

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PATRON SECUNDARIO  
TIPO CÁMARA HÚMEDA PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE GASES**

**JHONN FREDY VELOSA CHACÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2004**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PATRON SECUNDARIO  
TIPO CÁMARA HÚMEDA PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE GASES**

**JHONN FREDY VELOSA CHACÓN**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JABID EDUARDO QUIROGA MENDEZ  
Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**FABIO BUITRAGO  
Profesional de calibración y ensayos  
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2004**

## **DEDICATORIA**

A mi mamá Rosa Maria Chacón, por creer en mí y brindarme todo su cariño,  
A mi papá Víctor Manuel y a mi hermana Martha Liliana por darme su comprensión  
y apoyo incondicional,  
Y a toda mi familia, a quienes este logro llenará de orgullo.

**Jhonn Fredy**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la familia Hernández Chacón y Quesada Sánchez por hacerme sentir en casa  
estando lejos de la mía.

Al ingeniero Jabid Eduardo Quiroga, docente de la Escuela de Ingeniería mecánica  
de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración oportuna durante la  
realización de este proyecto.

Al equipo de trabajo del CDT de GAS por todo el apoyo y conocimiento brindado a  
través del desarrollo de este proyecto.

Y a todos mis amigos.

**Jhonn Fredy Velosa Chacón.**

## CONTENIDO

|                                                              | <b>pag</b> |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| INTRODUCCIÓN                                                 | 1          |
| 1. CÁMARAS HÚMEDAS                                           | 3          |
| 1.1 CLASES DE CÁMARAS HÚMEDAS                                | 3          |
| 1.1.1 Clasificación por principio de funcionamiento          | 3          |
| 1.2.1 Clasificación por capacidad                            | 5          |
| 1.2. DESCRIPCIÓN                                             | 6          |
| 1.2.1 Cuerpo                                                 | 6          |
| 1.2.2 Tambor de medición                                     | 7          |
| 1.2.2 Fluido objeto de medición                              | 12         |
| 1.2.3 Líquido sellante                                       | 12         |
| 1.2.4 Indicador de nivel                                     | 14         |
| 1.2.5 Instrumentación secundaria                             | 16         |
| 1.2.6 Accesorios                                             | 18         |
| 1.2.7 Material de construcción                               | 21         |
| 1.3 FUNCIONAMIENTO                                           | 21         |
| 1.3.1 Llenado y vaciado de las cámaras de medición           | 21         |
| 1.3.2 Caída de presión                                       | 23         |
| 1.3.3 Nivel de líquido                                       | 25         |
| 1.4 APLICACIÓN DE LAS CÁMARAS HÚMEDAS                        | 27         |
| 1.4.1 Medidor                                                | 27         |
| 1.4.2 Patrón Secundario                                      | 28         |
| 2. VARIABLES Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO EN LAS CÁMARAS HÚMEDAS | 30         |
| 2.1 VARIABLES DE DISEÑO                                      | 30         |
| 2.2 VOLUMEN INTERNO                                          | 31         |
| 2.2.1 Modelado del volumen                                   | 33         |

|        |                                                                             |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2  | Sensibilidad del volumen                                                    | 43 |
| 2.2.3  | Herramienta de cálculo del volumen interno                                  | 47 |
| 2.3    | CAIDA DE PRESIÓN                                                            | 50 |
| 2.3.1  | Estimación de la caída de presión                                           | 51 |
| 2.3.2  | Sensibilidad de la pérdida de presión a cambios en los parámetros de diseño | 54 |
| 2.3.3  | Herramienta de cálculo para la presión                                      | 60 |
| 2.4    | NIVEL DE LÍQUIDO                                                            | 64 |
| 2.4.1  | Nivel de líquido: funcionamiento, calibración y diseño                      | 64 |
| 2.4.2  | Prototipo de tambor y estudio de nivel                                      | 66 |
| 2.4.3  | Criterio para diseño del tambor de medición                                 | 70 |
| 2.5    | INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA                                                  | 71 |
| 2.5.1  | Incertidumbre en cámaras húmedas                                            | 72 |
| 2.5.2  | Incertidumbre en cámaras húmedas: modelo simplificado                       | 75 |
| 3.     | DISEÑO DE CÁMARAS HÚMEDAS                                                   | 78 |
| 3.1    | METODOLOGÍA DE DISEÑO                                                       | 78 |
| 3.1.1  | Definir características del medidor                                         | 78 |
| 3.1.2  | Calcular caída de presión en tuberías                                       | 80 |
| 3.1.3  | Criterio de diseño para la entrada y de salida de gas                       | 80 |
| 3.1.4  | Dimensionamiento inicial                                                    | 80 |
| 3.1.5  | Seleccionar parejas de diámetro y longitud                                  | 81 |
| 3.1.6  | Criterio de diseño para el diámetro del tambor                              | 81 |
| 3.1.7  | Dimensionamiento detallado                                                  | 81 |
| 3.1.8  | Criterio de diseño para la longitud total del tambor                        | 82 |
| 3.1.9  | Selección de instrumentación secundaria                                     | 82 |
| 3.1.10 | Diseño y selección accesorios y conjunto soporte                            | 82 |
| 3.2    | DISEÑO DE UN MEDIDOR CÁMARA HÚMEDA DE 10 LITROS POR REVOLUCIÓN              | 82 |
| 3.2.1  | Características del medidor                                                 | 82 |
| 3.2.2  | Caída de presión en tuberías                                                | 84 |
| 3.2.3  | Dimensionamiento inicial                                                    | 85 |
| 3.2.4  | Dimensionamiento detallado                                                  | 86 |
| 3.2.5  | Instrumentación secundaria                                                  | 87 |

|       |                                                                 |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.6 | Accesorios y conjunto soporte                                   | 91  |
| 3.3   | MODELADO EN TRES DIMENSIONES, GENERACIÓN DE PLANOS Y PLANTILLAS | 99  |
| 4     | CONSTRUCCIÓN                                                    | 101 |
| 4.1   | CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR DE MEDICIÓN                             | 101 |
| 4.1.1 | Selección del taller                                            | 101 |
| 4.1.2 | Suministro de material                                          | 102 |
| 4.1.3 | Proceso de construcción                                         | 102 |
| 4.2   | CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO                                         | 105 |
| 4.2.1 | Selección del taller                                            | 105 |
| 4.2.2 | Suministro de material                                          | 106 |
| 4.2.3 | Proceso de construcción                                         | 106 |
| 4.3   | CONSTRUCCIÓN DE LOS ACCESORIOS                                  | 108 |
| 4.3.1 | Selección del taller                                            | 108 |
| 4.3.2 | Suministro de material                                          | 108 |
| 4.3.3 | Proceso de construcción                                         | 108 |
| 4.4   | ENSAMBLE FINAL                                                  | 109 |
| 5     | CALIBRACIÓN Y PRUEBA                                            | 110 |
| 5.1   | CALIBRACIÓN                                                     | 110 |
| 5.1.1 | Equipo utilizado                                                | 110 |
| 5.1.2 | Metodología de calibración                                      | 111 |
| 5.1.3 | Resultados de calibración                                       | 113 |
| 5.2   | ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE                                  | 115 |
| 5.3   | PRUEBAS                                                         | 115 |
| 5.3.1 | Torque resistivo causado por el sello                           | 115 |
|       | RECOMENDACIONES                                                 | 119 |
|       | CONCLUSIONES                                                    | 120 |
|       | BIBLIOGRAFÍA                                                    | 122 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                  | pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1 Funcionamiento tipo normal                                              | 4    |
| Figura 2 Funcionamiento tipo Hyde                                                | 4    |
| Figura 3 Diferentes cuerpos de cámara húmeda                                     | 6    |
| Figura 4 Tambor de medición                                                      | 7    |
| Figura 5 Láminas internas del tambor                                             | 8    |
| Figura 6 Partes de una lámina interna                                            | 8    |
| Figura 7 Ángulo de inclinación del plano longitudinal                            | 9    |
| Figura 8 Ventana de circulación                                                  | 9    |
| Figura 9 Puertos de entrada y salida de gas                                      | 10   |
| Figura 10 Ángulos de inclinación de los planos transversales de entrada y salida | 11   |
| Figura 11 Ángulo de sincronización                                               | 11   |
| Figura 12 Indicador de nivel con agujero excéntrico                              | 15   |
| Figura 13 Indicador de nivel de aguja                                            | 15   |
| Figura 14 Indicador de nivel por vasos comunicantes                              | 16   |
| Figura 15 Termómetro y manómetro                                                 | 17   |
| Figura 16 Indicador de volumen                                                   | 17   |
| Figura 17 Conjunto nivelador                                                     | 18   |
| Figura 18 Válvula de drenaje                                                     | 19   |
| Figura 19 Conexión universal                                                     | 20   |
| Figura 20 Apoyo y sello                                                          | 20   |
| Figura 21 Etapas de una cámara de medición                                       | 22   |
| Figura 22 Fuentes de caída de presión                                            | 24   |
| Figura 23 Áreas a alta y baja presión                                            | 25   |
| Figura 24 Variación de nivel                                                     | 26   |
| Figura 25 Aplicación en laboratorios                                             | 27   |
| Figura 26 Aplicación en motores                                                  | 28   |

|            |                                                                  |    |
|------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27  | Aplicación en cocinas                                            | 29 |
| Figura 28  | Aplicación como patrón                                           | 29 |
| Figura 29  | Cámaras de medición                                              | 32 |
| Figura 30  | Línea de simetría                                                | 32 |
| Figura 31  | Cámara de medición simétrica                                     | 34 |
| Figura 32  | Plano de simetría                                                | 35 |
| Figura 33  | Nomenclatura                                                     | 36 |
| Figura 34  | planos de referencia para el vaciado interno                     | 37 |
| Figura 35  | Vaciado interno                                                  | 38 |
| Figura 36  | Vaciado externo                                                  | 39 |
| Figura 37  | Vaciado del nivel de líquido                                     | 41 |
| Figura 38  | Nomenclatura volumen asimétrico                                  | 42 |
| Figura 39  | Ventana de Solid Edge para las propiedades físicas               | 44 |
| Figura 40  | Variación del volumen ante el cambio dimensiones del tambor      | 46 |
| Figura 41  | Variación del volumen ante el cambio de geometría de las láminas | 46 |
| Figura 42  | Ventana dimensionamiento inicial                                 | 48 |
| Figura 43  | Ventana dimensionamiento detallado                               | 49 |
| Figura 44  | Resultados del dimensionamiento detallado                        | 50 |
| Figura 45  | Variación de la fuerza de flotación                              | 53 |
| Figura 46. | Variación de Ángulos                                             | 57 |
| Figura 47  | Variación de Nivel de líquido                                    | 58 |
| Figura 48  | Variación de diámetro y longitud                                 | 58 |
| Figura 49  | Configuración de accesorios de entrada y salida de gas           | 60 |
| Figura 50  | Ventana de selección del tipo de cámara húmeda                   | 62 |
| Figura 51  | Ventana de propiedades para el cálculo de la caída de presión    | 63 |
| Figura 52  | Resultados de la caída de presión                                | 64 |
| Figura 53  | Banda de error en las cámaras húmedas                            | 65 |
| Figura 54  | Foto del prototipo                                               | 67 |
| Figura 55  | Montaje del prototipo                                            | 68 |
| Figura 56  | Diferencial de presión para diferentes niveles de líquido        | 69 |
| Figura 57  | Metodología de diseño                                            | 79 |
| Figura 58  | Sensor de presión                                                | 88 |
| Figura 59  | RTD's                                                            | 89 |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 60 Encoders                                               | 90  |
| Figura 61 Elementos que conforman el display de la cámara húmeda | 91  |
| Figura 62 Accesorio de entrada de gas                            | 92  |
| Figura 63 Accesorio de salida de gas                             | 92  |
| Figura 64 Drenaje grueso                                         | 93  |
| Figura 65 Válvula de drenaje                                     | 93  |
| Figura 66 Nivel de aguja                                         | 94  |
| Figura 67 Base y apoyos                                          | 95  |
| Figura 68 Diferentes sistemas de sellado                         | 96  |
| Figura 69 Eje de rotación del tambor                             | 97  |
| Figura 70 Partes que conforman el cuerpo del medidor             | 98  |
| Figura 71 Tapa posterior                                         | 99  |
| Figura 72 Plantillas para los cortes del acrílico                | 99  |
| Figura 73 Plantilla de la lámina de acero inoxidable del tambor  | 100 |
| Figura 74 Metalteco Ltda.                                        | 101 |
| Figura 75 Sección de trazado, corte y dobléz                     | 102 |
| Figura 76 Láminas dobladas                                       | 103 |
| Figura 77 Curvado para el cilindro y la tapa trasera             | 103 |
| Figura 78 Proceso de soldadura                                   | 104 |
| Figura 79 Tambor de medición                                     | 105 |
| Figura 80 Formacryl Ltda.                                        | 105 |
| Figura 81 Partes de acrílico cortadas                            | 106 |
| Figura 82 Curvado de cilindros en acrílico                       | 107 |
| Figura 83 Proceso de pegado del cuerpo                           | 107 |
| Figura 84 Ensamble final del medidor                             | 109 |
| Figura 85 Campana gasométrica CDT de GAS                         | 111 |
| Figura 86 Arreglo de válvulas                                    | 111 |
| Figura 87 Metodología de calibración de cámaras húmedas          | 112 |
| Figura 88 Curva de error cámara húmeda 10 litros /rev            | 114 |
| Figura 89 Dos tipos de sello                                     | 116 |
| Figura 90 Torquimetro digital                                    | 116 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                          | pág. |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1 Variación del volumen ante el cambio de dimensiones del tambor   | 45   |
| Tabla 2 Variación del volumen ante el cambio de geometría de las láminas | 45   |
| Tabla 3 Sensibilidad del volumen ante variaciones geométricas            | 47   |
| Tabla 4 Variación de Ángulos                                             | 56   |
| Tabla 5 Variación de Nivel de líquido                                    | 56   |
| Tabla 6 Variación de diámetro y longitud                                 | 57   |
| Tabla 7 Diferencial de presión para diferentes niveles de líquido        | 69   |
| Tabla 8 Desviación estándar de la presión                                | 70   |
| Tabla 9 Estimación de la incertidumbre en Cámaras Húmedas                | 76   |
| Tabla 10 Incertidumbre en Cámaras húmedas (modelo simplificado)          | 77   |
| Tabla 11 Características proyectadas en el medidor                       | 83   |
| Tabla 12 Materiales seleccionados para la construcción                   | 83   |
| Tabla 13 Propiedades del acrílico                                        | 84   |
| Tabla 14 Caída de presión en tubería de entrada y salida de gas          | 85   |
| Tabla 15 Datos iniciales de iteración                                    | 86   |
| Tabla 16 Resultados de la iteración                                      | 86   |
| Tabla 17 Datos de entrada para el dimensionamiento detallado             | 87   |
| Tabla 18 Resultados del dimensionamiento detallado                       | 87   |
| Tabla 19 Datos técnicos del sensor de presión                            | 88   |
| Tabla 20 Resultados de calibración                                       | 114  |
| Tabla 21 Estimación de la Incertidumbre final de la Cámara Húmeda        | 117  |
| Tabla 22 Torque resistivo ocasionado por el sello                        | 118  |

## LISTA DE APÉNDICES

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| Apéndice A | Medición de gas                      |
| Apéndice B | Metrología                           |
| Apéndice C | Jerarquía de patrones y trazabilidad |
| Apéndice D | Incertidumbre                        |

## LISTA DE ANEXOS

|         |                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------|
| Anexo 1 | Manual de instrucciones de calibración y funcionamiento |
| Anexo 2 | Planos                                                  |

## RESUMEN

### TÍTULO:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN PATRÓN SECUNDARIO TIPO CÁMARA HÚMEDA PARA LA MEDICIÓN DE FLUJO DE GASES\***

### AUTOR:

Jhonn Fredy Velosa Chacón. \*\*

### PALABRAS CLAVES:

Metrología, Medición de gas, Patrón secundario, Medidor tipo cámara húmeda.

### DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto hace parte de una propuesta realizada por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) a COLCIENCIAS, para realizar en conjunto con la Escuela de Ingeniería Mecánica apropiación de tecnología, mediante el diseño, construcción y calibración de medidores de gas tipo cámara húmeda.

Las cámaras húmedas son medidores de flujo volumétrico de desplazamiento positivo con alta exactitud y baja incertidumbre para mediciones de volumen y caudal de gas relativamente pequeñas, por tal motivo son ampliamente utilizados como patrón secundario. El contenido del libro presenta en primer lugar un análisis cuantitativo del efecto producido por los diferentes parámetros que intervienen en el diseño de las cámaras húmedas como volumen, caída de presión, nivel de líquido, e instrumentación secundaria. Mediante el análisis de variables se lograron establecer diferentes criterios para el diseño, los cuales son el fundamento de la metodología desarrollada para el diseño de las cámaras húmedas, esta metodología cubre los aspectos relacionados con el cálculo y selección de tamaños, formas y materiales cuyo objetivo es la obtención de un instrumento con las mejores cualidades metrológicas. La materialización de este diseño se llevo a cabo con tecnología y mano de obra de la región, teniendo en cuenta la escogencia del personal y los equipos de la manera más adecuada para cada uno de los conjuntos que componente el medidor.

La calibración del prototipo fue realizada con el patrón primario de volumen tipo campana gasométrica propiedad del CDT de GAS, obteniéndose en esta resultados metrológicos favorables que ubican el prototipo construido como patrón secundario. La ventaja económica que representa el diseño y construcción con recursos humanos y técnicos nacionales representa una oportunidad viable para la comercialización de las cámaras húmedas.

---

\* Trabajo de Grado

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

## SUMMARY

**TITLE:**

**DESIGN, CONSTRUCTION AND CALIBRATION OF A WET DRUM TYPE SECONDARY STANDARD TO THE MEASUREMENT OF GAS FLOW \***

**AUTHORS:**

Jhonn Fredy Velosa Chacón. \*\*

**KEY WORDS:**

Metrology, Gas meter, Secondary standard, Wet test gas meter.

**DESCRIPTION:**

The present project is part of a proposal suggested by the “Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas” (CDT de GAS) to COLCIENCIAS, to achieve with the assistance of Mechanical Engineering School appropriation of technology, through design, construction and calibration of wet gas meter.

The wet gas meter are volumetric flow meter of positive displacement with high accurate and few uncertainty to measure small amounts of gas volume and flow; therefore, they are widely used as secondary standards. The content of this book is introduced as follow, firstly, it was done a quantitative analysis about the effect produced by different parameters that intervene in wet gas meters design as volume, pressure drop, liquid level and secondary instrumentation. By using the variables analysis it was acquired to establish different criteria of design, these criteria are the basis of the developed methodology at designing wet gas meters; this methodology cover aspects related to calculating and choosing, sizes, shapes and material, the goal is to get an instrument with the best meter qualities. Materialization of this design was perform with local technology and workmanship, suitable people to construct each part were chosen in the best way according to their specializations.

The calibration of this prototype was realized with the bell prover type volume master meter, which belongs to the CDT de GAS, the result got with this prototype were so favorable that located it as a secondary standard. The economical advantages, that represent the design and construction by using national technical and human resources, is a feasible opportunity to commercialize the wet gas meters.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Jabid Quiroga.

## INTRODUCCIÓN

Por causa del crecimiento manifestado en los últimos años en el sector del gas, se ha iniciado conciencia metrológica por parte de la industria y en general de los usuarios del gas, lo cual demanda a los laboratorios y entidades relacionadas a nivel nacional el fortalecimiento de la infraestructura y de los sistemas de medición con que ellos cuentan, a fin de solucionar los inconvenientes que se presentan a nivel metrológico.

La implementación de estos sistemas de medición representan un alto costo económico para estas entidades, ya que en el país aun no se cuenta con el desarrollo científico que permita la elaboración de estos, obligando a la importación de instrumentos de medición a un alto costo, sin que esto garantice una total comprensión en los aspectos tecnológicos y de funcionamiento de los instrumentos.

El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) en conjunto con la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, son abanderados a nivel nacional en la ejecución de actividades encaminadas al desarrollo de la metrología del gas, realizando apropiación de tecnología que elimine la dependencia tecnológica existente en el sector, de tal manera que estos desarrollos científicos sirvan como soporte a la industria del gas y en general al país.

El presente proyecto de grado se desarrolla como parte de una propuesta hecha por el CDT de GAS la cual es financiada por COLCIENCIAS, para realizar un avance en el campo de la metrología de gas, mediante el diseño, construcción y calibración de medidores de gas tipo Cámara Húmeda, que por su capacidad metrológica son de gran utilidad en la calibración de instrumentos contadores de gas.

Los desarrollos que se habían hecho hasta el momento en el reconocimiento de este tipo de medidores, corresponde a la definición de variables que intervienen en el diseño, lo cual fue el fundamento del proyecto de grado hecho por Carlos Patiño y Said Romero en el año 2002, resultado del cual se planteó una metodología preliminar de diseño y un estudio de variables de acuerdo a la misma, sin superar la etapa teórica del estudio.

Este proyecto se desarrolló teniendo como base los adelantos hechos anteriormente, realizando la evaluación de la incidencia de las variables que intervienen en el diseño, utilizando para ello el desarrollo de herramientas computacionales de última generación que faciliten el proceso; producto de ello se desarrolló una metodología que puede ser aplicada en el diseño de medidores tipo cámara húmeda para diferentes aplicaciones y capacidades. Esta metodología está sustentada en el análisis teórico de variables mediante las herramientas de diseño y principalmente en la construcción y prueba de un prototipo que permitió su validación.

El resultado del proceso fue la construcción de un medidor tipo cámara húmeda con una capacidad nominal de 10 litros por revolución, la cual fue calibrada mediante el patrón primario de volumen (Campana gasométrica) del CDT de GAS, presentando unas características metrológicas que lo confirman como patrón secundario para la medición de flujo de gases.

## **1. CÁMARAS HÚMEDAS**

Las cámaras húmedas son medidores de flujo volumétrico de desplazamiento positivo, con alta exactitud y baja incertidumbre para mediciones de volumen y caudal de gas relativamente pequeñas, por tal motivo son ampliamente utilizadas como patrón secundario para calibrar otros tipos de medidores<sup>1</sup>.

Es importante antes de abordar el proceso de diseño de las cámaras húmedas, conocer sus componentes y su funcionamiento. Por tal motivo, en el presente capítulo se mostrarán las características mas relevantes de diferentes modelos de medidores, sin que esto implique una camisa de fuerza para el diseño.

### **1.1 CLASES DE CÁMARAS HÚMEDAS**

Dos formas generales de clasificar las cámaras húmedas son: por funcionamiento y por tamaño.

#### **1.1.1 Clasificación por principio de funcionamiento**

La clasificación por funcionamiento de las cámaras húmedas las divide en dos tipos, dependiendo de la dirección que lleva el gas cuando entra o abandona el elemento primario de medición o tambor, estas son: radial y axial; A su vez cada una de estas se subdivide en dos principios que dependen de la manera como realiza su recorrido el gas medido a través del tambor, estos principios son: normal y Hyde.

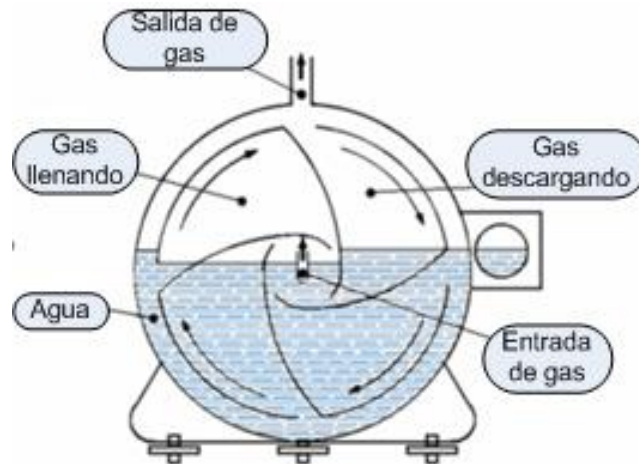
A continuación se describen brevemente los dos principios de funcionamiento para un medidor de tipo radial, el funcionamiento de los medidores axiales será explicado con más detalle posteriormente.

---

<sup>1</sup> Para mayor información sobre patrones ver Apéndice C

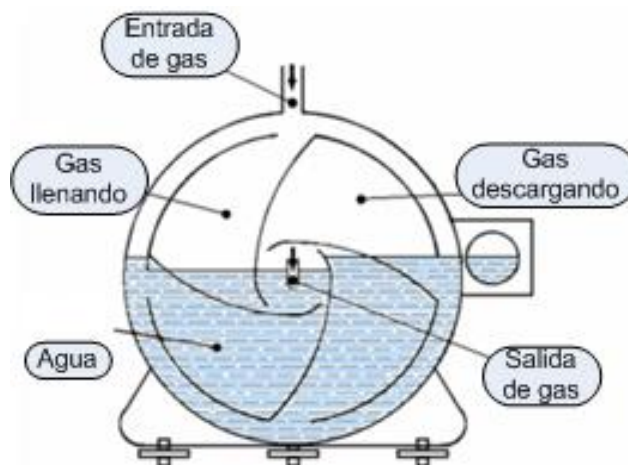
- ü Principio normal de funcionamiento. En este la entrada de gas al medidor esta dispuesta de forma que el gas pase primero a través del tambor de medición (figura 1).

**Figura 1 Funcionamiento tipo normal**



- ü Principio Hyde: La entrada de gas al medidor esta ubicada en el espacio por encima del nivel de agua, en el exterior del cuerpo de la cámara y el gas debe entonces pasar a través del tambor hacia la salida del medidor (figura 2).

**Figura 2 Funcionamiento tipo Hyde**



### 1.2.1 Clasificación por capacidad

#### ü Capacidad de la cámara de medición

Como capacidad de la cámara de medición de un contador de gas por desplazamiento positivo se considera el volumen correspondiente a un ciclo de trabajo del dispositivo medidor (volumen cíclico). Un ciclo de trabajo está dado por el transcurso total de los movimientos, a través de los cuales las partes móviles del dispositivo medidor vuelven a quedar en la posición inicial. La determinación de la capacidad de la cámara se realiza en primer lugar mediante cálculos, multiplicando el volumen correspondiente a una vuelta completa del elemento contador de prueba por la relación de transformación entre el dispositivo medidor y el dispositivo contador. (Aguja, odómetro, etc.)

La capacidad de las cámaras húmedas se puede evaluar de dos maneras, la primera es indicando el volumen de la cámara por revolución y la segunda según la capacidad operativa, que normalmente se define como el volumen de gas que tiene una gravedad específica de 0,64 y pasa a través del medidor en una hora con una pérdida de presión de 0,3 pulgadas de agua (74,652 Pa) a través de este.

En la norma ASTM D1071<sup>2</sup> se presenta de manera informativa, no normativa, la capacidad en pies cúbicos por revolución de los tamaños comerciales de cámaras húmedas, el rango presentado es desde 1/20 ft<sup>3</sup>/rev (1.42 dm<sup>3</sup>/rev) hasta 7 ft<sup>3</sup>/rev (198.22 dm<sup>3</sup>/rev).

Por su parte el PTB<sup>3</sup> señala que los diseños constructivos de contadores de gas patrones del tipo cámara húmeda, deben cumplir con los requisitos citados en sus propias directivas (directiva sobre instrumentos patrones de uso para el ensayo de contadores de gas a diafragma), de acuerdo con esta directiva, solamente están permitidos los contadores de gas del tipo de

---

<sup>2</sup> Standard test methods for Volumetric Measurement of gaseous fuel samples.

<sup>3</sup> PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt), (Instituto Nacional de Metrología Alemán)

tambor con tamaños correspondientes a las capacidades de  $5 \text{ dm}^3$  por hora hasta  $2000 \text{ dm}^3$  por hora.

Los fabricantes de cámaras húmedas normalmente producen tambores con capacidad de medición desde  $0,25 \text{ dm}^3$  hasta  $100 \text{ dm}^3$ , con una capacidad operativa que va desde  $1 \text{ dm}^3$  por hora hasta  $18 \text{ m}^3$ .

## **1.2. DESCRIPCIÓN**

### **1.2.1 Cuerpo**

El cuerpo es el encargado de reunir y asegurar todos los elementos para formar un instrumento con características compactas y de fácil transporte, es un cilindro ubicado de forma horizontal sobre unos apoyos, a este cilindro se le conoce como “tanque principal de almacenamiento de liquido”, debe tener características constructivas que le brinden absoluta hermeticidad para evitar el escape tanto de liquido sellante como del gas medido, todos los demás subconjuntos que conforman estos instrumentos deben ir acoplados en su exterior, el instrumento primario de medición (tambor) se encuentra en la parte interior de este cilindro. En algunos modelos se presenta en su parte posterior un conjunto de tornillos que permiten retirar de su interior el tambor de medición (Figura 3).

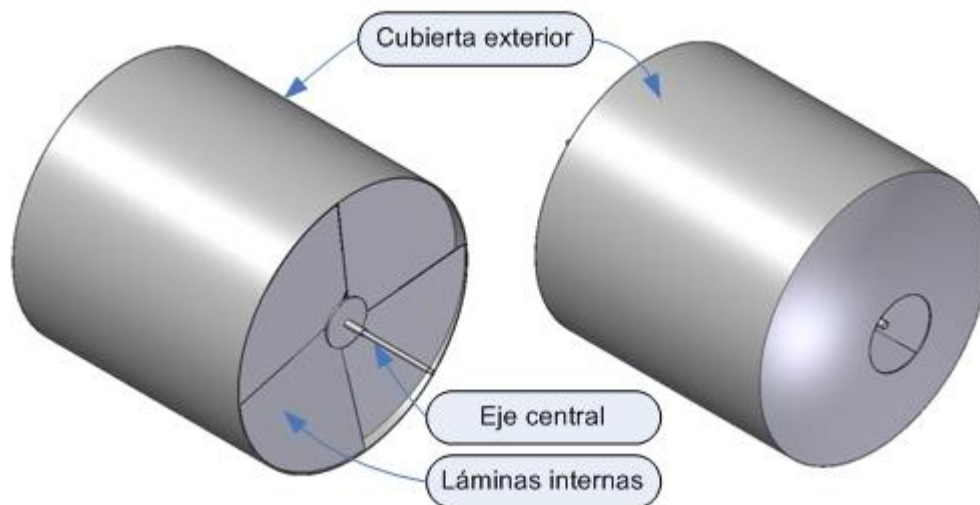
**Figura 3 Diferentes cuerpos de cámara húmeda**



### 1.2.2 Tambor de medición

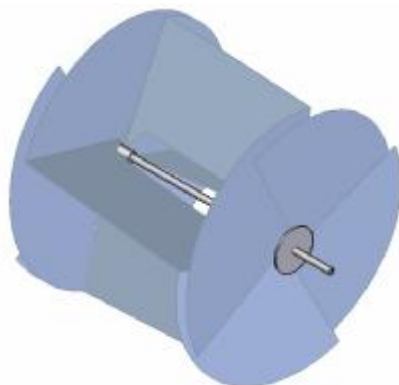
El tambor es el elemento primario del medidor cámara húmeda, es la parte rotativa del instrumento, sus componentes básicos son: láminas internas, cubierta exterior, tapa posterior, eje central y apoyos laterales (figura 4), todo el conjunto esta balanceado estáticamente con respecto al eje central para garantizar de esta manera que pueda rotar libremente y de manera uniforme, ya que las velocidades de rotación de este tambor cuando se encuentra funcionando a máximo caudal, no supera las 5 rpm.

**Figura 4 Tambor de medición**



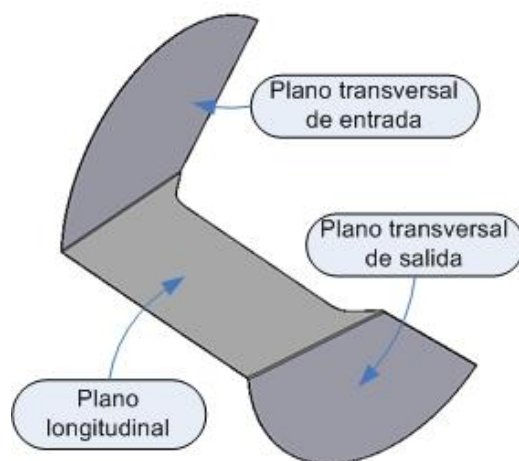
Las láminas internas del tambor se ubican igualmente espaciadas alrededor del eje central, y son las encargadas de dividir el volumen del tambor en cuatro cámaras con características de forma y tamaño similares (figura 5); la geometría de las láminas junto con la correcta ubicación del nivel de líquido permiten que durante la rotación del conjunto se sincronicen los procesos de llenado y vaciado. Cada lámina debe ir perfectamente soldada al tambor exterior para garantizar la hermeticidad de cada una de las cámaras de medición, porque la presencia de fugas o poros produciría errores significativos en la operación a bajos caudales.

**Figura 5 Láminas internas del tambor**



Estas láminas poseen unas características geométricas especiales, logradas mediante el corte y doblé de las mismas, estas dependen de los parámetros tenidos en cuenta en su diseño, como capacidad volumétrica y caída de presión; cada lámina se subdivide en tres planos (figura 6), cada uno de ellos posee funciones y características específicas, estos planos se denominan así: plano transversal de entrada, plano longitudinal y plano transversal de salida

**Figura 6 Partes de una lámina interna**

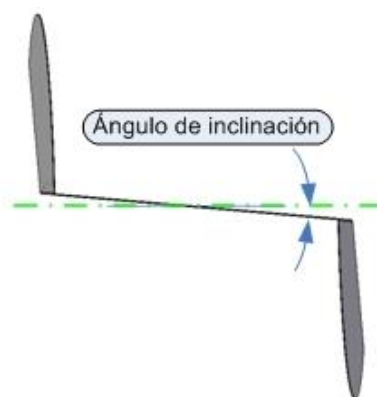


**ü Plano longitudinal:**

Cumple la función de separar “longitudinalmente” las cuatro cámaras del tambor, así como también, servir de área sobre la cual actúa la diferencial de presión que proporciona la rotación en el medidor. Debe tener la inclinación apropiada respecto al eje del tambor (figura 7) pues ángulos de inclinación

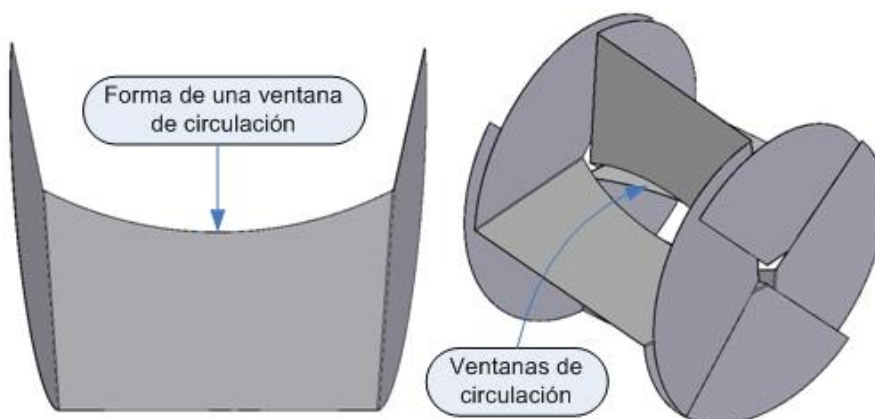
muy pequeños alteran la estabilidad de la superficie del nivel condicionando el diseño a velocidades de rotación pequeñas.

**Figura 7 Ángulo de inclinación del plano longitudinal**



El plano longitudinal presenta una ventana arqueada en su parte inferior, la cual permite la circulación del líquido sellante, evitando de esta manera una fuerza contraria al movimiento, (figura 8).

**Figura 8 Ventana de circulación**



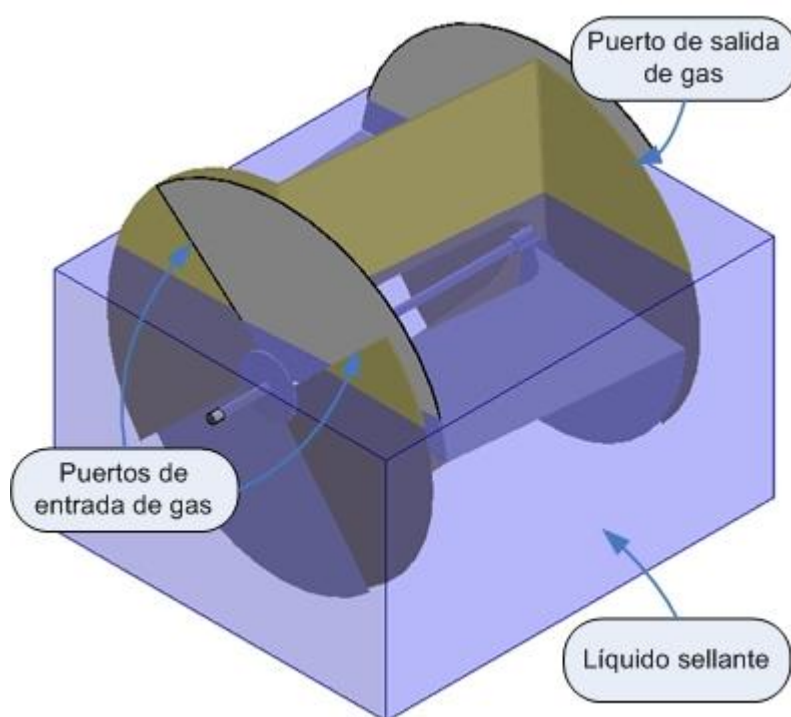
Cuando las dimensiones de esta ventana son muy pequeñas, el líquido sellante encuentra mayor resistencia a fluir entre las cámaras, lo cual se traduce en un aumento en la caída de presión en el tambor. Es conveniente elaborar esta

abertura de dimensiones tales que contribuyan lo menos posible a la resistencia a la rotación.

#### ü Plano transversal de entrada y de salida

Estos planos presentan configuraciones similares, diferenciándose únicamente en la dirección del doblé que se les aplica. Su función es completar junto con el nivel de líquido y la cubierta exterior los límites del volumen de gas en medición, a la vez que forma con su consecutiva lámina interior los puertos de entrada y salida de gas de cada una de las cámaras del tambor (figura 9).

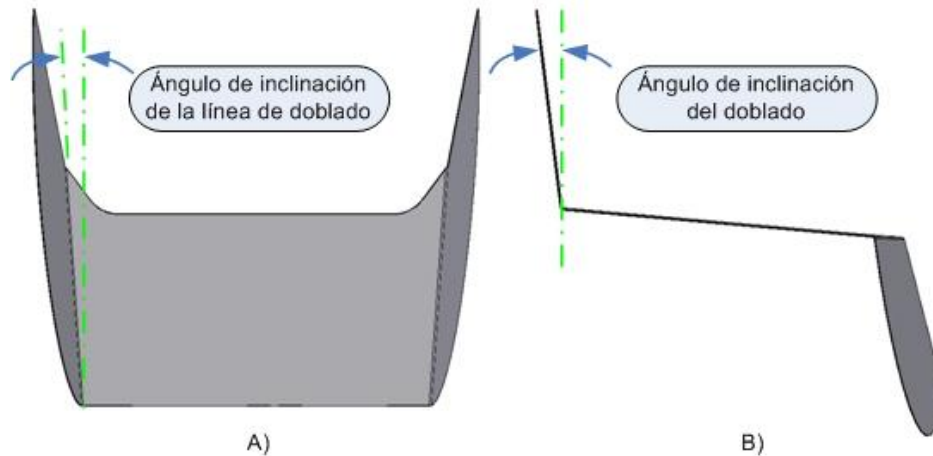
**Figura 9 Puertos de entrada y salida de gas**



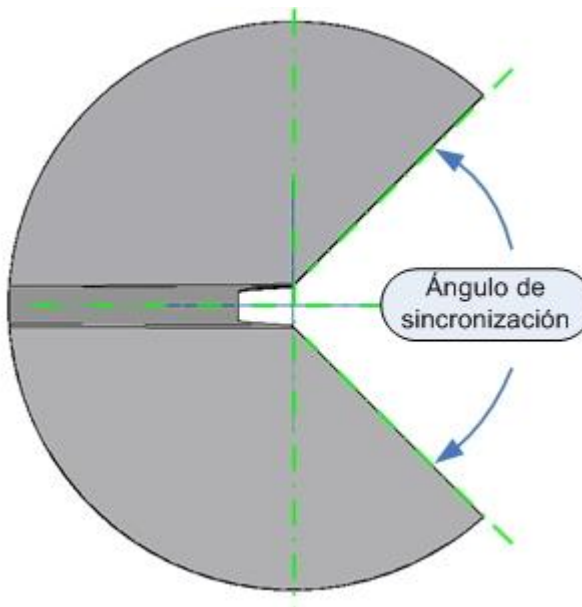
El tamaño de los puertos de entrada y de salida queda definido por la inclinación característica de los mismos, para definir la configuración de estos puertos se necesitan parámetros como: el ángulo de inclinación de la línea por donde se debe realizar el doblado (figura 10A), medido a partir de

un plano transversal al eje; y el ángulo de doblado, el cual se mide con respecto a un plano vertical que pasa por la línea de doblado anteriormente definida (figura 10B).

