

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DESARROLLO DE UN PATRÓN DINÁMICO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO
METROLÓGICO DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN CON SALIDA ELÉCTRICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Doctorado en Ingeniería para optar al grado y título de Doctorado Académico en Ingeniería

ALBERTO JUAN DÍAZ TEY

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

Dedicatoria.

A mi esposa Lorena, quien me animó a comenzar este camino, y me apoyó durante TODO su recorrido.

Agradecimientos

Muchos compañeros valiosos me permitieron concluir este trabajo, aunque el afán perfeccionista siempre conspira en la terminación de un proyecto.

Al Dr. Georges Govaere Vicarioli, por su apoyo fundamental en la ejecución del Proyecto. Como Director de Tesis, siempre estuvo atento a su desarrollo, aportando recomendaciones estratégicas para que llegara a buen puerto. Como Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) y Coordinador de la Unidad de Ingeniería Marítima, Ríos y Estuarios (IMARES), supo enlazar el tema de mi tesis doctoral con los proyectos de investigación de la UCR.

Al Dr. Rafael Murillo Muñoz, quien durante el desarrollo de mi tesis me apoyó en su doble papel de Director del Programa de Doctorado en Ingeniería del Sistema de Estudios de Postgrado (SEP) de la UCR y como miembro del Comité Asesor de Tesis.

Al Dr. Lautaro Ramírez Vargas, quien con su incorporación y atinadas observaciones con respecto a las publicaciones, permitió el buen desenlace del proyecto.

Para mi trabajo fue fundamental el apoyo de dos expertos reconocidos internacionalmente: el Dr. Sasha Eiscstädt, matemático del Departamento 8.4 del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), y el Dr. Christophe Sarraf, Director del Laboratoire de Métrologie Dynamique de la Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (LMD-ENSAM): ambos confiaron en mi propuesta, a pesar de que no coincidía con el "estado del arte" de las mediciones dinámicas de presión, enfocadas a eventos de gran amplitud y frecuencia.

A Alex Fernández y Pedro Rojas, del INII, siempre atentos no solo a apoyarme en mis solicitudes de colaboración, sino en aportar mejoras en los prototipos desarrollados.

Al Sr. Eduardo Rojas, del Taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica y al Sr. Víctor Rodríguez Araya, del Laboratorio Técnico Mecánico de la Escuela de Física, por el apoyo en la elaboración mecánica de piezas fundamentales para el desempeño de los generadores de presión.

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Doctorado en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Doctorado Académico en Ingeniería

Dr. Orlando Arrieta Orozco
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Georges Andre Govaere Vicarioli
Profesor Guía

Dr. Rafael Eduardo Murillo Muñoz
Lector

Dr. Lautaro Ramírez Varas
Lector

Dr. Marcial Garbanzo Salas
Representante del Director
Programa de Doctorado en Ingeniería

Alberto Juan Díaz Tey
Sustentante

Tabla de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Hoja de aprobación.....	iv
Tabla de contenido	v
Resumen	ix
Abstract.....	xi
Lista de tablas	xiii
Lista de figuras	xviii
Lista de gráficos	xx
Lista de siglas	xxii
Lista de símbolos	xxiv
1 Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos e hipótesis	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Definición del alcance del proyecto	3
1.4.1 Climatología del oleaje en Costa Rica	3
1.4.2 Rango experimental de presiones.	6
1.4.3 Rango experimental de frecuencia	6
1.4.4 Verificación del rango de presiones y frecuencia	6
1.5 Alcances y limitaciones.....	9
2 Marco teórico	10
2.1 Sistemas de medida	10
2.1.1 Transductor de presión	11
2.1.2 Sistema de acondicionamiento de la señal.....	12
2.1.3 Sistema de adquisición de datos	12
2.2 Dinámica de los transductores de presión.....	14

2.2.1	Generalidades	14
2.2.2	Modelación mecánica.....	14
2.2.3	Modelación matemática	15
2.2.4	Respuesta en régimen estacionario.....	17
2.2.5	Respuesta ante una perturbación tipo escalón.....	18
2.2.6	Respuesta ante una perturbación periódica	19
2.2.7	Reconstrucción de una señal periódica según la serie de Fourier	22
2.3	La incertidumbre de las mediciones	24
2.3.1	Generalidades	24
2.3.2	Incertidumbre estándar tipo B	25
2.3.3	Incertidumbre estándar tipo A	26
2.3.4	Presupuesto de incertidumbre	32
2.3.5	Incertidumbre estándar combinada.....	32
2.3.6	Incertidumbre expandida.....	34
2.3.7	Aplicaciones de la incertidumbre expandida.....	35
2.4	La trazabilidad metrológica	38
2.4.1	Evaluación de la deriva instrumental: primera aproximación	38
2.4.2	Evaluación de la deriva instrumental: segunda aproximación	40
2.5	Verificación del sistema de medida de presión	42
2.5.1	Generalidades	42
2.5.2	La medición de la presión del fluido.....	44
2.5.3	La medición de la corriente eléctrica CD	46
2.5.4	La calibración estacionaria.....	47
2.5.5	La calibración dinámica.....	52
2.6	Diseño experimental	55
3	Las mediciones de presión en régimen estacionario: el primer problema	57
3.1	Generalidades.....	57
3.2	El generador de presión estacionaria	57

3.2.1	Requisitos de diseño	58
3.2.2	Parámetros de desempeño	58
3.2.3	Desarrollo del prototipo GPE-01	59
3.2.4	Configuración del proceso de medición y registro	60
3.2.5	Validación del prototipo GPE-01	61
3.3	TP EXTECH PT30-SD: resultados de la calibración estacionaria.....	65
3.4	Verificación de la competencia técnica.....	67
4	Las mediciones de presión en régimen transitorio: el segundo problema	69
4.1	Generalidades.....	69
4.2	El tubo de choque	69
4.2.1	Marco teórico.....	69
4.2.2	Número de Mach.....	71
4.2.3	Presión teórica del gas perturbado por el paso de la onda de choque	78
4.2.4	Presión teórica del gas perturbado por la reflexión de la onda de choque.....	79
4.2.5	Requisitos de diseño	81
4.2.6	Estado del arte	82
4.2.7	Parámetros de desempeño.....	86
4.3	El prototipo TC-01-(0.4/2)	87
4.3.1	Diseño y construcción	87
4.3.2	Evaluación dinámica en el LMD-ENSAM DOR10.....	109
4.4	Mejora operativa del prototipo de tubo de choque	114
4.4.1	El prototipo TC-02-(Lcc/Lce).....	114
4.4.2	Mejora de la medición del número de Mach	115
4.4.3	Mejora del mecanismo de sujeción del diafragma.....	118
4.4.4	Mecanismo de secado	119
4.5	Optimización del desempeño del prototipo de tubo de choque.....	120
4.5.1	Configuración del proceso de registro y medición.....	120
4.5.2	Efecto de la longitud de la cámara de expansión.....	121

4.5.3	Efecto de la longitud de la cámara de compresión	126
4.5.4	Efecto de la posición del puerto TP2-2	130
4.5.5	Efecto del espesor del diafragma.....	131
4.5.6	Efecto de la humedad del aire	135
4.5.7	Estimación de la desviación del comportamiento ideal del aire húmedo	140
5	Las mediciones de las señales periódicas de presión: el tercer problema	143
5.1	Generalidades.....	143
5.2	Generadores de válvulas rotatorias	144
5.3	Requisitos de diseño.....	149
5.4	Estado del arte	151
5.5	Desarrollo del prototipo	151
5.6	Procedimiento de reproducción de la señal periódica.....	152
5.7	Parámetros de desempeño.....	153
5.8	Resultados	154
5.8.1	Prototipo GPP-01-M.....	154
5.8.2	Prototipo GPP-02-A.....	157
6	Conclusiones.....	167
7	Líneas futuras de trabajo	173
8	Bibliografía	174
9	Anexos	182
	Anexo 1. Patrón dinámico de presión: cartas de trazabilidad metrológica de las mediciones.....	182
	Anexo 2. Publicaciones y presentaciones en Congresos y Talleres Internacionales relacionados con la tesis doctoral.....	184

RESUMEN

Esta tesis doctoral analiza los problemas conceptuales y prácticos asociados con el desarrollo de un patrón de presión dinámica para calibrar transductores de presión con salidas eléctricas de baja amplitud (entre 0,28 y 4,22 dbar), y baja frecuencia (desde 0,05 hasta 0,39 Hz), típicas de la climatología del Océano Pacífico Central costarricense.

La sustitución del enfoque de calibración estacionario por el de calibración dinámica requirió del desarrollo de un conjunto de generadores dinámicos de presión, que permitiera la "realización" de la definición de la presión dinámica. El término "realización" está referido a la reproducción de la presión dinámica, no a partir de su definición, sino mediante la construcción de "... un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico".

Al elegir entre la generación de presión periódica y aperiódica, la literatura consultada establece que "... es probable la conveniencia de elegir la generación de presión similar a la situación de medición real", sin embargo, algunos autores prefieren utilizar los generadores de presión aperiódica porque la calibración asociada se reduce a una sola prueba en la que, según la teoría matemática subyacente, toda la información de frecuencia requerida puede ser determinada.

Por la razón anterior, se utilizó el segundo enfoque, desarrollándose un sistema de medida basado en la teoría de la onda de choque normal, y el tubo de choque como medio tecnológico de su aplicación, pero ajustado al rango de aplicación de interés para el proyecto: en este caso, el generador de perturbaciones periódicas de presión solo es un medio de verificación de la respuesta en frecuencia del sistema de medida, evaluado previamente en el tubo de choque.

Lo atípico del rango de su aplicación más el uso de transmisores de presión con cámara de medida incorporada con sensores resistivos (los laboratorios de presión dinámica utilizan transductores de presión con sensores piezorresistivos expuestos), obligó a realizar una extensa validación de sus parámetros de desempeño.

Considerando que no existen patrones dinámicos de presión reconocidos internacionalmente como fuente de trazabilidad metrológica, se comparó el desempeño del sistema de medida de presión en el primer prototipo desarrollado: TC-01-(0.4/2), y en el tubo de choque TC10, que conforma el patrón de presión dinámico de Francia, depositado en custodia en el Laboratorio de Mediciones Dinámicas de la École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de París.

A partir de los resultados obtenidos, se mejoraron los diseños hasta alcanzar el prototipo de tubo de choque TC-02-(0.6/2), validado en dos presiones manométricas del aire perturbado por la primera reflexión de una onda de choque transónica ($M_s = 1,0207$): 1,93 dbar y 3,45 dbar, resultantes del estallido de dos diafragmas de láminas de aluminio de espesores 10,2 μm y 14,7 μm , respectivamente.

Los resultados de la validación demostraron la capacidad de reproducir ambas presiones de manera estable durante 2,900 ms, con una precisión intermedia máxima igual a 0,033 dbar y un sesgo no mayor a 2,88 % cuando el aire es secado hasta ≈ 20 %.

Estos parámetros de desempeño del prototipo de tubo de choque permiten calcular experimentalmente los coeficientes de la ecuación característica de un transmisor de presión con sensor metálico montado en un diafragma cerámico, utilizando el método numérico de Levenberg-Marquardt.

Los coeficientes ajustados de la ecuación característica portan la información de frecuencia requerida para estimar el comportamiento del transmisor de presión, cuando está sujeto a una perturbación periódica.

El desempeño dinámico del transmisor de presión ante una perturbación periódica se estableció en el prototipo GDP-02-A, que es un generador neumático basado en el método de volumen de control y capaz de generar una señal periódica similar a una triangular, cuya desviación fue ajustada por el método de regresión lineal.

El desempeño del prototipo GDP-02-A se validó en el rango de frecuencia desde $0,883\ 6^{+0.1062}_{-0.3948}$ Hz hasta $0,983\ 1^{+0.0068}_{-0.0088}$ Hz, demostrándose que la amplitud de la señal reproducida fue insensible a la frecuencia, de manera que la amplitud del armónico fundamental, prácticamente es el dominante: $0,168\ 7^{+0.0029}_{-0.0042}$ para $0,883\ 6$ Hz y $0,038\ 8^{+0.0677}_{-0.2513}$ para $0,983\ 1$ Hz, para una distorsión total promedio igual a 35,24 %.

La insensibilidad de la señal reproducida en el rango de frecuencias establecido, justificó la calibración en régimen estacionario de un sistema de adquisición de datos utilizado para medir la altura del oleaje gravitacional y verificar su desempeño metrológico, tanto en el prototipo neumático GDP-02-A como en el canal de oleaje con agua “dulce”, utilizando los coeficientes de ajuste.

ABSTRACT

This doctoral thesis analyzes the conceptual and practical problems associated with the development of a dynamic pressure standard to calibrate pressure transducers with low amplitude electrical outputs: between 0.28 and 4.22 dbar, and low frequency: from 0.05 down to 0.39 Hz, typical of the climate of the Costa Rican Central Pacific Ocean.

The replacement of the stationary calibration approach by the dynamic calibration approach required the development of a set of dynamic pressure generators, which would allow the "realization" of the definition of dynamic pressure. The term "realization" refers to the reproduction of dynamic pressure not from its definition but through the construction of "... a highly reproducible standard based on a physical phenomenon".

When choosing between periodic and aperiodic pressure generation, the literature consulted establishes that "... it is likely the convenience of choosing pressure generation similar to the real measurement situation", however, some authors prefer to use aperiodic pressure generators because the associated calibration is reduced to a single test in which, according to the underlying mathematical theory, all the required frequency information can be determined.

For that reason, the second approach was used, developing a measurement system based on the theory of the normal shock wave, and the shock tube as a technological means of its application but adjusted to the range of application of interest for the project: in this case, the generator of periodic pressure disturbances is only a means of verifying the frequency response of the measurement system previously evaluated in the shock tube.

The atypical range of its application, plus the use of pressure transmitters with a built-in measurement chamber with resistive sensors (dynamic pressure laboratories use pressure transducers with exposed piezoresistive sensors), required an extensive validation of their performance parameters.

Considering that there are no internationally recognized dynamic pressure standards as a source of metrological traceability, the performance of the pressure measurement system was compared in the first prototype developed: TC-01-(0.4 / 2), and in the TC10 shock tube, that conforms to the dynamic pressure standard of France, deposited in custody in the Laboratory of Dynamic Measurements of the École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers in Paris.

From the results obtained, the designs were improved until reaching the TC-02- (0.6 / 2) shock tube prototype, validated in two manometric pressures of the air disturbed by the first reflection of a transonic shock wave ($M_s = 1,0207$): 1.93 dbar and 3.45 dbar, resulting from the bursting of two diaphragms of aluminum sheets with thicknesses 10,2 μm and 14,7 μm respectively.

The validation results demonstrated the ability to reproduce both pressures in a stable manner for 2,900 ms, with a maximum intermediate precision equal to 0,033 dbar and a bias no greater than 2.88% when the air is dried up to $\approx 20\%$.

These performance parameters of the shock tube prototype allow the coefficients of the characteristic equation of a pressure transmitter with a metal sensor mounted on a ceramic diaphragm to be experimentally calculated using the Levenberg-Marquardt numerical method.

The fitted coefficients of the characteristic equation carry the frequency information required to estimate the behavior of the pressure transmitter when it is subject to periodic disturbance.

The dynamic performance of the pressure transmitter exposed to a periodic disturbance was established in the GDP-02-A prototype, which is a pneumatic generator based on the control volume method and capable of generating a periodic signal similar to a triangular one, whose deviation was adjusted by the linear regression method.

The GDP-02-A prototype was validated in the frequency range from $0,883\ 6_{-0.3948}^{+0.1062}$ Hz to $0,983\ 1_{-0.0088}^{+0.0068}$ Hz, demonstrating that the amplitude of the reproduced signal was insensitive to frequency, so that the amplitude of the fundamental harmonic is practically the dominant one: $0,168\ 7_{-0.0042}^{+0.0029}$ for 0.883 6 Hz and $0,038\ 8_{-0.2513}^{+0.0677}$ for 0.983 1 Hz, for an average total distortion equal to 35.24%.

The insensitivity of the reproduced signal in the established frequency range justified the steady-state calibration of a data acquisition system used to measure the height of the gravitational wave, and verify its metrological performance in both the GDP-02-A pneumatic prototype and in the wave channel with “fresh” water, using the adjustment coefficients.

Lista de tablas

Tabla 1. Magnitudes características de las ondas de gravedad.....	3
Tabla 2. Océano Pacífico Central costarricense: climatología promedio del oleaje.....	4
Tabla 3. Alcance del proyecto: rango experimental de presiones manométricas.	6
Tabla 4. Procesamiento estadístico del oleaje: presión hidrostática.	8
Tabla 5. Alcance del proyecto: período y frecuencias equivalentes.....	9
Tabla 6. Alcance del proyecto: presión manométrica y corriente eléctrica equivalentes.	9
Tabla 7. Formato de la cuantificación de la incertidumbre estándar tipo B de la medida.	25
Tabla 8. Valores de los divisores según el tipo de FDP.	25
Tabla 9. Comportamiento de los factores bajo condiciones de repetibilidad.....	26
Tabla 10. Formato del presupuesto de incertidumbre de la medida.	32
Tabla 11. TP subamortiguado: parámetros de la respuesta en frecuencia.	54
Tabla 12. Generador estacionario de presión: parámetros de desempeño.	58
Tabla 13. Prototipo GPE-01: dimensiones de la cámara.....	60
Tabla 14. Selección de la frecuencia de muestreo.	60
Tabla 15. Configuración del inicio del registro de mediciones.....	60
Tabla 16. Fin del registro de las mediciones.	61
Tabla 17. Prototipo GPE-01: promedios de las mediciones de corriente eléctrica CD.	62
Tabla 18. Prototipo GPE-01: estabilidad de las series de mediciones.	63
Tabla 19. Prototipo GPE-01: correlación estadística de cada j-ésima serie de mediciones.	64
Tabla 20. Prototipo GPE-01: estanqueidad de la cámara de medida.	65
Tabla 21. TP EXTECH PT30-SD: condiciones ambientales durante la validación.	65
Tabla 22. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: presupuesto de incertidumbre.....	66
Tabla 23. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración estacionaria.	66
Tabla 24. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la verificación estacionaria.	67
Tabla 25. Calibración estacionaria: verificación de la competencia técnica.....	67
Tabla 26. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: error normalizado de la calibración estacionaria...68	
Tabla 27. Presupuesto de incertidumbre: constante molar del gas.....	75

Tabla 28. Presupuesto de incertidumbre: masa molar de cada componente del aire.	76
Tabla 29. Presupuesto de incertidumbre: masa molar del aire.	77
Tabla 30. Coeficientes de ajuste del factor de corrección.	78
Tabla 31. Coeficientes de ajuste de la presión de saturación.	78
Tabla 32. Coeficientes del polinomio de ajuste del factor de compresibilidad.	78
Tabla 33. Tubo de choque. Materiales y dimensiones reportadas.	84
Tabla 34. Tubo de choque. Presiones de reflexión (p_5) de la onda de choque.	84
Tabla 35. PCB modelo 9901C. Características del diafragma y presiones.	85
Tabla 36. Número de Mach: parámetros de desempeño.	86
Tabla 37. Presión en el puerto de medición TP2: parámetros de desempeño.	86
Tabla 38. Presión en el puerto de medición TP5: parámetros de desempeño.	86
Tabla 39. Tiempo: parámetros de desempeño.	87
Tabla 40. Prototipo TC-01-(0.4/2): dimensiones de la cámara de compresión.	88
Tabla 41. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.	89
Tabla 42. Prototipo TC-02-(Lcc/Lce): distancia recorrida por la onda de choque.	90
Tabla 43. Transmisores de presión: dimensiones medidas con el pie de rey.	91
Tabla 44. Selección de la frecuencia de muestreo.	92
Tabla 45. Configuración del inicio del registro de mediciones.	92
Tabla 46. Configuración del fin del registro de las mediciones.	92
Tabla 47. Prototipo TC-01-(0.4/2): trazabilidad de las mediciones.	93
Tabla 48. TC-01-(0.4/2): condiciones ambientales.	93
Tabla 49. TC-01-(0.4/2). Cuantificación de los hitos en TP6.	96
Tabla 50. TC-01-(0.4/2). TP6: estadísticas del aire húmedo en reposo y perturbado.	96
Tabla 51. TC-01-(0.4/2). Cuantificación de los hitos en TP6.	98
Tabla 52. TC-01-(0.4/2). TP2: estadísticas del gas en reposo y perturbado.	98
Tabla 53. TC-01-(0.4/2): cuantificación de los hitos en el puerto TP5.	100
Tabla 54. TC-01-(0.4/2). Puerto TP5: estadísticas del gas.	100
Tabla 55. TC-01-(0.4/2): identificación de los registros de las mediciones.	102

Tabla 56. TC-01-(0.4/2): parámetros del aire ambiental.....	102
Tabla 57. TC-01-(0.4/2). Precisión: comparación de los transmisores de presión.....	103
Tabla 58. TC-01-(0.4/2). Veracidad de P_5 : comparación de los transmisores de presión.....	103
Tabla 59. TC-01-(0.4/2). Veracidad de P_2	104
Tabla 60. Prototipo TC-01-(0.4/2). Tiempos de ascenso y estabilización.	104
Tabla 61. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.	106
Tabla 62. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: condiciones de reproducibilidad.....	106
Tabla 63. TP EXTECH PT30-SD: respuesta dinámica según el prototipo de tubo de choque.	107
Tabla 64. TP EXTECH PT30-SD. Reproducibilidad: comparación según el prototipo de TC.....	108
Tabla 65. TP EXTECH PT30-SD: resultados de la prueba de Anderson-Darling ($\alpha = 5\%$).	108
Tabla 66. TP EXTECH PT30-SD: resultados de la calibración dinámica.....	109
Tabla 67. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de las mediciones.....	111
Tabla 68. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según el prototipo.	112
Tabla 69. TC-01-(0.4/2). P_{2t} : presupuesto de incertidumbre.	115
Tabla 70. Prototipo TC-01-(0.4/2). Número de Mach.	116
Tabla 71. Prototipo TC-01-(0.4/2). Presupuesto de incertidumbre del número de Mach.....	116
Tabla 72. Prototipo TC-02-(0.4/2): distancia recorrida por la onda de choque.....	117
Tabla 73. Selección de la frecuencia de muestreo.	120
Tabla 74. Configuración del inicio del registro de mediciones.....	120
Tabla 75. Configuración del fin del registro de las mediciones.	120
Tabla 76. Prototipo TC-02-(0.4/3): dimensiones de la cámara de expansión.	121
Tabla 77. Prototipo TC-02-(0.4/3): distancia recorrida por la onda de choque.....	122
Tabla 78. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de las mediciones.....	122
Tabla 79. TC-02-(0.4/L _{ce}): parámetros del aire ambiental.	123
Tabla 80. TP EXTECH PT30-SD. Precisión: comparación según L_{ce}	124
Tabla 81. TP EXTECH PT30-SD. Comparación del número de Mach según L_{ce}	124
Tabla 82. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según L_{ce}	125
Tabla 83. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados del ajuste.	125

Tabla 84. Prototipo TC-02-(0.6/2): dimensiones de las cámaras de compresión.	126
Tabla 85. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.	127
Tabla 86. TC-02-(Lcc/2): parámetros del aire ambiental.	127
Tabla 87. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según Lcc.	128
Tabla 88. TP EXTECH PT30-SD. Precisión: comparación según Lcc.	129
Tabla 89. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración dinámica.	129
Tabla 90. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.	132
Tabla 91. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.	132
Tabla 92. TP EXTECH PT30-SD. TP2: comparación según el espesor del diafragma.	133
Tabla 93. TP EXTECH PT30-SD. TP5: comparación según el espesor del diafragma.	133
Tabla 94. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según diafragma.	133
Tabla 95. EXTECH PT30-SD n/s TA87982: parámetros ajustados de la ecuación característica.	134
Tabla 96. TC-02-(0.6/2). Proceso de secado del aire en la cámara de expansión.	136
Tabla 97. TC-02-(0.6/2). Resultados del secado del aire en la cámara de expansión.	136
Tabla 98. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de mediciones.	137
Tabla 99. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.	137
Tabla 100. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según la humedad. ...	138
Tabla 101. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración dinámica.	139
Tabla 102. TC-02-(0.6/2). Exactitud de P_5 : comparación según la humedad del aire.	139
Tabla 103. Exactitud de P_2 : comparación según la humedad del aire.	140
Tabla 104. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de mediciones.	141
Tabla 105. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.	141
Tabla 106. TC-02-(0.6/2). TP5: diferencias de presión con respecto a la posición central.	142
Tabla 107. Prototipo GPP-01-M: identificación de los registros de medición.	154
Tabla 108. Prototipo GPP-01-M: condiciones ambientales.	154
Tabla 109. Prototipo GPP-01-M: valores de los hitos de los ciclos reproducidos.	156
Tabla 110. Prototipo GPP-02-A: identificación de los registros de medición.	159
Tabla 111. Prototipo GPP-02-A: condiciones ambientales.	159

Tabla 112. Prototipo GPP-02-A: valores de los hitos de los ciclos reproducidos.....	160
Tabla 113. Prototipo GPP-02-A: resultados del ajuste por regresión lineal (ciclo 3).....	161
Tabla 114. Prototipo GPP-02-A: términos y parámetros de la serie de Fourier (ciclo 3).	162
Tabla 115. Prototipo GPP-02-A: espectros de frecuencia y amplitud ($T_p = 10$ s).....	163
Tabla 116. Prototipo GPP-02-A: identificación del registro de medición ($T_p = 20$ s).....	163
Tabla 117. Prototipo GPP-02-A: condiciones ambientales ($T_p = 20$ s).....	163
Tabla 118. Prototipo GPP-02-A: resultados del ajuste por regresión lineal (ciclo 3).....	164
Tabla 119. Prototipo GPP-02-A: términos y parámetros de la serie de Fourier (ciclo 3).	164
Tabla 120. Prototipo GPP-02-A: espectros de frecuencia y amplitud ($T_p = 20$ s).....	165
Tabla 121. Prototipo GPP-02-A: distorsión armónica total.	166
Tabla 122. Prototipo GPP-02-A: resultados de la validación.....	166

Lista de figuras

Figura 1. Representación idealizada de una ola para una posición de referencia.....	4
Figura 2. Cadena de medición de un sistema de medida de presión.....	10
Figura 3. Transductor de presión: sistema mecánico dinámicamente semejante.....	15
Figura 4. Transductor de presión: diagrama de cuerpo libre.....	15
Figura 5. Generador de presión estacionaria: esquema simplificado.....	57
Figura 6. Prototipo GPE-01: vista general del sistema de medida de presión estacionaria.....	61
Figura 7. Prototipo del GPE: instalación de los transmisores de presión.....	62
Figura 8. Tubo de choque: esquema simplificado.....	69
Figura 9. Tubo de choque: secuencia de los procesos en su interior.....	70
Figura 10. NPL: prototipo del tubo de choque de 1,4 MPa (203,0 psi).....	82
Figura 11. PCB Piezotronics: tubo de choque modelo 9901C.....	83
Figura 12. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de compresión.....	87
Figura 13. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.....	88
Figura 14. Prototipo TC-01-(0.4/2). Geometría entre los puertos de medición TP2 y TP5.....	89
Figura 15. Prototipo TC-01-(0.4/2). Vista general.....	91
Figura 16. Colocación del diafragma en la posición 2 en el tubo de choque.....	94
Figura 17. TC-01-(0.4/2). Junta de goma y diafragma estallado por sobrepresión.....	95
Figura 18. LMD-ENSAM: vista panorámica del tubo de choque TC10.....	105
Figura 19. Dispositivo de apertura rápida: esquema simplificado.....	110
Figura 20. LMD-ENSAM-DOR10: vista panorámica.....	110
Figura 21. LMD-ENSAM-DOR10: vista de la cámara menor con los transductores de presión.....	111
Figura 22. Prototipo TC-02-(Lcc/Lce). Esquema simplificado.....	114
Figura 23. TC-02-(Lcc/Lce): vista general para el caso (0.4/2).....	115
Figura 24. Prototipo TC-02-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.....	116
Figura 25. Prototipo TC-02-(0.4/2). Geometría entre los puertos de medición TP2 y TP5.....	117
Figura 26. Prototipo TC-02-(0.4/2): colocación del diafragma en la posición P2.....	118
Figura 27. Prototipo TC-02-(0.4/2): montaje del diafragma.....	118

Figura 28. Prototipo TC-02-(Lcc/3). Dimensiones de la cámara de expansión.	121
Figura 29. Prototipo TC-02-(0.4/3). Geometría entre los puertos de medición TP2-1 y TP2-2.	121
Figura 30. Prototipo TC-02-(0.6/2): vista general.	126
Figura 31. Prototipo TC-02-(Lcc/3). Reubicación del puerto de medición TP2-2.	131
Figura 32. TC-02-(0.6/2). Sistema de secado del aire en la cámara de expansión.	135
Figura 33. TC-02-(0.6/2). Colocación del datalogger en la cámara de expansión.	135
Figura 34. TC-02-(0.6/2). Puerto de medición TP5: evaluación de los tiempos de activación.	141
Figura 35. GPP de Hermann-Stiefelmeyer: sección de la válvula rotatoria y onda generada.	144
Figura 36. GPP de Kobata-Ooiwa: sección de la válvula rotatoria.	145
Figura 37. Generador periódico de presión: vista general del equipo y sus componentes.	151
Figura 38. Generador periódico de presión: esquema simplificado de los elementos de control. .	152
Figura 39. Prototipo GPP-01-M: vista general.	154
Figura 40. Prototipo GPP-02-A. Vista general.	157
Figura 41. GDP-02-A: configuración de calibración por comparación de dos TP.	157
Figura 42. Generadores dinámicos de trabajo: vista general del puesto de trabajo.	172

Lista de gráficos

Gráfico 1. Presión total: mediciones registradas (Burst Aquadopp 05-07-14).	7
Gráfico 2. Presión total: mediciones de los primeros 180 s de muestreo.....	7
Gráfico 3. TP subamortiguado: respuesta ante un escalón unitario según ζ	19
Gráfico 4. TP subamortiguado: ganancia ante una perturbación periódica según ζ	20
Gráfico 5. TP subamortiguado: desfase ante una perturbación periódica según ζ	21
Gráfico 6. Regímenes de operación de un TP ante un salto unitario.	52
Gráfico 7. TP subamortiguado: respuesta transitoria “ideal”.	53
Gráfico 8. TP subamortiguado: ajuste según Levenberg-Marquardt.....	54
Gráfico 9. TC-01-(0.4/2). Eventos en el interior del prototipo.	93
Gráfico 10. TC-01-(0.4/2). Primer acercamiento a los eventos en el interior del prototipo.	94
Gráfico 11. TC-01-(0.4/2): eventos en TP6.....	95
Gráfico 12. TC-01-(0.4/2): eventos en el puerto de medición TP2.	97
Gráfico 13. TC-01-(0.4/2): eventos en TP2 según la diferencia de presión.	98
Gráfico 14. TC-01-(0.4/2): eventos en el puerto TP5.....	99
Gráfico 15. TC-01-(0.4/2): ajuste fino de los eventos en el puerto TP5.	100
Gráfico 16. TC-01-(0.4/2): desempeño del prototipo, según el tipo de transmisor de presión.....	102
Gráfico 17. TC-01-(0.4/2): desempeño del prototipo en la región de estabilización de P_5	103
Gráfico 18. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según el prototipo de tubo de choque.....	107
Gráfico 19. TP EXTECH PT30-SD: desempeño en la región de estabilización de P_5	107
Gráfico 20. TP EXTECH PT30-SD: comparación de valores medidos vs. ajustados en TC10.	109
Gráfico 21. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según el generador de presión.	112
Gráfico 22. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según L_{ce}	123
Gráfico 23. TP EXTECH PT30-SD: desempeño en la región de estabilización de P_5	123
Gráfico 24. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según L_{cc}	127
Gráfico 25. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según L_{cc}	128
Gráfico 26. TC-02-(0.6/3). Efecto de la onda reflejada en la medición de p_2	130
Gráfico 27. TC-02-(0.6/3). Efecto de la onda reflejada en la medición de p_2	131

Gráfico 28. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según espesor del diafragma.....	132
Gráfico 29. TC-02-(0.6/2). Proceso de secado del aire en la cámara de expansión.....	136
Gráfico 30. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según la humedad del aire.....	138
Gráfico 31. TP EXTECH PT30-SD: efecto de su posición en el puerto de medición TP5.	142
Gráfico 32. GPP de Kobata-Ooiwa: salida, según la frecuencia de rotación.	145
Gráfico 33. GPP de Kobata-Ooiwa: a) señal muestreada b) espectro de amplitud.	147
Gráfico 34. GPP de Kobata-Ooiwa: a) promedio b) desviación estándar.	148
Gráfico 35. Prototipo GPP-01-M: reproducción experimental de una señal periódica.	155
Gráfico 36. Prototipo GPP-01-M ciclo 3: representación de los hitos experimentales.	155
Gráfico 37. Prototipo GPP-02-A: reproducción de una señal periódica.	159
Gráfico 38. Prototipo GPP-01-M ciclo 3: representación de los hitos experimentales.	160
Gráfico 39. Prototipo GPP-02-A ciclo 3: comparación de las señales.....	161
Gráfico 40. Prototipo GPP-02-A: comparación de las señales experimentales y ajustadas.	162
Gráfico 41. Prototipo GPP-02-A: reproducción de una señal periódica ($T_p = 20$ s).	164

Lista de siglas

Sigla	Significado
ADC	Convertidor analógico – digital, por sus siglas del inglés Analog to Digital Converter.
adim	Adimensional.
ANSI	American National Standards Institute. Es el ente normalizador de los Estados Unidos de América
BIPM	Del francés Bureau International des Poids et Mesures. Organismo rector de la Metrología Científica según la Convención de Metro, se encarga de los asuntos relacionados con la ciencia de las mediciones y los patrones de medida.
CD	Corriente directa.
CIMAR	Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología. Institución del Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria (DFAOP) de la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica.
CODATA	Committee on Data for Science and Technology.
CMCs	Capacidades de Medición y Calibración.
DAQ	Sistema de Adquisición de Dato (referido también por sus siglas DAQ, del inglés Data Acquisition system).
DOE	Diseño de Experimentos.
EDL	Ecuación Diferencial Lineal
EMRP	European Metrology Research Programme.
ENSAM	École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. El Laboratorio de Mediciones Dinámicas de ENSAM es el depositario de los patrones nacionales de presión dinámica de Francia.
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes. Organización regional de metrología que agrupa a los INM europeos.
FS	Rango de Medición (del inglés Full Scale).
GDP	Generador de Perturbaciones Dinámicas de Presión.
GEP	Generador Estacionario de Presión.
GPP	Generador de Perturbaciones Periódicas de Presión.
GUM	Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation.

IMARES	Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y Estuarios.
INM	Instituto Nacional de Metrología.
ISA	Instrumentation, Systems, and Automation Society.
LCM	Laboratorio Costarricense de Metrología. Anteriormente referido como LACOMET.
LMD	Laboratorio de Mediciones Dinámicas.
LNE	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais es el INM de Francia
MV	Valor Medido (del inglés Measured Value)
NBS	National Bureau of Standards, fue el INM de los Estados Unidos de América desde 1901 hasta 1988, cuando se convirtió en el NIST.
NCEP	National Centers for Environmental Prediction. Institución adscrita al NOAA, que depende del Departamento de Comercio de los E.U.A.
NIST	National Institute of Standard and Technologies. Actual INM de los Estados Unidos de América
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPL	National Physics Laboratory, es el INM de Gran Bretaña.
NR	Información no Reportada.
OC	Onda de Choque.
PLC	Siglas en inglés de "Programmable Logic Controller"
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, es el INM de Alemania.
PVC	Policloruro de Vinilo.
TC	Tubo de Choque.
TP	Transductor o Transmisor de Presión, según el contexto.
SI	Sistema Internacional de Unidades.
SLIT	Sistema Lineal Invariante en el Tiempo.
UCR	Universidad de Costa Rica.
UM _x	Unidad de Medida, donde <i>x</i> se refiere a la magnitud.
VIM	Vocabulario Internacional de Metrología.

Lista de símbolos

Símbolo	UM	Concepto
---------	----	----------

Relacionados con la climatología del mar

H	m	Altura de ola
p	Pa	Presión manométrica
P	Pa	Presión absoluta
p_{at}	Pa	Presión atmosférica
t_i	s	Tiempo de estabilización
T	s	Período de onda
ω	s^{-1}	Frecuencia angular
f	s^{-1}	Frecuencia de onda

Relacionados con los sistemas de medida

c_t	$UM_x/^\circ C$	Coefficiente de sensibilidad del instrumento de medida con respecto a la temperatura.
c_0	$UM_x/^\circ C$	Coefficiente de sensibilidad del cero (zero) del instrumento de medida con respecto a la temperatura.
c_m	$UM_x/^\circ C$	Coefficiente de sensibilidad de la linealidad (span) del instrumento de medida con respecto a la temperatura.
D	$UM_x/año$	Deriva del error de calibración del instrumento de medida.
$\pm EMP_x$	UM_x	Error máximo permitido bajo condiciones de operación.
FC	$aa-mm-dd$	Fecha de calibración del instrumento de medida.
FM	$aa-mm-dd$	Fecha de medición
MAX_x	UM_x	Valor máximo del rango de medida.
MIN_x	UM_x	Valor mínimo del rango de medida.
P_c	años	Período asignado entre calibraciones
RM_x	UM_x	Rango de medida. Se calcula como $(MAX - MIN)_x$.
t_{ref}	$^\circ C$	Temperatura de referencia.
t_{op}	$^\circ C$	Temperatura de operación.

Δt	$^{\circ}\text{C}$ o K	Diferencia de temperatura. Se calcula como $(t_{op} - t_{ref})$.
VM_x	UM_x	Valor medido.
ω_n	$rad \cdot s^{-1}$	Frecuencia natural no amortiguada.
ω_d	$rad \cdot s^{-1}$	Frecuencia natural amortiguada.
ζ	<i>adim</i>	Factor de amortiguamiento relativo.

Relacionados con los resultados de las mediciones

FDP		Función de densidad de probabilidad
p_{value}		Probabilidad de rechazar incorrectamente la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera (error tipo I).
x	UM_x	Variable aleatoria resultante de la medición de una magnitud física invariante X .
Δx_{ADC}	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la resolución del convertidor analógico-digital (ADC).
Δx_d	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la resolución del indicador digital del instrumento de medida.
Δx_C	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la incertidumbre de la corrección reportada en el certificado de calibración.
Δx_D	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la deriva del instrumento de medida.
Δx_{EMP}	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada al EMP_x .
Δx_H	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la histéresis del instrumento de medida.
Δx_{span}	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada al efecto de la temperatura en el ajuste de la linealidad del instrumento de medida.
Δx_{zero}	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada al efecto de la temperatura en el ajuste del cero del instrumento de medida.
Δx_r	UM_x	Corrección por inexactitud de la VA x asociada a la repetibilidad de las mediciones.
r	UM_x	Variabilidad de las mediciones en condiciones de repetibilidad.
R	UM_x	Variabilidad de las mediciones en condiciones de reproducibilidad.
$u(x)$	UM_x	Incertidumbre estándar de la VA x .

$u(\Delta x_l)$	UM_x	Incertidumbre estándar de la l –corrección asociada a un factor influyente reconocido sobre la VA x .
c_l	UM_y/UM_x	Coefficiente de sensibilidad asociado a la variable aleatoria x .
y	UM_y	Variable aleatoria resultante de la medición indirecta de una magnitud física invariante $Y = f(x_l)$.
$u_c(y)$	UM_y	Incertidumbre estándar combinada de la variable aleatoria y .
$U_p(y)$	UM_y	Incertidumbre expandida de la variable aleatoria y para la probabilidad de cobertura $1 - \alpha$.
VA		Variable aleatoria.
P		Número de parámetros de la ecuación ajustada por regresión.
p		Grado del polinomio ajustado por regresión.



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Alberto Juan Díaz Tey, con cédula de identidad 8-0088-0124, en mi condición de autor del TFG titulado Desarrollo de un patrón dinámico para evaluar el desempeño metrológico de los transductores de presión con salida eléctrica

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1 Introducción

1.1 Justificación

Actualmente, las aplicaciones de las mediciones en procesos dinámicos son cada vez más relevantes, abarcando diferentes campos en los sectores tecnológicos, médicos y académicos [1]. La confiabilidad de las bases de datos de las mediciones generadas en procesos dinámicos es un aspecto crítico para los investigadores e ingenieros involucrados con su modelación matemática. De la calidad metrológica de las bases de datos, depende alcanzar conclusiones en un ambiente conocido de incertidumbre y trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades, referido en lo adelante por sus siglas SI [2], que permita realizar recomendaciones acertadas desde los puntos de vista técnico y económico en el alcance establecido.

Sin embargo, es usual que los transductores de presión con salida eléctrica utilizados en mediciones dinámicas sean evaluados metrológicamente en régimen estacionario donde se desprecia la correlación estadística entre las variables con respecto al tiempo: en este caso, los parámetros obtenidos no son suficientes para definir su exactitud en condiciones dinámicas. En general cuando un transductor de presión con salida eléctrica está expuesto a eventos dinámicos su respuesta se amplifica y retrasa con respecto a la señal perturbadora y otros parámetros deben cuantificarse para su completa caracterización dinámica.

El problema se agudiza cuando se intenta conocer la respuesta del transductor de presión con salida eléctrica ante una perturbación dinámica de carácter oscilatorio porque no existen patrones reconocidos internacionalmente que aseguren su trazabilidad metrológica al SI: en este sentido el reto es desarrollar un patrón de presión dinámico que reproduzca señales periódicas de referencia basadas en un principio físico independiente del experimentador.

Si a este problema se suman los relacionados con la falta de consenso internacional tanto en los procedimientos de calibración dinámica y su validación, como de la trazabilidad de las mediciones dinámicas de presión al SI, se comprenderá la trascendencia de su solución integral, no solo para la comunidad científica, sino también para la industrial.

Las investigaciones relacionadas con el tema son realizadas principalmente por institutos nacionales de metrología y laboratorios de calibración vinculados con universidades y fabricantes de alto nivel académico y tecnológico, con amplio reconocimiento internacional, ubicados en países desarrollados, y los resultados obtenidos no están disponibles de manera comercial para las aplicaciones ingenieriles.

1.2 Objetivos e hipótesis

El objetivo fundamental del proyecto es:

Desarrollar un patrón de presión dinámica en el rango de frecuencia y amplitud del oleaje gravitacional del Océano Pacífico Central costarricense, que se utilice como referencia para otras mediciones periódicas de la misma naturaleza, estableciéndose así la trazabilidad metrológica al SI de la magnitud en un ambiente de incertidumbre conocida y controlada.

Para cumplir el objetivo propuesto, debe verificarse la siguiente hipótesis:

La respuesta del patrón desarrollado de presión dinámica ante una perturbación periódica puede justificarse con su caracterización estacionaria, porque es independiente prácticamente de la frecuencia para eventos similares al del oleaje gravitacional del Océano Pacífico Central costarricense.

En la verificación de la hipótesis planteada, el presupuesto de incertidumbre de la medición de la presión dinámica debe validarse no solo en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad en el laboratorio, sino comparando su desempeño con otros sistemas de medición semejantes, en la búsqueda de sesgos para su corrección y la definición de su reproducibilidad entre laboratorios.

1.3 Objetivos específicos

Para lograr el cumplimiento del objetivo fundamental del proyecto, referido en la sección anterior, se establecen los siguientes objetivos específicos:

OE1. Definir el marco teórico y el estado del arte de la evaluación dinámica de los transductores de presión con salida eléctrica.

OE2. Establecer los modelos matemáticos que relacionen la salida de los transductores de presión con las perturbaciones de entrada de presión dinámica, utilizando las leyes de la mecánica de los fluidos y la termodinámica, según aplique.

OE3. Desarrollar un conjunto de generadores de presión para reproducir experimentalmente los regímenes de operación estacionarios y dinámicos, que permitan evaluar el desempeño metrológico de los transductores de presión con salida eléctrica.

OE4. Desarrollar un sistema de medida de alto desempeño técnico y metrológico para medir las perturbaciones de presión reproducidas experimentalmente, a partir de la salida eléctrica del transductor de presión.

OE5. Validar el desempeño metrológico del patrón de presión dinámico, en un ambiente establecido de incertidumbre y trazabilidad metrológica.

1.4 Definición del alcance del proyecto

La aplicación de los sistemas de medición para caracterizar los procesos dinámicos comenzó al finalizar la II Guerra Mundial, con el desarrollo de los motores a reacción para aplicaciones militares, sin embargo, hoy están presentes en todos los campos de la tecnología [1, 4, 5].

Una de sus aplicaciones más interesantes, que es objeto de estudio en este proyecto, está relacionada con el diseño de las estructuras costeras, a partir de la medición dinámica del campo de presiones del oleaje marino y los posteriores cálculos indirectos de la altura del oleaje y su energía [6, 7]. En función de la energía promedio de las olas en un período histórico definido, se diseñan estructuralmente las instalaciones ingenieriles que protegen los litorales.

En el amplio espectro de frecuencias del oleaje marino, las más importantes para la ingeniería litoral, por su gran contenido energético, son las ondas de superficie producidas por el viento, específicamente las ondas de gravedad con períodos entre 1 s y 30 s [6, 7].

En la Tabla 1 se refieren los valores de dos de sus parámetros característicos más importantes para establecer el alcance del proyecto [6, 7]:

Tabla 1. Magnitudes características de las ondas de gravedad.

Parámetros	Símbolos	UM	MIN	MAX
Período	T	s	1	30
Altura de ola	H	m	≈ cm	15

1.4.1 Climatología del oleaje en Costa Rica

Para establecer el alcance del proyecto, se utilizaron los parámetros característicos del oleaje gravitacional propios del Océano Pacífico Central¹ de Costa Rica.

