

# MODELOS ANALÍTICOS Y COMPUTACIONALES PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE UN GAS EN UNA CÁMARA DE VACÍO EN LA INCERTIDUMBRE DE CALIBRACIÓN

F.J. Suero Sanchis (1), H. Fuentes González (1), F. Manso Guzmán (1), J.A. Santana Amado (1)  
 (1) Centro de Metrología y Calibración del INTA  
 Email: fsuero@inta.es Tlf: 669314010

Ponencia nº SP2-R33-P

**RESUMEN:** Las actividades relacionadas con el ensayo y la calibración aplicada a instrumentos de medición de vacío cobran mayor importancia cada día, por ejemplo, en aplicaciones del sector espacial, tecnológico o en los sectores relacionados con la alimentación.

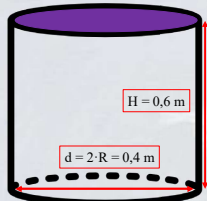
Es fundamental disponer de un conocimiento amplio y profundo de todas las contribuciones que pueden afectar a la incertidumbre de medida del vacío, incluida la distribución espacial de un gas en las cámaras de vacío, en las que se produce una entrada del mismo desde un punto y se produce la evacuación de este por otro (condiciones asociadas a la medida dinámica de presión de vacío). El laboratorio de Presión y Masa del INTA ha desarrollado dos modelos para la comprensión de la distribución del gas en una cámara cilíndrica. Además, se han realizado medidas en distintos puntos geométricos de una cámara de vacío real para comprobar experimentalmente el campo de aplicación y la validez de los modelos.

## INTRODUCCIÓN:

Se dispone de dos modelos, contrastados con datos experimentales. El objetivo de esta ponencia es determinar si la presión es o no homogénea a lo largo de las paredes de una cámara de vacío. Para ello, se calculan distintos parámetros que caracterizan la presión de un sistema:

- **Método Analítico:** Se plantean ecuaciones diferenciales y se obtiene ANALÍTICAMENTE una función que modela la concentración de un gas a lo largo de un cilindro dadas unas condiciones de contorno. La presión es proporcional al flujo,  $P = \frac{nRT}{V}$  (gas ideal)
- **Método Computacional:** Se simula la trayectoria de varias partículas y se estima cuántos choques realizan contra las paredes de un contenedor. El número de choques es proporcional a la presión.
- **Medidas en Banco Real:** Midiendo con un mismo equipo en distintos puntos geométricos del banco, se puede llegar a confirmar si los modelos funcionan o no, y asegurar si existe homogeneidad en las paredes.

## MODELO ANALÍTICO:

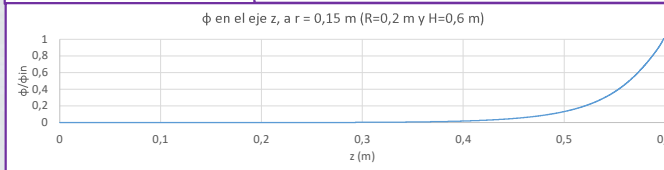
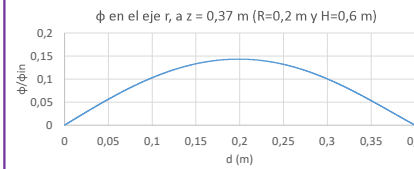
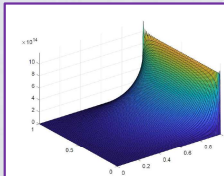


### Consideraciones:

- Se cumple la Primera Ley de Fick (Difusión)
- Se cumple la Ecuación de Continuidad (Partículas finitas)
- Régimen Estacionario (dn/dt=0)
- Medio isoterma T(r,z)=T0
- Simetría azimutal

Condiciones de contorno para la concentración de gas  $\phi$ :

$$\begin{cases} \Phi(r, 0) = 0 & \text{Bomba en tapa inferior} \\ \Phi(r, L) = \Phi_{in} & \text{Inlet de gas en tapa superior} \\ \vec{n} \cdot \nabla \Phi(R, z) = 0 & \text{El flujo no atraviesa las paredes} \end{cases}$$



### Desarrollo

- A partir de la Segunda Ley de Fick en régimen estacionario para partículas:

$$\frac{dn}{dt} = D \cdot \nabla^2 n \rightarrow \nabla^2 n = 0$$

- La solución a la ecuación en coordenadas cilíndricas se plantea mediante separación de variables:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{\infty} B_m \phi_m$$

$$\Phi_m = R_m(r) \cdot Z_m(z)$$

- Que admite dos posibles soluciones ( $J_1$  e  $Y_1$  son funciones de Bessel de primera y segunda especie respectivamente, de orden  $l$ ):

$$\Phi_m = \begin{cases} \alpha_m \cdot \sinh(k_m z) \cdot J_0(k_m r) + \beta_m \cdot \cosh(k_m z) \cdot J_0(k_m r) \\ \alpha_m' \cdot \sin(k_m z) \cdot I_0(k_m r) + \beta_m' \cdot \cos(k_m z) \cdot I_0(k_m r) \end{cases}$$

- Aplicando las condiciones de contorno, sólo se admite la solución:

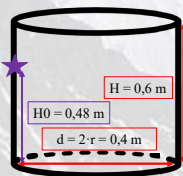
$$\Phi_m = \alpha_m \cdot \sinh\left(\frac{p_m}{R} z\right) \cdot J_0\left(\frac{p_m}{R} r\right)$$