**Figura 10** Ángulos de inclinación de los planos transversales de entrada y salida



**Figura 11** Ángulo de sincronización



Estos planos poseen, adicionalmente, un ángulo que es el encargado de sincronizar la apertura y cierre de los puertos, dicho ángulo es la separación

existente entre dos planos transversales de entrada y de salida de una misma lámina (figura 11); en síntesis éste ángulo es la suma de dos ángulos, uno medido desde un plano de referencia horizontal que pasa por el centro de la lámina hasta el plano transversal de entrada y el otro dirigido hacia el plano transversal de salida, comúnmente estos dos ángulos son iguales y suman  $90^\circ$ , pero son modificables dependiendo del diseño. Al aumentar el valor de éste ángulo disminuye el tiempo transcurrido entre el cierre y la apertura de una cámara de medición.

### **1.2.2 Fluido objeto de medición**

Las cámaras húmedas pueden usarse en la medición de volúmenes y caudales de diferentes gases, algunos de los gases empleados son: aire, gases combustibles, gases producto de la combustión, gases corrosivos y tóxicos, hidrocarburos gaseosos,  $N_2$ , He,  $CO_2$ , Ar,  $O_2$ , entre otros.

Algunas restricciones o recomendaciones que se realizan con respecto al fluido de trabajo son: desde el punto de vista del mantenimiento de estos instrumentos se puede encontrar una única consecuencia de la utilización de gases sucios en la medición, y es la necesidad de realizar una limpieza en el interior en periodos de tiempo más cortos que si se utilizara gas limpio. Otra recomendación es para los casos en los cuales es utilizado como fluido de trabajo oxígeno y se requiere utilizar el medidor con otro gas, es necesario realizar una purga del medidor con un gas inerte, para de esta manera evitar la mezcla de gases con el oxígeno, lo cual puede causar explosión.

### **1.2.3 Líquido sellante**

El medidor de gas de cámara húmeda debe llenarse con un líquido sellante.

#### **ü Funciones del líquido sellante:**

La primera función del líquido es realizar el sello de la “cámara de medición activa”, además, es quien sincroniza la apertura y cierre de los puertos de

entrada y salida de gas en el tambor. Si el nivel de líquido es muy bajo no permite que las cámaras de medición estén selladas, pudiendo el gas pasar libremente a través del instrumento sin ser cuantificado.

El nivel de líquido sellante dentro de la cámara de medición define el volumen de la misma. Esta segunda función es la base para el ajuste de la exactitud de medición de gas en estos medidores. Por tal motivo, la exactitud de la medición es directamente dependiente del nivel de líquido sellante y en consecuencia, una incorrecta fijación del nivel en el momento de su instalación o una variación durante su operación (por ejemplo por evaporación) ocasionará mediciones incorrectas.

#### ü Influencia mutua entre el líquido sellante y el gas a medir

Independientemente del líquido sellante escogido, existe una interacción entre el gas y el líquido, afectándose mutuamente, específicamente por los fenómenos de evaporación y disolución.

Generalmente pueden establecerse gráficos y valores límite para la influencia mutua del gas y el líquido sellante, hay que tener en cuenta que estos dependen en gran medida del gas particular que se está midiendo y de su estado. Por ejemplo, cuando el agua es usada como líquido sellante, un gas seco y caliente absorbe significativamente más partículas de agua evaporada que una mezcla de gas frío.

La solubilidad de los gases en líquidos también varía significativamente: por ejemplo, para un líquido sellante comercial conocido como aceite blanco "Austin B" presenta los siguientes valores de solubilidad en porcentaje de volumen a una temperatura de 20° C: nitrógeno 6%, aire de 7 a 8%, oxígeno 12%, dióxido de carbono 90%.

#### ü Selección de líquido sellante

El criterio para escoger un líquido sellante se basa en la influencia mutua entre el líquido sellante y la corriente de gas, buscando siempre que sea lo

más pequeña posible, o que los efectos puedan ser ignorados. En muchos casos, el agua puede ser usada como el líquido sellante.

Cuando no es adecuado el uso de agua como líquido sellante, se debe recurrir a otros fluidos (aceites de baja viscosidad, para facilitar la rotación del tambor) que cumplan con las características de absorción y disolución necesarias para la corriente de flujo utilizada. Entre estos aceites se encuentran los sintéticos que son inertes ante los gases más agresivos, y los de base parafínica como el Shell Tellus 10.

#### **1.2.4 Indicador de nivel**

Como ya se mencionó anteriormente el nivel de líquido es un factor crítico para el correcto funcionamiento de estos medidores, este nivel es mantenido en el valor correcto por medio de un indicador de nivel ubicado usualmente al frente o a un costado de la cámara húmeda, el cual sirve de referencia para este propósito.

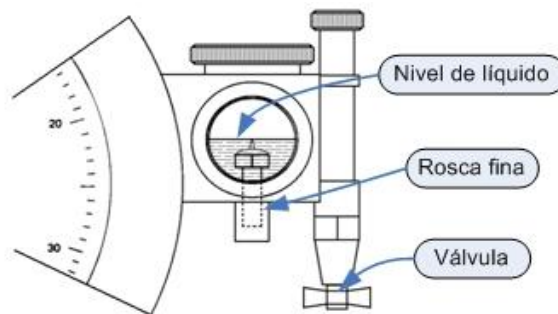
A continuación se presenta el funcionamiento de tres modelos de indicadores de nivel muy comunes.

- ü Indicador de nivel de agujero: utiliza un disco con un agujero excéntrico el cual es encargado de fijar el límite máximo para el nivel de líquido, debido al rebosamiento (figura 12). El disco permite ser girado mediante una rosca exterior, ajustando de esta manera la elevación del agujero y por consiguiente la referencia del nivel de líquido.
- ü Indicador de nivel de aguja: es el indicador de nivel más utilizado en las cámaras húmedas comercializadas actualmente, utiliza una aguja provista de rosca fina (para un pequeño desplazamiento por giro) que permite controlar el posicionamiento vertical de esta, con el objetivo de ubicar como punto de referencia para el nivel de líquido su punta (figura 13). La correcta ubicación del nivel de líquido se da cuando la punta de la aguja apenas toca por la parte inferior el nivel de líquido.

**Figura 12 Indicador de nivel con agujero excéntrico**



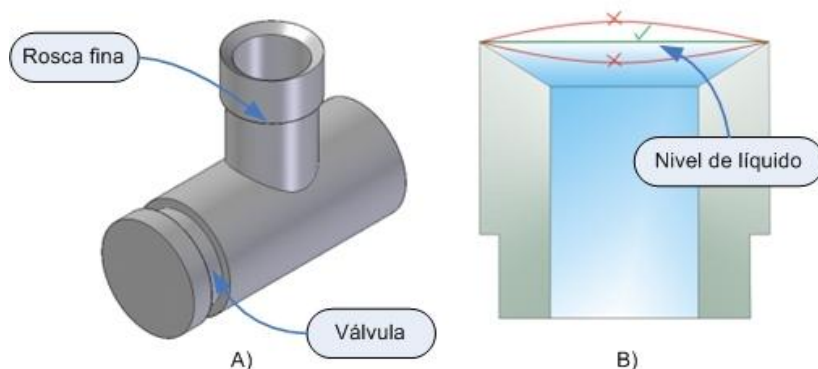
**Figura 13 Indicador de nivel de aguja**



- ü Indicador de nivel de vasos comunicantes: Utiliza un tubo conectado a la cámara de almacenamiento de líquido, este tubo posee una rosca que le permite desplazarse verticalmente modificando su altura definiendo el límite de nivel de líquido con respecto a su rebose (figura 14A), en la figura 14B se observa la manera correcta e incorrecta de la ubicación del nivel de líquido en el tubo durante la fijación de este, teniendo en cuenta la forma del menisco.

Cuando se utiliza como líquido sellante agua, es común la utilización de un agente anti detergente en ella, para que reduzca la tensión superficial y permita realizar mediciones de nivel de líquido más precisas.

**Figura 14 Indicador de nivel por vasos comunicantes**



### 1.2.5 Instrumentación secundaria

Es el conjunto de instrumentos que permite medir las condiciones de funcionamiento del medidor, como: presión del gas medido, temperatura del gas y líquido sellante, registro de la cantidad de giros del tambor; con estos valores se calcula el caudal o volumen que ha pasado por el tambor, y posteriormente realizar la corrección del volumen medido de condiciones de funcionamiento a condiciones estándar o normales (Ecuación A.11<sup>4</sup>).

Las características de los elementos utilizados para la medición de las condiciones de funcionamiento de las cámaras húmedas pueden ser muy variadas, y dependen de factores como: la aplicación del medidor y la exactitud de los instrumentos.

- ü Aplicación del medidor. Si el medidor va a ser utilizado en un proceso automatizado, o si la salida del medidor (volumen medido) se utilizará de forma digital, se emplea como instrumentación secundaria sensores cuya señal de salida sea de naturaleza eléctrica, caso muy diferente si la salida del medidor es analógica.

---

<sup>4</sup>Apéndice A

- ü Exactitud. La exactitud de medición de los instrumentos es otro factor con el cual se pueden diferenciar las características de la instrumentación secundaria, guardando una relación muy estrecha con el costo.

**Figura 15 Termómetro y manómetro**



**Figura 16 Indicador de volumen**



Como ya se mencionó, las condiciones de funcionamiento que se deben medir en una cámara húmeda son: temperatura, presión y giro del tambor (contador), para lo cual se utilizan instrumentos como termómetros y manómetros de columna (figura 15), en la figura 16 se observa la carátula de una cámara húmeda en la cual se encuentra el indicador de volumen del sistema de registro. Es de resaltar que los

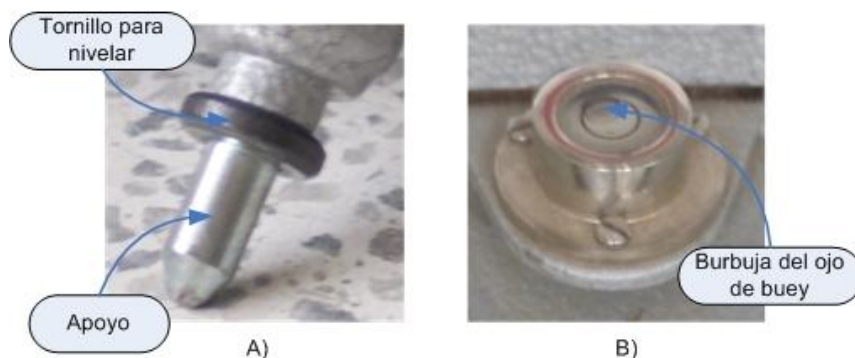
instrumentos mostrados permiten realizar lecturas en sus escalas correspondientes, pero no poseen salidas eléctricas de su señal.

### 1.2.6 Accesorios

Como accesorios en una cámara húmeda se cuentan aquellos que no intervienen directamente en la medición de gas, pero que son necesarios para lograr un buen funcionamiento, y además, permiten la puesta a punto del medidor. Entre ellos están: el conjunto nivelador, las válvulas de drenaje, las conexiones, los apoyos y sellos.

- ü Conjunto nivelador: El conjunto nivelador esta compuesto por tornillos (figura 17A), que cumplen doble función, primero variar la inclinación longitudinal o transversal del tambor, y segundo soportar el peso total del medidor, pueden usarse dos, tres o cuatro de estos tornillos, dependiendo principalmente del tamaño de la cámara, si es grande requiere más puntos de apoyo para distribuir su peso; el otro elemento que conforma este conjunto es un instrumento para la comprobación del nivel, conocido como “ojo de buey” (figura 17B), el punto de referencia para la nivelación representa el ajuste de la instalación al momento de realizar la calibración inicial de la cámara, no siendo un reflejo de la nivelación del eje respecto a la superficie sobre la que se instala el medidor.

**Figura 17 Conjunto nivelador**



Algunas cámaras húmedas de gran tamaño poseen como elemento adicional de apoyo unas ruedas que permiten la movilización de la cámara cuando ésta se encuentra llena de líquido.

- ü Válvulas de drenaje: en una cámara húmeda existen dos tipos de válvulas de drenaje: las de tipo grueso y las de tipo fino, las de tipo grueso se usan para retirar el líquido del interior del tambor de almacenamiento, cuando este va a ser movilizado, o cuando se requiere remplazar el líquido sellante, en muchos casos es común la utilización de un tapón en la parte mas baja del cuerpo para remplazar la llave de drenaje; las segundas, se usan en el proceso de ajuste del nivel líquido, para purgar pequeñas cantidades de éste del interior del tambor, y así lograr ubicar en la posición mas exacta posible el nivel de líquido; dependiendo del modelo de cámara húmeda estas válvulas cambian su configuración, tanto en diseño como en material, (figura 18).

**Figura 18 Válvula de drenaje**



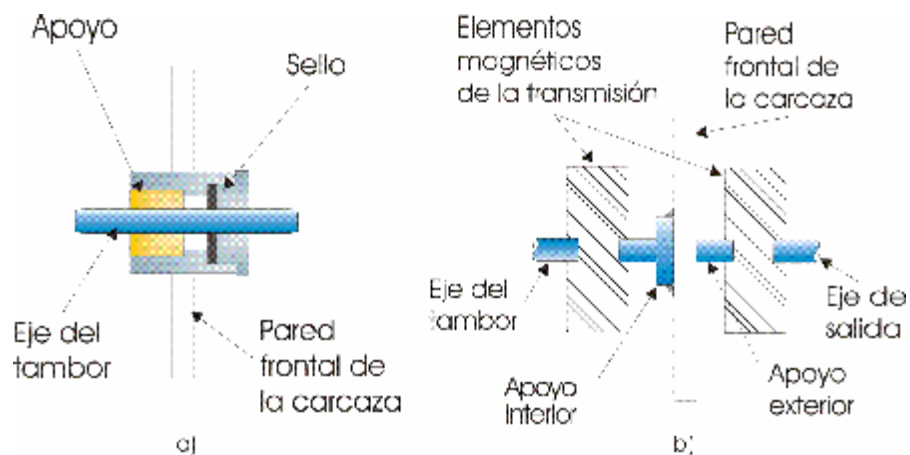
- ü Conexiones: las conexiones abarcan todos aquellos accesorios que sirven para unir la instrumentación secundaria y las válvulas de drenaje al cuerpo del medidor, también permiten conectar y desconectar fácilmente los ductos de entrada y salida de gas (figura 19), el tamaño y forma de estas depende de los instrumentos y del caudal de gas que circulará, la configuración de conexiones tanto de entrada de gas como de salida más utilizadas son las de tipo junta universal, permitiendo fácil conexión y evitando inducir esfuerzos al cuerpo durante el apriete.

**Figura 19 Conexión universal**



ü Apoyos y sellos: la selección adecuada del sello es muy importante para el funcionamiento de una cámara húmeda. Todo sello ofrece fricción al eje de rotación restringiendo su libre movimiento; por tal motivo, en algunos modelos es eliminado el sello mediante la utilización de acoples magnéticos, que permiten transmitir el movimiento del tambor al instrumento contador sin necesidad de utilizar un eje pasante; en la figura 20 se observan los dos tipos de conjuntos mas comunes para sello y apoyo, el primero posee eje pasante y sello, y en el segundo únicamente el apoyo pero con acople magnético.

**Figura 20 Apoyo y sello**



### **1.2.7 Material de construcción**

El material de construcción es definido por las características de uso del medidor, ya que si el gas empleado en la medición es corrosivo o tóxico el material de construcción debe tener propiedades especiales para soportar estas condiciones; igualmente, cuando se opera con gas a alta presión, el material y los procesos de manufactura empleados en su construcción deben ser los adecuados para estas condiciones, y también deben tener accesorios especiales como válvulas de seguridad.

Los materiales empleados en la construcción del cuerpo, el tambor y los accesorios, son variados, siendo los más empleados el acero inoxidable, el PVC, el PP (polipropileno) y el bronce en el caso de los accesorios.

## **1.3 FUNCIONAMIENTO**

A continuación se explicará el funcionamiento de las cámaras húmedas tipo axial que funcionan bajo el principio normal, estas presentan una mayor capacidad de caudal debido a la configuración de los puertos de descarga y de llenado; en este modelo de tambor se enfocará el presente libro ya que fue el escogido para su construcción.

### **1.3.1 Llenado y vaciado de las cámaras de medición**

Este proceso acontece durante la rotación del tambor, la cual es producida por la diferencia de presión existente entre una cámara en proceso de llenado y una cámara en proceso de vaciado, y se inicia en el momento que el borde de una lamina sobresale del nivel de líquido.

Considerando que rota en el sentido de las manecillas del reloj (figura 21), una cámara pasa por tres etapas: etapa de llenado, etapa de transición (cámara activa) y etapa de vaciado. El proceso de llenado de una cámara se lleva a cabo cuando el tambor se encuentra en una posición tal que el puerto de entrada de la cámara esté

por encima del nivel, y obviamente, el puerto de salida de la cámara se encuentre por debajo del nivel. Durante esta etapa, el volumen de la cámara va aumentando, puesto que las láminas van emergiendo del nivel; este volumen en aumento es ocupado por el gas que esta ingresando al medidor. Esta situación es ilustrada por la cámara formada por las láminas de color azul y rojo.

**Figura 21 Etapas de una cámara de medición**



En la etapa de transición representada por la cámara comprendida entre los alabes rojo y verde, la cámara ha alcanzado su volumen máximo y se encuentra completamente llena de gas. Durante esta etapa ocurre la transición entre cerrar el puerto de entrada y abrir el puerto de salida. Aquí no existe flujo de gas hacia o desde la cámara y por lo tanto la masa de gas permanece constante. La etapa de interferencia comienza cuando el puerto de entrada acaba de cerrar, y finaliza cuando el puerto de salida empieza a abrir. Durante este recorrido se representa un pequeño aumento de la presión dentro de la cámara debido a que el volumen de la cámara disminuye ligeramente hasta que el tambor se encuentra en la mitad del recorrido de la etapa de interferencia; luego el volumen vuelve a crecer y la presión vuelve a su valor inicial, ya que la cámara es simétrica en la mitad de la etapa de interferencia. Esta pequeña compresión se debe a la forma irregular que presenta el

volumen confinado entre los alabes, la cubierta cilíndrica y el nivel de líquido, que para efectos de cálculo se considera despreciable. Normalmente el ángulo de rotación durante la interferencia se encuentra en el orden de los 20 grados.

En la etapa de vaciado, el puerto de salida se encuentra abierto mientras el de entrada está cerrado. Durante esta etapa, la cámara disminuye su volumen, debido a que las láminas se van sumergiendo dentro del fluido, lo que obliga a salir al gas que se encuentra dentro de ella. Los alabes verde y amarillo representan una cámara cuando se encuentra en la etapa de vaciado.

Aunque el medidor es de desplazamiento positivo, el flujo es pulsante pero no interrumpido, ya que en todo momento se encuentra una cámara de medición en proceso de vaciado y otra en proceso de llenado.

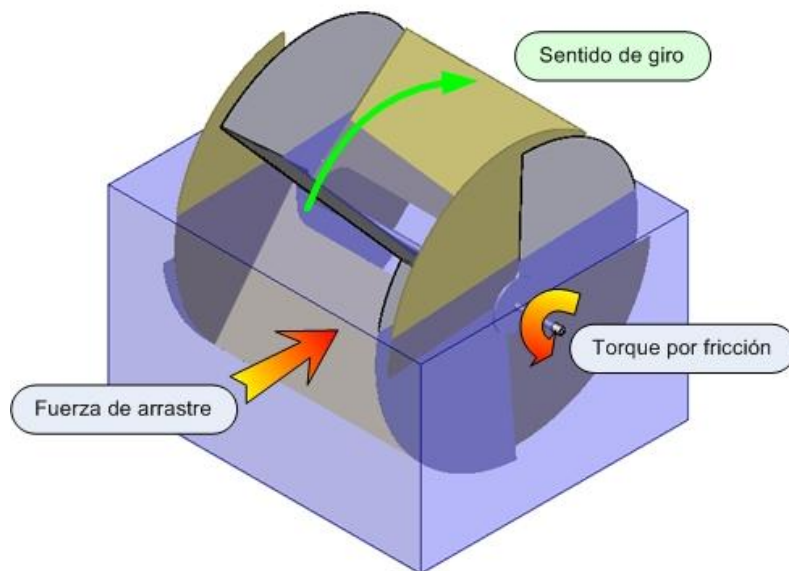
### **1.3.2 Caída de presión**

El diseño básico del medidor consiste en un tambor que se encuentra parcialmente sumergido en el líquido sellante, su rotación es una indicación del volumen que acaba de pasar a través del medidor. Para que el tambor rote entre el líquido sellante es necesario una cierta cantidad de energía que sirva para vencer la resistencia a la rotación presente en el tambor. La única fuente de energía aprovechable es la del fluido que va a ser medido, por lo cual el fluido cuando abandona el medidor lleva menor energía que cuando entro al mismo. Como el proceso de medición normalmente se lleva a cabo a temperatura constante tanto del gas a medir como del medidor mismo, la diferencia de energía del fluido a medir se manifiesta como una diferencia de presión entre la entrada y la salida del medidor.

Debido a que el fluido a medir es un fluido compresible, cualquier cambio de presión del mismo se manifiesta como un cambio en su densidad. Como este tipo de medidor contabiliza el volumen que pasa a través de él, es conveniente que esta diferencia de presión permanezca lo más baja posible con el fin de mantener la exactitud del aparato. Aunque en ingeniería es común considerar un fluido compresible como “incompresible” cuando la variación en su densidad sea menor al

5%<sup>5</sup>, en metrología, este orden de variación es muy alto considerando el grado de exactitud deseado ( $\pm 0,5\%$ ). Por esta razón es común encontrar que las caídas de presión máxima en modelos comerciales de estos medidores se encuentren en el orden de 1 a 1,5 mbar para los tamaños más grandes.

**Figura 22 Fuentes de caída de presión**



Todas las resistencias a las cuales se encuentre sometido el tambor se manifestarán como torques que se oponen a la rotación del mismo. Las fuerzas que impiden el movimiento del tambor son principalmente, la fricción presente en los apoyos del eje del tambor, el efecto de la fricción viscosa en las superficies del tambor, la fuerza de arrastre de los planos longitudinales y transversales (aunque estos en menor grado) y la fuerza de flotación (figura 22).

Existe además una caída por las contracciones y expansiones del gas medido a través de las ventanas de carga y descarga, las cuales presentan área variable de circulación debido a su rotación, este efecto no es fácilmente cuantificable por medio de expresiones matemáticas, para lo cual es útil el desarrollo de modelos físicos para experimentación.

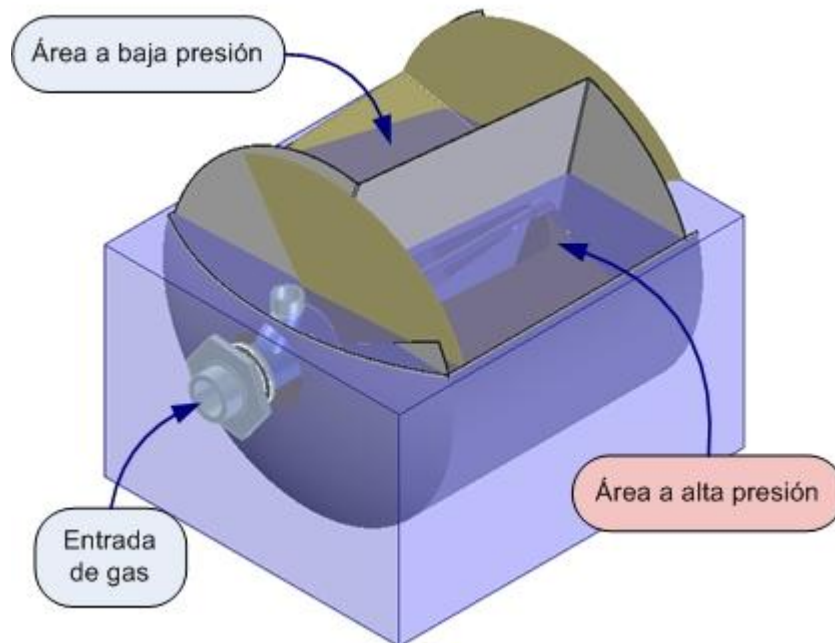
---

<sup>5</sup> Fox. Robert, pag 41

### 1.3.3 Nivel de liquido

El nivel de liquido depende de la diferencia de presión que haya entre la entrada y la salida, ya que una porción del nivel de liquido se encuentra a una presión más alta que la otra, por lo tanto el nivel de fluido sometido a alta presión baja y el nivel a baja presión sube para compensar dicha diferencia de presión. Esta variación de nivel hace que a mayor caída de presión haya mayor variación de la capacidad del tambor del medidor.

**Figura 23 Áreas a alta y baja presión**

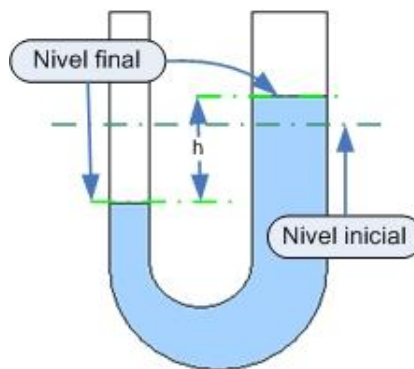


Por otro lado, existe otra fuente de variación del nivel debida ya no a la diferencia de presión sino al giro del tambor. Para explicar dicho fenómeno, considérese que para alguna condición de operación del medidor, la diferencia de presión entre la entrada y la salida permanece constante en un valor, de tal forma que existe una cierta cantidad de área del nivel expuesta a “alta presión” y el resto de área a baja presión (figura 23). El diseño constructivo del medidor hace que dichas áreas no sean constantes con la rotación del tambor, ya que al aumentar el volumen de una

cámara o bien al girar el rotor, el área del nivel que queda dentro de esta, que está a alta presión, también aumente. Por esta razón, el medidor va a presentar fluctuación del nivel con la rotación del medidor sujeta a la variación de dichas áreas.

Si se observa detenidamente, las cámaras que confinan gas a alta presión y las que confinan gas a baja presión no presentan ninguna comunicación presostática a través de sus paredes delimitantes, pues su naturaleza rígida no lo permite; sin embargo, a través de las áreas del nivel presentes dentro de cada una se establece una comunicación presostática entre las cámaras obligando al establecimiento de un equilibrio hidrostático. Este aspecto permite hacer una semejanza con el comportamiento hidrostático de los vasos comunicantes. Teniendo en cuenta ésta apreciación, es posible elaborar un análisis que posibilite la comprensión de éste factor.

**Figura 24 Variación de nivel**



La diferencia de áreas entre  $A_1$  y  $A_2$  de la figura 24, ocasiona que la columna de presión  $h$  desplace las columnas de líquido de forma asimétrica respecto al nivel inicial. Esta asimetría se hace mas notoria mientras más grande sea la diferencia entre las dos áreas.

Si se considera entonces una presión  $h$  constante y las áreas  $A_1$  y  $A_2$  variables, el nivel de las dos columnas variará de tal manera que la diferencia de presión  $h$

permanezca constante, es decir, la variación de las áreas con el tiempo, provocará que varíe la asimetría de las columnas respecto al nivel inicial.

Entonces el valor de nivel obtenido en el dimensionamiento del tambor es el nivel real que tiene el líquido en el lado de alta presión (entrada de gas), justo cuando el puerto de entrada de una cámara acaba de cerrar, y a un área dada del nivel a alta presión y otra a baja.

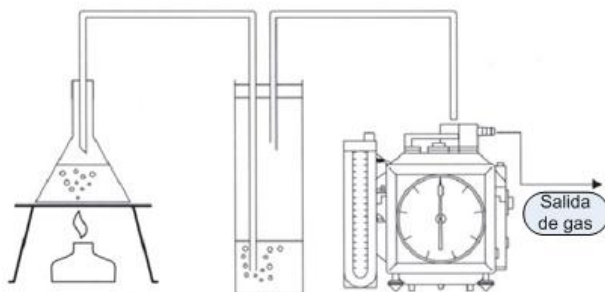
Por esta razón, la calibración adecuada del nivel de líquido constituye la calibración del equipo, ya que permite graduar la capacidad nominal por revolución del tambor; la conservación del nivel en el lugar recomendado constituye la exactitud del equipo.

## **1.4 APLICACIÓN DE LAS CÁMARAS HÚMEDAS**

### **1.4.1 Medidor**

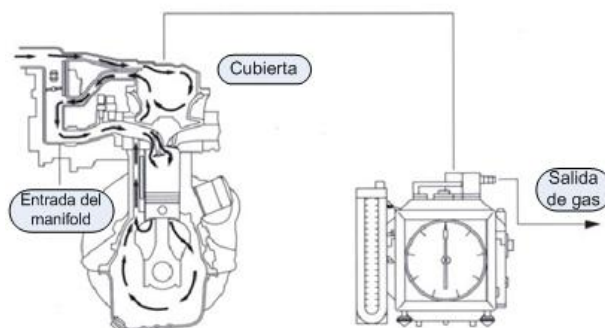
Entre las aplicaciones más comunes de las cámaras húmedas como medidor están: la medición de gases producto de reacciones químicas llevadas a cabo en laboratorios, especialmente cuando el caudal al que se generan los mismos es muy bajo (figura 25).

**Figura 25 Aplicación en laboratorios**



Por otro lado pueden ser usados para medir la cantidad de gases producto de la combustión en motores de combustión interna, debido a que en algunos casos estos flujos pueden llegar a ser imperceptibles (figura 26)

**Figura 26 Aplicación en motores**



en otros sectores de la industria, los medidores de cámara húmeda son usados en pruebas de desempeño de aplicaciones de gas, como la determinación de los caudales nominales de gases combustibles que son quemados en artefactos domésticos, como cocinas a gas, entre otros (figura 27).

#### **1.4.2 Patrón Secundario<sup>6</sup>**

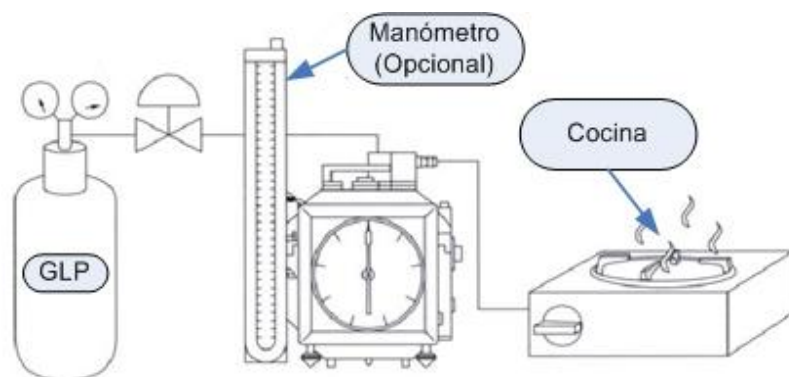
Los medidores de cámara húmeda son instrumentos de medición de volumen de gas que alcanzan normalmente una incertidumbre inferior a 0,5 %, razón por la cual son consideradas como patrones de tipo secundario.

Este método consiste en colocar un medidor de gas a ser ensayado, en serie con un medidor patrón, en este caso, un medidor de cámara húmeda con el fin de comparar el volumen registrado por el medidor en prueba con el volumen medido por el patrón (figura 28).

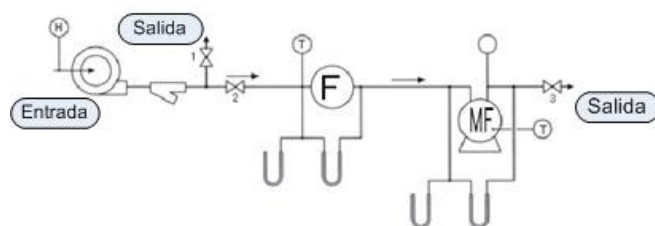
---

<sup>6</sup> Para mayor información sobre patrones de medición ver Apéndice C.

**Figura 27 Aplicación en cocinas**



**Figura 28 Aplicación como patrón**



**Símbolos**

|  |                   |  |            |  |            |
|--|-------------------|--|------------|--|------------|
|  | Cámara húmeda     |  | Ventilador |  | Termómetro |
|  | Medidor en prueba |  | Manómetro  |  | Higrómetro |
|  | Filtro            |  | Válvula    |  |            |

## **2. VARIABLES Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO EN LAS CÁMARAS HÚMEDAS**

El diseño de las cámaras húmedas consiste en el cálculo y selección de tamaños, formas y materiales, cuyo objetivo sea la elaboración de un instrumento de medición de gas con las mejores características o cualidades metrológicas posibles, ya que como se mencionó en el capítulo anterior estos medidores son utilizados como patrones secundarios para calibrar medidores.

Hay que tener en cuenta que en estos procesos de cálculo y selección no existe norma, guía o procedimiento válido y comprobado, que sea de libre compra o consulta, de forma que proporcione un camino claro y seguro durante el proceso, por lo tanto, algunos aspectos relacionados con este proceso de diseño tienen que asumirse intuitivamente para posteriormente ser comprobados en la construcción y prueba del instrumento.

Entre los fabricantes de este tipo de medidores a nivel internacional, el conocimiento acerca del funcionamiento interno de las cámaras húmedas es muy restringido, limitándose a la información obtenida a través de catálogos, siendo esta muy escasa.

### **2.1 VARIABLES DE DISEÑO**

Las variables de diseño son todos los aspectos que directa o indirectamente ayudan a definir las cualidades metrológicas de las cámaras húmedas, y que por lo tanto cualquier error o desvío en su estimación podría producir efectos desfavorables al objetivo de diseño.

Cabe aclarar que no todas las variables que intervienen en el diseño tendrán la misma influencia, porque aunque todas participan, solo algunas lo harán en un

grado tal que signifique un real declive en las cualidades metrológicas del instrumento.

Basados en el conocimiento acerca del manejo de las cámaras húmedas adquirido a través de los años de experiencia por el personal del laboratorio del CDT de GAS, se han determinado las variables que se consideran de mayor influencia en el desempeño del medidor, y por lo tanto son claves en el proceso de diseño; en orden de importancia ellas son:

- ü Volumen interno del tambor de medición
- ü Líquido sellante, relacionando su nivel con el volumen interno del tambor
- ü Caída de presión a través del tambor de medición
- ü Caída de presión total en el medidor
- ü Instrumentación secundaria

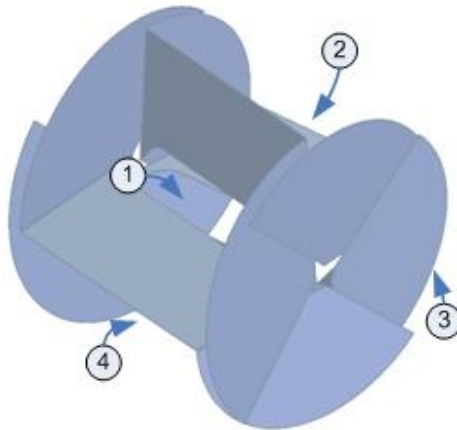
El volumen interno del tambor, el nivel de líquido, la caída de presión y los accesorios son quienes determinan la repetibilidad del instrumento, por otro lado la instrumentación secundaria y el nivel de líquido son quienes determinan la exactitud de medición del instrumento.

En este capítulo se realizará un estudio de la influencia de cada una de estas variables en el diseño, y se presentarán las herramientas desarrolladas para facilitar el proceso.

## **2.2 VOLUMEN INTERNO**

Al referirnos a volumen interno, no lo estamos haciendo en relación a un espacio el que pueda ser llenado totalmente en un mismo instante, dando la capacidad del medidor; sino que este volumen interno es la suma de cuatro volúmenes idénticos (figura 29), esto se debe a que el tambor está dividido en cuatro cámaras por cuatro láminas, y que además, su principio de funcionamiento requiere que el tambor rote sobre su eje estando parcialmente sumergido en el líquido sellante.

**Figura 29 Cámaras de medición**



El volumen de cada cámara está delimitado por dos láminas consecutivas, por la cubierta exterior del tambor y por el nivel de líquido; además es definido en el momento en que el puerto de entrada es cerrado por el líquido sellante. Después de cerrado el puerto de entrada, el volumen confinado no permanece constante durante la rotación del tambor, el volumen disminuye desde que cierra hasta alcanzar un punto mínimo, este punto corresponde al momento en que la línea que señala la simetría de cada cámara se alinea con el eje vertical que pasa por el centro del tambor (figura 30), luego de alcanzar su valor mínimo el volumen comienza a aumentar hasta que el puerto de salida emerge del nivel de líquido, las dos etapas por las que pasa el volumen de una cámara pueden ser iguales en su recorrido, esto depende de si los ángulos de sincronización son iguales.

**Figura 30 Línea de simetría**



El cierre de las cámaras de medición por parte del líquido sellante no permite el ingreso de más gas a estas, y este volumen confinado solo abandona la cámara de medición después de girar unos cuantos grados con el tambor, por lo tanto para efectos de cálculo, el volumen que se tiene en cuenta como medida de una de las cuatro cámaras, es aquel que se encuentra confinado en el momento de cierre.

El volumen de gas dentro de una cámara depende de las características geométricas del tambor de medición, características tales como: el diámetro, la longitud, la inclinación de los puertos de entrada y de salida, la inclinación del plano longitudinal y la posición del nivel de líquido. Por ser un número considerable de variables las posibilidades de combinación para determinar un volumen específico son muchas, por lo tanto, lograr una combinación de estas que cumpla con los requerimientos de funcionamiento esperados para una cámara húmeda demanda un criterio de diseño que satisfaga estas necesidades.

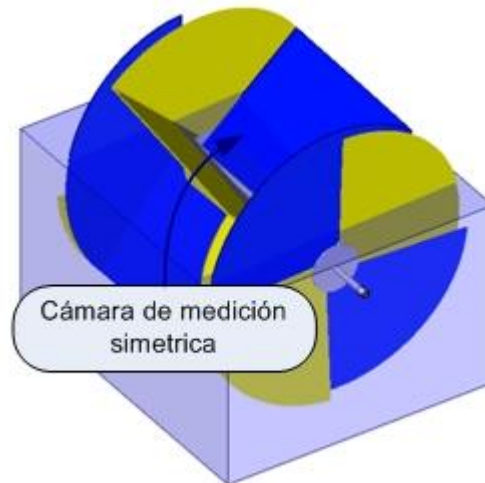
Determinar el volumen interno de un tambor de cámara húmeda requiere de un proceso matemático de integración, el cual por su complejidad dificultaría el diseño; un método alternativo para la determinación del volumen es el modelado en tres dimensiones, lo cual se logra mediante una herramienta CAD, que presente ciertas características de flexibilidad necesarias para variar parámetros dimensionales que conforman el volumen y de esta manera verificar su influencia dentro del diseño del tambor.

### **2.2.1 Modelado del volumen**

La herramienta CAD utilizada en este proceso es la aplicación específica para piezas de Solid Edge Origin V12, ya que este software posee dentro de sus funciones la característica de parametrización de variables, que permite un sencillo y rápido cambio en las características geométricas del modelo, además dentro de sus herramientas permite conocer propiedades físicas del modelo como masa, volumen, área superficial, inercia entre otras.

Como se mencionó anteriormente, el volumen total de una cámara húmeda se divide en cuatro volúmenes iguales, en la figura 31 se muestra una de estas cámaras, la cual se encuentra simétrica, es decir que la línea de simetría de la cámara coincide con la línea vertical, condición para la cual se facilita el proceso de modelado; la condición de simetría solo es una condición ideal, pero esta no sucede realmente en los tambores de medición, razón por la cual debe considerarse una asimetría para realizar una corrección en el cálculo del volumen, corrigiendo el modelo, más adelante en el capítulo se realizará la deducción con la cual se corrige este volumen.