En Costa Rica, los estudios sobre la climatología del oleaje están limitados a períodos cortos, y la mayoría han sido elaborados para recabar información científica básica, por ejemplo, en la elaboración de proyectos de investigación o estudios de impacto ambiental dirigidos a la construcción de estructuras costeras [8]. Por la naturaleza de estos estudios, sus resultados, locales y solo aplicables en esa zona, generalmente no son publicados por su carácter de informe o por considerarse privados [8].

Cuando se requiere conocer las características de los patrones de comportamiento regional del oleaje, es necesario utilizar otras herramientas, específicamente las simulaciones de modelos numéricos o mediciones de satélites.

¹ El Océano Pacífico Central costarricense ocupa la parte más meridional de la península de Nicoya, así como la estrecha llanura litoral de la costa pacífica central del país.

El CIMAR realizó en el 2007 [8], un reanálisis de los pronósticos de oleaje obtenidos del modelo matemático WAVEWATCH III de la NOAA - NCEP, basado en los datos históricos de oleaje tomados cada 3 h en el período desde 1997 hasta el 2004, que permitieron evaluar la climatología del oleaje para las costas costarricenses.

En la Tabla 2 se reportan únicamente los valores para el Océano Pacífico Central1 de Costa Rica:

Tabla 2. Océano Pacífico Central costarricense: climatología promedio del oleaje.

Parámetros	Símbolo	UM	MIN	PROM	MAX
Altura máxima de ola	H_{max}	m	0.29	2.00	4.22
Período de pico de ola	T_p	s	2.58	12.34	19.84

Donde [6]:

H_{max} : Altura máxima de la ola [m]. Se define como la distancia vertical máxima entre su cresta y seno en un período determinado.

T_p : Período de pico de la onda [s]. Tiempo hasta que se observa un punto idéntico en la superficie libre de ola.

Los parámetros anteriores describen el estado del oleaje en un lugar y un momento determinado, y se denominan magnitudes características. La representación idealizada del oleaje como una onda progresiva de período constante, permite comprender su sentido físico:

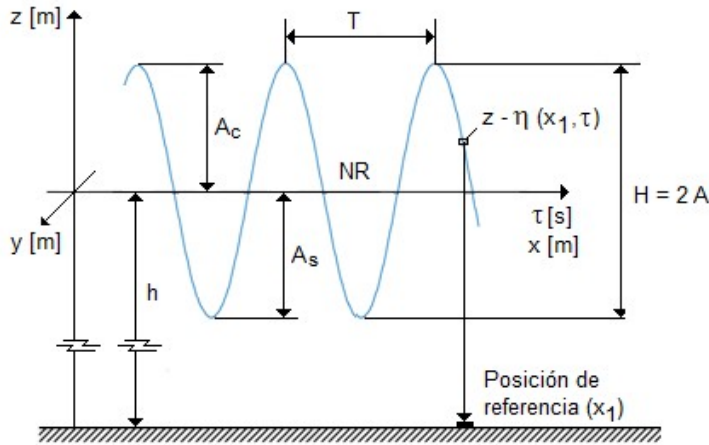


Figura 1. Representación idealizada de una ola para una posición de referencia.

Donde:

h : Profundidad [m]. Distancia entre el nivel de reposo (NR), donde el mar se encuentra en absoluto reposo, y el fondo.

$\eta(x, t)$: Superficie libre de onda [m]. Para la posición de referencia x_1 u otra cualesquiera, es la interface entre la superficie de la onda y la atmósfera en un tiempo t .

z, x, y : Coordenadas espaciales [m].

t : Coordenada temporal [s].

H : Altura de la ola [m]. Se define como la distancia vertical desde el máximo de la cresta hasta el fondo del valle [7], y se calcula según la ecuación 1:

$$H = A_c + A_s \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

A_c y A_s : Alturas de la cresta (punto en el que la superficie libre alcanza un máximo), y del seno de la onda (punto en el que la superficie libre alcanza un mínimo) respectivamente [m]. Para un oleaje real, de naturaleza estocástica, $A_c \neq A_s$.

En la posición de referencia se coloca el sensor de presión, aunque no sobre el lecho marino sino anclado, por ejemplo, a alguna estructura como las bases de un muelle o a una boya estacionaria. La profundidad de colocación del sensor de presión no es arbitraria, sino que está definida por la altura relativa de la ola² (δ):

$$\delta = H \times h^{-1} \quad \text{ecuación 2}$$

Si $\delta \ll 1$, se dice que la ola es de pequeña amplitud, y la dinámica del oleaje se modela matemáticamente aplicando la teoría lineal de ondas, también conocida como teoría de Airy [6, 7].

Si la profundidad de instalación del sensor de presión no supera los 20 m por cuestiones de seguridad de los buzos, entonces la altura relativa de la ola, para la climatología del oleaje reportado, siempre es menor a 0,21, por lo que puede considerarse de amplitud reducida y utilizarse en el análisis la teoría de Airy.

La teoría de Airy es la más simple de las teorías de ondas y considera al oleaje como una onda progresiva de altura y período constantes [6, 7]. Una de sus ventajas más importantes es que el nivel de reposo del mar (NR) coincide con el eje horizontal de simetría (eje de las x), por tanto:

$$A_c = A_s = A \Rightarrow H = 2A \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

A : Amplitud de la onda [m].

² La altura relativa de la ola (δ) es un parámetro adimensional que establece la importancia de la oscilación vertical de la ola con respecto a la profundidad.

1.4.2 Rango experimental de presiones.

La presión hidrostática de la columna de agua marina referida a la superficie libre del mar y medida en $(x_1; t)$, se definió para el Océano Pacífico Central costarricense a partir de los datos históricos de la Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y Estuarios (IMARES) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Por tanto, el rango de amplitud de presión a reproducir en los prototipos de generadores de perturbaciones dinámicas está definido por el mínimo y máximo de altura máxima de oleaje, y están referidos en términos de presión manométrica equivalente en la Tabla 3:

Tabla 3. Alcance del proyecto: rango experimental de presiones manométricas.

Parámetros	Símbolos	UM	MIN	MAX
Altura máxima de ola	H_{max}	m	0.29	4.22
Presión manométrica equivalente	PH	kPa	2.81	41.58
		dbar	0.28	4.16
		psi	0.41	6.03

1.4.3 Rango experimental de frecuencia

A partir del rango de período pico-pico de ola, representativo de la climatología del Océano Pacífico Central costarricense (ver la Tabla 2), se calculan las frecuencias equivalentes según las siguientes ecuaciones [6, 7]:

- Frecuencia de onda:

$$f = T^{-1} \quad \text{ciclos/s} \equiv \text{Hz} \quad \text{ecuación 4}$$

- Frecuencia cíclica o angular de la onda:

$$\omega = 2\pi T_p^{-1} \quad \text{rad/s} \quad \text{ecuación 5}$$

Por tanto, el rango de frecuencia de las señales de presión a reproducir en el prototipo de generador de perturbaciones periódicas se encuentra desde 0,05 Hz hasta 0,39 Hz.

1.4.4 Verificación del rango de presiones y frecuencia

El alcance de interés del proyecto en presión manométrica equivalente a la altura máxima del oleaje gravitacional y en frecuencia, definidos en las secciones 1.4.2 y 1.4.3 respectivamente, se confirma a partir de los datos del sistema de medida en la boya CR001³ de IMARES-UCR.

³ Las coordenadas de la boya CR001 de IMARES-UCR son: 9° 54 min 38 s latitud norte y 84° 44 min 9 s de longitud oeste.

Por ejemplo, los registros realizados el 5 de julio del 2014 por el sistema de medición Aquadopp [10], instalado en la boya CR001, muestran un conjunto de puntos de presión en el período de muestreo con el siguiente patrón de comportamiento:

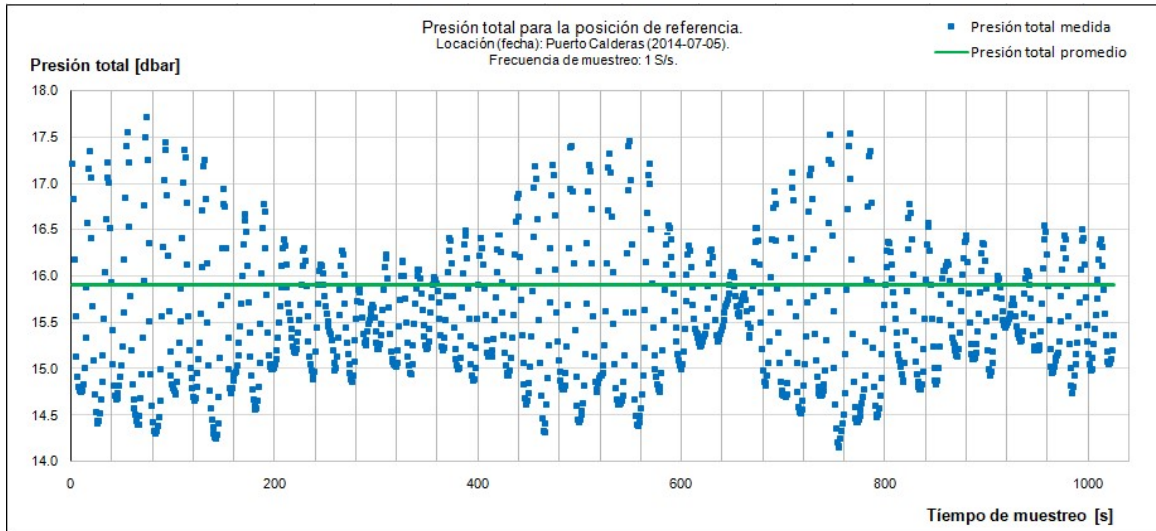


Gráfico 1. Presión total: mediciones registradas (Burst Aquadopp 05-07-14).

Si se analizan los primeros 180 s de muestreo, se observa que el oleaje, aún en su comportamiento aleatorio, se muestra como un evento oscilatorio recurrente:

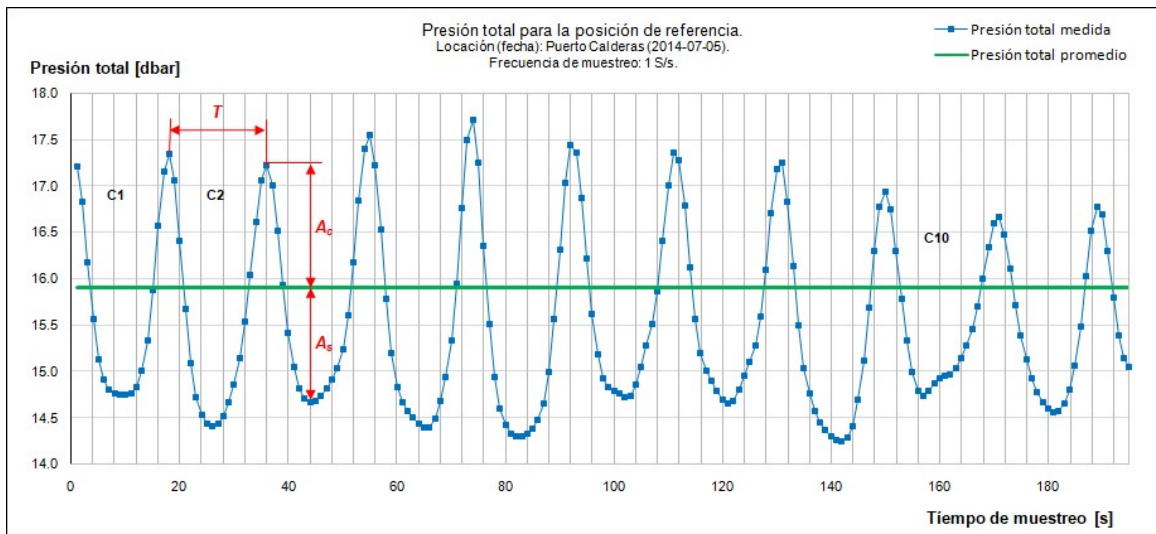


Gráfico 2. Presión total: mediciones de los primeros 180 s de muestreo.

Donde:

C1, C2 ..., C10: Ciclos identificados del oleaje analizado.

Obsérvese que las líneas que unen los puntos de medición solo muestran tendencias de interpolación porque en realidad, las mediciones son discretas, según la frecuencia de muestreo programada en el sistema de adquisición de datos.

El procesamiento estadístico de los primeros diez ciclos muestra los siguientes resultados:

Tabla 4. Procesamiento estadístico del oleaje: presión hidrostática.

Parámetros	UM	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Media	Desv.std
p_H	dbar	2.465	2.935	2.556	3.158	3.409	2.716	2.712	2.991	2.202	2.100	2.724	0.412
p_h	dbar	15.984	15.884	15.946	15.977	16.003	16.083	16.006	15.750	15.840	15.617	15.909	0.140
T	s	17.000	18.000	19.000	19.000	18.000	19.000	20.000	19.000	21.000	18.000	18.800	1.135

Donde:

p_H : Presión hidrostática de la columna de agua marina de dimensión H [dbar].

$$(p_H)_{C_i} = (p_{max} - p_{min})_{C_i} \quad \text{ecuación 6}$$

p_h : Presión hidrostática de la columna de agua marina de dimensión h [dbar].

$$(p_h)_{C_i} = [p_{min} + 0,5 \times (p_{max} - p_{min})]_{C_i} \quad \text{ecuación 7}$$

Considerando que:

- Tanto los promedios del período de onda ($\bar{T} = 18,800$ s) como de la presión manométrica ($\bar{p}_H = 2,724$ dbar), se encuentran dentro de los rangos de la climatología del oleaje de interés del proyecto (ver la Tabla 2 y Tabla 3 respectivamente).
- El oleaje es de amplitud reducida: $\bar{\delta} = 0,172 \ll 1$ (ver la ecuación 2).

Entonces puede aceptarse, a partir de las ventajas de la teoría de Ayres, que el perfil irregular de naturaleza estocástica podría ser sustituido, a efectos de su reproducción en el laboratorio para verificar el desempeño metrológico del transmisor de presión, por uno periódico regular de amplitud 2,724 dbar y período 18,800 s ($f = 0,053$ Hz $\Leftrightarrow \omega = 0,335$ ciclos \cdot s $^{-1}$).

El reto es, por tanto, reproducir las ondas periódicas de amplitudes en el rango de presión desde 0,28 dbar hasta 4,22 dbar con frecuencias desde 0,05 Hz hasta 0,4 Hz, es decir, señales periódicas de bajas amplitudes⁴ y frecuencias, típicas de la climatología del Océano Pacífico Central costarricense.

⁴ La presión de la columna hidrostática asociada a la profundidad de instalación del sensor del sistema de medición no es de interés para el alcance del proyecto, considerando que es un parámetro estacionario [2].

1.5 Alcances y limitaciones

El proyecto está enfocado hacia la verificación del desempeño metrológico de los sistemas de medida de presión utilizados para medir eventos oscilatorios de baja frecuencia y amplitud, como la altura del oleaje marino [6, 7], limitados a los rangos típicos de las ondas gravitatorias, según la climatología del Océano Pacífico Central costarricense [8]:

- Período pico – pico de las olas:

Tabla 5. Alcance del proyecto: período y frecuencias equivalentes.

Parámetros	Símbolos	UM	MIN	MAX
Período	T_p	s	2.58	19.84
Frecuencia lineal	f_p	Hz	0.39	0.05
Frecuencia angular	ω_p	rad/s	2.44	0.32

- Presión manométrica y corriente eléctrica equivalentes⁵:

Tabla 6. Alcance del proyecto: presión manométrica y corriente eléctrica equivalentes.

Parámetros	Símbolos	UM	MIN	MAX
Altura máxima de ola	H_{max}	m	0.29	4.22
Presión manométrica equivalente	p_H	kPa	2.81	41.58
		dbar	0.28	4.16
		psi	0.41	6.03
Corriente eléctrica CD equivalente	i_{equiv}	mA	4.22	7.22

- Densidad del agua marina desde $1\,008,45\text{ kg m}^{-3}$ hasta $1\,026,09\text{ kg m}^{-3}$, para el rango de temperatura desde $26,0\text{ °C}$ y $29,4\text{ °C}$, según la ecuación de estado del agua marina [9].

Una limitación tecnológica importante está relacionada con el diseño de los sistemas de medida de presión utilizados para medir indirectamente la altura del oleaje gravitacional, que no permite acceder a las señales eléctricas de salida del transductor de presión, de manera independiente al sistema de adquisición de datos, pues ambos están instalados en el interior de carcasas herméticas para prevenir los efectos adversos del agua marina.

⁵ Por recomendación del BIPM, los factores de conversión entre unidades de medida son tomados de la publicación especial NIST SP 811 [11].

2 Marco teórico

2.1 Sistemas de medida

En el campo de la metrología física, un sistema de medida es “un conjunto de uno o más instrumentos de medida y frecuentemente, otros equipos, ensamblados y adaptados para dar información utilizada en generar valores de magnitudes medidas dentro de intervalos específicos de una magnitud específica...” [2].

Un sistema de medida está asociado al proceso de adquisición de datos, mediante el muestreo de magnitudes físicas y conversión en señales adecuadas para su registro y posterior procesamiento.

En el contexto del proyecto, el sistema de medida está diseñado para medir la presión dinámica de una columna de agua marina (magnitud específica), y aunque puede estar contenido en una carcasa hermética, está conformado por los siguientes elementos:

- Transductor de presión.
- Sistema de acondicionamiento.
- Sistema de adquisición de datos.

Una representación esquemática del sistema de medición de presión que muestra la interrelación entre sus elementos constitutivos se muestra en la Figura 2:

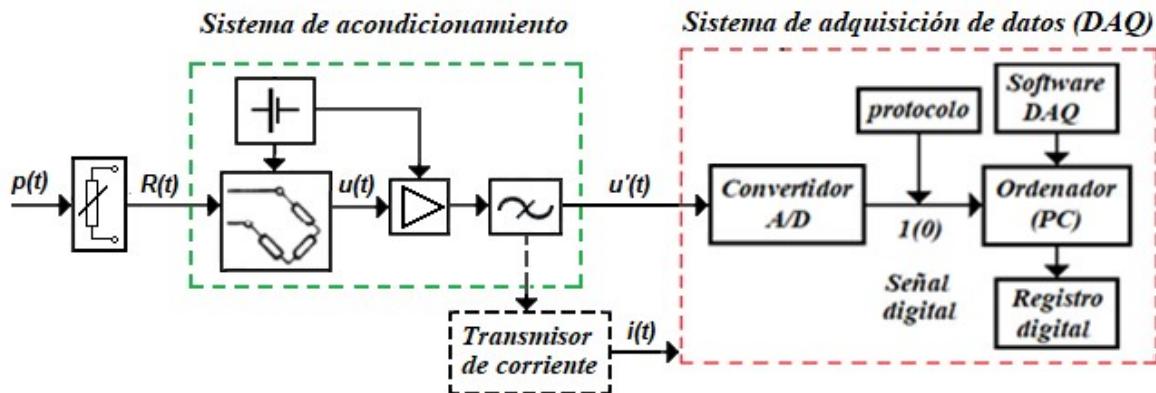


Figura 2. Cadena de medición de un sistema de medida de presión.

A continuación se describen los elementos que conforman el sistema de medida de presión:

2.1.1 Transductor de presión

Según el VIM [2], "... un transductor de medida es un dispositivo utilizado en una medición, que proporciona una magnitud de salida según el tipo de relación con la magnitud de entrada", mientras que el sensor [2], es el elemento que "... está expuesto directamente a la magnitud a medir".

Cuando la magnitud de entrada es la presión de un fluido, el transductor es llamado de presión. Aunque existe una amplia gama de principios de medición sobre los que se basan los transductores de presión, en el proyecto son de interés únicamente aquellos cuyos sensores están conformados por una resistencia eléctrica, también conocida como banda extensométrica⁶ [12], de naturaleza metálica o semiconductor, instalada sobre una membrana que, al deformarse por la acción de la presión del fluido (señal de entrada), modifica la geometría de la resistencia eléctrica y por tanto, sus valores.

Si la banda extensométrica es de naturaleza metálica, la componente geométrica de la deformación por la acción de la presión es la principal causa de la variación de su resistencia eléctrica.

Según la naturaleza de los hilos metálicos, es posible cuantificar experimentalmente la sensibilidad eléctrica con respecto a su deformación geométrica [12]:

$$S = \frac{dR/R_0}{\Delta L/L_0} = \frac{dR/R_0}{\varepsilon} \quad \text{ecuación 8}$$

Donde:

S : Sensibilidad de la banda extensométrica⁷ [$\Omega/\Omega/m/m$].

dR/R_0 : Variación relativa de resistencia eléctrica [Ω/Ω].

$\Delta L/L_0$: Variación relativa de longitud [m/m]

En la zona elástica, la sensibilidad es diferente por el efecto de la microestructura del material, sin embargo, después de la transición a la región de deformación plástica, hay un grupo de materiales cuyos factores de banda coinciden: $S \approx 2,0$, y son esos los preferidos para fabricar las bandas extensométricas.

Si la banda extensométrica es de naturaleza semiconductor, su funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo y la variación de su resistencia eléctrica se debe, fundamentalmente, al efecto de la temperatura sobre la movilidad de los electrones y no a su deformación geométrica, que es menor del 2 % [12].

⁶ Foil strain gage, en inglés.

⁷ La sensibilidad de la banda extensométrica también es conocida como factor de banda.

Si las variaciones de temperatura son pequeñas, el comportamiento del sensor semiconductor puede ser considerado lineal, y los valores promedios de su sensibilidad pueden ser hasta 60 veces mayores que los metálicos [12].

Los resultados de la comparación anterior permiten inferir que el uso de un transductor con un sensor semiconductor es más adecuado que otro de naturaleza metálica cuando se trata de medir una perturbación transitoria de presión. Sin embargo, es necesario considerar otros elementos, como la geometría de la cámara de medida y la rigidez de la membrana sobre la que se adhiere la banda extensométrica.

Como es imposible ajustar la sensibilidad de las bandas extensométricas durante su fabricación, sus valores se obtienen experimentalmente por comparación con un patrón de presión estacionaria en el rango de interés, bajo condiciones controladas de temperatura.

2.1.2 Sistema de acondicionamiento de la señal

No es usual la medición directa de la resistencia eléctrica del sensor del transductor de presión, sino la caída de tensión eléctrica con un puente de Wheatstone, donde el sensor constituye la resistencia eléctrica variable, por el efecto de la presión sobre su sección transversal [12].

Para evitar los efectos negativos de las caídas de tensión eléctrica⁸ durante la transferencia de la información contenida en la señal analógica de tensión eléctrica, esta es transformada en una señal equivalente de intensidad de corriente eléctrica CD^9 en el rango desde 4 hasta 20 mA.

El dispositivo que produce la transformación de tensión eléctrica (señal de entrada) a corriente eléctrica (señal de salida) se denomina transmisor de corriente y no debe confundirse con una fuente de corriente eléctrica, porque en realidad funciona como una resistencia variable.

2.1.3 Sistema de adquisición de datos

El objetivo del sistema de adquisición de datos es la recolección de los resultados de medición (datos) mediante su conveniente muestreo y registro, para su posterior procesamiento y evaluación, que convierte a los datos en información.

En general, un sistema de adquisición de datos está compuesto por los siguientes elementos:

- Convertidor analógico/digital.
- Software de adquisición de datos.

⁸ Las caídas de tensión son producidas por la propia resistencia eléctrica del cable de conexión y las fuerzas termoeléctricas parásitas en las conexiones.

⁹ Aunque el nombre formal según el SI es intensidad de corriente eléctrica, en lo adelante, con fines de simplificación, se referirá como corriente eléctrica.

El convertidor analógico/digital es el dispositivo responsable de la transformación de la condición analógica de la señal eléctrica de entrada (proveniente del transductor), en digital, como paso previo a su registro digital.

Aunque existen muchos parámetros de desempeño de un convertidor analógico/digital [13], seguidamente se exponen aquellos de interés para el proyecto, dado su enfoque metrológico:

- a) Error por resolución, asociado a la conversión digital de la señal analógica, considerando que la señal analógica es aproximada por un número máximo de intervalos uniformes:

$$\Delta e_d = \frac{(2^{n_{ADC}})^{-1}}{2} \quad \text{ecuación 9}$$

Donde:

Δe_d : Error por resolución de la conversión digital.

n_{ADC} : Número de bit utilizado en la conversión digital.

- b) Error en tiempo acumulado: asociado a los efectos sistemáticos que influyen en la estabilidad del oscilador, que define la base de tiempo del convertidor analógico/digital.

El software de adquisición de datos cumple varias funciones relacionadas con el proceso de medición y registro de las señales eléctricas:

- Sincronizar las señales eléctricas de los transductores (protocolo de comunicación).
- Seleccionar las conexiones de los transductores, según la naturaleza de sus sensores.
- Definir las frecuencias de muestreo y la forma de medición de las señales analógicas, por ejemplo, mediante la configuración del "trigger" para iniciar y finalizar un ciclo de muestreo.
- Establecer los tipos de filtros digitales para eliminar los ruidos generados por el sistema de medida y que modifica la forma y parámetros de la señal de entrada o perturbación.

La distorsión de la respuesta del sistema de medida se estima mediante la "distorsión armónica total", según la ecuación 10:

$$THD = \frac{[\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2]^{0.5}}{A_1} \quad \text{ecuación 10}$$

Donde:

THD : Distorsión armónica total [$adim$].

A_1 : Amplitud del armónico fundamental [$adim$].

A_n : Amplitudes de los armónicos secundarios [$adim$].

- Almacenar las señales digitales de salida del convertidor analógico/digital en un formato digital conveniente para su posterior transferencia a un software de procesamiento.

El software de procesamiento de los datos del registro digital generado por el software del convertidor analógico/digital, permite calcular los parámetros de interés del proceso evaluado.

En el proyecto se utilizan tres tipos de softwares comerciales suficientemente validados:

- PTC mathcad, enfocado a los cálculos matemáticos de ingeniería.
- Minitab[®] Statistical Software. Version 17, enfocado al procesamiento estadístico de los datos.
- Microsoft Excel. Microsoft Office, para determinar los hitos de las curvas experimentales.

2.2 Dinámica de los transductores de presión

2.2.1 Generalidades

Los transductores de presión en condiciones reales de operación están expuestos a perturbaciones aperiódicas y periódicas que definen su régimen dinámico de medición.

Las perturbaciones aperiódicas generan respuestas breves del transductor de presión y caracterizan su régimen transitorio: una vez que sus causas desaparecen, el fluido de operación alcanza un nuevo equilibrio, o retorna a las condiciones iniciales del proceso.

En las nuevas condiciones de equilibrio, el transductor de presión está expuesto a las variaciones estocásticas del fluido de operación, y su señal de salida es estacionaria, o puede estar correlacionada estadísticamente [2].

Si la perturbación es periódica, la respuesta del transductor de presión será de la misma naturaleza, pero desfasada y amplificada o atenuada, según la frecuencia de la perturbación. En este caso es importante considerar que, tanto la naturaleza del fluido de operación como la existencia de una cámara de medición para proteger el sensor, afectarán la forma de la respuesta del transductor de presión.

2.2.2 Modelación mecánica

El análisis de la dinámica de los transductores de presión, como un caso particular de los transductores mecánicos, es una rama de la ingeniería bien documentada [14, 15].

En general, un transductor de presión "ideal" responde linealmente a la presión (señal de entrada), y tendría un único grado de libertad, es decir, su movimiento estaría limitado a una dirección paralela a la línea de acción de la fuerza aplicada.

El modelo mecánico de un transductor de presión "ideal", representado por la Figura 3, se obtiene de aplicar las leyes de Newton a su membrana como elemento primario, donde se encuentra la banda extensométrica [14, 15]:

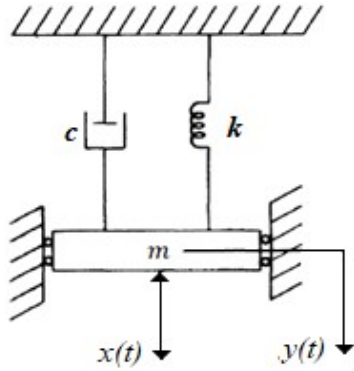


Figura 3. Transductor de presión: sistema mecánico dinámicamente semejante.

Donde:

t : Tiempo (variable independiente) [s].

$x(t)$: Función de entrada representada por la fuerza externa resultante de la acción de la presión del fluido sobre el sensor del transductor de presión [N].

$y(t)$: Función de salida (respuesta del transductor de presión) ante la perturbación $x(t)$, [m].

m : Masa inercial¹⁰ del sensor [kg].

c : Coeficiente de amortiguamiento viscoso¹⁰ del sensor [$N \cdot s \cdot m^{-1}$].

k : Constante elástica¹⁰ del sensor [$N \cdot m^{-1}$].

2.2.3 Modelación matemática

El diagrama de cuerpo libre equivalente se obtiene aplicando la Segunda Ley de Newton [14] al modelo mecánico de la Figura 3:

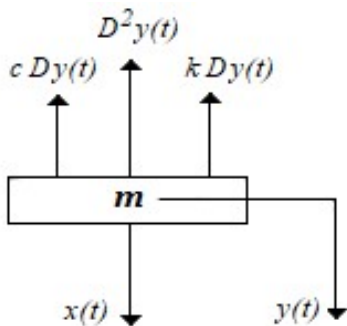


Figura 4. Transductor de presión: diagrama de cuerpo libre.

Si se vinculan las fuerzas del diagrama de cuerpo libre, se obtiene una ecuación diferencial lineal (EDL) de segundo orden, de coeficientes constantes o invariantes en el tiempo¹¹ [5, 14, 15]:

¹⁰ Constantes independientes del tiempo, que dependen de la naturaleza del sensor de presión.

$$D^2y(t) + \frac{c}{m} Dy(t) + \frac{k}{m} y(t) = \frac{1}{m} x(t) \quad \text{ecuación 11}$$

Donde $Dy(t) \equiv \frac{d}{dt}y(t)$.

En el campo de las mediciones dinámicas es común redefinir la ecuación 11, según la frecuencia natural no amortiguada y el coeficiente de amortiguamiento relativo del transductor de presión:

$$D^2y(t) + (2\omega_n\zeta) Dy(t) + \omega_n^2 y(t) = (\omega_n^2 S_y) x(t) \quad \text{ecuación 12}$$

Donde:

ω_n : Frecuencia natural no amortiguada [$rad \cdot s^{-1}$].

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m}\right)^{0,5} \quad \text{ecuación 13}$$

ζ : Factor de amortiguamiento relativo [$adim$].

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad \text{ecuación 14}$$

c_c : Coeficiente crítico de amortiguamiento viscoso [$N \cdot s \cdot m^{-1}$].

S_y : Sensibilidad estática del transductor de presión [$m \cdot N^{-1}$].

La ecuación 12 es conocida como la **ecuación diferencial característica** y sus coeficientes ω_n y ζ son también invariantes en el tiempo, con valores únicos para un transductor de presión específico.

Si las condiciones iniciales del sistema lineal modelado por la ecuación 12 son iguales a cero, el modelo matemático puede ser representado por su **función de transferencia** [5, 14, 15]:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[y(t)]}{\mathcal{L}[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{S_y}{\omega_n^{-2}s^2 + (2\zeta\omega_n^{-1})s + 1} \quad \text{ecuación 15}$$

Donde:

$G(s)$: Función de transferencia

$Y(s)$: Transformada de Laplace de la función de salida del transductor de presión.

$X(s)$: Transformada de Laplace de la función de entrada asociada a la perturbación.

\mathcal{L} : Operador de la transformada de Laplace.

¹¹ La EDL invariante en el tiempo del transductor de presión también es conocida como su "ecuación diferencial característica".

La función de transferencia es otra forma de expresar el modelo matemático del comportamiento dinámico del transductor de presión, no en el tiempo, sino en el dominio de Laplace [5, 14, 15] y aunque no contiene información sobre la estructura del transductor de presión, sí sobre la forma de su respuesta dinámica ante un mismo tipo de perturbación, que será idéntica para todos:

$$Y(s) = G(s)X(s) = \frac{S_y}{\omega_n^{-2}s^2 + (2\zeta\omega_n^{-1})s + 1} X(s) \quad \text{ecuación 16}$$

La función de transferencia es fundamental en la estrategia de calibración dinámica de los transductores de presión, basada en el cálculo de los coeficientes invariantes en el tiempo ω_n y ζ cuando el sistema de medida es perturbado por señales aperiódicas experimentales.

2.2.4 Respuesta en régimen estacionario

Si se considera que la perturbación es la presión manométrica p_f , que de manera constante es ejercida por el fluido sobre la membrana del transductor de presión:

$$x(t) = p_f \quad \forall t \quad \text{ecuación 17}$$

Entonces, la función de respuesta del transductor de presión en el dominio del tiempo es proporcional a la entrada:

$$S_y = \frac{y(t)}{x(t)} \Rightarrow y(t) = S_y x(t) = S_y p_0 \quad \text{ecuación 18}$$

En este caso, el sistema de medida se comporta como de orden cero y desde el punto de vista dinámico, es el más sencillo.

Según el modelo mecánico "ideal", $y(t)$ es la deformación dimensional de la membrana del transductor de presión, sin embargo, considerando que por definición, la presión es la fuerza ejercida por el fluido por la unidad de área de la membrana del sensor, entonces, su deformación geométrica también es proporcional a la presión.

En un transductor eléctrico de presión no se mide experimentalmente la deformación dimensional de su membrana, sino el efecto de la presión del fluido sobre la resistencia eléctrica de un resistor instalado en la misma, traducido convenientemente en un circuito electrónico en forma de una señal analógica, por ejemplo, de intensidad de corriente eléctrica CD.

Si el comportamiento lineal del transmisor de presión es satisfactorio, la presión manométrica medida del fluido se calcula según la ecuación 19:

$$p_f = S_0 + S_1 i_m \quad \text{ecuación 19}$$

Donde:

p_f : Presión manométrica medida del fluido [Pa].

S_0 : Coeficiente nominal de cero [Pa].

S_1 : Coeficiente nominal de sensibilidad [Pa · mA⁻¹].

i_m : Corriente eléctrica CD medida por el amperímetro del sistema de adquisición de datos [mA].

Los coeficientes nominales S_0 y S_1 representan los efectos de “fondo” (la presión base del fluido) y “proporcional” (la respuesta del transductor de presión a las perturbaciones de presión del fluido) respectivamente, y son objeto de calibración en régimen estacionario [2], según el procedimiento descrito más adelante en la sección 2.5.4.

2.2.5 Respuesta ante una perturbación tipo escalón

Si se considera que:

- La función de entrada es una función paso de amplitud unitaria $A_p(t) = p_f(t)/p_0$:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \forall t < 0 \\ A_p(t) & \forall t \geq 0 \end{cases} \quad \text{ecuación 20}$$

Donde:

p_0 : Presión manométrica de referencia¹² y constante durante el tiempo de la perturbación [Pa].

- El sistema de medida de segundo orden es subamortiguado¹³ $\Rightarrow \zeta < 1$,

Entonces, la respuesta del transductor de presión en el dominio de Laplace [5, 14, 15] es:

$$Y(s) = X(s) G(s) = \frac{A_p(t)}{s} \frac{1}{s^2 + (2\zeta\omega_n)s + \omega_n^2} \quad \text{ecuación 21}$$

La solución en el dominio del tiempo ($\forall t \geq 0$) es [5, 14, 15]:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = A_p(t) \left[1 - \frac{\text{EXP}(-\omega_d t)}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \cos^{-1}\zeta) \right] \quad \text{ecuación 22}$$

Donde:

\mathcal{L}^{-1} : Operador de la antitransformada de Laplace.

ω_d : Frecuencia amortiguada [rad · s⁻¹]:

¹² Es usual que sea el máximo de presión en el proceso.

¹³ En el marco del proyecto, los transductores de presión son subamortiguados.

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n$$

ecuación 23

La respuesta de un transductor de presión subamortiguado¹³ en el tiempo, ante una perturbación paso, está compuesta por dos términos: uno exponencial y otro de naturaleza oscilatoria.

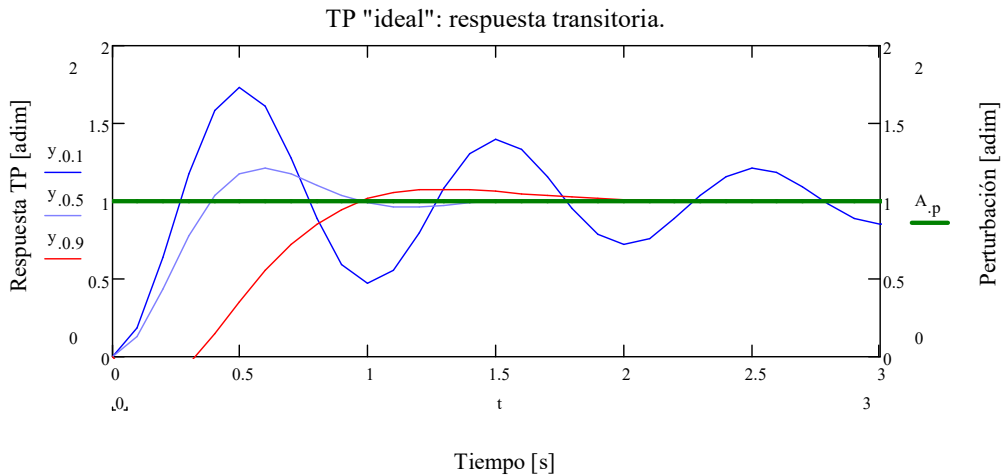


Gráfico 3. TP subamortiguado: respuesta ante un escalón unitario según ζ .

En el Gráfico 3 se aprecia que, para una frecuencia natural dada ($\omega_n = 6,283 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), la respuesta inicial del transductor de presión es exponencial, y pasado un tiempo, se torna oscilante, aunque si aumenta el amortiguamiento ($\zeta \rightarrow 1$), la parte oscilante es menos notable.

Si bien la respuesta dinámica de un transductor de presión ante una perturbación aperiódica tipo escalón también puede ser descrita en el dominio de las frecuencias por su correspondiente transformada discreta de Fourier [14, 15], su aplicación no es relevante en el marco del proyecto porque es suficiente el uso de la función de transferencia en el dominio de Laplace.

2.2.6 Respuesta ante una perturbación periódica

Si un sistema de medida de segundo orden subamortiguado¹³ es perturbado por una función periódica sinusoidal perfecta de amplitud unitaria:

$$x(t) = \sin(\omega_p t) \tag{ecuación 24}$$

Donde:

ω_p : Frecuencia de la perturbación periódica [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

La respuesta en el dominio del tiempo es también una función periódica del mismo tipo, pero amplificada o atenuada en amplitud y retrasada con respecto a la perturbación [5, 14, 15]:

$$y(t) = M_r [\sin(\omega_p t + \phi_r)] \tag{ecuación 25}$$

Donde:

M_r : Amplificación o atenuación de la amplitud de la respuesta del transductor de presión [adim].

$$M_r = [(1 - \alpha^2)^2 + (2\zeta\alpha)^2]^{-0.5} \quad \text{ecuación 26}$$

ϕ_r : Retraso de su respuesta [rad o grados].

$$\phi_r = -\tan^{-1}[(2\zeta\alpha)(1 - \alpha^2)^{-1}] \quad \text{ecuación 27}$$

Siendo a [adim] la relación de amortiguamiento:

$$a = \frac{\omega_p}{\omega_n} \quad \text{ecuación 28}$$

El desfase entre la perturbación periódica y la respuesta del transmisor de presión se puede expresar en el dominio del tiempo, según la ecuación 29:

$$\Delta\tau_r = 1000 \frac{ms}{s} \left(\frac{\phi_r}{\omega_p} \right) \quad \text{ecuación 29}$$

Donde:

$\Delta\tau_r$: Retraso de la respuesta del transductor de presión [ms].

Es usual representar las respuestas de un transductor de presión en el dominio de la frecuencia según su ganancia (Gráfico 4) y desfase (Gráfico 5) cuando es perturbado por una señal periódica [5, 14, 15]:

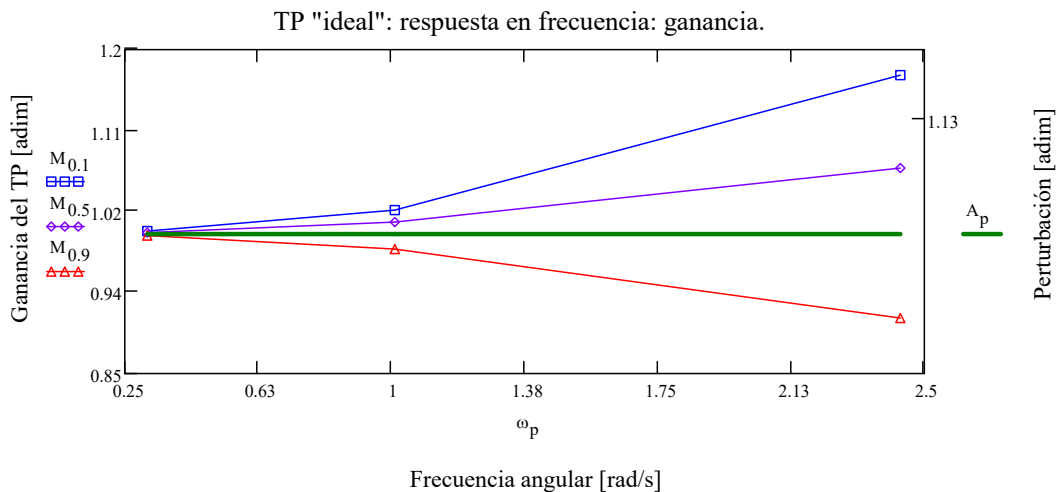


Gráfico 4. TP subamortiguado: ganancia ante una perturbación periódica según ζ .

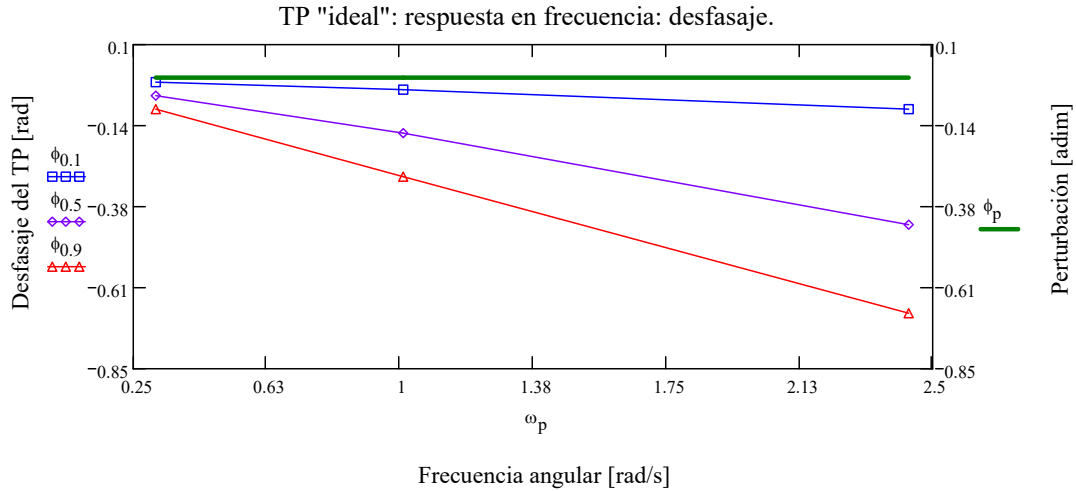


Gráfico 5. TP subamortiguado: desfasaje ante una perturbación periódica según ζ .

Supongamos que un transductor de presión subamortiguado de frecuencia natural $\omega_n = 6,283 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ es perturbado por una señal periódica de frecuencia ω_p , entonces en la medida que aumenta el amortiguamiento ($\zeta \rightarrow 1$):

- La atenuación de su respuesta es más importante que la amplificación (Gráfico 4).
- El desfasaje es más notable (Gráfico 5).

En general, en la medida que la frecuencia de la perturbación periódica (ω_p) sea menor que la frecuencia natural no amortiguada del transductor de presión (ω_n), se verifica que la ganancia y desfasaje propios de su respuesta en frecuencia, no son tan importantes y pueden corregirse mediante un proceso de escalado en amplitud y tiempo. Sin embargo, una señal periódica no tiene que ser necesariamente sinusoidal para evaluar el comportamiento dinámico de un transductor de presión, además de que en la experimentación, es prácticamente imposible reproducirla.

2.2.7 Reconstrucción de una señal periódica según la serie de Fourier

Una función periódica de semiperíodo L_p puede ser “reconstruida” a partir de su correspondiente serie de Fourier, si se cumple la condición de Dirichlet¹⁴ [15]:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad [n = 1, 2, \dots, \infty] \quad \text{ecuación 30}$$

Donde:

$$a_0 = \frac{1}{L_p} \int_{-L_p}^{L_p} f(t) dt \quad \text{ecuación 31}$$

$$a_n = \frac{1}{L_p} \int_{-L_p}^{L_p} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{ecuación 32}$$

$$b_n = \frac{1}{L_p} \int_{-L_p}^{L_p} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad \text{ecuación 33}$$

$L_p = 0,5T_p$: Semiperíodo de la perturbación periódica [s].

La amplitud y frecuencia de los armónicos de la señal reconstruida se calculan según las siguientes ecuaciones:

$$A_n = [a_n^2 + b_n^2]^{0.5} \quad \text{ecuación 34}$$

$$\omega_n = n\omega_0 \quad \text{ecuación 35}$$

Siendo $\omega_1 = \omega_0$: frecuencia fundamental [$rad \cdot s^{-1}$].

