

Quantum Pascal: Propuestas límite y fundamentación cuántica

E. Bernabeu⁽¹⁾, S. Molto^{(2)*}, M.A. Sáenz-Nuño⁽³⁾, T. Belenguer^(1,4),
M.C. García-Izquierdo⁽²⁾, M.N. Medina⁽²⁾ y D. del Campo⁽²⁾

⁽¹⁾Universidad Complutense de Madrid: Avda. Séneca, 2. Ciudad Universitaria 28040 Madrid.

⁽²⁾Centro Español de Metrología: Calle Alfar, 2. 28760 Tres Cantos, Madrid.

⁽³⁾Instituto de Investigación Tecnológica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería-ICAI-Universidad Pontificia Comillas: Calle de Sta. Cruz de Marcenado, 26. 28015 Madrid.

⁽⁴⁾Laboratorio de Investigación Espacial –LINES- INTA: Carretera Aljavir, km, 4. 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid.

* Teléfono: 918074823, correo electrónico: smolto@cem.es.

RESUMEN

En el proyecto EMPIR 18SIB04 QuantumPascal se realiza una investigación sobre métodos de medidas primarios de presión. Las realizaciones actuales del Pascal se basan en manómetros de pistón o balanzas de presión y manómetros líquidos conteniendo mercurio, elemento tóxico. Ambos, miden la presión a través de fuerza por área.

Este proyecto propone el desarrollo de patrones de presión basados en la determinación de la densidad de un gas utilizando la ley de los gases y la relación de Lorentz-Lorenz para relacionar dicha densidad con la medida del índice de refracción. De esta manera se promete un proceso de medida limitado únicamente por la precisión de los cálculos cuánticos. Para ello este proyecto busca alcanzar una incertidumbre con factor de cobertura $k=1$ que en el rango de 1 Pa a 1 kPa es de 500 ppm y en el rango de 1 kPa a 100 kPa es de 10 ppm. Para cumplir con dicho objetivo se necesitan superar distintos retos al límite tecnológico, como: alcanzar una deformación mínima y una estabilidad térmica próxima al mK en el dispositivo básico de medida: un refractómetro interferencial de Fabry-Perot

1. INTRODUCCIÓN

La relación entre la densidad de un gas y el índice de refracción se establece por la relación de Lorentz-Lorenz, por lo que para acceder a la presión se hace necesario realizar una refractometría. La técnica refractométrica seleccionada es la de coincidencia de modos entre los de dos cavidades Fabry-Perot (F-P) idénticas y poder establecer medidas diferenciales.

Una cavidad Fabry-Perot consiste en dos espejos plano-paralelos de alta reflectividad separados por una distancia dada. Solo luz con ciertas frecuencias o longitudes de onda pueden mantenerse dentro de la cavidad (los modos axiales o normales de la cavidad) [1]. En la Fig. 11 se presentan los modos axiales de una cavidad F-P perfecta con 100 mm de separación entre espejos plano-paralelos con una reflectividad del 87 %, donde ν_0 es el rango espectral libre, F_R es la fineza reflectiva y ν_q es la frecuencia de los modos normales.

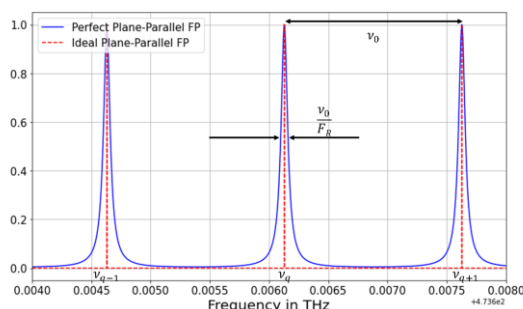


Fig. 1: Modos normales de una cavidad F-P perfecta (línea continua azul) y F-P ideal (líneas en trazos rojos) 100 mm de separación entre espejos plano-paralelos y con reflectividad del 87 %.

Midiendo el desplazamiento relativo en frecuencia entre los modos es posible determinar el índice de refracción. Conociendo el índice de refracción se calcula la presión del gas. Para medir dicho desplazamiento se hace un barrido en la frecuencia del haz y la servo-electrónica se ocupa de mantener siempre el mismo modo seleccionado. El uso de dos cavidades F-P permite establecer la comparación entre una cavidad en vacío o a una presión dada conocida del gas y la otra cavidad a una presión problema del mismo gas a determinar por diferencia.