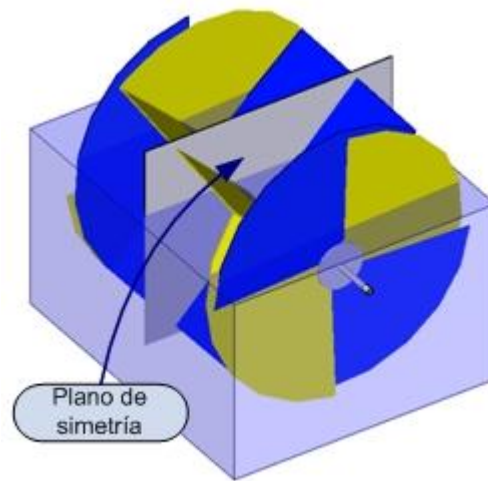
**Figura 31 Cámara de medición simétrica**



En la figura también se observan los planos longitudinales y transversales de dos láminas consecutivas (color azul y amarillo), que junto con el sólido azul transparente (que representa el nivel de líquido sellante) forman la cámara de medición correspondiente a un cuarto del volumen por revolución medido por el tambor. El modelado de este cuarto del volumen se basa en la creación de un cilindro al cual se le retiran los volúmenes que corresponden al líquido sellante y a la parte exterior de las láminas azul y amarilla, este proceso de sustracción de volúmenes es complejo aun en Solid Edge, dada la geometría (ángulos y distancias) que se debe manejar.

Con el fin de disminuir la complejidad del modelado se crea un plano imaginario, este plano imaginario es transversal al eje del tambor y se ubica en la mitad de este (figura 32), con el fin de crear dos volúmenes idénticos uno a cada lado de este plano, disminuyendo la cantidad de operaciones a realizar durante el modelado.

**Figura 32 Plano de simetría**

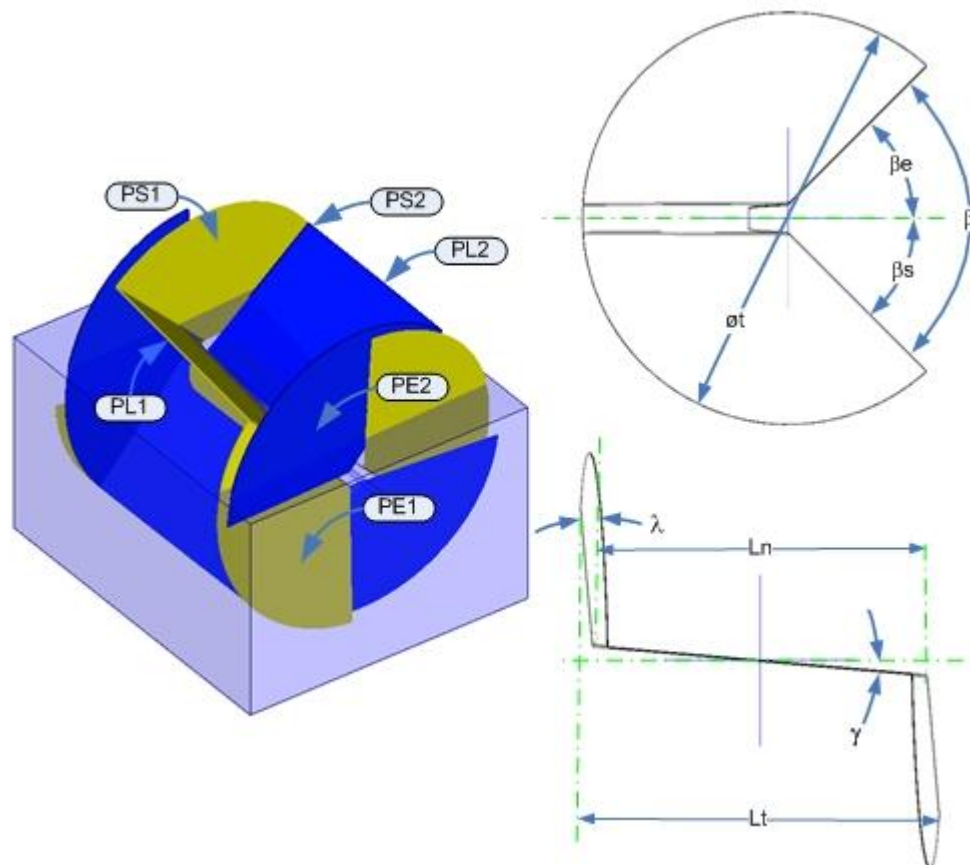


Con el propósito de facilitar el reconocimiento de cada una de las variables geométricas y elementos del tambor, es importante definir las abreviaturas que van a ser utilizadas en el desarrollo de el modelado del volumen y posteriormente en otras secciones de este libro, la figura 33 se presenta como apoyo para el entendimiento de esta nomenclatura.

- ü PL1: plano longitudinal de la lámina 1
- ü PE1 : plano del puerto de entrada de la lámina 1
- ü PS1 : plano del puerto de salida de la lámina 1
- ü PL2: plano longitudinal de la lámina 2
- ü PE2: plano del puerto de entrada de la lámina 2
- ü PS2: plano del puerto de salida de la lámina 2
- ü PS: plano imaginario de simetría
- ü  $\gamma$ : ángulo de inclinación del plano longitudinal

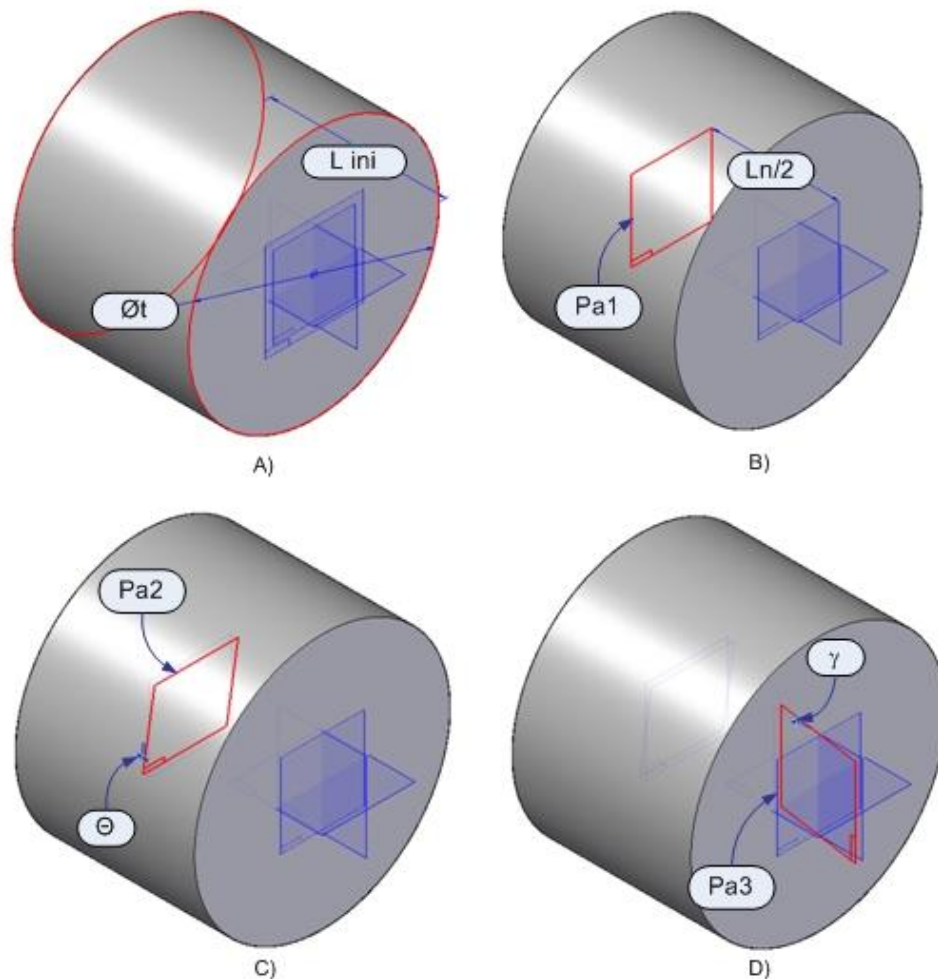
- ü  $\theta$ : ángulo de inclinación de la línea por donde se realiza el doblado
- ü  $\lambda$ : ángulo de doblado
- ü  $\beta_e$ : ángulo de sincronización correspondiente al puerto de entrada
- ü  $\beta_s$ : ángulo de sincronización correspondiente al puerto de salida
- ü  $\beta$ : ángulo de separación entre los puertos de entrada y salida
- ü  $\phi_t$ : diámetro del tambor
- ü  $L_t$ : longitud total de las láminas del tambor
- ü  $L_n$ : longitud nominal del tambor

**Figura 33 Nomenclatura**



El modelado del volumen interno se realiza bajo el entorno pieza de Solid Edge, comenzando con la protrusión<sup>7</sup> de un cilindro de diámetro  $\phi t$  y longitud equivalente a 1.3 veces el diámetro (figura 34A).

**Figura 34 planos de referencia para el vaciado interno**



La primer sustracción de volumen que se le realiza al cilindro creado anteriormente, es la correspondiente al exterior de los planos PL2 y PE2, los cuales están caracterizados por los ángulos  $\gamma$  para PL2 y para PE2 los ángulos  $\theta$  y  $\lambda$ ; para realizar estas operaciones es necesario la creación de planos auxiliares a partir de los planos de referencia xy, xz y yz; esta primer sustracción comienza con la

<sup>7</sup> Protrusión, término empleado por Solid Edge para denominar las operaciones de generación de volumen a partir de un perfil de geometría base.

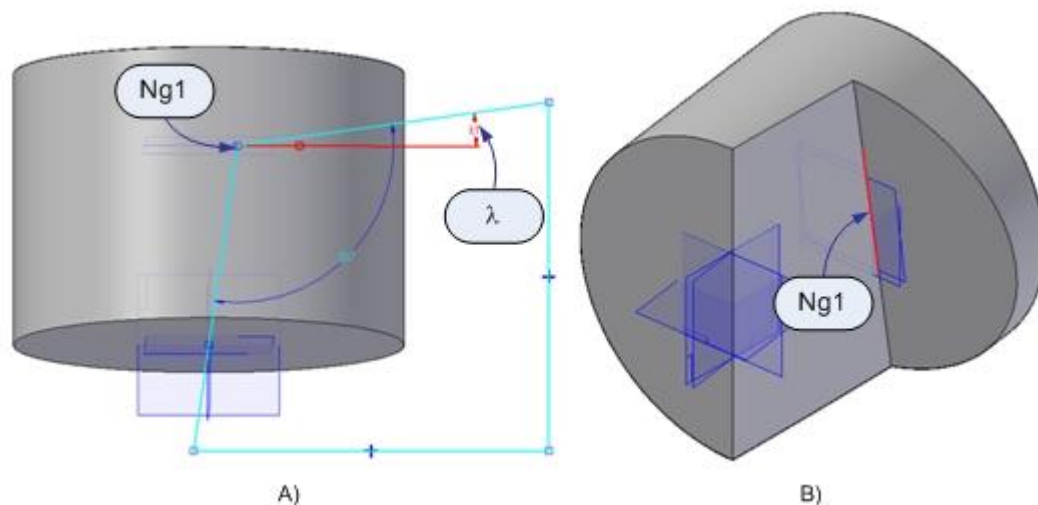
creación de un plano auxiliar (Pa1), ubicado a una distancia equivalente a la mitad de  $L_n$  del plano de referencia yz (figura 34B).

A partir del plano Pa1, visto como línea en la cara frontal del sólido base, se crea otro plano auxiliar (Pa2), girándolo un ángulo  $\theta$  en sentido horario (figura 34C).

Se crea otro plano auxiliar (Pa3) a partir del plano xz, apareciendo como línea en la vista superior del sólido, el plano Pa2 se gira el ángulo  $\gamma$  en sentido horario (figura 34D).

La intersección de los dos planos auxiliares Pa2 y Pa3 genera una línea, que corresponde a la línea por donde se realiza el doblado de la lámina 2, ya que estos dos planos incluyen en su construcción los ángulos  $\gamma$  y  $\theta$ ; por lo tanto el siguiente paso es la creación de esta línea auxiliar para el vaciado (Ng1).

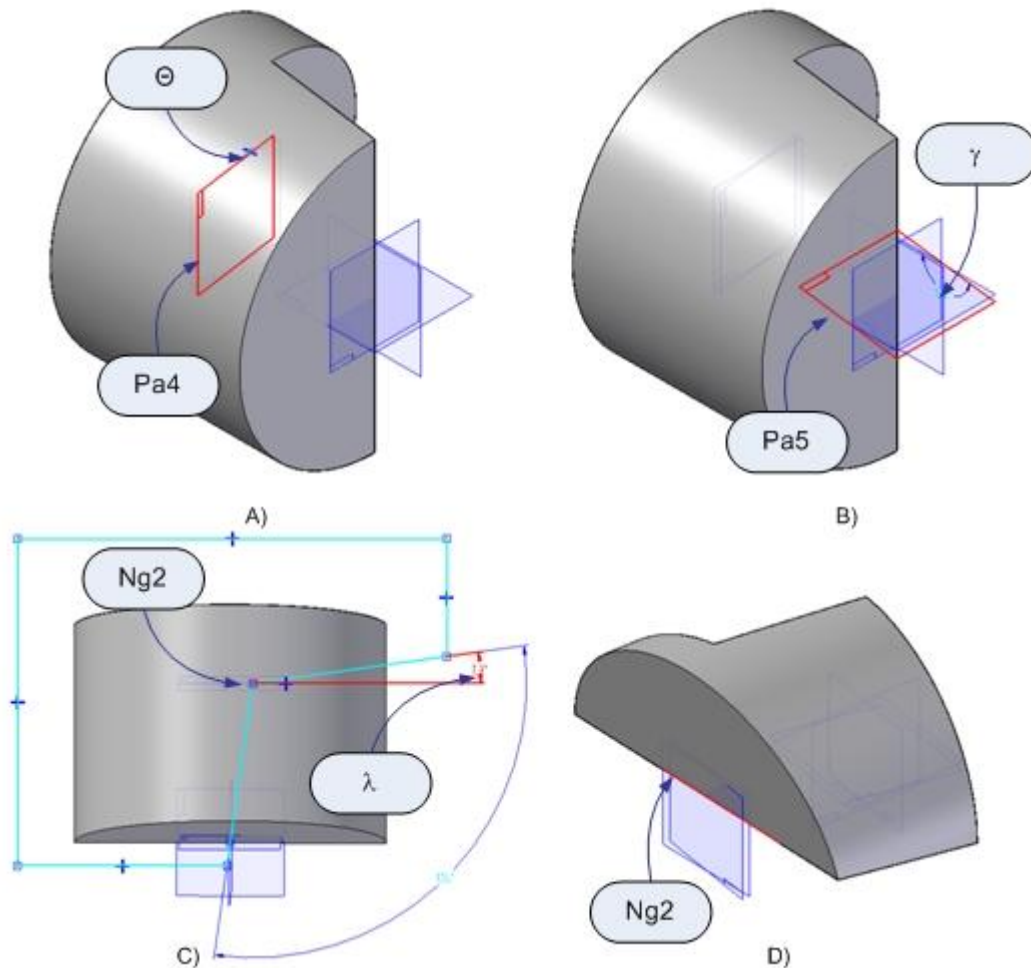
**Figura 35 Vaciado interno**



Para realizar la operación de vaciado se necesita un plano sobre el cual se dibuja perfil para el vaciado, este se logra cuando la línea Ng1 creada mediante la intersección de los planos auxiliares es vista como punto, sobre este plano se realiza el dibujo del perfil (figura 35A), en la figura 35A se observa acotado el valor correspondiente al ángulo  $\lambda$ , que corresponde al doblado de las láminas. De esta

manera se completa la primera operación se sustracción al volumen total del cilindro creado, cuya apariencia al término de este proceso es la mostrada en la (figura 35B).

**Figura 36 Vaciado externo**



La segunda sustracción de volumen que se realiza, es la correspondiente al exterior de los planos PL1 y PE1, los cuales al igual que en la primera sustracción están caracterizados por los ángulos  $\gamma$  para PL1 y para PE1 los ángulos  $\theta$  y  $\lambda$ ; para el primer plano de referencia creado para este vaciado se utiliza como base el plano auxiliar 1 (Pa1) creado anteriormente, el cual está ubicado sobre una distancia que corresponde a la mitad de la  $L_n$  del tambor, el plano auxiliar (Pa4) se crea girando el plano Pa1 en sentido anti horario un ángulo  $\Theta$  (figura 36A).

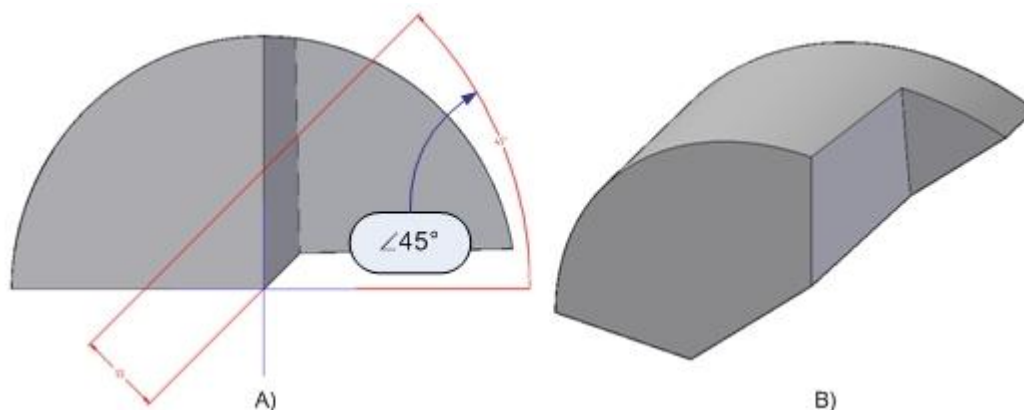
Sobre la vista frontal se crea un quinto plano (Pa5), el cual va rotado a partir del plano xy en sentido horario un ángulo  $\gamma$  (figura 36B).

Al igual que en la primera sustracción la intersección de los planos Pa4 y Pa5 generan una línea Ng2 que señala el doblez de la lámina 1, el perfil para este vaciado se realiza sobre el plano que se forma al ver la línea Ng2 como punto, la geometría de este vaciado debe llevar acotado el valor del ángulo  $\lambda$ , el cual define el valor del ángulo de doblez de la lámina 1, como se muestra en la figura 36C, de esta manera se termina la segunda operación de vaciado de la cual se obtiene la apariencia mostrada en la figura 36D.

Para la etapa final de modelado del volumen en la cual se debe especificar el nivel de líquido, se procede dibujando un perfil para el vaciado en la vista lateral derecha del sólido, sobre el plano yz (figura 37A), el vaciado del nivel de líquido corresponde a una línea recta de 45° de inclinación con respecto a la horizontal, la cual lleva una cota desde el centro del cilindro dirigida perpendicularmente a esta, con el fin de representar la altura del nivel de líquido medido desde el centro del tambor; la inclinación de 45° se debe a que inicialmente el volumen se asumió como simétrico, es decir, que la línea de simetría de la cámara de medición se alinea con el eje vertical, pero en los medidores no sucede esto realmente, por lo tanto el volumen se debe cambiar para corregir esta asimetría, como se vera más adelante.

El aspecto final del sólido después de realizados los tres vaciados es el mostrado en la figura 37B, teniendo en cuenta que este corresponde a 1/8 del volumen total por revolución de la cámara húmeda.

**Figura 37 Vaciado del nivel de líquido**



#### ü Volumen asimétrico

En la sección anterior se modeló el volumen de una cámara asumiendo que su volumen es simétrico, pero este volumen debe ser corregido para poder tener en cuenta la asimetría del volumen cuando se cierra la cámara de medición. La influencia de la asimetría en el volumen modelado anteriormente se encuentra en la variación del ángulo de inclinación de la línea que representa el nivel de líquido. En la figura 38 se observa una cámara de medición que acaba de cerrar su puerto de entrada, en ella se nota que la línea que señala la simetría de la cámara esta desplazada en sentido horario un ángulo con respecto a la vertical, este ángulo se denomina ángulo de asimetría ( $\alpha$ ), este mismo ángulo es el medido entre las líneas OA y OB.

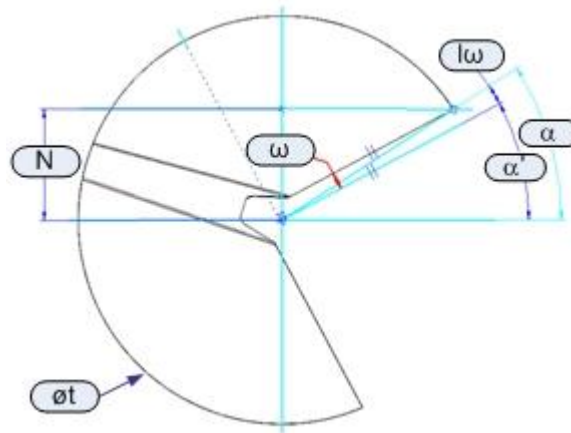
El valor de  $\alpha$  se puede dar como función de otros ángulos (Ecuación 1) los cuales pueden expresarse más fácil en función de valores geométricos conocidos.

$$\alpha = \alpha' - \omega \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $\alpha'$  representa el ángulo que forma la parte superior del puerto de entrada cuando este acaba de cerrar, expresado matemáticamente como función del nivel de líquido medido a partir del centro del tambor y del diámetro de este (Ecuación 2); el ángulo  $\omega$  se forma a causa de la inclinación del plano longitudinal, este ángulo

siempre presenta valores más pequeños que  $\alpha'$ , matemáticamente se expresa como función del diámetro del tambor y de la longitud  $l_w$  (Ecuación 3), la cual a su vez es función del ángulo de inclinación del plano longitudinal  $\gamma$  y de la longitud nominal del tambor, este valor puede ser fácilmente leído del modelo 3D de una lámina interna como se verá más adelante.

**Figura 38 Nomenclatura volumen asimétrico**



$$a' = \text{Sen}^{-1}\left(\frac{2 * N}{ft}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$w = \text{Sen}^{-1}\left(\frac{2 * l_w}{ft}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

La Ecuación 3 sirve solo cuando el ángulo  $\beta_e$  es igual a  $45^\circ$ , cuando este ángulo es diferente se requiere realizar una modificación adicional al ángulo de asimetría, para tener en cuenta el volumen que modifica, la Ecuación 4 tiene en cuenta este aspecto.

$$a = a' - w - (be - 45) \quad \text{Ecuación 4}$$

Después de determinar el valor del ángulo de asimetría, se obtienen dos ángulos ( $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ ) con los cuales se modificará la inclinación de la línea que representa el nivel de líquido, para cada uno de estos ángulos de inclinación del nivel se obtiene de Solid Edge el valor del volumen correspondiente, que sumados representan el valor total de una de las cámaras de medición, seguidamente se obtiene el volumen total por revolución de una cámara húmeda como la multiplicación de esta suma de volúmenes por 4.

De esta manera se obtiene un modelo con el cual se consigue agrupar todas las variables geométricas del tambor de medición junto con el nivel de líquido para definir su volumen por revolución.

## **2.2.2 Sensibilidad del volumen**

Durante los procesos de diseño y más aun en los procesos de construcción de cámaras húmedas, es de gran importancia conocer la influencia que sobre el volumen final del medidor tiene cada una de las variables que intervienen en su dimensionamiento.

Matemáticamente es posible realizar esta estimación mediante la evaluación de las derivadas parciales, las cuales determinan la sensibilidad de una relación funcional al presentarse cambios de cada una de las variables. Desarrollar una relación funcional entre las variables que determinan el volumen interno de una cámara húmeda es una labor muy compleja de realizar, pero existe otra opción para la evaluación de estas derivadas parciales, y es mediante la variación de un parámetro a la vez en el modelo tridimensional creado anteriormente, el método en el cual se discretizan las derivadas parciales es válido para el propósito perseguido.

La metodología se basa en la utilización de unos valores base para la geometría (diámetro, longitud, nivel de líquido,  $\gamma$ ,  $\theta$  y  $\lambda$ ), y luego mediante la parametrización hecha en el modelo variar los valores uno a la vez, dejando los demás salvos, para cada valor modificado se lee en la ventana de propiedades físicas de Solid Edge

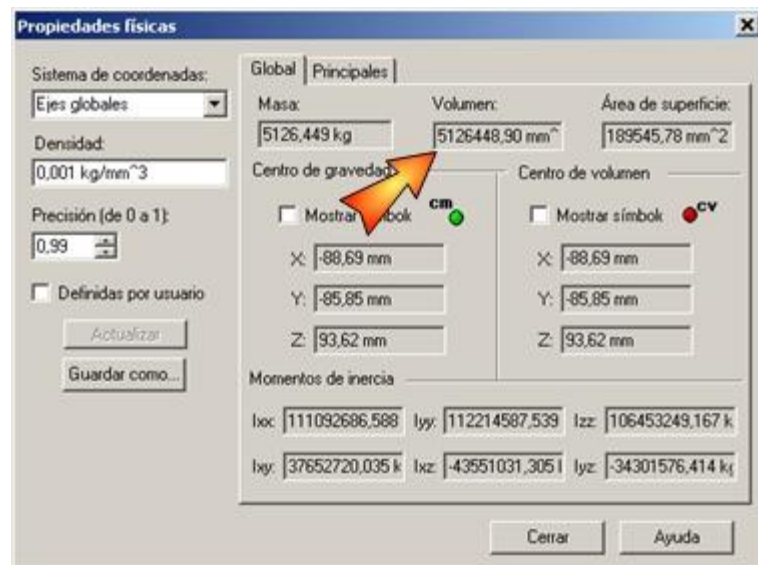
(figura 39) el valor correspondiente a volumen del sólido, consignando estos valores en tablas, que luego serán graficadas, y de esta manera poder obtener el valor aproximado de la derivada parcial.

Los valores arbitrarios de geometría base utilizados son:

|               |       |
|---------------|-------|
| ü $\phi$ :    | 400mm |
| ü l:          | 350   |
| ü Nivel:      | 50mm  |
| ü $\gamma$ :  | 2°    |
| ü $\theta$ :  | 2°    |
| ü $\lambda$ : | 2°    |

El valor de volumen correspondiente a la geometría base utilizada es de 5126448.9 mm<sup>3</sup>.

**Figura 39 Ventana de Solid Edge para las propiedades físicas**



En la Tabla 1 se presentan los volúmenes (en cm<sup>3</sup>) correspondientes al cambio en las variables de  $\phi$ , l y N, realizando aumentos de 3mm sobre el valor de geometría

base dado anteriormente, y en la Tabla 2 se presentan los volúmenes correspondientes al cambio en  $\gamma$ ,  $\theta$  y  $\lambda$ , con aumentos de 1° sobre los valores base.

**Tabla 1 Variación del volumen ante el cambio de dimensiones del tambor**

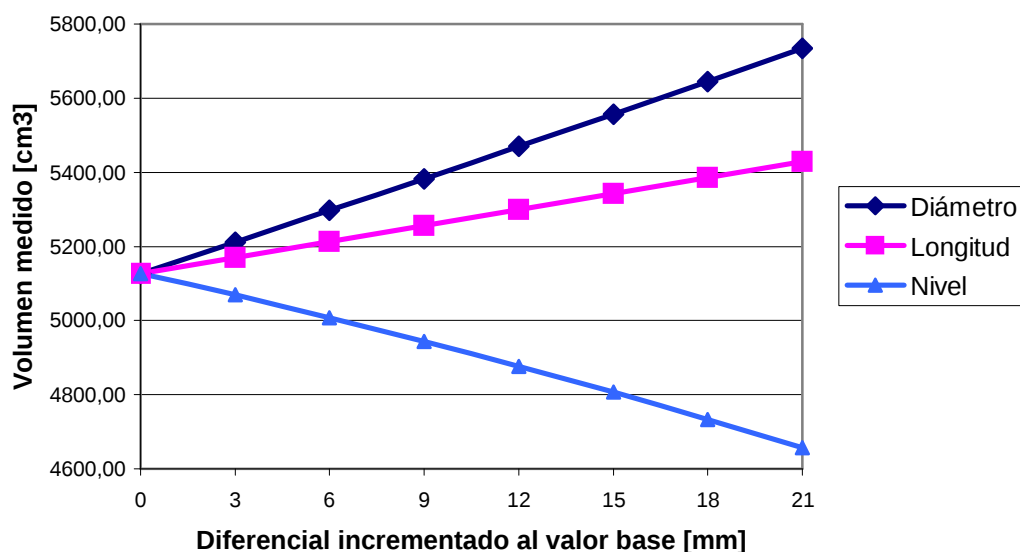
| Valor base + | Diámetro | Longitud | Nivel   |
|--------------|----------|----------|---------|
| 0            | 5126,45  | 5126,45  | 5126,45 |
| 3            | 5211,28  | 5169,71  | 5068,79 |
| 6            | 5296,76  | 5212,98  | 5008,01 |
| 9            | 5382,90  | 5256,24  | 4944,14 |
| 12           | 5469,69  | 5299,57  | 4877,07 |
| 15           | 5557,15  | 5342,77  | 4806,97 |
| 18           | 5645,26  | 5386,03  | 4733,80 |
| 21           | 5734,03  | 5429,29  | 4657,39 |

**Tabla 2 Variación del volumen ante el cambio de geometría de las láminas**

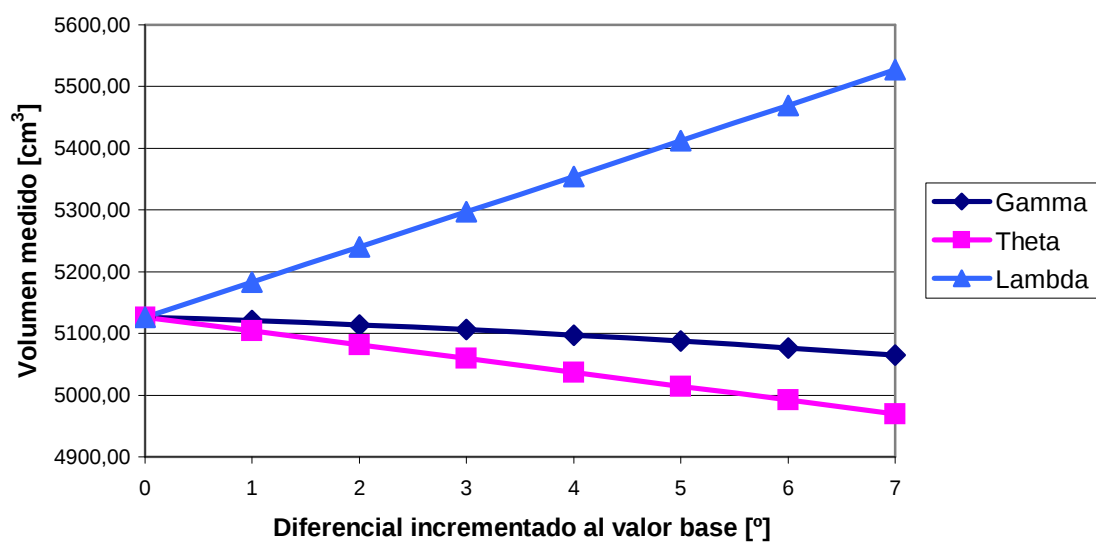
| Valor base + | Gamma   | Theta   | Lambda  |
|--------------|---------|---------|---------|
| 0            | 5126,45 | 5126,45 | 5126,45 |
| 1            | 5120,81 | 5104,02 | 5183,38 |
| 2            | 5114,11 | 5081,62 | 5240,23 |
| 3            | 5106,39 | 5059,26 | 5297,32 |
| 4            | 5097,54 | 5036,88 | 5354,57 |
| 5            | 5087,62 | 5014,48 | 5412,04 |
| 6            | 5076,59 | 4992,06 | 5469,75 |
| 7            | 5064,42 | 4969,60 | 5527,74 |

Las figuras 40 y 41 corresponden a las tablas 1 y 2 respectivamente, debido a la dispersión de datos correspondiente a cada parámetro geométrico, se realiza una regresión lineal, con la cual se desea obtener el valor de la variación promedio de cada uno de estos; esta variación promedio definida matemáticamente como la pendiente de la línea de tendencia es la semejanza de la derivada parcial de cada parámetro geométrico con respecto al volumen.

**Figura 40 Variación del volumen ante el cambio dimensiones del tambor**



**Figura 41 Variación del volumen ante el cambio de geometría de las láminas**



Los valores obtenidos como pendiente de estas líneas se consignan en la Tabla 3. en donde se puede observar que la sensibilidad del volumen ante aumento en

algunos parámetros puede reflejarse en el aumento o disminución del volumen de la cámara.

**Tabla 3 Sensibilidad del volumen ante variaciones geométricas**

| Parámetro geométrico | Derivada Parcial (d/dV)       |
|----------------------|-------------------------------|
| Diámetro             | 28.932 [cm <sup>3</sup> /mm]  |
| Longitud             | 14.421 [cm <sup>3</sup> /mm]  |
| Nivel                | -22.336 [cm <sup>3</sup> /mm] |
| $\gamma$             | 57.34 [cm <sup>3</sup> /°]    |
| $\theta$             | -8.852 [cm <sup>3</sup> /°]   |
| $\lambda$            | -22.399 [cm <sup>3</sup> /°]  |

Claramente se observa que la contribución al volumen por parte del ángulo  $\gamma$  de inclinación del plano longitudinal es la que está muy por encima de las demás; en los procesos de construcción es muy importante garantizar que las dimensiones correspondientes a los más altos valores de contribución no varíen con respecto a los de diseño, para evitar tener que realizar modificaciones sustanciales al valor correspondiente al nivel de líquido.

### 2.2.3 Herramienta de cálculo del volumen interno

Uno de los aspectos más importantes en el procedimiento de diseño de una cámara húmeda es el dimensionamiento del tambor de medición, este consiste en la determinación de una combinación de todas las variables que proporcionen un volumen por revolución definido, tornándose un proceso iterativo muy complejo, dada la cantidad de variables que se deben manejar.

La mejor manera de encontrar un conjunto de variables que satisfaga el volumen por revolución que se desea encontrar, es variando la menor cantidad de parámetros, como por ejemplo el diámetro y la longitud, dejando las demás variables sin modificación alguna, sin embargo aunque es más sencillo el proceso, sigue siendo iterativo y extenso.

El dimensionamiento del tambor se divide en dos etapas, dimensionamiento inicial y dimensionamiento detallado, en la primera etapa se obtiene un conjunto de parejas de diámetro y longitud que corresponden al volumen definido inicialmente, sin embargo esta etapa es solo una aproximación ya que no se tiene en cuenta el error ocasionado al volumen por la no consideración de la asimetría en las cámaras de medición. A las parejas obtenidas se les aplica un criterio de selección que permite identificar dentro del conjunto aquellas que contribuyan a obtener las mejores características de funcionamiento para el medidor; luego de escoger la pareja indicada se procede con la segunda etapa del dimensionamiento, en la cual se tiene en cuenta la asimetría de las cámaras de medición para obtener las dimensiones del tambor más detalladas.

**Figura 42 Ventana dimensionamiento inicial**

**Dimensionamiento inicial**

**Datos iniciales para iteración**

Volumen por revolución  L/rev

Geometría fija en el proceso de iteración

Angulo Theta

Angulo Lambda

Angulo Gamma

Longitud inicial  mm

Número de parejas

Para facilitar estos procesos iterativos se creo un archivo de Excel con macros, una para cada etapa, en las que mediante lenguaje de programación Visual Basic permite enlazar las aplicaciones de Solid Edge con Excel, para de esta manera realizar cambios a una variable del modelo y automáticamente obtener el valor correspondiente al volumen, tomando este de las propiedades físicas

proporcionadas por Solid Edge; por otro lado la hoja de Excel permite consignar cada una de estas combinaciones de variables en tablas, para su posterior utilización.

La primera parte del proceso de dimensionamiento con la macro se inicia con la ventana dimensionamiento inicial<sup>8</sup> (figura 42), en ella se deben ingresar datos como: Volumen por revolución, Theta, Lambda, Gamma, Longitud inicial para la iteración y número de parejas que serán solicitadas a la macro. El botón aceptar inicia el proceso, los datos producto de esta iteración son automáticamente consignados en la hoja de resultados del archivo.

**Figura 43 Ventana dimensionamiento detallado**

**Dimensionamiento detallado**

**Datos iniciales para corrección de longitud**

Volumen por revolución: 10 L/rev

Valores de geometría fijos:

- Angulo Theta: 4
- Angulo Lambda: 1
- Angulo Gamma: 5

Pareja de D y L seleccionada:

- Diámetro: 260 mm
- Longitud: 110 mm

Angulos de asimetría:

- Alfa1: 33,88
- Alfa2: 56,12

Aceptar

La macro que realiza la segunda parte del proceso se encuentra en la hoja “dimensionamiento detallado”, el botón “corregir longitud” da inicio a la macro con una ventana de diálogo (figura 43), en la cual se ingresan los valores como: volumen por revolución,  $\gamma$ ,  $\theta$  y  $\lambda$ , y la pareja de diámetro y longitud escogida de la primera etapa la cual es el resultado de la aplicación de un criterio de diseño específico; como esta corrección tiene en cuenta las variaciones del volumen por

<sup>8</sup> Para mas detalle ver el archivo titulado “dimensionamiento” anexo en el CD.

asimetría de las cámaras de medición, la ventana incorpora dos campos en los cuales se ingresan los valores de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  correspondientes.

A medida que se desarrolla el proceso iterativo, Excel consigna continuamente en la hoja dimensionamiento detallado los datos obtenidos para la longitud y los dos volúmenes de asimetría correspondientes (figura 44), en esta tabla existe también la opción de conocer qué porcentaje del volumen esperado difiere del volumen obtenido teóricamente en Solid Edge.

**Figura 44 Resultados del dimensionamiento detallado**

|    | A                               | B          | C                 | D          | E         | F              |
|----|---------------------------------|------------|-------------------|------------|-----------|----------------|
| 1  | <b>CORRECCIÓN LONGITUD (In)</b> |            |                   |            |           |                |
| 2  |                                 |            |                   |            |           |                |
| 3  |                                 |            | Corregir Longitud |            |           |                |
| 4  |                                 |            |                   |            |           |                |
| 5  | <b>Datos de entrada</b>         |            |                   |            |           |                |
| 6  | Angulo Hacha                    | 4          |                   | Vol CH/rev | 10        | [litros/rev]   |
| 7  | Angulo Lambda                   | 1          |                   | Diámetro   |           | mm             |
| 8  | Angulo Gamma                    | 5          |                   | Longitud   |           | mm             |
| 9  |                                 |            |                   |            |           |                |
| 10 | Vol [m³]                        | 0,01       | Alfa1             | 33,00      | Alfa2     | 55,12          |
| 11 |                                 |            |                   |            |           |                |
| 12 |                                 |            |                   |            |           |                |
| 13 | <b>Tabla de resultados</b>      |            |                   |            |           |                |
| 14 | Longitud                        | Vol @Alfa1 | Vol @Alfa2        | Vol/4      | Vol total | % Vol esperado |
| 15 | mm                              | m³         | m³                | m³         | m³        |                |
| 16 |                                 |            |                   | 0          | 0         | -100           |
| 17 |                                 |            |                   |            |           |                |
| 18 |                                 |            |                   |            |           |                |

Al terminar el proceso se obtiene una combinación de parámetros geométricos del tambor y del nivel de líquido sellante, que proporcionan un volumen por revolución inicialmente definido, cabe aclarar que para un mismo volumen por revolución existen infinitas posibilidades de combinación de estas variables, todo depende del criterio de diseño que se esté utilizando para su selección. Más adelante se profundizará sobre el criterio utilizado en el desarrollo de este libro para la selección de estas variables.

## 2.3 CAIDA DE PRESIÓN

La caída de presión en una cámara húmeda está limitada por las condiciones de funcionamiento, debido a que esta diferencia provoca una variación en el nivel de líquido, lo cual se refleja en un aumento de la pendiente de la curva de error y por consiguiente, un aumento en el ancho del margen de error del instrumento, por lo tanto, entre más baja sea esta mejor.

Una caída de presión alta provoca que el nivel de líquido descienda demasiado, hasta el punto que este deje de cumplir su función, originándose escapes de gas antes que este sea medido; los escapes ocurren por la ventana que se encuentra en la parte longitudinal de las láminas de medición y por el agujero localizado en la parte trasera del tambor de medición.

En una cámara húmeda se puede dividir la caída de presión en dos partes, la primera ocurre en el tambor de medición a causa de las fuerzas de arrastre, de flotación y de fricción, la segunda es la ocurrida en los accesorios de entrada y salida de gas, la cual ocurre por fuerzas viscosas y depende de la configuración de accesorios que se tenga.

La importancia de la caída de presión en un proceso de diseño no radica en realizar cálculos para conocerla exactamente, sino, determinar la contribución de los elementos del medidor que intervienen en el aumento o disminución de esta, ya que es muy compleja la interrelación existente entre el tambor de medición, el líquido sellante y el gas medido, como para determinar un modelo matemático que la represente.