Considerando que el promedio es un estimador sesgado para una función periódica, es preferible utilizar el valor cuadrático medio:

$$RMS = \left[\left(\frac{a_0}{2} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{A_n}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad [n = 1, 2, \dots, \infty] \quad \text{ecuación 36}$$

Donde:

$\frac{a_0}{2}$: Componente directa de la señal y representa el promedio [adim].

¹⁴ Dirichlet demostró que, si $f(t)$ es finita en un intervalo dado y tiene un número finito de máximos y mínimos en un período, la serie de Fourier de $f(t)$ es convergente, y su suma es igual a $f(t)$, si $f(t)$ es continua en el punto t .

Una señal periódica de gran interés para el proyecto corresponde a la función triangular periódica de amplitud unitaria, que puede ser representada según la ecuación 37:

$$x(t) = \begin{cases} -t & \forall -L_p \ll t < 0 \\ t & \forall 0 \ll t < L_p \end{cases} \quad \text{ecuación 37}$$

Considerando que la función triangular es una función par [$f(t) = f(-t) \Rightarrow b_n = 0$], entonces su desarrollo por series de Fourier [14, 15] es definido por la ecuación 38:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \times \cos\left(\frac{n\pi t}{L_p}\right) \right] \quad \text{ecuación 38}$$

Donde:

$$a_0 = \frac{L_p}{2} \quad \text{ecuación 39}$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{2L_p}{(n\pi)^2} \cos(n\pi) - \frac{2L_p}{(n\pi)^2} & \forall n: \text{impar} \\ 0 & \forall n: \text{par} \end{cases} \quad \text{ecuación 40}$$

Otro parámetro de interés es la distorsión armónica total:

$$THD = \frac{\sum_{n=3}^{\infty} \left[a_n \times \cos\left(\frac{n\pi t}{L_p}\right) \right]}{a_2 \times \cos\left(\frac{2\pi t}{L_p}\right)} \quad \text{ecuación 41}$$

2.3 La incertidumbre de las mediciones

2.3.1 Generalidades

En general, el modelo físico invariante de una magnitud cualquiera puede representarse por el siguiente modelo matemático:

$$Y = f(X_l) \quad \text{ecuación 42}$$

Donde:

Y : Magnitud física invariante

X_l : Magnitudes físicas independientes reconocidas como influyentes.

l : Contador que define la cantidad de magnitudes físicas influyentes ($l = 1; 2; \dots; N$).

El marco teórico de la GUM [16] parte de la definición del modelo estadístico del proceso de medición de una magnitud física invariante Y :

$$y_c = f(x_l) + \sum_{l=1}^N \Delta x_l \quad \text{ecuación 43}$$

Donde:

y_c : Estimación de Y corregida por las inexactitudes de las $l = N$ magnitudes influyentes.

$f(x_l)$: Valor más probable de la magnitud medida.

Δx_l : Inexactitudes de las estimaciones de las magnitudes influyentes¹⁵.

Si $f(x_l)$ está asociado a una simple serie de mediciones aleatorias realizadas bajo condiciones de repetibilidad, su mejor estimador es el promedio o media aritmética [16]:

$$\bar{y} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k \quad \text{ecuación 44}$$

Donde:

\bar{y} : Promedio de la serie de medición evaluada [UM_y].

y_k : Observaciones independientes [UM_y].

K : Número de mediciones independientes de la serie evaluada.

k : Contador que define las observaciones de la serie de medición evaluada.

¹⁵ Sus esperanzas matemáticas son cero [$E(\Delta x_l) = 0$], pero aportan incertidumbre a la medición [$u(\Delta x_l)$].

Uno de los retos más notables de la evaluación de la incertidumbre de una magnitud influyente reconocida es la estimación de su incertidumbre estándar. En este sentido, la GUM [16] establece dos métodos operativos según la forma de su cuantificación:

Tipo A: si la cuantificación se basa en el análisis estadístico de series de mediciones.

Tipo B: si la cuantificación se basa en otros medios que no sean estadísticos.

Esta forma operativa de clasificar la cuantificación de la incertidumbre es la gran fortaleza de la GUM [16], que garantizó su amplia acogida por la comunidad metrológica mundial con respecto a la teoría convencional de errores.

2.3.2 Incertidumbre estándar tipo B

La cuantificación de la incertidumbre estándar tipo B sigue el siguiente formato:

Tabla 7. Formato de la cuantificación de la incertidumbre estándar tipo B de la medida.

Corrección	Suposiciones	Incertidumbre estándar tipo B
Δx_l	$\Delta x_l \sim FDP[0; \Delta x_l^2 / divisor]$	$u(\Delta x_l) = \Delta x_l / \sqrt{divisor}$

Donde:

Δx_l : Corrección asociada a la l -ésima fuente de incertidumbre [UM_y].

La expresión: $\Delta x_l \sim FDP[0; \Delta x_l^2 / divisor]$ es la forma estadística de representar las suposiciones que sustentan teóricamente la cuantificación tipo B, y significa que:

“La corrección asociada a la l -ésima fuente de incertidumbre de la variable aleatoria x se distribuye según la función de densidad de probabilidad FDP , con esperanza matemática cero [$E(\Delta x_l) = 0$] y varianza $\sigma^2(\Delta x_l) = \Delta x_l^2 / divisor$ ”.

El valor del divisor está asociado al tipo de FDP asignado a la corrección, y los utilizados en el proyecto están definidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de los divisores según el tipo de FDP.

Tipo de FDP	Símbolo	Divisor
Rectangular simétrica	RS	3
Normal	N	k_p

Los grados de libertad de las incertidumbres estándares de tipo B pueden ser considerados infinitos ($\nu \rightarrow \infty$) porque se considera que sus límites, inferior (a_-) y superior (a_+), son conocidos exactamente [16].

Esta suposición “no está muy alejada de la realidad” porque es frecuente elegirlos de manera que “la probabilidad de que la magnitud en cuestión esté fuera del intervalo, sea extremadamente pequeña” [16].

2.3.3 Incertidumbre estándar tipo A

Considerando que la incertidumbre estándar de tipo A se basa en el procesamiento estadístico de series de mediciones a continuación se muestra cómo cuantificarla cuando proviene de fuentes como la repetibilidad, la precisión intermedia y el análisis de regresión lineal, todas de gran importancia para el proyecto.

2.3.3.1 Repetibilidad

La precisión de un procedimiento de medida es el grado de concordancia existente entre las mediciones consecutivas y_{k-1} y y_k [17], y se define bajo determinadas condiciones, llamadas de repetibilidad, que dependen del comportamiento de los siguientes factores:

Tabla 9. Comportamiento de los factores bajo condiciones de repetibilidad.

Factores	Comportamiento
Tiempo	Menor técnicamente posible entre series de mediciones y constante.
Condiciones ambientales	Bajo control estadístico según el momento y lugar de realización.
Sistema de medida	El mismo sin ajustar o recalibrar.
Operador	El mismo.

Bajo condiciones de repetibilidad, la precisión es conocida como repetibilidad y se estima por la desviación estándar de la muestra de la serie de mediciones y_k [17]:

$$s(y_k) = + \left[(K - 1)^{-1} \sum_{k=1}^K (y_k - \bar{y})^2 \right]^{0,5} \quad \text{ecuación 45}$$

Donde:

$s(y_k)$: Desviación estándar de la serie de mediciones o muestra $[UM_y]$.

k : Contador que establece el número de mediciones realizadas ($k = 1; 2; \dots; K$).

La desviación estándar de la serie de mediciones o muestra es una incertidumbre de tipo A con ν grados de libertad, según la ecuación 46 [17]:

$$\nu = K - 1 \quad \text{ecuación 46}$$

2.3.3.2 Precisión intermedia

En el proyecto, el momento y lugar de realización de las j -ésimas series de mediciones generadas durante la validación de los procedimientos de medida (ver Tabla 9) cambian, no así el resto de los factores influyentes, por tanto, la variabilidad estocástica no puede ser estimada por la repetibilidad, sino por la precisión intermedia [18].

La precisión intermedia depende de si las series de mediciones generadas bajo un diseño experimental [19] satisfacen o no la condición de homocedasticidad (igualdad de varianzas), sin embargo, antes de su cuantificación es necesario “limpiarlas” de valores aberrantes que no pertenecen, por alguna razón generalmente desconocida, a la distribución experimental obtenida. El proceso, conocido como “minería de datos” [20], consta de las siguientes pruebas de hipótesis:

a) Verificación de la concordancia de la distribución experimental con la normal.

La prueba de hipótesis se basa en verificar estadísticamente si la distribución de las j -ésimas series de mediciones de la variable y_{kj} puede ser explicada o no a través de una distribución normal para $\alpha = 0,05$:

$$H_0: y_{jk} \sim N(\mu_y; \sigma_y^2) \text{ vs. } H_1: y_{jk} \not\sim N(\mu_y; \sigma_y^2)$$

Donde:

j : Contador que identifica la serie de medición evaluada ($j = 1; 2; \dots; J$).

En el proyecto se utiliza la prueba de Anderson – Darling para verificar el cumplimiento estadístico de la prueba de hipótesis, basada en el valor P [20].

Si $p_{value} \leq \alpha$, entonces es posible rechazar H_0 con una probabilidad $1 - \alpha$ de equivocación estadística, porque es verdadera (error tipo I).

b) Detección de posibles valores experimentales aberrantes.

La prueba de hipótesis se basa en verificar si el menor o mayor valor de la serie analizada de mediciones y_{kj} podría ser un valor no explicado por la distribución experimental asumida.

$$H_0: \forall y_{jk} \in N(\mu_y; \sigma_y^2) \text{ vs. } H_1: MIN(y_{kj}); MAX(y_{kj}) \notin N(\mu_y; \sigma_y^2)$$

En el proyecto se utiliza la prueba de Grubbs [20], que detecta un valor aberrante¹⁶ a la vez: el mayor o menor de la serie de mediciones, que se elimina del conjunto de datos.

El proceso se repite hasta que no se detecte ningún otro valor aberrante, pero puede conducir a excesivos rechazos, específicamente cuando $n_j \geq 6$ y la hipótesis de normalidad no gozan de la suficiente aproximación a la realidad [20].

¹⁶ En inglés referido como “outlier”.

En este momento del proceso, libre de observaciones aberrantes, es posible estimar las estadísticas mancomunadas: promedio y desviación estándar, de la matriz conformada por las JK mediciones [16] mediante las siguientes pruebas de hipótesis:

c) Verificación de la homocedasticidad.

La prueba de hipótesis se basa en verificar si las varianzas experimentales de cada j -ésima serie de medición, son iguales o no estadísticamente:

$$H_0: s^2(y_1) = s^2(y_2) = \dots s^2(y_j) \text{ vs. } H_1: s^2(y_j) \neq s^2(y_i) \quad \forall j \neq i$$

Si la suposición de normalidad de la serie de mediciones es aceptable estadísticamente, se aplica la prueba de Bartlett [20], de lo contrario, se aplica la prueba de Levene [20].

d) Verificación de la homogeneidad de medias.

Una vez verificada la homocedasticidad, la cuantificación de la precisión intermedia depende de si existen o no diferencias estadísticas entre los j -ésimos promedios que conforman la matriz de las mediciones:

$$H_0: \bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \dots \bar{y}_j \text{ vs. } H_1: \bar{y}_j \neq \bar{y}_i \quad \forall j \neq i$$

Si se considera que las j -series de mediciones son normales y homocedásticas, se utiliza el ANOVA unifactorial de Fisher [20] para probar la hipótesis anterior, pero si no son homocedásticas, se utiliza el ANOVA unifactorial de Welch [20].

Para ambas herramientas estadísticas, si $p_{value} > \alpha$, entonces, no es posible rechazar H_0 con una probabilidad $(1 - \alpha)$, y se considera que existe homogeneidad de promedios. En este caso, las estadísticas mancomunadas de la matriz de mediciones bajo condiciones de precisión intermedia se calculan según las siguientes ecuaciones:

- Promedio mancomunado de la matriz [16]:

$$\bar{y} = \frac{1}{KJ} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K y_{jk} \quad \text{ecuación 47}$$

Como consecuencia de la "limpieza" estadística de las j -ésimas series de mediciones, el número de observaciones por serie no es constante, es decir:

$$K_j \neq K_i \quad \forall j \neq i$$

Por tanto:

$$K = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J K_j \quad \text{ecuación 48}$$

- Varianza mancomunada de la matriz [16]:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{(J-1)s_a^2 + J(n-1)s_b^2}{K(K-1)} \quad \text{ecuación 49}$$

Donde:

$s^2(\bar{y})$: Varianza mancomunada de la gran media con grados de libertad $\nu_y = JK - 1$.

s_a : Estimador de la variabilidad entre series con grados de libertad $\nu_a = J - 1$.

$$s_a^2 = \frac{K}{J-1} \sum_{j=1}^J (\bar{y}_j - \bar{y})^2 \quad \text{ecuación 50}$$

s_b : Estimador de la variabilidad dentro de series con grados de libertad $\nu_b = J(K - 1)$.

$$s_b^2 = \frac{1}{J(K-1)} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (y_{jk} - \bar{y}_j)^2 \quad \text{ecuación 51}$$

Para ambas herramientas estadísticas: ANOVA unifactorial de Fisher ó ANOVA unifactorial de Welch, si $p \leq \alpha$ entonces se rechaza H_0 con una probabilidad $(1 - \alpha)$, y se considera que no existe homogeneidad de promedios. En este caso, la varianza mancomunada se estima según la ecuación 52 [16]:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{1}{J} \left(s_a^2 + \frac{s_b^2}{K} \right) \quad \text{ecuación 52}$$

Donde:

$$s_a^2 = \frac{Ks^2(\bar{y}_j) - s_b^2}{K} \quad \text{ecuación 53}$$

$$s^2(\bar{y}_j) = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (\bar{y}_j - \bar{y})^2 \quad \text{ecuación 54}$$

$$s_b^2 = \overline{s^2(y_{jk})} \quad \text{ecuación 55}$$

Si la distribución experimental de las series de mediciones no es concordante con la distribución normal, no es posible aplicar el procedimiento descrito anteriormente. En este caso, si el evento es oscilatorio, entonces las oscilaciones pueden ser explicadas probabilísticamente según una función arcoseno [16] y estimar su variabilidad según la ecuación 56:

$$u(\Delta x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}}$$

ecuación 56

Donde:

Δx : Amplitud del evento oscilatorio [UM_y].

Para todos los casos evaluados, la precisión intermedia de la variable de interés se estima a partir de la raíz cuadrada positiva de su varianza mancomunada:

$$s_p(\bar{y}) = +\sqrt{s^2(\bar{y})}$$

ecuación 57

Donde:

$s_p(\bar{y})$: Incertidumbre estándar mancomunada¹⁷ de la variable de interés y .

La varianza mancomunada de la variable investigada, definida por la ecuación 57, tiende asintóticamente a un valor que constituye el límite de control estadístico para las posteriores pruebas rutinarias de la variable de interés (ver más adelante las aplicaciones de la incertidumbre expandida en la sección 2.3.7).

El procedimiento descrito para estimar la precisión intermedia del mensurando (y) fue aplicado previamente para definir el desempeño metrológico de un patrón volumétrico [21], y es la base estadística para cuantificar la variabilidad estocástica del patrón dinámico del proyecto.

En general, el ANOVA es una herramienta fundamental para comprender la estructura de la incertidumbre de una variable cuando, a través de un diseño experimental conveniente, se evalúa su repetibilidad y precisión intermedia a largo plazo [22].

¹⁷ La GUM la refiere como "pooled experimental standard deviation" [ver la sección 4.2.4 - 16].

2.3.3.3 Análisis de regresión

Otro caso de evaluaciones tipo A de la incertidumbre estándar, está asociada a la estimación de la calidad del ajuste mínimo-cuadrático de los coeficientes de un modelo estadístico [23]:

$$\hat{y}_c = \hat{S}_y \times y_m \quad \text{ecuación 58}$$

Donde:

\hat{y}_c : Vector columna ($P \times 1$) de los valores ajustados.

\hat{S}_y : Vector columna ($P \times 1$) de los coeficientes del polinomio de ajuste.

P : Número de parámetros de la ecuación ajustada.

p : Grado del polinomio ajustado.

$$p = P - 1 \quad \text{ecuación 59}$$

y_m : Matriz ($N \times P$) de los valores más probables de la magnitud medida.

N : Longitud de la matriz y_m .

Las siguientes estadísticas definen la calidad de la regresión lineal [23]:

- Error típico del ajuste $s_a(\hat{y}_c)$.

$$s_a(\hat{y}_c) = \sqrt{CM_{res}} = \left(\frac{SC_{res}}{N - P} \right)^{0,5} = \left(\frac{y_c^T y_c - \hat{S}_y^T Y^T y_c}{N - P} \right)^{-0,5} \quad \text{ecuación 60}$$

Donde:

SC_{res} : Suma de cuadrados del residuo.

CM_{res} : Cuadrado medio del residuo.

$Y_{N \times P}$: Matriz ampliada.

- Coeficiente de correlación R^2 : porcentaje de variación de la variable de respuesta que se explica por su relación con una (regresión simple) o más variables predictoras (regresión múltiple). En general, cuanto mayor sea R^2 , mejor se ajustará el modelo a sus datos, considerando que $0\% \leq R^2 \leq 100\%$.
- Matriz varianza-covarianza de los coeficientes ajustados $V_{\hat{S}_y}$.

$$V_{\hat{S}_y} = \frac{CM_{res}}{Y^T Y} \quad \text{ecuación 61}$$

Es usual aplicar un ANOVA secuencial [23] para verificar el cumplimiento de la hipótesis nula:

$$H_0: \hat{\delta}_i = 0 \text{ vs. } H_1: \hat{\delta}_i \neq 0 \quad \forall i (i = 0; 1; \dots; P)$$

Si $p_{value} \leq \alpha$, entonces se rechaza H_0 con una probabilidad $(1 - \alpha)$, y se considera que el coeficiente ajustado es significativamente diferente de cero y debe ser considerado.

2.3.4 Presupuesto de incertidumbre

El presupuesto de incertidumbre es una herramienta que permite cuantificar la incertidumbre estándar combinada de la estimación corregida de la magnitud medida, según el siguiente formato:

Tabla 10. Formato del presupuesto de incertidumbre de la medida.

y_m	Incertidumbre estándar						$u_l(y_c)$			$u_c(y_c)$		
	UM_{y_m}	Δx_l	Valor	FDP	Divisor	$u(\Delta x_l)$	v_l	c_l	UM_{y_m}	%	UM_{y_m}	v_{ef}
##		$\Delta x_{l=1}$	## $UM_{l=1}$	$FDP_{l=1}$	##	## $UM_{l=1}$	#	## $UM_{l=1}$	##	##	##	#
		\vdots										
		$\Delta x_{l=N}$	## $UM_{l=N}$	$FDP_{l=N}$	##	## $UM_{l=N}$	#	## $UM_{l=N}$	##	##		

Donde:

$$y_m = f(x_l)$$

UM: Unidad de medida.

FDP: Función de densidad de probabilidad asignada.

v_l : Grados de libertad de la l -ésima fuente de incertidumbre.

$c_l = \partial y_c / \partial \Delta y_l$: Coeficiente de sensibilidad de la l -ésima fuente de incertidumbre.

v_{ef} : Grados efectivos de libertad (ver más adelante la ecuación 68).

En el presupuesto de incertidumbre se incluyen los resultados de las cuantificaciones de las incertidumbres estándares tanto de tipo B (ver la sección 2.3.2) como de tipo A (ver la sección 2.3.3).

2.3.5 Incertidumbre estándar combinada

Si se asume que las mediciones son estadísticamente independientes (régimen estacionario) la varianza combinada de la variable corregida se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16], al modelo estadístico de su medición, definido por la ecuación 43:

$$u_c^2(y_c) = \sum_{l=1}^N u_l^2(y_c) = \sum_{l=1}^N \left[ABS \left(\frac{\partial y_c}{\partial x_l} \right) u(\Delta x_l) \right]^2 \quad \text{ecuación 62}$$

Donde:

$u_c^2(y_c)$: Varianza combinada [UM_y^2].

$u_l(y_c)$: Incertidumbre estándar aportada por la l -ésima fuente de incertidumbre [UM_y].

$u(\Delta x_l)$: Incertidumbre estándar de la l -ésima fuente de incertidumbre [UM_{x_l}].

Si se reconoce la falta de independencia estadística entre al menos dos variables, entonces la Ley de propagación de incertidumbres debe ser corregida por el efecto de la correlación [16]:

$$u_c^2(y_c) = \sum_{l=1}^N u_l^2(y_c) + 2 \sum_{l=1}^{N-1} \sum_{j=l+1}^N \frac{\partial y_c}{\partial x_l} \frac{\partial y_c}{\partial x_j} u(x_l; x_j) \quad \text{ecuación 63}$$

Donde:

$u(x_l; x_j)$: Covarianza estimada entre las variables medidas x_l y x_j .

La incertidumbre estándar combinada de la estimación corregida de la magnitud medida se calcula según la siguiente ecuación:

$$u_c(y_c) = +[u_c^2(y_c)]^{0,5} \quad \text{ecuación 64}$$

Donde:

$u_c(y_c)$: Incertidumbre estándar combinada de la estimación corregida del mensurando [UM_y].

En el marco del proyecto será común reportar:

- El valor numérico de la incertidumbre estándar combinada entre paréntesis a continuación del valor del promedio, pero referido a sus dos últimas cifras reportadas [16].

Por ejemplo: $p_5 = 22,25(15) \text{ kPa}$.

- La incertidumbre relativa para demostrar el peso de la incertidumbre estándar combinada en el valor medido de la magnitud:

$$u_r(y_c) = \frac{u_c(y_c)}{y_c} \quad \text{ecuación 65}$$

Donde:

$u_r(y_c)$: Incertidumbre relativa [$adim$].

2.3.6 Incertidumbre expandida

Si se desea reportar un intervalo probabilístico para la estimación corregida de la magnitud medida, entonces se calcula su incertidumbre expandida [16]:

$$U_p(y_c) = \pm k_p u_c(y_c) \quad \text{ecuación 66}$$

Donde:

$U_p(y_c)$: Incertidumbre expandida.

k_p : Factor de cobertura.

$p = 1 - \alpha$: Probabilidad de cobertura de la medición.

Si se comprueba que la desviación del Teorema del Límite Central (TLC) [16] es importante, entonces es recomendable calcular el factor de cobertura a partir de la estadística¹⁸ t_p pero con ν_{ef} grados de libertad, es decir:

$$k_p = t_{1-\alpha}(\nu_{ef}) \quad \text{ecuación 67}$$

Los grados efectivos de libertad se calculan según la ecuación de Welch-Satterthwaite [16]:

$$\nu_{ef} = u_c^4(y_c) \left[\sum_{l=1}^N \frac{u_l^4(y_l)}{\nu_l} \right]^{-1} \quad \text{ecuación 68}$$

Cuando los grados efectivos de libertad se calculan según la ecuación 68, debe satisfacerse la siguiente inecuación [16]:

$$\nu_{ef} \leq \sum_{l=1}^N \nu_l \quad \text{inecuación 69}$$

En este caso, no es conveniente asignarle infinitos grados de libertad a las incertidumbres estándares obtenida por evaluaciones de tipo B, sino realizar una estimación según la ecuación 70:

$$\nu_l \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_l)}{u(x_l)} \right]^{-2} \quad \text{ecuación 70}$$

Donde:

$\Delta u(x_l)/u(x_l)$: Incertidumbre relativa de la evaluación tipo B realizada.

¹⁸ Los valores de la estadística t_p pueden ser consultados en la Tabla G.2 [16].

En general, $\Delta u(x_l)/u(x_l)$ es una magnitud subjetiva basada en el juicio científico del evaluador, a partir del conjunto de informaciones disponibles [16]. En el proyecto se utilizará:

$$\Delta u(x_l)/u(x_l) = 0,25 \Rightarrow v_l = 8.$$

2.3.7 Aplicaciones de la incertidumbre expandida

En el proyecto, la incertidumbre expandida de la magnitud medida tiene tres importantes aplicaciones desde el punto de vista metrológico:

2.3.7.1 Aplicación 1

El objetivo es verificar la conformidad del desempeño del instrumento de medida bajo determinadas magnitudes influyentes. La magnitud evaluada es generalmente el error absoluto de calibración del instrumento de medida, obtenido por un método de comparación directa:

$$[e_c - U_p(e_c); e_c + U_p(e_c)] \in [-EMP_y; +EMP_y] \quad \text{inecuación 71}$$

Donde:

e_c : Error absoluto de calibración del instrumento de medida [UM_y].

EMP_y : Error máximo permitido del mensurando¹⁹ [UM_y].

Para verificar el cumplimiento de la inecuación 71 se considerará que $p \approx 95\% \Rightarrow k_p = 2$. Si se cumple la inecuación 71, entonces puede considerarse que el desempeño metrológico del instrumento de medida está conforme con sus tolerancias, para un nivel de confianza $\alpha \approx 5\%$.

2.3.7.2 Aplicación 2

El objetivo es determinar si el laboratorio es competente técnicamente para verificar el desempeño metrológico de un instrumento de medida. En el ámbito del proyecto se utilizan los siguientes indicadores²⁰:

- Índice de consistencia metrológica (IC). Este indicador se cuantifica, según la ecuación 72:

$$IC = \frac{u_c(y_c)}{u_{obj}(y)} \quad \text{ecuación 72}$$

Donde:

$u_{obj}(y)$: Incertidumbre objetivo de la medición [UM_y]:

¹⁹ El rango del error máximo permitido es definido por el fabricante siempre que el instrumento de medida se utilice bajo las condiciones de operación establecidas.

²⁰ Los indicadores para caracterizar la calidad de la medición son referidos en diversos contextos como "measurement capability index C_m ", y otros derivados como "test uncertainty ratio (TUR)" y "test accuracy ratio (TAR)" [24].

$$u_{obj}(y) = (1/3)EMP_y \quad \text{ecuación 73}$$

La fracción 1/3 está relacionada con la teoría de las bandas de control estadístico [25], y se analiza en la **Aplicación 3**, cuando se abordan los límites de control.

El índice de consistencia metrológica permite evaluar si el laboratorio dispone de la exactitud requerida para verificar el desempeño metrológico del instrumento de medida.

Su valor “deseado” es $IC \leq 1$ ($IC = 1$ es el valor óptimo), sin embargo, como la incertidumbre estándar combinada del mensurando incluye fuentes de incertidumbre relacionadas con las características metrológicas del instrumento de medida evaluado, independientes de la gestión metrológica del laboratorio, se requiere de otro parámetro para concluir la evaluación.

- Relación de exactitud (RE). Este indicador, que complementa al IC en la evaluación integral de la competencia técnica del laboratorio, se cuantifica según la ecuación 74:

$$RE = \left[\frac{u_p(y)}{u_c(y)} \right]^2 \quad \text{ecuación 74}$$

Donde:

$u_p(y)$: Incertidumbre aportada por el patrón de medida.

Los valores óptimos de la relación de exactitud del proyecto están en el rango:

$$1/4 \leq RE \leq 1/3 \Leftrightarrow 25 \% \leq RE \leq 33 \%$$

Es decir, se espera que el peso estadístico de los patrones de medida represente entre el 25 % y, como máximo, el 33 % de la incertidumbre estándar combinada del mensurando.

Este “saludable” criterio permitiría asegurar que si las derivas de los instrumentos patrones de medida son del orden de $\pm 1/3$ EMP en el período asignado de recalibración, pasado ese tiempo, aún los resultados de sus mediciones estarían bajo control estadístico.

2.3.7.3 Aplicación 3

El objetivo es determinar si las mediciones del mensurando están bajo control estadístico. Si los efectos sistemáticos sobre el mensurando han sido corregidos o son despreciables, entonces, es posible utilizar el carácter asintótico de la incertidumbre estándar mancomunada para definir los límites de advertencia del proceso de medición [25]:

$$LA_{s(i)} = \bar{y} \pm U_p(\bar{y}) \quad \text{ecuación 75}$$

Donde:

$LA_{s(i)}$: Límites de advertencia superior o inferior [UM_y].

$U_p(\bar{y}) = \pm 2 s_p(\bar{y})$: Incertidumbre expandida del promedio histórico de la variable evaluada [UM_y].

Cualquier valor fuera de los límites de advertencia debe ser considerado, para una probabilidad de cobertura $p \approx 95 \%$, una alerta de la deriva del instrumento de medida o de la ocurrencia de una medición históricamente poco probable.

Respecto de los límites de control [25] superior e inferior [$LC_{s(i)}$], definidos para $p \approx 99 \%$, cualquier valor de la variable de interés, fuera de estos límites, debe ser una alerta de la ocurrencia de procesos que afectan seriamente la variabilidad natural e histórica del instrumento de medida:

$$LC_{s(i)} = \bar{y} \pm 3 s_p(\bar{y})$$

ecuación 76

2.4 La trazabilidad metrológica

El VIM [2] define la trazabilidad metrológica como la “propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida”.

La trazabilidad de las mediciones en régimen estacionario, junto con la evaluación realista de sus incertidumbres, son dos pilares de la competencia técnica a demostrar en el proyecto. Es un hecho que la exactitud de un instrumento de medida funcionando en condiciones estacionarias, estimada por las tolerancias establecidas por el fabricante o por las correcciones generadas durante su calibración, no se mantiene constante con el tiempo.

En la etapa investigativa del proyecto, que abarcó el período comprendido entre agosto del 2016 hasta junio del 2019, se utilizaron instrumentos de medida con calibraciones iniciales o declaraciones de conformidad²¹ de los fabricantes, y posteriores recalibraciones externas.

Con los resultados de las recalibraciones externas, se implementaron dos procedimientos para evaluar, de manera retroactiva, el efecto de la deriva de los instrumentos de medida en la incertidumbre estándar de las mediciones de los diferentes procesos investigativos.

2.4.1 Evaluación de la deriva instrumental: primera aproximación

En este caso, se conoce la tolerancia establecida por el fabricante del instrumento de medida, y las mediciones no son corregidas en ningún momento dentro del período asignado entre calibraciones, sino que su inexactitud se trata en términos de incertidumbre estándar, según el siguiente procedimiento:

- Inicialmente se estima que la incertidumbre expandida del parámetro evaluado (error absoluto de calibración) es igual a la banda definida por 1/3 del error máximo permitido (EMP_y) del instrumento de medida reportada por su fabricante:

$$U_p(y) = \pm k_p u_c(y) = \pm 1/3 EMP_y \quad \text{ecuación 77}$$

- La estimación de la incertidumbre estándar de tipo B, asociada a la inexactitud de las mediciones con el instrumento de medida, se cuantifica según la ecuación 78:

$$u_B(\Delta y_{inex}) = \frac{EMP_y}{3} \quad [\Delta y_{inex} \sim N(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 78}$$

²¹ La declaración de conformidad es un documento formal del fabricante, usualmente asociado a un proceso de inspección, que establece la conformidad del desempeño metrológico del instrumento de medida con los requisitos del manual.

- Se calcula el factor de deriva según la ecuación 79:

$$F_c = \frac{(F_m - F_0)}{(365 P_c)} \quad \text{ecuación 79}$$

Donde:

F_c : Factor de deriva [adimensional].

F_m : Fecha de la medición.

F_0 : Fecha de inicio de uso del instrumento de medida en el proceso.

P_c : Período asignado entre calibraciones externas [años].

Si se conoce la deriva del instrumento de medida por estimación experimental o del reporte del fabricante, entonces su incertidumbre estándar de tipo B se cuantifica, según la ecuación 80:

$$u_B(\Delta y_D) = \frac{F_c D_y}{\sqrt{3}} \quad [\Delta y_D \sim RS(u_B = 8)] \quad \text{ecuación 80}$$

Donde:

D_y : Deriva [UM_y].

- Si no se conoce la deriva del instrumento de medida, algo usual, entonces se considera que su incertidumbre estándar de tipo B se cuantifica, según la ecuación 81:

$$u_B(\Delta y_D) = F_c u(\Delta y_{inex}) \quad [\Delta y_{inex} \sim N(u_B = 8)] \quad \text{ecuación 81}$$

La incertidumbre estándar por la deriva del instrumento de medida varía en el siguiente rango:

- Mínimo, recién calibrado el instrumento de medida:

$$F_m = F_0 \Rightarrow F_c = 0 \Rightarrow u(\Delta y_D)_{MIN} = 0$$

- Máximo, cuando ha transcurrido el tiempo asignado de recalibración externa:

$$F_m = F_0 + 365 P_c \Rightarrow F_c = 1 \Rightarrow u(\Delta x_D)_{MAX} = u(\Delta y_{inex})$$

El peso estadístico de la incertidumbre por deriva es cero solo al inicio, recién calibrado el instrumento de medida, pero se incrementa en la medida que transcurre el tiempo de uso.

Una vez transcurrido el período asignado de recalibración (P_c), según las recomendaciones del fabricante, el desempeño metrológico del sistema de medida debe verificarse y la incertidumbre estándar por deriva puede actualizarse, según la deriva observada experimentalmente.

Si no se realiza, entonces $F_c > 1$ y aunque puede cuantificarse su efecto, según la ecuación 80, el riesgo de su utilización es alto especialmente cuando define magnitudes de referencia.

2.4.2 Evaluación de la deriva instrumental: segunda aproximación

Para la evaluación se dispone de las correcciones reportadas en los certificados de calibración de los instrumentos de medida, al inicio y final del período asignado entre calibraciones externas, y las mediciones generadas en algún momento dentro del período son corregidas retrospectivamente, considerando que la distribución de la corrección reportada es lineal en el tiempo.

La corrección al momento de la medición se calcula según el siguiente procedimiento:

- Se calcula la corrección de la variable x en la fecha F_0 :

$$C_{y,0} = C_{min,0} + \frac{C_{max,0} - C_{min,0}}{y_{max} - y_{min}} (y_m - y_{min}) \quad \text{ecuación 82}$$

Donde:

$C_{y,0}$: Corrección de la variable y en la fecha F_0 [UM_y].

$C_{max,0}$, $C_{min,0}$: Correcciones máxima y mínima reportadas para la variable y en el certificado de calibración de fecha F_0 [UM_y].

y_{max} , y_{min} : Valores máximo y mínimo de la variable y [UM_y].

y_m : Valor medido de la variable y en la fecha de medición F_m [UM_y].

Nota a la ecuación 82: Si no se dispone de un certificado de calibración, pero sí de la declaración de conformidad²¹ del fabricante, entonces $C_0 = 0$.

- Se calcula la corrección del mensurando (y) en la fecha de la última calibración externa F_1 :

$$C_{y,1} = C_{min,1} + \frac{C_{max,1} - C_{min,1}}{y_{max} - y_{min}} (y_m - y_{min}) \quad \text{ecuación 83}$$

Donde:

$C_{y,1}$: Corrección de la variable y en la fecha F_1 [UM_x].

$C_{max,1}$, $C_{min,1}$: Correcciones máxima y mínima reportadas para la variable y en el certificado de calibración de fecha F_1 [UM_y].

- Se calcula la corrección de la variable y en el momento de la medición (F_m):

$$C_{y,m} = C_{y,1} + \frac{C_{y,1} - C_{y,0}}{F_1 - F_0} (F_1 - F_m) \quad \text{ecuación 84}$$

Donde:

$C_{y,m}$: Corrección de la variable y en la fecha F_m [UM_y].

- Se calcula la medición corregida al momento de la medición, según la ecuación 85:

$$y_c = y_m + C_{y,m} \quad \text{ecuación 85}$$

- La estimación de la incertidumbre estándar de tipo B asociada a la inexactitud de las mediciones con el instrumento de medida, se cuantifica, según la ecuación 86:

$$u_B(\Delta y_{inex}) = \frac{U_p(C_{y,m})}{k_{\approx 95\%}} = \frac{U_p(C_{y,m})}{2} \quad [\Delta y_{inex} \sim N(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 86}$$

A diferencia de la primera aproximación (sección 2.4.1), la segunda aproximación ajusta la deriva al calcular la corrección al momento de la medición, por tanto, la incertidumbre estándar asociada al efecto de la deriva sobre el resultado de la medición es cero, es decir: $u(\Delta y_D) = 0$.

La segunda aproximación de la evaluación de la deriva es bayesiano, porque ajusta estadísticamente la inestabilidad del instrumento de medida en el período comprendido entre dos calibraciones consecutivas, sin embargo, su distribución lineal retrospectiva requiere de verificación mediante calibraciones intermedias que validan la diferencia de correcciones, utilizando el error normalizado como criterio de aceptación o rechazo [26].

$$E_N = \frac{|p_{ref} - p_c|}{\sqrt{U_p^2(p_{ref}) + U_p^2(p_c)}} \quad \text{ecuación 87}$$

Donde:

E_N : Error normalizado [*adim*].

p_{ref} : Presión de referencia, corregida retroactivamente a la fecha de la verificación intermedia [*Pa*].

p_c : Presión corregida, según la verificación intermedia [*Pa*].

$U_p(p_{ref})$: Incertidumbre expandida de la presión de referencia ($p \approx 95\%$) [*Pa*].

$U_p(p_c)$: Incertidumbre expandida de la presión corregida por verificación intermedia ($p \approx 95\%$) [*Pa*].

Si $E_N \leq 1 \Rightarrow$ el proceso de verificación intermedia es satisfactorio [26], es decir, no existen diferencias significativas estadísticamente ($\alpha \approx 5\%$), entre los valores de las presiones corregidas retrospectivamente a la fecha de medición, a partir del certificado de calibración reportado por el laboratorio de calibración externo, con respecto al obtenido en la verificación intermedia.

2.5 Verificación del sistema de medida de presión

2.5.1 Generalidades

El estado del arte de la evaluación dinámica de los sistemas de medición de presión está definido, fundamentalmente, por las investigaciones realizadas en los INM, así como por las publicadas en revistas y en las memorias de los eventos de carácter metrológico, generalmente auspiciados por los propios INM.

En el caso de la calibración de transductores mecánicos en régimen dinámico, existe consenso en la contradicción actual entre la relativa facilidad con que se obtiene y registran los resultados de las mediciones dinámicas de presión, y la dificultad encontrada en la estimación de su calidad [3]. La calidad de las mediciones de una magnitud en general, está definida por la gestión de su trazabilidad a los patrones internacionales que la reproducen, y por el procedimiento para cuantificar su incertidumbre.

En el caso de las mediciones dinámicas de presión, aunque los fabricantes reclaman que sus instrumentos de medida son capaces de medir con bajas incertidumbres aún para altas frecuencias, lo cierto es que para la fecha de presentación de esta tesis doctoral, aún el BIPM [27] no había publicado las correspondientes CMCs.

A la falta de trazabilidad formal de las mediciones dinámicas de presión, se une la ausencia de procedimientos normalizados para la estimación tanto de los parámetros como de la incertidumbre de la respuesta dinámica de los transductores de presión, lo que influye indirectamente en los resultados de las investigaciones donde las mediciones son, por naturaleza, dinámicas. Ante esta situación, los países europeos, con una larga tradición en el campo de la metrología, decidieron impulsar en el marco de EURAMET el proyecto 1078. Development of methods for the evaluation of uncertainty in dynamic measurements [28], con el propósito de fomentar la aplicación y el desarrollo de métodos para el análisis de las mediciones dinámicas en metrología, haciendo énfasis en la evaluación de la incertidumbre de la medición [3].

El proyecto 1078, que comenzó el 1 de noviembre del 2008 bajo la coordinación del PTB, se concentró en la organización de una serie de talleres internacionales denominados "Workshop on analysis of Dynamic Measurements", como plataforma para presentar y discutir los nuevos enfoques, y poner en marcha proyectos conjuntos.

Durante la realización del V Taller Internacional en Análisis de Mediciones Dinámicas, realizado entre el 1 y el 3 de junio del 2010 en la ciudad sueca de Boras, se lanzó la iniciativa entre los participantes, para desarrollar un proyecto conjunto relacionado con el análisis de mediciones dinámicas, en el marco del EMRP, resultando en el proyecto "IND09. Dynamic Traceable dynamic measurement of mechanical quantities" [29], que se ejecutó entre el 2011 y el 2014.

Estos dos grandes proyectos europeos en el campo de las mediciones dinámicas, son los precedentes para que el BIPM haya desarrollado un taller dedicado exclusivamente a la Metrología de la Dinámica de las Mediciones entre el 15 y el 16 de noviembre del 2012 [3], al que asistieron metrologos designados exclusivamente por los Directores de los INM (solamente una, como máximo dos personas), demostrando no solo la importancia que el BIPM atribuye a este tema para la industria moderna, sino el reconocimiento de la complejidad para evaluar la incertidumbre de las mediciones dinámicas en un ambiente de trazabilidad al SI reconocido.

El BIPM reconoce que la trazabilidad de las mediciones desde los INM hasta los laboratorios de calibración, se establece generalmente bajo condiciones estacionarias, y que las capacidades disponibles están solamente en algunos INM donde se realizan investigaciones en el campo de las mediciones dinámicas [3]. En particular, reconoce que, actualmente, la verificación de las capacidades de mediciones dinámicas mediante comparaciones fundamentales (key comparisons) es un largo camino, debido a la falta de métodos validados y procedimientos aceptados.

El objetivo del Taller fue reunir a expertos de los INM y los usuarios industriales que tienen necesidades de mediciones dinámicas trazables, fiables y comparables, así como a los responsables de la redacción y aplicación de normas de especificación y/o medio ambiente, ahorro de energía y la legislación sobre seguridad [3].

El BIPM ha depositado grandes expectativas en las consecuencias que el Taller tenga en el ámbito de las mediciones dinámicas, esperando que [3]:

- ✓ Se incremente la colaboración dirigida a la caracterización de los desafíos en el campo de las mediciones dinámicas trazables al SI.
- ✓ Se armonicen los términos y métodos para que las mediciones hechas por diversas metodologías puedan ser relacionadas entre sí, permitiendo la comparación de los trabajos de investigación y un enfoque coherente para estimar los resultados de las mediciones y sus incertidumbres;
- ✓ Se desarrollen guías de mejores prácticas y documentos que podrían adoptarse como base para los aspectos de medición de la normalización internacional, la regulación y la legislación.

Referente a Costa Rica, ni el LCM ni los laboratorios de calibración industriales, han desarrollado la calibración dinámica de los transductores de presión, limitándose a su calibración estática, cuyos resultados no son estrictamente aplicables en condiciones dinámicas.

2.5.2 La medición de la presión del fluido

Si el comportamiento lineal del transmisor de presión es satisfactorio, el modelo estadístico de la presión manométrica experimental del fluido (ver la ecuación 19) está definido por la ecuación 88:

$$p_f = S_0 + S_1(i_m + \Delta i_{DAQ}) + (C_p + \Delta C_p) + \Delta p_t \quad \text{ecuación 88}$$

Donde:

p_f : Presión manométrica corregida del fluido [Pa].

S_0 y S_1 : Coeficientes nominales de cero [Pa] y de sensibilidad [Pa · mA⁻¹] respectivamente (ver la sección 2.2.4).

i_m : Corriente eléctrica CD medida por el miliamperímetro del sistema de adquisición de datos [mA].

Δi_{DAQ} : Corrección resultante de los efectos de las magnitudes influyentes en el sistema de adquisición de datos [mA].

C_p : Corrección reportada resultante de la calibración del transmisor de presión [Pa], ajustada retrospectivamente al momento de la medición (vea la sección 2.4.2).

ΔC_p : Inexactitud de la corrección reportada [Pa].

$$u_B(\Delta C_p) = U_p(C_p)/2 \quad [\Delta C_p \sim N(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 89}$$

Δp_t : Corrección resultante por el efecto de la temperatura en el transmisor de presión [Pa].

$$u_B(\Delta p_t) = p_c c_t \Delta t / \sqrt{12} \quad [\Delta p_t \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 90}$$

Si las mediciones de la presión del fluido son estacionarias e independientes, la incertidumbre estándar se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 88:

$$u_c(p_f) = +\{[S_1 u_c(i_m)]^2 + u^2(\Delta C_p) + u_c^2(\Delta p_t)\}^{0,5} \quad \text{ecuación 91}$$

La presión absoluta asociada a la presión manométrica p_f se calcula según la ecuación 92:

$$P_f = p_f + P_{at} \quad \text{ecuación 92}$$

Donde:

P_f : Presión absoluta del fluido [hPa].

P_{at} : Presión atmosférica, medida por un barómetro [hPa].

Si las mediciones de la presión absoluta son estacionarias e independientes, la incertidumbre estándar se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 92:

$$u_c(P_f) = + \sqrt{u_c^2(p_f) + u_c^2(P_{at})} \quad \text{ecuación 93}$$

Donde:

$u_c(p_f)$: Incertidumbre estándar de p_f según la ecuación 91 [hPa].

$u_c(P_{at})$: Incertidumbre estándar de P_{at} [hPa].

La medición de la presión atmosférica se realiza al inicio ($P_{at_{in}}$) y al final ($P_{at_{f}}$) de cada proceso de medición, utilizando un barómetro digital, y se calcula, según la ecuación 94:

$$P_{at} = \overline{P_{at}} = \frac{1}{2}(P_{at_{in}} + P_{at_{f}}) \quad \text{ecuación 94}$$

El modelo estadístico de la presión atmosférica está definido por la ecuación 95:

$$P_{at} = (P_{at_m} + \Delta P_{at_d}) + (C_{at} + \Delta C_{at}) \quad \text{ecuación 95}$$

Donde:

P_{at_m} : Presión atmosférica medida [hPa].

ΔP_{at_d} : Corrección por resolución del barómetro [hPa].

$$u_B(\Delta P_{at_d}) = (d/2)/\sqrt{3} \quad [\Delta P_{at_d} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 96}$$

C_{at} : Corrección reportada de la medición de presión atmosférica [Pa], ajustada retroactivamente al momento de la medición (ver la sección 2.4.2).

