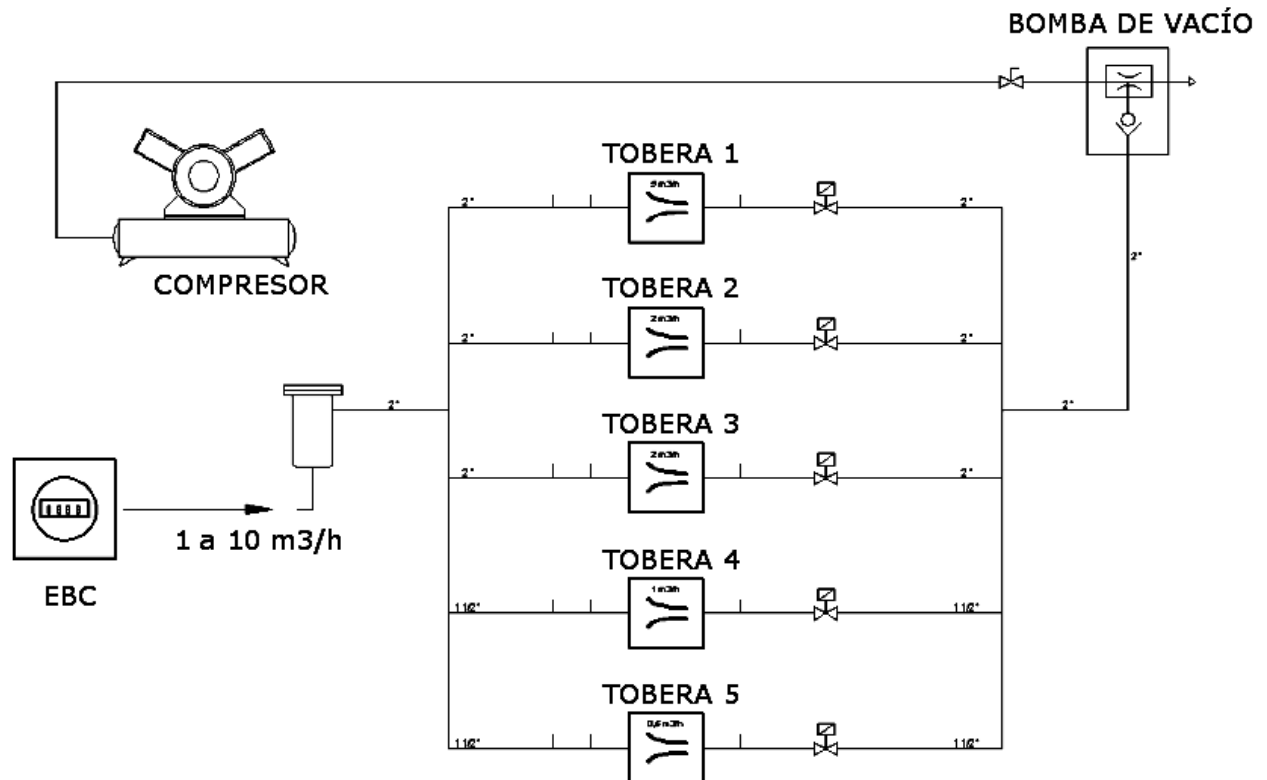


Al llegar al límite físico antes mencionado por más que se siga aumentando la diferencia de presión la velocidad de pasaje del fluido por el orificio se mantendrá constante. Como el diámetro también es constante (y considerando condiciones ambientales invariantes) el resultado es un Caudal Másico constante. Se utiliza la estable situación de circulación lograda como patrón de caudal de gas.

Banco de calibración y ensayo

El diseño general se muestra en los gráficos a continuación. Se utiliza un compresor alternativo y una bomba de vacío de alto caudal para generar la depresión requerida a la salida de cada tobera. La condición de criticidad se verifica con un sensor de presión diferencial colocado entre la entrada y la salida de cada Tobera, también se mide temperatura para realizar correcciones. A continuación se muestra un diagrama neumático y un layout de la disposición de las ramas de medición.





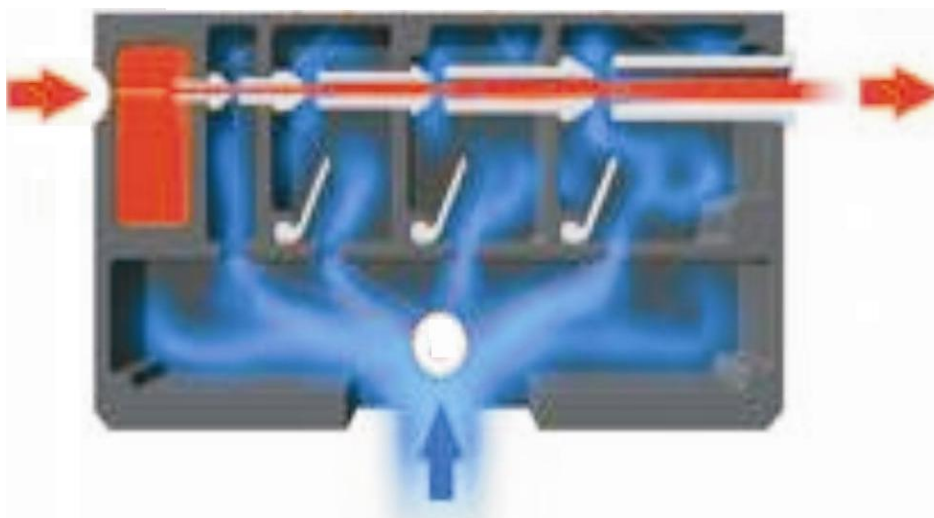
El equipamiento se detalla a continuación:

- 5 Toberas, caudales nominales 0,5, 1, 2, 2 y 5 m³/h.
- 5 Portatoberas de acero inoxidable.
- 1 Bomba vacío de alto caudal.
- 1 Sensor de presión diferencial.
- 1 Sensor de presión absoluto.
- 1 Sensor de humedad ambiente.
- 1 Sensor de temperatura ambiente.
- 6 Sensores de temperatura.
- 1 Multímetro digital.
- 1 Mesa móvil (adquisición de datos).
- 1 Tablero de acero inoxidable.
- 5 Electroválvulas.
- 1 Computadora personal.
- 2 Placas adquisidoras de datos.
- Caños y accesorios varios de acero inoxidable.

Funcionamiento

El Banco de calibración está formado por cinco ramas de medición conectadas en paralelo. Cada una posee una Tobera (calibrada, trazable) y una electroválvula de control. Los caudales nominales de las ramas son los siguientes: 0,5 / 1 / 2 / 2 / 5 m³/h. Según la combinación de EV actuadas se logra un caudal diferente. Aguas arriba de las Toberas se coloca un Filtro y luego el Equipo Bajo Calibración. Para las cañerías del Banco se utilizaron tubos de acero inoxidable de diámetro nominal 50,8 (2") y accesorios adecuados (codos, tee's, bridas, etc.).

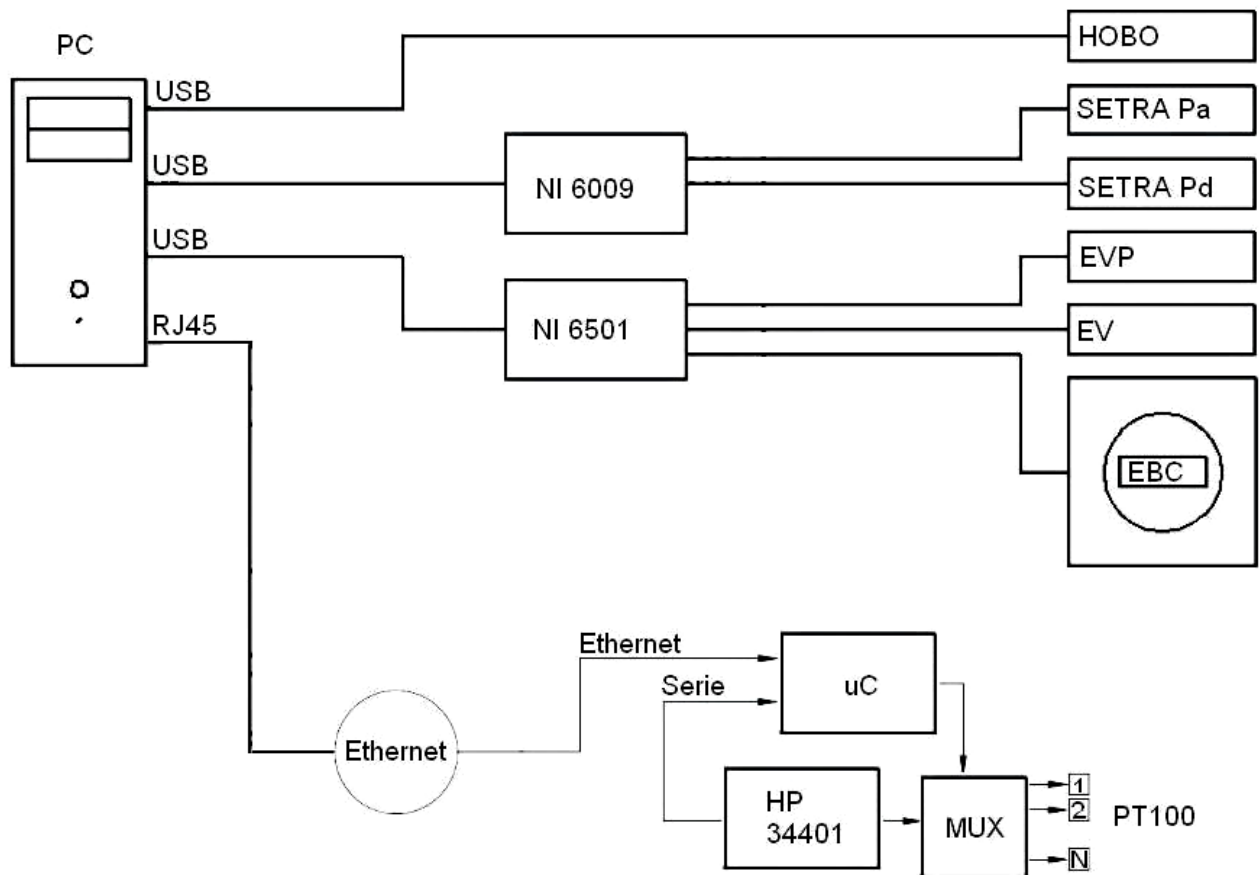
La condición de criticidad se verifica con un sensor de presión diferencial colocado entre la entrada y la salida de cada Tobera, también se mide temperatura para realizar correcciones. Aguas abajo de las EV se coloca una Bomba de Vacío de Alto Caudal que funciona por Efecto Venturi. Se la alimenta con aire comprimido (3,4 a 6 bar) y consume cerca de 20 m³/h. El vacío se genera por etapas.