### **2.3.1 Estimación de la caída de presión**

Patiño y Romero<sup>9</sup> realizaron en su trabajo de grado una propuesta para realizar una estimación de la caída de presión en las cámaras húmedas, esta propuesta se resume en una hoja de cálculo con macros, que fue llamada por sus autores como “SDIMECH”, esta hoja de cálculo permite estimar la caída de presión total en el

---

<sup>9</sup> Estudio de las variables de diseño para un prototipo de medidor de gas tipo cámara húmeda.

medidor, es decir en el tambor de medición y los accesorios de entrada y salida de gas.

En lo que respecta al tambor de medición, “SDIMECH” presenta flexibilidad, permitiendo variar todos los parámetros geométricos del tambor para su estudio; por otro lado, para el cálculo de caída de presión en accesorios no es posible la utilización de una configuración para la entrada y salida de gas diferente de la utilizada en el desarrollo de la hoja; teniendo en cuenta los fines perseguidos en esta etapa de diseño no es posible la utilización de esta parte de la hoja de cálculo.

Debido a la compleja interacción entre los elementos de una cámara húmeda, no es posible pretender tener un valor exacto de manera teórica de la caída de presión en el tambor de medición, por lo tanto “SDIMECH” se perfila solo como una herramienta, con la cual se estima parcialmente la influencia o contribución por separado de algunas variables con respecto a la pérdida de presión durante el diseño del tambor de una cámara húmeda.

La estimación de la caída de presión en el tambor se basa en determinar el torque generado por las fuerzas de oposición a este, como la fuerza de arrastre, la fuerza de flotación y la fuerza de fricción que ejercen los apoyos en el eje, este torque es el que se opone a la rotación del tambor, a continuación se explica en resumen<sup>10</sup> los principios utilizados por SDIMECH para hallar estos valores.

La fuerza de flotación es definida como la fuerza que ejerce un líquido sobre un sólido sumergido en dirección inversa a la gravedad, y es igual al peso del volumen desplazado por el objeto sumergido, y se aplica en el centroide del volumen sumergido.

Dada la geometría compleja de cada lámina en el espacio y teniendo en cuenta que son cuatro láminas parcialmente sumergidas en el líquido sellante, la manera mas

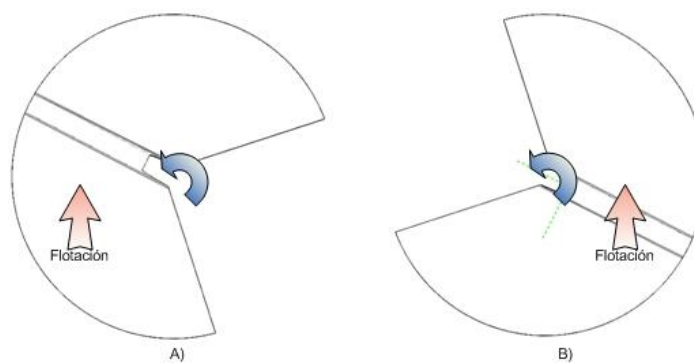
---

<sup>10</sup> Para mayor profundización ver capítulo 4 de la referencia bibliográfica No1.

sencilla de explicar el fenómeno que ocurre con la fuerza de flotación en el tambor, es describiendo el proceso para solo una lámina.

Por estar parcialmente sumergida dentro del líquido sellante durante la rotación del tambor, cada lámina pasa por varias fases, por lo cual el volumen sumergido de la lámina no permanece constante y en consecuencia tampoco su centroide o punto de aplicación de la fuerza, en la figura 45 se observan dos posiciones de la misma lámina, las cuales se encuentran espaciadas un giro de 180 grados, se puede observar que en la posición A el centroide se ubica de tal manera que el torque se opone al sentido de rotación, en la posición B la ubicación del centroide hace coincidir el sentido del torque por flotación con el giro del tambor, contrario a lo ocurrido en la posición anterior.

**Figura 45 Variación de la fuerza de flotación**



Para estimar el valor debido a la fuerza de rotación, se requiere conocer la cantidad de lámina sumergida en el líquido sellante y el centroide de esta para cada uno de los ángulos de rotación, este proceso es repetitivo y muy extenso, por lo tanto son muy útiles las facilidades de manipulación de datos que ofrecen las macros.

La fuerza de arrastre se genera por el movimiento relativo entre un sólido y un fluido, esta fuerza no puede ser evaluada de manera analítica, por lo tanto requiere de coeficientes experimentales para hacerlo, la Ecuación 5 expresa la fuerza de arrastre en función de parámetros relativos al movimiento del tambor en el fluido y de un coeficiente experimental.

$$F_a = \frac{1}{2} * C_A * \rho * V^2 * A \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $C_A$  representa el coeficiente experimental y es conocido como coeficiente de arrastre,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $V$  la velocidad y  $A$  el área sometida al movimiento dentro del fluido. Experimentalmente se determinan los coeficientes de arrastre para geometrías similares a las láminas del tambor, reduciéndose el cálculo a la determinación del área y velocidad del tambor de medición.

El torque provocado por la fricción en los apoyos es mas sencillo de calcular que los dos anteriores, porque solo existen dos apoyos. Primero se determina la carga total sobre los apoyos y luego con un coeficiente de fricción para el rozamiento entre el eje y los apoyos, se determina el torque resistivo por parte de estos dos.

### **2.3.2 Sensibilidad de la pérdida de presión a cambios en los parámetros de diseño**

Al igual que con el volumen, es de gran importancia para los procesos de diseño y construcción, conocer el impacto que sobre el comportamiento de la presión a través del medidor tengan las variables que determinan su diseño.

A falta de una relación funcional para la caída de presión, es posible asumir como modelo matemático la estimación parcial que de la caída de presión ofrece SDIMECH, para de esta manera emular el proceso de las derivadas parciales en una relación funcional, hallando la influencia de las variables de diseño en la caída de presión, mediante el método de variación de parámetros sobre el modelo.

La metodología usada para la variación de parámetros consiste en: definir unos valores base de las variables de diseño, luego mediante SDIMECH realizar la estimación de la caída de presión, mientras es modificada solo una de las variables a analizar; de esta manera se obtiene una tabla de resultados para cada variable, la

cual permite realizar gráficos comparativos entre la caída de presión provocada en el tambor ante los cambios hechos a estas variables.

Los valores arbitrarios de geometría base utilizados son:

|               |       |
|---------------|-------|
| ü $\phi$ :    | 30 cm |
| ü L:          | 25 cm |
| ü N:          | 4 cm  |
| ü $\theta$ :  | 3°    |
| ü $\lambda$ : | 3°    |
| ü $\gamma$ :  | 5°    |

El valor para la caída de presión determinado por SDIMECH para estos valores fue de 83.634 [Pa].

Del proceso de modificación de variables en el modelo presentado por SDIMECH, se obtuvieron las Tablas 4, 5 y 6, las cuales están organizadas de la siguiente manera: en la Tabla 4 están consignados los valores de  $\Delta P$  producto de la modificación de los ángulos  $\theta$ ,  $\lambda$  y  $\gamma$ , en las columnas 2, 3 y 4 respectivamente, en la columna 1 “Ángulo” esta el valor del ángulo asignado para la variable que está siendo analizada, permaneciendo las demás intactas. La Tabla 5 presenta los valores de  $\Delta P$  resultado de modificar el nivel de liquido en SDIMECH, conservando el valor base para los demás valores. Por último, la Tabla 6 contiene en las columnas 2 y 3 los valores de  $\Delta P$  al modificar el diámetro y la longitud respectivamente, en la columna 1 se encuentra el valor asignado a la variable que es objeto de estudio.

**Tabla 4 Variación de Ángulos**

| Ángulo [°] | DP (q) [Pa] | DP (l) [Pa] | DP (g) [Pa] |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>1</b>   | 85.522      | 81.012      | 84.097      |
| <b>2</b>   | 84.587      | 82.302      | 83.815      |
| <b>3</b>   | 83.634      | 83.634      | 83.8        |
| <b>4</b>   | 82.686      | 85.022      | 83.742      |
| <b>5</b>   | 81.734      | 86.457      | 83.634      |
| <b>6</b>   | 80.771      | 87.932      | 83.535      |
| <b>7</b>   | 79.821      | 89.479      | 83.373      |
| <b>8</b>   | 78.875      | 91.072      | 83.159      |
| <b>9</b>   | 77.926      | 92.724      | 83.178      |
| <b>10</b>  | 76.997      | 94.448      | 83.110      |

**Tabla 5 Variación de Nivel de líquido**

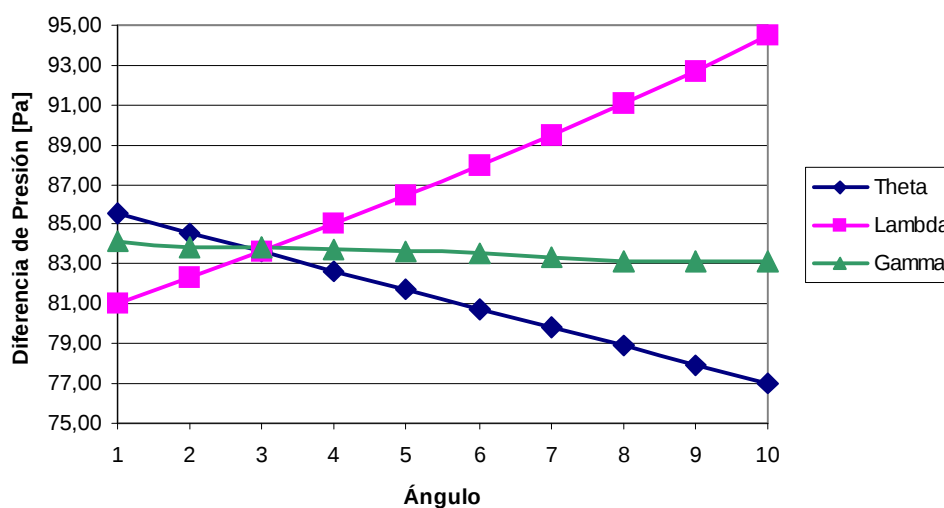
| Nivel     | DP (N) [Pa] |
|-----------|-------------|
| <b>1</b>  | 75.296      |
| <b>2</b>  | 77.799      |
| <b>3</b>  | 80.195      |
| <b>4</b>  | 83.634      |
| <b>5</b>  | 88.797      |
| <b>6</b>  | 96.697      |
| <b>7</b>  | 109.606     |
| <b>8</b>  | 160.002     |
| <b>9</b>  | 283.448     |
| <b>10</b> | 846.061     |

**Tabla 6 Variación de diámetro y longitud**

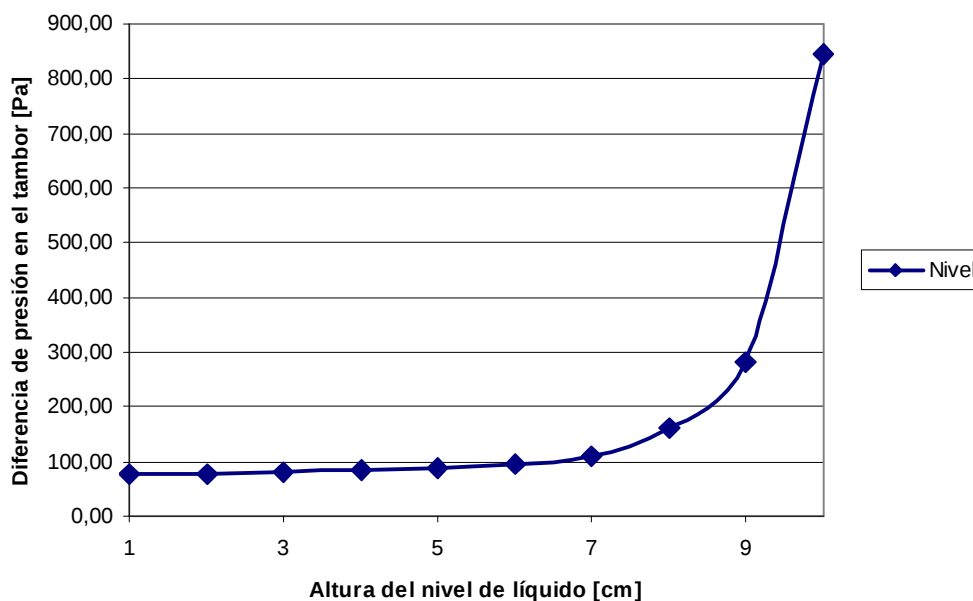
| Dimensión [cm] | DP (f) [Pa] | DP (L) [Pa] |
|----------------|-------------|-------------|
| 21             | 50.846      | 84.407      |
| 22             | 53.571      | 84.183      |
| 23             | 56.577      | 83.986      |
| 24             | 59.787      | 83.816      |
| 25             | 63.03       | 83.634      |
| 26             | 66.534      | 83.494      |
| 27             | 70.508      | 83.357      |
| 28             | 74.508      | 83.245      |
| 29             | 79.696      | 83.137      |
| 30             | 83.634      | 83.032      |

Con el ánimo de facilitar el entendimiento de los resultados consignados en las tablas 4, 5 y 6, se presentan los gráficos correspondientes a estas tablas en las figuras 46, 47 y 48.

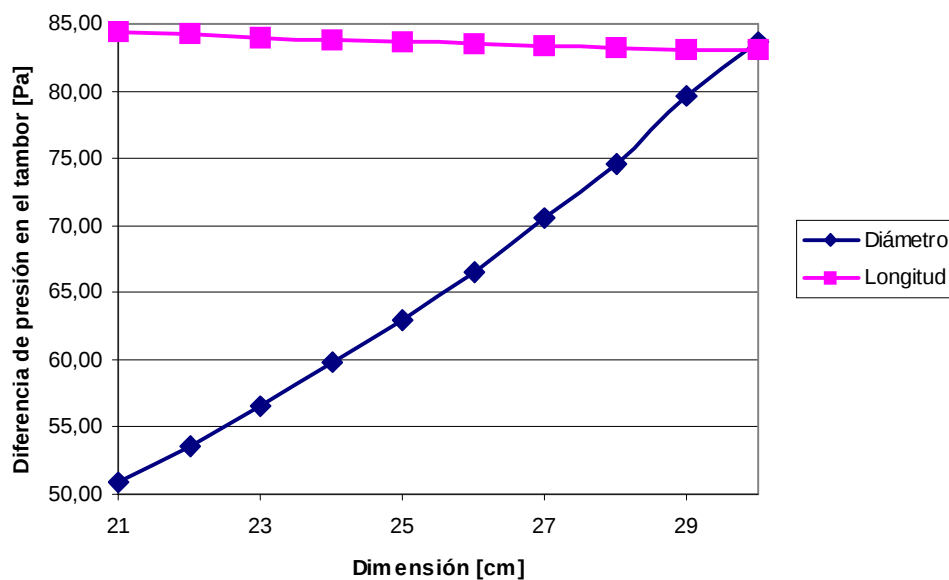
**Figura 46. Variación de Ángulos**



**Figura 47 Variación de Nivel de líquido**



**Figura 48 Variación de diámetro y longitud**



Los ángulos  $\lambda$  y  $\theta$  presentan el efecto contrario en el  $\Delta P$  del tambor, aumentos en el ángulo de doblado de las láminas ( $\lambda$ ) producen que la caída de presión aumente,

mientras que el mismo aumento en la inclinación de la línea por donde se realiza el doblado ( $\theta$ ) conduce a una disminución en el  $\Delta P$ .

El ángulo de inclinación del plano longitudinal ( $\gamma$ ) no presenta una modificación significativa en el  $\Delta P$  en comparación a los otros dos ángulos; este ángulo no representa mayor importancia en la caída de presión, tal como sucede con el volumen (ver sección 2.2.3), la inclinación de este plano es importante durante el funcionamiento de las cámaras húmedas, ya que ángulos de inclinación muy pequeños de este plano producen turbulencia en el líquido sellante.

Cuando se incrementa la longitud del tambor ocurre un aumento en el área efectiva que está en contacto con el líquido sellante, de la Ecuación 5 se sabe que esta área es directamente proporcional a la fuerza de arrastre, pero el aumento de la longitud y por lo tanto del área no representa un incremento significativo en el  $\Delta P$  a través del tambor, como se puede observar en la figura 48, de hecho se produce una disminución en esta.

Por otro lado, para incrementos en el diámetro del tambor ocurre un aumento significativamente mayor de la diferencia de presión que la presentada para aumentos en la longitud; debido al aumento en el diámetro se produce un aumento proporcional en la longitud en la cual se aplican las fuerzas de oposición a la rotación del tambor, por tanto el torque también aumenta, lo cual se refleja en un aumento significativo de la caída de presión dentro del tambor al aumentar su diámetro.

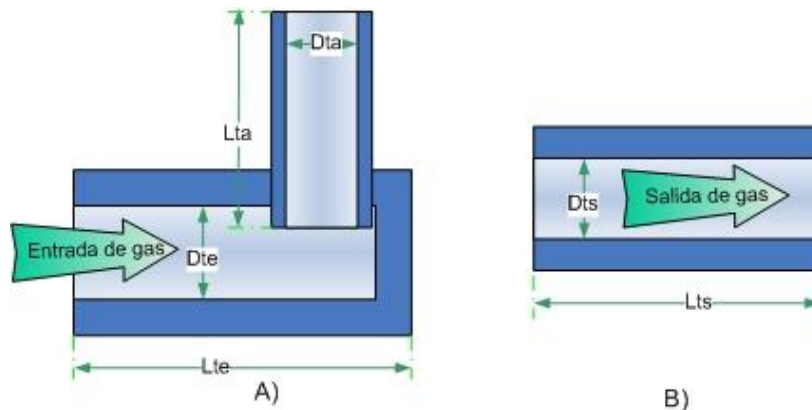
Por último para el nivel de líquido (figura 47), se presenta una grafica muy diferente a las demás, ya que presenta dos etapas, la primera es a bajos valores de nivel de líquido, donde presenta un comportamiento ascendente casi lineal, mientras en la segunda etapa presenta un aumento acelerado de la caída de presión a través del tambor, lo cual sugiere que el nivel de líquido “siempre” se debe conservar en valores tan bajos como sea posible.

Las características de desempeño presentadas por la geometría del tambor en esta sección y en la sección 2.2.3, son muy importantes en el diseño, y estas pueden determinar la metodología y los criterios de diseño a seguir en el desarrollo de un proceso de diseño de cámaras húmedas.

### 2.3.3 Herramienta de cálculo para la presión

El tamaño de las conexiones de entrada y salida de gas generan una pérdida de presión a causa de las fuerzas viscosas la cual no ha sido considerada hasta el momento; esta caída de presión no debe afectar directamente el funcionamiento del tambor, por tal motivo, es necesario controlar su valor y evitar que llegue a afectar las características del instrumento; para efectos de diseño se debe controlar la contribución que estos elementos representan en la caída de presión total, lo cual se logra mediante la selección de una configuración de accesorios tal que no sobrepasen ciertos límites en proporción a la diferencia total de presión en el instrumento.

**Figura 49 Configuración de accesorios de entrada y salida de gas**



Para tal fin se desarrolló una hoja de Excel, que mediante la utilización de macros permite calcular la contribución a la pérdida de presión por los accesorios de entrada y salida de gas para una configuración muy usual de estos accesorios (figura 49), permitiendo cambiar fácilmente parámetros como el diámetro y longitud de estos; mediante un criterio de diseño apropiado, esta hoja se presenta como una

herramienta útil para identificar el tamaño adecuado de tal manera que no afecte las características metrológicas del instrumento.

El objetivo inicialmente planteado fue la construcción de una cámara húmeda de 10 L/rev, pero la macro fue desarrollada para tres tamaños de cámaras húmedas diferentes, cuyos volúmenes son 2.5, 10 y 50 L/rev; esta macro es fácilmente modificable para la utilización en cualquier tamaño mediante modificación en su programación.

Para hallar la pérdida en las conexiones de entrada y salida de gas, la macro se basa en la formula de Darcy<sup>11</sup> (Ecuación 6) para el cálculo general de la perdida de presión en tuberías; aunque esta formula es desarrollada para flujo de líquidos, es posible su utilización para flujo de fluidos compresibles ya que la pérdida de presión entre la entrada y la salida es menor del 10%<sup>12</sup>.

$$DP = \frac{\rho * f * L * Vel^2}{2 * D} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $f$  el factor de fricción,  $L$  la longitud del tramo de tubería,  $Vel$  la velocidad del fluido en la tubería y  $D$  el diámetro de la tubería. Como los caudales son muy bajos el flujo se asume laminar para cualquier condición de funcionamiento del medidor, por lo tanto el factor de fricción ( $f$ ) se calcula mediante la Ecuación 7<sup>13</sup>, la cual depende del Número de Reynolds, y este a su vez es calculado mediante la Ecuación 8<sup>14</sup>, donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido; los valores sugeridos para  $\rho$  y  $\nu$  para el cálculo de pérdidas son los del aire a unas condiciones de 20° C y 1,01325 bar, aunque estos son modificables.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 7}$$

---

<sup>11</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, Cap1, pag 7

<sup>12</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, Cap1, pag 9

<sup>13</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, Cap1, pag 8

<sup>14</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, Cap1, pag 5

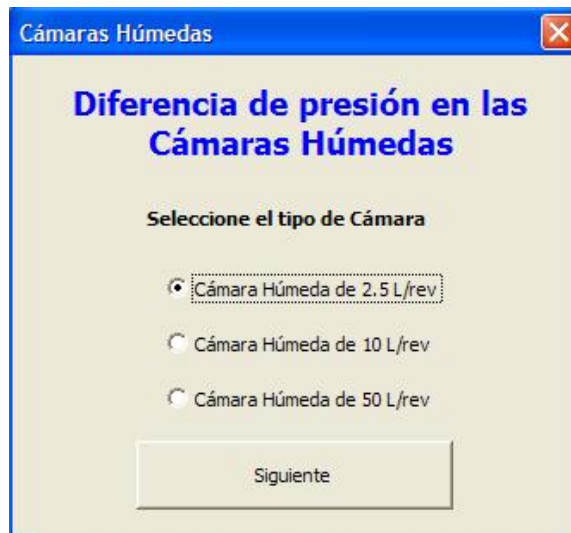
$$Re = \frac{Vel * D}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

La pérdida de presión en los accesorios, contracciones y expansiones se realiza basados en la Ecuación 9<sup>15</sup>, la cual se da en función del coeficiente K de pérdida de carga.

$$DP = \frac{k * Vel^2 * r}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Al iniciar la macro presenta una ventana como la mostrada en la figura 50, en la cual solicita la selección del tamaño de cámara a analizar; Solo se presentan tres opciones de tamaños como se mencionó anteriormente.

**Figura 50 Ventana de selección del tipo de cámara húmeda**



Después de seleccionar la el volumen por revolución de la cámara a analizar, se presenta una nueva ventana (figura 51), en esta es posible modificar los valores correspondientes a las propiedades del fluido (densidad y viscosidad cinemática) y propiedades de la tubería (diámetro interno y longitud), además se encuentra una casilla para indicar el máximo número de revoluciones por minuto del tambor de

<sup>15</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, Cap3, pag 5

medición, esto con el fin de determinar el máximo flujo que se va a desplazar por la tubería.

**Figura 51 Ventana de propiedades para el cálculo de la caída de presión**

**Datos de entrada**

**Propiedades**

**Propiedades del fluido**

Densidad: 1.2045 Kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad: 0.0000151 m<sup>2</sup>/s

**max RPM**

6

**Propiedades de la tubería**

Dia tubería de entrada 15 mm L. tubería de entrada 70 mm

Dia tubería auxiliar 15 mm L. tubería auxiliar 50 mm

Dia tubería salida 15 mm L. tubería salida 40 mm

Resultados

Los cálculos realizados para determinar velocidades en tuberías, números de Reynolds, factores de fricción y pérdidas, son realizados automáticamente y consignados en la hoja “Tabla de cálculos”; la hoja resultados resume los valores de: volumen por revolución, pérdida máxima total en el tambor<sup>16</sup>, pérdida máxima a la entrada y pérdida máxima a la salida (figura 52).

El botón “Volver” permite realizar nuevamente la escogencia del tamaño de la cámara y luego modificar las propiedades del fluido y propiedades de la tubería, de esta manera es posible realizar las modificaciones que se deseen a las características de las conexiones de entrada y salida de gas, hasta obtener la caída de presión adecuada.

<sup>16</sup> Este valor es calculado a partir de las estimaciones hechas por SDIMECH, ver sección 2.3.1

**Figura 52 Resultados de la caída de presión**

|    | A                          | B | C           | D | E                     | F | G           | H       |
|----|----------------------------|---|-------------|---|-----------------------|---|-------------|---------|
| 1  |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 2  |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 3  | <b>TABLA DE RESULTADOS</b> |   |             |   |                       |   |             |         |
| 4  |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 5  | Tipo de Cámara Húmeda      |   | CH10        |   | Vol/rev:              |   | 10          | [L/rev] |
| 6  | Pérdida máxima Total       |   | 68,601 [Pa] |   | Pérdida máxima tambor |   | 66,400 [Pa] |         |
| 7  | Pérdida máxima entrada     |   | 1,644 [Pa]  |   | Pérdida máxima salida |   | 0,556 [Pa]  |         |
| 8  |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 9  |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 10 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 11 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 12 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 13 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 14 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |
| 15 |                            |   |             |   |                       |   |             |         |

## 2.4 NIVEL DE LÍQUIDO

Como se ha podido establecer anteriormente el nivel de líquido es sin duda el factor más importante en un medidor tipo cámara húmeda, de él dependen las características metrológicas del instrumento como la repetibilidad y la exactitud; la sensibilidad que ofrece el volumen por revolución ante variaciones del nivel es alta en comparación a otras variables, de la misma manera la posición relativa del nivel de líquido con respecto al diámetro del tambor, influye considerablemente en la caída de presión que a través de este se genere. Como consecuencia, es necesario prestar especial cuidado durante el diseño en la determinación del nivel de líquido adecuado, ya que una buena escogencia de este favorecerá en el medidor las mejores cualidades metrológicas posibles.

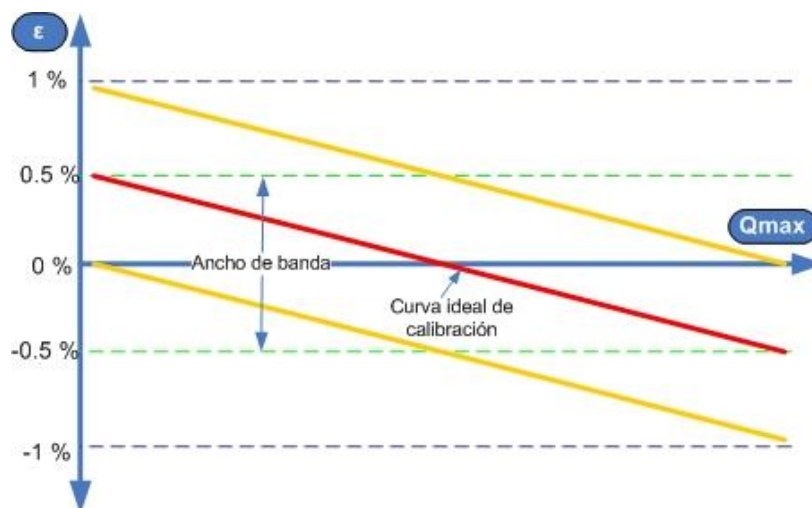
### 2.4.1 Nivel de líquido: funcionamiento, calibración y diseño

Cuando una cámara húmeda esta en funcionamiento, su nivel de líquido oscila a causa de la diferencia de presión, la cual esta actuando sobre áreas diferentes del nivel de líquido en el tambor de medición; esta variación de nivel va desde un punto

máximo superior para cuando no hay flujo de gas (diferencia presión cero), hasta un punto mínimo inferior cuando está trabajando a caudal máximo (diferencia de presión máxima), lo cual crea en el medidor una banda de error que generalmente no supera el 1% entre los puntos máximo y mínimo.

El proceso de calibración del nivel de líquido en una cámara húmeda se realiza cuando esta se encuentra sin flujo de gas; si al determinar el nivel de líquido este se ubica de tal forma que genere un error cero para cuando se encuentra funcionando a caudal mínimo, la banda de error del medidor se desplazara hacia abajo, obteniendo de esta manera un error máximo del medidor de -1%, por otro lado si se ubica el nivel de líquido para que a máximo caudal posea el error cero, su banda de error subirá, generando de esta manera un error máximo de +1%; por tal motivo los procedimientos de calibración<sup>17</sup> buscan ubicar el nivel de líquido de tal manera que la banda de error sea repartida igualmente entre los valores positivos y negativos, para lo cual se generaría un error máximo de  $\pm 0.5\%$ , al disminuir el error se proporciona mayor exactitud al instrumento (figura 53).

**Figura 53 Banda de error en las cámaras húmedas**



Durante el proceso de diseño de las cámaras húmedas se utiliza un valor de nivel de líquido fijo, este nivel corresponde para el punto en que el error en la medición es

<sup>17</sup> Para mas detalles ver capítulo 5.

cero, por consiguiente el nivel de calibración se debe ubicar por encima del nivel utilizado para el diseño; la diferencia entre estos dos valores depende de la caída de presión presentada en el medidor a medida que el caudal a través de este aumenta.

La dependencia que presenta el nivel de calibración con respecto a la caída de presión, imposibilita determinar un nivel de calibración teóricamente, ya que este basaría el cálculo de nivel en valores igualmente teóricos.

#### **2.4.2 Prototipo de tambor y estudio de nivel**

En los procesos de diseño de cámaras húmedas existen muchos criterios y variables, cuya única referencia existente son los modelos matemáticos desarrollados, estos modelos no proporcionan la confianza suficiente debido a su complejidad y a las suposiciones tenidas en cuenta para su desarrollo; además, no existe referencia alguna que valide su comportamiento, porque no ha sido construido el primer tambor con el cual se puedan comprobar.

Con el fin de validar los criterios utilizados en los procesos de diseño y tener una herramienta más confiable durante la toma de decisiones en estos procesos, se decidió construir un tambor de medición, con el que se pudieran comprobar estos aspectos.

El objetivo principal de la construcción del tambor es determinar la influencia que sobre el comportamiento del tambor tiene el nivel de líquido, para tal fin se determinó la geometría cuyo volumen por revolución fuera de 10 Litros; como valor de nivel de líquido se adoptó la relación de  $1/6$  del diámetro del tambor, este valor es arbitrario, de hecho es objetivo de la construcción el validar esta relación.

Teniendo en cuenta la consideración de nivel de líquido hecha anteriormente, se utilizó la herramienta desarrollada para la determinación del volumen interno de una cámara de medición, los valores geométricos hallados en este proceso son los siguientes:

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| ü $\phi$ :    | 26,3 cm              |
| ü L:          | 25,3 cm              |
| ü N:          | 4,4 cm ( $1/6\phi$ ) |
| ü $\theta$ :  | 3°                   |
| ü $\lambda$ : | 3°                   |
| ü $\gamma$ :  | 5°                   |

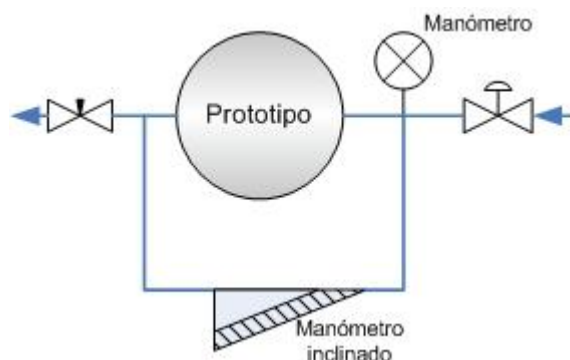
En esta sección no se profundizará en los procesos constructivos del tambor, ni del soporte exterior con el cual se realizaron las pruebas, ya que en el Capítulo 4 se profundizará sobre el tema. En la figura 54 se observa el aspecto final que adoptó el prototipo de tambor de medición construido.

**Figura 54 Foto del prototipo**



Para realizar las pruebas al tambor de medición se realizó un montaje, el cual permite variar la altura del nivel de líquido y realizar lecturas de diferencia de presión en el tambor mediante un manómetro inclinado, con la resolución suficiente para realizar las lecturas de la caída de presión, la figura 64 muestra los elementos utilizados en el montaje realizado para este prueba. De esta manera es posible graficar el  $\Delta P$  del tambor en función del ángulo de rotación, para diferentes valores de nivel de líquido.

**Figura 55 Montaje del prototipo**



Los valores de nivel de líquido seleccionados para esta prueba están dentro del rango de  $1/9$  a  $1/5$  del diámetro del tambor, los valores son: 5, 4.5, 4, 3.5 y 3 cm.

La Tabla 7 contiene los valores de  $\Delta P$  para el tambor de medición en función del nivel de líquido, para un giro completo del tambor, el  $\Delta P$  consignado en la tabla está dado en mbar y corresponde al valor promedio de las mediciones hechas durante la prueba.

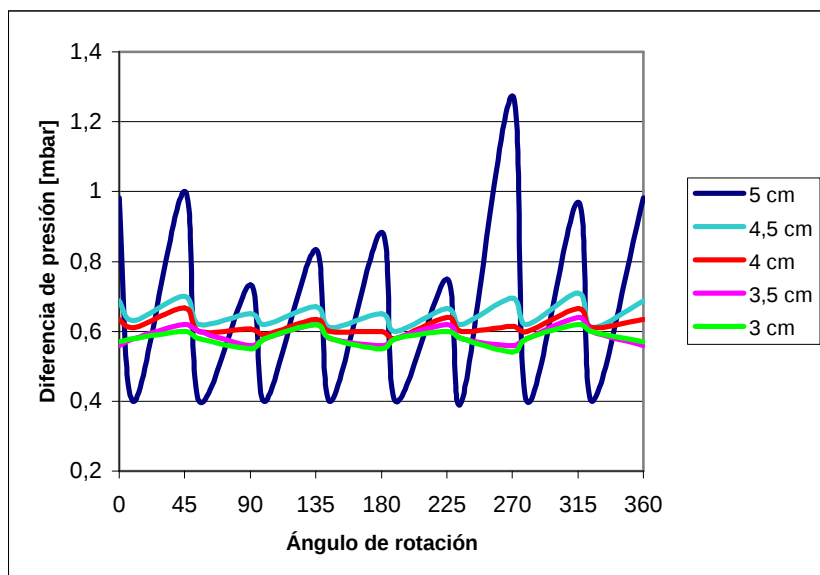
Estos resultados permiten identificar el comportamiento del medidor experimentalmente, realizando cambios en el nivel; la figura 56 permite realizar una comparación directa entre los resultados obtenidos.

Los picos presentados por las líneas de comportamiento corresponden a los puntos en los cuales se realiza la apertura y cierre de las cámaras de medición, cada una de estas clases de picos se repiten alternativamente 4 veces durante una rotación del tambor, comenzando en el ángulo cero con la apertura de una cámara de medición.

**Tabla 7 Diferencial de presión para diferentes niveles de líquido**

| Ángulo de rotación | Nivel de líquido sellante [cm] |      |      |      |      |
|--------------------|--------------------------------|------|------|------|------|
|                    | 5                              | 4,5  | 4    | 3,5  | 3    |
| 0                  | 0,98                           | 0,69 | 0,63 | 0,56 | 0,57 |
| 10                 | 0,40                           | 0,63 | 0,61 | 0,58 | 0,58 |
| 45                 | 1,00                           | 0,70 | 0,67 | 0,62 | 0,60 |
| 55                 | 0,40                           | 0,62 | 0,60 | 0,60 | 0,58 |
| 90                 | 0,73                           | 0,65 | 0,61 | 0,56 | 0,55 |
| 100                | 0,40                           | 0,62 | 0,59 | 0,58 | 0,58 |
| 135                | 0,83                           | 0,67 | 0,63 | 0,62 | 0,62 |
| 145                | 0,40                           | 0,61 | 0,60 | 0,58 | 0,58 |
| 180                | 0,88                           | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,55 |
| 190                | 0,40                           | 0,60 | 0,58 | 0,58 | 0,58 |
| 225                | 0,75                           | 0,67 | 0,64 | 0,62 | 0,60 |
| 235                | 0,40                           | 0,62 | 0,60 | 0,58 | 0,58 |
| 270                | 1,27                           | 0,70 | 0,61 | 0,56 | 0,54 |
| 280                | 0,40                           | 0,62 | 0,60 | 0,58 | 0,58 |
| 315                | 0,97                           | 0,71 | 0,67 | 0,64 | 0,62 |
| 325                | 0,40                           | 0,61 | 0,61 | 0,60 | 0,60 |
| 360                | 0,98                           | 0,69 | 0,63 | 0,56 | 0,57 |

**Figura 56 Diferencial de presión para diferentes niveles de líquido**



La curva que representa el comportamiento del nivel de 5 cm, describe oscilaciones en el  $\Delta P$  muy grandes, en comparación a las demás líneas; el promedio del  $\Delta P$  de cada una de las líneas disminuye su valor a medida que el nivel también disminuye.

Las curvas también presentan una disminución en la dispersión de los datos a medida que el nivel disminuye, esta dispersión es la representación de la uniformidad en el movimiento del tambor, a mayor uniformidad de movimiento se presentan mejores características metrológicas en el instrumento. Una manera de cuantificar esta dispersión es con la desviación estándar promedio, la cual se encuentra consignada en la Tabla 8 para cada uno de los niveles de líquido.

**Tabla 8 Desviación estándar de la presión**

| Nivel de líquido | Desviación estándar promedio |
|------------------|------------------------------|
| 5                | 0,2660                       |
| 4,5              | 0,0314                       |
| 4                | 0,0203                       |
| 3,5              | 0,0208                       |
| 3                | 0,0157                       |

#### **2.4.3 Criterio para diseño del tambor de medición**

Basados en las observaciones del comportamiento del prototipo de tambor y las pruebas de variación de nivel hechas a este, es posible desarrollar un criterio de diseño para el tambor con el cual se seleccione la geometría para lograr un funcionamiento adecuado de este; de esta manera se elimina un factor teórico en el proceso de diseño, ya que el criterio ha sido comprobado mediante las pruebas del prototipo.

El dimensionamiento del prototipo del tambor se realizó con base a la selección de un nivel de líquido correspondiente a 1/6 del diámetro del tambor, cuando se encontraba funcionando cerca o por encima de este nivel, se presentaban picos positivos en el valor del  $\Delta P$ , causados por la apertura y cierre de los puertos de entrada y de salida, lo cual provocaba una perturbación muy notoria en el nivel de

líquido, además en la rotación del tambor se presentaba un movimiento no uniforme, con aceleraciones y desaceleraciones en el momento de apertura y cierre de las cámaras de medición; con niveles de líquido inferiores al nivel de diseño del prototipo, es decir con valores menores a  $1/7$  del diámetro del tambor, las oscilaciones del  $\Delta P$  son menores, al igual que las variaciones en el nivel, por otro parte la rotación del tambor en estos casos es mucho más uniforme que la presentada en niveles de líquido superiores.

A medida que el nivel de líquido es menor que el valor de  $1/7$  del diámetro, los picos de presión son contrarios a los presentados con niveles superiores, es decir su diferencia con el valor promedio es negativa; pero su valor es tan bajo que la perturbación en el nivel de líquido no es muy grande, además se presenta una ventaja para el medidor, siendo esta la rotación uniforme del tambor de medición.

La selección de la geometría adecuada para el diseño de una cámara húmeda, debe basar los cálculos en un nivel de líquido inferior a  $1/7$  del diámetro, para de esta manera garantizar un comportamiento lo más uniforme posible tanto en la variación de la presión como en la rotación del tambor; lo cual proporciona un gran beneficio a las cualidades metrológicas que se desean obtener en el medidor.

## **2.5 INSTRUMENTACIÓN SECUNDARIA**

La medición de gas es afectada por factores que desvían la medición de su verdadero valor, por tanto un instrumento de medición de gas, debe incluir en su configuración una instrumentación secundaria capaz de realizar las correcciones necesarias, con el fin de aumentar la exactitud de las mediciones.

En las cámaras húmedas la instrumentación secundaria está compuesta por todos los elementos que sirven de apoyo al elemento primario (tambor), con el fin de aumentar la exactitud en la medición; entre estos elementos se cuentan los instrumentos para medir presión, temperatura y giro del tambor.

La selección de la instrumentación secundaria debe realizarse teniendo en cuenta aspectos como: influencia del instrumento en la exactitud del medidor y por consiguiente el aspecto económico, ya que instrumentos con mayor exactitud representan mayor costo.