2. FABRY-PEROT Dual Real CEM: desarrollo y selección de materiales y componentes

2.1. El Sistema Óptico

El sistema propuesto por el CEM consta de una cavidad F-P cuyo espaciador está construido en NEXCERA CD107 de KHC y los espejos en ClearCeram CCZ-Regular de Ohara Glasser. La geometría del espaciador es cilíndrica para minimizar deformaciones y las dimensiones se escogieron tal que el cociente de espesores de espejos/espaciador corresponda al primer cero de la función J_0 de Bessel, función asociada con la simetría cilíndrica de revolución. El diámetro interno del espaciador es de 20 mm, para cumplir con los requisitos de una apertura numérica de 0,2. Además, se ha analizado por simulación que este diámetro proporciona un régimen más laminar en variaciones rápidas de presión que con diámetros más pequeños.

Se realizó un análisis mecánico de la cavidad utilizando la técnica de elementos finitos, calculando la deformación en el eje largo de un espaciador hecho de Zerodur, con el fin de comparar nuestra geometría con la de otro diseño propuesto por NMIs –National Metrology Institute-. En la

Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos por la geometría del CEM y los obtenidos por otros NMIs [2], donde se ve que la geometría del CEM tiene una deformación relativa normalizada en presión (ϵ) menor que la propuesta.

Tabla 1: Deformación relativa normalizada en presión (ϵ) obtenida por la geometría del CEM frente la obtenida por otros NMIs [2].

Centro metrológico	ϵ (1/Pa) $\times 10^{-12}$	$u(\epsilon)$ (1/Pa) $\times 10^{-12}$
CEM	-5,7585840	0,047
NMIs [2]	-6,3902	1,5

NEXCERA CD107 y CCZ-Regular son cerámicas más resistentes que Zerodur o INVAR. Por lo que se realizaron simulaciones de la deformación de los espejos, considerando espejos plano-paralelos y teniendo en cuenta vacío en el interior de la cavidad y presión atmosférica en su exterior para diferentes configuraciones. En la Fig. 2 se presentan los resultados de dichas simulaciones, donde se aprecia que la configuración con mayor deformación es la de dos espejos de Zerodur y las que menos deformación presentan son las de dos espejos de NEXCERA CD107 y la de un espejo de NEXCERA CD107 y otro de CCZ-Regular. Lo ideal sería tener la configuración de dos espejos de NEXCERA CD107; sin embargo, este material no es óptico (es opaco), por lo que no se podría utilizar una configuración con dos espejos de este material con transmisión desde o con el exterior, salvo recurrir a sistemas de fibra óptica.

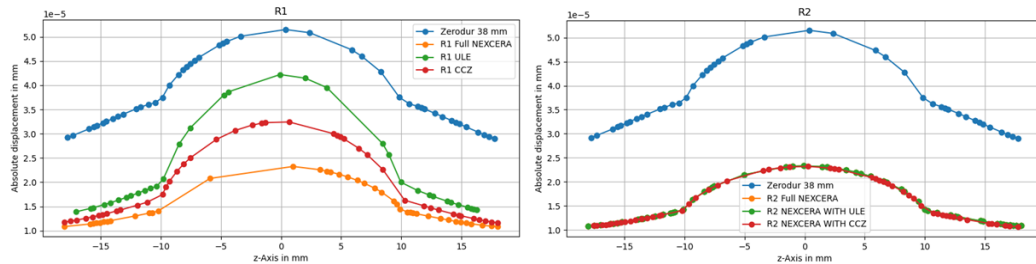


Fig. 2: Deformación de los espejos para diferentes configuraciones cuando hay vacío en el interior de la cavidad y presión atmosférica en el exterior.

3. ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN ÓPTICA INSTRUMENTAL

El esquema funcional de cualquier dispositivo óptico responde a tres etapas de conceptualización que deben guiar el diseño, el desarrollo de componentes, así como las características de funcionamiento y operatividad del dispositivo final. Estas tres etapas se concretan en: modelo Ideal, modelo Perfecto y modelo Real.