Aguas abajo de las EV se coloca una Bomba de Vacío de Alto Caudal que funciona por Efecto Venturi. Se la alimenta con aire comprimido (3,4 a 6 bar) y consume cerca de 20 m³/h. El vacío se genera por etapas.

Control del sistema

A continuación se muestra un esquema:



Se utiliza una computadora en donde se conectan por USB dos placas adquisidoras de datos (con entradas digitales y analógicas) y por puerto serie un sensor de humedad. En una de las placas se conectan dos sensores de presión (uno absoluto y otro relativo). La otra se utiliza para controlar las electroválvulas y para adquirir la señal proveniente del equipo bajo calibración.

Desde la Pc también se accede via Ethernet a un micro-controlador que gobierna la medición de temperatura. Se utiliza para esto un multímetro de laboratorio y un multiplexor de 32 canales de medición. Se lo puede dividir en varias partes principales:

- Medición del Equipo Bajo Calibración
- Medición de Temperatura
- Medición de Presión
- Medición de Humedad
- Control de actuadores
- Software de usuario

Medición del Equipo Bajo Calibración

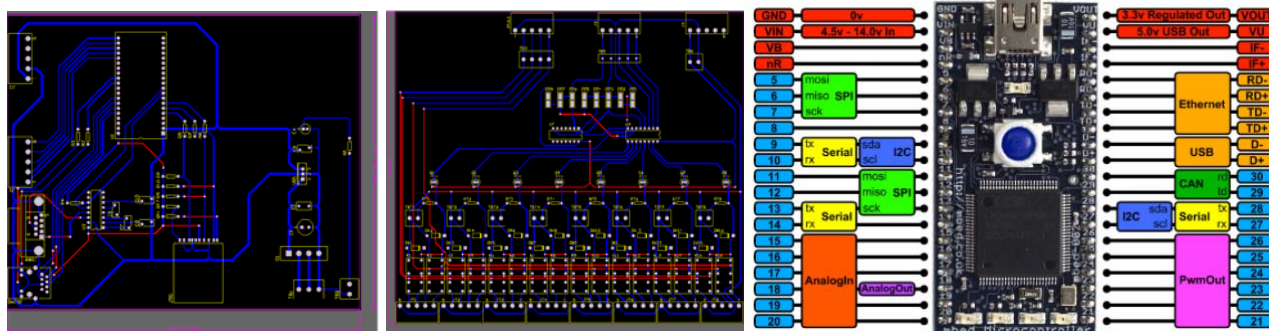
Con respecto a los equipos bajo calibración, suelen venir con encoders de alta resolución por lo que a veces las entradas convencionales no pueden utilizarse para contar los pulsos. Por esto se usa una entrada de alta frecuencia que posee la placa National.



PLACA NI 6501

Medición de Temperatura

Se utilizó un multímetro marca Agilent, modelo 34401, de 6 ½ dígitos y se lo conectó a un micro-controlador marca NXP, con núcleo ARM Cortex M3 y se desarrolló el driver correspondiente. Desde el microcontrolador se gobierna también un multiplexor compuesto de dos placas de 16 canales c/u. La medición se realiza a 4 hilos. A continuación se presentan los circuitos impresos de la placa principal y la placa multiplexora, un transductor de temperatura tipo PT100, el multímetro utilizado y un esquema del micro-controlador.



Multímetro
AGILENT 34401

y

Termoresistencia
PT 100

Medición de Presión

Los sensores seleccionados son marca Setra, modelos 239 y 270. El primero de ellos es diferencial, rango ± 450 mbar, incertidumbre $\pm 0,14\%$ FS. El otro es absoluto y se lo usa para medir presión ambiente, su rango es de 800 a 1100 hPa y su incertidumbre es de $\pm 0,05\%$.



Se los conectó a una Placa adquisidora de datos marca National Instruments, modelo NI6009, a dos de sus entradas analógicas.