ΔC_{at} : Inexactitud de la corrección reportada [hPa].

$$u_B(\Delta C_{at}) = U_p(C_{at})/2 \quad [\Delta C_{at} \sim N(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 97}$$

Si las mediciones de P_{at} son estacionarias y estadísticamente independientes, la incertidumbre estándar se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 95:

$$u_c(P_{at}) = + \sqrt{u^2(\Delta P_{at_d}) + u^2(\Delta C_{at})} \quad \text{ecuación 98}$$

2.5.3 La medición de la corriente eléctrica CD

La corriente eléctrica CD a la salida de los transmisores de presión (i_m en la ecuación 88) se mide de manera independiente, simultánea, sincronizada y en tiempo real por cada uno de los canales de entrada del miliamperímetro de un sistema de adquisición de datos y su corrección, resultante de los efectos de las magnitudes influyentes, se calcula, según la ecuación 99:

$$\Delta i_{DAQ} = \sum_{l=1}^5 \Delta i_l = \Delta i_d + \Delta i_{inex} + \Delta i_D + \Delta i_t + \Delta i_r \quad \text{ecuación 99}$$

Donde:

Δi_d : Corrección por resolución del DAQ [mA].

$$u_B(\Delta i_d) = (d/2)/\sqrt{3} \quad [\Delta i_d \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 100}$$

Δi_{inex} : Corrección por inexactitud del DAQ [mA].

$$u_B(\Delta i_{inex}) = EMP/\sqrt{3} \quad [\Delta i_{inex} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 101}$$

Δi_D : Corrección por deriva del DAQ según primera aproximación (ver la sección 2.4.1) [mA].

$$u_B(\Delta i_D) = F_c u_B(\Delta i_{inex}) \quad [\Delta i_D \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 102}$$

Δi_t : Corrección resultante por el efecto de la temperatura en el DAQ [mA].

$$u_B(\Delta i_t) = c_t(\Delta t/2)/\sqrt{3} \quad [\Delta i_t \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 103}$$

Δi_r : Corrección por precisión [mA].

Si la serie de mediciones se realiza bajo condiciones de repetibilidad, se estima según la desviación estándar de la muestra (ver la sección 2.3.3.1):

$$u_A(\Delta i_r) = s(\bar{i}_{xe}) \quad [\Delta i_r \sim N(v_A = n - 1)] \quad \text{ecuación 104}$$

Si las mediciones están asociadas a un diseño experimental bajo condiciones de precisión intermedia, se estima según la desviación estándar mancomunada (ver la sección 2.3.3.2):

$$u_A(\Delta i_r) = s_p(\bar{i}_{xe}) \quad [\Delta i_r \sim N(v_p = JK - 1)] \quad \text{ecuación 105}$$

Si las mediciones de i_m son estacionarias e independientes, la incertidumbre estándar se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 99:

$$u_c(i_m) = + \left[\sum_{l=1}^5 u^2(\Delta i_{DAQl}) \right]^{0,5} \quad \text{ecuación 106}$$

2.5.4 La calibración estacionaria

2.5.4.1 La verificación del sistema de adquisición de datos

Si se considera que la exactitud de la presión manométrica medida por el transmisor de corriente según la ecuación 88 depende de la incertidumbre de la medición de la corriente eléctrica CD, es prudente verificar²² periódicamente el desempeño del sistema de adquisición de datos, según las tolerancias del fabricante. En este sentido, el sistema de adquisición de datos es una “caja negra” a la que se aplica señales analógicas de exactitud conocida, provenientes de una fuente de corriente eléctrica CD, y se obtiene como salida registros digitalizados, sin importar los detalles de su funcionamiento. Aunque el sistema de adquisición de datos se haya calibrado como parte de un sistema de medida de presión [31], en el proyecto se verifica su desempeño metrológico por comparación directa con una fuente de corriente eléctrica que funciona como patrón de referencia.

Al respecto, existen precedentes de aplicar este enfoque [32], es decir, calibrar el miliamperímetro del sistema de adquisición de datos por simulación del transmisor de presión, con una fuente de corriente eléctrica CD.

Los límites del rango de verificación en corriente eléctrica CD se establecieron según los valores equivalentes en presión manométrica de los transmisores de presión utilizados:

- El aire a la presión atmosférica define el límite inferior: 4 mA (0 hPa).
- La presión del aire perturbado por la primera reflexión de la onda de choque define los siguientes valores del rango: 5,49 mA [193,05 hPa (2,80 psi)] y 6,67 mA [345,43 hPa (5,01 psi)] para los diafragmas de espesores 10,2 μm y 14,7 μm , respectivamente.

En este sentido, el certificado de calibración de la fuente de corriente eléctrica CD seleccionada reporta las correcciones para 4 mA y 12 mA.

Para verificar la linealidad del convertidor analógico/digital del sistema de adquisición de datos se introdujo el punto intermedio 8 mA, que corresponde a la presión manométrica 517,11 hPa (7,5 psi), cercana a la presión de la altura máxima del oleaje gravitacional: 4,22 m (7,27 mA) para la densidad del agua marina en el Océano Pacífico Central costarricense (ver la Tabla 6).

Los valores discretos de corriente eléctrica CD 4 mA, 8 mA y 12 mA son generados por la fuente de referencia corriente eléctrica CD [33] y aplicados de manera independiente a los canales del sistema de adquisición de datos.

²² La verificación es un término de calidad definido por ISO 9000 [30] pero debe ser interpretado en el ámbito de la calibración del sistema de adquisición de datos.

2.5.4.2 La verificación de la fuente de corriente eléctrica CD

En la verificación del desempeño metrológico del sistema de adquisición de datos, la incertidumbre que aporta la fuente patrón de corriente eléctrica CD, aunque controlada estadísticamente, es muy importante, porque define la trazabilidad metrológica de las mediciones de corriente eléctrica CD e indirectamente, la calidad de las mediciones de presión manométrica.

Como el período entre calibraciones externas de la fuente patrón de corriente eléctrica CD es bianual [33] es prudente verificar periódicamente su desempeño, según las tolerancias del propio fabricante, [33] por comparación directa con el miliamperímetro CD de un multímetro digital [34].

La verificación de la fuente patrón de corriente eléctrica CD se realiza en los mismos valores de corriente eléctrica CD de la verificación del sistema de adquisición de datos: 4 mA, 8 mA y 12 mA, que son generados por la misma fuente y aplicados al multímetro digital [34].

En el Anexo 1 se puede consultar el esquema de jerarquía de la trazabilidad metrológica de las mediciones de corriente eléctrica CD.

2.5.4.3 La verificación del transmisor de presión

La inexactitud de la medición de la presión manométrica del gas, según la ecuación 19 se cuantifica comparándola con la misma presión pero medida por un patrón, que es aceptada como “convencionalmente verdadera” [2] con una incertidumbre y trazabilidad metrológica establecida y reproducida estacionariamente en un generador de presión estacionaria (ver la sección 3.2).

El modelo matemático de la medición de la corriente eléctrica CD de salida de cada transmisor de presión está definido por la ecuación 107:

$$\bar{i}_{p(c)} = 0,5 \left[0,5 (i_{m_1} + i_{m_3})^{\uparrow} + i_{m_2}^{\downarrow} \right] \quad \text{ecuación 107}$$

Donde:

$\bar{i}_{p(c)}$: Promedio de corriente eléctrica CD de salida del patrón (p) o calibrando (c) [mA].

i_{m_1} e i_{m_3} : Corrientes eléctricas CD medidas en ascenso [mA].

i_{m_2} : Corriente eléctrica CD corregida en descenso [mA].

La presión manométrica del transmisor de presión patrón se calcula según la ecuación 108:

$$p_p = S_0 + S_1 \bar{i}_p + C_p \quad \text{ecuación 108}$$

Donde:

p_p : Presión manométrica corregida [Pa].

S_0 y S_1 : Coeficientes nominales de cero [Pa] y de sensibilidad estática [Pa · mA⁻¹] respectivamente (ver la sección 2.2.4).

i_m : Corriente eléctrica CD medida por el sistema de adquisición de datos [mA].

C_p : Corrección reportada en el certificado de calibración del patrón [Pa], corregida retrospectivamente al momento de la medición, según el procedimiento de la sección 2.4.2.

En el caso del calibrando el propósito es calcular los coeficientes de ajuste en régimen estacionario según la siguiente ecuación vectorial [23]:

$$\hat{S}_{P \times 1} = (i_c i_c^T)^{-1} i_c^T p_p \quad \text{ecuación 109}$$

Donde:

$\hat{S}_{P \times 1}$: Vector columna ($P \times 1$) de los coeficientes del polinomio de ajuste [Pa · mA⁻¹].

P : Número de parámetros del polinomio ajustado.

i_c : Matriz ($N \times P$) de los promedios de corriente eléctrica CD [mA].

N : Número de puntos de presión calibrados en el rango de operación del calibrando.

p_p : Vector columna ($N \times 1$) de los promedios de presión corregida del patrón [Pa].

Si el comportamiento del calibrando es lineal ($P = 2$), entonces la relación entre la presión ejercida por el fluido y la salida eléctrica del transmisor de presión está definida por la ecuación 110:

$$\hat{p}_c = \hat{S}_0 + \hat{S}_1 i_c \quad \text{ecuación 110}$$

Donde:

\hat{p}_c : Presión medida indirectamente por el calibrando después del ajuste [Pa].

\hat{S}_0, \hat{S}_1 : Coeficientes de ajuste, en [Pa] y [Pa · mA⁻¹] respectivamente.

Como resultado del ajuste, el calibrando medirá como el patrón de referencia, pero con una incertidumbre mayor; a partir de ese momento, la trazabilidad al SI comienza a tener sentido.

El modelo estadístico del error absoluto de calibración (e_c) se calcula según la ecuación 111:

$$e_{c_j} = \{(\hat{p}_c + \Delta p_c) - [(p_p + \Delta p_{p_t}) + (C_p + \Delta C_p)] + \Delta e_{corr}\}_j \quad \text{ecuación 111}$$

Donde:

\hat{p}_c : Presión manométrica ajustada del calibrando [Pa], calculada según la ecuación 110 [Pa].

Δp_c : Corrección resultante del efecto de las magnitudes influyentes en el calibrando [Pa].

p_p : Presión manométrica medida (no corregida) por el transmisor de presión patrón [Pa].

Δp_{p_t} : Corrección resultante del efecto de la temperatura en el patrón [Pa].

$$u_B(\Delta p_{p_t}) = c_t \Delta t / \sqrt{12} \quad [\Delta p_{p_t} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 112}$$

C_p : Corrección del certificado de calibración del transmisor de presión patrón [Pa], ajustada retrospectivamente al momento de la medición según el procedimiento de la sección 2.4.2.

ΔC_p : Inexactitud de la corrección reportada [Pa].

$$u_B(\Delta C_p) = U_p(C_p)/2 \quad [\Delta C_p \sim N(v_B = v_{ef})] \quad \text{ecuación 113}$$

Δe_{corr} : Corrección por correlación estadística de las medidas de los transmisores de presión [Pa].

j : Contador que define el punto de calibración evaluado ($j = 1; 2; \dots; N$).

La corrección resultante de los efectos de las magnitudes influyentes en el transmisor de presión calibrado, se calcula según la ecuación 114:

$$\Delta p_c = \sum_{l=1}^3 \Delta p_{c_l} = \Delta p_{c_H} + \Delta p_{c_r} + \Delta p_{c_t} + \Delta p_{c_a} \quad \text{ecuación 114}$$

Donde:

Δp_{c_H} : Corrección por histéresis [Pa].

$$u_A(\Delta p_{c_H}) = (i_{m_1} - i_{m_2}) S_1 / \sqrt{3} \quad [\Delta p_{c_H} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 115}$$

Δp_{c_r} : Corrección por repetibilidad [Pa].

$$u_A(\Delta p_{c_r}) = (i_{m_1} - i_{m_3}) S_1 / \sqrt{3} \quad [\Delta p_{c_r} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 116}$$

Δp_{c_t} : Corrección resultante del efecto de la temperatura en el calibrando [Pa].

$$u_B(\Delta p_{c_t}) = c_t \Delta t / \sqrt{12} \quad [\Delta p_{c_t} \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 117}$$

Δp_{c_a} : Corrección resultante del ajuste mínimo-cuadrático del calibrando [Pa].

$$u_A(\Delta p_{c_a}) = s(\hat{p}_c) \quad [\Delta p_{c_a} \sim RN(v_A = N - P)] \quad \text{ecuación 118}$$

Donde:

$s(\hat{p}_c)$: Error típico del ajuste [Pa] (ver la ecuación 60).

La corrección por correlación estadística (Δe_{corr}) se incluye en el modelo estadístico porque la calibración ocurre realmente en condiciones cuasi-estacionarias, no estacionarias, donde es razonable esperar la dependencia temporal entre las mediciones indirectas, simultáneas y sincronizadas, de la presión manométrica de ambos transmisores de presión: patrón y calibrando.

Las causas de la falta de independencia estadística entre las mediciones de presión manométrica con ambos transmisores de presión, están asociadas al uso de un mismo:

- Registrador digital, que al sincronizar las señales analógicas de corriente eléctrica CD depende de la estabilidad del oscilador de frecuencia del convertidor analógico/digital del sistema de adquisición de datos.
- Comparador isobárico, que no logra mantener el régimen estacionario por su pérdida de estanqueidad (ver la sección 3.2).

La correlación estadística (ver la ecuación 63) se podrá despreciar si su aporte estadístico a la incertidumbre estándar combinada del error de calibración, no es significativo.

La incertidumbre estándar por la correlación estadística se estima según la ecuación 119:

$$u(p_c; p_p)_j = 2 \frac{s(p_c; p_p)}{\sqrt{n}} = 2 s(\bar{p}_c; \bar{p}_p) \quad \text{ecuación 119}$$

Donde:

$s(p_c; p_p)$: Covarianza experimental [Pa^2].

Considerando la falta de independencia estadística, la incertidumbre estándar combinada del error absoluto de calibración del calibrando se calcula aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16], a la ecuación 120:

$$u_c(e_{c_j}) = + \sqrt{[u_c^2(\Delta p_c) + u^2(\Delta p_{p_t}) + u^2(\Delta C_p) + 2(\bar{p}_c; \bar{p}_p)]_j} \quad \text{ecuación 120}$$

Donde:

$u_c(e_{c_j})$: Incertidumbre estándar combinada del error de calibración [Pa].

Como el transmisor de presión patrón es el responsable de la trazabilidad metrológica [2] de las mediciones de presión manométrica estacionaria al SI en el rango de aplicación del proyecto (ver la sección 1.4), su comportamiento lineal debe verificarse periódicamente por comparación con un patrón de referencia, usualmente en las instalaciones del INM.

La verificación del desempeño del transmisor de presión calibrado con respecto a las tolerancias establecidas por su fabricante se basa en la primera aplicación de la incertidumbre expandida (ver sección 2.3.7), considerando que: $U_p(e_{c_j}) = \pm 2 u_c(e_{c_j})$ ($p \approx 95\%$) (ver la ecuación 66).

Si como resultado de la verificación se establece la no conformidad del transmisor de presión, según las tolerancias del fabricante, antes de tomar cualquier acción correctiva es necesario evaluar la competencia técnica del laboratorio para realizar la calibración, según los indicadores establecidos en la aplicación 2 de la sección 2.3.7.

La corrección de calibración (C_c) en cada punto calibrado, se calcula, según la ecuación 121:

$$C_c = -e_c \quad \text{ecuación 121}$$

La incertidumbre estándar combinada de la corrección de calibración del calibrando es igual a la del error absoluto de calibración:

$$u_c(C_{c_j}) = u_c(e_{c_j}) \quad \text{ecuación 122}$$

La corrección de la calibración es una herramienta matemática de ajuste para utilizar un transmisor de presión no conforme con las especificaciones del fabricante, siempre que se acepten los riesgos asociados, por ejemplo, a su inestabilidad a corto plazo.

En resumen, la calibración estacionaria del transmisor de presión constituye el **primer problema** a resolver en el desarrollo del patrón dinámico de presión en el rango de interés del proyecto.

2.5.5 La calibración dinámica

Los resultados de la calibración estacionaria, aunque permiten calcular la presión corregida del transmisor de presión según la sección 2.5.4, no son suficientes para caracterizar su comportamiento dinámico. Por ejemplo, ante una perturbación aperiódica tipo escalón unitario, la respuesta dinámica de un transmisor de presión (ver la sección 2.2.5) está compuesta por una función exponencial, que caracteriza el régimen transiente de la respuesta, y otra oscilatoria que tiende a ser estacionaria:

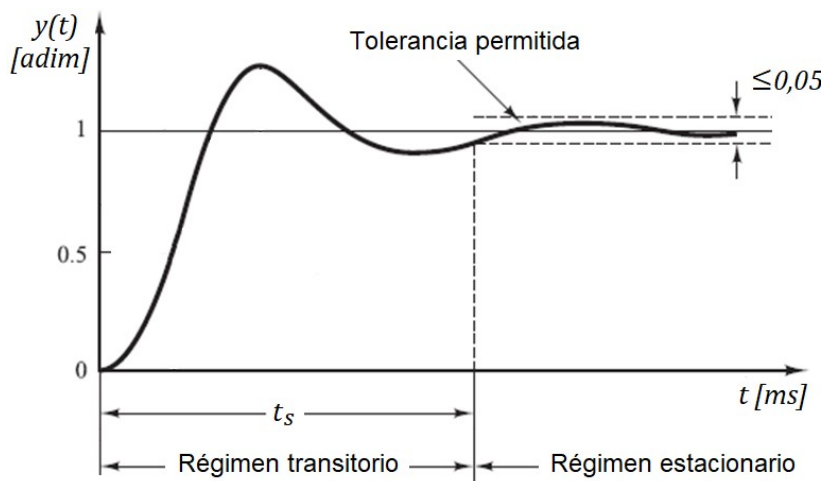


Gráfico 6. Régimenes de operación de un TP ante un salto unitario.

El régimen transitorio inicia cuando $t = 0$ s, y se extiende hasta $t = t_s$, cuando se torna oscilatorio y el tiempo t_s , denominado de asentamiento [5], es el tiempo requerido para que la curva de respuesta se encuentre entre $\pm 5\%$ del valor de la amplitud de la perturbación.

Si bien la literatura especializada [5] refiere varios parámetros para evaluar la respuesta dinámica de un transmisor de presión, es de interés para el presente proyecto determinar los coeficientes de su función de transferencia (ver la ecuación 15): ω_n y ζ .

Los parámetros de la función de transferencia se calculan cuando el transmisor de presión es sometido a una perturbación aperiódica tipo escalón de amplitud unitaria A_p : en este caso, a partir de la respuesta experimental en el dominio del tiempo; la tarea matemática es hallar la curva que mejor explique la distribución experimental con respecto a la ecuación de referencia (ecuación 22).

Aunque existen diferentes métodos para hallar la mejor curva, en el proyecto se utiliza el método numérico de Levenberg - Marquardt, basado en un algoritmo iterativo de aproximaciones que minimiza el residuo del ajuste, definido en el software de aplicación PTC mathcad.

Una vez estimados los valores de ω_n y ζ , entonces es matemáticamente posible calcular la respuesta en frecuencia del sistema de medida de presión para cualquier perturbación periódica.

A modo de demostración, considere un transmisor de presión subamortiguado ($\zeta = 0,1$; $\omega_n = 6,283$ s⁻¹) que responde “idealmente” según la ecuación 22 a un salto escalón unitario:

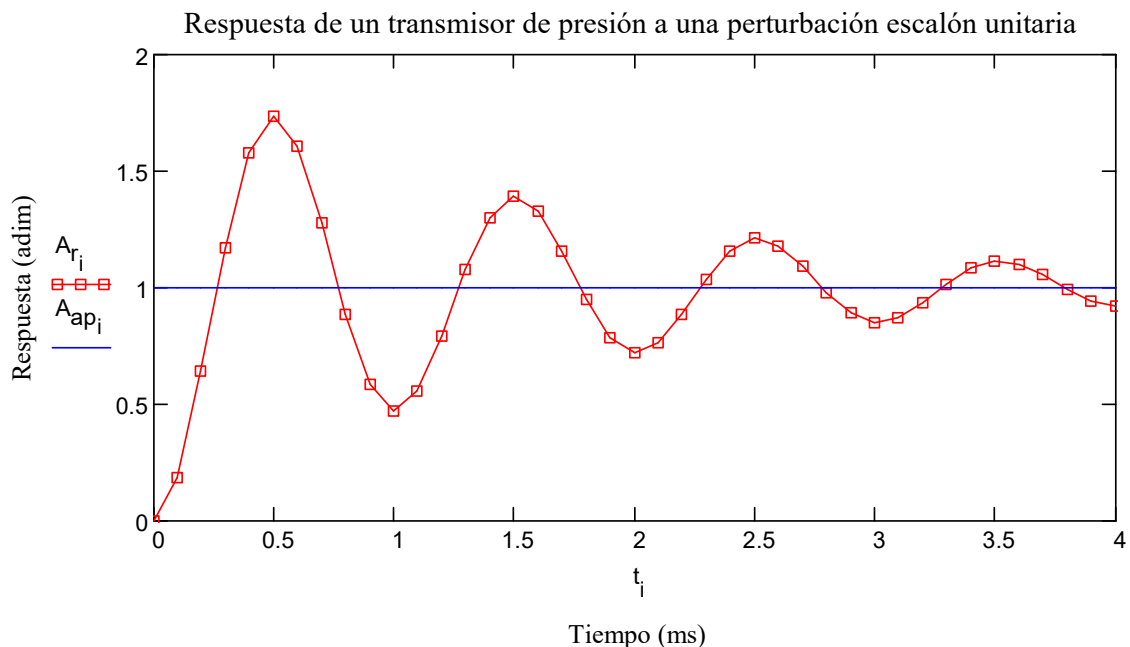


Gráfico 7. TP subamortiguado: respuesta transitoria “ideal”.

Como resultado de la aplicación del método de Levenberg-Marquardt se obtienen los valores ajustados de los parámetros $\hat{\zeta} = 0,1 = \zeta$ y $\hat{\omega}_n = 6,283 \text{ ms}^{-1} = \omega_n$ exactamente iguales²³ a los del transmisor de presión subamortiguado, como se aprecia en el Gráfico 8.

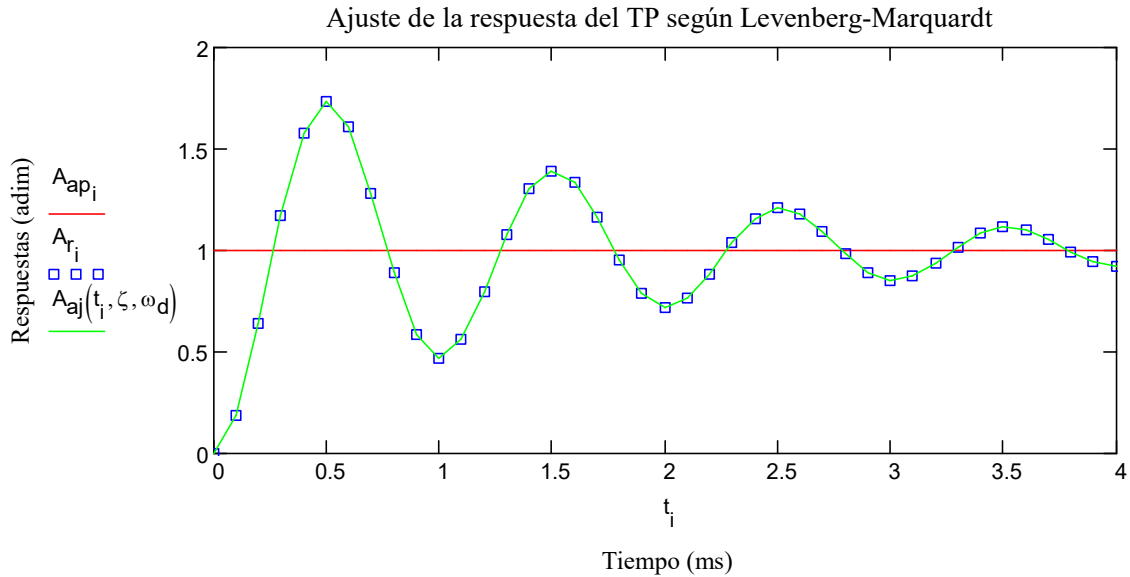


Gráfico 8. TP subamortiguado: ajuste según Levenberg-Marquardt.

La calibración dinámica del transmisor de presión cuando es sometido a una perturbación aperiódica constituye el **segundo problema** a resolver en el desarrollo del patrón dinámico de presión, en el rango de interés del proyecto.

Si el transmisor de presión subamortiguado evaluado es perturbado por una señal sinusoidal perfecta de amplitud unitaria y período dentro del rango del oleaje gravitacional, por ejemplo, $T_p = 11,21 \text{ s} \Rightarrow \omega_p \approx 0,5605 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, los parámetros de su respuesta en frecuencia son:

Tabla 11. TP subamortiguado: parámetros de la respuesta en frecuencia.

Parámetros	Símbolos	Valores	Referencias
Ganancia	M	1,000 000 <i>adim</i>	ecuación 26
Desfasaje	ϕ	-171 μs	ecuación 29

La calibración dinámica del transmisor de presión cuando es perturbado por una perturbación periódica, constituye el **tercer problema** a resolver en el desarrollo del patrón dinámico de presión en el rango de interés del proyecto.

²³ Cuando el resultado del método de Levenberg-Marquardt es convergente, el residuo del ajuste es cero.

2.6 Diseño experimental

El objetivo del diseño experimental es validar [2] el desempeño metrológico del patrón dinámico de presión en el alcance establecido en la sección 1.4, para demostrar objetivamente que los parámetros de desempeño de la calibración dinámica de los sistemas de medida de presión son adecuados para el uso previsto: determinar la presión dinámica de un evento de baja amplitud y frecuencia, como es el caso del oleaje gravitacional.

Si se considera que el patrón dinámico de presión es un sistema complejo de medida, la validación consta de las siguientes etapas:

Primera etapa: calcular las estadísticas que definen la calidad de los parámetros de desempeño de los generadores de presión estacionarios (ver la sección 3.2.2) o dinámicos de presión transiente (ver la sección 4.2.7) o periódicos (ver la sección 5.7), y así definir los prototipos de mejores desempeños.

Segunda etapa: calcular las estadísticas que definen la calidad de los parámetros de desempeño de los transductores de presión, según los modelos matemáticos establecidos para los regímenes estacionario (ver la sección 2.5.4.3) y dinámico (ver la sección 2.5.5).

Tercera etapa: reportar los parámetros de desempeño del patrón dinámico en un ambiente de precisión intermedia y trazabilidad metrológica, establecidos por validación.

La validación de cada parámetro de desempeño evaluado se basa en la cuantificación de las siguientes estadísticas:

- a) Precisión, en términos de repetibilidad (sección 2.3.3.1) y precisión intermedia (sección 2.3.3.2).
- b) Veracidad, por comparación de los valores experimentales con los esperados teóricamente.

Para evaluar la veracidad del parámetro de desempeño se calcula la desviación del valor experimental más probable con respecto al teórico predicho, si existe:

$$\delta(y) = \bar{y} - y_t \quad \text{ecuación 123}$$

Donde:

$\delta(y)$: Error absoluto, indicador estadístico de la veracidad [UM_y].

y_t : Valor teórico predicho [UM_y], que constituye la referencia aceptada como valor convencionalmente verdadero, si existe.

\bar{y} : Promedio mancomunado experimental según la ecuación 47.

La extensión de la validación depende de la existencia reportada de los parámetros de desempeño por otros laboratorios de reconocido prestigio en el campo de las mediciones dinámicas. Por ejemplo, en el caso del generador aperiódico basado en la tecnología del tubo de choque, es posible considerar todas las estadísticas en su validación, pero no es posible en el caso del periódico, considerando que no existen reportes de otro basado en su principio de funcionamiento.

En función de los resultados obtenidos, se declararía "in house" la condición de patrón de referencia de presión dinámica, que constituiría la mejor capacidad de medición y calibración en el alcance establecido. Seguidamente se muestran los principales problemas relacionados con el desarrollo del patrón dinámico de presión dinámica, y los resultados obtenidos de su solución en el alcance establecido del proyecto.

3 Las mediciones de presión en régimen estacionario: el primer problema

3.1 Generalidades

La determinación experimental de los coeficientes de ajuste \hat{S}_{Px1} del transmisor de presión (ver la ecuación 109) para las mediciones indirectas de la presión del fluido p_f , constituye el **primer problema** a resolver en el proyecto. Para su cálculo se requiere la evaluación metrológica de la respuesta eléctrica del transmisor de presión en un medio de comparación donde se reproduzcan estados de presión estáticos en el rango de interés.

Si bien la calibración estática de un transmisor de presión es un proceso normalizado de comparación directa, su realización en el ámbito del desarrollo de un patrón de presión dinámico es fundamental, porque permite establecer la trazabilidad metrológica al SI.

El principal reto del proyecto, en este sentido es la reproducción de ambientes estáticos de presión, que no se pueden lograr estrictamente por el efecto de la pérdida de estanqueidad del medio de comparación, que define su aproximación estacionaria.

3.2 El generador de presión estacionaria

El generador de presión estacionaria es una cámara sostenida por soportes (posición 1) a una mesa de trabajo rígida y horizontal (posición 2):

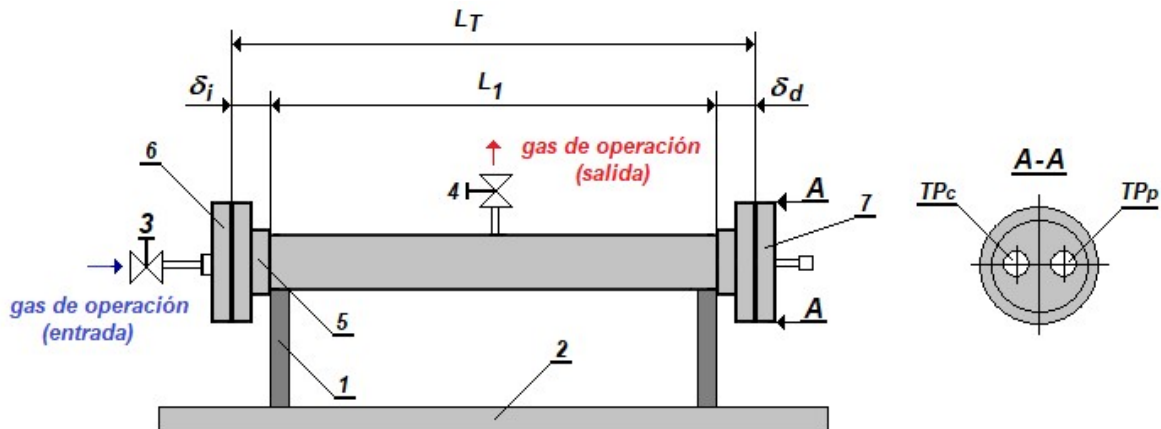


Figura 5. Generador de presión estacionaria: esquema simplificado.

Donde:

L_T : Longitud total de la cámara de medición [mm].

L_1 : Longitud del tubo expuesto, medido con una regla metálica rígida [mm].

δ_d y δ_i : Anchos de las bridas móviles derecha e izquierda, respectivamente [mm].

El fluido de operación, que puede ser aire limpio pero húmedo, proveniente del tanque de almacenamiento de un compresor recíprocante o aire seco de uso medicinal proveniente de un cilindro con una pureza $\leq 95\%$, fluye de manera controlada a través de la válvula reductora (3), instalada en la brida ciega (6), para establecer una secuencia lineal de presiones en ascenso.

La misma secuencia lineal de presiones, pero en descenso, se obtiene a través de la válvula de alivio (4), que descarga a la atmósfera, de manera que puede reproducirse un proceso continuo de ascenso-descenso-ascenso, en el rango de presión manométrica de interés.

Los valores de presión se miden simultáneamente con los transmisores de presión instalados en los puertos de medición T_{Pp} y T_{Pc} de la brida ciega (7): en el primer puerto de medición se instala el transmisor de presión patrón, mientras que el calibrando se instala en el segundo.

Las salidas analógicas de corriente eléctrica CD de ambos transmisores de presión se conectan independientemente en los puertos de medición de un sistema de adquisición de datos.

3.2.1 Requisitos de diseño

El generador estacionario de presión debe satisfacer los siguientes requisitos:

- Los puertos de medición deben garantizar que los sensores de ambos transductores de presión se encuentren en el mismo plano horizontal, para evitar el efecto de la densidad del aire en la diferencia de altura (ver sección A-A - Figura 5).
- La hermeticidad del sistema, para garantizar que el proceso de comparación entre ambos transmisores de presión transcurra en condiciones estacionarias [2], aunque en realidad existe una variación estocástica alrededor del valor de presión seleccionado por el efecto de la temperatura, y una tendencia a disminuir por la fuga del gas de operación en la cámara.

3.2.2 Parámetros de desempeño

Dado que el objetivo del generador de presión estacionario es reproducir ambientes de presión con variaciones mínimas e independientes del tiempo, entonces se validan los parámetros de desempeño definidos en la Tabla 12:

Tabla 12. Generador estacionario de presión: parámetros de desempeño.

Parámetros	Símbolos	UM	Presiones de ensayo [psi]
Estabilidad	$s(p_p)$	psi	0; 6 y 12
Independencia estadística	$s(i_p, i_c)$	psi ²	0; 6 y 12
Estanqueidad	E	psi/s	0; 6 y 12

Considerando que no existen criterios normalizados de los valores permitidos de estanqueidad [35, 36, 37], los resultados experimentales se vinculan con la covarianza experimental $u(i_m; i_p)$. Si las mediciones no son independientes, entonces la incertidumbre aumenta según la ecuación 63.

La estanqueidad del volumen del gas contenido en la cámara del generador estacionario de presión se calcula para la presión máxima del rango de interés según la ecuación 124:

$$E = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{MAX(p_i) - MIN(p_i)}{\Delta t} \quad \text{ecuación 124}$$

Donde:

p_i : Serie de mediciones de presión manométrica para la presión máxima del rango de interés.

Debido a que el valor de estanqueidad a la presión máxima de operación del generador estacionario de presión es un máximo, se induce razonablemente que, para valores de presión menores, las pérdidas de estanqueidad del sistema también serán menores.

Si la pérdida de estanqueidad es despreciable ($E \rightarrow 0$), entonces las presiones de calibración reproducidas son estacionarias, y el peso estadístico de la covarianza [$s(i_p; i_m)$] también es despreciable. En caso contrario, el proceso se trata como cuasi-estacionario, lo que incrementaría la incertidumbre estándar por el efecto de la correlación según la ecuación 63.

3.2.3 Desarrollo del prototipo GPE-01

El generador estacionario de presión desarrollado, denominado GPE-01 permite reproducir, de manera controlada, las presiones estacionarias en el rango de interés: desde 0 hasta 82,7 kPa (\approx 12 psi), para calibrar los transmisores de presión, según el procedimiento de la sección 2.5.4.3.

La cámara es un tubo de policloruro de vinilo (PVC) de diámetro nominal constante e igual a 76,2 mm (3 in)²⁴, cuyos extremos terminan en bridas móviles de espiga (posición 5).

Desde el punto de vista de seguridad se utilizó tubería PVC cédula 40, con un espesor mínimo de +0,66 mm (+0,026 in) que asegura una presión mínima de estallido de 5,79 MPa (840 psi) [38].

La longitud total de la cámara se calcula según la ecuación 125:

$$L_T = L_1 + \delta_d + \delta_i \quad \text{ecuación 125}$$

La incertidumbre de la longitud total de la cámara se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 125:

$$u_c(L_T) = +[u_c^2(L_1) + 2 u_c^2(\delta)]^{0,5} \quad \text{ecuación 126}$$

²⁴ El diámetro exterior efectivo equivalente es igual a (88,90 \pm 0,203) mm (3½ in) según ASTM D1785 – 15 [38].

Los resultados de las mediciones de los parámetros geométricos²⁵ del prototipo GPE-01 (ver la Figura 5) se muestran en la Tabla 13:

Tabla 13. Prototipo GPE-01: dimensiones de la cámara.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v_{ef}
Longitud entre bridas:	L_1	mm	313.03	0.29	9
Ancho de las bridas móviles:	2δ	mm	108.48	0.06	24
Longitud total de la cámara:	L_T	mm	421.51	0.30	10

Donde δ [mm] es el promedio del ancho de las bridas derecha e izquierda.

3.2.4 Configuración del proceso de medición y registro

Como no existen resultados previos, se seleccionó inicialmente como patrón de presión estacionario al transmisor de presión OMEGA PX4200-030GI n/s 56901 considerando la exactitud y estabilidad térmica reportadas por su fabricante [41], y así realizar la calibración estacionaria de los otros transmisores de presión por comparación directa (ver la sección 2.5.4.3).

La corriente eléctrica CD de salida de cada transmisor de presión es medida y registrada con el sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 [42], configurado según los siguientes criterios:

- Frecuencia de muestreo (f_m): seleccionada a través de la función "Sample rate".

Tabla 14. Selección de la frecuencia de muestreo.

Parámetros evaluados	Símbolo	UM	Valores
Frecuencia de muestreo	f_m	Hz	200
Tiempo por muestra	$(f_m)^{-1}$	ms/S	5

- Filtro digital: no se utiliza "ex professo" (función "Sample rate/Filter" desactivada), por lo tanto, los resultados están afectados por el ruido de fondo.
- Inicio del registro de las mediciones.

Tabla 15. Configuración del inicio del registro de mediciones.

Configuración	Referencia
Manual	Al considerar estable el proceso

²⁵ Los tramos rectos de los tubos se miden con la regla metálica rígida Starrett C635-1000 [39], y las dimensiones de las bridas, así como los orificios de los puertos de medición se miden con el calibrador Mitutoyo CD-6"-CSX [40].

- Fin del registro de las mediciones.

Tabla 16. Fin del registro de las mediciones.

Parámetros evaluados	Símbolo	UM	Valores
Tiempo de muestreo	t_m	s	30
Cantidad de muestras	N_m	S	6000

La estanqueidad del prototipo GPE-01 se evaluó manteniendo la presión de ensayo durante 1 min, que es el doble del tiempo de muestreo programado.

- Registro de los resultados de las mediciones: se “salvan” en archivos de extensión .xlsx, para su posterior exportación a los softwares de aplicación desarrollados, en función del proceso.

3.2.5 Validación del prototipo GPE-01

Los parámetros de desempeño del prototipo GPE-01 (ver la sección 3.2.2) se determinaron indirectamente durante la calibración estacionaria del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43], realizada el 20 de marzo del 2019, por comparación directa con el patrón OMEGA PX4200-030GI n/s 56901 [41] (ver más adelante la sección 3.3).

Los transmisores de presión se instalaron en los puertos de medición T_{Pp} y T_{Pc} del prototipo GPE-01, y se conectaron a los canales 1 y 2 respectivamente, del sistema de adquisición de datos (DAQ) HBM MX Quantum MX440B n/s 0009E5008567 [42]:

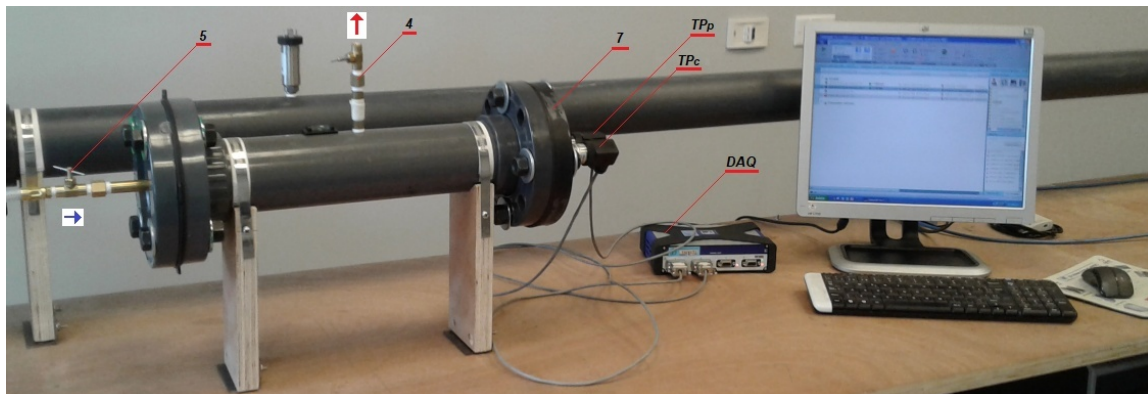


Figura 6. Prototipo GPE-01: vista general del sistema de medida de presión estacionaria.

Se aseguró que los transmisores de presión estuviesen instalados, uno a la par del otro, en la brida ciega, paralelos y a una distancia mínima restringida por sus respectivos diámetros:

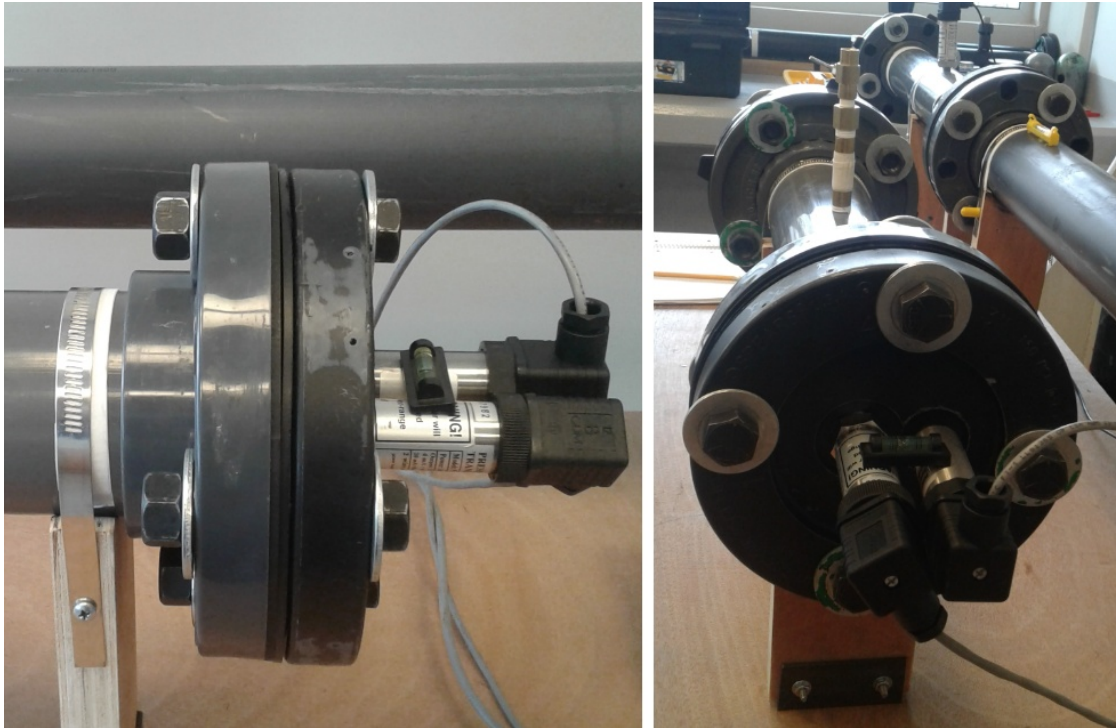


Figura 7. Prototipo del GPE: instalación de los transmisores de presión.

En la Tabla 17 se reportan los resultados de las mediciones asociadas a los transmisores de presión para cada presión nominal de prueba (p_{cal}), en ascenso, descenso y ascenso, registradas de manera sincronizada y simultánea por los canales 1 y 2 del sistema de adquisición de datos:

Tabla 17. Prototipo GPE-01: promedios de las mediciones de corriente eléctrica CD.

i	$P_{cal\ i}$	$i_{cal\ i}$	Registro de medición	Fecha/hora	$i_{p\ i}$	$s(i_{p\ i})$	$i_{c\ i}$	$s(i_{c\ i})$	η_i	COV($i_{p,i}, i_c$)	COV(p_p, p_c)
	psi	mA			mA	μA	μA	S			
1	0	4	Job1_2019_03_20_14_25_40	20.03.19 14:25:10	4.05981	0.20	4.00011	1.59	6000	1.25E-08	4.41E-08
2	6	7.2	Job1_2019_03_20_14_25_40_002	20.03.19 14:36:03	7.66508	0.47	7.20182	1.42	6000	1.1E-07	3.88E-07
3	12	10.4	Job1_2019_03_20_14_25_40_003	20.03.19 14:40:20	11.23547	1.07	10.40297	1.44	6000	-5.1E-08	-1.78E-07
4	12	10.4	Job1_2019_03_20_14_25_40_008	20.03.19 14:52:09	11.26186	1.10	10.42521	2.03	6000	1.1E-06	3.83E-06
5	6	7.2	Job1_2019_03_20_14_25_40_009	20.03.19 14:53:59	7.67822	0.40	7.21041	1.54	6000	-1.4E-07	-4.86E-07
6	0	4	Job1_2019_03_20_14_25_40_010	20.03.19 14:55:38	4.04845	0.17	4.00005	1.57	5997	-5.8E-08	-2.05E-07
7	6	7.2	Job1_2019_03_20_14_25_40_011	20.03.19 14:58:53	7.66742	0.20	7.20539	1.59	5998	-7.5E-08	-2.63E-07
8	12	10.4	Job1_2019_03_20_14_25_40_012	20.03.19 15:01:10	11.22362	1.53	10.39789	1.53	5997	2.8E-06	9.70E-06

A continuación se detallan los cálculos de los parámetros de desempeño del prototipo GEP-01:

a) Estabilidad.