El modelo Ideal es una abstracción límite que puede paragonarse al mismo nivel que la de asumir en Mecánica el “péndulo simple” (que realmente no existe), o concepto abstracto de punto en Matemáticas, o el de onda plana infinita, entre otros.

Un F-P ideal es aquel en que el factor de reflexión de sus espejos plano-paralelos tiende al límite 1. En tal caso, la conocida función de Airy [1] se transforma en una función peine, constituida por una serie infinita de deltas de Dirac separadas en el espacio de frecuencias por $\gamma_q = c/2L$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, L la separación entre espejos y el subíndice “ q ” son valores de números enteros consecutivos. En longitudes de onda la separación entre órdenes interferenciales axiales vendrá dada por $\Delta\lambda = 1/2nL$, donde n es el índice de refracción del medio entre los espejos. La variación de índice de refracción por variación de la presión y la ayuda de dos lentes de focal adecuada para establecer la correspondencia entre un objeto luminoso (considerado monocromático), dispuesto en la focal objeto de la lente colimadora, y en el foco imagen de la lente colectora donde se formara una imagen en el plano perpendicular al eje de revolución del sistema óptico. En ese plano focal imagen se formarán una repartición de máximos en forma de anillos concéntricos repartidos en torno al punto del eje de simetría en ese plano. El radio de los anillos concéntricos responderá a $\rho_q = f' \cdot \text{tag} \epsilon$, en la que f' es la focal de la lente colectora y ϵ viene fijado por la ecuación $2 \cdot n \cdot L \cdot \cos \epsilon = K \cdot \lambda$, por lo que los anillos irán creciendo en diámetro para números enteros K menores y correlativos, tendiendo a juntarse conforme aumenta su diámetro en razón de raíz cuadrada del número correlativo creciente de anillos $p-1$ (comenzando por $p=1$ anillo central de orden K_0 y los consecutivos 2,3,...).

Si se otorga un valor realista al factor de reflexión el coeficiente multiplicador del denominador de la función de Airy puede expresarse como $F_R = 4R/(1-R)^2$, que se le conoce como fineza refractiva F_R , o mejor aún el parámetro $\mathcal{F}_R = \pi F_R^{1/2}/2$ para que se corresponda al criterio resolutivo de Lord Rayleigh (de ahí el factor $\pi/2$ sobre $F_R^{1/2}$). Este parámetro \mathcal{F}_R da cuenta desde un punto realista de dos estimadores importantes:

1. \mathcal{F}_R viene a corresponder con el número de las reflexiones múltiples que eficazmente influyen en el sumatorio del número de ondas múltiples que interfieren.
2. El cociente $\gamma_q / \mathcal{F}_R = \delta\gamma$ da cuenta de la anchura a media altura del perfil en frecuencias y de manera análoga puede expresarse en longitudes de onda $\delta\lambda = \Delta\lambda / \mathcal{F}_R$. La dependencia inversa de \mathcal{F}_R indica que para valores elevados implica perfiles más estrechos –más finos- (de

ahí el término “fineza”) y, en tal caso, $\Delta\lambda/\delta\lambda = \mathcal{R}$ expresa, también, el número de elementos espectrales “independientes”.

Si se tiene en cuenta el desarrollo en serie de la función $\text{sen}^2 \delta/2 \approx (\delta/2)^2$, la función de Airy se corresponde con una función de Lorenz o lorenziana, que bajo la “aproximación de pico estrecho” (factores de reflexión elevados $R > 80\%$) es válida como función representativa de un F-P Perfecto y es la que se le puede otorgar en lugar de función de Airy.

Sin embargo, existen unas “realidades” limitantes y -en la mayoría de los casos no evadibles- que modifican la fineza refractiva y conducen a una “fineza operativa” \mathcal{F} .