La estimación de la incertidumbre<sup>18</sup> en las cámaras húmedas, es entonces la herramienta idónea para seleccionar el tipo y características metrológicas de la instrumentación secundaria, ya que permite realizar una estimación del impacto que podría generar cada uno de estos elementos sobre la exactitud total del instrumento.

### **2.5.1 Incertidumbre en cámaras húmedas**

Siguiendo la metodología planteada en el Apéndice D para la estimación de la incertidumbre, se define el mensurado o magnitud a ser medida por las cámaras húmedas, como el volumen de gas desplazado por el giro del tambor de medición.

Por tratarse de un proceso de medición de gas es muy usual la realización de ajustes del volumen entre dos estados, desde un estado con las condiciones de medición hasta otro estado en el cual se consideren condiciones base, las consideraciones mas importantes bajo las cuales se plantea la realización de la corrección del volumen son:

- ü Consideración del gas medido como gas real.
- ü Debido a que el gas medido entra en contacto con el líquido sellante, se tiene en cuenta la humedad del gas durante el ajuste del volumen.
- ü La temperatura del gas permanece constante mientras este atraviesa el medidor.
- ü La presión a la cual es medido el gas, es aquella presente cuando se cierra la cámara de medición, por tanto se asume como presión del gas medido la presión tomada a la entrada del medidor.
- ü Se asume el gas a condiciones estándar como seco.

---

<sup>18</sup> Para mayor información sobre el procedimiento para la estimación de incertidumbre ver Apéndice D

La Ecuación A.12<sup>19</sup> representa el modelo matemático para la determinación del volumen medido por una cámara húmeda teniendo en cuenta las consideraciones de humedad y gas real hechas anteriormente. Esta ecuación incluye términos como el factor de compresibilidad ( $Z$ ) y el factor  $F_{s-h}$ <sup>20</sup>, los cuales no son cuantificables directamente en el instrumento de medición, por tanto es necesario expresarlos en función de otros parámetros que si lo sean.

Para el cálculo de el factor de compresibilidad se utiliza el procedimiento desarrollado en la sección 3.5 “Compressibility Factor  $Z$ ” del artículo “Equation for the determination of the density of moist air (1981)”<sup>21</sup>, el cual expresa al factor de compresibilidad como una función de la presión, temperatura y humedad relativa del gas.

Por otro lado, la  $P_{p_{vapor}}$  se formula como el producto entre la humedad relativa y la presión de saturación; esta presión de saturación también se puede expresar como función únicamente de la temperatura del gas, utilizando la ecuación 22 que para tal fin desarrolla el artículo “Equation for the determination of the density of moist air (1981)”.

Basados en este modelo matemático es posible identificar las fuentes de incertidumbre en la medición del volumen.

- ü Presión
- ü Temperatura
- ü Pulsos por revolución
- ü Porcentaje de error producto de la calibración
- ü Humedad relativa

---

<sup>19</sup> Apéndice A, Sección A.1.5.1.

<sup>20</sup> Apéndice A, Sección A.1.4.

<sup>21</sup> P. Giacomo; International Bureau of Weights and Measures; France

Después de identificar el modelo que representa el mensurado, se desarrolla un proceso matemático que incluye cálculo diferencial y estadística básica, por tanto, para mayor facilidad de este, se seleccionó como herramienta de cálculo el software Mathcad 11, por sus características de flexibilidad en el manejo de las variables y potencia de cálculo.

En la tabla 9 están consignados los resultados obtenidos de Mathcad<sup>22</sup>, producto de la aplicación de la metodología para la estimación de la incertidumbre. Esta tabla proporciona información muy útil con respecto al modelo matemático escogido para el mensurado y cada una de sus fuentes de incertidumbre.

La columna correspondiente al porcentaje de contribución, permite identificar cual de las fuentes de incertidumbre tiene mayor ponderación dentro de la incertidumbre total estimada; para la situación analizada, la mayor ponderación es presentada por el porcentaje de error, 56,332%, seguida por la humedad relativa con 42,109%.

Por el alto porcentaje de contribución por parte de la humedad relativa, el conseguir incertidumbre total para el medidor que este dentro de los rangos especificados para su tipo, requiere de una incertidumbre muy baja por parte del instrumento utilizado para la medición de la humedad; por otro lado, obtener baja incertidumbre por parte de un instrumento implica un alto costo, lo cual en muchos casos no es justificable.

El objetivo de la utilización dentro del modelo matemático de la humedad relativa, es la disminución del error generado durante la medición del volumen, pero al realizar una ponderación de la variación del error ante la no inclusión de este factor en el modelo matemático, se determina que es muy poco sensible; por tal motivo no incluir dentro del modelo matemático a la humedad relativa, implica un pequeño aumento en el error de medición, pero una disminución en la incertidumbre total del instrumento.

---

<sup>22</sup> Para mayor información remitirse al archivo "Incertidumbre CH" anexo en el CD.

### 2.5.2 Incertidumbre en cámaras húmedas: modelo simplificado

El modelo simplificado para la estimación de la incertidumbre en la medición del volumen por parte de una cámara húmeda, no incluye la consideración de gas real ni la corrección por humedad relativa, de esta forma el modelo matemático utilizado para este caso es el determinado por la Ecuación A.11.<sup>23</sup>

Para este modelo las fuentes de incertidumbre en la medición del volumen son:

- ü Presión
- ü Temperatura
- ü Pulsos por revolución
- ü Porcentaje de error producto de la calibración

En la tabla 10 están consignados los resultados obtenidos de Mathcad<sup>24</sup>, producto de la aplicación de la metodología para la estimación de la incertidumbre para el modelo simplificado.

La contribución a la incertidumbre por parte del porcentaje de error sigue siendo la mas importante, los valores obtenidos en los demás instrumentos proporcionan la herramienta para la selección de los mismos, dando prioridad a la escogencia de sensores con mayor exactitud para quienes tengan el mayor porcentaje de contribución; para este caso la variable más importante es la presión, la temperatura ocupa el segundo lugar y por último los pulsos por revolución.

---

<sup>23</sup> Apéndice A, Sección A.1.5.1.

<sup>24</sup> Para mayor información remitirse al archivo : "Incertidumbre Modelo Simplificado" anexo en el CD.

**Tabla 9 Estimación de la incertidumbre en Cámaras Húmedas**

| Fuentes de incertidumbre | Cuantificación    |                       |                        |                      | Reducción               | Combinación                     |                           |                            | Incertidumbre expandida |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                          | Valor estimado Xi | Fuente de información | Incertidumbre original | Tipo de distribución |                         | Coeficientes de sensibilidad ci | Contribución ui(y)        | Porcentaje de contribución |                         |
| Presión                  | 101000 Pa         | CC                    | 27 Pa                  | B, rectang           | 15,588 Pa               | $9,481 \cdot 10^{-8}$           | $1,472 \cdot 10^{-6}$     | 0,916                      | 50                      |
| Temperatura              | 300 K             | CC                    | 0,06 K                 | B, k=2               | 0,03 K                  | $(-)4,109 \cdot 10^{-5}$        | $(-)1,238 \cdot 10^{-6}$  | 0,642                      | 50                      |
| Pulsos/rev               | 5000 Pulsos       | Escala                | 0,0002                 | B, rectang           | $1,155 \cdot 10^{-4}$ P | $(-)1,874 \cdot 10^{-6}$        | $(-)2,164 \cdot 10^{-10}$ | $1,979 \cdot 10^{-8}$      | 50                      |
| Humedad relativ          | 50%               | Norma                 | 0,03                   | No aplica            | 0,03                    | $(-)3,327 \cdot 10^{-4}$        | $(-)9,981 \cdot 10^{-6}$  | 42,109                     | 50                      |
| % de error               | 0,4               | CC                    | 0,27                   | B, k=2               | 0,123                   | $(-)9,406 \cdot 10^{-5}$        | $(-)1,154 \cdot 10^{-5}$  | 56,332                     | 50                      |

| Mensurado Y | Mejor estimado de Y [y]           |
|-------------|-----------------------------------|
| Volumen     | $9,368 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |

|                                           |       |
|-------------------------------------------|-------|
| Incertidumbre estándar Combinada $u_c(y)$ | 0,164 |
|-------------------------------------------|-------|

|                           |
|---------------------------|
| Grados de libertad efect. |
| 50                        |

CC: Certificado de Calibración

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Incertidumbre expandida U | 0,328 |
|---------------------------|-------|

**Tabla 10 Incertidumbre en Cámaras húmedas (modelo simplificado)**

| Fuentes de incertidumbre | Cuantificación    |                       |                        |                      | Reducción               | Combinación                     |                           |                            | Incertidumbre expandida |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                          | Valor estimado xi | Fuente de información | Incertidumbre original | Tipo de distribución |                         | Coeficientes de sensibilidad ci | Contribución ui(y)        | Porcentaje de contribución |                         |
| Presión                  | 101000 Pa         | CC                    | 27 Pa                  | B, rectang           | 15,88 Pa                | $9,82 \cdot 10^{-8}$            | $1,531 \cdot 10^{-6}$     | 1,262                      | 50                      |
| Temperatura              | 300 K             | CC                    | 0,06 K                 | B, k=2               | 0,03 K                  | $(-)3,453 \cdot 10^{-5}$        | $(-)1,036 \cdot 10^{-6}$  | 0,578                      | 50                      |
| Pulsos/rev               | 5000 Pulsos       | Escala                | 0,0002                 | B, rectang           | $1,155 \cdot 10^{-4}$ P | $(-)1,99 \cdot 10^{-6}$         | $(-)2,298 \cdot 10^{-10}$ | $2,844 \cdot 10^{-8}$      | 50                      |
| % de error               | 0,5               | CC                    | 0,27                   | B, k=2               | 0,135                   | $(-)1 \cdot 10^{-4}$            | $(-)1,35 \cdot 10^{-5}$   | 98,16                      | 50                      |

| Mensurado Y | Mejor estimado de Y [y]          |
|-------------|----------------------------------|
| Volumen     | $9,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| Incertidumbre estándar Combinada uc(y) | 0,137 |
|----------------------------------------|-------|

|                           |
|---------------------------|
| Grados de libertad efect. |
| 50                        |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Incertidumbre expandida U | 0,274 |
|---------------------------|-------|

### **3. DISEÑO DE CÁMARAS HÚMEDAS**

Producto del tratamiento dado a las variables de diseño en el capítulo anterior y a la construcción del prototipo de tambor de medición, se desarrolló una metodología que facilita el diseño de las cámaras húmedas, la cual puede ser aplicada en el diseño de medidores de cualquier tamaño.

#### **3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO**

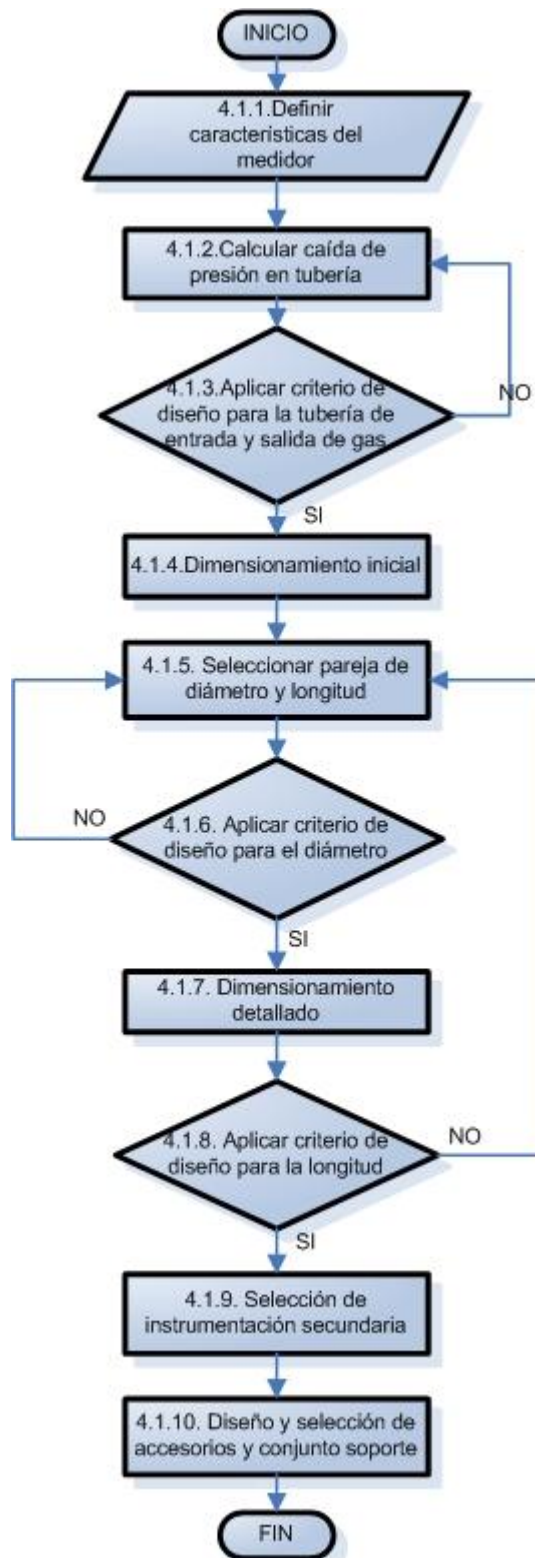
En la figura 57 se presenta un diagrama de flujo en el cual se resume el proceso de diseño, esta metodología cubre los aspectos relacionados con selección de material de construcción, dimensionamiento del tambor de medición, dimensionamiento de la tubería de entrada y salida de gas, selección de la instrumentación secundaria, selección de accesorios y conjunto de soporte. A continuación se dará la explicación y justificación de cada uno de estos pasos.

##### **3.1.1 Definir características del medidor**

El establecimiento de las características funcionales que se desean obtener finalmente en el medidor constituye el primer paso en el diseño, porque con ellas se establecen los parámetros en los cuales se basan las siguientes etapas de la metodología. Entre las características que se deben fijar están: el volumen por revolución, la presión máxima de entrada, la caída de presión máxima, el rango de caudal del medidor, tipo de gas a medir, tipo de líquido sellante y las características de la instrumentación secundaria.

Con base en las características que se han definido para el funcionamiento del medidor, se selecciona el tipo de material a utilizar para cada uno de los elementos. Los criterios que se deben tener en cuenta en la escogencia del material son: afinidad de los elementos contruidos con el líquido sellante y con el gas medido, disponibilidad del material en el mercado y costo del mismo, y por último para el

Figura 57 Metodología de diseño



tambor de medición se requiere que posea resistencia ante el posible ataque químico del líquido sellante o del gas, así como estabilidad dimensional, ya que este es el elemento primario de medición, y su volumen es quien fija la capacidad del medidor.

### **3.1.2 Calcular caída de presión en tuberías**

El cálculo de la caída de presión se realiza con la macro desarrollada en la sección 2.3.3, la misma es calculada para el caudal máximo del medidor y sirve como herramienta para determinar la forma y el tamaño de la tubería de entrada y salida de gas.

### **3.1.3 Criterio de diseño para la entrada y de salida de gas**

La caída de presión dentro de una cámara húmeda es un factor muy importante que afecta directamente el volumen medido, por lo tanto se debe establecer limite a la contribución hecha a la caída de presión por parte de la tubería de entrada y de salida. Con base en datos experimentales tomados de medidores tipo cámara húmeda comerciales, se establece un valor máximo de 0.5 [Pa] para la suma de caída de presión en dichas tuberías.

Este paso consiste en una iteración de los valores de diámetro y longitud (sección 3.1.2) hasta encontrar la configuración que satisfaga el criterio de caída de presión; cuando estén definidos estos valores se determina el diámetro y longitud mínimos necesarios para la ventana de entrada de gas al tambor, la cual esta ubicada en la parte trasera del tambor de medición; este valor permite establecer el limite inferior para el nivel de liquido.

### **3.1.4 Dimensionamiento inicial**

Este paso se lleva a cabo mediante la ejecución de la macro de Excel explicada en la sección 2.2.3. Se debe considerar la ubicación del nivel de líquido con base al

criterio de diseño desarrollado en la sección 2.4.3, con el fin de garantizar un funcionamiento uniforme para el tambor de medición.

El valor para los ángulos es seleccionado teniendo en cuenta el estudio hecho a las variables en la sección 2.3.2. Los valores de  $L_0$  de iteración y  $N_0$  de parejas son valores arbitrarios, seleccionados dependiendo de la cantidad de datos con los que se quiere contar para escoger la pareja de diámetro y longitud.

### **3.1.5 Seleccionar parejas de diámetro y longitud**

En este paso se selecciona una pareja de diámetro y longitud de las obtenidas en el dimensionamiento inicial, las cuales están consignadas en la hoja de resultados.

### **3.1.6 Criterio de diseño para el diámetro del tambor**

Cuando se selecciona una pareja de diámetro y longitud es necesario verificar que el nivel de líquido utilizado en el modelado, no se encuentre por debajo del radio mínimo seleccionado para la ventana de entrada de gas al tambor (sección 3.1.3); por tal motivo, y por seguridad se debe dejar un margen dentro del cual ubicar el nivel de líquido, así se cumple con el criterio de diseño para el tambor de medición y además la ventana no queda por encima del nivel de líquido. Este margen debe ser mayor a 5mm.

### **3.1.7 Dimensionamiento detallado**

El dimensionamiento inicial es un proceso muy extenso, por tal motivo en esta etapa no se tuvo en cuenta el volumen asimétrico de las cámaras de medición (sección 2.2.1.1); por consiguiente después que se ha verificado el cumplimiento del criterio de diseño para el diámetro del tambor de medición se debe realizar una nueva iteración para encontrar la longitud correspondiente, teniendo en cuenta ahora la asimetría de las cámaras y para un nivel de líquido ubicado en la mitad del rango seleccionado para tal fin en la sección 3.1.6.

### **3.1.8 Criterio de diseño para la longitud total del tambor**

El tercer criterio a aplicar en el diseño de un tambor de cámara húmeda es el correspondiente a la longitud del medidor, el cual verifica que la longitud total de las láminas sumada a la longitud de la cámara de entrada de gas no debe superar el valor correspondiente al diámetro del tambor. En caso de no cumplir con este requisito se debe repetir el proceso desde 3.1.4 a 3.1.7.

### **3.1.9 Selección de instrumentación secundaria**

La selección de la instrumentación se realiza en base a la estimación de la incertidumbre, la cual fue desarrollada en la sección 2.5, esta selección se realiza en base a la calidad de medición ofrecida por los elementos y su costo.

### **3.1.10 Diseño y selección accesorios y conjunto soporte**

El conjunto soporte lo conforman el exterior de la cámara húmeda y los accesorios, entre los cuales se cuentan los drenajes, el sistema para el ajuste del nivel de líquido, el conjunto de nivelación, el sello y los accesorios de entrada y salida de gas; la escogencia de esos sistemas se realiza en base a la comparación entre diferentes tecnologías y la conveniencia de utilización según el tamaño y material del medidor.

## **3.2 DISEÑO DE UN MEDIDOR CÁMARA HÚMEDA DE 10 LITROS POR REVOLUCIÓN**

A continuación se muestran los resultados producto de la aplicación de la metodología de diseño presentada en la sección 3.1, estos resultados proporcionan la información suficiente para realizar la construcción de los elementos del medidor, así como los requisitos para la compra de la instrumentación necesaria.

### **3.2.1 Características del medidor**

Las características más relevantes que se prevén obtener en el diseño están consignadas en la tabla 11; algunas de estas características como el volumen por revolución y la caída de presión máxima, deben ser comprobadas mediante pruebas y calibraciones después de finalizada la construcción.

**Tabla 11 Características proyectadas en el medidor**

| Características del medidor      | Valor         |
|----------------------------------|---------------|
| Volumen por revolución [L/rev]   | 10            |
| Presión máxima de entrada [mbar] | 50            |
| Caída de presión máxima [mbar]   | 2             |
| Caudal máximo [L/min]            | 40            |
| Caudal mínimo [L/min]            | 0.4           |
| Tipo de gas a medir              | aire, glp, gn |
| Tipo de líquido sellante         | agua          |
| Instrumentación secundaria       | electrónica   |

La selección de los materiales de construcción para los diferentes elementos del medidor se encuentran referenciados en la tabla 12, teniendo en cuenta los criterios expuestos para tal fin en la sección 3.1.1, la tabla contiene además el criterio utilizado para la selección de cada uno de ellos.

**Tabla 12 Materiales seleccionados para la construcción**

| Elemento           | Material              | Justificación                                         |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|
| Tambor de medición | Acero inoxidable 304  | Estabilidad dimensional y corrosión                   |
| Accesorios         | Acero inoxidable 304  | Corrosión por el gas medido o por el líquido sellante |
| Carcaza            | Acrílico transparente | Fines de investigación                                |
| Elementos de sello | Caucho                | Gran variedad en el mercado                           |

A continuación se presentan las características técnicas más relevantes de los materiales seleccionados, las cuales justifican su selección.

ü Acero inoxidable AISI 304

- Presenta buena resistencia a la corrosión.

- Buena soldabilidad, excepto con soldadura oxi-acetilénica.

#### ü Acrílico

- La materia prima para la fabricación del acrílico es el monómero de metil metacrilato.
- Es resistente químicamente a: los ácidos orgánicos como el cítrico, los inorgánicos como el sulfúrico (dependiendo de su concentración), compuestos básicos como el amoníaco, la soda cáustica (a bajas concentraciones), combustibles como el petróleo, gasolina, ACPM.
- Es atacado químicamente por: los compuestos clorurados como el tetracloruro de carbono, cloruro de metileno, o por los solventes orgánicos como los fenoles, cetonas, toluenos, bencenos y los acetatos en general.
- Posee excelente resistencia a la intemperie y a agentes atmosféricos por ser un polímero estable.

Otras propiedades ópticas, mecánicas y térmicas del acrílico están consignadas en la tabla 13.

**Tabla 13 Propiedades del acrílico**

| Propiedades                                   | Valor              |
|-----------------------------------------------|--------------------|
| Transmitancia de luz                          | 91% máximo         |
| Resistencia a la tensión                      | 9000 psi           |
| Modulo de elasticidad                         | 425000 psi         |
| Porcentaje de elongación a la rotura          | 2 mínimo           |
| Temperatura de deflexión bajo carga (264 psi) | 87°C               |
| Coeficiente de expansión lineal a 38°C        | 2,2-10,5 [cm/cm°C] |
| Porcentaje de variación de espesor            | 3,5% máximo        |
| Encogimiento                                  | 2,8% máximo        |
| Absorción de agua                             | 0,45% máximo       |

#### 3.2.2 Caída de presión en tuberías

Como se mencionó en la sección 2.3.3 la caída de presión esta calculada con base a una geometría específica, en la cual es posible realizar cambios a 6 variables

diferentes. La tabla 14 contiene los resultados para la pérdida de presión a la entrada (P ent) y pérdida de presión en la salida (P sal), para tres configuraciones de geometría diferentes; los diámetros utilizados en cada una de estas configuraciones corresponden al diámetro interno de tubería NPT estándar, así, configuración N°1 corresponde a un diámetro de ½", la N°2 a ¾" y la N°3 a 1", la longitud se conservó en las tres configuraciones para facilitar la comparación entre estas.

**Tabla 14 Caída de presión en tubería de entrada y salida de gas**

| Nº | Ø ent [mm] | Ø aux [mm] | Ø sal [mm] | L ent [mm] | L aux [mm] | Lsal [mm] | P ent [Pa] | P sal [Pa] | P total [Pa] |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|--------------|
| 1  | 15         | 15         | 15         | 60         | 60         | 60        | 1,644      | 0,63       | 2,274        |
| 2  | 20         | 20         | 20         | 60         | 60         | 60        | 0,52       | 0,2        | 0,719        |
| 3  | 25         | 25         | 25         | 60         | 60         | 60        | 0,213      | 0,08       | 0,295        |

La configuración de geometría seleccionada es la N°3, ya que es la única que cumple el criterio expuesto en la sección 3.1.3 para el diseño de la tubería de entrada y salida de gas.

Teniendo el diámetro y longitud de los accesorios, se establece la longitud y diámetro mínimos necesarios para la cámara de entrada de gas al tambor, estos valores mínimos están determinados por la facilidad con la cual se pueda realizar el montaje del tambor y los accesorios. Se estima que para la configuración dada, el diámetro mínimo de la cámara de entrada de gas es de 60mm y la longitud mínima de esta es de 25mm.

### 3.2.3 Dimensionamiento inicial

Con los valores registrados en la tabla 15 se llenan los campos solicitados por la macro para realizar el dimensionamiento inicial (sección 2.2.3).

**Tabla 15 Datos iniciales de iteración**

| Campo de la plantilla  | Valor     |
|------------------------|-----------|
| Volumen por revolución | 10 litros |
| Ángulo $\Theta$        | 4         |
| Ángulo $\lambda$       | 1         |
| Ángulo gama            | 5         |
| Lo para la iteración   | 150 mm    |
| Nº de parejas          | 10        |

Después de realizada la iteración entre la macro y Solid Edge se obtiene una tabla de resultados (tabla 16) con el número de parejas de diámetro y longitud especificado anteriormente.

**Tabla 16 Resultados de la iteración**

| Nº de pareja  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Longitud [mm] | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 | 230 | 240 |
| Diámetro [mm] | 311 | 301 | 292 | 284 | 276 | 269 | 262 | 256 | 251 | 245 |

Todas las parejas de la tabla cumplen con el criterio de diseño para el diámetro del tambor (sección 3.1.6), ya que 1/7 del diámetro del tambor es superior al radio de la ventana de entrada de gas al tambor, permitiendo además un rango de mas de 5mm en todas las parejas.

La pareja seleccionada para continuar la metodología y realizar el dimensionamiento detallado fue la N° 7, que corresponde a un diámetro de 262 mm con una longitud correspondiente de 210 mm.

### **3.2.4 Dimensionamiento detallado**

Para realizar el dimensionamiento detallado se conservan los valores de los ángulos (gamma, lamda y theta) utilizados en el dimensionamiento inicial, y se ingresan como diámetro y longitud la pareja seleccionada en el paso anterior. Para el nivel de líquido se selecciona un valor tal que se encuentre dentro del rango determinado por la escogencia del diámetro del tambor.

Como ya se estableció el nivel de líquido, se calcula el valor de los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  como se indica en la sección 2.2.1.1; en la tabla 17 se encuentran todos los datos que deben ser ingresados en la plantilla de la macro para proceder con el proceso iterativo del dimensionamiento detallado.

**Tabla 17 Datos de entrada para el dimensionamiento detallado**

| Campo de la plantilla  | Valor     |
|------------------------|-----------|
| Volumen por revolución | 10 litros |
| Ángulo Theta           | 4         |
| Ángulo Lamda           | 1         |
| Ángulo Gamma           | 5         |
| Diámetro               | 262 mm    |
| Longitud               | 210 mm    |
| Alfa 1                 | 33,88     |
| Alfa2                  | 56,12     |
| Nivel                  | 35 mm     |

El resultado final de la iteración dio como resultado la geometría que se encuentra en la tabla 18, en esta tabla se encuentra la información suficiente para realizar la construcción del tambor de medición que cumpla con los requisitos de volumen por revolución indicado en el primer paso de esta metodología.

**Tabla 18 Resultados del dimensionamiento detallado**

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| Diámetro [mm]         | 260   |
| Longitud nominal [mm] | 211,7 |
| Ángulo Gamma          | 5     |
| Ángulo Theta          | 4     |
| Ángulo Lamda          | 1     |
| Nivel [mm]            | 35    |

### 3.2.5 Instrumentación secundaria

La instrumentación secundaria proyectada para la cámara húmeda es electrónica, por lo tanto su selección se debe realizar mediante diferentes catálogos de cada uno de los elementos que se requieren, evaluando la conveniencia de utilización ya sea

por el resultado del análisis de incertidumbre o por el propósito trazado para cada uno de los instrumentos.

**ü Presión:**

Para la toma de presión del gas en las cámaras húmedas existen dos opciones, la utilización de un sensor manométrico o de un sensor de presión absoluta. El tipo de sensor seleccionado es el de presión absoluta, ya que de esta manera se puede realizar la corrección del volumen de condiciones normales a condiciones estándar sin necesidad de utilizar otro instrumento para medir la presión atmosférica, como ocurre si se utilizará un sensor manométrico.

El sensor de presión absoluta seleccionado debe cumplir con ciertos requisitos, como: tener un rango de presión adecuado para las condiciones de trabajo de la cámara húmeda (hasta 50 mbar) y que la exactitud del sensor corresponda a las necesidades de incertidumbre planteadas anteriormente para la presión. La tabla 19 presenta el resumen de las características técnicas del sensor seleccionado.

**Tabla 19 Datos técnicos del sensor de presión**

| Sensor de presión absoluta      |            |
|---------------------------------|------------|
| Rango [psi]                     | 0 - 15     |
| Excitación [Vdc]                | 8          |
| Salida [Vdc]                    | 1 a 6      |
| Compensado por temperatura [°C] | (-)18 a 63 |
| Tipo                            | (+/-) 0,5  |

**Figura 58 Sensor de presión**



#### ü Temperatura:

En la cámara húmeda se necesitan dos sensores de temperatura, uno para registrar el valor de temperatura del gas que esta siendo medido y otro para el líquido sellante; las opciones para la selección del sensor son: el termómetro de resistencia eléctrica (RTD) y el termopar.

La temperatura representa un factor muy importante en la incertidumbre de las cámaras húmedas, por tanto la escogencia del tipo de sensor se debe realizar en base a las características de exactitud de los instrumentos. El elemento seleccionado es la RTD ya que entre los diferentes métodos este es el mas exacto que hay para medición de temperaturas.

La denominación de los elementos seleccionados es RTD Pt100 (resistencia nominal de  $100\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$ ) de 3 hilos. Dada la ubicación de los sensores dentro del instrumento las RTD's son de diferente tamaño, una de 10" para el líquido sellante y otra de 2" para el gas; las RTD's tienen conexión de  $\frac{1}{4}$ " NPT para acoplarlas al medidor.

**Figura 59 RTD's**

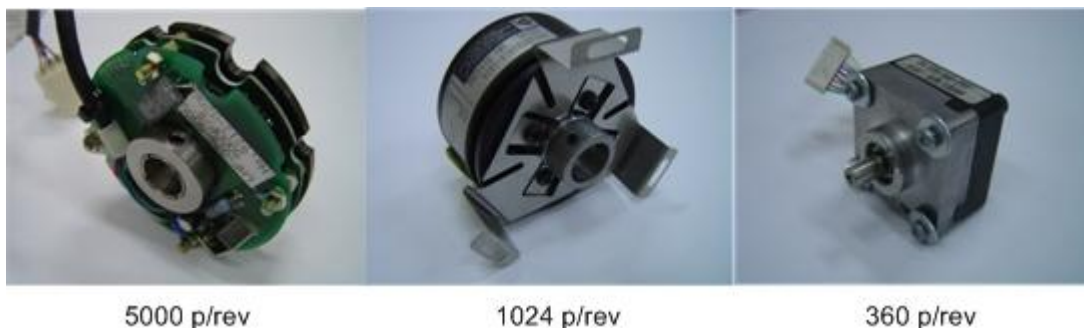


#### ü Registro de volumen:

La selección del encoder se refiere a la determinación del número de pulsos por revolución de este. Para la cámara húmeda se seleccionaron tres encoders con diferente resolución (figura 60), con el fin de realizar comparaciones en los

resultados de la medición. El diseño de la cámara y en especial de la carátula debe presentar flexibilidad para intercambiar los encoders.

**Figura 60 Encoders**



#### ü Adquisición de datos:

El sistema de adquisición de datos para la cámara húmeda debe realizar las siguientes funciones:

- Registro de la señal proveniente de la instrumentación secundaria mencionada anteriormente (sensor de presión, RTD y encoder).
- Procesamiento de la señal con el fin de realizar la corrección del volumen desde el estado a condiciones de medición, hasta unas condiciones predefinidas por el usuario (por ejemplo: condiciones estándar).
- Indicación del resultado de medición, con la posibilidad de mostrar el valor corregido, además de otras características de la medición como el volumen total desplazado y el caudal instantáneo y promedio.

La selección de este sistema se encamina a la obtención por parte del elemento de las funciones descritas anteriormente, teniendo en cuenta el bajo costo que este debe tener. A continuación se señalan las características relevantes del sistema seleccionado para adquisición de datos en la cámara húmeda:

- Tipo de control: Microprocesamiento por PIC de Microchip.
- Conversor Análogo a Digital de 12 Bits de rango variable.

- Pantalla de cristal Líquido de 4 x16 Caracteres.
- Teclado numérico de 16 botones Outdoor.
- Fuente de alimentación por baterías recargables.

**Figura 61 Elementos que conforman el display de la cámara húmeda**



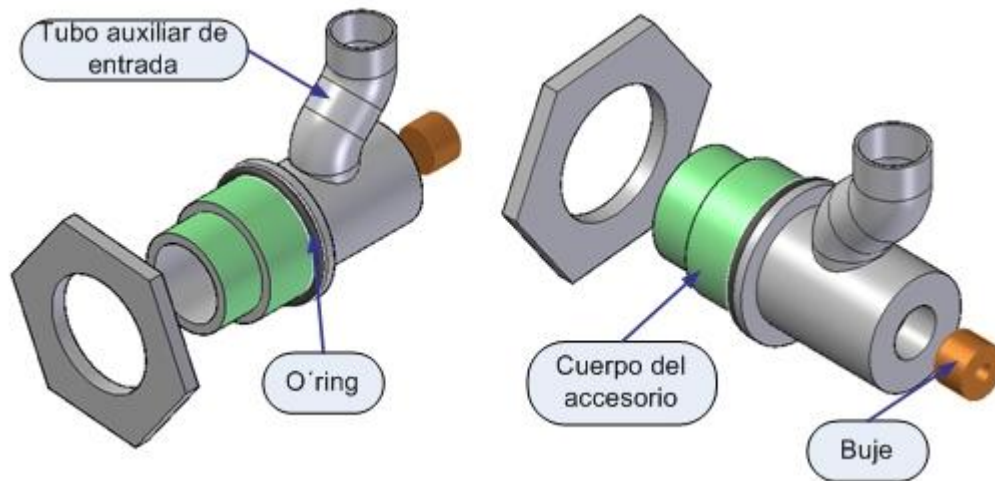
### **3.2.6 Accesorios y conjunto soporte**

#### **ü Accesorios de entrada y salida de gas.**

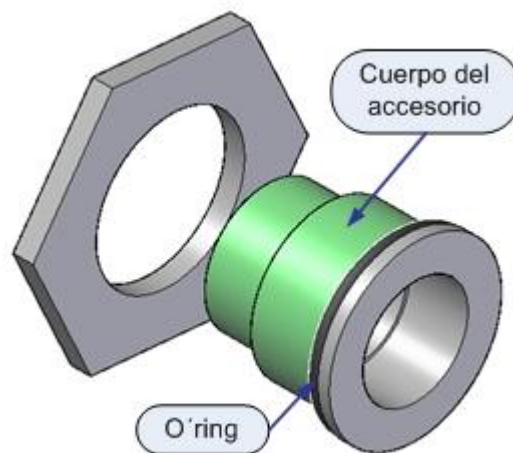
En el inicio del proceso de diseño se definió el tamaño (diámetro y longitud) que tendrán los accesorios de entrada y salida de gas, estos accesorios van acoplados al cuerpo en la parte trasera mediante una tuerca de sujeción (figuras 62 y 63), lo cual facilita el montaje de los accesorios en el medidor.

El accesorio de entrada de gas posee dos elementos muy importantes, el primero es el tubo de entrada de gas auxiliar, el cual se introduce dentro de la cámara de entrada de gas al tambor para permitir el llenado de las cámaras de medición; el otro elemento es un buje de bronce que sirve de apoyo al eje del tambor y facilita su rotación.

**Figura 62 Accesorio de entrada de gas**



**Figura 63 Accesorio de salida de gas**

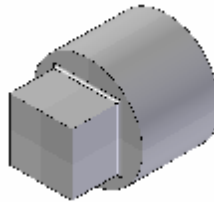


#### ü Drenajes.

Son dos los drenajes que se requieren en una cámara húmeda, drenaje grueso y drenaje fino; el primero es para vaciar totalmente el líquido sellante que se encuentra dentro del medidor, como esta operación no es muy frecuente durante el uso normal de las cámaras húmedas, se decidió utilizar para este drenaje un tapón estándar de ½" NPT, este tamaño es suficiente para lograr el vaciado de la cámara, en un tiempo prudencial; el accesorio donde se ubica el tapón se encuentra en la parte mas baja posible del tanque de almacenamiento de

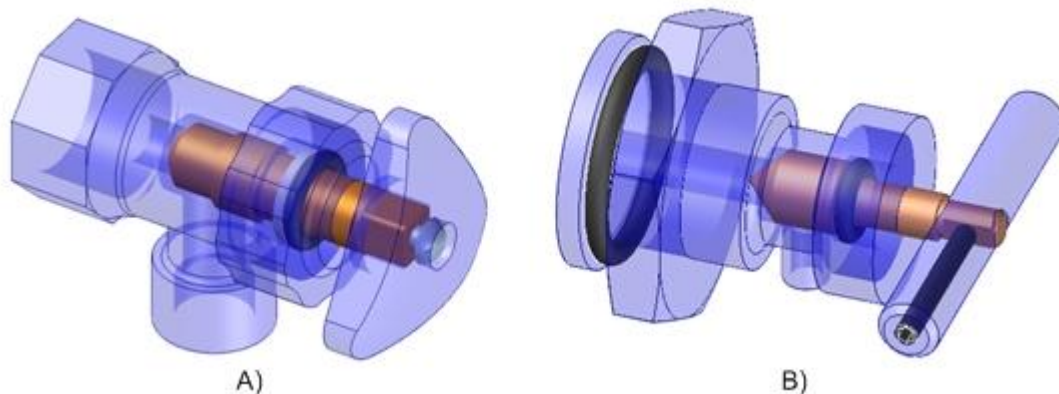
líquido, con el fin de realizar un vaciado completo de este; para sujetarlo al cuerpo se utiliza una tuerca como lo muestra la figura 64.

**Figura 64 Drenaje grueso**



En cuanto al drenaje fino se presentan dos opciones para escoger, una es la utilización de una válvula comercial con conexión estándar de ½" NPT (figura 65A), esta válvula es de material plástico lo cual la hace económica, pero presenta un problema en el montaje: la necesidad de utilizar de un conector unido al tambor exterior para roscar la válvula, la ubicación de este conector en un costado de la cámara constituye un riesgo para la manipulación de esta, ya que se puede romper fácilmente. La otra opción es la utilización de una válvula de drenaje en acero inoxidable, especialmente diseñada para acoplarse al tambor sin necesidad de conectores (figura 65B), dándole mayor robustez al conjunto; la desventaja de esta válvula es el costo de construcción.

**Figura 65 Válvula de drenaje**

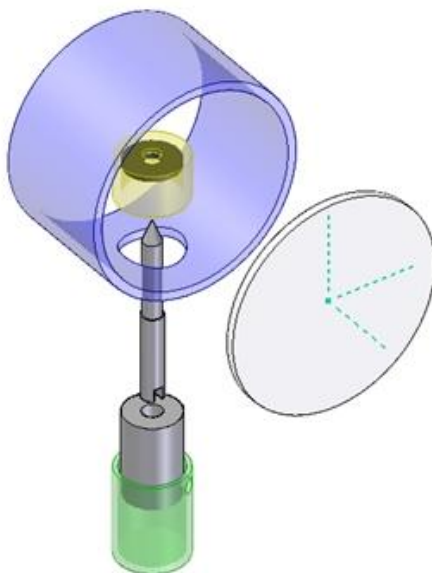


Por motivos económicos se utilizará en el presente diseño la válvula de plástico comercial, sin embargo no se descarta la utilización de la otra válvula en el futuro, ya que el reemplazo de una por otra es muy sencillo.

#### ü Ajuste del nivel de líquido.

Entre las tres opciones de sistemas de nivelación mencionados en el capítulo 1, el de aguja fue el escogido para su construcción por ser el método más preciso para la ubicación del nivel de líquido (figura 66). Este sistema consta de una aguja cuyo desplazamiento es ajustable mediante una rosca fina de 4mm, el paso correspondiente para esta rosca es de 0,5mm, valor con el cual se presenta sensibilidad suficiente para el ajuste del nivel de líquido. La aguja y los elementos que realizan el sello van sujetos al visor de nivel (el cual es hecho en acrílico transparente) mediante tuercas, y este visor a su vez va pegado al cuerpo de tal manera que no haya escape de gas o líquido sellante. Como el ajuste del nivel de líquido corresponde a la calibración del instrumento, es conveniente proteger la aguja para evitar que esta sea movida de su punto de calibración, para lo cual la tapa inferior esta provista de un agujero que permite su aseguramiento, de tal manera que no se pueda tener acceso a la aguja.