La Tabla 18 muestra los resultados relacionados con el cálculo de la estabilidad de cada j -ésima presión reproducida en la cámara del prototipo GPE-01, estimados a partir de las desviaciones estándares de las n_j mediciones de corriente eléctrica CD.

Las desviaciones estándares de las j -ésimas muestras son un buen estimador de la variabilidad de las mediciones de corriente eléctrica CD, en condiciones de repetibilidad.

Tabla 18. Prototipo GPE-01: estabilidad de las series de mediciones.

j =	$p_{cal j}$	$i_{cal j}$	$i_{p j}$	$MAX[s(i_p)]_j$	$MAX[s(p_p)]_j$	
	psi	mA	mA	μA	psi	Pa
1	0	4	4.0541	0.20	3.8E-04	2.65
2	6	7.2	7.6722	0.47	8.8E-04	6.05
3	12	10.4	11.2457	1.53	2.9E-03	19.83

Para expresar las desviaciones estándares de las j -ésimas muestras en presión se utilizó el coeficiente de sensibilidad nominal de los transmisores de presión del proyecto:

$$s(p_p) = S_{1_{nom}} s(i_p) \quad \text{ecuación 127}$$

Donde:

$s(i_p)$: Desviación estándar de la muestra de corriente eléctrica CD del TP patrón [mA].

$$S_{1_{nom}} = 1,875 \text{ psi} \cdot \text{mA}^{-1}$$

La estabilidad del prototipo GEP-01 como parámetro de desempeño se estimó como el máximo de las desviaciones estándares de las j -ésimas muestras:

$$s(i)_{MAX} = 3,21 \mu A \Leftrightarrow s(p)_{MAX} = 0,006 \text{ psi}$$

b) Independencia estadística

La independencia estadística permite definir el comportamiento estacionario de la presión en la cámara del prototipo GPE-01, al estimar la independencia estadística entre las mediciones simultáneas de corriente eléctrica CD generadas por los transmisores de presión y medidas por el sistema de adquisición de datos.

La independencia estadística de los j -ésimas pares de series de corriente eléctrica CD se estimó por sus covarianzas.

En la Tabla 19 se muestran los resultados de los cálculos:

Tabla 19. Prototipo GPE-01: correlación estadística de cada j-ésima serie de mediciones.

j =	$p_{cal j}$	$i_{cal j}$	$i_{p j}$	$i_{c j}$	$MAX[s(i_p, i_c)_j]$	$MAX[s(p_p, p_c)_j]$	
	psi	mA	mA	mA	μA^2	psi ²	Pa ²
1	0	4	4.0541	4.0001	0.0125	2.4E-05	2.1
2	6	7.2	7.6722	7.2070	0.1103	2.1E-04	18.4
3	12	10.4	11.2457	10.4128	2.7597	5.2E-03	461.2

De la Tabla 19 se aprecia que la covarianza:

- Es mínima en $p_{cal} = 0 \text{ psi}$ porque la válvula está abierta y los sensores de ambos transmisores de presión están expuestos a la presión atmosférica, que no varía prácticamente durante el tiempo de medición.
- Aumenta cuando que la presión de evaluación se incrementa, alcanzando el máximo en $p_{cal} = 12 \text{ psi}$, que es el doble de la presión máxima de interés del proyecto (ver la Tabla 6).

La covarianza de las 6 000 mediciones simultáneas de corriente eléctrica CD de ambos transmisores de presión, indica que las mediciones son afectadas por una variable común a ambos, pero que no está considerada en el modelo matemático de la medida.

La variable común podría ser:

- El efecto de la desincronización de los canales de medida del sistema de adquisición de datos.
- Las pérdidas del gas de operación por falta de estanqueidad del prototipo GPE-01 validado.

Independientemente de la causa, es evidente que para presiones manométricas $p_c \leq 6 \text{ psi}$, que es el rango de interés del proyecto (ver la Tabla 6), la correlación puede ser considerada moderada, sin embargo, su importancia depende de su peso estadístico en la verificación del transmisor de presión, y debe ser considerada en su presupuesto de incertidumbre.

c) Estanqueidad

La estanqueidad es el parámetro de desempeño del prototipo GEP-01, que probablemente es la principal causa de la pérdida de independencia estadística de las series de mediciones.

En la Tabla 20 se reportan los resultados de las mediciones de la estanqueidad de la cámara de medida del prototipo GPE-01:

Tabla 20. Prototipo GPE-01: estanqueidad de la cámara de medida.

Parámetro	Símbolo	UM	P _{cal} [psi]		
			0	6	12
Presión mínima	MIN	psi	0.09	5.99	11.98
Presión máxima	MAX	psi	0.11	6.03	12.06
Frecuencia de muestreo:	f _m	Hz	200	200	200
Tiempo de medición	T _m	s	30	30	30
Estabilidad	E	psi/min	0.05	0.07	0.15

Si bien la estanqueidad a la máxima presión de operación validada es máxima, es de interés la estanqueidad correspondiente a 6 *psi*, que es la presión máxima definida en el alcance del proyecto (ver la Tabla 6).

3.3 TP EXTECH PT30-SD: resultados de la calibración estacionaria

La calibración estacionaria del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43] se realizó el 20 de marzo del 2019 por comparación directa con el patrón de referencia estacionaria OMEGA PX4200-030GI n/s 56901 [41], en el volumen de trabajo del prototipo GPE-01 (ver la Figura 7), conectándose sus salidas analógicas de corriente eléctrica CD a los canales 1 y 2 respectivamente, del sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 [42].

En la Tabla 21 se reportan las condiciones promedio del aire ambiental²⁶ durante el proceso de calibración estacionaria:

Tabla 21. TP EXTECH PT30-SD: condiciones ambientales durante la validación.

Parámetro	UM	x _m	x _c	u _c (x)
Temperatura	°C	21.25	21.34	0.10
Humedad relativa	%	77.4%	75.07%	0.75%
Presión atmosférica	hPa	878.1	878.14	0.16

En la Tabla 22 se reporta el presupuesto de incertidumbre del error absoluto de calibración del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43]:

²⁶ Al inicio y al final de cada presión reproducida se miden las variables ambientales: temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, reportándose siempre sus valores medios corregidos retroactivamente, según el procedimiento indicado en la sección 2.4.2.

Las mediciones de las variables ambientales se realizan con el datalogger EXTECH SD-700 n/s Q774023 [44].

Tabla 22. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: presupuesto de incertidumbre.

p _c	e _c	x _i	u _i (x _i)	ν _i	c _i	u _i (e _c)		u _c (e _c)	
								psi	ν _{ef}
0.00	0.05	Δe _p	0.0170 psi	13	1	0.017 psi	0.53%	0.23	8
		Δe _c	0.2325 psi	8	-1	0.232 psi	99.47%		
		Δe _{corr}	0.0000 psi ²	5999	1	0.000 psi ²	0.00%		
					-1				
6.01	-0.40	Δe _p	0.0176 psi	14	1	0.018 psi	2.22%	0.12	8
		Δe _c	0.1165 psi	8	-1	0.116 psi	97.77%		
		Δe _{corr}	0.0000 psi ²	5999	1	0.000 psi ²	0.01%		
					-1				
12.02	-0.82	Δe _p	0.0182 psi	15	1	0.018 psi	2.38%	0.12	9
		Δe _c	0.1166 psi	8	-1	0.117 psi	97.48%		
		Δe _{corr}	0.0000 psi ²	5999	1	0.000 psi ²	0.14%		
					-1				

De la Tabla 22 se confirma que:

- El peso estadístico del sistema de medición patrón (2,38% máximo) es despreciable, en comparación con el peso estadístico del calibrando (97,48% máximo).

La razón es el pésimo comportamiento metrológico del transmisor de presión EXTECH PT30-SD con las variaciones de temperatura: $c_t = 2 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [43].

- El efecto de la correlación estadística entre las mediciones simultáneas de presión con ambos sistemas de medida es despreciable, confirmando el buen desempeño del prototipo GEP-01 desarrollado, referido en la sección 3.2.5.

En la Tabla 23 se reportan los resultados de la calibración estacionaria del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982:

Tabla 23. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración estacionaria.

p _c	e _c	u _c (e _c)	ν _{ef}	k _{5%} (ν _{ef})	± U _p (e _c)
					psi
0.000	0.05	0.261	8	2.31	0.60
6.003	-0.40	0.261	8	2.31	0.60
12.006	-0.82	0.262	8	2.31	0.60

En la Tabla 24 se reportan los resultados de la verificación del comportamiento estacionario del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43]:

Tabla 24. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la verificación estacionaria.

p _c	e _c	± U _p (e _c)	e _c ± U _p (e _c)		± EMP	Verificación
			psi	psi		
0.00	0.05	0.60	-0.55	0.65	0.3	No conforme
6.00	-0.40	0.60	-1.00	0.21	0.3	No conforme
12.01	-0.82	0.60	-1.43	-0.22	0.3	No conforme

La verificación demuestra que el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 no es conforme con los requisitos de exactitud referidos por el fabricante [43], lo que obliga a introducir las correcciones de sus indicaciones por interpolación lineal.

3.4 Verificación de la competencia técnica

La verificación de los resultados de la calibración del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43] genera una duda razonable sobre la competencia técnica de su realización.

En la Tabla 25 se reportan los valores de los parámetros de competencia técnica, definidos en la aplicación 2 de la incertidumbre expandida (ver la sección 2.3.7.2).

Tabla 25. Calibración estacionaria: verificación de la competencia técnica.

p _c	e _c	u _c (e _c)	u _{obj} (e _c)	Indicadores			
				IC _{calc}	IC _{req}	RE _{calc}	RE _{req}
0.00	0.05	0.261	0.10	7.83	≤ 1	0.005	≤ 0,33
6.00	-0.40	0.261	0.10	7.84		0.005	
12.01	-0.82	0.262	0.10	7.85		0.006	

Del análisis de los indicadores de competencia técnica se observa que:

- Los valores calculados del Índice de consistencia metrológica son mucho mayores que los requeridos: $\overline{IC}_{calc} \approx 7,84 \gg IC_{req} = 1$.
- Sin embargo, no sucede lo mismo con la relación de exactitudes, que es, en promedio, mucho menor que la requerida: $\overline{RE}_{cal} \approx 0,005 \ll RE_{req} = 0,33$.

Esta última condición demuestra que el efecto del sistema de medición patrón es despreciable, y puede confiarse en el desempeño de su función como patrón de referencia de presión manométrica estacionaria.

Esta conclusión es reconfirmada con el cálculo del error normalizado en el rango de interés:

Tabla 26. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: error normalizado de la calibración estacionaria.

j =	$p_{cal j}$	$i_{cal j}$	$\Delta e_{c j}$	$E_{N j}$	$E_{N req}$
	psi	mA	psi	adim	adim
1	0	4	0.030	0.03	≤ 1
2	6	7	0.432	0.51	
3	12	10	0.776	0.91	

Donde:

Δe_c : Diferencia entre los errores absolutos de calibración del calibrando.

$$\Delta e_c = ABS(e_{ce} - e_{cr}) \quad \text{ecuación 128}$$

Donde:

e_{ce} : Error absoluto de calibración calculado experimentalmente [psi].

e_{cr} : Error absoluto de calibración calculado corrigiendo retroactivamente las mediciones de presión manométrica del calibrando, según los resultados de la calibración externa [45].

El cumplimiento satisfactorio de los indicadores RE_{req} y E_N demuestran la competencia técnica para realizar las calibraciones estacionarias de los transmisores de presión en el rango de presión manométrica de interés del proyecto: desde -0,05 psi hasta 12,85 psi, con una incertidumbre expandida $U_p(p) = \pm 0,60 \text{ psi}$.

El esquema de jerarquía metrológica de las mediciones estacionarias de presión manométrica puede ser consultado en la Tabla A1-2 - Anexo 1.

4 Las mediciones de presión en régimen transitorio: el segundo problema

4.1 Generalidades

El cálculo experimental de los coeficientes ω_n y ζ de la **ecuación diferencial característica** (ver la ecuación 12) del transmisor de presión necesarios para medir la presión del fluido (p_f) ante una perturbación aperiódica tipo escalón, constituye el **segundo problema** a resolver en el proyecto.

Para su cálculo se requiere conocer la respuesta eléctrica del transmisor de presión en un medio de comparación, donde se reproduzca la perturbación aperiódica en el rango de interés.

La sustitución del enfoque de calibración estacionario, visto en el capítulo 3, por el de calibración dinámica, requiere del desarrollo de un generador de perturbaciones de presión para la "realización" de la definición de la presión dinámica [2]. En el proyecto, el término "realización" está referido a la reproducción de la presión dinámica no a partir de su definición sino mediante la construcción de "... un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico" [2].

4.2 El tubo de choque

4.2.1 Marco teórico

El tubo de choque es un generador de perturbaciones aperiódicas de presión tipo escalón, adecuado para evaluar el comportamiento del sistema de medida en régimen transitorio. Está compuesto por dos cámaras de sección transversal constante (D_t): la cámara de compresión de longitud L_{cc} , y la cámara de expansión de longitud L_{ce} , entre las que se instala un diafragma (lámina roja) ajustado entre las dos juntas de goma (láminas en azul) que al estallar por sobrepresión en la cámara de compresión produce la expansión de una onda choque.

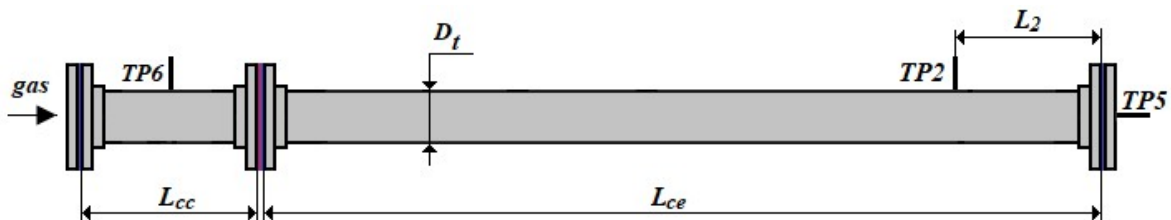


Figura 8. Tubo de choque: esquema simplificado.

Los procesos en el tubo de choque se describen en la Figura 9, donde el eje vertical representa la presión en un momento determinado y el horizontal, la longitud del tubo de choque [15].

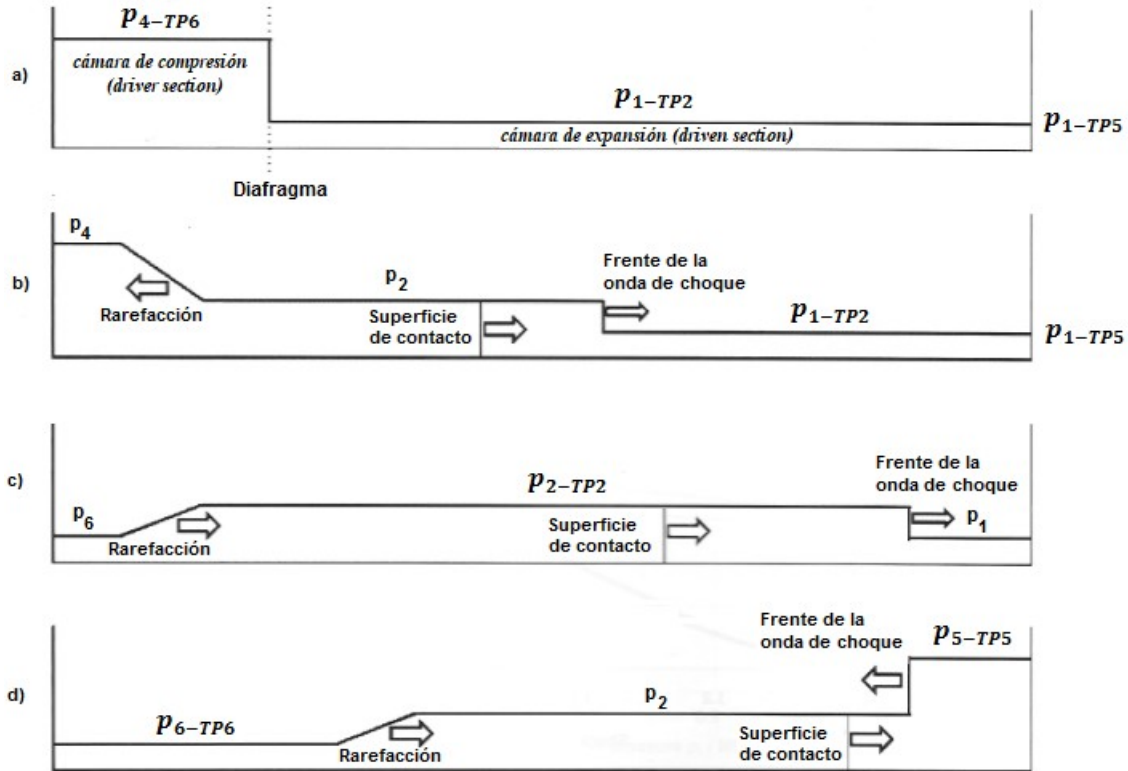


Figura 9. Tubo de choque: secuencia de los procesos en su interior.

Inicialmente, en la cámara de expansión se encuentra un gas en reposo a una presión aproximadamente igual a la atmosférica, mientras que en la cámara de compresión, la presión se incrementa de forma sostenida, introduciendo un gas desde una fuente de alta presión.

Los valores de la presión de los gases en las cámaras de compresión y expansión, instantes antes de vencer la resistencia mecánica del diafragma, se representan por p_4 y p_1 , respectivamente [Figura 9 a)] y se miden experimentalmente con transmisores de presión instalados en los puertos de medición TP6 y TP2, respectivamente (Figura 8).

Pasado el límite, el diafragma estalla y las ondas de choque producidas (de rarefacción “aguas arriba” del diafragma y de expansión “aguas abajo” en la cámara de expansión) se propagan más rápido que el gas (superficie de contacto) [Figura 9 b)] provocando una caída de presión en la cámara de compresión de p_4 a p_6 y un incremento de presión de p_1 a p_2 en la cámara de expansión [Figura 9 c)].

La reflexión del frente de la onda de choque en expansión en la superficie de la brida produce un incremento de presión de p_2 a p_5 [Figura 9 d)], caracterizado por un tiempo de estabilización durante el cual puede considerarse que la presión del gas es estable.

A continuación se describe el proceso de estimación teórica de los principales parámetros que caracterizan la expansión isentrópica del gas ideal en el tubo de choque.

4.2.2 Número de Mach

Si se considera que el gas²⁷ en la cámara de expansión (gas 2) se comporta como un gas ideal, entonces puede estimarse la velocidad del frente de la onda de choque con respecto a la velocidad del sonido a las condiciones termodinámicas del gas en reposo, utilizando el número de Mach según la ecuación 129 [15, 46, 47]:

$$M_s = a_s a_1^{-1} \quad \text{ecuación 129}$$

Donde:

a_s : Velocidad del frente de la onda de choque [$m \cdot s^{-1}$].

a_1 : Velocidad del sonido a las condiciones termodinámicas del gas en reposo [$m \cdot s^{-1}$].

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar del número de Mach de la onda de choque [48] se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 129:

$$u_c(M_s) = +\sqrt{[c_{a_s} u_c(a_s)]^2 + [c_{a_1} u_c(a_1)]^2} \quad \text{ecuación 130}$$

Donde:

c_{x_l} : Coeficientes de sensibilidad.

$$c_{a_s} = \frac{\partial M_s}{\partial a_s} = a_1^{-1} \quad [s \cdot m^{-1}] \quad \text{ecuación 131}$$

$$c_{a_1} = \frac{\partial M_s}{\partial a_1} = -a_s a_1^{-2} \quad [s \cdot m^{-1}] \quad \text{ecuación 132}$$

Seguidamente se expone el cálculo de las magnitudes influyentes en el número de Mach:

4.2.2.1 Velocidad del frente de la onda de choque

La velocidad del frente de la onda de choque se calcula según la ecuación 133:

$$a_s = L_2 \tau_2^{-1} \quad \text{ecuación 133}$$

Donde:

L_2 : Distancia medida entre los puertos de medición TP2 y TP5 [m] (ver la Figura 8).

τ_2 : Tiempo invertido por el frente de la onda de choque en recorrer L_2 [s].

²⁷ El comportamiento del gas en la cámara de compresión no es relevante en la teoría de la onda de choque para estimar las presiones del gas perturbado.

La magnitud L_2 se cuantifica experimentalmente según las dimensiones del prototipo de tubo de choque (ver la ecuación 189 y la ecuación 194) mientras que τ_2 se cuantifica experimentalmente según la configuración de los puertos de medición del prototipo de tubo de choque para detectar el paso del frente de la onda de choque (ver la ecuación 191 y la ecuación 196).

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar combinada de la velocidad del frente de la onda de choque se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 133:

$$u_c(a_s) = +\sqrt{[c_{L_2}u(L_2)]^2 + [c_{t_2}u(t_2)]^2} \quad \text{ecuación 134}$$

Donde:

c_x : Coeficientes de sensibilidad.

$$c_{L_2} = \frac{\partial a_s}{\partial L_2} = t_2^{-1} \quad [s^{-1}] \quad \text{ecuación 135}$$

$$c_{t_2} = \frac{\partial a_s}{\partial t_2} = -L_2 t_2^{-2} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad \text{ecuación 136}$$

4.2.2.2 Velocidad del sonido en el gas en reposo

La velocidad del sonido en el gas antes de ser perturbado por la onda de choque se calcula según la ecuación 137 [15, 46, 47]:

$$a_1 = [(\gamma_1 R T_1) M_g^{-1}]^{0,5} \quad \text{ecuación 137}$$

Donde:

γ_1 : Coeficiente isentrópico del gas a las condiciones termodinámicas, adimensional.

R : Constante molar del gas [$J/mol \cdot K$].

T_1 : Temperatura termodinámica del gas en reposo en la cámara de expansión [K].

M_g : Masa molar del gas en la cámara de expansión del tubo de choque [$g \cdot mol^{-1}$].

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar combinada de a_1 se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 137:

$$u_c(a_1) = +\sqrt{[c_{T_1}u(T_1)]^2 + [c_{\gamma_1}u(\gamma_1)]^2 + [c_R u(R)]^2 + [c_{M_g} u(M_g)]^2} \quad \text{ecuación 138}$$

Donde:

c_{x_i} : Coeficientes de sensibilidad.

$$c_{\gamma_1} = \frac{\partial a_1}{\partial \gamma_1} = \frac{R T_1 M_g^{-1}}{2a_1} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad \text{ecuación 139}$$

$$c_R = \frac{\partial a_1}{\partial R} = \frac{\gamma_1 T_1 M_g^{-1}}{2a_1} \quad [K \cdot 10^3 (mol \cdot kg^{-1}) \cdot (s \cdot m^{-1})] \quad \text{ecuación 140}$$

$$c_{T_1} = \frac{\partial a_1}{\partial T_1} = \frac{\gamma_1 R M_g^{-1}}{2a_1} \quad [10^3 (m \cdot s^{-1}) \cdot K^{-1}] \quad \text{ecuación 141}$$

$$c_{M_g} = \frac{\partial a_1}{\partial M_g} = -\frac{\gamma_1 R T_1 M_g^{-2}}{2a_1} \quad [(m \cdot s^{-1}) \cdot 10^6 (mol \cdot kg^{-1})] \quad \text{ecuación 142}$$

4.2.2.3 Temperatura termodinámica del aire en reposo

Cuando se instala el diafragma entre las cámaras de compresión y expansión queda retenido aire en equilibrio térmico con el aire ambiental del laboratorio. Considerando la brevedad de los procesos de estallido del diafragma y reflexión de la onda de choque, se acepta que el equilibrio térmico se mantiene, por tanto, la medición de la temperatura del aire retenido en la cámara de expansión se realiza al inicio y final de cada “disparo”, reportándose el promedio según la ecuación 143:

$$t_1 = \bar{t}_1 = 0,5 (t_{1in} + t_{1f}) \quad \text{ecuación 143}$$

Donde:

t_{1in} y t_{1f} : Valores de temperatura del aire ambiental inicial y final respectivamente [°C].

Considerando que la magnitud temperatura en las ecuaciones termodinámicas es absoluta, el modelo estadístico del valor de la temperatura del aire en reposo es el siguiente:

$$T_1 = 273,15 + [(t_a + \Delta t_d + \Delta t_r) + (C_t + \Delta C_t)] \quad \text{ecuación 144}$$

Donde:

t_a : Temperatura medida del aire ambiental [°C].

Δt_d : Corrección por el efecto de la resolución del indicador digital del termómetro [°C].

$$u_B(\Delta t_d) = d/\sqrt{12} \quad [\Delta t_d \sim RS(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 145}$$

Δt_r : Corrección por el efecto de la repetibilidad de las mediciones de temperatura [°C].

$$u_A(\Delta t_r) = s(\bar{t}_a) \quad [\Delta t_r \sim N(v_A = n - 1)] \quad \text{ecuación 146}$$

C_t : Corrección de la temperatura medida según el reporte de calibración [°C], ajustada de manera retroactiva al momento de la medición (ver la sección 2.4.2).

ΔC_t : Inexactitud de la corrección reportada [°C].

$$u_B(\Delta C_t) = U_{p \approx 95\%}(C_t)/2 \quad [\Delta C_t \sim N(v_B = 8)] \quad \text{ecuación 147}$$

La incertidumbre estándar de la temperatura del gas en reposo se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] al modelo estadístico definido por la ecuación 148:

$$u_c(T_1) = +[u_d^2(\Delta t_d) + u_r^2(\Delta t_r) + u_c^2(\Delta C_c)]^{0,5} \quad \text{ecuación 148}$$

4.2.2.4 Calor específico del gas a presión constante

Considerando que el gas en reposo en la cámara de expansión satisface la condición de gas ideal, el calor específico del gas a presión constante se calcula según la ecuación 149 [49]:

$$c_p = \sum_{i=0}^8 a_i \times \left(\frac{T_1}{1000}\right)^i \quad \text{ecuación 149}$$

Donde:

a_i : Coeficientes de ajuste del polinomio interpolador, según Rivkin [ver tabla - 49].

La calidad del ajuste del polinomio interpolador según la ecuación 149 no sobrepasa 0,5 %, es decir: $\Delta e_{aj} \leq 0,5 \%$

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar del calor específico a presión constante se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 149:

$$u_c(c_p) = +\sqrt{[c_{T_1} u_c(T_1)]^2 + u^2(\Delta e_{aj})} \quad \text{ecuación 150}$$

Donde:

$u_c(T_1)$: Incertidumbre estándar según la [°C].

$u(\Delta e_{aj})$: Incertidumbre estándar del error de ajuste [$J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$].

c_x : Coeficiente de sensibilidad.

$$c_{T_1} = \frac{\partial c_p}{\partial T_1} = \sum_{i=1}^8 i a_i \left(\frac{T_1}{1000}\right)^{i-1} \quad [J \cdot mol \cdot K^{-2}] \quad \text{ecuación 151}$$

4.2.2.5 Constante molar del gas.

El modelo estadístico del valor de la constante molar del gas, según CODATA versión 2010 [50], está definido por la ecuación 152:

$$R_c = R_{CODATA} + \Delta R_{inex} \quad \text{ecuación 152}$$

Según CODATA versión 2010 [ver Tabla XLI - 50]: $R_{CODATA} = 8,314\,462\,1(75) \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$

La incertidumbre estándar de la constante molar del gas según CODATA se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] al modelo estadístico definido por la ecuación 152:

$$u(R_c) = u(\Delta R_{inex}) \quad \text{ecuación 153}$$

Tabla 27. Presupuesto de incertidumbre: constante molar del gas.

R	Incertidumbre estándar						u _r (R)
	x _i	Valor	FDP	Divisor	u _c (x _i)	v _i	%
8.3144621	Δe _{inex}	7.50E-06 J/(mol·K)	RS	1.732	4.33E-06 J/(mol·K)	infinitos	0.0001%

4.2.2.6 Calor específico del gas a volumen constante

El calor específico del gas a volumen constante se calcula según la ecuación 154 [48]:

$$c_v = c_p - R \quad \text{ecuación 154}$$

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar del calor específico a volumen constante se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 154:

$$u_c(c_v) = +\sqrt{[c_p u_c(c_p)]^2 + [c_R u_c(R)]^2} \quad \text{ecuación 155}$$

Donde:

c_x : Coeficiente de sensibilidad.

$$c_{c_p} = \frac{\partial c_v}{\partial c_p} = 1 \quad [adim] \quad \text{ecuación 156}$$

$$c_R = \frac{\partial c_v}{\partial R} = -1 \quad [adim] \quad \text{ecuación 157}$$

4.2.2.7 Coeficiente isentrópico del gas

El coeficiente isentrópico del gas ideal se calcula según la ecuación 158 [15, 46, 47]:

$$\gamma_1 = c_p c_v^{-1} \quad \text{ecuación 158}$$

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar del coeficiente isentrópico del gas en reposo se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 158:

$$u_c(\gamma_1) = +\sqrt{[c_{c_p} u_c(c_p)]^2 + [c_{c_v} u_c(c_v)]^2} \quad \text{ecuación 159}$$

Donde:

c_x : Coeficiente de sensibilidad.

$$c_{c_p} = \frac{\partial \gamma_1}{\partial c_p} = c_v^{-1} \quad [(mol \cdot K)^{-1} \cdot J] \quad \text{ecuación 160}$$

$$c_{c_v} = \frac{\partial \gamma_1}{\partial c_v} = -c_p c_v^{-1} \quad [(mol \cdot K)^{-1} \cdot J] \quad \text{ecuación 161}$$

4.2.2.8 Masa molar del gas en reposo

En caso de que el gas en reposo sea aire seco, su masa molar se calcula según la ecuación 162 y depende de la masa molar de cada componente [51].

$$M_a = \frac{\sum_i (xM)_i}{\sum_i x_i} \quad \text{ecuación 162}$$

Donde:

x_i : Fracción molar del i-ésimo componente del aire seco [52].

Si las variables son independientes, la incertidumbre estándar de la masa molar del aire seco se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 162:

Tabla 28. Presupuesto de incertidumbre: masa molar de cada componente del aire.

M _i			Δx _i	Valor	FDP	Divisor	u _i (M _i)	v _i	c _i	u _i (M _i)
i	Gas	g/mol		adim			g/mol			g/mol
1	N ₂	28.01371	ΔM _{N2}	4.9E-04	RS	1.732	2.8E-04	8	2	5.7E-04
2	O ₂	31.99880	ΔM _{O2}	4.3E-04	RS	1.732	2.5E-04	8	2	4.9E-04
3	Ar	39.948	ΔM _{Ar}	1.0E-03	RS	1.732	5.8E-04	8	1	5.8E-04
4	CO ₂	44.00940	ΔM _{CO2}					8	1	7.5E-04
4.1			ΔM _{CO2(C)}	1.2E-03	RS	1.732	6.7E-04	8		
4.2			ΔM _{CO2(O2)}	4.3E-04	RS	1.732	2.5E-04	8	2	
5	H ₂	2.01595	ΔM _{H2}	1.6E-04	RS	1.732	9.0E-05	8	2	1.8E-04

Tabla 29. Presupuesto de incertidumbre: masa molar del aire.

M _{aire} kg/mol	Δx _i	u _i (x _i)	v _i	c _i		u _i (M _{aire})		u _c (M _{aire})		u _i (M _{aire})	
				mol/mol	%	g/mol	%	kg/mol	v _{ef}	%	
0.02897	ΔM _{aire} (N ₂)	5.7E-04	8	7.8E-01	4.4E-04	94.82%	4.5E-07	9	0.002%		
	ΔM _{aire} (O ₂)	4.9E-04	8	2.1E-01	1.0E-04	5.17%					
	ΔM _{aire} (Ar)	5.8E-04	8	9.3E-03	5.4E-06	0.01%					
	ΔM _{aire} (CO ₂)	7.5E-04	8	4.0E-04	3.0E-07	0.00%					
	ΔM _{aire} (H ₂)	1.8E-04	8	5.0E-07	9.0E-11	0.00%					

Si el aire retenido en la cámara de expansión es húmedo, entonces su masa molar debe ser corregida por el efecto de la humedad [51]:

$$M_{ah} = M_a \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad \text{ecuación 163}$$

Donde:

M_{ah} : Masa molar del aire húmedo en la cámara de expansión del tubo de choque [$g \cdot mol^{-1}$].

x_v : Fracción molar del vapor de agua [adimensional]. Según [51]:

M_v : Masa molar del agua [$g \cdot mol^{-1}$]. Según [51]:

$$M_v = 18.015 \, 28(17) \, g \cdot mol^{-1}$$

La fracción molar del aire húmedo se calcula según la

$$x_v = HR_a f \frac{p_{sv}}{p_a} \quad \text{ecuación 164}$$

Donde:

HR_a : Humedad relativa del aire húmedo en la cámara de expansión del tubo de choque.

p_a : Presión del aire húmedo en reposo [Pa].

f : Factor de corrección. Según [51]:

$$f = \alpha + \beta p_a + \gamma t_a \quad \text{ecuación 165}$$

Tabla 30. Coeficientes de ajuste del factor de corrección.

α	β	γ
adim	Pa^{-1}	K^{-2}
1.00062	3.14E-08	5.60E-07

$p_{sv}(t)$: Presión de vapor de agua saturado. Según [51]:

$$p_{sv} = 1\text{Pa} \text{EXP}(AT^2 + BT + C + DT^{-1}) \quad \text{ecuación 166}$$

Tabla 31. Coeficientes de ajuste de la presión de saturación.

A	B	C	D
K^{-2}	K^{-1}	adim	K
1.24E-05	-1.91E-02	3.39E+01	-6.34E+03

Una medida de la desviación del comportamiento ideal del gas secado, pero con humedad remanente es el coeficiente de compresibilidad [50]:

$$Z = 1 - \frac{P_{at}}{T_a} [a_0 + a_1 t_a + a_2 t_a^2 + (b_0 + b_1 t_a) x_v + (c_0 + c_1 t_a) x_v^2] + \left(\frac{P_{at}}{T_a}\right)^2 (d + e x_v^2) \quad \text{ecuación 167}$$

Donde:

Z: Coeficiente de compresibilidad [adim].

Tabla 32. Coeficientes del polinomio de ajuste del factor de compresibilidad.

a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	c_0	c_1	d	e
$\text{K}\cdot\text{Pa}^{-1}$	Pa^{-1}	$\text{K}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$	$\text{K}\cdot\text{Pa}^{-1}$	Pa^{-1}	$\text{K}\cdot\text{Pa}^{-1}$	Pa^{-1}	$\text{K}^2\cdot\text{Pa}^{-2}$	$\text{K}^2\cdot\text{Pa}^{-2}$
1.581E-06	-2.933E-08	1.104E-10	5.707E-06	-2.051E-08	1.990E-04	-2.376E-06	1.830E-11	-7.650E-09

4.2.3 Presión teórica del gas perturbado por el paso de la onda de choque

Si el gas en la cámara de expansión del tubo de choque se comporta como un gas ideal, es posible predecir la presión del gas perturbado en la cámara de expansión al paso de la onda de choque en expansión por el puerto de medición TP2 (ver la Figura 8) según la ecuación 168 [15, 46, 47]:

$$P_{2t} = P_{1e} \left[1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} (M_s^2 - 1) \right] \quad \text{ecuación 168}$$

Donde:

P_{2t} : Presión absoluta teórica del gas perturbado al paso de la onda de choque [hPa].

P_{1e} : Presión absoluta del gas no perturbado, calculada previamente según la ecuación 92 [hPa].

γ_1 : Coeficiente isentrópico del gas [adim], calculado previamente según la ecuación 158.

M_s : Número de Mach [adim], calculado previamente según la ecuación 129.

Si P_{2t} se mantiene constante durante el “tiempo de estabilización”²⁸ hasta la llegada de la onda de choque resultante de las reflexiones de las ondas de rarefacción o expansión, según aplique [15, 46, 47]; el proceso es estacionario e independiente y su incertidumbre estándar se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 168:

$$u_c(P_{2t}) = +\sqrt{[c_{P_1} u_c(P_1)]^2 + [c_{\gamma_1} u_c(\gamma_1)]^2 + [c_{M_s} u_c(M_s)]^2} \quad \text{ecuación 169}$$

Donde:

$u_c(P_1)$: Incertidumbre estándar combinada de P_1 [hPa], estimada según la ecuación 93.

$u_c(\gamma_1)$: Incertidumbre estándar combinada de γ_1 [adim], estimada según la ecuación 159.

$u_c(M_s)$: Incertidumbre estándar combinada de M_s [adim], estimada según la ecuación 130.

c_{x_i} : Coeficientes de sensibilidad.

$$c_{P_1} = \frac{\partial P_{2t}}{\partial P_1} = \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} (M_s^2 - 1) \quad [\text{adim}] \quad \text{ecuación 170}$$

$$c_{\gamma_1} = \frac{\partial P_{2t}}{\partial \gamma_1} = P_1 \frac{(M_s^2 - 1)}{(\gamma_1 + 1)^2} \quad [\text{hPa}] \quad \text{ecuación 171}$$

$$c_{M_s} = \frac{\partial P_{2t}}{\partial M_s} = P_1 \left(\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} \right) (2M_s) \quad [\text{hPa}] \quad \text{ecuación 172}$$

4.2.4 Presión teórica del gas perturbado por la reflexión de la onda de choque

Si el frente de la onda de choque en expansión se propaga a través de un gas ideal, es posible predecir teóricamente la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque en la brida final de la cámara de expansión según la ecuación 173 [15, 46, 47]:

$$P_{5t} = P_{2t} \frac{(\alpha_1 + 2)\alpha_2 - 1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad \text{ecuación 173}$$

Donde:

²⁸ La literatura lo refiere usualmente por el inglés “dwell time”.

P_{5t} : Presión absoluta teórica del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque en la brida final de la cámara de expansión [hPa].

α_1 y α_2 : Variables auxiliares.

La variable auxiliar α_1 se calcula según la ecuación 174 [15, 46, 47]:

$$\alpha_1 = (\gamma_1 + 1)(\gamma_1 - 1)^{-1} \quad \text{ecuación 174}$$

La incertidumbre estándar de la variable auxiliar α_1 se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 174:

$$u_c(\alpha_1) = c_{\gamma_1} u(\gamma_1) \quad \text{ecuación 175}$$

Donde:

$u(\gamma_1)$: Incertidumbre estándar de γ_1 estimada previamente según la ecuación 159.

c_{γ_1} : Coeficiente de sensibilidad [adim]. Se calcula según la ecuación 176:

$$c_{\gamma_1} = \frac{\partial \alpha_1}{\partial \gamma_1} = \frac{-2}{(\gamma_1 - 1)^2} \quad \text{ecuación 176}$$

La variable auxiliar α_2 se calcula según la ecuación 177:

$$\alpha_2 = P_{2t} P_{1e}^{-1} \quad \text{ecuación 177}$$

La incertidumbre estándar de la variable auxiliar α_2 se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 177:

$$u_c(\alpha_2) = +\sqrt{[c_{P_2} u_c(P_{2t})]^2 + [c_{P_1} u_c(P_1)]^2} \quad \text{ecuación 178}$$

Donde:

$u_c(P_{2t})$ y $u_c(P_1)$: Incertidumbres estándares de P_{2t} y P_1 [hPa], estimadas según la ecuación 169 y la ecuación 93 respectivamente.

c_{x_1} : Coeficientes de sensibilidad:

$$c_{P_2} = \frac{\partial \alpha_2}{\partial P_{2t}} = \frac{1}{P_1} \quad [hPa^{-1}] \quad \text{ecuación 179}$$

$$c_{P_1} = \frac{\partial \alpha_2}{\partial P_1} = -\frac{P_{2t}}{P_1^2} \quad [hPa^{-1}] \quad \text{ecuación 180}$$

Al igual que P_{2t} , la presión P_{5t} se mantiene constante durante el llamado “tiempo de estabilización”²⁸, hasta la llegada del frente de la onda de choque resultante de la reflexión de la onda de expansión [15, 46, 47], por tanto, su incertidumbre estándar puede ser estimada aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 173:

$$u_c(P_{5t}) = +\sqrt{[c_{P_2}u_c(P_2)]^2 + [c_{\alpha_1}u_c(\alpha_1)]^2 + [c_{\alpha_2}u_c(\alpha_2)]^2} \quad \text{ecuación 181}$$

Donde:

c_{x_i} : Coeficientes de sensibilidad.

$$c_{P_2} = \frac{\partial P_{5t}}{\partial P_2} = \frac{(\alpha_1 + 2)\alpha_2 - 1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad [adim] \quad \text{ecuación 182}$$

$$c_{\alpha_1} = \frac{\partial P_{5t}}{\partial \alpha_1} = P_{2t} \frac{(-\alpha_2^2 + 2\alpha_2 - 1)^2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2} \quad [hPa] \quad \text{ecuación 183}$$

$$c_{\alpha_2} = \frac{\partial P_{5t}}{\partial \alpha_2} = P_{2t} \frac{-(\alpha_1 + 1)^2}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2} \quad [hPa] \quad \text{ecuación 184}$$

4.2.5 Requisitos de diseño

Para generar una perturbación aperiódica de duración razonable que permita reconocer los eventos en el tubo de choque, la literatura consultada recomienda satisfacer los siguientes:

Requisitos dimensionales:

- Longitud de la cámara de expansión. Aunque no existe una relación teórica para su determinación, la experiencia muestra que debe ser al menos diez veces mayor que el diámetro de la sección transversal, es decir, $L_{ce} \geq 10 D_t$ [15].
- Diámetro de la sección transversal. Su selección depende de los diámetros de los transmisores de presión, sin embargo, es recomendable que $D_t \geq 50,8 \text{ mm}$ [15].
- Longitud de la cámara de compresión. La literatura consultada no refiere valores específicos, pero sugiere que debe ser lo suficientemente larga para evitar que la onda de rarefacción supere a la onda de choque, antes de que pase por el puerto de medición TP2 (ver la Figura 8).

Para evitarlo, debe atenderse a la relación entre las presiones iniciales de los gases en las cámaras de compresión y expansión del tubo de choque.

Si la relación de presiones se refiere al puerto de medición TP5 (ver la Figura 8), el “tiempo de estabilización” máximo se alcanza cuando la relación de longitud de la cámara de compresión-expansión es tal que la rarefacción reflejada, la superficie de contacto y la primera reflexión, alcanzan el mismo punto en el mismo instante.

Requisitos de operación

a) Antivibratorios

Considerando que los transmisores de presión son sensibles a la vibración mecánica, es deseable minimizarla construyendo un tubo de choque de forma solidaria y rígida. Por ejemplo, el tubo de choque del NBS construido en 1963 [15], pesó 680,4 kg (\approx 1 500 lb), con un espesor de pared mínimo igual a 19,05 mm (3/4 in).

b) Alineación de los tubos

El desalineamiento de los tubos provoca la distorsión del frente de la onda de choque al no desplazarse verticalmente a sus superficies internas. En general se especifica que la distorsión longitudinal se debe evitar especialmente, con una tolerancia de 0,088 9 mm (0,035 in) en una tubería de 304,8 mm (12 in) de longitud [15].

c) Rugosidad de los tubos

La rugosidad de la superficie interna de los tubos debe seleccionarse dentro de tolerancias dimensionales razonables, en vez de intentar su rectificación mecánica [15].

4.2.6 Estado del arte

Actualmente un grupo de institutos nacionales de metrología: NPL [46, 47], NIST [53] y LMD-ENSAM [54], reportan el uso del tubo de choque para calibrar dinámicamente los transductores de presión, sin embargo, el NPL es el único que reporta la descripción detallada de su prototipo:

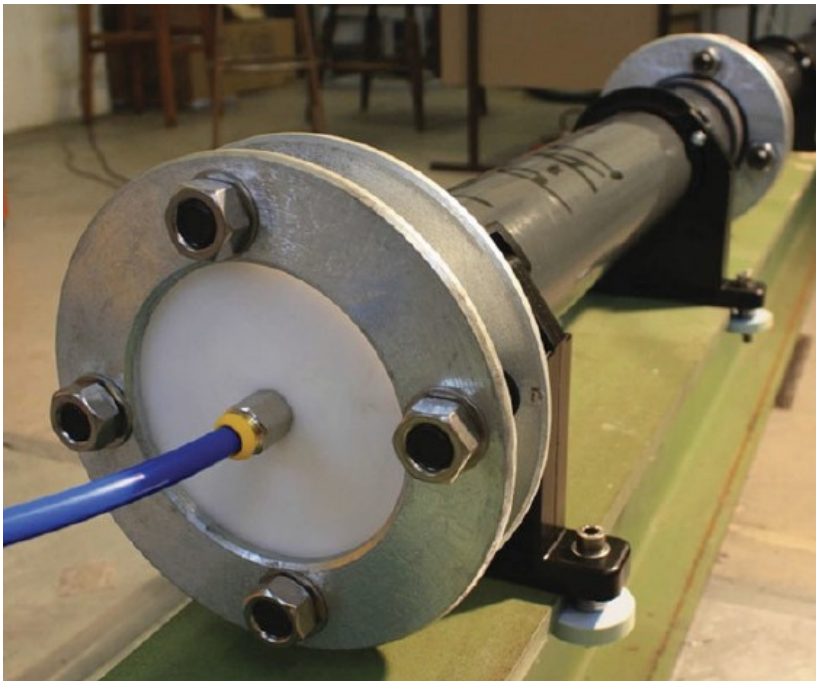


Figura 10. NPL: prototipo del tubo de choque de 1,4 MPa (203,0 psi).

El prototipo desarrollado por el NPL difiere de los diseños convencionales en el material utilizado: PVC, más barato y liviano que el acero, permitiendo que su sección más larga (cámara de expansión), pueda ser manipulada por un solo hombre. En los extremos de los tubos, cortados a la longitud deseada, se pegan las bridas móviles plásticas que, a través de cuatro tornillos de acero, permiten el acople de las secciones, y también la instalación de las bridas ciegas [46, 47].