Las causas reales son varias: el estado superficial final que tienen los espejos a utilizar, las aberraciones ópticas de “todo el conjunto del sistema óptico” (principalmente la ab. esférica, si se opera eje), la divergencia del haz de luz y el diámetro de apertura del diafragma selector si el sistema opera en eje. P. Jacquinet [3] considera que el resultado operativo de cualquier sistema espectrométrico es una operación producto de convolución de una función instrumental -función aparato- con la distribución espectral del espectro de la fuente de luz. A su vez, esta función aparato en el caso de un interferómetro de F-P es estimable como un producto de convolución múltiple de las distintas funciones asignables a cada causa real. Así, el estado superficial del pulido final de los espejos y la deposición de las láminas delgadas dieléctrica, en cuanto que son procesos de carácter aleatorios, se ajustan bien a una función de tipo gaussiano (“función de error estadístico”); la ab. esférica en cuanto asocia una función localmente extensa que convierte a la función ideal de punto: “delta de Dirac” en una estructura de disco con límites decrecientes y la parte central con un máximo ensanchado, por lo que la asignación a una función de Gauss es también adecuada; sin embargo, la divergencia del haz de luz y la actuación de límite espacial por un diafragma selector son funciones de tipo rectángulo - más propiamente en 2D serían de tipo disco circular al ser de revolución (con la aproximación implícita de desprestigiar inclinaciones angulares de dependencia proyectiva tipo coseno al ser ángulos muy próximos a 0° con el eje). El diámetro del diafragma selector es un parámetro instrumental elegible si se conoce el perfil de la función aparato o -al menos su anchura a media altura- para poder estimar un radio del diafragma que sea despreciable a efectos operativos sobre la función instrumental. Respecto a la divergencia del haz trabajando con fuentes láser monomodo de baja divergencia de haz (\approx mrad.) es posible ajustar la divergencia por un acoplamiento correcto con una óptica colimadora adecuada y una optomecánica micrométrica. Desde un punto de vista formal la tesis doctoral de R. Chabal [4] contiene un análisis minucioso y exhaustivo sobre los productos de convolución asignables a las distintas funciones contributivas de un F-P real. En esta línea, puede considerarse que el producto de convolución de una función rectángulo de anchura $\approx 1/10$ de una función lorenziana deja inalterable la función y hasta $\approx 1/4$ resulta una función lorenziana de anchura a media altura como suma de las dos semianchuras (es decir, 1.25 de la lorenziana sin convolucionar). También conviene recordar que el producto de convolución entre lorenzianas da una lorenziana de anchura a media altura suma directa de las anchuras de las lorenzianas convolucionadas. Y que para gaussianas, el producto de esas funciones da una función de Gauss cuya anchura será la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las anchuras a media altura de las funciones gaussianas. Finalmente, es conocido que el producto de convolución entre una función lorenziana y una gaussiana da una función de Voigt. Función no analítica, pero que se encuentra tabulada [5] y de la que existen aproximaciones funcionales de error estimado que facilitan su manejo analítico [6].

Muchos autores acreditados presentan en artículos y libros, sin justificación, una expresión para la Fineza Operativa F total como suma de inversas al cuadrado:

$$1/f^2 = 1/F_R^2 + 1/F_{ab}^2 + 1/F_\theta^2 + 1/F_{ds}^2 + \dots \quad (1)$$

Esta expresión es recogida incluso en guiones de trabajos de práctica docente experimental [7], como un estimador que en fase de diseño resulta útil. Su justificación se ve reforzada, en nuestra opinión, bajo la aproximación analítica de la función de Voigt citada [6]: pues esta aproximación consiste en una suma directa - punto a punto- de la función de Lorenz más de la de Gauss ponderadas por las razones normalizadas de las semianchuras de cada una de estas dos funciones respecto a la semianchura de la función de Voigt, por lo que la adición resulta proporcional a términos cuadrático, como en (1). No obstante, parece obligado hacer el análisis de la función instrumental y el tratamiento de datos experimentales por deconvolución en base a ajustes con la función de Voigt. Ahora bien, en las fases de diseño y de conformado experimental resulta útil el uso de la expresión (1), por lo que nosotros hemos hecho uso de ella.