Con respecto a la medición de Presión, dado que los sensores poseen salidas de tensión, se ensayaron diversos parámetros de configuración del muestreo de las placas adquisidoras. Se buscó bajar los componentes de ruido y llevar la indicación a un valor estable, (y a la vez) representativo de la dinámica del sistema. Se logró una resolución a la décima de mbar, valor acorde a la incertidumbre requerida.

Medición de humedad

Se utilizó un sensor marca Hobo, modelo TCH08003, rango de 25 a 95%, incertidumbre $\pm 5\%$. Se realizó la conexión del mismo mediante puerto serie de la Pc y se desarrolló el Driver correspondiente para Labview. El tiempo de respuesta del sensor de humedad fue un poco más elevado del esperado. Sin embargo se cuantificó el valor utilizando una cámara de ciclado térmico. Se ajustó el Driver correspondiente en forma adecuada.



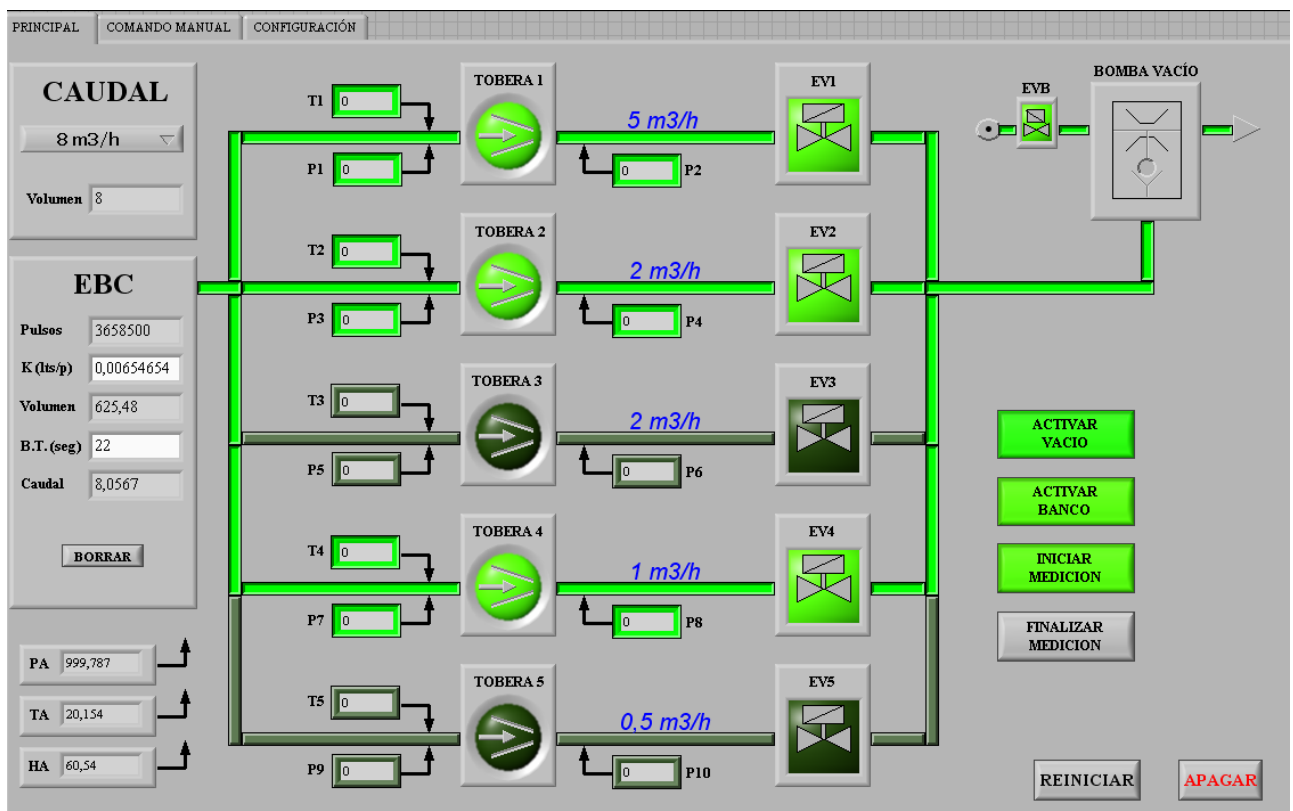
Control de actuadores

Las electroválvulas utilizadas son marca Festo. Por un lado se utilizaron cinco de la línea MN1H para las ramas del Banco de Calibración y por otro lado del modelo CPE10 (con pilotaje externo) para la medición de presión.