El prototipo de tubo de choque del NPL permite para una misma cámara de compresión, conformar hasta tres opciones uniendo cámaras de compresión de diferentes longitudes (ver la Tabla 33).

Con respecto a la seguridad de operación, el NPL [46, 47], es el único que reporta explícitamente cuáles son sus presiones máximas de operación y de seguridad: 1,4 MPa (203,0 psi) y 1,5 MPa (217,6 psi) respectivamente. En este último caso, su valor depende de los materiales de los tubos y de los accesorios del tubo de choque como las bridas y los tornillos de acople.

La empresa norteamericana PCB Piezotronics ha desarrollado el tubo de choque modelo 901A02 [55], referido explícitamente en el clásico taller que sobre Mediciones de temperatura y presión en régimen transiente se desarrolló entre el 23 y 24 de abril de 1991, bajo los auspicios del NIST [56]. Actualmente, su tubo de choque es un prototipo comercializado como 9901C [57]:



Figura 11. PCB Piezotronics: tubo de choque modelo 9901C.

Los Departamentos de Energética y de Ingeniería Aeroespacial del Politécnico de Milano [58], han diseñado y construido un tubo de choque de baja energía, con la particularidad de que la cámara de expansión está abierta a la atmósfera.

En la Tabla 33 se reportan los materiales y las dimensiones de los tubos de choque del NPL [46, 47], PCB Piezotronics [57] y el Politécnico de Milano [58].

Tabla 33. Tubo de choque. Materiales y dimensiones reportadas.

Parámetros	Símbolos	UM	NPL	NIST	P. de Milano	PCB
Material	N.A	N.A	PVC	Acero	Plexiglass	N.R
Diámetro interior	d_i	mm	75	63.5	80	50
		in	2.95	2.50	3.15	1.97
Espesor del tubo	δ	mm	6.5	N.R	5	N.R
		in	0.26		0.20	
Longitud de la cámara de compresión	L_{cc}	m	0.7	N.R	1.5	0.305
Longitud de la cámara de expansión	L_{ce}	m	2	7	5 (extremo abierto)	1.829
			4			
			6			

El enfoque del LMD-ENSAM es diferente [54]: construyó una serie de tubos de choque de diferentes dimensiones para cubrir el rango de presiones desde 8 kPa (1,2 psi) hasta 1,4 MPa (rango de frecuencias: desde 110 Hz hasta 1 MHz).

En general, los prototipos de tubo de choque reportados han sido diseñados y construidos para producir poderosas ondas de choque desde el punto de vista energético, por lo que requieren de altas presiones en sus cámaras de compresión.

Tabla 34. Tubo de choque. Presiones de reflexión (p_5) de la onda de choque.

Parámetros	Símbolos	UM	NPL	NIST	LMD-ENSAM	P. de Milano	PCB
Presión mínima	p_{5_min}	MPa	0.8	N.R	0.008	N.R	6.6
		psi	116.0		1.2		957.2
Presión máxima	p_{5_max}	MPa	1.4	20.0	20.0	0.13	7.2
		psi	203.1	2900.8	2900.8	19.1	1044.3

Para generar la onda de choque, existen dos mecanismos de ruptura del diafragma:

- Por sobrepresión, basado en el incremento rápido de la presión del gas en la cámara de compresión, hasta que estalla el diafragma.
- Por percusión, donde un mecanismo provoca, de manera controlada, la ruptura del diafragma.

Crede [59] recomienda utilizar un mecanismo de ruptura por percusión a bajas presiones porque la reproducibilidad de la presión de ruptura es muy dependiente de la homogeneidad del diafragma, mientras que para grandes presiones de operación, recomienda el mecanismo por sobrepresión.

Sin embargo, no reporta los resultados comparativos de la mejora de la reproducibilidad experimental de la presión de estallido del diafragma al utilizar uno u otro método.

Al respecto, el Politécnico de Milano [58], cuyo prototipo de tubo de choque es de baja presión (ver la Tabla 34), refiere el uso de "... diafragmas que estallan bajo una diferencia de presión dada, evitando usar un sistema de ruptura, por ejemplo, una cuchilla de corte".

Para reproducir las presiones de estallido, las referencias consultadas reportan el uso de juegos de diafragmas de naturaleza y espesor diferentes, generalmente reforzados o sujetos a un marco para evitar su deformación en el estallido y garantizar la hermeticidad del acople entre las secciones del tubo de choque.

El NBS utilizó diafragmas de acetato de celulosa de espesor nominal igual a 5,08 mm (0,02 in), capaces de reproducir un diferencial de presión por lámina aproximadamente igual a 0,6 MPa (80 psi), utilizando una capa adicional para reducir la probabilidad de ruptura prematura [15].

El Politécnico de Milano [58] reporta el reforzamiento del diafragma para reducir su deformación, con cuatro láminas de aluminio del lado de alta presión, mientras que utiliza un disco monohoradado metálico de 1 mm de espesor del lado de baja presión, para imponer un diámetro de abertura (d) específico durante el "disparo", en el siguiente rango:

$$(40 < d < 60) \text{ mm} \Leftrightarrow (0,5 < d/D < 0,75)$$

El NPL [38] reporta el uso de dos diafragmas de latón de espesores 0,05 mm y 0,1 mm, cada uno soportado por dos anillos de acero de 6 mm de grosor, con ranuras de junta tórica en ambas caras.

El fabricante PCB es el único que reporta detalladamente para su modelo comercial 9901C [57], la relación entre las características de los diafragmas y las diferentes presiones dentro del tubo de choque, según la naturaleza del gas en la cámara de compresión:

Tabla 35. PCB modelo 9901C. Características del diafragma y presiones.

Parámetros	Símbolos	UM	Espesores de diafragma (δ_D) [mm]					
			1,6	1	0,8	0,8	0,3	0,01
Material	N.A	N.A	Al	Al	Al	Al	Mylar ^{N1}	Mylar
Gas de cámara de compresión	N.A	N.A	He	He	He	N ₂	N ₂	Aire
Presión de ruptura	p_6	MPa	9.7	6.1	5.2	5.2	1.6	0.05
		psi	1406.9	884.7	754.2	754.2	232.1	7.3
Presión incidente	p_2	MPa	1.2	1.0	0.9	0.4	0.2	0.02
		psi	174.0	145.0	130.5	58.0	29.0	2.9
Presión reflejada	p_5	MPa	7.2	5.4	4.8	1.7	0.8	0.05
		psi	1044.3	783.2	696.2	246.6	116.0	7.3

N1. Mylar es la marca registrada de un tipo de plástico.

La información de la Tabla 35 es muy importante para el proyecto considerando que, en el prototipo de tubo de choque desarrollado, por razones del alcance previsto, se instalan como diafragmas láminas comerciales de aluminio de 0,010 2 y 0,014 7 mm de espesor.

4.2.7 Parámetros de desempeño

La estimación de los coeficientes de la **ecuación diferencial característica** (ecuación 12) del transmisor de presión, según la teoría de la onda de choque normal, requiere establecer mediante validación los siguientes parámetros de desempeño del prototipo de tubo de choque:

Tabla 36. Número de Mach: parámetros de desempeño.

Parámetros de desempeño	Símbolo	UM
Longitud recorrida por la onda de choque	L_2	mm
Tiempo de recorrido de la onda de choque	$\Delta\tau_2$	ms
Velocidad del sonido en el gas en reposo	a_1	m/s
Velocidad del frente de la onda de choque	a_s	m/s
Número de Mach	M_s	adim

Tabla 37. Presión en el puerto de medición TP2: parámetros de desempeño.

Parámetros de desempeño	Símbolo	UM
Presión experimental del gas en reposo en la cámara de expansión (TP2)	P_{1e}	hPa
Presión teórica del gas perturbado según la teoría de la onda de choque normal (expansión isentrópica)	P_{2t}	hPa
Presión experimental del gas perturbado por el paso del frente de la onda de choque en expansión (TP2)	P_{2e}	hPa
Veracidad de la presión medida P_{2e}	$\delta(P_2)$	%

Tabla 38. Presión en el puerto de medición TP5: parámetros de desempeño.

Parámetros de desempeño	Símbolo	UM
Presión experimental del gas (aire húmedo) en reposo en la cámara de expansión (TP5)	P_{1e}	hPa
Presión teórica del gas perturbado según la teoría de la onda de choque normal (expansión isoentrópica)	P_{5t}	hPa
Presión experimental del gas perturbado por la 1. reflexión del frente de la onda de choque (TP5)	P_{5e}	hPa
Veracidad de la presión medida P_{5e}	$\delta(P_5)$	%

Tabla 39. Tiempo: parámetros de desempeño.

Parámetros de desempeño	Símbolo	UM
Tiempo de respuesta	$\Delta\tau_{15}$	ms
Tiempo de estabilización	$\Delta\tau_5$	ms

4.3 El prototipo TC-01-(0.4/2)

4.3.1 Diseño y construcción

El primer prototipo desarrollado del generador aperiódico de presión se basó en la tecnología del tubo de choque y consideró los requisitos de diseño establecidos en la sección 4.2.5. Se designó como TC-01-(0.4/2) y los objetivos de su desarrollo se enfocaron a:

- Identificar los hitos de los procesos que ocurren en el interior del tubo de choque, descritos en la sección 4.2.1, relacionados con el estallido de un diafragma y los posteriores procesos de compresión / expansión de las ondas de rarefacción y choque, respectivamente.
- Evaluar la capacidad de detección del sistema de medición, tanto del sistema de adquisición de datos tanto en términos de frecuencia de muestreo, como de los transmisores de presión por el efecto de sus cámaras de medida.

A diferencia de la cámara del generador estacionario de presión (ver la sección 3.2.3), los tubos del prototipo son cédula 80 [38], generando un margen de seguridad con respecto a las presiones máximas del proyecto (sección 1.4), previendo aplicaciones futuras de mayor amplitud de presión.

Las dimensiones de la cámara de compresión del prototipo se muestran en la Figura 12:

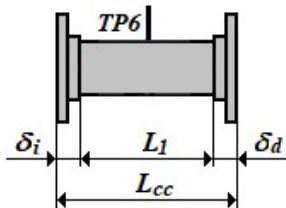


Figura 12. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de compresión.

La longitud total de la cámara de compresión se calcula según la ecuación 185:

$$L_{cc} = L_1 + 2\delta \quad \text{ecuación 185}$$

Donde:

L_1 : Longitud entre las bridas móviles del tubo [mm].

2δ : Ancho promedio de las bridas móviles de espiga [mm].

La incertidumbre estándar combinada de la longitud total de las cámaras de compresión se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 185:

$$u_c(L_{cc}) = +[u_c^2(L_1) + 2 u_c^2(\delta)]^{0,5} \quad \text{ecuación 186}$$

Los resultados de las mediciones de los parámetros geométricos²⁵ del prototipo de la cámara de compresión se muestran en la Tabla 40:

Tabla 40. Prototipo TC-01-(0.4/2): dimensiones de la cámara de compresión.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v_{ef}
Longitud entre bridas:	L_1	mm	313.0	0.29	9
Ancho de las bridas móviles:	2δ	mm	109.97	0.06	24
Longitud total de la cámara:	L_{CC}	mm	423.00	0.30	10

Las dimensiones de la cámara de expansión del prototipo se muestran en la Figura 13:

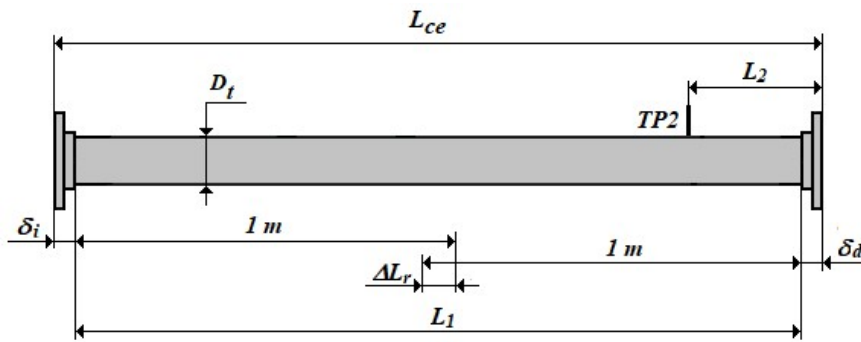


Figura 13. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.

El procedimiento de medición de las dimensiones de la cámara de expansión es el siguiente:

- La longitud total de la cámara de expansión se calcula según la ecuación 187:

$$L_{ce} = L_1 + 2\delta = 2(1\text{ m}) - \Delta L_r + 2\delta \quad \text{ecuación 187}$$

Donde:

L_1 y ΔL_r : Longitudes de la cámara de expansión [mm].

- La incertidumbre estándar de la longitud total de la cámara de expansión se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 187:

$$u_c(L_{ce}) = +[2u_c^2(1\text{ m}) + u_c^2(\Delta L_1) + 2u_c^2(\delta)]^{0,5} \quad \text{ecuación 188}$$

La Tabla 41 muestra los parámetros geométricos de la cámara de expansión:

Tabla 41. Prototipo TC-01-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v_{ef}
Longitud remanente:	ΔL_r	mm	96.5	0.29	9
Longitud entre bridas:	L_1	mm	1903.5	0.41	18
Ancho de las bridas móviles:	2δ	mm	109.97	0.06	24
Longitud total de la cámara:	L_{ce}	mm	2013.47	0.51	28

En la Figura 14 se representan las dimensiones entre los puertos de medición TP2 y TP5:

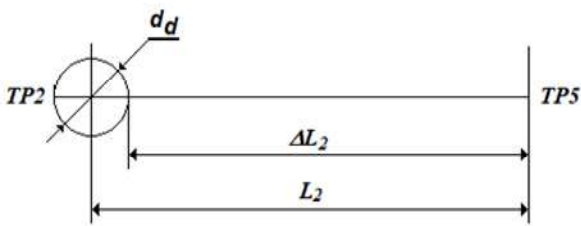


Figura 14. Prototipo TC-01-(0.4/2). Geometría entre los puertos de medición TP2 y TP5.

Donde:

L_2 : Distancia del centro del puerto de medición TP2 y la brida móvil [mm].

ΔL_2 : Distancia entre el borde interior del orificio de TP2-1 y la brida móvil [mm].

d_d : Diámetro del orificio del puerto de medición TP2 [mm].

La medición de L_2 de la cámara de expansión se realizó según el siguiente procedimiento:

- Se calcula la distancia entre el centro del orificio de TP2 y la brida móvil según la ecuación 189:

$$L_2 = \Delta L_2 + 0,5d_d \quad \text{ecuación 189}$$

- La incertidumbre estándar combinada de L_2 se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 189:

$$u_c(L_2) = +[u_c^2(\Delta L_2) + 0,5u_c^2(d)]^{0,5} \quad \text{ecuación 190}$$

Los resultados de las mediciones de la distancia entre TP2 y TP5 se muestran en la Tabla 42:

Tabla 42. Prototipo TC-02-(Lcc/Lce): distancia recorrida por la onda de choque.

Parámetros:	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v_y
Diámetro del orificio (TP2):	d_d	mm	12.50	0.10	9
Longitud entre el borde derecho del orificio y la brida ciega TP5:	ΔL_2	mm	348.5	0.29	9
Distancia entre el centro TP2 y TP5:	L_2	mm	354.75	0.31	11

El tiempo que el frente de la onda de choque recorre la distancia L_2 se calcula a partir de los tiempos de activación de las señales de los transmisores de presión instalados en TP2 y TP5:

$$\tau_2 = \tau_{TP5} - \tau_{TP2} \quad \text{ecuación 191}$$

Donde:

τ_2 : Tiempo de recorrido de la onda de choque entre los puertos de medición TP2 y TP5 [s].

τ_{TP5} : Tiempo de activación del transmisor de presión en TP5 [s].

τ_{TP2} : Tiempo de activación del transmisor de presión en TP2 [s].

El modelo estadístico asociado al tiempo de recorrido τ_2 está definido por la ecuación 192:

$$\tau_{2c} = \tau_2 + 2(\Delta\tau_d + \Delta\tau_{inex} + \Delta\tau_D) = \tau_2 + 2 \sum_{l=1}^3 \Delta\tau_{2l} \quad \text{ecuación 192}$$

Donde:

τ_{2c} : Tiempo de recorrido corregido [ms].

$\Delta\tau_d$: Corrección por resolución del tiempo medido [ms].

$\Delta\tau_{inex}$: Corrección por inexactitud del tiempo medido [ms].

$\Delta\tau_{osc}$: Corrección por deriva del oscilador [ms].

La incertidumbre estándar de la medición del tiempo de recorrido de la onda de choque se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 192:

$$u_c(\tau_{2c}) = + \left[\sum_{l=1}^3 2 u^2(\Delta\tau_{2l}) \right]^{0,5} \quad \text{ecuación 193}$$

En la Figura 15 se muestra el prototipo TC-01-(0.4/2) desarrollado en las instalaciones del LABCAL (Finca 3) entre **enero y octubre del 2016**.



Figura 15. Prototipo TC-01-(0.4/2). Vista general.

4.3.1.1 Selección inicial del transmisor de presión

Al simular la naturaleza del calibrando se dispuso de dos transmisores de presión de naturaleza similares: el OMEGA PX4200-030G [41] y el EXTECH PT30-SD [43], ambos con rangos de medida desde 0 hasta 2068,43 hPa (30 psi), salida eléctrica analógica desde 4 hasta 20 mA y sensores resistivos semiconductores y metálicos, respectivamente, instalados sobre membranas flexibles.

La selección inicial del transmisor de presión para medir la presión del gas perturbado (p_5) por la primera reflexión de la onda de choque se basó en el amortiguamiento de su respuesta. Según [60], siendo similares las longitudes de las cámaras de medición, el de mayor diámetro del tubo de conexión tendrá una respuesta menos amortiguada.

En la Tabla 43 se refieren los diámetros de los orificios del tubo de conexión y la profundidad de la cámara de medición de ambos transmisores de presión:

Tabla 43. Transmisores de presión: dimensiones medidas con el pie de rey.

Parámetros	Símbolo	UM	OMEGA PX4200-030G	EXTECH PT30-SD
Longitud de la cámara	L_T	mm	17.98	20.00
Diámetro del tubo de conexión	d_t	mm	4.07	1.75

Siendo el transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43], el de menor diámetro se seleccionó inicialmente para medir p_5 , instalándose en el puerto de medición TP5 del prototipo TC-01-(0.4/2); su confirmación como patrón secundario de presión dinámica dependerá de la validación.

Como no se dispone de todas las dimensiones, no es posible calcular los coeficientes de sus ecuaciones características, según la geometría de la cámara de medición del transmisor de presión [60], por lo tanto, se estimarán según la teoría de la onda de choque normal y el método numérico de Levenberg-Marquardt (ver la sección 2.5.5).

4.3.1.2 Configuración del proceso de registro y medición

La corriente eléctrica CD de salida de los transmisores de presión instalados en el prototipo TC-01-(0.4/2) se midieron y registraron de manera simultánea, independiente y sincronizada con el sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 [42], configurado según los siguientes criterios:

- Frecuencia de muestreo (f_m): seleccionada a través de la función “Sample rate”.

Tabla 44. Selección de la frecuencia de muestreo.

Parámetros evaluados	Símbolo	UM	Valores
Frecuencia de muestreo	f_m	KHz	4.8
Tiempo por muestra	$(f_m)^{-1}$	$\mu\text{s/S}$	208

- Filtro digital: no se utiliza “*ex professo*” (función “Sample rate/Filter” desactivada), por tanto, los resultados están afectados por el ruido de fondo.
- Inicio del registro de las mediciones.

Tabla 45. Configuración del inicio del registro de mediciones.

Configuración	Referencia
Por disparo (trigger)	Presión de estallido del diafragma

Es importante considerar que, para definir el valor de la presión de estallido del diafragma, se requiere de “disparos” previos para conocerla aproximadamente.

- Fin del registro de las mediciones.

Tabla 46. Configuración del fin del registro de las mediciones.

Parámetros evaluados	Configuración	Símbolo	UM	Valores
Tiempo de muestreo	Por tiempo	t_m	s	1
Cantidad de muestras	$N_m = f_{m1} \times t_m$	N_m	S	4800

- Registro de los resultados de las mediciones: se “salvan” en archivos de extensión .xlsx, para su posterior exportación a los softwares de aplicación desarrollados, según el proceso.

4.3.1.3 Procesamiento de las mediciones

Para demostrar cómo se identifican y cuantifican los hitos asociados a la ruptura del diafragma y posterior expansión de la onda de choque, se utilizan las mediciones del “disparo” realizado el 29 de junio del 2017, durante la validación del prototipo de tubo de choque TC-01-(0.4/2), con el transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] en el puerto de medición TP5.

Tabla 47. Prototipo TC-01-(0.4/2): trazabilidad de las mediciones.

Registros de medición:	2017_06_29_01_01
Fecha de medición:	17-06-29 Hora: 9:30:56
Lugar de mediciones:	LMD-LABCAL (Finca 3)

En la Tabla 48 se reportan las condiciones promedio del aire ambiental²⁶ durante la validación:

Tabla 48. TC-01-(0.4/2): condiciones ambientales.

Parámetro	UM	x_m	x_c	$u_c(x)$
Temperatura	°C	23.7	23.7	0.10
Humedad relativa	%	70.7%	69.7%	0.81%
Presión atmosférica	hPa	881.3	881.3	0.16

En el Gráfico 9 se muestran los resultados de las mediciones simultáneas de presión a partir del momento de inicio del registro de las mediciones por el sistema de adquisición de datos:

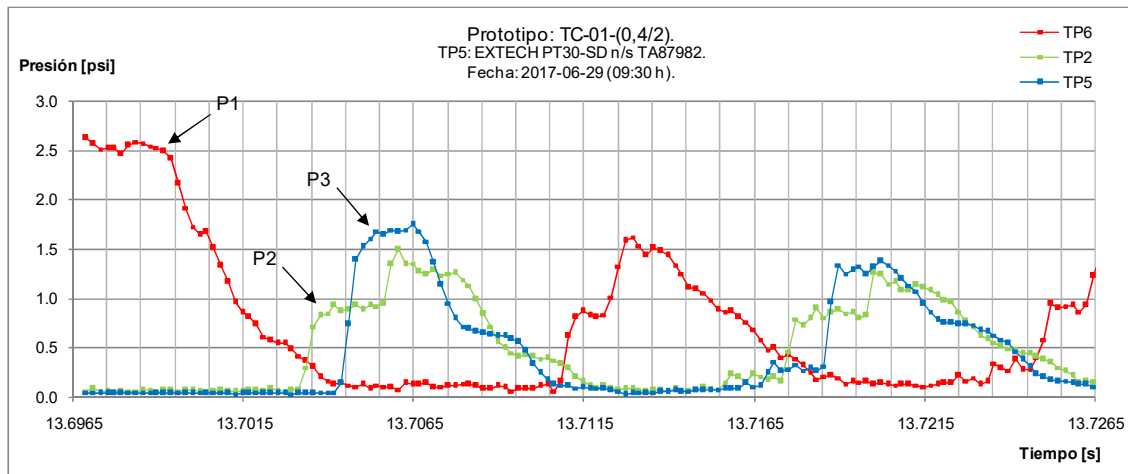


Gráfico 9. TC-01-(0.4/2). Eventos en el interior del prototipo.

En el Gráfico 9 se distinguen los siguientes procesos:

- El momento de la ruptura del diafragma (P1) y la primera y sucesivas reflexiones de la onda de rarefacción sobre la brida ciega al final de la cámara de compresión (línea “en rojo” de las mediciones del transmisor de presión instalado en el puerto de medición TP6).

- ☑ El paso del frente de la onda de choque (P2) por el puerto de medición TP2 (línea “en verde” de las mediciones del transmisor de presión instalado).
- ☑ La primera (P3) y sucesivas reflexiones de la onda de choque sobre la brida ciega al final de la cámara de expansión (línea “en azul” de las mediciones del transmisor de presión instalado en TP5), y la evidente atenuación de las amplitudes en presión por las pérdidas de energía.

De este enjambre de cientos de mediciones solo son de interés aquellas relacionadas con las primeras reflexiones de las ondas de rarefacción y de choque [ver la Figura 9 c) y d) respectivamente], que ocurren entre los 13,6967 s y 13,7066 s aproximadamente (ver el Gráfico 10). Es decir, en aproximadamente 10 ms ocurren todos los eventos de interés asociados a la ruptura del diafragma y las primeras reflexiones de las ondas de rarefacción y de choque, especialmente la primera reflexión de la onda de choque en la brida ciega del prototipo, identificada como la zona estable de presión entre los puntos P3 y P4.

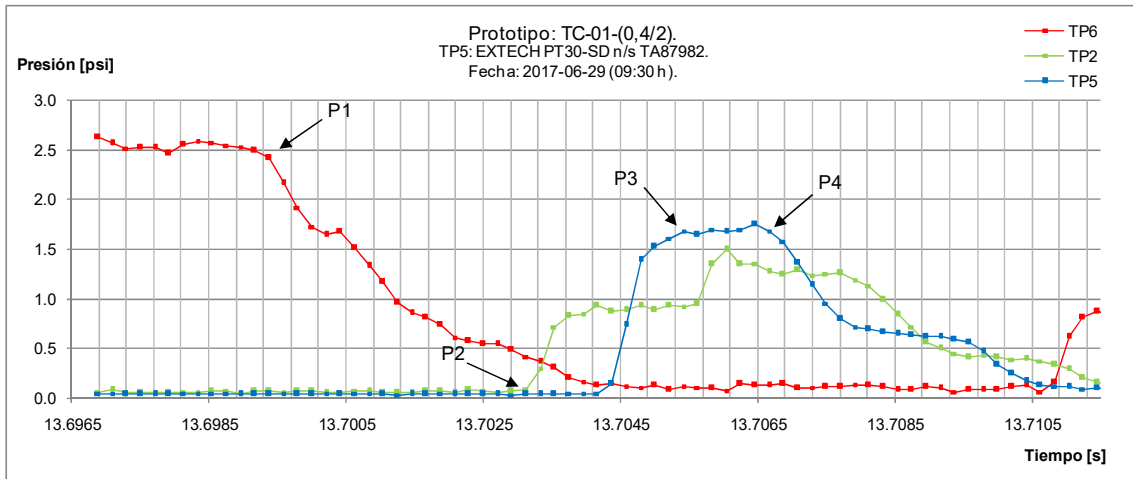


Gráfico 10. TC-01-(0.4/2). Primer acercamiento a los eventos en el interior del prototipo.

A continuación se muestran los procedimientos de cuantificación de los parámetros de interés (hitos) que nutren a la matriz de validación del prototipo de tubo de choque:

4.3.1.4 Estallido del diafragma y primera reflexión de la onda de rarefacción

En la Figura 16 se muestra la instalación del diafragma (1) utilizado en el prototipo TC-01-(0.4/2):

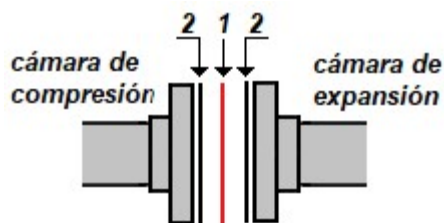


Figura 16. Colocación del diafragma en la posición 2 en el tubo de choque.

El diafragma es una lámina comercial de aluminio de espesor 10,2 μm designado Al1 e instalado entre dos juntas de goma (2) con orificios para su conexión por tornillos a las bridas móviles de las cámaras de compresión y expansión, que estalla de manera brusca y repentina por sobrepresión:



Figura 17. TC-01-(0.4/2). Junta de goma y diafragma estallado por sobrepresión.

Una vez concluido el proceso, el diafragma puede ser identificado unívocamente con la fecha y hora de la medición, de manera que pueda ser rastreado al registro de medición.

La caída de presión por el estallido del diafragma y el paso del frente de la onda de rarefacción generado, activan al sensor del transmisor de presión EXTECH PT300-SD n/s TA 87982 [43], instalado en el puerto de medición TP6, cuya respuesta se muestra en el Gráfico 11:

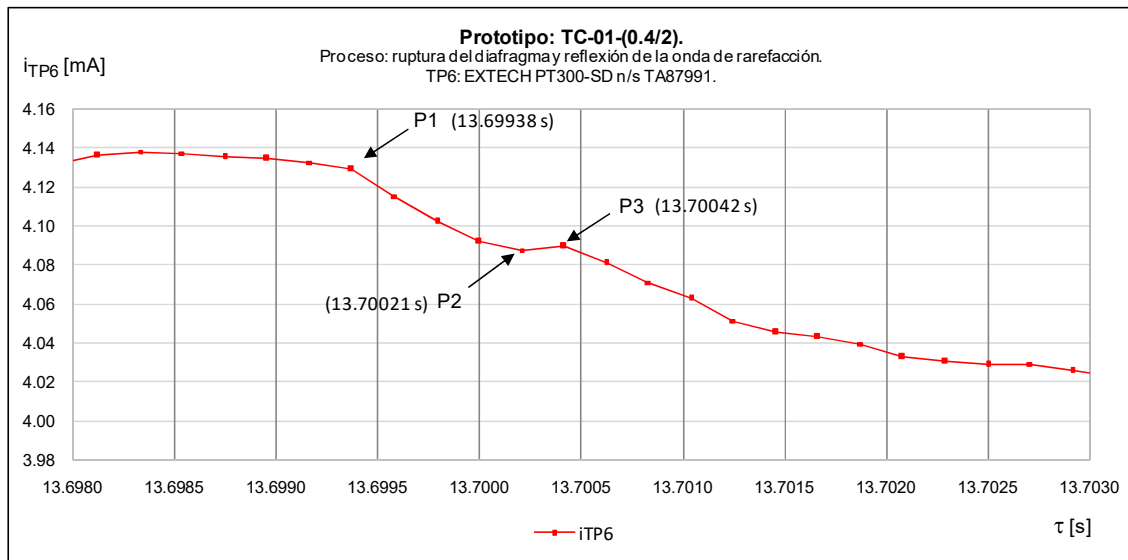


Gráfico 11. TC-01-(0.4/2): eventos en TP6.

En el Gráfico 11 se identifican los siguientes hitos experimentales:

- La presión del aire húmedo en reposo (p_{4e}), definida por las mediciones estacionarias en el puerto de medición TP6 antes del punto P1.

- ☑ El momento de la ruptura del diafragma por sobrepresión (P1): a partir de ese instante se “cae” la presión del aire húmedo en la cámara de compresión.
- ☑ La llegada del frente de la onda de rarefacción al puerto de medición TP6 (P2), activando el sensor del transmisor de presión instalado.
- ☑ La presión del aire perturbado en el tiempo de estabilización (p_{6e}), definida por la presión medida en TP6 entre los puntos P2 y P3.

La primera reflexión de la onda de rarefacción se caracteriza por un tiempo de estabilización de la presión p_6 (puntos P2 y P3), concordante con lo previsto teóricamente según la Figura 9 d).

La cuantificación de los hitos referidos se aprecia²⁹ en la Tabla 49:

Tabla 49. TC-01-(0.4/2). Cuantificación de los hitos en TP6.

Evento	Punto	s	mA
p_4 estable: ruptura del diafragma e inicia descenso desde p_4 hasta p_6	P1	13.69938	4.1287
Llega la onda de rarefacción a TP6: fin de descenso e inicio de estabilización de p_6	P2	13.70021	1.6398
Fin del período de estabilización de p_6	P3	13.70042	1.6758

En la Tabla 50 se reportan los parámetros del aire húmedo en reposo y perturbado en la cámara de expansión medidos por el transmisor de presión EXTECH PT300-SD n/s TA 87982 [43]:

Tabla 50. TC-01-(0.4/2). TP6: estadísticas del aire húmedo en reposo y perturbado.

i_4	$s(i_4)$	n_{i4}	p_{4e}	$\Delta\tau_{46}$	i_6	$s(i_6)$	n_{i6}	p_{6e}	$\Delta\tau_6$
mA	mA	S	psi	ms	mA	mA	S	psi	ms
4.1348	0.0029	13	2.53	0.833	4.0884	0.0014	2	1.66	0.208

La estabilización de la presión del gas p_6 entre los puntos P2 y P3 es un proceso interesante que induce a pensar en la posibilidad de utilizar el puerto de medición TP6 como referencia para la verificación dinámica de un transmisor de presión, sin embargo, no es posible establecer la perturbación como un salto de presión Δp_{46} porque p_4 no es estacionaria, sino que es una “rampa” asociada al incremento de presión para la ruptura del diafragma.

²⁹ Las celdas en “azul” son celdas de entrada de datos, y están desprotegidas

4.3.1.5 Paso de la onda de choque por el puerto de medición TP2.

La onda de choque en expansión activa al sensor del transmisor de presión EXTECH PT150-SD n/s TA 88850 [43] a su paso por el puerto de medición TP2, como se aprecia en el Gráfico 12:

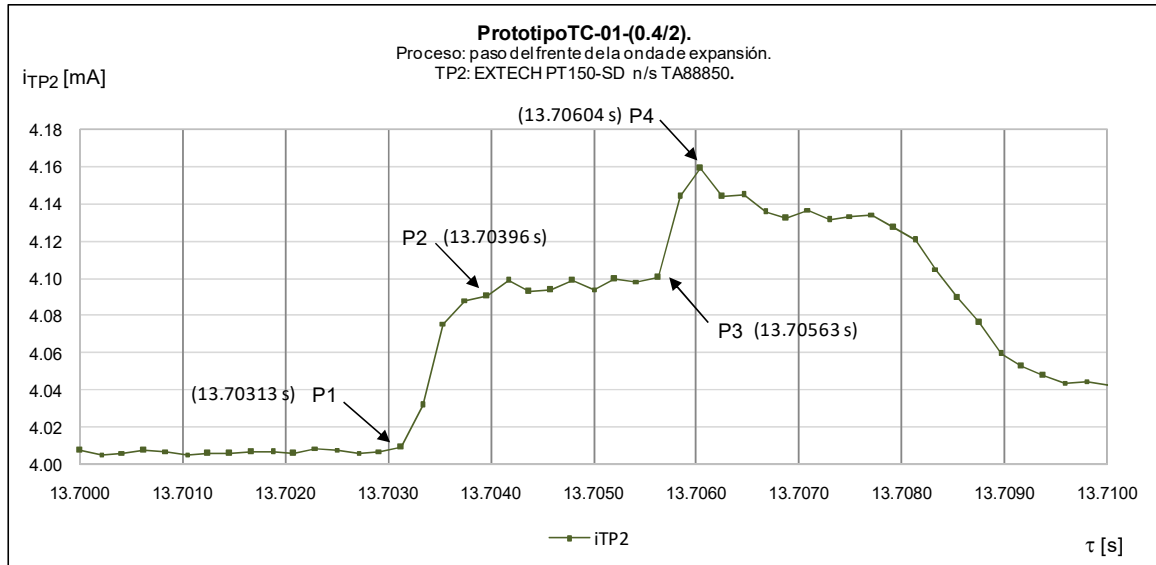


Gráfico 12. TC-01-(0.4/2): eventos en el puerto de medición TP2.

En el Gráfico 12 se identifican los siguientes hitos experimentales:

- La presión del gas en reposo (p_{1e}), definida por las mediciones en TP2 antes del punto P1.
- El momento de paso del frente de la onda de choque por el puerto de medición TP2 (P1).
- La presión del gas perturbado en el tiempo de estabilización (p_{2e}), definida por la presión medida en TP2 entre los puntos P2 y P3.
- El momento de la llegada del frente de la primera reflexión de la onda de choque a TP2 (P3).
- El pico de sobrepresión producido por la llegada del gas comprimido en la brida ciega de TP5 y "rebotado" aguas abajo (P4).

Entre los puntos P2 y P3 la presión del gas perturbado debería variar estocásticamente alrededor de la presión teórica p_{2t} (ver la ecuación 168) si el sensor estuviese expuesto directamente, pero la cámara de medición actúa como un resonador, alterando el proceso y complicando la identificación del rango dónde puede estimarse la presión p_{2e} como estimador de p_{2t} .

Por esa razón se utiliza el Gráfico 13 como complemento del Gráfico 12, para cuantificar la presión del gas perturbado p_{2e} en el tiempo de estabilización τ_2 , aunque a la frecuencia de muestreo del experimento $f_m = 4,8 \text{ kHz}$ ($208 \mu\text{s/S}$), el beneficio no es notorio.

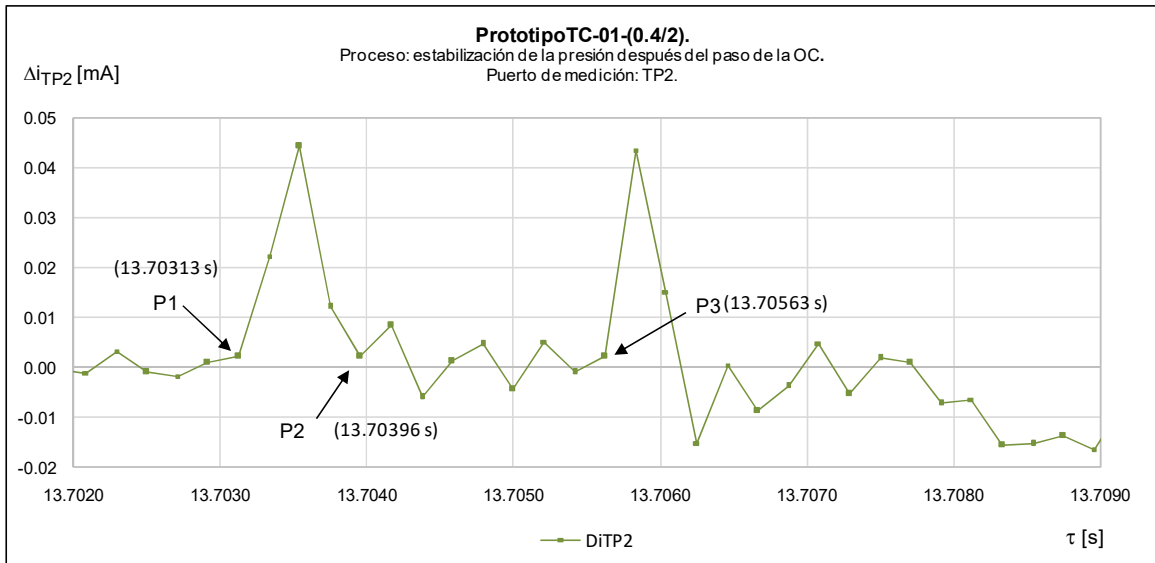


Gráfico 13. TC-01-(0.4/2): eventos en TP2 según la diferencia de presión.

Donde:

Δi_{TP} : Diferencia entre mediciones consecutivas de corriente eléctrica en el rango analizado [mA].

Como resultado de la interpretación del Gráfico 13, se reportan los siguientes resultados:

- Cuantificación de los hitos en TP6:

Tabla 51. TC-01-(0.4/2). Cuantificación de los hitos en TP6.

Evento	Punto	s	mA
p_1 estable: llega la onda de choque a TP2-1, e inicia ascenso de p_1 a p_{2-1}	P1	13.70313	4.0093
Fin de ascenso: inicio del período de estabilización p_2	P2	13.70396	4.0903
Fin del período de estabilización de p_2	P3	13.70563	4.1004
Fin de ascenso: inicio del período de estabilización p_2	P4	13.70604	4.1590

- Cuantificación de los parámetros del gas en reposo y perturbado en la cámara de expansión según las mediciones del EXTECH PT150-SD n/s TA88850:

Tabla 52. TC-01-(0.4/2). TP2: estadísticas del gas en reposo y perturbado.

i_1	$s(i_1)$	η_{p1}	p_{1c}	$\Delta\tau_{1-2}$	i_2	$s(i_2)$	η_{p2}	p_{2c}	$\Delta\tau_2$
mA	mA	S	psi	ms	mA	mA	S	psi	ms
4.0069	0.0011	20	0.04	0.833	4.0962	0.004	9	0.83	1.667

Para evitar el efecto de la onda de choque reflejada en las mediciones³⁰ de $p_{2e} = p_{2c} = 0,83 \text{ psi}$, se requiere la modificación de uno o ambos de los siguientes factores influyentes: longitud de la cámara de expansión o reubicar la posición de TP2: el tema es abordado más adelante, en las secciones 4.5.2 y 4.5.4 respectivamente.

Aunque se reportan el tiempo de respuesta del transmisor de presión ante la perturbación ($\Delta\tau_{12}$) así como el tiempo de estabilización de la presión (τ_2), no es propósito del proyecto utilizar el puerto de medición TP2 para caracterizar la respuesta dinámica de los transmisores de presión.

4.3.1.6 Primera reflexión de la onda de choque

La primera reflexión de la onda de choque en la brida ciega instalada al final de la cámara de expansión del prototipo TC-01-(0.4/2), es el evento más importante desde el punto de vista metroológico, considerando que en el puerto de medición TP5 se instalaría el calibrando:

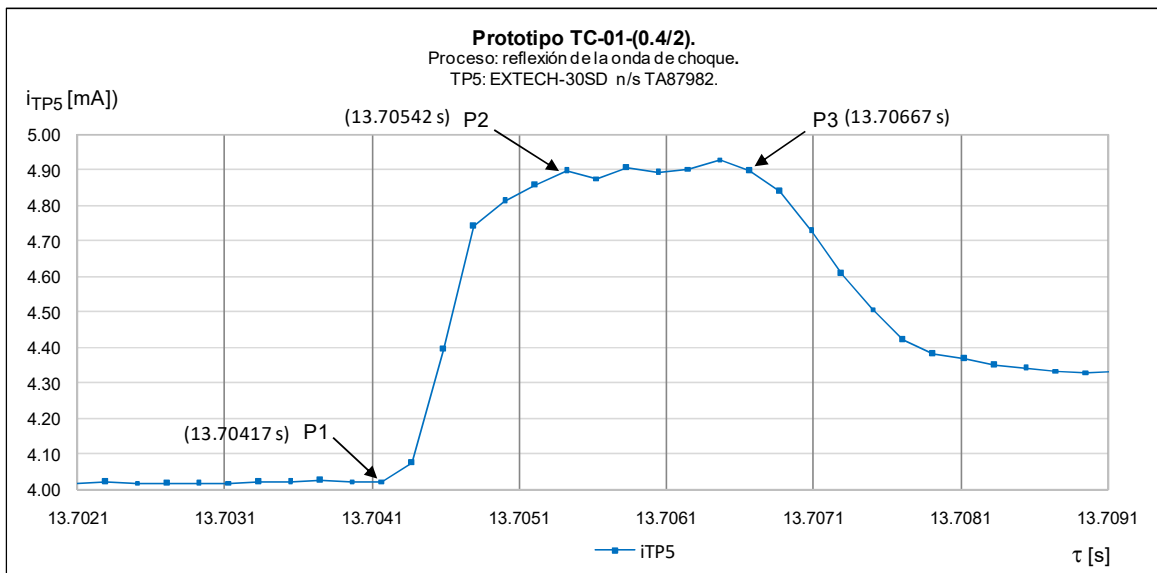


Gráfico 14. TC-01-(0.4/2): eventos en el puerto TP5.

Utilizando el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 instalado en el puerto de medición TP5, en el Gráfico 14 se identifican los siguientes hitos experimentales:

- La presión del gas en reposo (p_{1e}), definida por las mediciones en TP5 antes del punto P1.
- La llegada de la onda de choque al sensor del transmisor de presión instalado en TP5, y el rápido ascenso ($\Delta\tau_{15}$) de la presión desde el punto P1 hasta el punto P2.
- La presión del gas perturbado (p_{5e}) en el tiempo de estabilización, definida por las presiones medidas en el puerto de medición TP5 entre los puntos P2 y P3.

³⁰ El subíndice "c" se refiere a que es corregida de manera retroactiva, según el procedimiento de la sección 2.4.2.

Entre los puntos P2 y P3 la presión del gas perturbado se mantiene constante, pero el efecto resonante de la cámara de medición del transmisor de presión complica la identificación del rango, donde puede utilizarse la presión p_{5e} como estimador de p_{5t} (ver la ecuación 173). Por esa razón, se utiliza el Gráfico 15 como complemento del Gráfico 14, para cuantificar la presión del gas perturbado p_{5e} en el tiempo de estabilización τ_5 .

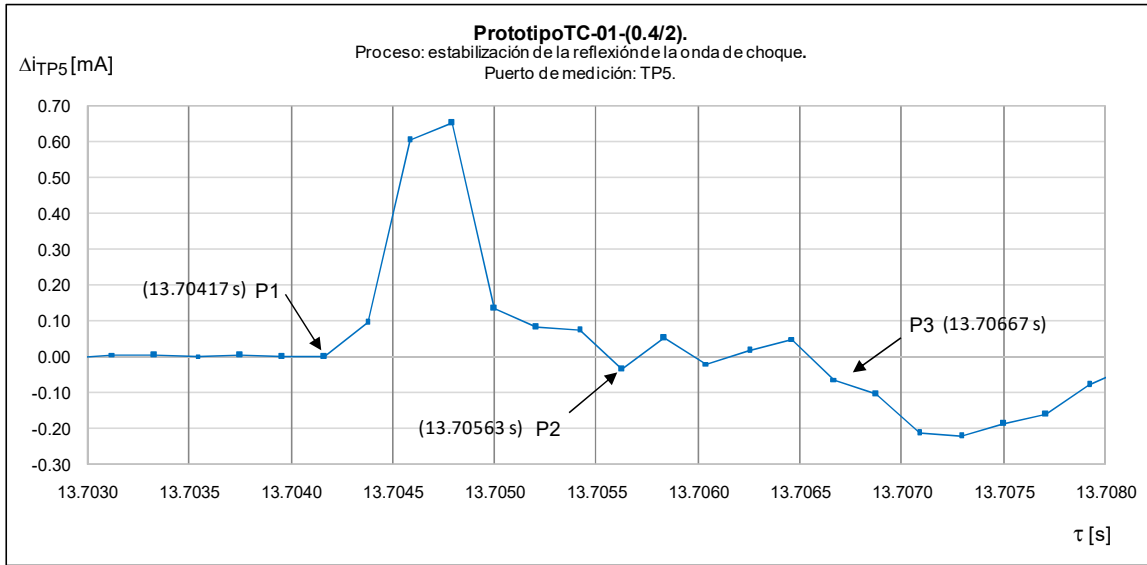


Gráfico 15. TC-01-(0.4/2): ajuste fino de los eventos en el puerto TP5.