4. CONFORMACIÓN DE CONFIGURACIONES FABRY-PEROT A PARTIR DE UN CONJUNTO COMPATIBLE DE ELEMENTOS BÁSICOS

Un análisis preliminar [1] condujo a dimensionar una serie de posibles configuraciones ópticas estables, adecuadas para la refractometría de diferentes gases para un rango de presiones de 0 a 100 kPa. A partir de este estudio y confrontando la literatura especializada no hemos encontrado se haya recurrido para un interferómetro F-P a un diseño óptico integral que minimice la aberración óptica esférica -la única relevante esperable en un dispositivo interferométrico de esta índole. Por ello, a pesar que los sistemas ópticos simétricos y casi simétricos aseguran "a priori" cierta compensación de las aberraciones ópticas (de punto y distorsión), no es menos cierto que las bases ópticas de los espejos que conforman una configuración F-P dada al estar formadas por elementos ópticos tipo "menisco" son susceptibles de minimización de aberraciones por el uso del cálculo de diseño automatizado [8]. Nuestro planteamiento de diseño óptico automatizado ha respondido a la imposición de las condiciones: optar por configuraciones ópticas de F-P simétricas o casi simétricas; recurrir al uso simétrico y de identidad para las lentes colimadoras y colectoras e imponer su compatibilidad con las distintas configuraciones F-P a conformar; ejecutar la minimización de aberración esférica en el conjunto completo de cada configuración F-P óptica seleccionada; así como realizar una selección previa de los materiales ópticos, basada por criterios de alta estabilidad dimensional y de muy bajo coeficiente de expansión térmica, optando por los de mejores prestaciones posibles: CERAM CCZ-Regular de Ohara Glasser para los distintos espejos y el bien conocido N-BK7 de Schott para los conjuntos de lentes colimadora/colectora. Como espaciador un bloque cilíndrico perforado de L=100mm en NEXCERA CD-107 de Krosaki Harima Corp. En la elección de dimensionado de componentes ópticas (espesores y aperturas) se compatibilizado con los resultados del análisis estabilidad dimensional de los formatos óptimos ya presentado.

Los resultados de cálculo automatizado de las distintas configuraciones ópticas nos ha permitido fijar un conjunto compatible de elementos ópticos, junto con sus tolerancias, que se concreta en:

2 espejos plano paralelos de factor de reflexión $R = 99,99\%$; 4 espejos esféricos cóncavos $R: 200,5 \text{ mm}$, de $R = 99,7 \%$; 2 espejos esféricos cóncavos $R: 400,25 \text{ mm}$ de $R = 99,8 \%$ y 6 lentes esféricas de focal $f' = 50 \text{ mm}$. Todas estas componentes ópticas con sus correspondientes tratamiento antirreflejante en las superficies requeridas y factores de reflexión citados lo son la longitud de onda de trabajo de 633 nm . Este conjunto compatible de componentes ópticas permite conformar 4 Configuraciones Ópticas para un F-P dual,

configuraciones estables de F-P que se muestran situadas en el diagrama de estabilidad [1] de la Fig. 3.

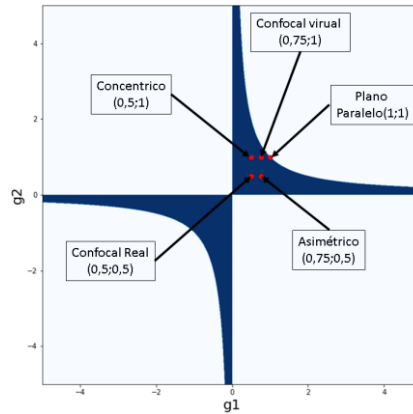


Fig. 3: Diagrama de estabilidad cavitario F-P y ubicación de las 4 configuraciones conformables, junto con la nominal F-P plano tomada como base de referencia formal. 1. Confocal Real, 2. Concéntrica, 3. Confocal Real y 4. Asimétrica (R1:4L/R2:2L/L=100).

Los resultados del cálculo automatizado realizado por nosotros muestran que la ab. esférica minimizada residual para las distintas configuraciones estudiadas se sitúa en valores de: RMS: $\approx 0,81$ a $0,97 \mu\text{m}$, inferiores radio de Airy: $\approx 1,75 \mu\text{m}$. Valores ambos muy inferiores al del radio de la cintura del haz láser: $\approx 100 \mu\text{m}$. Se ha apreciado que la configuración 3, aún da un mejor resultado si se incide como primera superficie por el espejo plano (RMS: $0,485 \mu\text{m}$).