- Las funciones de Bessel  $J_\alpha(p_m r/R)$  forman una base ortogonal en  $u \in [0,1]$ , donde los coeficientes  $p_m$  son soluciones de  $J_1\left(\frac{p_m}{R}\right) = 0$ .
- Se desarrolla  $\Phi$  en  $J_1\left(\frac{p_m}{R} r\right)$  en el intervalo  $[0,R]$ .
- Donde, tras aprovechar del todo las condiciones de contorno, queda como:

$$\Phi = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \Phi_{in} \int_0^R r \cdot J_1\left(\frac{p_m}{R} r\right) dr}{R^2 [J_2(p_m)]^2 \cdot \sinh\left(\frac{p_m}{R} L\right)} \cdot \sinh\left(\frac{p_m}{R} z\right) \cdot J_0\left(\frac{p_m}{R} r\right)$$

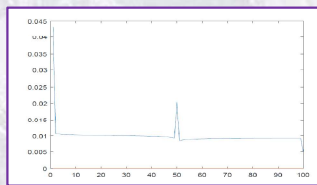
## MODELO COMPUTACIONAL:

La presión que ejercen las partículas de un gas sobre una superficie es proporcional al número de impactos que se producen. Por tanto, se estima el número de impactos que N partículas simuladas sufren contra una geometría concreta.



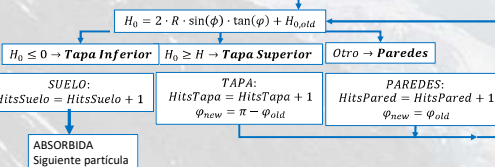
### CONSIDERACIONES

- N Partículas
- Trayectorias rectilíneas
- Choques elásticos
- No hay interacción entre partículas
- No hay fugas



N Partículas

$\Phi$ , ángulo azimut, aleatorio  
 $\phi$ , ángulo polar, aleatorio  
 $H_0$ , altura desde la que se inicia la trayectoria



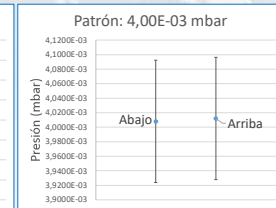
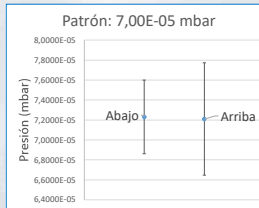
## CARACTERÍSTICAS DEL BANCO SIMULADO

- Radio,  $R = 0,2$  m
- Altura,  $H = 0,6$  m
- Altura fuente partículas,  $H_0 = 0,48$  m
- Eficiencia de la bomba,  $\alpha = 1$  (perfecta)

## MEDIDAS EN BANCO REAL:

Para comprobar si los modelos son eficaces o no, se toman varias medidas en un banco de vacío real de geometría aproximadamente cilíndrica, donde el gas es inyectado desde una toma de una pared a una cierta altura y es extraído por una bomba a través de un orificio en la superficie inferior. Se determina la presión mediante un vacuómetro de tipo Penning en dos puntos espaciales, ambos separados por una diferencia de alturas de 227,15 mm. El punto superior está situado por encima de la entrada de gas, y el inferior, por debajo. Para asegurar que se mide siempre en el mismo punto, se utiliza un patrón de referencia que permanece estático.

	Descripción	Marca	Modelo	Rango	Expected U
Patrones	Vacuómetro de Ionización	LEYBOLD	IE414	2E-11 to 1e-2 hPa	5% VM
	Spinning-Rotor-Gauge	MKS	SRG-BF Ball/Flange	2E-7 to 2E-2 hPa	2% VM
Equipo	Vacuómetro tipo Penning	LEYBOLD	PKR 361	5E-9 to 1E+3 hPa	5% VM



Patrón	Abajo		Arriba		Error Normalizado
	P medida [mbar]	U [mbar]	P medida [mbar]	U [mbar]	
7,00E-05	7,231E-05	3,7E-06	7,210E-05	5,6E-06	0,03
4,00E-03	4,008E-03	8,4E-05	4,012E-03	8,4E-05	0,03

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES:

Los dos modelos, tanto el analítico como el computacional, estiman que la distribución del gas a lo largo de la cámara y cerca de las paredes es homogénea. Las medidas realizadas con un banco de vacío real, en dos puntos separados en el eje vertical, muestran que, para las precisiones de calibración típicas de cada rango, **no existe un efecto sistemático apreciable en las medidas.**

Además, se ha desarrollado una función analítica a partir de las ecuaciones que rigen un sistema geométrico bastante aproximado al caso real, lo cual es una herramienta extremadamente útil para la caracterización del banco. Los siguientes pasos del laboratorio consistirán en poner a prueba el modelo analítico frente a otras medidas experimentales y conseguir alcanzar una mayor comprensión del comportamiento del gas en las regiones de mayor vacío.

## REFERENCIAS:

- **UNE-EN ISO/IEC 17025:2017** Requisitos generales relativos a la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración
- EURAMET Calibration Guide No. 17. Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers.
- **CEM ME-001** Procedimiento para la calibración de medidores de vacío
- **CEM ME-018** Procedimiento para la calibración de manómetros de ionización
- **ENAC NT-22.** Calibración de manómetros, transmisores y transductores de presión. Contenido Básico de los certificados.