El “ajuste fino” de la cuantificación de los hitos referidos se reportan en la Tabla 53:

Tabla 53. TC-01-(0.4/2): cuantificación de los hitos en el puerto TP5.

Evento	Punto	s	mA	psi
p_1 estable: llega la onda de expansión a TP5, e inicia ascenso de p_1 a p_5	P1	13.70417	4.0231	4.02
Fin de ascenso: inicio del período de estabilización p_5	P2	13.70542	4.8955	4.90
Fin del período de estabilización de p_5	P3	13.70667	4.8958	4.90

En la Tabla 54 se reportan los parámetros del gas en reposo y perturbado en la cámara de expansión, según las mediciones del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43]:

Tabla 54. TC-01-(0.4/2). Puerto TP5: estadísticas del gas.

i_1	$s(i_1)$	n_{p1}	$\Delta\tau_{15}$	p_{1c}	i_5	$s(i_5)$	n_{i5}	$\Delta\tau_5$	p_{5c}
mA	mA	S	ms	psi	mA	mA	S	ms	psi
4.0207	0.0026	20	1.250	0.05	4.8998	0.016	7	1.250	1.74

De la Tabla 54 se infiere que:

- ☑ La presión manométrica³⁰ del aire húmedo en reposo en la cámara de compresión es: $p_{1c} = 0,05 \text{ psi} (3,45 \text{ hPa})$.
- ☑ El tiempo de ascenso $\Delta\tau_{15} = 1,250 \text{ ms}$ define la calidad experimental de la perturbación tipo escalón, fundamental para calcular los coeficientes de la ecuación característica del transmisor de presión.
- ☑ La presión del aire húmedo perturbado se mantiene oscilando alrededor de $p_{5e} = p_{5c} = 120,22 \text{ hPa} (1,74 \text{ psi})$, durante el tiempo de estabilización $\Delta\tau_5 = 1,250 \text{ ms}$, definiendo la amplitud del salto: $\Delta p_5 = p_{5c} - p_{1c} = 116,76 \text{ hPa} (1,69 \text{ psi})$.

4.3.1.7 Presentación del prototipo TC-01-(0.4/2)

Considerando que la literatura estudiada para establecer el marco teórico del proyecto no reporta el uso de un transmisor de presión con cámara de medición y sensor resistivo para medir p_5 , el Comité Organizador del 9th International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements (DYNAMIC 2016) invitó al autor del proyecto [69] a presentar el prototipo TC-01-(0.4/2) y su novedosa aplicación a los eventos de bajo frecuencia y amplitud relacionados con el oleaje gravitacional, a la comunidad metrológica mundial relacionada con las mediciones dinámicas.

La presentación se realizó por el autor del proyecto en noviembre del 2016 en la sede del PTB en Berlín, Alemania [70], y como resultado los expertos técnicos participantes aceptaron el novedoso proyecto considerando su aplicación a mediciones dinámicas de presión de bajas amplitudes y frecuencias (ver sección 1.4), recomendando su validación para conocer el desempeño del sistema de medida del prototipo TC-01-(0.4/2).

4.3.1.8 Validación del prototipo TC-01-(0.4/2).

La validación del prototipo TC-01-(0.4/2) incluyó dos etapas:

- La comparación del desempeño dinámico de los transmisores de presión con cámara de medición y sensores resistivos de naturaleza y membranas diferentes.
- La validación de los parámetros de desempeño del tubo de choque (sección 4.2.7), una vez seleccionado el transmisor de presión de mejor desempeño dinámico.

Cada transmisor de presión se expuso a perturbaciones aperiódicas tipo escalón mediante el estallido de diafragmas de aluminio de espesor $10,2 \mu\text{m}$ (Al1).

La Tabla 55 muestra la trazabilidad de los disparos realizados entre el 19 y el 29 de junio del 2017:

Tabla 55. TC-01-(0.4/2): identificación de los registros de las mediciones.

Parámetros	OMEGA PX4200-030GI			EXTECH PT30-SD		
Diafragma	D4	D5	D6	D1	D2	D3
Registro de medición	2017_06_19_04_01	2017_06_19_05_01	2017_06_19_06_01	2017_06_29_01_01	2017_06_29_02_01	2017_06_29_03_01
Fecha:	17-06-19			17-06-29		
Hora:	12:29:50	13:01:47	14:41:16	9:30:56	9:38:46	9:45:12

En la Tabla 56 se reportan los parámetros²⁶ del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, considerado en equilibrio con el aire ambiental:

Tabla 56. TC-01-(0.4/2): parámetros del aire ambiental.

Símbolo	UM	OMEGA PX4200-030GI			EXTECH PT30-SD		
		γ	$u_B(\gamma)$	v_B	γ	$u_B(\gamma)$	v_B
t_1	°C	23.9	0.10	10	23.8	0.10	10
HR_1	%	69.3%	0.81%	9	69.8%	0.81%	9
P_{at}	hPa	881.4	0.15	9	881.4	0.15	9
Z	adim	0.999319	3.3E-05	17	0.999321	3.3E-05	17

En la secuencia del Gráfico 16 y Gráfico 17 se aprecian las respuestas dinámicas de ambos transmisores de presión al exponerse a la perturbación reproducida en el prototipo TC-01-(0.4/2).

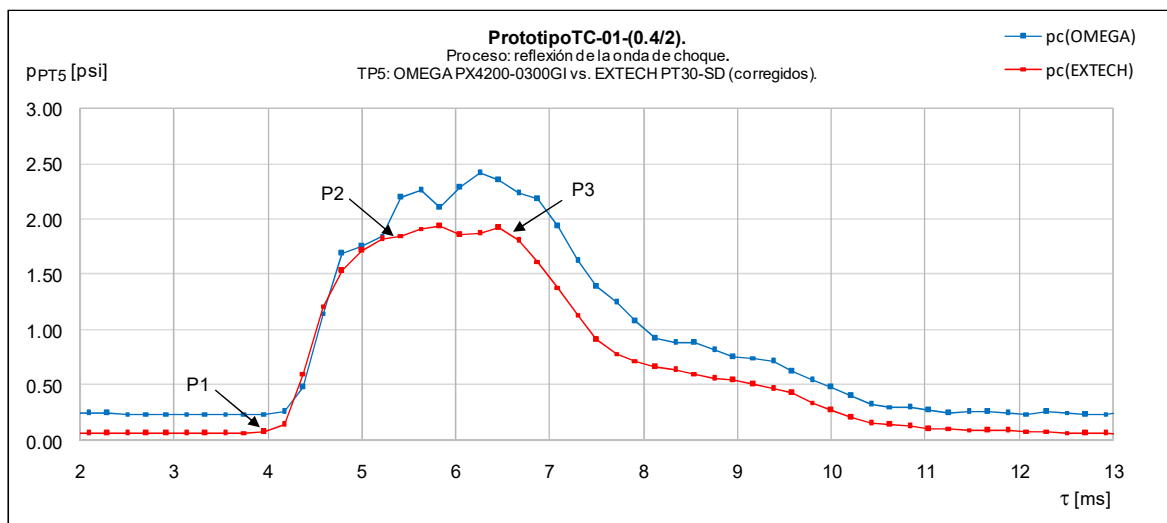


Gráfico 16. TC-01-(0.4/2): desempeño del prototipo, según el tipo de transmisor de presión.

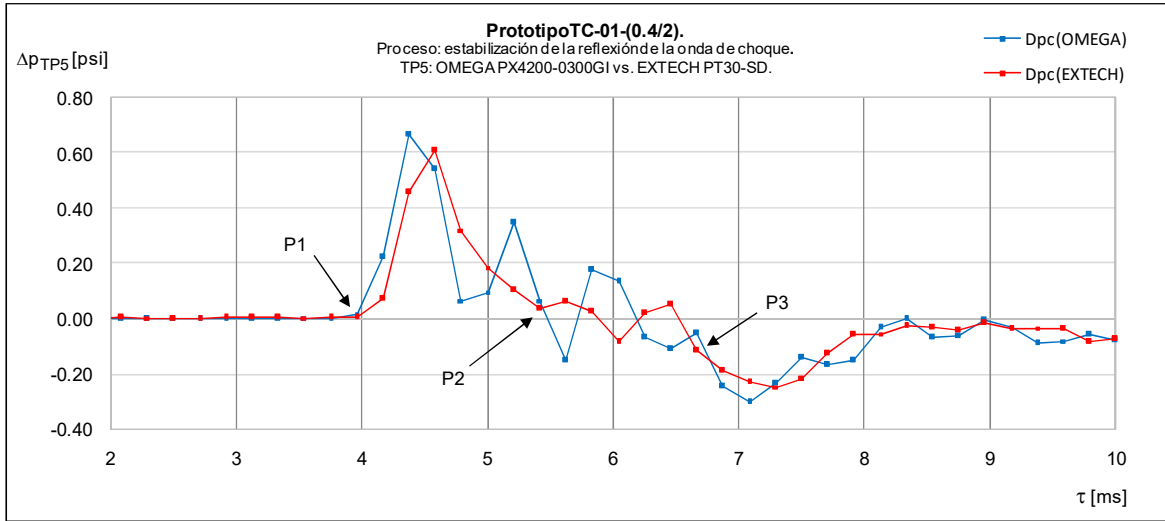


Gráfico 17. TC-01-(0.4/2): desempeño del prototipo en la región de estabilización de P_5 .

Desde el punto cualitativo es mejor el comportamiento dinámico en la región de estabilización del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] en comparación con el OMEGA PX4200-030GI [41].

Los resultados de la cuantificación de los hitos relacionados con la primera reflexión de la onda de choque, justifican la afirmación anterior:

Tabla 57. TC-01-(0.4/2). Precisión: comparación de los transmisores de presión.

Parámetro de desempeño	UM	OMEGA PX4200-030GI					EXTECH PT30-SD				
		y	$u_B(y)$	v_B	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_B	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	903.7	1.15	14	8.03	59	885.2	1.47	12	0.10	34
P_{5t}	hPa	508.1	5.48	86	N.A		846.6	6.03	169	N.A	
P_{5e}	hPa	1035.5	4.28	12	4.61	29	1009.6	1.95	19	1.98	19

De la Tabla 57 se confirma que la variabilidad mancomunada definida $[s_p(P_{5e})]$ del transmisor de presión EXTECH PT30-SD es 2,32 veces menor con respecto a la del OMEGA PX4200-030GI.

Tabla 58. TC-01-(0.4/2). Veracidad de P_5 : comparación de los transmisores de presión.

Parámetro de desempeño	OMEGA PX4200-030GI		EXTECH PT30-SD	
	hPa	%	hPa	%
$\delta(P_5)$	593.90	134.50%	163.02	19.26%

De la Tabla 58 se confirma que el sesgo $[\delta(P_5)]$ del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] es mucho menor: 19,26 % vs. 134,50 % en el caso del OMEGA PX4200-030GI [41].

El mejor desempeño del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA8798, en términos de precisión intermedia y veracidad, confirman la decisión preliminar (ver comentarios en Tabla 43) para conformar el patrón dinámico de presión, junto con el sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 [42] y prototipo TC-01-(0.4/2).

En la Tabla 59 se muestran los resultados de la validación con respecto a la presión del gas perturbado al paso del frente de la onda de choque por el puerto de medición TP2 (ver Figura 12):

Tabla 59. TC-01-(0.4/2). Veracidad de P_2 .

Parámetro de desempeño	UM	EXTECH PT30-SD		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}
P_{1e}	hPa	885.2	1.5	12.0
P_{2t}	hPa	856.0	8.8	1626.5
P_{2e}	hPa	943.4	3.9	856.0
$\delta(P_2)$	%	10.2%		

En la Tabla 60 se reporta el desempeño transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA8798 en el prototipo TC-01-(0.4/2) con respecto a los tiempos de ascenso ($\Delta\tau_{15}$) y estabilización ($\Delta\tau_5$):

Tabla 60. Prototipo TC-01-(0.4/2). Tiempos de ascenso y estabilización.

Parámetro de desempeño	UM	EXTECH PT30-SD		
		y	$s(y)$	$v = n_d - 1$
$\Delta\tau_{15}$	ms	1.319	0.318	2
$\Delta\tau_5$	ms	1.181	0.120	2

Los resultados de la comparación del desempeño de ambos transmisores de presión instalados en el puerto de medición TP5 del prototipo TC-01-(0.4/2) se presentaron en ponencia en el 18th International Congress of Metrology (CIM 2017) en septiembre del 2017 en París, Francia [71].

4.3.1.9 Evaluación dinámica en el LMD-ENSAM TC10.

Terminada la participación en el CIM 2017 [71] y por invitación del Dr. Christophe Sarraf [72], se trasladó el sistema de medida compuesto por el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA8798 y el sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 a la sede del LMD-ENSAM, en París, Francia, con los siguientes propósitos:

- Evaluar la capacidad de instalar el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA8798 en un prototipo de tubo de choque similar en rango de operación al prototipo TC-01-(0.4/2), con el fin de organizar una futura intercomparación [72].

- Determinar el desempeño dinámico del sistema de medición EXTECH PT30-SD n/s TA8798 + HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 para medir los parámetros que caracterizan la primera reflexión de la onda de choque en un prototipo de tubo de choque del LMD-ENSAM.
- Comparar los resultados obtenidos en el tubo de choque francés, con los previos obtenidos en la validación del TC-01-(0.4/2).

La Figura 18 muestra el prototipo de tubo de choque seleccionado por el LMD-ENSAM: TC10, que como todo generador de perturbaciones aperiódicas de presión basado en la tecnología del tubo de choque, está compuesto de dos cámaras, en este caso de aluminio, de secciones constantes: la de compresión mide $L_{cc} = 950$ mm y la de expansión $L_{ce} = 1\ 750$ mm ($L_{ce}/L_{cc} = 1,84$).

En la Figura 18 se aprecia que en el puerto de medición TP5 del TC10 está instalado el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982, y en la mesa, el sistema de adquisición de datos HBM MX440B n/s 0009E5008567, porque el sistema de adquisición de datos francés no permite medir salidas analógicas de corriente eléctrica CD.



Figura 18. LMD-ENSAM: vista panorámica del tubo de choque TC10.

La Tabla 61 muestra la trazabilidad de los “disparos” del 29 de junio y el 26 de septiembre del 2017, realizados en la UCR, Costa Rica y el LMD-ENSAM, en París, Francia, respectivamente:

Tabla 61. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.

Parámetros	TC-01-(0.4/2)			TC10	
	D1	D2	D3	D1	D2
Registro de medición	2017_06_29_01_01	2017_06_29_02_01	2017_06_29_03_01	test1	test2
Fecha:	17-06-29			17-09-26	
Hora:	9:30:56	9:38:46	9:45:12	9:11:43	9:22:31

Los colegas franceses [72] recomendaron:

- Incrementar la frecuencia de muestreo con respecto a la utilizada en la validación “in house” (ver la Tabla 44) para apreciar los eventos relacionados con la reflexión de la onda de choque.
- No utilizar el filtro digital.

La comparación de los parámetros de la primera reflexión de la onda de choque en ambos prototipos de tubos de choque, se realizó bajo las siguientes condiciones de reproducibilidad:

Tabla 62. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: condiciones de reproducibilidad.

Factores	TC-01-(0.4/2)	TC10
Lugar	LMD-LABCAL (Finca 3). San José, Costa Rica	LMD-ENSAM. París, Francia
Fecha	2017-06-29	2017-09-26
Frecuencia de muestreo	4.8 kHz	38.4 kHz
Filtro digital	Bessel lowpass @ 50 Hz	Sin filtro digital
Relación L_{ce}/L_{cc}	5.28	1.84
Tipo de diafragma	Al1 (0,0102 mm)	film plástico
Mecanismo de disparo	sobrepresión	manual
Gas de operación	aire húmedo	aire seco

La secuencia del Gráfico 18 y Gráfico 19 muestra las respuestas dinámicas del transmisor de presión al exponerse a las perturbaciones reproducidas en ambos prototipos de tubos de choque.

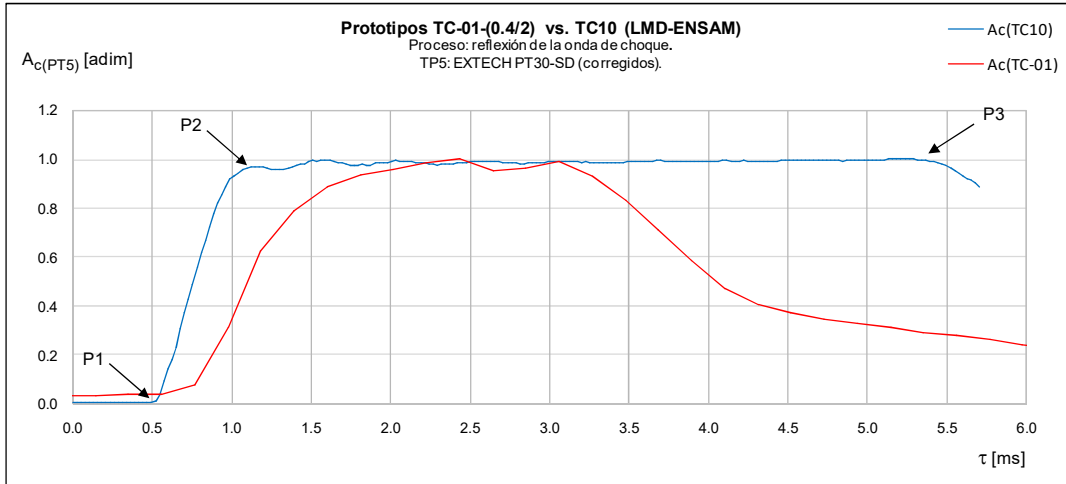


Gráfico 18. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según el prototipo de tubo de choque.

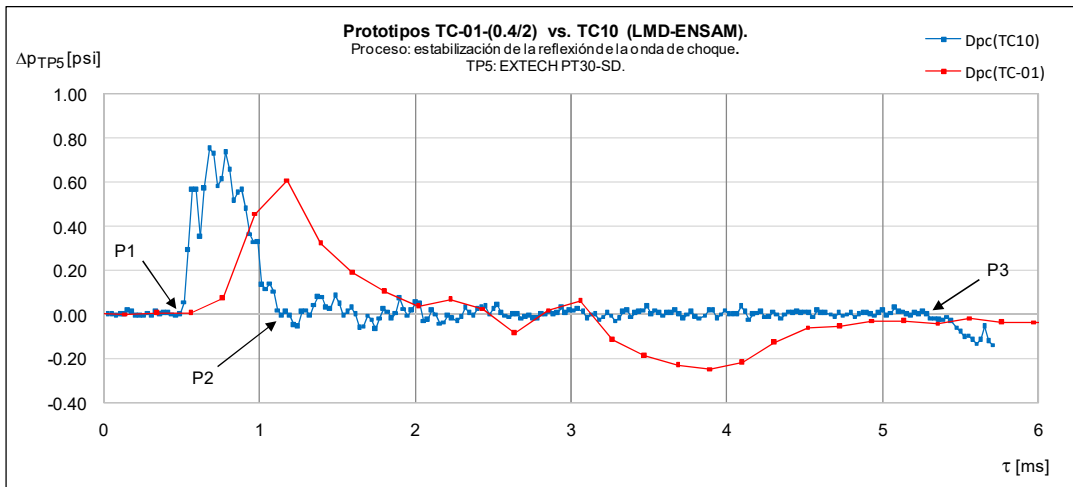


Gráfico 19. TP EXTECH PT30-SD: desempeño en la región de estabilización de P_5 .

La Tabla 63 muestra la comparación de los desempeños del transductor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 en ambos prototipos de tubo de choque, con respecto a los tiempos de ascenso ($\Delta\tau_{15}$) y estabilización ($\Delta\tau_5$):

Tabla 63. TP EXTECH PT30-SD: respuesta dinámica según el prototipo de tubo de choque.

Parámetro de desempeño	UM	TC-01-(0.4/2)			TC10		
		y	s(y)	$v = n_d - 1$	y	s(y)	$v = n_d - 1$
$\Delta\tau_{15}$	ms	1.319	0.318	2	0.638	0.018	1
$\Delta\tau_5$	ms	1.181	0.120	2	4.232	0.092	1

Con respecto a los resultados obtenidos, se demuestra que:

- ☒ El tiempo de ascenso de la señal de presión medida por el transmisor de presión ante la perturbación es 0,48 veces menor en el prototipo francés TC10.

En este sentido, cuanto menor sea el tiempo de ascenso, menor será la desviación con respecto a la suposición teórica de respuesta inmediata: $\Delta\tau_{15} \rightarrow 0$.

- ☒ El tiempo de estabilización de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque es 3,58 veces mayor en el prototipo francés TC10.

En este sentido, cuanto mayor sea el tiempo de estabilización, podrá observarse mejor el comportamiento dinámico del transmisor de presión en régimen estacionario.

Si se analiza cualitativamente la variabilidad del transductor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43] en la región de estabilización, se observa un mejor desempeño en el prototipo TC10 con respecto al prototipo desarrollado TC-01-(0.4/2), sin embargo, su cuantificación en función de las desviaciones estándares mancomunadas [$s_p(P_{5e})$] son iguales entre sí.

Tabla 64. TP EXTECH PT30-SD. Reproducibilidad: comparación según el prototipo de TC.

Parámetro de desempeño	UM	TC-01-(0.4/2)					TC10				
		y	$u_B(y)$	v_B	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_B	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	885.2	1.47	12	0.10	34	1025.2	1.98	27	0.06	39
P_{5e}	hPa	1009.6	1.95	19	1.98	19	1728.9	2.15	31	1.98	321

Al respecto, es importante considerar que al aumentar la frecuencia de muestreo, las pruebas estadísticas de normalidad fallaron, demostrando que el comportamiento de las mediciones de presión en la región de estabilidad no es estocástico, sino oscilatorio:

Tabla 65. TP EXTECH PT30-SD: resultados de la prueba de Anderson-Darling ($\alpha = 5\%$).

TC10		¿Aceptar H_0 ?
D1	D2	
0.005	0.005	No

En este caso no es posible aplicar el ANOVA para estimar la incertidumbre estándar mancomunada de P_{5e} , según el procedimiento referido en la sección 2.3.3.2, sino que se evaluó considerando que se distribuye según una distribución arcoseno (ver la ecuación 56).

En la Tabla 66 se reportan los coeficientes de la ecuación diferencial característica (ecuación 12) del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43] en el prototipo francés TC10:

Tabla 66. TP EXTECH PT30-SD: resultados de la calibración dinámica.

Parámetros ajustados	Símbolo	UM	Valores
Coefficiente de amortiguamiento relativo	ζ_n	adim	0.76681
Frecuencia amortiguada	ω_d	rad/s	4.9395
Frecuencia natural angular	ω_n	rad/s	7.6954
Frecuencia natural lineal	f_n	ciclos/s	1.2248
Error de ajuste según Levenberg-Marquardt	s_a	adim	0.0426
	v_a	S	186

En el Gráfico 20 se muestran los resultados medidos (puntos en azul) por el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 [43] ante la perturbación tipo escalón, reproducida por el prototipo francés TC10 y los ajustados (línea roja) por el método numérico de Levenberg-Marquardt:

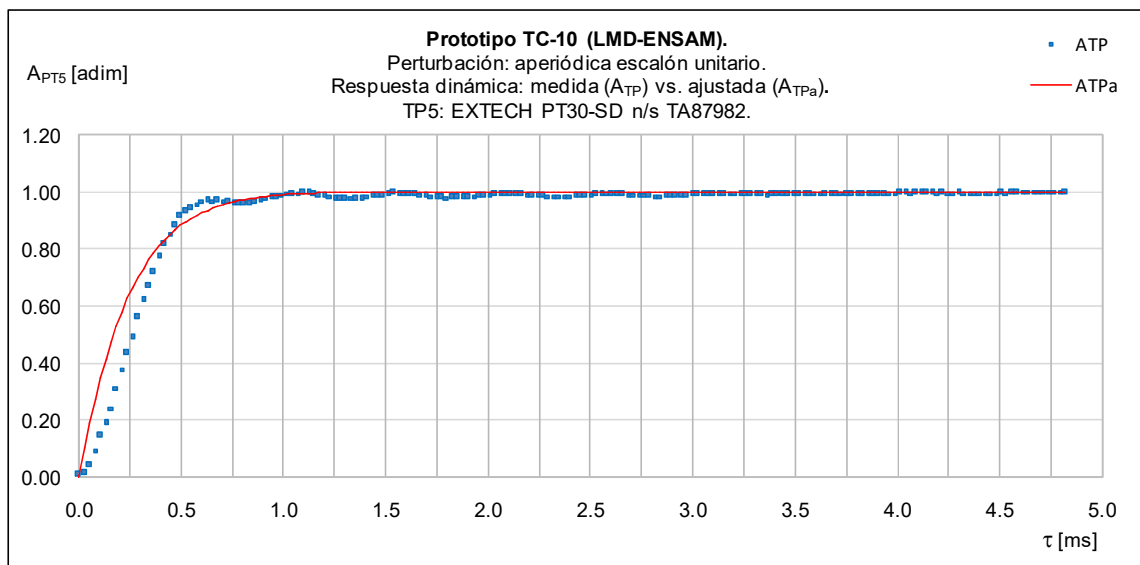


Gráfico 20. TP EXTECH PT30-SD: comparación de valores medidos vs. ajustados en TC10.

4.3.2 Evaluación dinámica en el LMD-ENSAM DOR10

Considerando el efecto de retardo de la cámara de medida del transmisor de presión EXTECH PT30-SD, los colegas franceses recomendaron realizar mediciones complementarias en un dispositivo de apertura rápida³¹ y compararlas con las obtenidas en el tubo de choque TC10.

Los dispositivos de apertura rápida son una extensión de los tubos de choque hacia las bajas frecuencias [1, 15], y son adecuados para evaluar el desempeño dinámico de transmisores de presión subamortiguados con baja frecuencia natural, porque mantienen la amplitud del salto de presión generado durante mucho tiempo, permitiendo compensar el retardo de su respuesta.

³¹ Referido usualmente por las siglas FOD, del inglés Fast Opening Device.

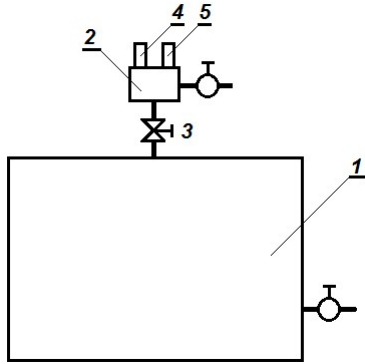


Figura 19. Dispositivo de apertura rápida: esquema simplificado.

Como se indica a en la Figura 19, los dispositivos de apertura rápida están compuestos de dos cámaras: una de volumen mucho mayor (1), conectada a la de menor volumen (2) mediante un sistema de apertura rápida (3). Cuando el dispositivo de apertura (3) se abre, el fluido de la cámara mayor (1) fluye hacia la cámara menor (2), cuya presión pasa de p_1 a p_2 , resultando en un paso escalón de amplitud $\Delta p = p_2 - p_1$, positivo o negativo según p_2 sea mayor o menor que p_1 .

En la Figura 20 se muestra la vista panorámica del dispositivo de apertura rápida DOR-10 [54] utilizado. La presión del recipiente que funciona como cámara de mayor volumen (1) es monitoreada por un sistema de medida de presión estacionaria (2).



Figura 20. LMD-ENSAM-DOR10: vista panorámica.

A diferencia del tubo de choque, cuya presión de referencia se mide según la ecuación termodinámica de la expansión isentrópica de la onda de choque, en este caso se requiere de un transductor de presión para medir directamente la presión en la cámara de menor volumen (3).

El LMD-ENSAM utiliza un sistema de medida de presión basado en el transductor piezoeléctrico Kistler 601A (patrón de referencia) y el amplificador de carga Kistler 5015A (4) cuya salida analógica de voltaje CD es enviada al sistema de adquisición de datos Genesis LDS (5) para su exportación como archivo con extensión .csv.

En la Figura 21 se aprecia, en detalle, la cámara de menor volumen del DOR10. En la cámara de menor volumen (2) se instalan los dos transmisores de presión: el patrón de referencia Kistler 601A (3) y el calibrando, en este caso, el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 (5).

La expansión brusca del gas desde la cámara de mayor volumen (1) a la de menor volumen (2), se realiza manualmente abriendo repentinamente la válvula (4).

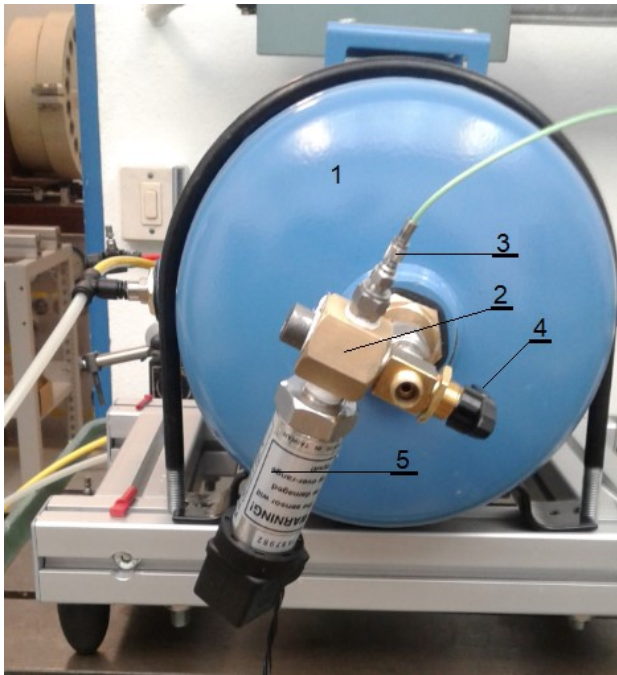


Figura 21. LMD-ENSAM-DOR10: vista de la cámara menor con los transductores de presión.

La Tabla 67 muestra la trazabilidad de las mediciones realizadas en el TC10 y el DOR10 entre el 26 y el 27 de septiembre del 2017, en las instalaciones del LMD-ENSAM, en París, Francia:

Tabla 67. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de las mediciones.

Generador de presión	TC10		DOR10			
Diafragma	D1	D2	A1	A2	A3	A4
Registro de medición	test1	test2	test5	test7	test9	test10
Fecha:	17-09-26		17-09-27			
Hora:	9:11:43	9:22:31	6:34:14	7:02:33	7:06:38	7:07:52

La validación del desempeño del sistema de medida TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982 + HBM MX440B n/s 0009E5008567 en el DOR10 generó una matriz de mediciones de corriente eléctrica CD, “alimentada” de las “aperturas” manuales, realizadas el 2017-09-27 (A1 al A4).

En el Gráfico 21 se aprecian cualitativamente las respuestas dinámicas del transmisor de presión al exponerse a las perturbaciones aperiódicas reproducidas en ambos prototipos: TC10 vs DOR10.

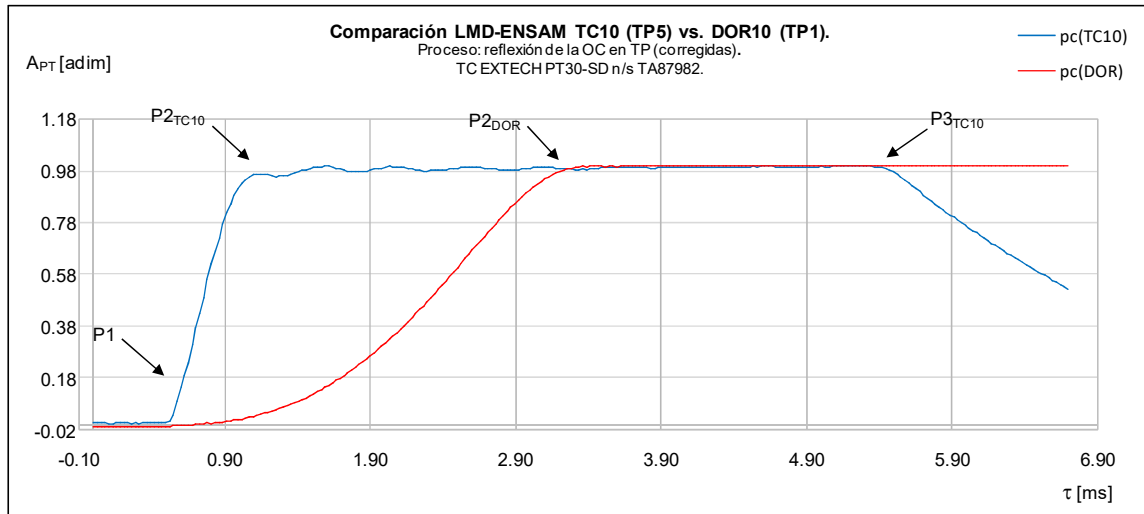


Gráfico 21. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según el generador de presión.

En la Tabla 68 se comparan los desempeños de ambos prototipos de generadores aperiódicos de presión, con respecto a los tiempos de ascenso ($\Delta\tau_{15}$) y estabilización ($\Delta\tau_5$):

Tabla 68. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según el prototipo.

Parámetros de desempeño	UM	TC10			DOR10			y_1 / y_2
		y_1	$s(y_1)$	$v = n_d - 1$	y_2	$s(y_2)$	$v = n_d - 1$	
$\Delta\tau_{15}$	ms	0.651	0.018	1	23.021	0.442	3	35.4
$\Delta\tau_5$	ms	4.115	0.092	1	863.958	37.418	3	210.0

Con base en los resultados obtenidos, se demuestra que:

- El tiempo de ascenso de la señal de presión medida por el transmisor de presión en el dispositivo de apertura rápida DOR10 es ¡35 veces mayor!, con respecto a la producida por el estallido del diafragma en el prototipo TC10.

El tiempo de ascenso del DOR10 impide realizar una estimación adecuada de los coeficientes de ajuste de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982, por la desviación tan grande con respecto a la suposición teórica ($\Delta\tau_{15} \rightarrow 0$).

☑ Sin embargo, el tiempo de estabilización de la presión del gas perturbado en el DOR10 es ¡210 veces mayor! con respecto a la producida por el estallido del diafragma en el prototipo TC10.

Desde este punto de vista se aseguraría que el transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 estuviera en la zona estacionaria para una posible comparación con un transmisor de presión patrón del LMD-ENSAM en régimen estacionario, calculando su error absoluto de calibración según la ecuación 111.

Así, la trazabilidad metrológica de las mediciones de presión dinámica se gestionaría por intercomparaciones metrológicas periódicas en el DOR10, como medio de comparación isobárico, y el transmisor de presión EXTECH PT30-SD con el sistema de adquisición de datos HBM MX440B sería un patrón secundario, considerando que el LMD-ENSAM es reconocido por el LNE como el custodio de los patrones dinámicos de presión de Francia [54].

Aunque la propuesta de los colegas franceses es adecuada, en el marco de la tesis doctoral solo será tratada como una vía alterna de trazabilidad metrológica, considerando que el objetivo es desarrollar un “patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico”, en este caso, la expansión isentrópica de una onda de choque en un gas ideal en el tubo de choque.

En este sentido, el Working Group 1.33. Dynamic pressure del PTB ha estado trabajando para sustituir los dispositivos de apertura rápida en la calibración previa de los transmisores de presión utilizados para medir la presión del gas de combustión del propelente en la detonación de una munición que, en esencia, es el mismo problema de la tesis doctoral.

Con la invitación del Dr. Markus Bär para realizar una pasantía en el PTB [74], durante tres meses se colaboró en la conversión de su generador de presión conocido como “dropping ball”, de un medio de comparación en un patrón primario que permita calcular los coeficientes de la ecuación característica de los transmisores de presión, mediante la “realización” de la presión dinámica basada en un fenómeno físico: la dependencia de los cambios de densidad del fluido en una “masa de control”, medida indirectamente a partir de las desviaciones del recorrido de un LASER [75,76].

4.4 Mejora operativa del prototipo de tubo de choque

4.4.1 El prototipo TC-02-(Lcc/Lce).

Confirmado el supuesto teórico que considera al tubo de choque como un patrón primario, complementado con el francés que considera al transmisor de presión EXTECH PT30-SD como patrón secundario trazable al TC10 (LMD-ENSAM), el **primer semestre del 2018** se dedicó a mejorar la operación del prototipo TC-01-(0.4/2), construyéndose el prototipo: el TC-02-(Lcc/Lce):

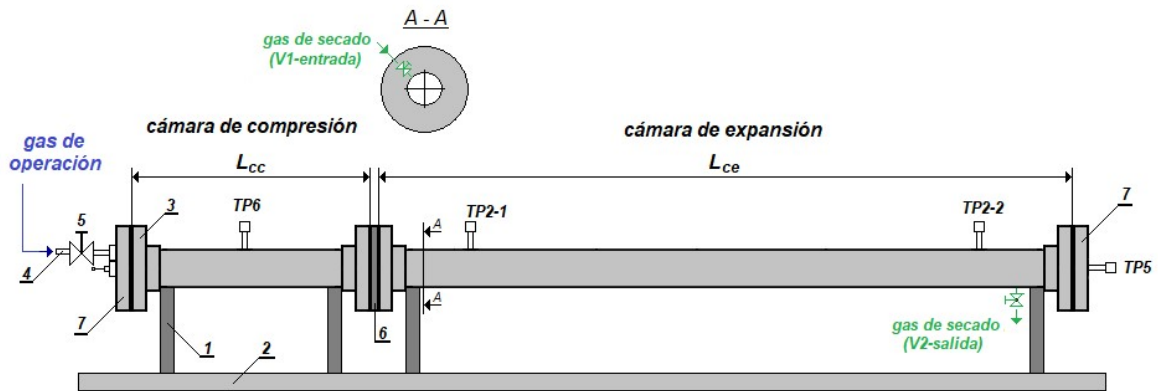


Figura 22. Prototipo TC-02-(Lcc/Lce). Esquema simplificado.

El prototipo TC-02-(Lcc/Lce), construido considerando los requisitos de diseño de la sección 4.2.5, consta de dos cámaras tubulares de PVC de diámetro nominal 76,2 mm (3 in), sostenidas por soportes (1) a una mesa (2) horizontal para asegurar la estabilidad de la operación del sistema.

Cada sección se une por bridas móviles de PVC (3), que garantizan la hermeticidad de sus cámaras mediante sus acoples con juntas de goma y cuatro pernos ajustados adecuadamente.

El gas de operación es aire almacenado en el cilindro de un compresor recíprocante, y se conecta la cámara de compresión mediante manguera y acople rápido (4).

La entrada del aire a la cámara de compresión es controlado, manualmente, por una válvula de regulación (5), que cumple dos funciones: interrumpir el suministro del aire de operación o regular el flujo volumétrico del aire de entrada.

El gas de transmisión es el aire ambiental²⁶ que queda atrapado en la cámara de expansión al instalarse el diafragma entre las bridas (6).

La construcción del prototipo TC-02-(Lcc/Lce) (ver la Figura 23) se realizó en el primer semestre del año 2018 en las instalaciones del LABCAL en Finca 3.



Figura 23. TC-02-(Lcc/Lce): vista general para el caso (0.4/2).

A diferencia del primer prototipo, el segundo incorporó una serie de subsistemas para mejorar su operación, de manera que su desempeño se aproxime más al de referencia: TC10.

4.4.2 Mejora de la medición del número de Mach

El sesgo en la estimación de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque [$\delta(P_5) = 19,26\%$ (Tabla 58)] es muy alto aún con respecto al objetivo: $\leq 5\%$.

La causa del sesgo tan alto en la estimación de P_{5t} (ecuación 173) es la propia estimación de P_{2t} (ecuación 168) a partir de sus mediciones en el puerto de medida TP2 (Figura 12) que genera un sesgo $\delta(P_2) = 10,2\%$ (Tabla 59). A partir del presupuesto de incertidumbre de P_{2t} se aprecia que la única fuente de incertidumbre relevante está asociada a la medición del número de Mach:

Tabla 69. TC-01-(0.4/2). P_{2t} : presupuesto de incertidumbre.

P_{2t} hPa	x_i	$u_i(x_i)$	v_i	$c_i = \partial y / \partial x_i$	$u_i(P_{2t-1})$		$u_c(P_{2t-1})$		$u_r(P_{2t-1})$
					hPa	%	hPa	v_{ef}	%
856.01	$\Delta P_{1(TP2)}$	2.59 psi	108	-0.03 adim	0.09	0.01%	8.80	1627	1.03%
	$\Delta P_{\gamma 1}$	0.0120 adim	18	-4.34 hPa	0.05	0.00%			
	ΔP_{Ms}	0.0043 adim	21	2032.72 hPa	8.80	99.99%			

$$\Sigma = 100.00\%$$

En la Tabla 70 se reportan los resultados de las mediciones de las magnitudes que definen al número de Mach, según la ecuación 129:

Tabla 70. Prototipo TC-01-(0.4/2). Número de Mach.

Parámetro de desempeño	UM	EXTECH PT30-SD		
		y	$u_B(y)$	n_B
L_2	mm	354.8	0.31	11
$\Delta\tau_2$	ms	1.042	1.8E-05	9
a_1	m/s	345.487	1.4876	19
a_s	m/s	340.562	0.2945	9
M_s	adim	0.9857	0.0043	21

A partir del presupuesto de incertidumbre del número de Mach:

Tabla 71. Prototipo TC-01-(0.4/2). Presupuesto de incertidumbre del número de Mach.

M_s	Δx_i	$u_i(x_i)$	v_i	c_i	$u_i(M_s)$		$u_c(M_s)$		$u_r(M_s)$
		m/s		(m/s) ⁻¹	adim	%	adim	v_{ef}	%
0.98574	$\Delta M_{s(a1)}$	1.4876	19	-0.00285	0.0042	96.12%	0.0043	21	0.44%
	$\Delta M_{s(as)}$	0.2945	9	0.00289	0.0009	3.88%			

100.00%

Se aprecia que la principal fuente de incertidumbre está relacionada con la medición de la velocidad del frente de onda de choque [$\Delta M_{s(a1)}$], por tanto, los esfuerzos se enfocaron en las variables que influyen en su medición, según la ecuación 129.

Para mejorar la medición de la velocidad de la onda de choque y, por tanto, del número de Mach (sección 4.2.2) se introdujeron en la cámara de expansión dos puertos de medida: TP2-1 y TP2-2.

La Figura 24 muestra la cámara de expansión del prototipo TC-02-(0.4/2) de dimensiones similares al TC-01-(0.4/2) (ver la Tabla 41) excepto por la distancia entre puertos de medición:

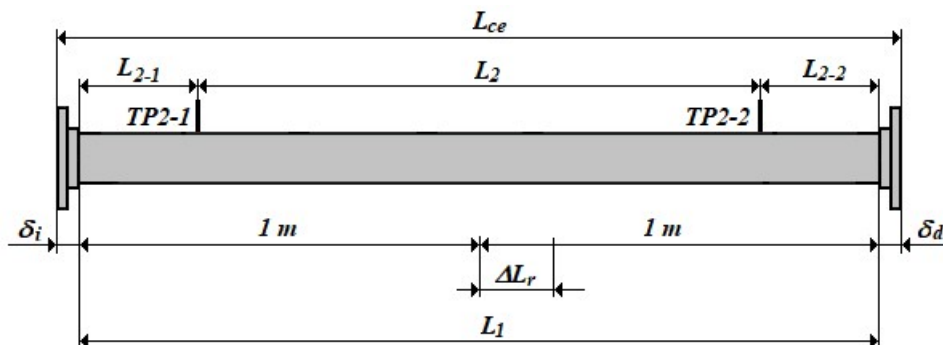


Figura 24. Prototipo TC-02-(0.4/2). Dimensiones de la cámara de expansión.

En la Figura 25 se representan las dimensiones entre los puertos de medición TP2-1 y TP2-2:

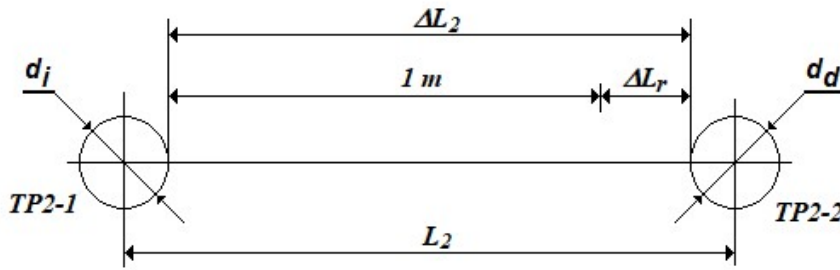


Figura 25. Prototipo TC-02-(0.4/2). Geometría entre los puertos de medición TP2 y TP5.

La medición de L_2 se realizó según el siguiente procedimiento:

- La distancia entre los centros de los orificios de los puertos de medición en la cámara de expansión se calcula según la ecuación 194:

$$L_2 = \Delta L_2 + \bar{d} = 1 \text{ m} + \Delta L_r + \bar{d} \quad \text{ecuación 194}$$

Donde:

L_2 : Distancia entre los centros de los orificios de los puertos de medición TP2-1 y TP2-2 [mm].

ΔL_2 : Distancia entre los bordes interiores de los orificios [mm].