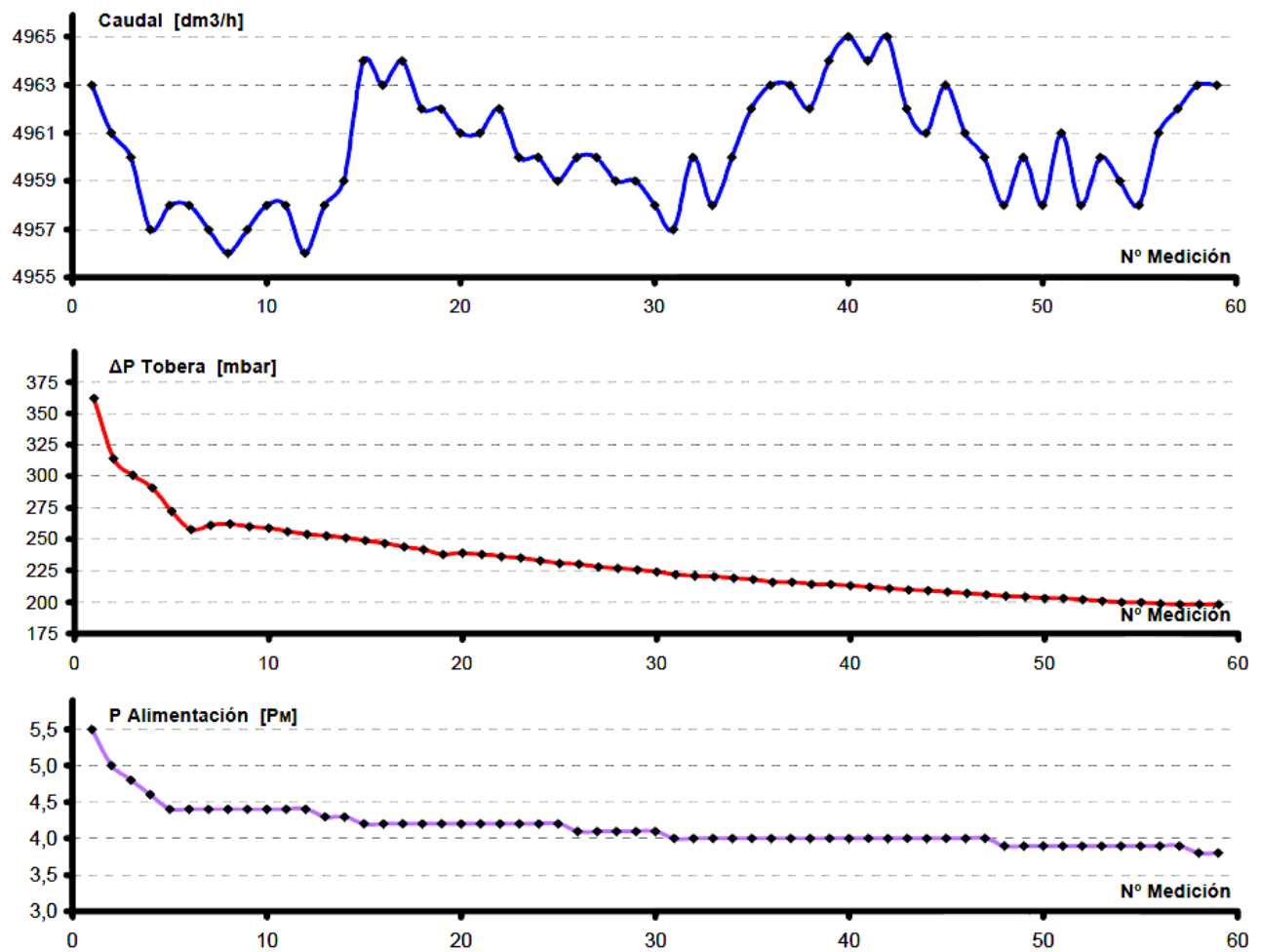
Software de usuario

Se realizó en el entorno de desarrollo de National Instruments, Labview. Desde allí se realiza el control del sistema completo, se adquieren, procesan y guardan los datos de la medición. A continuación se muestra una pantalla del proceso en funcionamiento, cuando están activas tres de las cinco ramas:



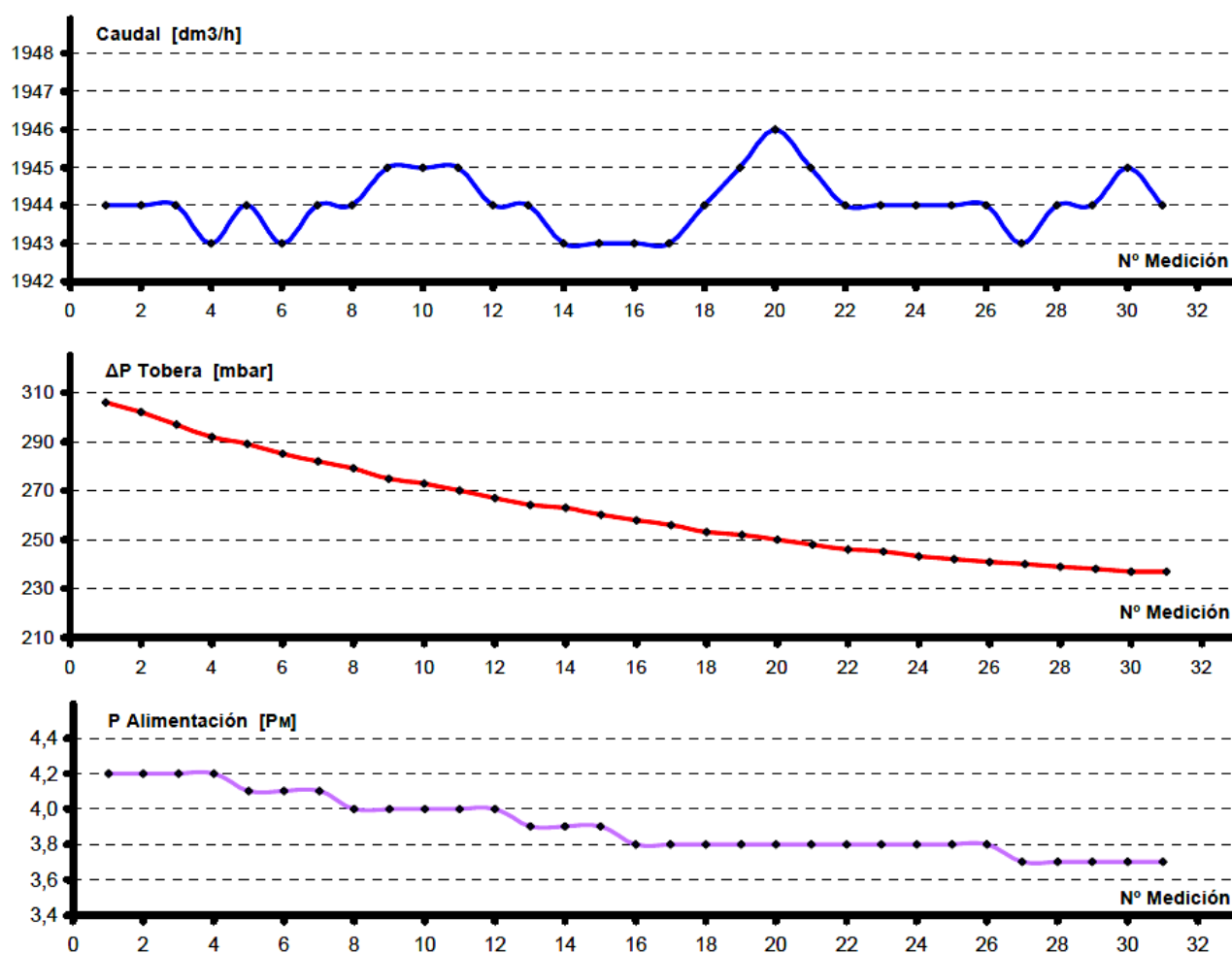
3) Mediciones

Tobera N°1 (5 m³/h)



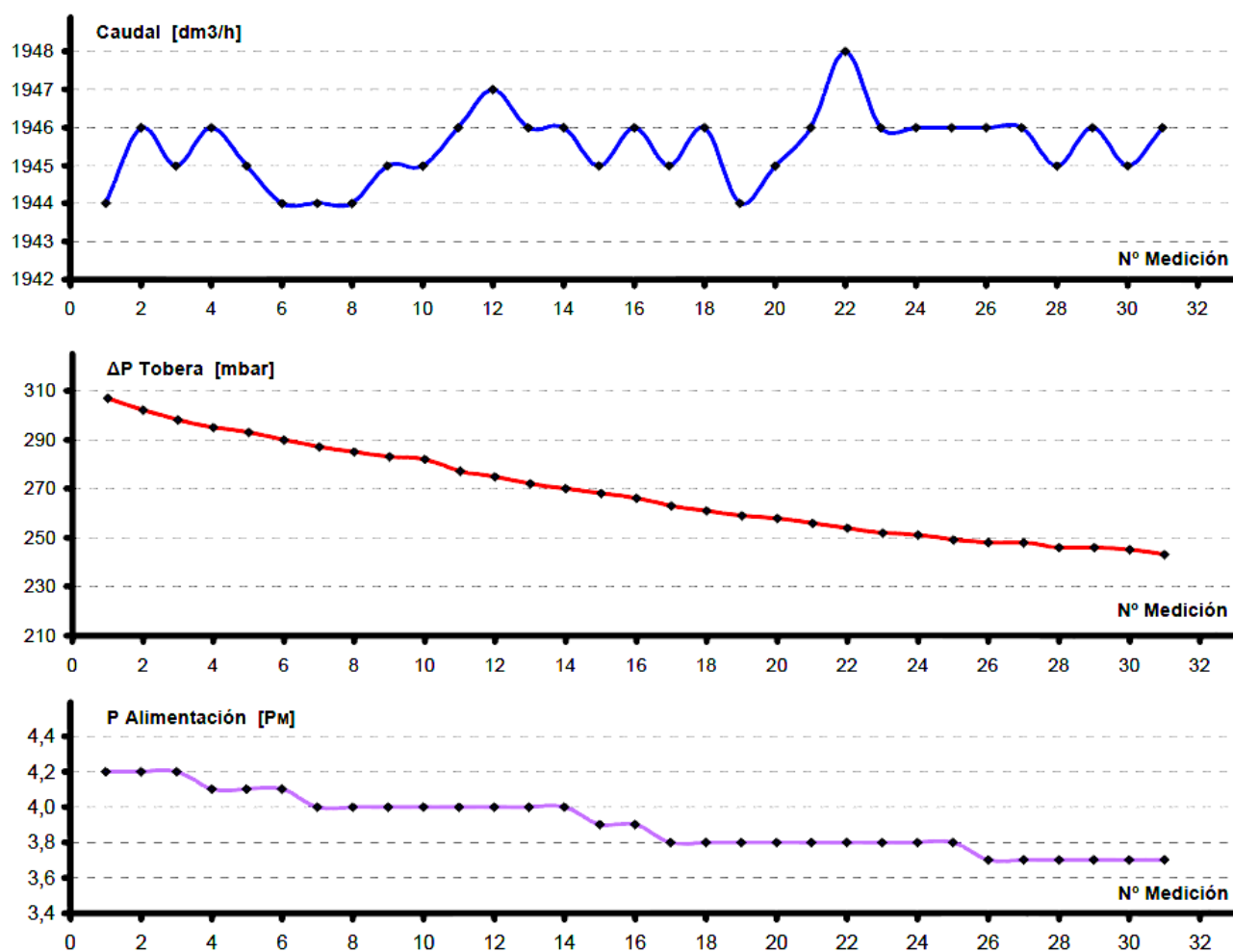
Mediciones realizadas contrastando con un medidor rotativo tipo dúo, sin utilizar enderezador de flujo, con las tomas de presión y temperatura con el tubo perforado, regulando vacío y sin electroválvula de control.