Las configuraciones ópticas seleccionadas compatibles con un conjunto seleccionado de elementos ópticos comunes utilizando un espaciador común $L = 100 \text{ mm}$ son:

1. Confocal Real: R1: 200,5 mm + R2: 200,5 mm
2. Concéntrica: R1: 200,5 mm + R2: ∞
3. Confocal virtual: R1 400,25 mm + R2: ∞
4. Asimétrico R1/R2 = 2: R1:400,25 mm + R2: 200,5 mm.

4.1. Función instrumental para las configuraciones F-P propuestas. PARÁMETROS DE EQUIVALENCIA

Para conformar la función instrumental de las 4 configuraciones señalamos los cambios de equivalencia formal que permiten adecuar la función instrumental básica de un Interferómetro F-P de espejos plano-paralelo a la cada una de las configuraciones propuestas. La FR, al ser el parámetro más significativo de todo dispositivo interferométrico F-P.

Tabla 2 recoge los parámetros significativos de equivalencia, así como los valores estimados de Fineza Reflectiva \mathcal{R} , al ser el parámetro más significativo de todo dispositivo interferométrico F-P.

Tabla 2: Parámetros de equivalencia y valores estimados de \mathcal{R} , ν_q y $\delta\nu$ para las configuraciones estables Fabry-Perot seleccionadas

Configuración	Parámetros Equivalencia					
	Nº tramos L	F. Reflexión	m_{st}	\mathcal{R}	$\nu_q(\text{MHz})$	$\delta\nu(\text{kHz})$
Confocal Real	6	98,21 %	> 80	174	500	13.158
Concéntrico	8	98,80 %	> 96	260	375	7.979
Confocal	12	98,21 %	>	174	250	4.808

Virtual			130			
Asimétrico R1/R2 = 2	20	95,12 %	> 230	>63	150	2.632

5. SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN TÉRMICA

El sistema de estabilización térmica construido se basa en 3 fases (Fig. 4). La estabilización térmica de laboratorio, la estabilización de la primera cámara de aire, la estabilización de la segunda cámara de aire y una camisa de cobre que envuelve todo a cada conjunto cavitario F-P. Esta camisa a su vez está envuelta de unos calentadores flexibles.

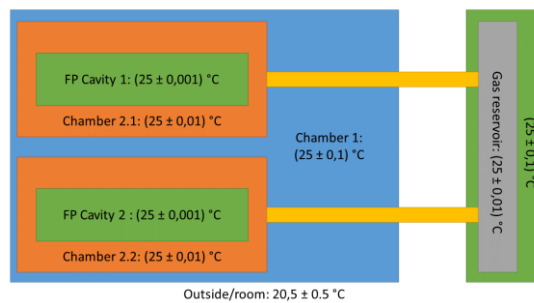


Fig. 4: Esquema del sistema de estabilización térmica.

La Fig. 4 se presenta un sistema para controlar la temperatura de un reservorio de gases donde los gases son pre-estabilizados térmicamente antes de entrar dentro del F-P dual.

Para calcular el espesor óptimo de la camisa de cobre de las cavidades Fabry-Perot y del reservorio de gases se utilizó la técnica de elementos finitos, comparando la temperatura de las caras internas de la cavidad con la temperatura del calentador, obteniendo los resultados de la Fig. 5. Analizando estos histogramas se obtuvo un espesor óptimo de 50 mm para la camisa de las cavidades y de 44 mm para la camisa del calentador de gases.

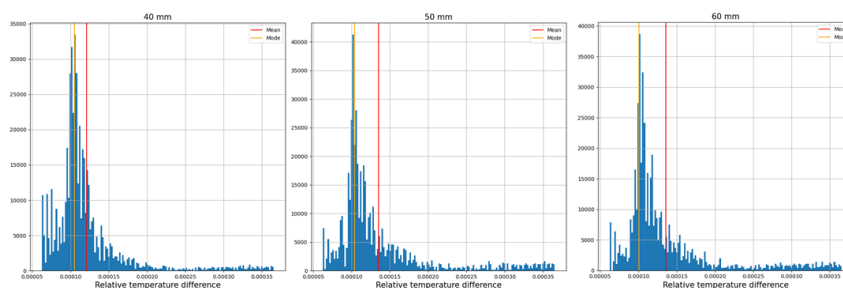


Fig. 5: Diferencia relativa entre las caras internas de la cavidad y la temperatura de los calentadores.