**Figura 66 Nivel de aguja**

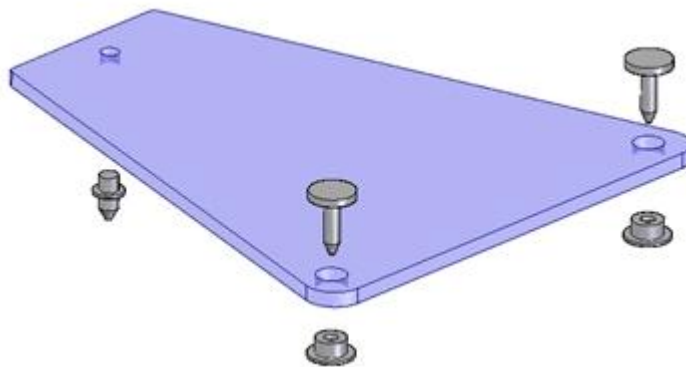


#### ü Sistema de nivelación.

Los apoyos reciben el peso total del medidor a través de la base plana del cuerpo, incluyendo también el peso del líquido sellante; por lo tanto su forma, tamaño y material deben ser seleccionado con el fin de soportar estas cargas y permitir un acople eficiente de los elementos al cuerpo del medidor.

Para el sistema de nivelación se utiliza un sistema con tres apoyos, dos de estos llevan rosca para realizar la nivelación y se ubican en la parte delantera para facilitar su manipulación; el tercer apoyo es fijo y se ubica en la parte posterior del medidor, en la figura 67 se muestra la forma de los elementos y la disposición adoptada en la base del medidor.

**Figura 67 Base y apoyos**



El tamaño de cada elemento debe estar sujeto a las propiedades mecánicas del material, pero para el caso estos valores se seleccionaron teniendo en cuenta la facilidad para la manipulación del sistema de nivelación y no los requerimientos mecánicos que puedan tener dichos elementos.

#### ü Sellos.

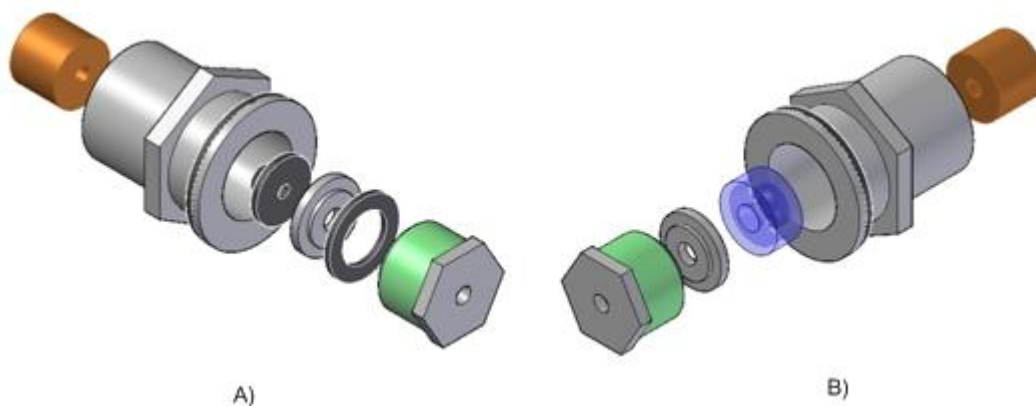
Por economía y funcionalidad son dos los posibles sistemas de sellado para las cámaras húmedas, el sistema de reten y el de sellos cónicos. Con el fin de realizar una evaluación posterior del desempeño de cada uno de estos sistemas,

se diseña un conjunto de sellado que tenga la flexibilidad para ubicar cualquiera de estos dos tipos de sello.

Los diámetros comerciales de retenes van de 3mm en adelante, por lo tanto el diseño del eje de salida del tambor debe ajustarse para poder utilizar un reten estándar, esto no presenta problema con el sello de caucho cónico, porque existe gran variedad de estos para seleccionar el adecuado.

Los montajes de conjunto para el sello cónico y el reten son mostrados en las figuras 68A y 68B respectivamente, este montaje permite asegurar por medio de una tuerca el cuerpo del sello al cuerpo del medidor. Este conjunto tiene en un extremo un buje bronce sobre el cual va apoyado el eje del tambor.

**Figura 68 Diferentes sistemas de sellado**

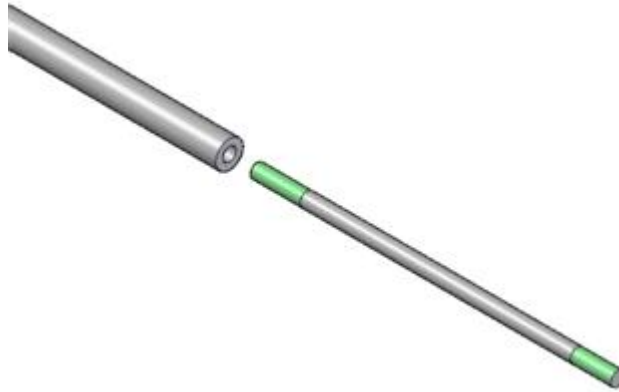


#### ü Eje de rotación del tambor.

El eje del tambor posee dos secciones de diferentes diámetros, la sección principal corresponde al diámetro mayor y es la que soporta el tambor de medición, esta sección se encuentra apoyada en los cojinetes de deslizamiento; la sección secundaria del eje corresponde al diámetro menor y es la que pasa a través del sello hasta el sistema de registro del volumen. El eje puede ser de una sola pieza, pero para facilitar el montaje es mejor utilizar el eje de dos secciones

las cuales se acoplan mediante una rosca izquierda, debido a que el giro del tambor es en sentido horario (figura 69).

**Figura 69 Eje de rotación del tambor**



El diámetro de la sección principal del eje es de 6mm, ya que sobre el solamente se encuentra montado el tambor de medición y su velocidad de giro no supera las 6 rpm, asumir un diámetro mayor sería con el fin de evitar que el eje se pandee como consecuencia de los procedimientos de montaje y desmontaje del tambor.

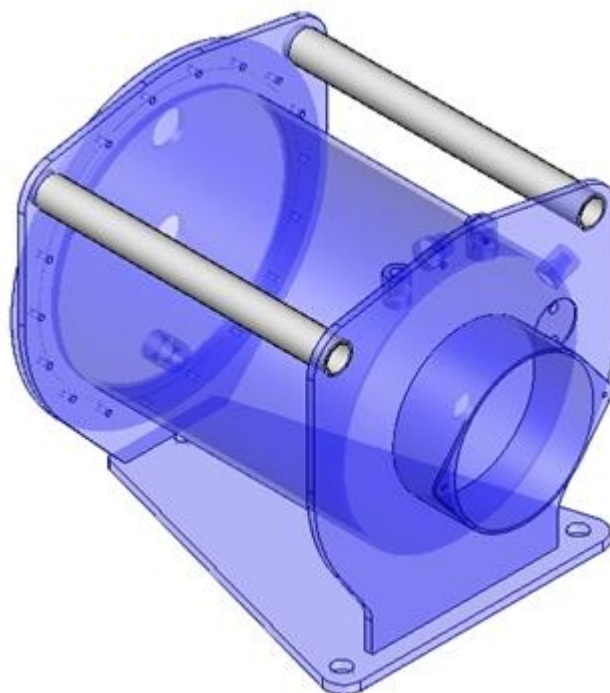
El diámetro de la sección secundaria se selecciona con base en el reten del conjunto de sellado. Debido a que el diámetro nominal de un reten es un poco mayor que el diámetro interno de este, se debe seleccionar un diámetro de eje con el cual la interferencia entre este y el diámetro interno del reten sea menor a la cual esta diseñado, con el fin agregarle el menor torque resistivo posible al eje. Con un reten de 4mm de diámetro interno nominal se tiene un diámetro interno real de 3.5mm, por tanto el diámetro del eje debe ser 3.8mm para tener una interferencia diametral aproximada de 0,3mm.

#### **ü Cuerpo del medidor**

Cuando se están determinado las dimensiones y forma del cuerpo se debe tener en cuenta que en ella se acoplan todos los demás sistemas, por otro lado, el material seleccionado para la construcción de este no permite realizar uniones

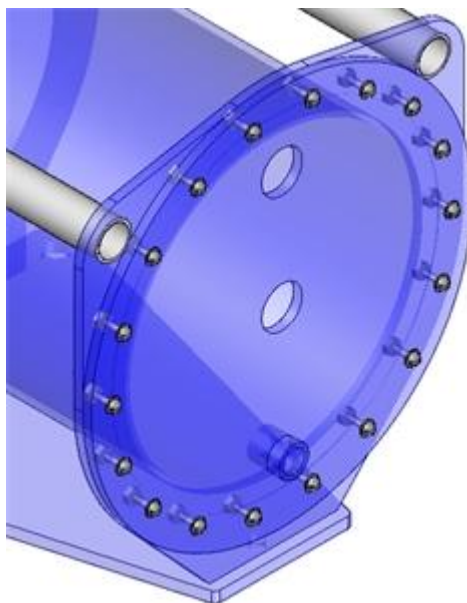
robustas entre los elementos que la conforman, por tanto el diseño debe ser tal que permita el acople organizado de todos los elementos y que además de soporte a la estructura. La función de las manijas es permitir el transporte de la cámara mediante la sujeción de estas, pero además son las encargadas de darle la rigidez necesaria al conjunto.

**Figura 70 Partes que conforman el cuerpo del medidor**



Para facilitar el montaje y desmontaje de la cámara húmeda, el diseño de la tapa trasera permite que esta se asegure al cuerpo mediante tornillos, 18 en total, sobre esta tapa son ubicados los accesorios de entrada y salida de gas junto con el drenaje grueso de la cámara, entre la tapa y el cuerpo se debe ubicar un oring con el tamaño suficiente para que evite escapes de gas y líquido entre estos dos. La figura 71 muestra el montaje que presenta esta tapa, junto con la ubicación de los diferentes accesorios acoplados a ella.

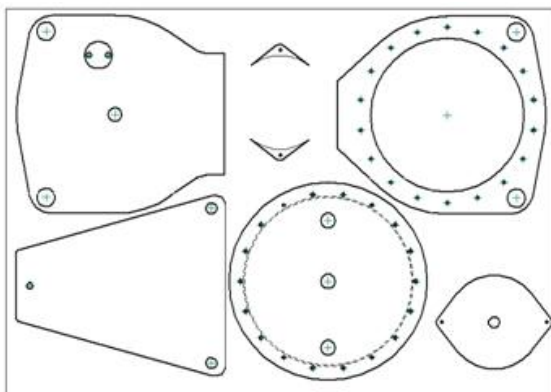
**Figura 71 Tapa posterior**



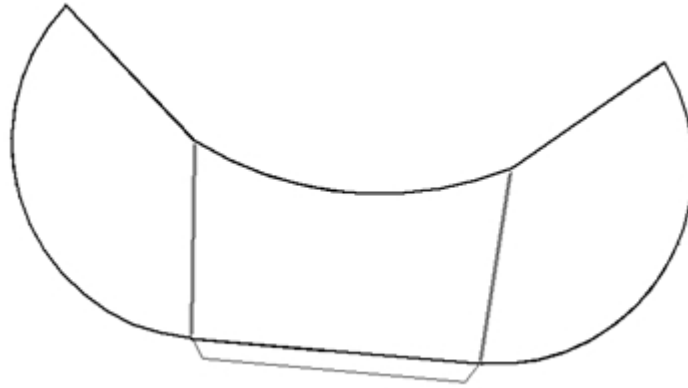
### **3.3 MODELADO EN TRES DIMENSIONES, GENERACIÓN DE PLANOS Y PLANTILLAS**

Todos los elementos descritos en la sección anterior, están detallados en los planos anexos; para el proceso de construcción del tambor y de los elementos que conforman el cuerpo de acrílico, es necesario suministrar al personal encargado de la manufactura plantillas de los elementos, para facilitar su construcción, las figuras 72 y 73 son ejemplos de estas plantillas.

**Figura 72 Plantillas para los cortes del acrílico**



**Figura 73 Plantilla de la lámina de acero inoxidable del tambor**



## **4 CONSTRUCCIÓN**

La etapa posterior al diseño es la materialización del mismo, para lo cual se requiere la selección del lugar adecuado para la elaboración de cada uno de los elementos que lo conforman, teniendo en cuenta para su escogencia la calidad en el desarrollo de los procesos y las garantías que respalden el trabajo.

### **4.1 CONSTRUCCIÓN DEL TAMBOR DE MEDICIÓN**

#### **4.1.1 Selección del taller**

Para la construcción del tambor de medición se requiere un taller de metalmecánica que cuente con las herramientas necesarias para realizar los procesos de construcción (corte, doblado, soldado, etc.), teniendo en cuenta además que las opciones deben estar en el área metropolitana de Bucaramanga, con el fin de utilizar mano de obra de la región lo cual constituye uno de los objetivos planteados en el proyecto.

**Figura 74 Metalteco Ltda.**



En el proceso de búsqueda del lugar indicado la principal dificultad es la ubicación en un mismo lugar de los diferentes procesos de construcción, lo cual reduce

considerablemente el grupo de opciones. Entre este conjunto se encuentra Metalteco Ltda. (figura 74), quienes cuentan con gran experiencia en el sector metalmecánico, y cuentan con certificación ISO 9001:2000, brindando de esta manera las garantías necesarias para la construcción en lo que a calidad en la mano de obra y cumplimiento se refiere. En cuanto a costos Metalteco presenta también la mejor opción en referencia a los demás talleres consultados.

#### **4.1.2 Suministro de material**

La lámina requerida para la construcción del tambor es de acero inoxidable 304 calibre 26, la cual no es suministrada por ninguna importadora de acero con sucursal en Bucaramanga, por tal motivo fue necesario solicitar el producto a Imporinox Ltda. con sede principal en Cali; el estado de suministro de la lámina ofrecida por Imporinox es en rollo de 1m de ancho.

#### **4.1.3 Proceso de construcción**

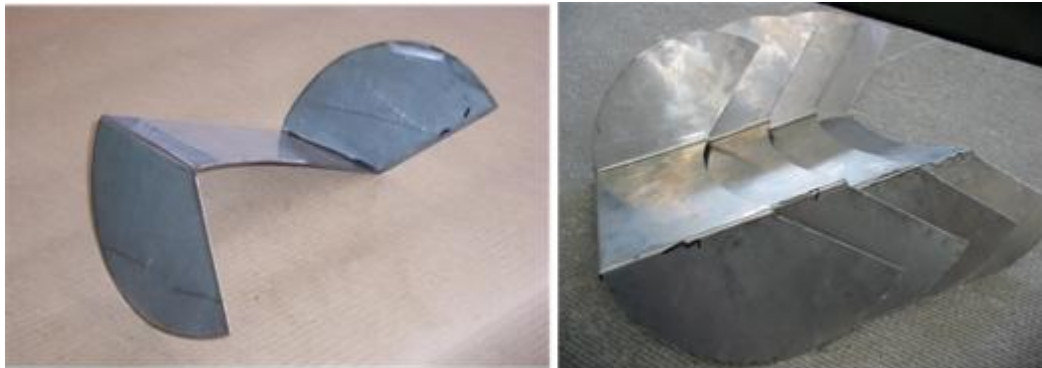
- ü Corte: requiere inicialmente el trazado sobre la lámina de los elementos a cortar, para las láminas internas se cuenta con plantillas para el trazado que permiten definir los detalles de estas; para el tambor exterior y la tapa trasera no se cuenta con plantillas dada la simplicidad de su geometría.

**Figura 75 Sección de trazado, corte y dobléz**



- ü Doblado: Las plantillas cuentan con una línea auxiliar la cual sirve de referencia para realizar el doblado, el ángulo de doblado corresponde al ángulo  $\lambda$ . Son cuatro láminas idénticas las que se deben construir.

**Figura 76 Láminas dobladas**



- ü Curvado: Para realizar el curvado del cilindro que forma el tambor exterior, se debe realizar un pre-curvado a la lámina con el fin de aproximar más la forma circular que este tambor posee. Con respecto a la tapa trasera el curvado se realiza por deformación de la lámina mediante una fuerza aplicada por una prensa hidráulica.

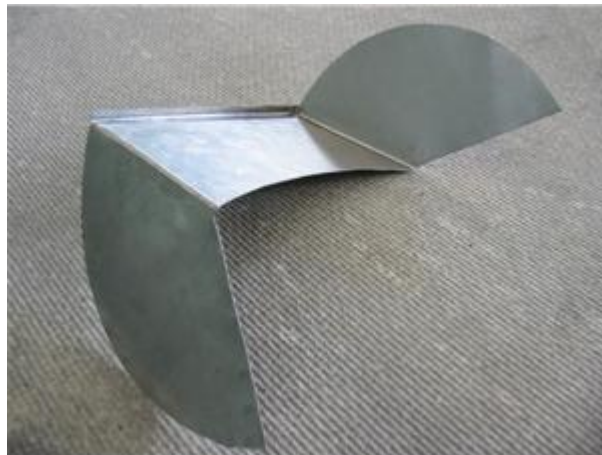
**Figura 77 Curvado para el cilindro y la tapa trasera**



- ü Soldadura: La construcción del tambor requiere dos procesos de soldadura, uno para ubicar las láminas dentro del tambor y darle soporte y el otro para realizar

el sello de cada cámara de medición. Las láminas son pegadas al tambor mediante soldadura de punto, para lo cual cada lámina esta provista de una aleta como extensión del plano longitudinal (figura 78). Las láminas son soldadas al tambor exterior mediante soldadura de estaño de referencia 30/70; la soldadura de láminas de acero inoxidable demanda especial cuidado con la limpieza de las superficies a unir, de lo contrario la aplicación del estaño provocará poros en las uniones soldadas. Cada lámina debe ser soldada al tambor exterior en tres bordes diferentes como lo muestra la figura 86, por tal motivo se debe seguir un orden en el proceso, para evitar dejar algún borde oculto que no pueda ser soldado.

**Figura 78 Proceso de soldadura**



- ü Balanceo estático: Dada la geometría irregular de las láminas y los cordones de soldadura aplicados en los bordes de estas, se presenta un desbalanceo del tambor con respecto a su eje central, el cual debe ser corregido ya que este ocasiona un comportamiento irregular del medidor, el cual es muy notorio a bajos caudales. El mecanismo utilizado para realizar el balanceo es el mostrado en la figura 79.

**Figura 79 Tambor de medición**



## **4.2 CONSTRUCCIÓN DEL CUERPO**

### **4.2.1 Selección del taller**

La manufactura de elementos de acrílico en Bucaramanga cuenta con cerca de 30 años de desarrollo, por tal motivo encontrar el lugar adecuado para la construcción del cuerpo de la cámara húmeda, en donde se den garantías en la construcción y cumplimiento en el desarrollo del trabajo es menos complicado que con el tambor de medición.

**Figura 80 Formacryl Ltda.**



Escoger el lugar de construcción tiene entonces como fundamento la evaluación de los costos de fabricación, ya que las condiciones de garantía propuestas por los diferentes talleres consultados son similares. El lugar escogido para la construcción de los elementos en acrílico es Formacryl Ltda., quienes cuentan con gran experiencia en el sector, y que proporcionan las mejores condiciones económicas para la construcción.

#### **4.2.2 Suministro de material**

La lámina de acrílico con las características especificadas en la sección 3.2.1 es suministrada por Inacril Ltda. (Bogotá), quienes garantizan lámina de monómero de metil metacrilato 100% virgen, importado, el estado de suministro es lámina lisa de 120x180 cm, en los calibres requeridos de 3, 5 y 8mm.

#### **4.2.3 Proceso de construcción**

ü Corte: La geometría que conforma el cuerpo incluye formas y dimensiones que deben ser conservadas con el fin de garantizar su correcto funcionamiento; para lograr este objetivo se emplean plantillas en el corte del acrílico, que permiten reproducir con el mínimo error el diseño de los elementos en la lámina de acrílico.

**Figura 81 Partes de acrílico cortadas**



- ü Deformación térmica: Este proceso es utilizado para darle forma a los elementos cilíndricos que conforman la cámara húmeda, como: el tambor principal de almacenamiento de líquido, el cilindro que conforma la carátula y el cilindro donde se ubica la aguja de nivelación. El proceso consiste en el calentamiento de la lámina de acrílico en un horno y mediante la utilización de un molde (figura 82A), se da la forma cilíndrica a la lámina, figura 81B.

**Figura 82 Curvado de cilindros en acrílico**



- ü Pegado

**Figura 83 Proceso de pegado del cuerpo**



La unión de las piezas de acrílico se realiza mediante la aplicación de un líquido llamado “Cloruro de metileno”; el pegante líquido no es suficiente cuando la unión es expuesta a un líquido, por tal motivo se debe utilizar un elemento

sellante en polvo denomina “Acril”, que además de realizar sello contra líquido proporciona más rigidez al elemento pegado.

### **4.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ACCESORIOS**

#### **4.3.1 Selección del taller**

La gran cantidad de elementos que constituyen los accesorios y el detalle requerido en estos requiere mano de obra calificada, para lo cual fue seleccionado el taller de mecánica fina de la Corporación para la Investigación en Corrosión (CIC), cuyas instalaciones se encuentran en el Parque Tecnológico sede UIS Guatiguará (Piedecuesta, Santander).

#### **4.3.2 Suministro de material**

El material para la construcción de los accesorios es acero inoxidable 304, cuyo estado de suministro son barras redondas de diferentes diámetros; entre diferentes empresas comercializadoras de acero inoxidable, la Compañía General de Aceros S.A. en sus existencia posee gran variedad de diámetros para este material, por tal motivo y con el objetivo principal de obtener garantías en la obtención de acero con las características físicas y de composición requeridas, es la fuente de suministro escogida para el material de los accesorios de la cámara húmeda.

#### **4.3.3 Proceso de construcción**

- ü Torneado: La mayoría de accesorios diseñados para la cámara húmeda son cilíndricos, por tanto el torno es una herramienta fundamental en su elaboración.
- ü Roscado: Para no exigir mecánicamente el cuerpo de acrílico y permitir un acople rápido y fácil de los accesorios a esta, se requiere la utilización de conjuntos que utilicen roscas y tuercas como mecanismos de fijación.

#### 4.4 ENSAMBLE FINAL

El montaje final del medidor toma el aspecto mostrado en la figura 84, en el se distinguen los distintos elementos contruidos; debido al material transparente del cuerpo del medidor se observa en la parte interna de este el tambor de medición; el montaje cuenta además con la instrumentación secundaria (sensor de presión, RTD´s y encoder).

**Figura 84 Ensamble final del medidor**



## **5 CALIBRACIÓN Y PRUEBA**

### **5.1 CALIBRACIÓN**

La calibración de las cámaras húmedas consiste en la ubicación del nivel de líquido de tal forma que el ancho de banda para el porcentaje de error del medidor no supere el rango de  $\pm 1\%$ , este rango es una recomendación de laboratorios internacionales reconocidos, tales como NIST (National Institute of Standards and Technology), PTB (Physikalisch – Technische Bundesanstalt), IPT (Instituto de Pesquisas Técnicas de Brasil) y CENAM (Centro Nacional de Metrología de México), ya que no existe ningún tipo de norma que fije los parámetros y requerimientos para la calibración de este tipo de medidores.

A continuación se describen los elementos y la metodología utilizada por el CDT de GAS (Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas) para realizar la calibración en cámaras húmedas, esta metodología fue la seguida para calibrar la cámara húmeda construida.

#### **5.1.1 Equipo utilizado**

El patrón primario utilizado para la calibración es la campana gasométrica<sup>25</sup> del CDT de GAS (figura 85), cuya capacidad volumétrica es de 300 litros y maneja un rango de medición de caudal para pruebas de 0,016 a 25 m<sup>3</sup>/h; la utilización de este instrumento es posible ya que el rango de medición de la cámara húmeda se encuentra dentro del rango de prueba de la campana gasométrica. La campana cuenta con la instrumentación calibrada por la superintendencia de industria y comercio y por tanto tiene trazabilidad a este ente gubernamental.

---

<sup>25</sup> Ver apéndice B

**Figura 85 Campana gasométrica CDT de GAS**



El montaje de la campana cuenta con un arreglo de 7 válvulas (figura 86), mediante el cual se definen los caudales de prueba del medidor.

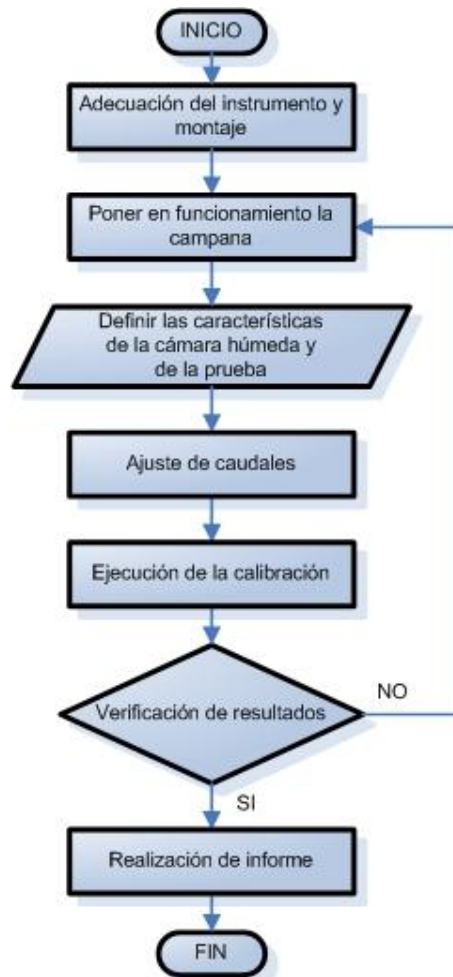
**Figura 86 Arreglo de válvulas**



### **5.1.2 Metodología de calibración**

La figura 87 resume el procedimiento de calibración de cámaras húmedas seguido por el laboratorio del CDT de GAS.

**Figura 87 Metodología de calibración de cámaras húmedas**



- ü Adecuación del instrumento y montaje: Esta primera etapa comprende la revisión de la nivelación de la cámara húmeda, el ajuste de un nivel inicial de líquido sellante y la realización del montaje de los ductos de gas y de los sensores de presión y temperatura.
- ü Poner en funcionamiento la campana: Esta etapa cubre el aspecto de verificación de las condiciones ambientales en el cuarto de la campana.
- ü Definir las características de la cámara húmeda y de la prueba: Las características que se deben fijar para la cámara húmeda son el volumen por

revolución, el caudal máximo, el caudal mínimo y el volumen cíclico. Para la prueba en general se deben definir el número de caudales en los que se va a probar al medidor y el número de repeticiones de la prueba para cada caudal.

- ü Ajuste de caudales: El acondicionamiento del caudal se realiza por medio de las válvulas reguladoras, dependiendo el número de caudales que definidos se realiza el ajuste para el mismo número de válvulas.
- ü Ejecución de la calibración: Esta etapa es realizada automáticamente hasta culminar la calibración, incluye: purga, sincronización y ajuste de la posición de la campana, y estabilización del sistema.
- ü Verificación de resultados: La verificación de los resultados se realiza mediante el análisis del porcentaje de error, la repetibilidad de los datos y el valor de la incertidumbre declarado durante la calibración. En caso tal que los datos no sean satisfactorios se realiza nuevamente la prueba.
- ü Informe de calibración: Es la última etapa del proceso de calibración. En el informe se consignan los resultados obtenidos y los datos más relevantes de la calibración.

### **5.1.3 Resultados de calibración**

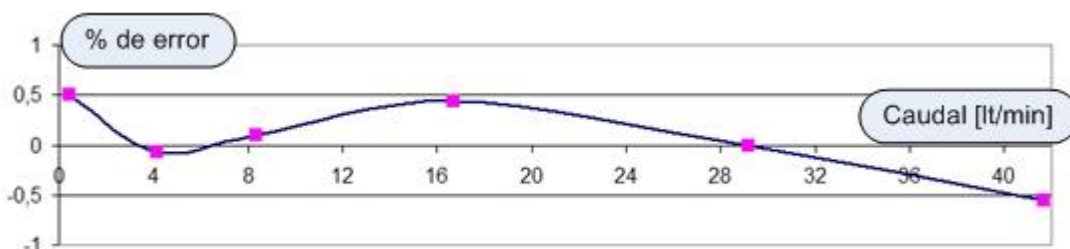
Los datos más importantes resultado de la calibración de la cámara húmeda se registran en la tabla 20, en ella se presentan el porcentaje de error, la desviación estándar y la incertidumbre del error para 6 caudales de prueba, seleccionados con respecto al caudal máximo y mínimo según la capacidad operativa definida para el medidor, estos caudales son establecidos por el procedimiento de calibración utilizado en el laboratorio. La calibración se realizó con tres pruebas para cada uno de los caudales, con el fin de evaluar la repetibilidad del instrumento.

La curva de desempeño que corresponde a dicha calibración es la mostrada en la figura 88.

**Tabla 20 Resultados de calibración**

| Caudal referencia | Caudal dm <sup>3</sup> /min | Error % | Desviación estándar % | Incertidumbre U % |
|-------------------|-----------------------------|---------|-----------------------|-------------------|
| Q min             | 0,417                       | 0,5     | 0,318                 | 0,55              |
| 0,1*Qmax          | 4,167                       | -0,076  | 0,035                 | 0,46              |
| 0,2*Qmax          | 8,333                       | -0,1    | 0,032                 | 0,46              |
| 0,4*Qmax          | 16,667                      | -0,434  | 0,036                 | 0,46              |
| 0,7*Qmax          | 29,167                      | -0,009  | 0,043                 | 0,46              |
| Qmax              | 41,667                      | -0,551  | 0,267                 | 0,49              |

**Figura 88 Curva de error cámara húmeda 10 litros /rev**



Teniendo en cuenta que la instrumentación de la cámara es de naturaleza eléctrica, las correcciones de volumen o caudal las puede realizar con gran facilidad el sistema de procesamiento de las señales, utilizando para tal fin la curva de error presentada para el medidor en la figura 88; mediante este procedimiento es posible indicarle automáticamente al usuario una medición corregida por el error, para unas condiciones de presión y temperatura que él ha establecido.

#### ü Repetibilidad<sup>26</sup>

La desviación estándar del error producto de la dispersión de los datos durante las tres pruebas hechas para cada caudal, representan la repetibilidad de la cámara húmeda, que es la capacidad de decir siempre lo mismo. Por tanto los resultados obtenidos durante la calibración confirman a la cámara húmeda de 10 litros por revolución como un patrón secundario para la medición de flujo de gases, teniendo en cuenta que su comportamiento como patrón se restringe a

<sup>26</sup> Ver apéndice B, sección B.3.1.

los caudales superiores a  $0,1 \cdot Q_{\max}$ , dada su repetibilidad e incertidumbre a caudales más bajos.

## **5.2 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE**

Después de realizada la calibración, obteniendo un error de medición con una incertidumbre asociada, se estima la incertidumbre con la cual mide la cámara húmeda, teniendo en cuenta la incertidumbre aportada por la instrumentación secundaria. El procedimiento es el mismo descrito en la sección 2.5.2, el archivo Mathcad asociado al desarrollo de éste es “Incertidumbre final”. En la tabla 21 se encuentra el resumen de los datos importantes en esta estimación de incertidumbre.

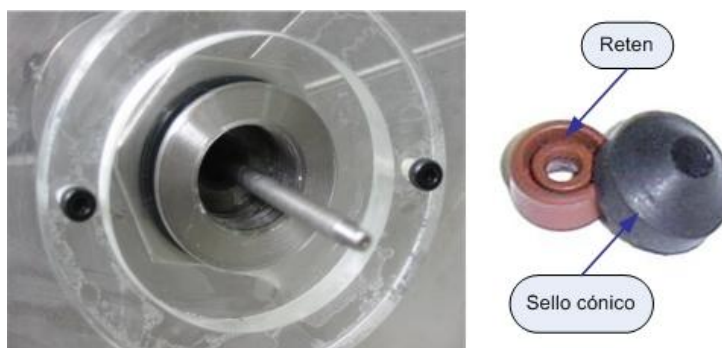
Las mediciones hechas con esta cámara húmeda proporcionan una incertidumbre en el error de 0,494%.

## **5.3 PRUEBAS**

### **5.3.1 Torque resistivo causado por el sello**

El sistema de sellado fue diseñado para poder ubicar dos tipos de sello, el sello de caucho cónico y el reten, con el fin de determinar cual de estos dos sistemas presenta mayor torque resistivo, ya que menor restricción del movimiento del tambor se representa en menor caída de presión. La figura 89 muestra la cavidad donde se ubican los sellos y los dos tipos de sello.

**Figura 89 Dos tipos de sello**



Para determinar el torque generado por cada uno de los sistemas se utiliza un torquimetro digital, el cual permite leer el pico máximo de torque presentado en el eje producto de la resistencia a la rotación (figura 90), la lectura hecha por el instrumento tiene unidades de lb-in.

**Figura 90 Torquimetro digital**



Se realizaron lecturas de torque para tres condiciones diferentes sin líquido sellante, para cuando no se tiene sello, para cuando se tiene el sello cónico y para cuando se monta el reten; adicionalmente se realizó la lectura del torque para cuando la cámara húmeda está con líquido sellante. Las lecturas se hicieron para cuatro posiciones diferentes del tambor de medición, para poder comparar entre ellas, ya que las diferencias son muy pequeñas; las lecturas de torque están consignadas en la tabla 22.

**Tabla 21 Estimación de la Incertidumbre final de la Cámara Húmeda**

| Fuentes de incertidumbre   | Cuantificación    |                       |                        |                      | Reducción                    | Combinación                     |                           |                            | Incertidumbre expandida |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Magnitudes de entrada {Xi} | Valor estimado xi | Fuente de información | Incertidumbre original | Tipo de distribución | Incertidumbre estándar u(xi) | Coeficientes de sensibilidad ci | Contribución ui(y)        | Porcentaje de contribución | Grados de libertad      |
| Presión                    | 101000 Pa         | CC                    | 150 Pa                 | B, rectang           | 86,603 Pa                    | $9,82 \cdot 10^{-8}$            | $8,504 \cdot 10^{-6}$     | 11,968                     | 50                      |
| Temperatura                | 300 K             | CC                    | 0,1 K                  | B, k=2               | 0,05 K                       | $(-)3,453 \cdot 10^{-5}$        | $(-)1,727 \cdot 10^{-6}$  | 0,493                      | 50                      |
| Pulsos/rev                 | 5000 Pulsos       | Escala                | 0,0002                 | B, rectang           | $1,155 \cdot 10^{-4}$ P      | $(-)1,99 \cdot 10^{-6}$         | $(-)2,298 \cdot 10^{-10}$ | $8,738 \cdot 10^{-8}$      | 50                      |
| % de error                 | 0,5               | CC                    | 0,46                   | B, k=2               | 0,23                         | $(-)1 \cdot 10^{-4}$            | $(-)2,3 \cdot 10^{-5}$    | 87,539                     | 50                      |

| Mensurado Y | Mejor estimado de Y [y]          |
|-------------|----------------------------------|
| Volumen     | $9,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| Incertidumbre estándar Combinada uc(y) | 0,247 |
|----------------------------------------|-------|

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Incertidumbre expandida U | 0,494 |
|---------------------------|-------|

|                           |
|---------------------------|
| Grados de libertad efect. |
| 50                        |

**Tabla 22 Torque resistivo ocasionado por el sello**

| Posición        | Condición |           |           |             |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|                 | sin sello | con sello | con reten | con líquido |
| 1               | 0,30      | 0,55      | 0,53      | 1,23        |
| 2               | 0,31      | 0,66      | 0,56      | 1,25        |
| 3               | 0,25      | 0,49      | 0,50      | 1,18        |
| 4               | 0,34      | 0,50      | 0,47      | 1,14        |
| <b>Promedio</b> | 0,30      | 0,55      | 0,52      | 1,20        |

mediante el análisis de las lecturas obtenidas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- ü El torque generado por el sello cónico es un poco superior al presentado con el reten, por tanto su selección no depende del torque resistivo, como se suponía en un comienzo.
- ü El mejor sistema de sello para las cámaras húmedas es el reten, ya que estos elementos son comerciales y vienen en tamaños estándar, por tanto conseguir repuestos es mas sencillo.
- ü De los valores promedio para el torque resistivo y utilizando como sello el reten, se obtiene una contribución del torque resistivo distribuido de la siguiente manera: 56,7% para el líquido sellante, 25% para la inercia del tambor y 18,3% para el reten.

## RECOMENDACIONES

- ü Para la selección del instrumento de presión se recomienda la utilización de un sensor de tipo manométrico, ya que la utilización de sensores del tipo barométrico como el seleccionado para esta cámara, no se consigue la resolución requerida, lo cual se representa en una mayor incertidumbre
- ü Con el fin de garantizar la operabilidad a largo plazo del instrumento, se recomienda la implementación de pruebas de durabilidad a este, las cuales deben incluir la operación bajo condiciones máximas de presión y caudal.
- ü Se debe realizar un estudio desde el punto de vista ergonómico, de los diferentes elementos que conforman la cámara húmeda, para de esta manera determinar modificaciones al diseño, que brinden facilidad de operación y seguridad al usuario del instrumento.
- ü Se recomienda realizar la aplicación de la metodología de diseño desarrollada, para la obtención de medidores con diferente capacidad al construido en el presente proyecto, con lo cual se logrará depurar dicha metodología y garantizar mejoramiento continuo en el proceso.

## CONCLUSIONES

- ü El diseño de un medidor de gas tipo cámara húmeda se define por: el dimensionamiento del tambor de medición, la selección de los accesorios y la selección de instrumentación secundaria.
- ü El dimensionamiento del tambor de medición se logra mediante el establecimiento adecuado de variables como: el diámetro y la longitud del tambor, los ángulos de inclinación de las láminas internas, en conjunto con la correcta determinación del nivel de líquido.
- ü El nivel de líquido es la variable más importante en el diseño de un medidor de gas tipo cámara húmeda, ya que de la correcta fijación de este dependen características del medidor como la repetibilidad y la exactitud.
- ü La caída de presión en el accesorio de entrada de gas, define el tamaño de este, y además establece el límite inferior para la ubicación del nivel de líquido.
- ü El criterio principal de diseño para el dimensionamiento del tambor de medición se basa en la escogencia del nivel de líquido en función del diámetro del tambor.
- ü El ángulo doblado de los puertos en las láminas del tambor y el nivel de líquido, son las dos variables que mayor incidencia tienen sobre la caída de presión a través del medidor
- ü La humedad relativa no es un factor a tener en cuenta en el análisis de incertidumbre de las cámaras húmedas, ya que esta provoca una disminución en el error de medición pero un aumento en la incertidumbre, condición desfavorable para las cámaras húmedas desde el punto de vista metrológico.

- ü De los instrumentos que conforman la instrumentación secundaria, la presión es la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre de las cámaras húmedas.
- ü En la construcción del tambor de medición se debe tener especial cuidado con el proceso de soldadura de las láminas al tambor de medición, ya que de este proceso depende la hermeticidad de las cámaras de medición.
- ü El balanceo estático del tambor de medición proporciona uniformidad de movimiento durante el funcionamiento, siendo esta característica una influencia muy importante en la repetibilidad del medidor.
- ü Como resultado de este proyecto se obtuvo por primera vez en el país, el diseño y construcción de un medidor de gas tipo cámara húmeda con una capacidad volumétrica de 10 litros por revolución, para un rango de operación de 0,416 litros/min a 41,66 litros/min. contribuyendo de esta manera al desarrollo de la metrología del gas en Colombia.
- ü La calibración de la cámara húmeda fue realizada mediante el patrón de volumen (campana gasométrica) del CDT de GAS. Las características metrológicas demostradas durante la calibración acreditan a este medidor tipo cámara húmeda como patrón secundario para la medición de flujo de gases.
- ü La ventaja económica que ofrece el diseño y construcción de las cámaras húmedas con recursos humanos y técnicos nacionales, frente a los instrumentos del mismo tipo importados, además de la calidad metrológica obtenida en la calibración, generan una alternativa viable para la comercialización de este tipo de medidores.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**PATÍÑO, Carlos. ROMERO, Said.** Estudio de las variables de diseño para un medidor de gas tipo cámara húmeda. Proyecto de grado Escuela de Ingeniería Mecánica, UIS. 2002. Capitulo 3, 4.

**MILLER, Richard.** Flow Measurement Engineering Handbook. New York. 1987. Capitulo 2.

**FOX, Robert y MACDONALD, Alan.** Introducción a la mecánica de fluidos. Mc. Graw Hill. 1992.

**ASTM D 1071 - 83.** Standard Test Methods for Volumetric Measurement of Gaseous Fuel Sample. Reapproved 1998.

**MATSCHKE, Rolf y SCHLIETER, Hartmut.** Reglamento de prueba del PTB Tomo 4, Contadores Volumétricos de Gas. Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig. 1992.