Tobera N°2 ($2 \text{ m}^3/\text{h}$)



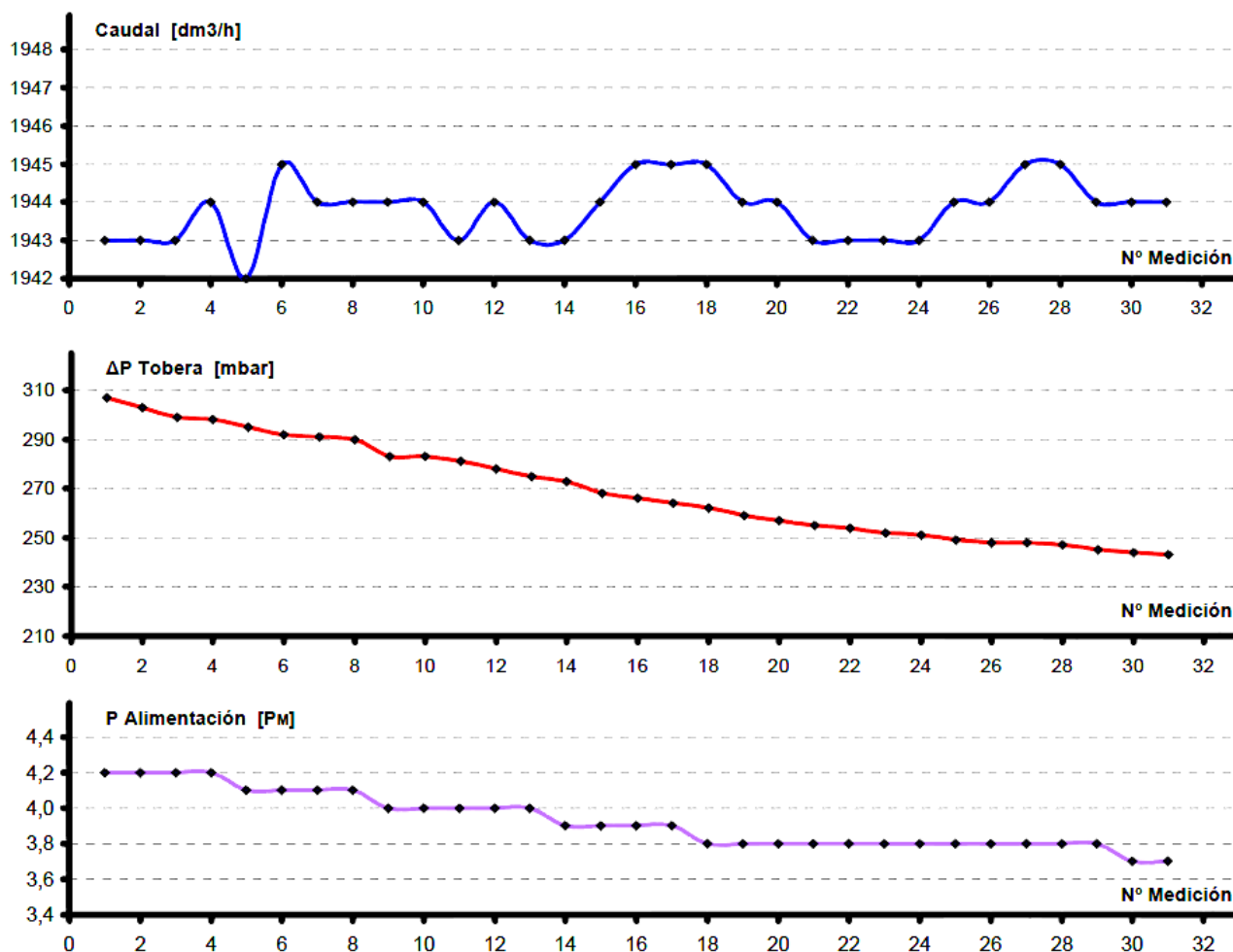
Mediciones realizadas contrastando con un medidor rotativo tipo dúo, utilizando enderezador de flujo, con las tomas de presión y temperatura sin el tubo perforado.