En referencia al control y la medida de temperatura del gas se utilizan 2 tipos de sondas térmicas: PT100 para control y SPRT para medida. Como se aprecia en la Fig. 6 se coloca una PT100 en el interior de la camisa de cobre y dos sondas SPRT: una en la camisa de cobre y otra en el interior del tubo de admisión de gases.

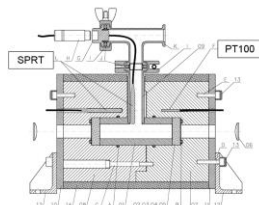


Fig. 6: Esquema del sistema de medida y control de temperatura de las cavidades.

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran la disponibilidad de un conjunto de 4 configuraciones estables de F-P conformables y compatibles con un mismo sistema de estabilización y control térmico capaz de conseguir $25^{\circ}\text{C} \pm \approx \text{mK}$, así como cubrir diferentes rangos de medida de presiones de hasta 30 KPa por determinación del índice de refracción de diferentes gases: nobles, H_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , ... a partir de una metodología propia, que generaliza la relación de Lorentz-Lorenz, y permite la extracción de dependencias lineales [8] con la presión y la temperatura que evitan el uso de los coeficientes del virial a la vez que genera un “factor de forma”. Factor que conecta directamente con cálculos “ab initio” mecano-cuánticos. A nuestro entender, esta última consideración es el objetivo primordial del “QuantumPascal Project” y para la trazabilidad para el Pascal como unidad del sistema internacional.

5. REFERENCIAS

- [1] E. Bernabeu, T. Belenguer, M. N. Medina: *Hacia el "Pascal Cuántico": una propuesta para el Diseño Óptico de un Patrón Primario de Presión*. e-medida, **15** (2019). [Número 15 – Revista e-medida](#). Este artículo es una introducción preliminar al QuantumPascal Project.
- [2] J. Zakrisson *et al.*: *Simulation of pressure-induced cavity deformation – the 18SIB04 QuantumPascal EMPIR project*, ACTA IMEKO, **9**, 281–286 (2020). [doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.985](#).
- [3] P. Jacquot: *New development in interference spectroscopy*, Rep. Prog. Phys. **23**, 267-311 (1960).
- [4] R. Chabbal: Tesis Doctoral. Univ. París VI. 1957. Rev. Opt. **37**, 336-501 (1958).
- [5] H. Flores-Llamas *et al.*: *Tables of the Voigt profile whit ten digits*. N. Inst. Meth. Phys. Res. Sec. B. **287**, 557-558 (1990).
H. G. Kuhn: Atomic Spectra. Longman. 1969. 2ª ed. Oxford. pp. 415-418.
- [6] J. M. Alvarez, E. Bernabeu: Análisis de perfiles de líneas espectrales mediante una aproximación analítica del prefll de Voigt. Opt. P. Apl. **11**, 99-106 (1978).
- [7] Tutorial Experimental Practices Lab. Siegen University. The Fabry-Perot Interferometer: [fabry-perot.pdf \(uni-siegen.de\)](#).
- [8] S. Moltó, M. A. Sáenz-Nuño, C. García-Izquierdo, E. Bernabeu: *A parametric methodology for the assignment of pressure values versus refractive measurement*. IMEKO 24th TC3, 14th TC5, 6th TC16 and 5th TC22 Intern. Conf. Aceptado. Publ. Enviada (pendiente de aceptación).

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible por los soportes económico y material del CEM, así como por la participación del CEM en el proyecto europeo EMPIR-EURAMET 18SIB04 “QuantumPascal”. La colaboración y soporte de la empresa IberOptics Systems Ópticos, S.L., en concreto de Manuel F. Herrera, han sido determinantes para su progreso. El impulso y la confianza de José Ángel Robres han sido las constantes que ha propiciado su desarrollo.