**CRANE.** Flujo de fluidos. 1989. Capitulo 1

## APENDICES

## **APÉNDICE A MEDICIÓN DE GAS**

Desde el punto de vista del control de procesos, ninguna otra variable es más importante para la operación de una planta industrial que el caudal. La medición de caudal es esencial en todas las fases de manipulación de los fluidos, incluyendo la producción y el procesamiento, además de la distribución de productos y utilidades. Ella está asociada al control de procesos productivos, como garantía de calidad y confiabilidad, y desde el punto de vista comercial, está directamente ligada a los aspectos de compra y venta de productos.

La medición confiable y exacta del caudal de un fluido exige un conjunto de actividades de ingeniería que involucran, en primer lugar, el pleno entendimiento del proceso a ser medido, seguido de la selección del instrumento de medición, su instalación, operación, mantenimiento y la interpretación correcta de los resultados obtenidos.

### **A.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

Dada la necesidad que se plantea a nivel metrológico del conocimiento y entendimiento de diferentes conceptos aplicables en la medición de flujo fluidos, se presenta a continuación una descripción breve de las propiedades más relevantes en el tratamiento matemático para los gases que se realizará en este libro.

#### **A.1.1 Densidad**

Es la razón entre la masa  $m$  de un fluido y su volumen. La densidad se utiliza para determinar si un fluido es incompresible o compresible. Si la densidad del fluido es constante, el fluido es incompresible; esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido puede cambiar. Los gases (como el aire), son compresibles, por lo tanto pueden expandirse para llenar un nuevo volumen; cuando esto ocurre, la masa no

cambia, pero el volumen aumenta, de esta manera, la densidad del gas disminuye en el nuevo volumen.

#### **A.1.2 Viscosidad**

La viscosidad ( $\mu$ ) es la propiedad por la cual un fluido ofrece resistencia al corte o cizallamiento. La ley de Newton de la viscosidad establece que, para una determinada velocidad de deformación angular de un fluido, la fuerza de corte es directamente proporcional a la viscosidad.

La unidad de viscosidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el Pascal x segundo (Pa.s), pero es común expresar la viscosidad en centiPoise (cP), dado que 1 cP equivale a  $1 \times 10^{-3}$  Pa.s.

#### **A.1.3 Solubilidad del aire en los líquidos (disolución)**

El aire y en general los gases son soluble en líquidos y su solubilidad es directamente proporcional a la presión absoluta. La solubilidad del aire en el agua está alrededor del 1% a una presión absoluta de 0,5 bar, 2% a 1 bar, 4% a 2 bar, y así sucesivamente. El aire es muy soluble en hidrocarburos, de forma que sus valores típicos a presión absoluta de 1 bar son de 8% en aceites lubricantes, 12% en queroseno y 16% en gasolina.

#### **A.1.4 Gases húmedos (evaporación)**

Una mezcla de gases con un vapor se comporta diferente de una mezcla de gases, ya que en el primer caso, un cambio en la presión o la temperatura resulta en condensación o vaporización. Cuando el vapor es agua, esta mezcla puede variar entre seca y saturada, para tal fin se definen algunas propiedades de la mezcla que indican la cantidad de vapor presente en ella, estas propiedades son: humedad específica y humedad relativa. La humedad específica se define como la relación de la masa de vapor de agua con respecto a la masa de gas seco, y la humedad

relativa como la relación entre la presión de vapor del agua en la mezcla con respecto a la presión de vapor del agua si la mezcla estuviera saturada.

Cuando se realizan mediciones de volúmenes o caudales de gas, el vapor de agua en una corriente, es un componente integrado al flujo total, sin embargo, en muchos casos de medición debe calcularse el volumen o masa de gas seco, o ajustar un volumen de gas húmedo a unas condiciones base de gas seco, en estos casos es de gran utilidad definir un factor adicional ( $F_{s-h}$ ), el cual es una relación entre el volumen de gas seco y el volumen de gas húmedo o total.

El factor  $F_{s-h}$  que es la relación entre el volumen seco y el volumen húmedo se obtiene con base en la ley de volúmenes de Amagat: “el volumen de una mezcla gaseosa es igual a la suma de los volúmenes de cada gas, medidos a la misma presión y temperatura de dicha mezcla (ecuación 1).

$$V_{\text{Húmedo}} = V_{\text{seco}} + V_{\text{vapor}} \quad \text{Ecuación A.10}$$

$$F_{s-h} = \frac{V_{\text{seco}}}{V_{\text{Húmedo}}} = 1 - \frac{V_{\text{vapor}}}{V_{\text{Húmedo}}} \quad \text{Ecuación A.11}$$

La relación del volumen de cada uno de los componentes al volumen total conocida como fracción molar ( $\chi$ ), representado en la Ecuación 3 y la Ecuación 4, permite utilizar la ley de Dalton sobre las presiones parciales, para de esta manera obtener una relación que incluya la presión parcial ( $P_p$ ) de cada componente con su volumen (Ecuación 5, Ecuación 6).

$$\chi_{\text{Seco}} = \frac{V_{\text{Seco}}}{V_{\text{Húmedo}}} \quad \text{Ecuación A.12}$$

$$\chi_{\text{vapor}} = \frac{V_{\text{vapor}}}{V_{\text{Húmedo}}} \quad \text{Ecuación A.13}$$

$$P_{p_{\text{Seco}}} = \chi_{\text{Seco}} * P_{\text{Húmedo}} = \frac{V_{\text{Seco}}}{V_{\text{Húmedo}}} * P_{\text{Húmedo}} \quad \text{Ecuación A.14}$$

$$P_{p_{\text{vapor}}} = \chi_{\text{vapor}} * P_{\text{Húmedo}} = \frac{V_{\text{vapor}}}{V_{\text{Húmedo}}} * P_{\text{Húmedo}} \quad \text{Ecuación A.15}$$

reemplazando la Ecuación 5 y la Ecuación 6 en la Ecuación 2 se obtiene:

$$F_{s-h} = 1 - \frac{P_{\text{vapor}} * V_{\text{Húmedo}}}{P_{\text{Húmedo}} V_{\text{Húmedo}}} = 1 - \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{Húmedo}}} \quad \text{Ecuación A.16}$$

### A.1.5 Ecuaciones de estado

Las ecuaciones de estado son representaciones analíticas del comportamiento p-v-t de un gas; la expresión mas general desarrollada para solucionar problemas en los cuales las tres variables cambian, es conocida como ecuación de gas ideal (Ecuación 8), y es el resultado de la combinación de la ley de Boyle y la ley de Charles.

$$\frac{P * V}{T} = \text{cte} \quad \text{Ecuación A.17}$$

La ley de gas ideal correlaciona factores observados experimentalmente, concernientes al comportamiento de gases ideales. Los gases reales obedecen estas leyes razonablemente bien bajo ciertas temperaturas y presiones dependiendo de las propiedades moleculares de el gas específico que esta siendo considerado.

La teoría que ofrece un modelo para explicar estas leyes y observaciones es conocida como la teoría cinética de los gases. Esta teoría realiza los siguientes postulados para un gas ideal:

- ü Los gases consisten de moléculas ampliamente separadas en el espacio. El volumen total de las moléculas es insignificante en comparación al volumen del gas como un todo.
- ü Las moléculas de gas están en movimiento constante, rápido y rectilíneo, colisionando entre ellas y su contenedor. Las colisiones son perfectamente elásticas con transferencia de energía de molécula a molécula pero sin descenso neto en la energía cinética.

- ü Las moléculas de gas transforman energía térmica en energía cinética. Aunque moléculas diferentes tienen diferente energía cinética, la energía cinética promedio de las moléculas de cualquier gas es la misma a una temperatura dada.

A altas presiones y bajas temperaturas, los gases reales no siguen del todo la ley de gas ideal y deben ser considerados otros factores. La razón para la variación del comportamiento ideal viene de las mismas inexactitudes en las suposiciones de la teoría cinética.

Para realizar una compensación por esta variación, se debe añadir otro factor a la ley de gas ideal, este factor es conocido como factor de compresibilidad (Z), matemáticamente se expresa de esta forma:

$$\frac{P * V}{T * Z} = \text{cte} \quad \text{Ecuación A.18}$$

#### **A.1.5.1 Ajuste del volumen de un gas para diferentes estados**

En todos los procesos de medición de gas, la medición se realiza bajo ciertas condiciones de presión y temperatura que son propias del proceso y cuyas condiciones pueden no ser constantes con el tiempo, además están afectadas por factores como las condiciones atmosféricas del sitio de medición.

Dentro del ámbito de la medición de volumen de gas, es usual la realización de correcciones al volumen desde un estado a las condiciones de proceso o medición, hasta otro estado a condiciones predefinidas (por ejemplo: condiciones estándar).

A continuación se presentará la forma que toman estas correcciones de volumen, asumiendo de manera general para un gas real, la corrección se expresa matemáticamente como:

$$V_2 = \frac{V_1 * P_1 * T_2 * Z_2}{P_2 * T_1 * Z_1} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde el subíndice dos (2) indica las condiciones base, y el subíndice uno (1) referencia las condiciones del fluido en el medidor. En el caso para el cual la consideración de gas real no deba aplicarse, solo se retiran de la ecuación los términos correspondientes al factor de compresibilidad (Z) en ambos estados.

$$V_2 = \frac{V_1 * P_1 * T_2}{P_2 * T_1} \quad \text{Ecuación A.20}$$

En cuanto a la corrección de volúmenes de gas existe un caso especial, en el cual se considera la humedad como un componente de una mezcla, el cual es medido como parte del volumen total, anteriormente se presentó lo relacionado con la humedad de un gas y como esta se expresa matemáticamente. Un caso especial donde se requiere realizar corrección del volumen de gas medido, teniendo en cuenta la humedad que contiene es aquel donde se está determinando el poder calorífico de un gas.

Para establecer una ecuación que ajuste el valor de volumen teniendo en cuenta la humedad, se requiere multiplicar los valores correspondientes al volumen en la Ecuación 12 por un factor  $F_{s-h}$  (Ecuación 7), el resultado es:

$$V_2 = V_1 * \frac{F_{s-h1} * P_1 * T_2 * Z_2}{F_{s-h2} * P_2 * T_1 * Z_1} \quad \text{Ecuación A.21}$$

## A.2 TIPOS BÁSICOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

El término genérico medición de caudal puede referirse a cualquiera de los seis tipos de medición comúnmente encontrados, que son:

- ü Medición de la velocidad puntual
- ü Medición de la velocidad media en tuberías
- ü Medición de caudal volumétrico
- ü Medición de volumen total
- ü Medición caudal másico
- ü Medición de masa total

Las mediciones de caudal y de volumen abarcan el sistema de clasificación más común de medidores, que cubre tanto a medidores de volumen como a medidores de masa. Aunque es la más común, no es la manera más adecuada para realizar una clasificación, debido a que un medidor de caudal puede emplearse con facilidad como un medidor de volumen y viceversa.

A continuación se presenta una breve descripción de estos tipos básicos de medición, los cuales están directamente relacionados con la medición de gas.

### **A.2.1 Medición de velocidad**

Existen dos maneras para determinar la velocidad: velocidad puntual y velocidad media en tuberías.

Para la determinación de la velocidad puntual,  $v$ , de un fluido existen diversos tipos de instrumentos disponible comercialmente. Estos medidores son llamados generalmente anemómetros cuando se utilizan en corrientes libres de aire, flujómetros si son empleados en agua y medidores de inserción si son utilizados específicamente dentro de tuberías y ductos.

La velocidad media en tuberías,  $\bar{v}$ , está relacionada con el caudal volumétrico,  $Q_v$ , y el área de la sección transversal de la tubería, Aplicando la siguiente expresión:

$$\bar{v} = \frac{Q_v}{A} \quad \text{Ecuación A.22}$$

El término  $\bar{v}$  puede determinarse de tres maneras diferentes: midiendo  $Q_v$  y  $A$  y aplicándolo a la ecuación anterior; midiendo  $v$  en varios puntos de una determinada sección transversal y, entonces, determinando una media ponderada apropiada; o con menor precisión, midiendo la velocidad en un punto situado a  $\frac{3}{4}$  de distancia entre el centro y las paredes de la tubería para flujo en secciones circulares, pues se sabe que, en flujos completamente desarrollados, la velocidad del fluido en ese punto representa aproximadamente la velocidad media del flujo.

### A.2.2 Medición de caudal volumétrico

El caudal volumétrico,  $Q_v$ , se define como el flujo de un determinado volumen de fluido por un intervalo de tiempo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación A.23}$$

Muchos medidores se diseñan para indicar directamente el valor de  $Q_v$ , estos medidores se denominan medidores de caudal volumétrico.

### A.2.3 Medición de volumen total

Algunos medidores se diseñan para indicar directamente el volumen total ( $V$ ) de fluido que ha pasado a través del medidor. Normalmente, estos se llaman medidores volumétricos, o totalizadores, con el fin de distinguirlos de los otros tipos de medidores de caudal.

Es posible obtener el valor del volumen total  $V$  de fluido que pasa a través del medidor de flujo por medio de la integración de la señal de salida a lo largo de un determinado intervalo de tiempo. También es posible obtener  $Q_v$  a partir de un medidor volumétrico derivando la señal de salida con relación al tiempo. Sin embargo, estas operaciones generalmente convergen en una disminución de la exactitud de la medición.

### A.2.4 Medición de caudal másico

El caudal másico  $Q_m$ , representa el paso de una masa determinada de fluido durante un intervalo de tiempo dado, es decir:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad \text{Ecuación A.24}$$

Algunos medidores de flujo se diseñan para indicar directamente el caudal másico del fluido. Estos se llaman medidores másicos, o medidores másicos verdaderos.

Generalmente, el parámetro  $Q_m$  se determina efectuando varias mediciones simultáneas de  $Q_v$  y densidad ( $\rho$ ), y aplicando la siguiente relación:

$$Q_m = \rho * Q_v \quad \text{Ecuación A.25}$$

### **A.2.5 Medición de masa total**

Actualmente, se encuentran disponibles comercialmente medidores capaces de medir directamente la masa total,  $m$ , de un fluido durante un determinado intervalo de tiempo. Para determinar  $m$ , es preciso medir  $Q_m$  e integrar las mediciones en un determinado tiempo, o de igual forma, medir el volumen total de fluido ( $V$ ), la densidad ( $\rho_o$ ) y multiplicarlos.

## **A.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE GAS**

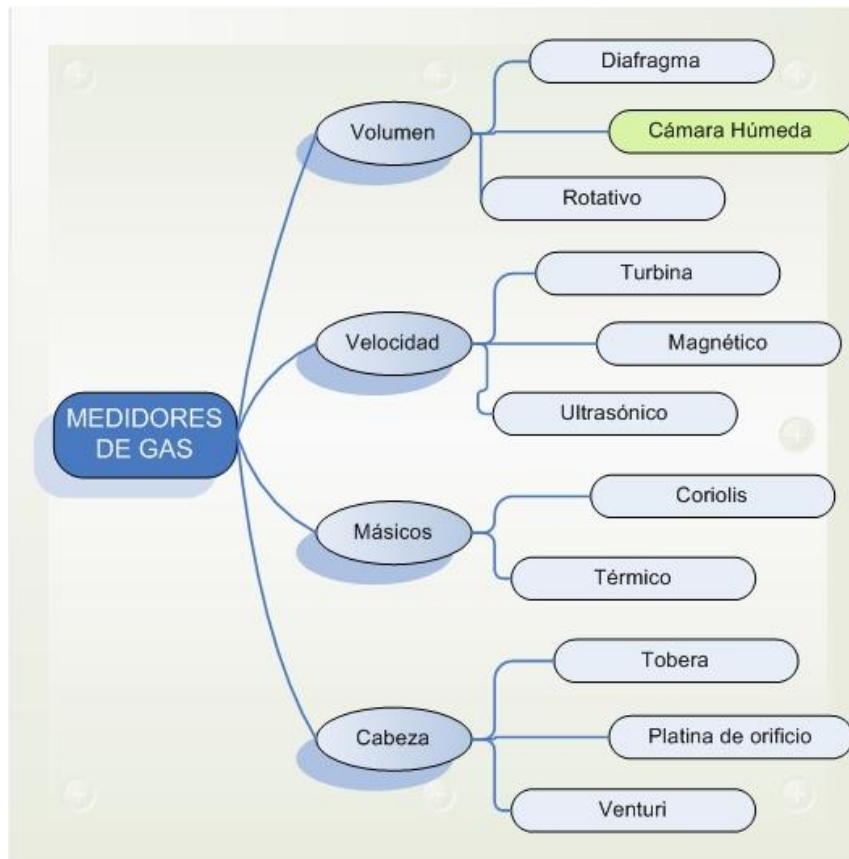
Unos de los equipos o instrumentos más difíciles de seleccionar es un medidor de volumen ó caudal de gas. Los medidores son escogidos con base en muchos factores como: el costo, el tamaño, el fluido que mide y su estado, el rango del medidor y la exactitud deseada.

La clasificación más usual para estos medidores es aquella que los divide en cuatro categorías (Figura A.1).

- ü Desplazamiento positivo
- ü Velocidad
- ü Presión diferencial
- ü Masa

A continuación se presenta una breve descripción del principio de funcionamiento y algunos ejemplos cada una de estas categorías de medidores.

**Figura A.1 Clasificación de los medidores**



### **A.3.1 Medidores de desplazamiento positivo**

Miden la rata volumétrica ( $Q_v$ ) directamente por medio de la repetición de una cámara o volumen muestra de fluido. El volumen total de gas que pasa a través del medidor en un período de tiempo dado es el producto del volumen de muestra por el número de muestras. Los medidores de desplazamiento positivo frecuentemente totalizan el flujo directamente a través de la cuantificación de una integral, pero algunos de estos también pueden generar un pulso de salida el cual puede leerse sobre un display local contador o por medio de la transmisión a un cuarto de control.

Tres tipos comunes de medidores, los de diafragma, los rotativos y la cámara húmeda.

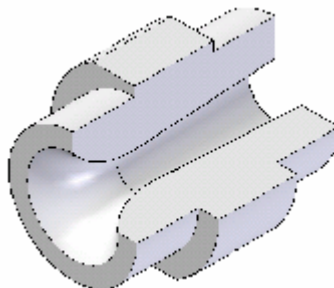
**Figura A.2 Medidor de volumen (diafragma)**



### **A.3.2 Medidores de Cabeza**

Estos son el tipo más común de medidores, utilizados en la medición de caudal volumétrico. Ellos infieren el caudal de fluidos, a través de la determinación de la diferencia de presión producto de la restricción al flujo. Los medidores de cabeza son generalmente simples, disponibles y ofrecen una mayor flexibilidad que otros métodos de medición. El medidor de flujo tipo cabeza la mayoría de las veces consta de dos componentes: el dispositivo primario y dispositivo secundario. El dispositivo primario es consiste en la tubería y los elementos para restringir el flujo y desarrollar una diferencia de presión. El dispositivo secundario mide la presión estática, el diferencial de presión y la temperatura, proveyendo una señal al sistema de control. El dispositivo primario se selecciona de acuerdo con el fluido específico o la aplicación y el dispositivo secundario puede seleccionarse por el tipo de recepción de señal. Entre estos dispositivos se encuentran: las placas de orificio, toberas, tubos venturi, tubos Pitot.

**Figura A.3 Medidor de cabeza (vénturi)**



### A.3.3 Medidores de Velocidad

Cuando se usa la velocidad para la medición de caudal volumétrico, un dispositivo primario genera una señal proporcional a la velocidad del fluido. Algunos de ellos no generan grandes interferencias en el flujo del fluido, y gracias a que proveen una señal lineal de salida con respecto al flujo, no necesitan relacionarse con la raíz cuadrada del diferencial de presión, con lo cual se elimina esta inexactitud y se amplía el rango de aplicación. Entre estos se encuentran: medidor de turbina y ultrasónico.

**Figura A.4 Medidor de velocidad (turbina)**



### A.3.4 Medidores Másicos

Estos medidores miden directamente el caudal másico, cada medidor másico combina esencialmente 2 dispositivos, uno para medir la velocidad del fluido y el otro para medir la densidad. Estas dos entradas son típicamente combinadas en un microprocesador para proveer una salida en la que se indique el caudal másico. Entre ellos están los medidores térmicos y los de coriolis.

**Figura A.5 Medidor másico (coriolis)**



## A.4 CURVAS DE DESEMPEÑO DE MEDIDORES

Una curva de calibración (o curva característica) es un gráfico que muestra como varía el desempeño de un medidor con respecto al caudal, con la velocidad o con el Número de Reynolds.

Generalmente, esta curva se obtiene por medio de una calibración, es decir, a través de una serie de pruebas a lo largo del rango de operación del medidor, comparando las lecturas mostradas por el instrumento (volumen, masa o velocidad) contra los valores obtenidos a través de un medidor de exactitud mayor.

### A.4.1 Clasificación

Si el gráfico forma una línea más o menos recta pasando por el origen como en la Figura 6, el medidor es considerado como lineal.

**Figura A.6 Curva característica de un medidor tipo lineal**



Muchos medidores no-lineales poseen características como la mostrada en la Figura 7, donde  $Q$  es proporcional a  $Y^2$ . Medidores de flujo de tipo tubo de Vénturi, placas de orificio, boquillas y tubos de Pitot, pertenecen a esa clase de medidores, donde  $Y$  es el valor medido de la presión diferencial.

**Figura A.7 Curva característica de un medidor tipo no lineal**



#### **A.4.2 Índices de desempeño**

En la práctica, gráficos como los mostrados en las Figuras 6 y 7 rara vez son usados, porque estos no ofrecen detalles suficientes acerca de la calibración. Lo ideal es la utilización de un gráfico que muestre claramente cualquier pequeña desviación del comportamiento ideal del medidor.

Por tanto, es común graficar algún tipo de índice de desempeño del medidor contra el caudal. Existen varios tipos de índice de desempeño, entre ellos:

- ü Coeficiente de descarga
- ü Factor F del medidor
- ü Factor K del medidor
- ü Error

#### **A.4.3 Error**

El término error del medidor,  $\varepsilon$ , se define como:

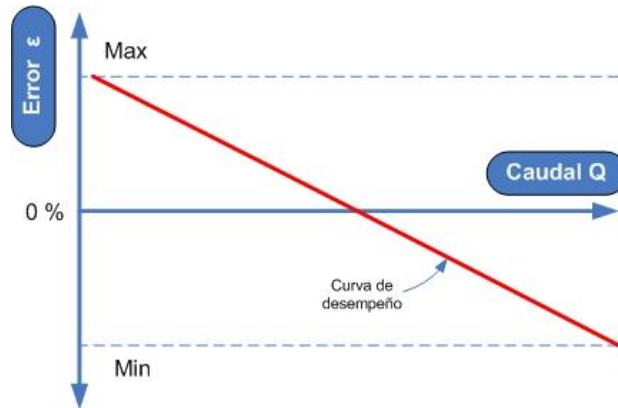
$$\varepsilon = \frac{V_i - V_t}{V_t} \quad \text{Ecuación A.26}$$

o porcentualmente

$$\varepsilon = \frac{V_i - V_t}{V_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Ecuación A.27}$$

donde:  $V_t$  e  $V_i$  indican, respectivamente, el volumen convencionalmente verdadero y el indicado. Generalmente, el error se expresa en términos de porcentaje del valor verdadero convencional.

**Figura A.8 Curva de desempeño característica para el error**



## APÉNDICE B METROLOGÍA

La metrología es definida como la "ciencia de la medición"<sup>27</sup>, es decir, es una ciencia encargada de determinar el valor cualitativo y cuantitativo de una magnitud, incluye aspectos teóricos y prácticos relacionados con las mediciones, cualquiera que sea su incertidumbre y cualquiera que sea el campo de la ciencia o de la tecnología al cual se aplica, de hecho, la metrología es considerada como la columna vertebral de todas las disciplinas científicas.

Debido a la gran velocidad con la cual las técnicas modernas que dependen de las mediciones crecen en el mundo industrializado, es necesaria la realización de mediciones cada vez más exactas y consistentes, para de esta manera acoplar adecuadamente el engrane de la tecnología a nivel mundial, requiriéndose por supuesto el desarrollo y mejora de referencias en común.

Una de las dificultades con las que se enfrenta la metrología al tratar de comunicar un concepto relacionado con las mediciones, es el vocabulario técnico utilizado, el cual posee significados muy precisos, y hace uso de palabras que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito. Palabras como precisión, exactitud y error son empleadas frecuentemente de manera inadecuada desde el punto de vista de la terminología reconocida internacionalmente. Aun en los medios técnicos existía una falta de consenso sobre el significado de los términos empleados en metrología hasta la publicación en 1993 del VIM, publicada por la ISO a nombre de siete organizaciones internacionales cuya traducción al español se encuentra en la norma NTC 2194.

A continuación se presenta la definición de algunos términos metrológicos, que serán de utilidad más adelante.

---

<sup>27</sup> VIM (International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology), 2.2

- ü Medición: “Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud”<sup>28</sup>
- ü Magnitud: “Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente”<sup>29</sup>
- ü Mensurado: “Magnitud particular sujeta a medición”
- ü Instrumento de medición: “Dispositivo destinado para efectuar mediciones, solo o en conjunto con uno o varios dispositivos adicionales”

## **B.1 CARACTERIZACIÓN DE LA METROLOGÍA**

Por conveniencia, se hace a menudo una distinción entre los diversos campos de aplicación de la metrología; suelen distinguirse como Metrología Científica, Metrología Legal y Metrología Industrial.

### **B.1.1 Metrología científica**

Es el conjunto de acciones que persiguen el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades de base y derivadas del Sistema Internacional de Unidades, SI.

### **B.1.2 Metrología industrial**

La función de la metrología industrial reside en la calibración, control y mantenimiento adecuados de todos los equipos de medición empleados en producción, inspección y pruebas. Esto con la finalidad de que pueda garantizarse que los productos están de conformidad con normas. El equipo se controla con

---

<sup>28</sup> VIM 2.1

<sup>29</sup> VIM 1.1

frecuencias establecidas y de forma que se conozca la incertidumbre de las mediciones.

La calibración debe hacerse contra equipos certificados, con relación válida conocida a patrones, por ejemplo los patrones nacionales de referencia.

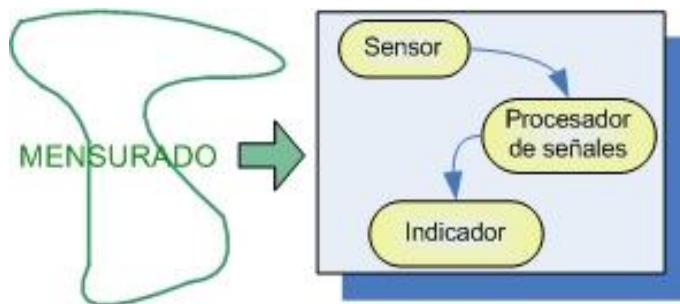
### **B.1.3 Metrología legal**

Según la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) es la totalidad de los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos establecidos por, o por referencia a, autoridades públicas y puestas en vigor por su cuenta con la finalidad de especificar y asegurar, de forma regulatoria o contractual, la calidad y credibilidad apropiadas de las mediciones relacionadas con los controles oficiales, el comercio, la salud, la seguridad y el ambiente.

## **B.2 PROCESO DE MEDICIÓN**

La medición generalmente sigue un proceso como el ilustrado en la figura B.1; el mensurado representa el mundo físico del cual se desea medir una propiedad en particular, el instrumento de medición entra en contacto con este mensurado a través del sensor el cual es encargado de adquirir la información, es decir, realizar los procesos de transducción y acondicionamiento, el siguiente paso es el procesamiento de las señales, y por último se termina el proceso de medición dentro del instrumento con la presentación de resultados mediante un indicador.

**Figura B.1 Proceso de medición**



En cada uno de estos pasos es posible identificar fuentes de incertidumbre, entre las cuales están: la respuesta no lineal del sensor, errores de redondeo de para los sistemas digitales de procesamiento de señales, el número de dígitos en indicadores digitales y la resolución del instrumento si es analógico.

### **B.3 PROPIEDADES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

A continuación, se presentan algunos términos relacionados con los instrumentos de medición en general. Estos son de especial importancia cuando se consideran las propiedades de los medidores.

#### **B.3.1 Repetibilidad y reproducibilidad**

Es la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición<sup>30</sup>.

Las condiciones de repetibilidad incluyen:

- El mismo procedimiento de medición
- El mismo observador
- El mismo instrumento de medición
- El mismo lugar
- Repetición en un corto periodo de tiempo

Un término relacionado con la repetibilidad es la reproducibilidad<sup>31</sup>. Este término se traduce en la capacidad que un instrumento posee de lograr el mismo resultado cuando es utilizado para medir la misma magnitud en momentos diferentes y bajo condiciones diferentes. Este factor es importante, por ejemplo, para la evaluación de la susceptibilidad de un determinado medidor a las condiciones de instalación.

---

<sup>30</sup> VIM 3.6

<sup>31</sup> VIM 3.7

### **B.3.2 Precisión**

Es una expresión cualitativa de la repetibilidad, no debe asociársele ningún valor numérico y no debe ser usada como sinónimo de la palabra exactitud. La precisión indica tan solo cuantas cifras decimales nosotros podemos leer, pero ella nada dice respecto a cuantas de esas cifras decimales nosotros podemos confiar.

Por medio de un acuerdo internacional, la palabra “precisión” es utilizada para describir que tan discriminadamente un instrumento puede medir. Por ejemplo, la precisión de un cronómetro digital electrónico con lectura en milisegundos es una centena de veces mayor del cronómetro manual con graduación en décimas de segundo.

### **B.3.3 Exactitud**

Si repetibilidad es la capacidad de un instrumento de “contar siempre la misma historia”, exactitud<sup>32</sup> es la medida de su capacidad de “decir la verdad”.

En general, la buena repetibilidad de un medidor depende de un buen diseño y de una fabricación cuidadosa, así mismo, una buena exactitud depende, de los dos requisitos mencionados anteriormente, y de una calibración cuidadosa contra un patrón. Por eso, cuando necesitamos mantener continuamente una alta exactitud de un medidor, el mismo debe recalibrarse regularmente.

Es importante resaltar que la palabra exactitud es una palabra cualitativa y no debe ser utilizada para cuantificar un determinado parámetro porque ella posee varios significados.

La repetibilidad es confundida frecuentemente con exactitud, pero son dos conceptos diferentes (figura B.2).

---

<sup>32</sup> VIM 3.5

**Figura B.2 Diferencia entre exactitud y repetibilidad**



Si un instrumento posee una repetibilidad pobre, tendrá también una exactitud pobre. Por otro lado, un factor de un medidor que presente una buena repetibilidad no significa necesariamente que presente también una buena exactitud (aunque la pueda tener), ya que puede estar presentando el mismo valor incorrecto repetidamente.

#### **B.3.4 Incertidumbre**

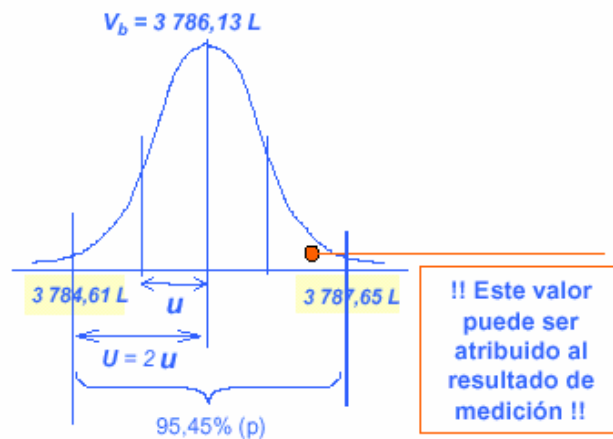
Actualmente, el término internacionalmente aceptado para expresar la exactitud o inexactitud de una medición es el término incertidumbre. Este término tiene un significado preciso y debería ser utilizado asociado a los resultados de todas las mediciones volumen y de caudal.

La incertidumbre es un parámetro, asociado a los resultados de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podrían atribuir a la magnitud por medir<sup>33</sup>, figura B.3.

---

<sup>33</sup> VIM 3.9

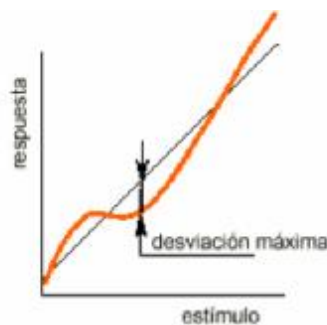
**Figura B.3 Incertidumbre**



### **C.3.4 Linealidad**

Se refiere a la proximidad de concordancia entre la respuesta del medidor y una referencia lineal o proporcional. Se define usualmente estableciendo la desviación máxima dentro de la cual se espera la respuesta del medidor para un alcance de medición definido.

**Figura B.4 Linealidad**

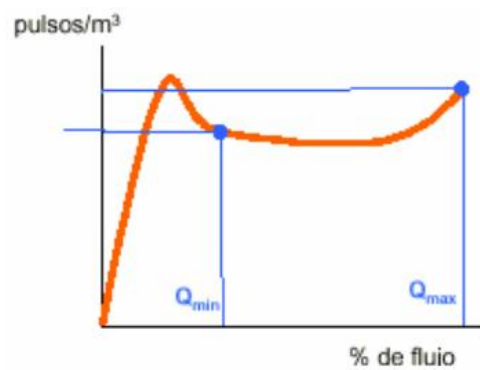


### **B.3.6 Banda de medición**

Una banda de medición de un instrumento se define como la banda de trabajo del instrumento en el cual cumple los requisitos para una determinada exactitud. De esta forma, la banda de medición es de  $Q_{\text{MIN}}$  hasta  $Q_{\text{MAX}}$ . La relación  $Q_{\text{MIN}} / Q_{\text{MAX}}$  se

denomina rangeabilidad de un instrumento, o, en el caso de medidores de flujo, turndown ratio o simplemente turndown.

**Figura B.5 Banda de medición**



## APENDICE C JERARQUIA DE PATRONES Y TRAZABILIDAD

### C. 1 Jerarquía de patrones

Un patrón de medición es la medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud que sirva como referencia. Los patrones pueden ser internacionales y nacionales, se dividen en: primarios, secundarios, de referencia, de trabajo y de transferencia.

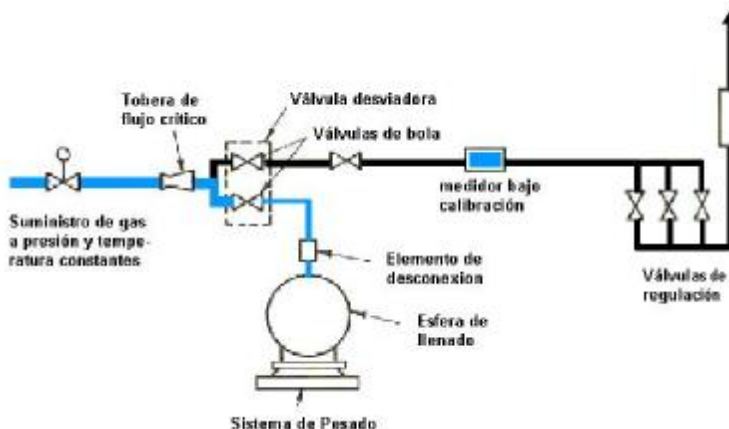
#### C.1. 1 Patrón primario

Es el patrón que se designa o se recomienda por presentar las mas altas calidades metrológicas y cuyo valor se establece sin referirse a otros patrones de la misma magnitud. Entre ellos están:

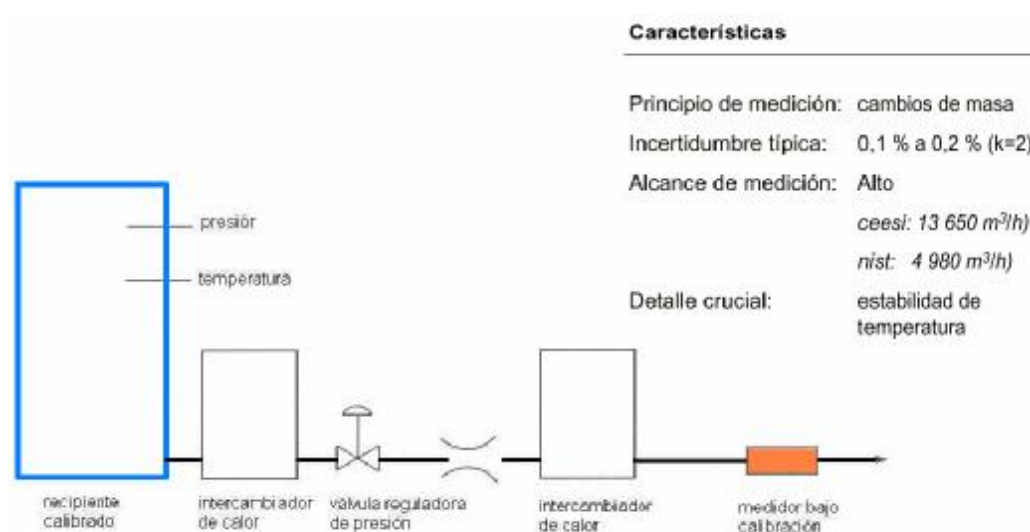
##### ü Sistema Gravimétrico

###### Características

- ü Incertidumbres típicas de 0,15 %
- ü Medición directa de flujo másico
- ü Presiones relativamente altas (80 bar)
- ü Alcance de medición: alto



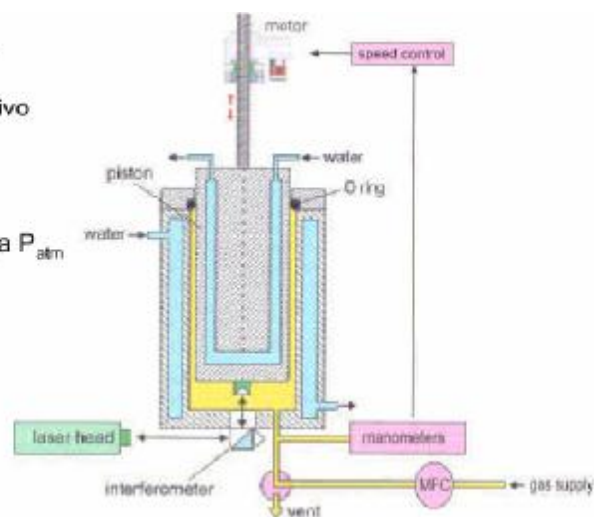
## ü Sistema PVT



## ü Tipo pistón

### Características

Método de medición: desplazamiento positivo  
 Incertidumbre típica: 0,05 a 0,1 % ( $k=2$ )  
 alcance de medición: limitado  
 Presión de operación: ligeramente superior a  $P_{atm}$   
 Elemento de sello: mecánico  
 Sensor de posición: interferómetro láser



## ü Tipo campana gasométrica

### Características

- ü Método de medición: desplazamiento positivo
- ü Incertidumbre: 0,05 a 0,15 % ( $k=2$ )
- ü Alcance de medición: limitado
- ü Presión de operación: ligeramente superior a  $P_{atm}$
- ü Elemento de sello: líquido (aceite, agua)



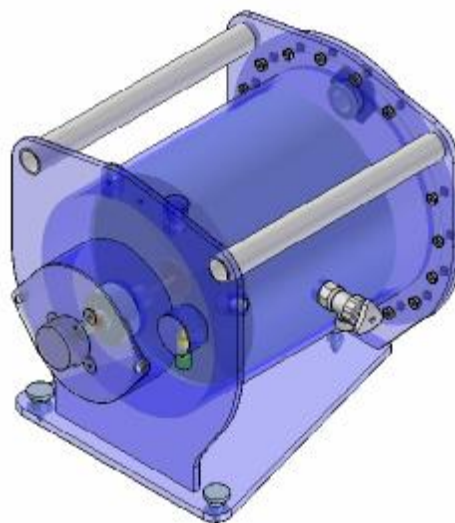
## C.1. 2 Patrón secundario

Es el patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. Algunos son:

## ü Cámara húmeda

### Características

- ü Método de medición: desplazamiento positivo
- ü Incertidumbre típica: 0,3 a 0,4 % ( $k=2$ )
- ü alcance de medición: reducido
- ü Presión de operación: ligeramente superior a  $P_{atm}$
- ü Fluidos: aire, gas natural, etc.
- ü Aplicaciones principales: medidor de referencia



## ü Desplazamiento positivo

### Características

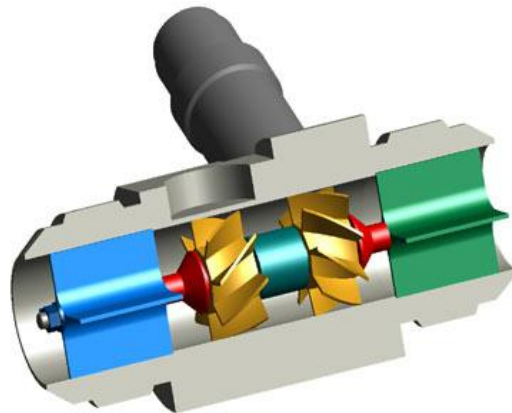
- ü Método de medición: desplazamiento positivo
- ü Incertidumbre típica: 0,2 a 0,4 % (k=2)
- ü alcance de medición: moderado
- ü Presión de operación: hasta 16 bar
- ü Fluidos: aire, gas natural, etc.
- ü Aplicaciones principales: medidor de transferencia



## ü Turbina

### Características

- ü Método de medición: desplazamiento positivo
- ü Incertidumbre típica: 0,3 a 0,5 % (k=2)
- ü alcance de medición: Amplio (>25 000 m<sup>3</sup>/h)
- ü Presión de operación: hasta 100 bar
- ü Fluidos: aire, gas natural, etc.
- ü Aplicaciones principales: medidor de referencia



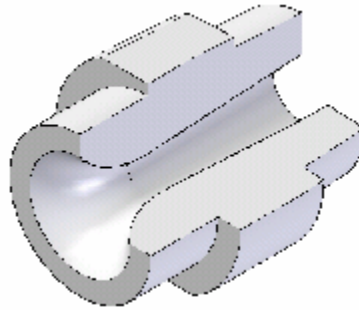
### C.1. 3 Patrón de transferencia

Es el patrón empleado como intermediario para comparar patrones entre sí.