Tobera N°2 ($2 \text{ m}^3/\text{h}$)



Mediciones realizadas contrastando con un medidor rotativo tipo dúo, sin utilizar enderezador de flujo, con las tomas de presión y temperatura sin el tubo perforado.

Tobera N°2 ($2 \text{ m}^3/\text{h}$)



Mediciones realizadas contrastando con un medidor rotativo tipo dúo, sin utilizar enderezador de flujo, con las tomas de presión y temperatura con el tubo perforado, regulando vacío.



4) Resultados y conclusiones

Con las mediciones realizadas en la etapa uno se definieron aspectos finales de la configuración mecánica de las piezas para la construcción del Banco de Calibración.

Se verificó para una sola rama de medición el fenómeno de criticidad buscado, comparando con un patrón de diferentes tecnologías (medidor de gas a pistones rotativos tipo duo y contador volumétrico tipo húmedo).

A continuación se muestran dos curvas relevadas en donde se aprecia el caudal constante en valores de diferencia de presión por arriba de la criticidad.

Del análisis de los Ensayos se modificaron planos (Autocad) y se envió a mecanizar las piezas para todo el Banco completo.

Para la integración de los Software Drivers de los distintos sensores se implementaron máquinas de estado y así se optimizó en forma significativa la interacción entre el Labview y el Sistema Operativo.

Los componentes de incertidumbre relativa debido a la repetibilidad se calcularon entre 0,05% (Tobera N°1 5m³/h) y 0,1% (0,5 m³/h).



5) Documentos de referencia

International Organization for Standardization. *Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles*. (ISO 9300:2005)

Bureau International des Poids et Mesures. *Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement*. (JCGM 100:2008) (GUM).

Bureau International des Poids et Mesures. *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms*. (JCGM 200:2008) (VIM).

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. *Guía para la expresión de incertidumbres de medición, Traducción de INTI-Física y Metrología del documento: Guide to Expression of Uncertainty in Measurements*. (BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP, OIML 1993).

Miller, R. W. (1996). *Flow measurement engineering handbook*. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill.

Spitzer, D.W. (2001). *Flow measurement: practical guides for measurement and control*. North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Baker, R. C. (2000). *Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Wright, J.D. (1998). *The long term calibration stability of critical flow nozzles and laminar flowmeters*.

Gaithersburg, Maryland, EEUU. Fluid Flow Group, Process Measurements Division, Chemical Science and Technology Laboratory, National Institute of Standards and Technology

Johnson A.N., Wright J.D. *Sonic Nozzles as Primary Standards*. Gaithersburg, Maryland, EEUU. National Institute of Standards and Technology.

Johnson A., Wright J., Nakaoy S., Merklez C., Moldoverx M. *The Effect of Vibrational Relaxation on the Discharge Coefficient of Critical Flow Venturis*. Gaithersburg, Maryland, EEUU. National Institute of Standards and Technology.

Miralles, B.T. (1999). Preliminary considerations in the use of industrial sonic nozzles *Flow Measurement and Instrumentation* 11 (2000), 345–350

Bignell, N. (1996). Comparison techniques for small sonic nozzles *Flow Measurement and Instrumentation* 7 N°2, pp. 109-114.



UNSAM
INSTITUTO DE
LA CALIDAD
INDUSTRIAL

James, C., Wware, M. Grant, J., Thorpe. A., Michael, A., Senftle, F., Smith, S (2001). Flow equation for an ideal or viscous gas through a nozzle, application to cascade impactors *Experimental Thermal and Fluid Science* 25 (2001) 421-427

Paik, J., Park, K.A., Park, J.T. (1999) Inter-laboratory comparison of sonic nozzles at KRISS *Flow Measurement and Instrumentation* 11 (2000) 339–344

Bignell, N., Choi, M. (2002). Thermal effects in small sonic nozzles *Flow Measurement and Instrumentation* 13 (2002) 17–22

Bignell, N. (1999). Using small sonic nozzles as secondary flow standards *Flow Measurement and Instrumentation* 11 (2000) 329–337

Taira, N. (2002). *Medición de gas, Toberas sónicas*. Trabajo presentado en la Primera jornada técnica internacional en medición de flujo de gas. Bucaramanga, Colombia.