ü Las **boquillas sónicas** son un ejemplo de estos patrones

#### Características

- ü Método de medición: flujo crítico
- ü Incertidumbre típica: 0,2 a 0,4 %  
(k=2)
- ü alcance de medición: amplio
- ü Presión de operación: hasta 100 bar
- ü Fluidos: aire, gas natural, etc.



### C.1. 4 Patrón de referencia

Es generalmente de la más alta calidad petrológica disponible en un lugar u organización dado, del cual se derivan las mediciones hechas en dicho lugar.

### C.1. 5 Patrón de trabajo

Es el patrón utilizado corrientemente para controlar medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia

### C.1. 6 Campo de aplicación

**Tabla C.1. Campo de aplicación de los patrones**

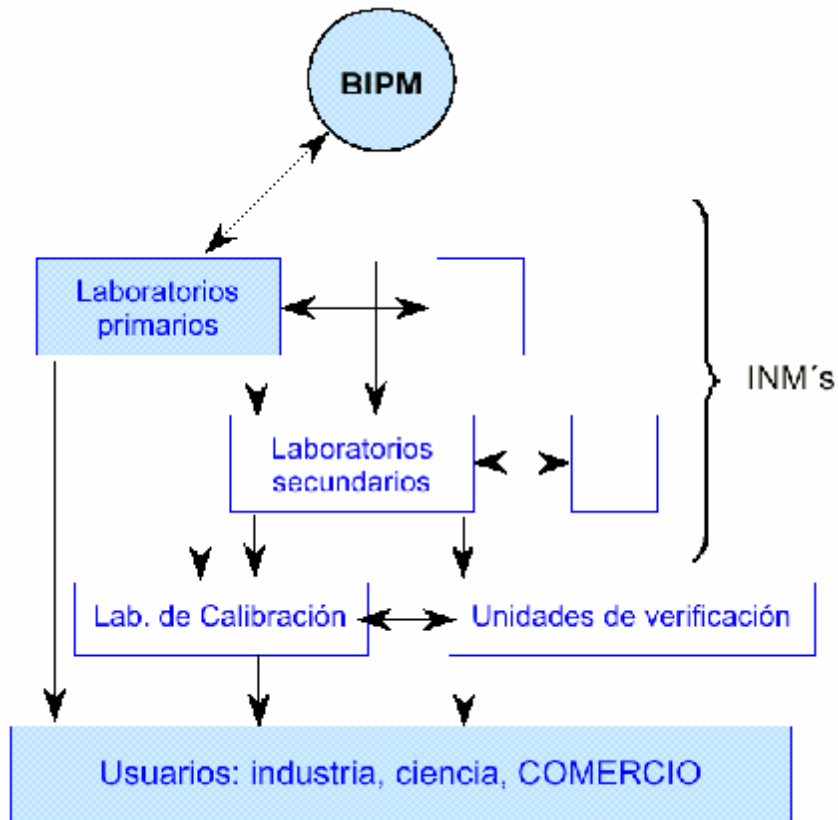
| Instrumentos bajo ensayo                       | Medidores de gas a diafragma | Medidores de gas de pistones rotativos | Medidores de gas de cámaras rotativas | Medidores de gas de turbina | Medidores de gas por vorticidad |
|------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Patrón                                         |                              |                                        |                                       |                             |                                 |
| Campana de medición                            | X                            | X                                      | X                                     | X                           | X                               |
| Cámara húmeda                                  | X                            | X                                      | X                                     | X                           | X                               |
| Contadores de gas patrón de pistones rotativos | X                            | X                                      | X                                     |                             |                                 |
| Contadores de gas patrón de turbina            |                              |                                        | X                                     | X                           | X                               |
| Contadores de gas patrón por vorticidad        |                              |                                        | X                                     | X                           | X                               |
| Toberas sónicas                                | X                            | X                                      | X                                     | X                           | X                               |

## C. 2 ORDEN INTERNACIONAL

La trazabilidad es 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.<sup>34</sup>.

### C.2. 1 ORDEN INTERNACIONAL



La trazabilidad a nivel internacional, y por lo tanto la exactitud de los Patrones Nacionales se asegura a través del trabajo conjunto entre el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) y los Institutos Nacionales de Metrología (INM's), en términos de los lineamientos establecidos en la Convención del Metro. En la siguiente figura se muestran las conexiones entre el BIPM, los INM's, los laboratorios de calibración y las aplicaciones industriales. En esta figura se aprecia la conexión que debe existir entre los INM's para establecer el grado de

<sup>34</sup> VIM 6.10

equivalencia entre los mismos. Actualmente el Comité International des Poids et Mesures (CIPM) promueve el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo entre los INM's.

### **C.2. 2 Como adquirir trazabilidad**

De la definición del concepto de trazabilidad se aprecia que es indispensable “enganchar” el instrumento o patrón de medición en cuestión a algún patrón nacional o internacional adecuado, a través de una cadena in-interrumpida de comparaciones.

Es de notarse que no es indispensable realizar una comparación directa entre el instrumento en cuestión y los patrones nacionales, basta que en cada eslabón de comparación que los conecte exista una declaración de incertidumbre respecto del proceso de comparación.

En la actualidad los Institutos Nacionales de Metrología diseminan las cualidades metrológicas de los Patrones Nacionales a través de los siguientes mecanismos:

#### **ü CALIBRACIÓN DIRECTA DEL INSTRUMENTO O PATRÓN DEL CLIENTE CONTRA LOS PATRONES DE REFERENCIA DESIGNADOS.**

El cliente envía el artefacto por calibrar a las instalaciones del Laboratorio de calibración, donde se realiza la comparación entre patrón e instrumento. Aunque esta alternativa es la más socorrida en la actualidad, tiene la desventaja de que requiere de tiempos largos para su realización y el riesgo de daños durante el transporte del instrumento.

En esta modalidad, no es indispensable que la calibración se efectúe en un INM; un laboratorio secundario puede realizar el servicio de calibración. Por supuesto, las mediciones del (los) patrón(es) de referencia deben mantener trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales.

## ü MATERIALES DE REFERENCIA CERTIFICADOS (MRC).

Los MRC son producidos por los INM's como un patrón de referencia para la calibración de instrumentos de medición, por parte del usuario.

Cada material de referencia es acompañado de un certificado de calibración donde se informa sobre el valor de la propiedad física en cuestión (densidad, viscosidad cinemática, composición química, etc.), su incertidumbre, el nivel de confianza, entre otros datos.

Un aspecto de importancia en esta modalidad es la estabilidad del MRC. En este sentido, es de gran importancia observar las recomendaciones del productor respecto de las condiciones de uso y almacenamiento del material como una medida para garantizar la trazabilidad.

## ü SERVICIOS DE CALIBRACIÓN EN SITIO.

El Laboratorio de calibración lleva sus patrones de referencia a las instalaciones del cliente para realizar la calibración del instrumento o sistema de medición.

En esta modalidad el cliente asegura que su instrumento es calibrado bajo las condiciones de operación. El Patrón Viajero debe cumplir con ciertos requisitos de: robustez, reproducibilidad, funcionalidad, entre otros, para asegurar la trazabilidad hacia las referencias superiores.

Además de los mecanismos anteriores, en la actualidad también se recurre a las siguientes alternativas:

ü Datos de referencia

ü Disseminación del Tiempo Universal Coordinado

ü Calibración a través de Internet

## APÉNDICE D INCERTIDUMBRE

La incorrecta interpretación de los resultados de las mediciones pueden tener serias repercusiones económicas y sociales. Este hecho justifica la atención que la metrología presta a las técnicas de estimación de incertidumbre, la cual es el elemento fundamental para apreciar en forma adecuada la información que conlleva el resultado de una medición.

La incertidumbre de la medición se define como “Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando”<sup>35</sup>.

No existen fórmulas exactas para determinar la incertidumbre de la medición, razón por la cual se habla de “estimación de la incertidumbre” en lugar de “cálculo de incertidumbre”, pues es necesario emplear el criterio del metrólogo para identificar y evaluar los factores de influencia.

La comunidad internacional ha establecido un consenso sobre la metodología preferida para cuantificar y combinar los factores de influencia, de tal manera que los resultados de las mediciones puedan ser reportados de una manera que sea interpretada uniformemente por todos los usuarios. Este concepto internacional se plasmó en el documento “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”<sup>36</sup> publicado por la ISO, al igual que el vocabulario de metrología, a nombre de siete organizaciones internacionales; la cual ha sido traducida al español por el CENAM<sup>37</sup>, y consignada en el documento “Guía para estimar la incertidumbre de la medición”.

La GUM ha sido aceptada mundialmente por la comunidad metrológica por la manera formal y consistente en que sugiere simplificaciones aceptables a un muy

---

<sup>35</sup> VIM, 3.9

<sup>36</sup> GUM

<sup>37</sup> CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA de México

complejo problema estadístico. En efecto, el tratamiento riguroso de la propagación de la distribución, a través de un modelo matemático del proceso de medición, es un reto aún para los profesionales de la estadística. La GUM simplifica el problema grandemente al sugerir aproximaciones lineales y presenta métodos sencillos para incorporar en términos estadísticos el conocimiento de parámetros de los que se tienen muy poca información.

No obstante este esfuerzo de simplificación, la GUM continúa siendo percibida como un documento de difícil lectura por el usuario casual, ya que hace uso de conceptos elementales de cálculo diferencial y estadística básica. De cualquier manera, no hay duda que esta metodología es la más adecuada para estimar la incertidumbre en la mayor parte de las mediciones.

Bajo la consideración de las cámaras húmedas como patrón secundario de calibración, la incertidumbre desempeña un papel muy importante tanto en los procesos de diseño como en los procesos finales de calibración; por esta razón a continuación se presenta la metodología para realizar la estimación de la incertidumbre, basados en el documento del CENAM.

## **D. 1 EL MENSURADO**

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando, que de acuerdo al VIM, es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición. En no pocas ocasiones se mide algo distinto al propósito original. La imperfección natural de la realización de las mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud: 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 al mensurando.

El principio, el método y el procedimiento de medición son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada, o incompleta en el mejor de los casos, de la incertidumbre de la medición.

## **D. 2 MODELO FÍSICO**

Pretender estudiar el proceso de medición de manera exacta y completa está usualmente fuera de las actividades rutinarias del metrólogo, más aún, es el propósito de la investigación científica, cuya solución pocas veces se vislumbra. Por lo tanto, es necesaria la simplificación del fenómeno o de la situación real conservando las características más relevantes para el propósito pretendido, mediante la construcción de un modelo para la medición.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Estas suposiciones usualmente incluyen:

- ü Relaciones fenomenológicas entre variables.
- ü Consideraciones sobre el fenómeno como conservación de cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías; consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que sólo aproxima el proceso real.

## **D. 3 MODELO MATEMÁTICO**

El modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas.

Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto  $\{X_i\}$  expresión en la cual el índice  $i$  toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada  $N$ .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mensurando  $Y$  como la magnitud de salida se representa como una función

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Ecuación D. 1}$$

representada por una tabla de valores correspondientes, una gráfica o una ecuación.

Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc.

Se denota al mejor estimado de las magnitudes de entrada  $X_i$  como  $x_i$ . Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc.

El mejor estimado del valor del mensurando es el resultado de calcular el valor de la función  $f$  evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada,

$$y = f(x_1, \dots, x_N) \quad \text{Ecuación D. 2}$$

En algunas ocasiones se toma el mejor estimado de  $Y$  como el promedio de varios valores  $y_j$  del mensurando obtenidos a partir de diversos conjuntos de valores  $\{X_i\}$  de las magnitudes de entrada.

#### **D. 4 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE**

Una vez determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre.

Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo:

- ü Los resultados de la calibración del instrumento
- ü La incertidumbre del patrón o del material de referencia
- ü La repetibilidad de las lecturas
- ü La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos
- ü Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, etc.
- ü Variaciones de las condiciones ambientales
- ü La definición del propio mensurando
- ü El modelo particular de la medición
- ü Variaciones en las magnitudes de influencia

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución, comparada con las demás, apoyada en mediciones. Es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar algunas entre las cuales pudiera descartarse alguna importante. No obstante, siempre estarán presentes efectos que la experiencia, conocimientos y actitud crítica del metrologo permitirán calificar como irrelevantes después de las debidas consideraciones.

## **D. 5 CUANTIFICACIÓN**

En la literatura se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El Método de Evaluación Tipo A está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el Método de Evaluación Tipo B comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

Cabe mencionar que esta clasificación no significa que exista alguna diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada uno de los dos tipos de evaluación, puesto que ambos tipos están basados en distribuciones de probabilidad. La única diferencia es que en las evaluaciones tipo A se estima esta distribución basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de

medición mientras en el caso de tipo B se supone una distribución con base en experiencia o información externa al metrologo.

En la práctica esta clasificación no tiene consecuencia alguna en las etapas para obtener una estimación de la incertidumbre combinada.

## ü Evaluación tipo A

La incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si  $X_i$  se determina por  $n$  mediciones independientes, resultando en valores  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , el mejor estimado  $\bar{q}$  para el valor de  $X_i$  es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Ecuación D. 3}$$

La dispersión de los resultados de la medición  $q_1, q_2, \dots, q_n$  para la magnitud de entrada  $X_i$  se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación D. 4}$$

La incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de  $X_i$  se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación D. 5}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de  $X_i$ :

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación D. 6}$$

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es razonable suponer que la distribución (dispersión) de los  $q_j$  no cambia, o sea se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas en diferentes días, por distintos metrologos, etc. (esto es, la medición está bajo control estadístico). En este caso esta componente de la incertidumbre puede ser

más confiablemente estimada con la desviación estándar  $s_p$  obtenida de un solo experimento anterior, que con la desviación estándar experimental  $s(q)$  obtenida por un número  $n$  de mediciones, casi siempre pequeño.

La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación D. 7}$$

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones  $n$ , ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Hay que considerar que:

- ü Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a  $1/\sqrt{n}$
- ü Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.
- ü En pocos casos se recomienda o se requiere  $n$  mayor de 10
- ü Para determinar el impacto que tiene  $n$  en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad

Otras fuentes de incertidumbre que se evalúan con este método son la reproducibilidad y las obtenidas al hacer una regresión lineal.

#### ü Evaluación tipo B

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- ü Certificados de calibración.
- ü Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- ü Normas o literatura.
- ü Valores de mediciones anteriores.
- ü Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

### **D.5. 1 Distribuciones de probabilidad**

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

#### **ü Distribución normal**

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

#### **ü Distribución rectangular:**

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.

Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

#### **ü Distribución triangular:**

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

#### **ü Otras distribuciones**

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a “errores de coseno”.

## D. 6 REDUCCIÓN

Antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente.

a) Distribución normal:

La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida (Evaluación tipo A) ya representa la incertidumbre estándar.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida  $U$ , como los presentados por ejemplo en certificados de calibración, se divide  $U$  entre el factor de cobertura  $k$ , obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \text{Ecuación D. 8}$$

b) Distribución rectangular:

Si la magnitud de entrada  $X_i$  tiene una distribución rectangular con el límite superior  $a_+$  y el límite inferior  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación D. 9}$$

y la incertidumbre estándar se calcula por como:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad \text{Ecuación D. 10}$$

o por

$$u(x_i) = \frac{a/\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación D. 11}$$

donde  $a/2$  es el semiancho del intervalo  $a$  con

$$a = a_+ - a_- \quad \text{Ecuación D. 12}$$

c) Distribución triangular:

Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada  $X_i$  que tiene una distribución triangular con los límites  $a_+$  y  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación D. 13}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}} \quad \text{Ecuación D. 14}$$

con  $a$  definido como en la Ecuación C. 12

## D. 7 COMBINACIÓN

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$ , la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando  $Y$ .

La contribución  $u_i(y)$  de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando, y viceversa.

Se determina  $u_i(y)$  por el producto de  $u(x_i)$  y su coeficiente de sensibilidad  $c_i$  (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad \text{Ecuación D. 15}$$

### D.7. 1 Coeficiente de sensibilidad

El coeficiente de sensibilidad describe, qué tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Para su determinación existen dos métodos:

#### a) Determinación a partir de una relación funcional

Si el modelo matemático para el mensurando  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  describe la influencia de la magnitud de entrada  $X_i$  suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  se calcula por la derivada parcial de  $f$  con respecto a  $X_i$ :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \Big|_{x_1=x_1 \dots x_N=x_N} \quad \text{Ecuación D. 16}$$

#### b) Otros métodos de determinación:

Si la influencia de la magnitud de entrada  $X_i$  en el mensurando  $Y$  no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  por una estimación del impacto de una variación de  $X_i$  en  $Y$  según:

$$c_i = \frac{DY}{DX_i} \quad \text{Ecuación D. 17}$$

Esto es, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada, se determina el cambio de  $Y$  producido por un cambio en  $X_i$  por una medición o a partir de la información disponible (como una gráfica o una tabla).

### D.7. 2 Porcentaje de contribución

El porcentaje de contribución ( $\%c_i$ ) es otra manera de expresar la contribución  $u_i(y)$  de cada fuente sobre la incertidumbre total o combinada, mediante la fórmula:

$$\%C = \sum_{i=1}^N [u_i(y)]^2 \quad \text{Ecuación D. 18}$$

$$\%c_i = \frac{[u_i(y)]^2 * 100}{\%C} \quad \text{Ecuación D. 19}$$

Este valor no es tenido en cuenta durante la estimación de la incertidumbre, pero representa de una mejor manera la contribución de cada variable frente a la incertidumbre total.

### D.7.3 Propagación de la incertidumbre

Considerando los métodos de combinación y los coeficientes de sensibilidad resulta finalmente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i * u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} * u(x_i) \right]^2} \quad \text{Ecuación D. 20}$$

## D.8 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

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, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

### D.8.1 Factor de cobertura y nivel de confianza

La incertidumbre estándar  $u_c$  representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad  $p$  de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor  $k$ , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida  $U$

$$U = k * u_c \quad \text{Ecuación D. 21}$$

La incertidumbre expandida  $U$  indica entonces un intervalo que representa una fracción  $p$  de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de  $p$  es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal.

Por ejemplo, en una distribución normal,  $k=1$  corresponde a  $p=68,27\%$ ,  $k=2$  a  $p=95,45\%$ .

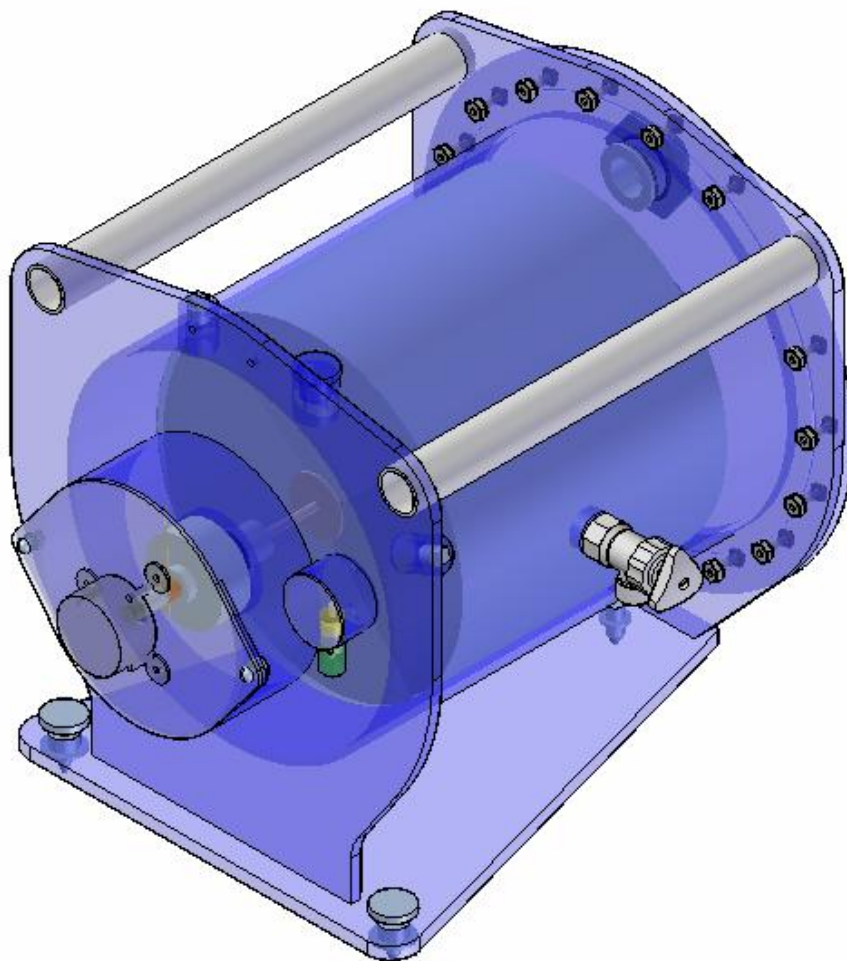
En una distribución rectangular  $p=57,7\%$  si  $k=1$ .

Cuando es necesaria una estimación más rigurosa de la incertidumbre expandida se utiliza la distribución  $t$  de Student y los grados de libertad como herramienta.

Estimar la incertidumbre de la medición requiere de un proceso extenso, que para evitar pasar por alto factores importantes en esta estimación, requiere que se haga de la manera más ordenada, por tal motivo son desarrolladas plantillas o formatos con los cuales es posible llevar de manera ordenada un registro de todas las variables que intervienen en el proceso, estos formatos varían de aspecto de acuerdo a factores como el mensurado y la complejidad del modelo matemático que se este manejando.

**ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**MANUAL DE INSTRUCCIONES DE CALIBRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO**



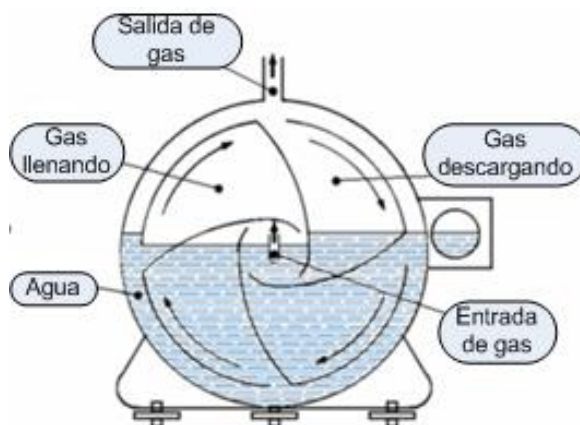
**MEDIDOR DE FLUJO DE GAS TIPO CÁMARA HÚMEDA**

## FUNCIONAMIENTO

Estos medidores son de tipo desplazamiento positivo, con alta exactitud y baja incertidumbre para mediciones de volumen y caudal de gas relativamente pequeñas. Consisten esencialmente de un cuerpo que contiene un tambor de medición, con cuatro compartimientos separados, montados sobre un eje que gira libremente. El cuerpo está lleno aproximadamente al 60% de su volumen con agua.

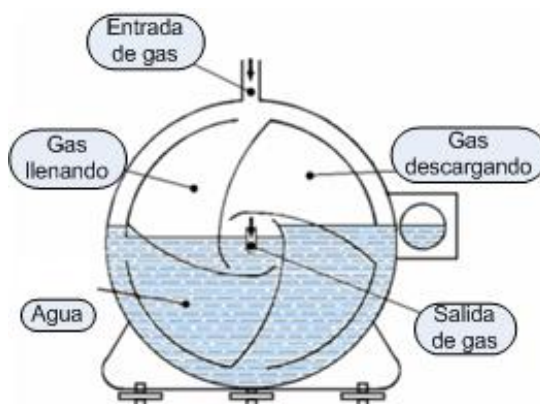
El funcionamiento de las cámaras húmedas las divide en dos tipos, dependiendo de la manera como realiza su recorrido el gas medido a través del tambor, estos tipos son: normal y Hyde.

**Figura 1 Tipo normal**



- ü Principio normal de funcionamiento. En este la entrada de gas al medidor está dispuesta de forma que el gas pase primero a través del tambor de medición (figura 1).
- ü Principio Hyde: La entrada de gas al medidor está ubicada en el espacio por encima del nivel de agua, en el exterior del cuerpo de la cámara y el gas debe entonces pasar a través del tambor hacia la salida del medidor (figura 2).

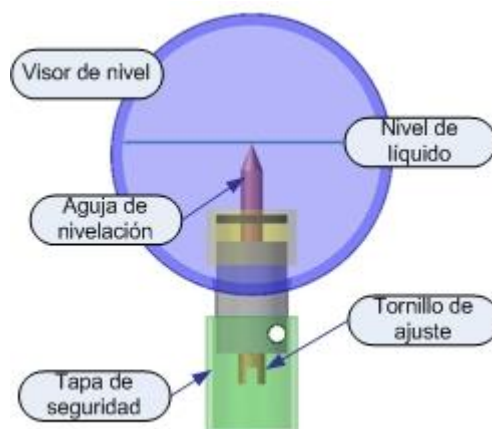
**Figura 2 Tipo Hyde**



### **Visor del nivel de líquido**

Las partes que componen el visor de nivel de líquido son mostradas en la figura 3.

**Figura 3 Visor de nivel**



### **Gases corrosivos**

Es claramente imposible cubrir todos los usos potenciales de estos medidores para todos los gases. Normalmente, los medidores no son construidos para usar en donde se midan gases corrosivos. En ciertas condiciones, por modificación de materiales o por uso de un recubrimiento protector, los medidores pueden ser hechos para usos que no son conocidos normalmente.

### **Condiciones de presión**

- ü Los medidores son adecuados para el uso bajo condiciones de presión que no excedan los 50 mbar. Cuando la presión sobrepasa estos límites
- ü El medidor registra el volumen que pasa bajo condiciones actuales de uso, pero cuando son requeridos volúmenes de aire libre deben ser aplicadas correcciones a la presión del medidor.
- ü Cuando es requerido el volumen reducido para condiciones estándar debe ser aplicada la corrección apropiada para las lecturas del medidor basada en la ley de Boyle y de Charles y en datos de humedad

### **ADVERTENCIA**

NO EXCEDA LA PRESIÓN RECOMENDADA  
NO EXCEDA EL CAUDAL RECOMENDADO  
USE CON EXTREMO CUIDADO CUANDO UTILICE GASES CORROSIVOS  
SIEMPRE CIERRE EL SUMINISTRO DE GAS A LA ENTRADA DEL  
MEDIDOR ANTES DE CERRAR LA SALIDA

## **INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN**

### **Ajuste inicial**

- ü Nivelar el medidor usando los 2 tornillos de nivelación en conjunto con el nivel de gota.
- ü Llenar el medidor con agua hasta que el nivel coincida exactamente con la punta de la aguja de nivelación.
- ü Realizar las conexiones para el medidor como sigue:  
Entrada: la conexión central de la parte trasera  
Salida: La conexión superior en la parte trasera
- ü Poner en funcionamiento el medidor por no menos de dos revoluciones del puntero para asegurar que es conseguido el nivel correcto de agua dentro del tambor.

El medidor esta ahora listo para usar.

### **Rutina de verificaciones antes de comenzar las pruebas**

- ü Verificar la nivelación del medidor
- ü Verificar el nivel de agua, si es necesario se debe sustraer o añadir agua.

## **CUIDADO Y MANTENIMIENTO**

- ü Si el medidor será almacenado después de una serie de pruebas, este debe ser vaciado, limpiado con agua y no ser llenado hasta que se requiera nuevamente para su uso.
- ü El agua en el medidor debe ser remplazada a intervalos de aproximadamente 2 meses, o mas frecuentemente si los gases que están siendo utilizados podrían contaminar el agua y crear una solución corrosiva.
- ü Si los gases que están siendo medidos son particularmente solubles en agua, será necesario pasar una cantidad a través del medidor suficiente para saturar el agua antes que puedan ser de obtenidas mediciones exactas.
- ü Cuando un medidor que ha sido llenado con agua es posteriormente llenado con aceite, se debe asegurar que toda el agua es completamente drenada y que es cambiada por un tipo de aceite adecuado.

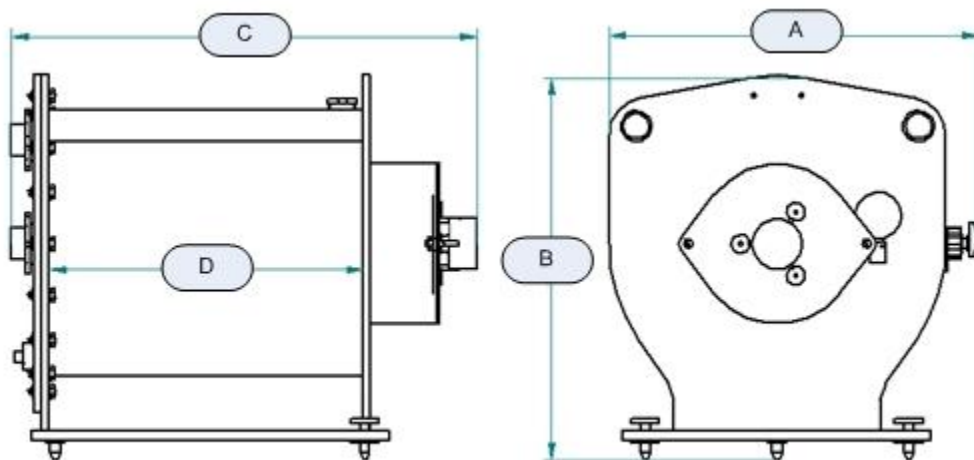
## **RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE FLUJO DE GAS TIPO CÁMARA HÚMEDA**

- ü** Después de revisadas o remplazadas las partes los sellos, el medidor es presurizado y verificado por fugas.
- ü** El medidor es llenado con agua hasta un nivel de aproximadamente la mitad del visor de nivel.
- ü** El medidor es nivelado usando los apoyos ajustables en conjunto con un nivelador de gota y conectado a un patrón volumétrico.
- ü** El caudal de salida del patrón es ajustado para el caudal normal de la cámara húmeda.
- ü** A continuación un volumen específico de aire es pasado a través del medidor al caudal normal de funcionamiento. Deben ser tomadas las lecturas de inicio y parada.
- ü** Si las lecturas no corresponden con el volumen de aire pasado, se añade o drena agua del medidor hasta que la lectura corresponda exactamente con el volumen de aire pasado.
- ü** Una vez que el nivel de agua se haya establecido y chequeado se fija el punto de indicación en el visor de nivel.
- ü** El medidor está ahora calibrado.

## DATOS TÉCNICOS DEL MEDIDOR CÁMARA HÚMEDA

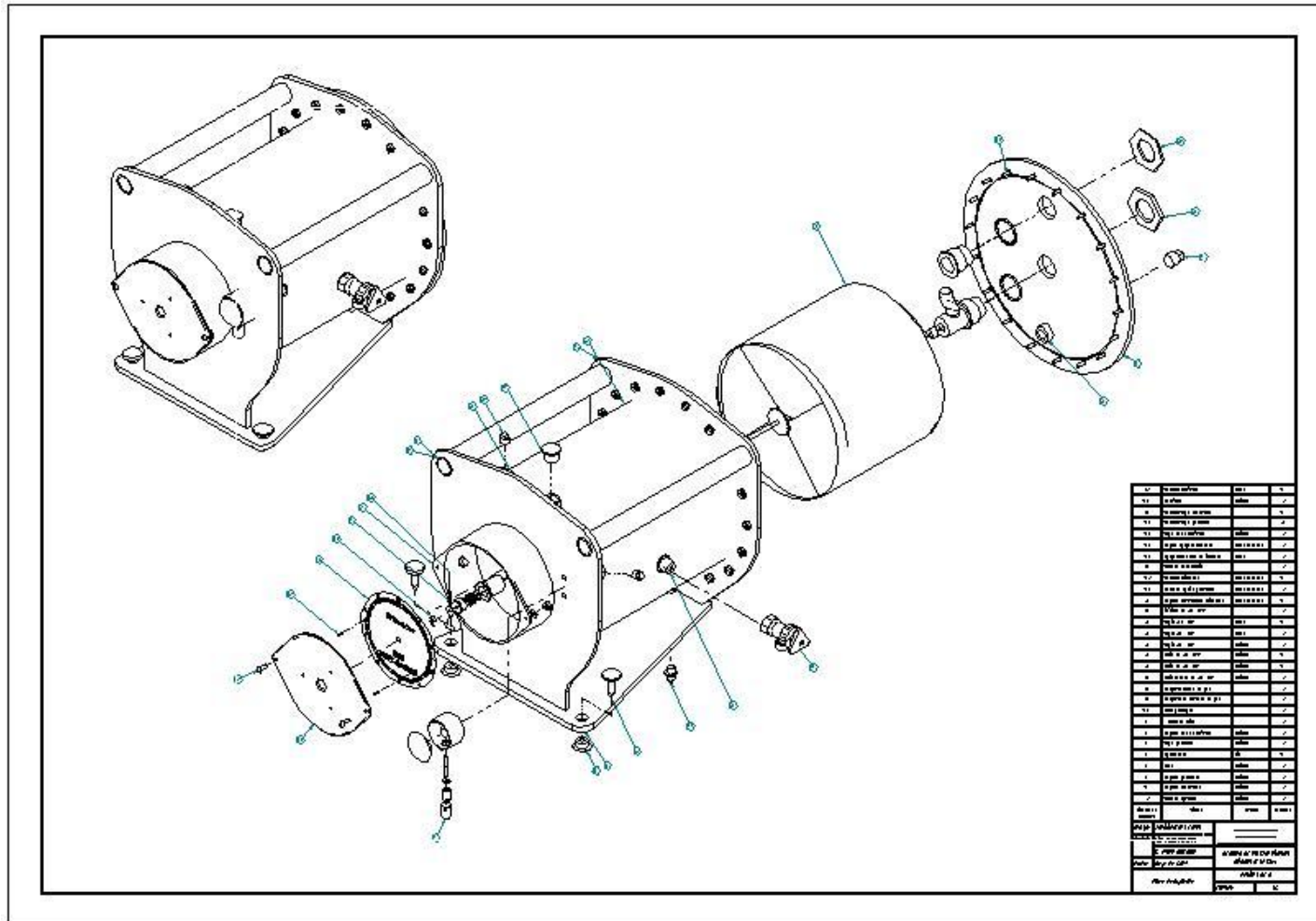
|                                                    |          |       |
|----------------------------------------------------|----------|-------|
| <b>Capacidad del tambor de medición [l/rev]</b>    |          | 10    |
| <b>Caudal máximo [litro/min]</b>                   |          | 41,66 |
| <b>Caudal mínimo [litro/min]</b>                   |          | 0,416 |
| <b>Peso aproximado sin líquido [kg]</b>            |          | 10    |
| <b>Cantidad aproximada de líquido sellante [l]</b> |          | 12,5  |
| <b>Dimensiones aproximadas [cm]</b>                | <b>A</b> | 39,4  |
|                                                    | <b>B</b> | 40,5  |
|                                                    | <b>C</b> | 49,5  |
|                                                    | <b>D</b> | 33,4  |

Vistas para indicar las dimensiones



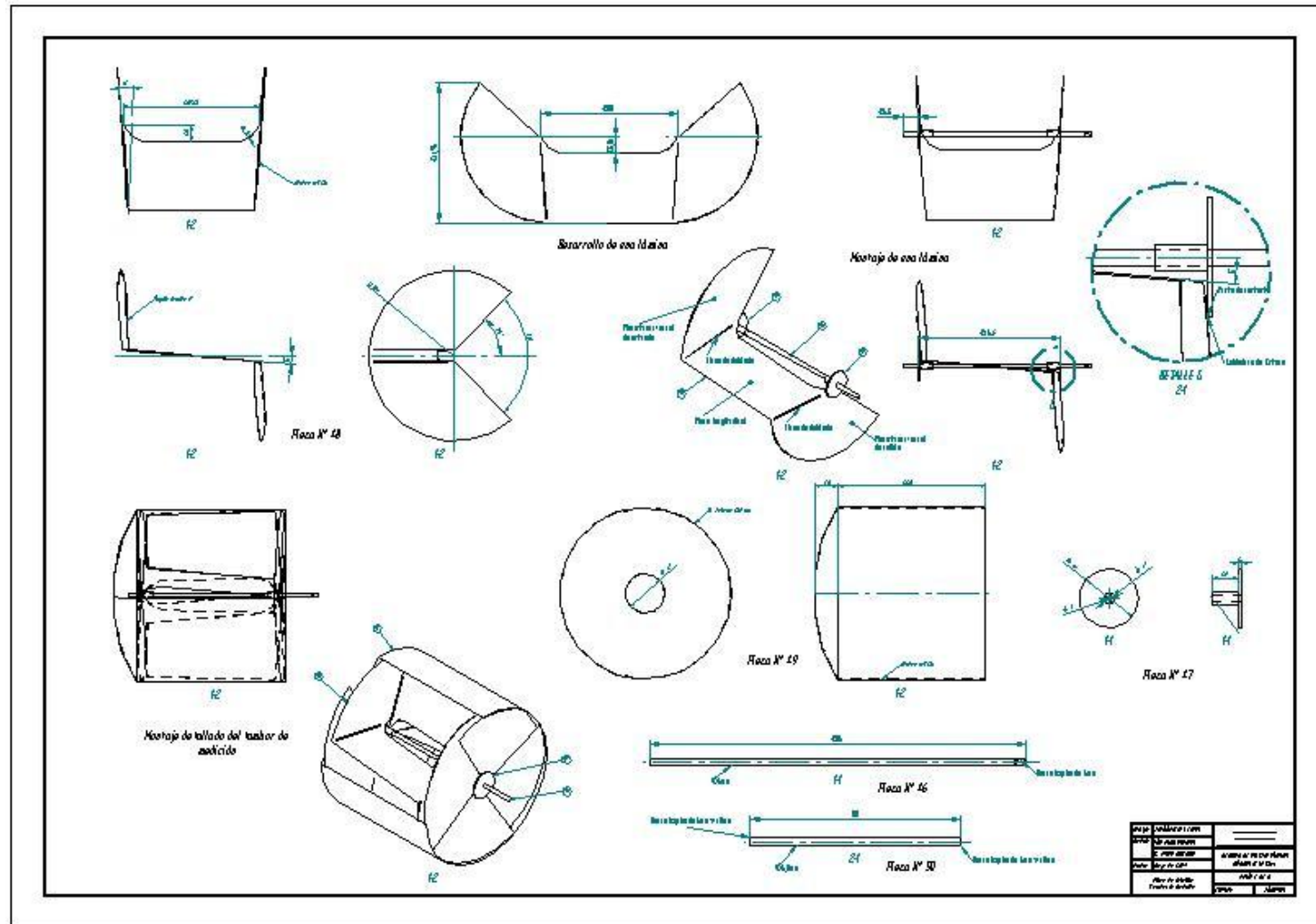
## **ANEXO 2**

## 1. Plano de explosión



[illegible]

## 2. Plano de detalle – tambor de medición





#### 4. Plano de detalle – accesorios