\bar{d} : Promedio de los diámetros derecho (d_d) e izquierdo (d_i) de los orificios [mm].

- La incertidumbre estándar combinada de L_2 se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 194:

$$u_c(L_{21}) = +[u_c^2(1 \text{ m}) + u_c^2(\Delta L_r) + u_c^2(d)]^{0,5} \quad \text{ecuación 195}$$

Los resultados de las mediciones relacionadas con la distancia entre TP2-1 y TP2-2 se muestran en la Tabla 72:

Tabla 72. Prototipo TC-02-(0.4/2): distancia recorrida por la onda de choque.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v
Longitud remanente:	ΔL_r	mm	182.0	0.29	9
Longitud entre los bordes internos de los orificios de TP2-1 y TP2-2:	ΔL_2	mm	1182.0	0.41	18
Diámetro promedio del orificio (TP2):	d	mm	12.50	0.10	9
Longitud entre centros TP2-1 y TP2-2:	L_2	mm	1194.50	0.42	20

El tiempo que recorre el frente de la onda de choque la distancia L_{21} se calcula según los tiempos de activación de los sensores de los transmisores de presión instalados en TP2-1 y TP2-2:

$$\tau_2 = \tau_{2-1} - \tau_{2-2}$$

ecuación 196

Para la medición experimental del número de Mach del frente de la onda de choque, se utilizan dos transmisores de presión del tipo OMEGA PX4200-030GI [41].

El modelo estadístico del tiempo recorrido por la onda de choque se calcula según la ecuación 197:

$$\tau_{2c} = \tau_{2m} + 2(\Delta\tau_d + \Delta\tau_{inex} + \Delta\tau_D) = \tau_{2m} + 2 \sum_{l=1}^3 \Delta\tau_{2l}$$

ecuación 197

La incertidumbre estándar de la medición del tiempo de recorrido de la onda de choque se estima aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 197:

$$u_c(\tau_2) = + \left[\sum_{l=1}^3 2 u^2(\Delta\tau_{2l}) \right]^{0,5}$$

ecuación 198

4.4.3 Mejora del mecanismo de sujeción del diafragma.

A diferencia del primer prototipo (ver la Figura 16), en el TC-02-(0.4/2) se utiliza un marco (3) para instalar de manera más eficiente el diafragma (1) entre las dos juntas de goma (2):

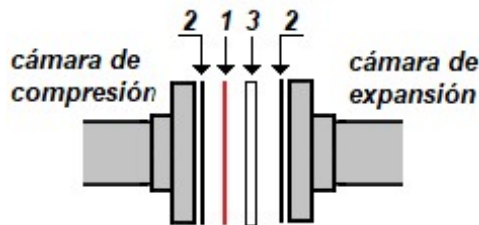


Figura 26. Prototipo TC-02-(0.4/2): colocación del diafragma en la posición P2.

Aunque el diafragma puede colocarse en el marco en dos posiciones, en el proyecto siempre se instaló hacia el lado de la cámara de compresión: posición P2, como se muestra en la Figura 27:

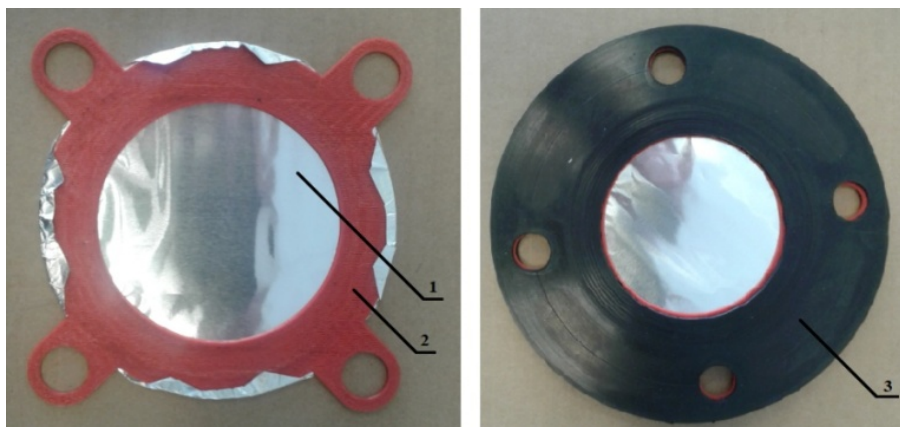


Figura 27. Prototipo TC-02-(0.4/2): montaje del diafragma.

Si bien en el prototipo TC-02-(0.4/2) se pueden instalar diafragmas de materiales de diferentes naturaleza y espesor, por razones del alcance previsto, en el proyecto solo se utilizaron láminas comerciales de aluminio de 10,2 y 14,7 μm de espesor, denominados AI1 y AI2, respectivamente.

Una vez concluido el proceso, el diafragma puede ser identificado unívocamente con la fecha y hora de la medición, de manera que pueda ser rastreado al registro de medición.

La presión de ruptura del diafragma se mide con el transmisor de presión instalado en el puerto de medición TP6 (ver la Figura 22). Una vez que estalla el diafragma por sobrepresión, sus mediciones representan la presión de la onda de rarefacción.

Terminado el proceso de registro de datos, se cierra la válvula de regulación (posición 5 - Figura 22), y con esta acción se interrumpe el suministro de aire comprimido a la cámara de compresión, pero no se desconfiguran las restricciones al flujo volumétrico.

4.4.4 Mecanismo de secado

Si bien es posible el uso de gases inertes de alta pureza como medios de desplazamiento del frente de la onda de choque, en el proyecto se utiliza el aire ambiental atrapado en la cámara de expansión del tubo de choque durante el montaje del diafragma.

Aunque la composición del aire ambiental es constante, su humedad lo desvía del comportamiento del gas ideal, por lo que se diseñó un sistema de secado mediante ciclos de llenado – vaciado de la cámara de expansión con un gas inerte y seco contenido en un cilindro a alta presión.

Como gas inerte y seco se utilizó aire de uso medicinal, que se suministra desde su respectivo cilindro a la cámara de expansión a través de la válvula de entrada (ver V1-entrada en la sección A-A de la Figura 22), y se extrae por sobrepresión con respecto a la atmosférica, mediante la válvula de salida (ver V2-salida en la Figura 22). La consideración de su comportamiento como gas ideal no es aceptable “a priori” considerando la presencia del vapor de agua. El criterio utilizado por el NPL [46, 47], basado en que las energías moleculares producidas por la generación y la reflexión de la onda de choque son significativamente menores que las energías de disociación e ionización de los gases utilizados, no aplica para el caso de aire húmedo, incluso si es “secado” a través de algún procedimiento.

En el proyecto se corrigió la desviación del comportamiento del aire secado con respecto al “ideal” por el efecto de la humedad remanente, calculando su masa molar según la ecuación 163 y reportando el correspondiente coeficiente de compresibilidad Z [51], según la ecuación 167.

Cuando $Z = 1$, el comportamiento del gas real es idéntico al del correspondiente gas ideal, sin embargo, surge la duda sobre la máxima desviación de Z que puede ser considerada aceptable, por esa razón, su valor experimental se reporta junto al parámetro de desempeño “veracidad” δ_5 .

4.5 Optimización del desempeño del prototipo de tubo de choque

Una vez establecidos los mecanismos de mejora de la operación del prototipo TC-02-(0.4/2), referidos en la sección anterior, se procedió a optimizar su influencia en los parámetros de su desempeño entre **mayo y diciembre del 2018** en el Laboratorio Doctorado en Ingeniería, ubicado en el INII.

4.5.1 Configuración del proceso de registro y medición.

La corriente eléctrica CD de salida de los transmisores de presión instalados en los puertos de medición del prototipo de tubo de choque evaluado, se midió y registró de manera simultánea, independiente y sincronizada con el sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567 [42], configurado según los siguientes criterios:

- Frecuencia de muestreo (f_m): seleccionada a través de la función “Sample rate”.

Tabla 73. Selección de la frecuencia de muestreo.

Parámetros evaluados	Símbolo	UM	Valores
Frecuencia de muestreo	f_m	KHz	20
Tiempo por muestra	$(f_m)^{-1}$	$\mu\text{s/S}$	50

- Filtro digital: no se utiliza “*ex professo*” (función “Sample rate/Filter” desactivada), por lo tanto, los resultados están afectados por el ruido de fondo.
- Inicio del registro de las mediciones.

Tabla 74. Configuración del inicio del registro de mediciones.

Configuración	Referencia
Por disparo (trigger)	Presión de estallido del diafragma

Es importante considerar que para definir el valor de la presión de estallido del diafragma se requiere de “disparos” previos para conocerla aproximadamente.

- Fin del registro de las mediciones.

Tabla 75. Configuración del fin del registro de las mediciones.

Parámetros evaluados	Configuración	Símbolo	UM	Valores
Tiempo de muestreo	Por tiempo	t_m	s	1
Cantidad de muestras	$N_m = f_{m1} \times t_m$	N_m	S	20000

- Registro de los resultados de las mediciones: se “salvan” en archivos de extensión .xlsx, para su posterior exportación a los softwares de aplicación desarrollados, según el proceso.

4.5.2 Efecto de la longitud de la cámara de expansión.

En esta etapa experimental se evalúan dos efectos importantes en el desempeño del prototipo de tubo de choque desarrollado TC-01-(0.4/2):

- El efecto de la longitud de la cámara de expansión, considerando que la relación $L_{ce}/L_{cc} = 2/0.4 = 5$ está alejada con respecto al tubo de choque TC10: $L_{ce}/L_{cc} = 1,84$.
- La distancia recorrida por el frente de la onda de choque para calcular el número de Mach.

En la Figura 28 se muestra la segunda cámara de expansión CE2 construida, igual en materiales y componentes a la primera CE1 (ver la Figura 13):

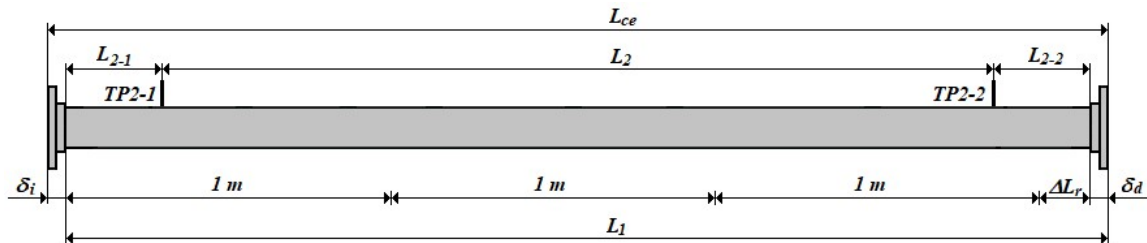


Figura 28. Prototipo TC-02-(Lcc/3). Dimensiones de la cámara de expansión.

El procedimiento de medición de las dimensiones de la cámara de expansión CE2 es similar al de la primera: CE1, adecuándose la ecuación 187 a su geometría. Los resultados de las mediciones de los parámetros geométricos de la cámara de expansión se muestran en la Tabla 76:

Tabla 76. Prototipo TC-02-(0.4/3): dimensiones de la cámara de expansión.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	V_{ef}
Longitud remanente:	ΔL_r	mm	151.0	0.29	9
Longitud entre bridas:	L_1	mm	3151.0	0.50	27
Ancho de las bridas móviles:	2δ	mm	106.99	0.04	33
Longitud total de la cámara:	L_{ce}	mm	3257.99	0.58	37

En la Figura 29 se representan las dimensiones entre los puertos de medición TP2-1 y TP2-2:

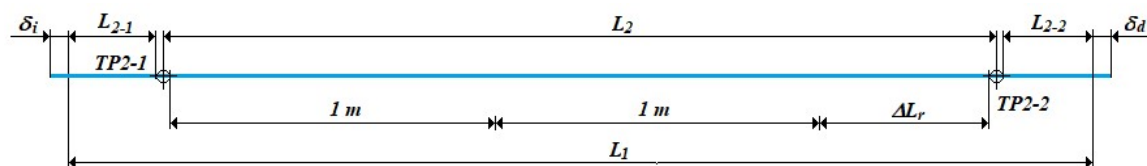


Figura 29. Prototipo TC-02-(0.4/3). Geometría entre los puertos de medición TP2-1 y TP2-2.

El procedimiento de medición de L_2 es similar, adecuándose la ecuación 194 a su geometría:

- Se calcula la distancia entre los centros de los orificios de los puertos de medición TP2-1 y TP2-2 en la cámara de expansión según la ecuación 201:

$$L_2 = 2(1 m) + \Delta L_r + d \quad \text{ecuación 199}$$

- La incertidumbre estándar combinada de L_2 se obtiene al aplicar la Ley de propagación de incertidumbres [16] a la ecuación 201:

$$u_c(L_2) = +[2u_c^2(1 m) + u_c^2(\Delta L_r)]^{0,5} \quad \text{ecuación 200}$$

Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 77:

Tabla 77. Prototipo TC-02-(0.4/3): distancia recorrida por la onda de choque.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	v
Longitud entre los bordes del orificio TP2-1 y la espiga de la brida izquierda:	L_{2-1}	mm	346.0	0.29	9
Diámetro promedio del orificio (TP2):	d	mm	11.41	0.07	9
Longitud entre los bordes del orificio TP2-2 y la espiga de la brida derecha:	L_{2-2}	mm	348.5	0.29	9
Longitud remanente:	ΔL_r	mm	433.0	0.29	9
Longitud entre centros TP2-1 y TP2-2:	L_2	mm	2444.4	0.51	29

La Tabla 78 muestra la trazabilidad de los “disparos” realizados el 28 de junio del 2018, en las instalaciones del Laboratorio Doctorado en Ingeniería-INII, en la mañana y la tarde.

Tabla 78. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de las mediciones.

Parámetros	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.4/3)		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Registro de medición	Job1_2018_06_28_10_48_36_01	Job1_2018_06_28_10_48_36_02	Job1_2018_06_28_10_48_36_03	Job1_2018_06_28_15_38_41_01	Job1_2018_06_28_15_38_41_02	Job1_2018_06_28_15_38_41_03
Fecha:	18-06-28			18-06-28		
Hora:	10:48:33	11:35:00	12:08:37	15:38:39	16:28:31	17:00:24
Tiempo entre "disparos" [mm:ss]		46:27	33:37		49:52	31:53

En la Tabla 79 se reportan los parámetros²⁶ del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, considerado en equilibrio con el aire ambiental:

Tabla 79. TC-02-(0.4/Lce): parámetros del aire ambiental.

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.4/3)		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
T_1	K	296.17	0.10	10	295.86	0.10	10
HR_1	%	70.6%	0.81%	9	71.5%	0.81%	9
P_{at}	hPa	879.94	0.15	9	877.79	0.15	9
Z	adim	0.999322	3.1E-05	17	0.999325	3.1E-05	17

En la siguiente secuencia gráfica se aprecian cualitativamente las respuestas dinámicas del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] al exponerse a una perturbación tipo escalón:

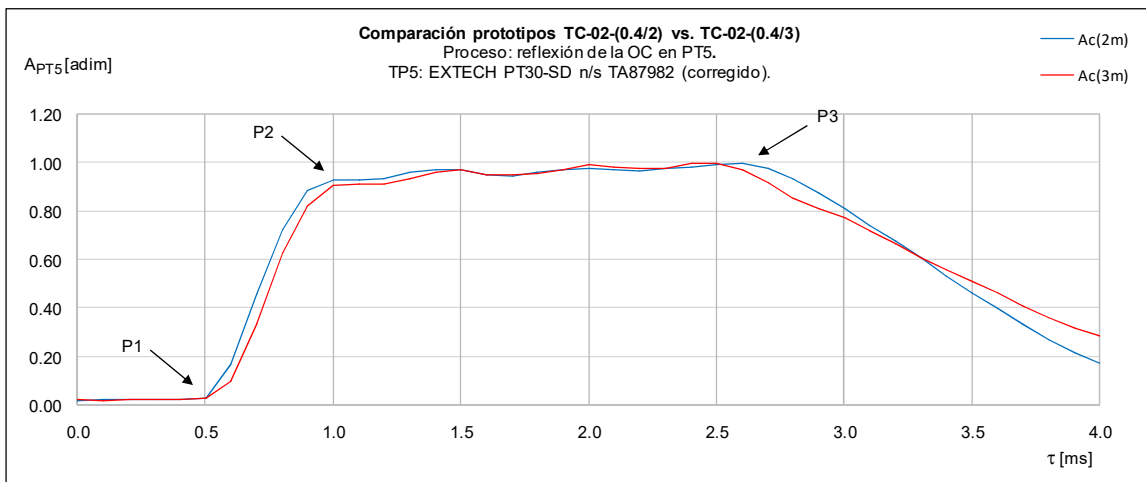


Gráfico 22. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según L_{ce} .

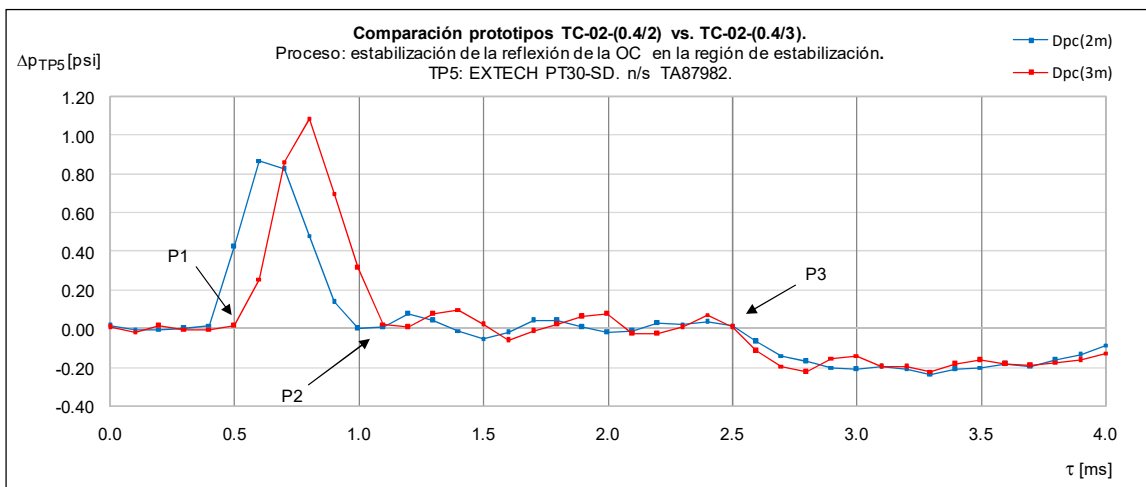


Gráfico 23. TP EXTECH PT30-SD: desempeño en la región de estabilización de P_5 .

La cuantificación de los hitos relacionados con la primera reflexión de la onda de choque, según la longitud de la cámara de expansión, se muestra en la Tabla 80:

Tabla 80. TP EXTECH PT30-SD. Precisión: comparación según L_{ce} .

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)					TC-02-(0.4/3)				
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	905.5	1.5	13	0.04	59	882.0	1.5	12	0.04	59
P_{5t}	hPa	973.0	13.8	3504	N.A		1006.8	14.1	3566	N.A	
P_{5e}	hPa	1047.1	1.5	16	1.29	52	1108.4	1.5	15	4.44	43
$\delta(P_5)$	%	7.62%	N.A				10.10%	N.A			

De la Tabla 80 se observa que:

- Las variabilidades mancomunadas, definidas por $s_p(P_{5e})$, son menores cuando L_{ce} es menor: de 1,29 hPa a 4,44 hPa.
- Utilizando aire húmedo de similares condiciones termodinámicas (ver la Tabla 79), el sesgo, definido por $\delta(P_5)$, también es menor cuando L_{ce} es menor: de 7,62 % a 10,10%.

Si se comparan los sesgos $\delta(P_{5e})$ obtenidos con el prototipo TC-02-(0.4/ L_{ce}) con respecto al prototipo TC-01-(0.4/2) (ver la Tabla 58), se aprecia una importante reducción, aproximadamente igual a la mitad: de 19,26 % al 8,86 % (promedio).

La causa de la reducción, como se previó, está en la mejora de la medición del número de Mach por la inclusión del puerto de medición TP2-2.

Tabla 81. TP EXTECH PT30-SD. Comparación del número de Mach según L_{ce} .

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.4/3)		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
L_2	mm	1194.5	0.42	20	2444.4	0.51	29
$\Delta\tau_2$	ms	3.40	0.00	10	6.90	0.00	10
a_1	m/s	345.05	1.49	19	344.88	1.48	19
a_s	m/s	351.32	0.12	9	354.26	0.07	9
M_s	adim	1.01818	0.00440	20	1.02722	0.00443	20

El número de Mach pasa de 0,985 7 en el prototipo TC-01-(0.4/2) (ver la Tabla 71) a 1,022 7 (promedio) (flujo transónico) [80] en el prototipo TC-02-(0.4/ L_{ce}), con incertidumbres estándares tipo B del mismo orden: $u_B(M_s) = 0,0044$.

Los resultados obtenidos se presentaron en el Simposio de Metrología 2018, organizado por el CENAM en octubre del 2018 en la ciudad de Querétaro, México [76] (ver el Anexo 2).

En la Tabla 82 se comparan cuantitativamente los desempeños del prototipo TC-02-(Lce) con respecto a los tiempos de ascenso (Δt_{15}) y estabilización (Δt_5):

Tabla 82. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según L_{ce} .

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.4/3)		
		y	s(y)	$v = n_d - 1$	y	s(y)	$v = n_d - 1$
Δt_{15}	ms	0.600	0.058	2	0.600	0.058	2
Δt_5	ms	1.500	0.058	2	1.400	0.058	2

Con respecto a los resultados obtenidos, se demuestra que:

- Los tiempos de ascenso de la señal de presión medida por el transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] son iguales: 0,600 ms e independientes de la longitud de la cámara de expansión.

Con respecto al prototipo TC-01-(0.4/2), el tiempo de ascenso mejoró en la mitad: de 1,319 ms (ver la Tabla 60) a 0,600 ms, y con respecto al francés TC10, se obtuvieron resultados ligeramente mejores, $\approx 6\%$: 0,600 ms vs. 0,638 ms (ver la Tabla 63).

- Los tiempos de estabilización de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque son prácticamente iguales: 1,500 ms vs. 1,400 ms, e independientes de L_{ce} .

Referente al prototipo TC-01-(0.4/2), el tiempo de estabilización mejoró $\approx 20\%$, aumentando de 1,181 ms (ver la Tabla 60) a 1,450 ms (promedio), y con respecto al prototipo francés TC10, fue mucho menor: 1,450 ms (promedio) vs. 4,232 ms (ver la Tabla 63).

En la Tabla 83 se comparan los coeficientes de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43], obtenidos en los prototipos TC-02-(0.4/Lce) y el TC10.

Tabla 83. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados del ajuste.

Parámetros de desempeño	UM	UM	$Y_{(2m)}$	$Y_{(3m)}$	$Y_{(TC10)}$
Coefficiente de amortiguamiento relativo	ζ_n	adim	0.7861	0.8019	0.7668
Frecuencia amortiguada	ω_d	rad/s	6.0797	5.2313	4.9395
Frecuencia natural angular	ω_n	rad/s	9.8354	8.7551	7.6954
Frecuencia natural lineal	f_n	ciclos/s	1.5654	1.3934	1.2248
Error de ajuste según Levenberg-Marquardt	s_a	adim	0.0738	0.0784	0.0426
	v_a	S	20	19	186

Por tanto, el tubo de choque es sensible a la longitud de la cámara de expansión y el prototipo TC-02-(0.4/2) se desempeñó mejor con respecto al prototipo TC-02-(0.4/3) cuando la longitud de la cámara de compresión y la presión de estallido del diafragma se mantienen constantes.

4.5.3 Efecto de la longitud de la cámara de compresión

En esta etapa experimental se evaluó el efecto de la longitud de la cámara de compresión (L_{cc}) en la distancia recorrida por el frente de la onda de rarefacción, y su incidencia indirecta en:

- Número de Mach.
- Tiempo de estabilización de la primera reflexión de la onda de choque.

En este sentido, en el **segundo semestre del 2018** se construyó una nueva cámara de compresión CC2, igual en materiales y componentes a la primera CC1 (ver la Figura 12), adecuándose la ecuación 185 a su geometría. Los resultados de los parámetros geométricos se muestran en la Tabla 84:

Tabla 84. Prototipo TC-02-(0.6/2): dimensiones de las cámaras de compresión.

Parámetros	Símbolo	UM	y	$u_c(y)$	V_{ef}
Longitud entre bridas:	L_1	mm	562.9	0.29	9
Ancho de las bridas móviles:	2δ	mm	106.99	0.04	33
Longitud total de la cámara:	L_{CC}	mm	669.89	0.29	10

Con la nueva relación $L_{ce}/L_{cc} = 2/0,6 = 3,3$, más cercana a la utilizada por los franceses en el tubo de choque TC10: $L_{ce}/L_{cc} = 1,84$ se realizó la validación del sistema de medición.



Figura 30. Prototipo TC-02-(0.6/2): vista general.

La Tabla 85 muestra la trazabilidad de los “disparos” realizados el 28 de junio (concordantes con los referidos en la Tabla 78), y el 6 de diciembre del 2018, en las instalaciones del Laboratorio Doctorado en Ingeniería – INII:

Tabla 85. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.

Parámetros	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.6/2)		
Diafragma	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Registro de medición	Job1_2018_06_28_10_48_36_0	Job1_2018_06_28_10_48_36_001	Job1_2018_06_28_10_48_36_002	Job1_2018_12_06_14_36_45_003	Job1_2018_12_06_14_36_45_004	Job1_2018_12_06_14_36_45_005
Fecha:	18-06-28			18-12-06		
Hora:	10:48:33	11:35:00	12:08:37	16:07:26	16:26:06	16:41:57
Tiempo entre "disparos" [mm:ss]		46:27	33:37		18:40	15:51

En la Tabla 86 se reportan los parámetros²⁶ del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, considerado en equilibrio con el aire ambiental:

Tabla 86. TC-02-(Lcc/2): parámetros del aire ambiental.

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.6/2)		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
T_1	K	296.17	0.10	10	21.81	0.10	10
HR_1	%	70.6%	0.8%	9	70.2%	0.81%	9
P_{at}	hPa	879.94	0.15	9	879.01	0.15	9
Z	adim	0.999322	3.1E-05	17	0.999320	2.7E-05	17

En el Gráfico 24 se aprecian cualitativamente las respuestas dinámicas del transmisor de presión al exponerse a una perturbación tipo escalón reproducidas en el prototipo TC-02-(Lcc/2):

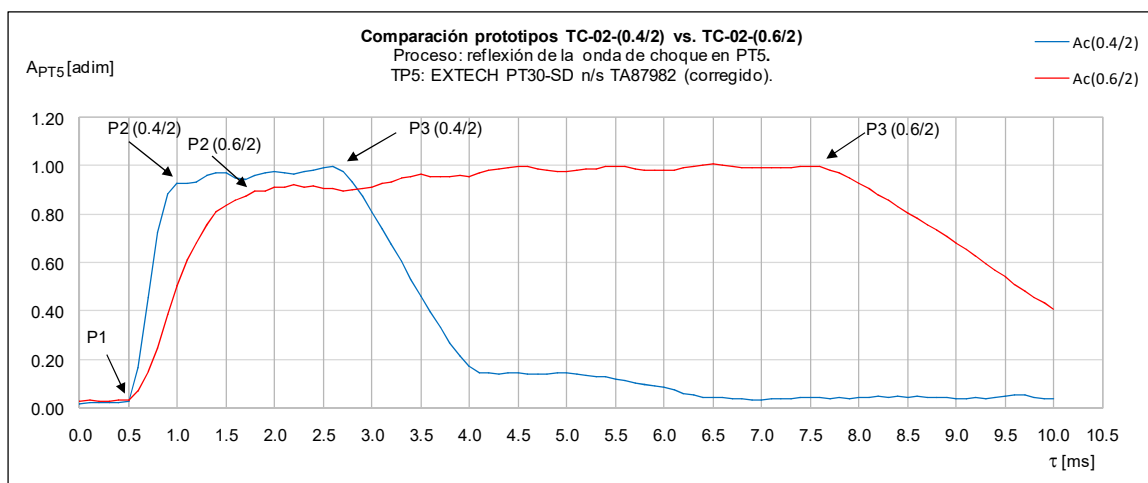


Gráfico 24. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según Lcc.

El comportamiento dinámico del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] cambió radicalmente al aumentar la longitud de la cámara de compresión (L_{cc}), manteniendo constante la longitud de la cámara de expansión ($L_{ce_{nominal}} = 2 \text{ m}$).

En la Tabla 87 se comparan cuantitativamente el desempeño del prototipo TC-02-($L_{cc}/2$) con respecto a los tiempos de ascenso ($\Delta\tau_{15}$) y estabilización ($\Delta\tau_5$).

Tabla 87. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según L_{cc} .

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)			TC-02-(0.6/2)		
		y	s(y)	$v = n_d - 1$	y	s(y)	$v = n_d - 1$
$\Delta\tau_{15}$	ms	0.600	0.058	2	0.700	0.144	2
$\Delta\tau_5$	ms	1.500	0.058	2	2.850	0.202	2

En cuanto a los resultados obtenidos, se demuestra que:

- El tiempo de ascenso de la señal de presión medida por el transmisor de presión es ligeramente menor: $100 \mu\text{s}$, y puede suponerse independiente de la longitud de la cámara de compresión.

Con respecto al prototipo francés TC10 (ver la Tabla 63) las diferencias se encuentran en el rango desde 5,96 %: ($600 \text{ vs. } 638$) μs hasta 9,72 %: ($700 \text{ vs. } 638$) μs .

- Es en los tiempos de estabilización de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque donde se aprecia la gran diferencia: ($2,850 \text{ vs. } 1,500$) ms.

Referente al prototipo francés TC10 (ver la Tabla 63) las diferencias estuvieron en el rango desde 64,55 %: ($1,500 \text{ vs. } 4,232$) ms hasta 32,66 %: ($2,850 \text{ vs. } 4,232$) ms, aunque en este último caso se alcanzó con una indeseable forma de ascenso “más suave”.

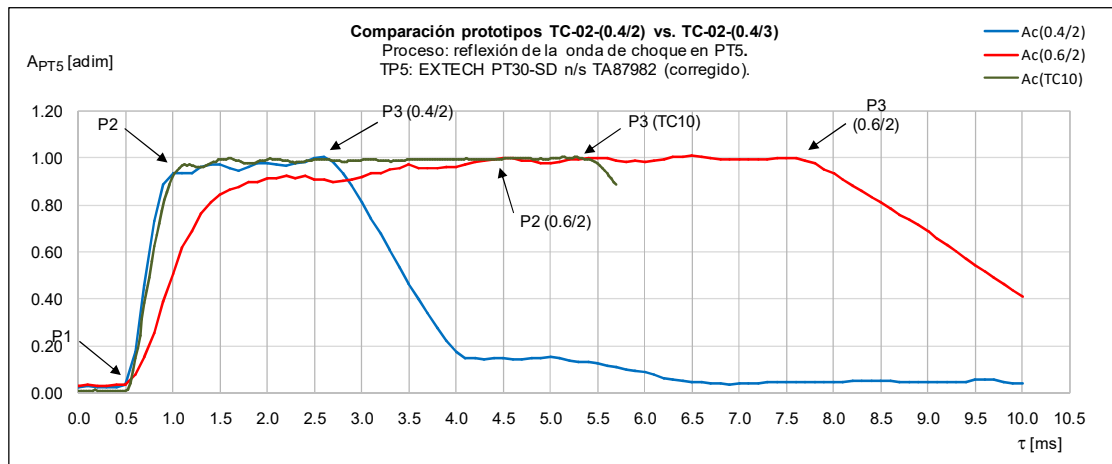


Gráfico 25. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según L_{cc} .

La Tabla 88 muestra la cuantificación de los hitos de la primera reflexión de la onda de choque:

Tabla 88. TP EXTECH PT30-SD. Precisión: comparación según Lcc.

Parámetros de desempeño	UM	TC-02-(0.4/2)					TC-02-(0.6/2)				
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	905.5	1.5	13	0.04	59	883.2	1.5	12	0.19	59
P_{5t}	hPa	973.0	13.8	3504	N.A		969.3	13.7	3442	N.A	
P_{5e}	hPa	1047.1	1.5	16	1.29	52	1071.9	1.5	20	2.13	178
$\delta(P_5)$	%	7.62%	N.A				10.59%	N.A			

Con respecto a los resultados referidos en la Tabla 88, se demuestra que:

- La presión del gas perturbado es 2,37 % mayor: 1071,9 hPa vs. 1047,1 hPa, pero inferior al 5 %, por lo que no dependen de Lcc.
- Los sesgos $\delta(P_{5e})$ dependen de Lcc: 7,62 % vs. 10,65 %.

En la Tabla 89 se comparan los coeficientes de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43], obtenidos en los prototipos TC-02-(Lcc/2) y el TC10.

Tabla 89. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración dinámica.

Parámetros de desempeño	UM	UM	$Y_{(0.4/2)}$	$Y_{(0.6/2)}$	$Y_{(TC10)}$
Coefficiente de amortiguamiento relativo	ζ_n	adim	0.7861	0.7843	0.7668
Frecuencia amortiguada	ω_d	rad/s	6.0797	4.9616	4.9395
Frecuencia natural angular	ω_n	rad/s	9.8354	7.9974	7.6954
Frecuencia natural lineal	f_n	ciclos/s	1.5654	1.2728	1.2248
Error de ajuste según Levenberg-Marquardt	s_a	adim	0.0738	0.0939	0.0426
	v_a	S	20	59	186

Con respecto a los resultados de la Tabla 89 se demuestra que la “forma más suave” del ascenso en el prototipo TC-02-(0.6/2) hasta alcanzar el período de estabilización:

- No afecta prácticamente el amortiguamiento relativo: 0,786 1 vs. 0784 3, que representa 0,23 % << 5 %.
- Sí afecta la frecuencia natural del sistema de medición: de 9,835 4 rad/s a 7,997 4 rad/s, que representa el 18,69 % >> 5 %.

En este sentido, utilizar una cámara de expansión de longitud menor, si bien influye en la frecuencia natural del sistema porque el efecto resonante de la cámara de medición del transmisor de presión es más importante, se compensa con un error de ajuste menor según Levenberg-Marquardt: de 0,073 8 vs. 0,093 9.

En general, la utilización de un sistema de adquisición de datos con alta frecuencia de muestreo ($f_m = 20 \text{ kHz}$), más que la frecuencia de Nyquist [13], responsable de la calidad de la reconstrucción digital de la señal analógica de salida del transmisor de presión, es fundamental para identificar las diferencias del comportamiento dinámico del transmisor de presión.

4.5.4 Efecto de la posición del puerto TP2-2

En la cámara de expansión CE2, de mayor longitud que la CE1: 3 471,97 mm vs. 2 233,40 mm, se colocaron inicialmente los puertos de medición TP2-1 y TP2-2 (ver la Figura 28), respetando la distancia existente entre TP2-2 y TP5 ($L_2 = 354,75 \text{ mm}$), establecida en la cámara de expansión CE1 (ver la Figura 13).

En el Gráfico 26 se aprecia la respuesta del transmisor de presión instalado en el puerto TP2-2 por el efecto perturbador de la primera reflexión de la onda de choque en la presión del gas perturbado:

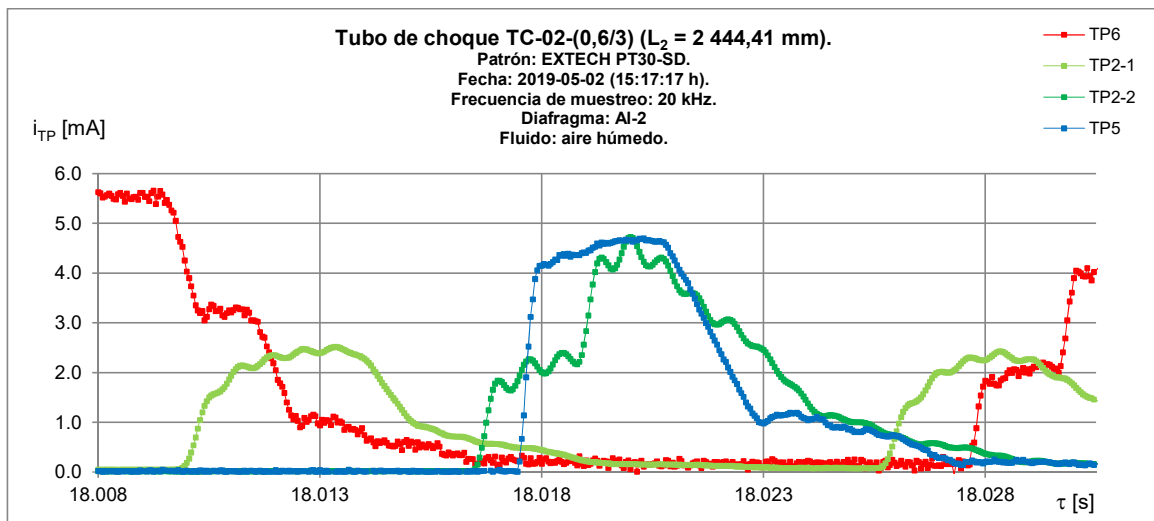


Gráfico 26. TC-02-(0.6/3). Efecto de la onda reflejada en la medición de p2.

Si bien en el proyecto no se utilizan los puertos TP2 para caracterizar la respuesta dinámica del transmisor de presión evaluado, sino el TP5, es deseable corregir el efecto de la primera reflexión de la onda de choque, porque permitiría utilizar las mediciones de presión p_{2-1} y p_{2-2} como criterio de control metrológico del proceso de calibración dinámica.

En la Figura 31 se muestra la nueva configuración, reubicando el puerto TP2-2 a la misma distancia $L_2 = 1 194,50 \text{ mm}$ de la configuración CE1 (ver la Figura 24) para medir el tiempo de desplazamiento del frente de la onda de choque, y corregir el efecto indeseable de la onda de choque reflejada en la presión medida en el puerto TP2-2:

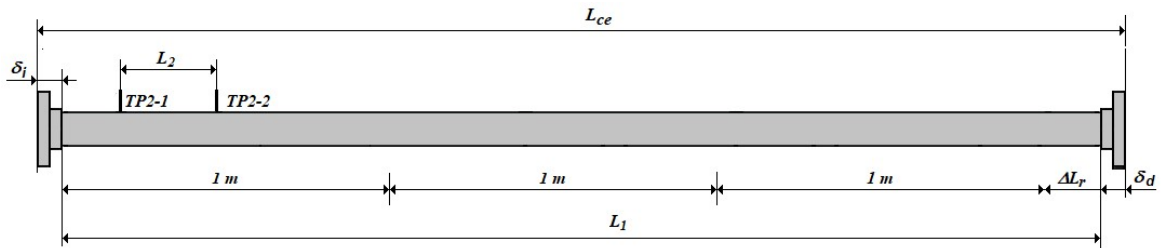


Figura 31. Prototipo TC-02-(Lcc/3). Reubicación del puerto de medición TP2-2.

Los resultados obtenidos demuestran cómo la reubicación del puerto TP2-2 permite desplazar en tiempo la llegada de la primera reflexión de la onda de choque, de manera que la respuesta del transmisor de presión instalado en el puerto TP2-2, está libre del efecto perturbador de la misma:

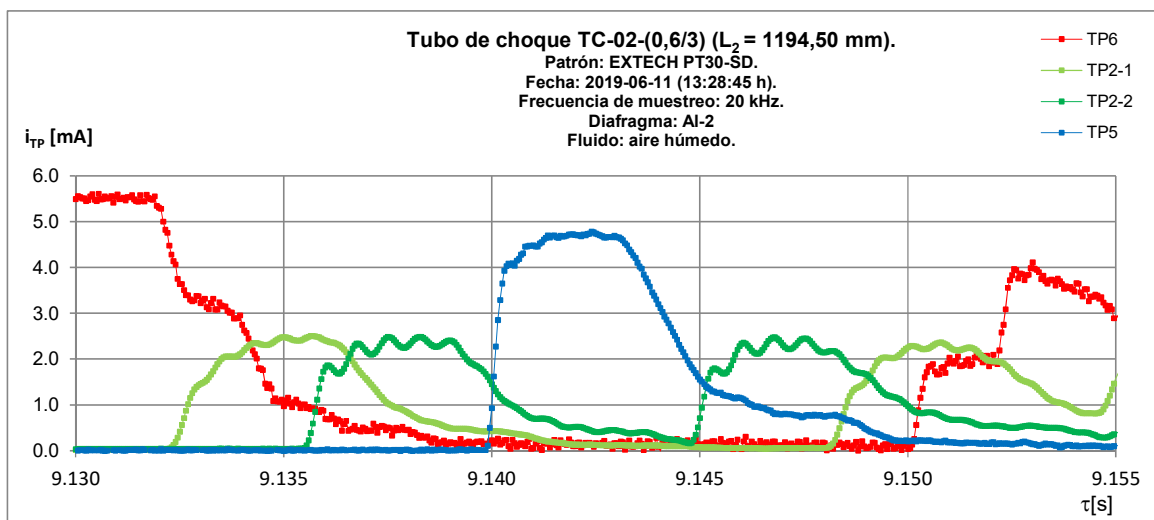


Gráfico 27. TC-02-(0.6/3). Efecto de la onda reflejada en la medición de p2.

4.5.5 Efecto del espesor del diafragma

Es lógico que al aumentar el espesor del diafragma, las presiones de estallido y del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque deben aumentar, sin embargo, ¿se mantendrán los parámetros ajustados de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43], determinados experimentalmente en el prototipo TC-02-(0.6/2)? Para responderla, se realizó una “corrida” de tres disparos en el TC-02-(0.6/2), utilizando el diafragma Al³² de 14,7 μm de espesor, instalado según la posición 2 (ver la Figura 26).

La Tabla 90 muestra la trazabilidad de los “disparos” realizados el 8 de enero del 2019 en las instalaciones del Laboratorio Doctorado en Ingeniería-INII, y las del 6 de diciembre del 2018.

³² El espesor del diafragma Al1, igual a 10,2 μm , es 30,61 % menor comparativamente (ver la sección 4.4.3).

Tabla 90. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de las mediciones.

Parámetros	Diafragma P2AI1			Diafragma P2AI2		
Diafragma	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Registro de medición	Job1_2018_12_06_14_36_45_003	Job1_2018_12_06_14_36_45_004	Job1_2018_12_06_14_36_45_005	Job1_2019_01_08_12_32_49	Job1_2019_01_08_12_32_49_001	Job1_2019_01_08_13_48_02
Fecha:	18-12-06			19-01-08		
Hora:	16:07:26	16:26:06	16:41:57	12:32:42	13:06:06	13:48:01
Tiempo entre "disparos" [mm:ss]		18:40	15:51		33:24	41:55

En la Tabla 91 se reportan comparativamente, los parámetros²⁶ del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, considerado en equilibrio con el aire ambiental:

Tabla 91. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.

Parámetros de desempeño	UM	Diafragma P2AI1			Diafragma P2AI2		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
T_1	°C	21.81	0.10	10	21.31	0.10	10
HR_1	%	70.2%	0.81%	9	70.8%	0.81%	9
P_{at}	hPa	879.01	0.15	9	880.06	0.15	9
Z	adim	0.999320	2.7E-05	17	0.999320	2.6E-05	17

En el Gráfico 28 se aprecia que las respuestas dinámicas del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] al exponerse a una perturbación tipo escalón reproducida en el prototipo TC-02-(0.6/2), no difieren cualitativamente.

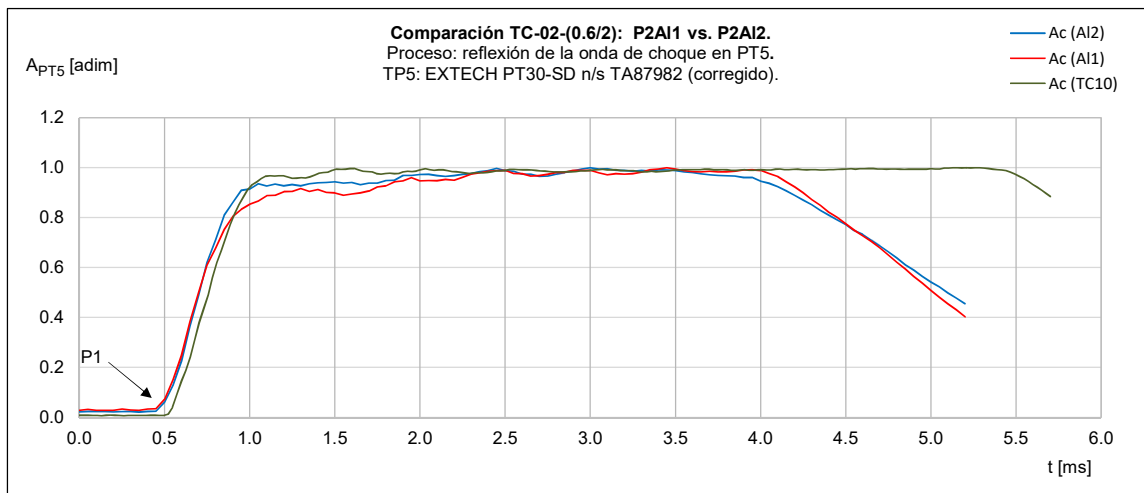


Gráfico 28. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según espesor del diafragma.

En la siguiente secuencia de tablas se muestran comparativamente la cuantificación de los hitos relacionados con la expansión de la onda de choque en el prototipo TC-02-(0.6/2):

Tabla 92. TP EXTECH PT30-SD. TP2: comparación según el espesor del diafragma.

Parámetros de desempeño	UM	Diafragma P2AI1			Diafragma P2AI2		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
P_{1e}	hPa	883.3684	1.15	14	886.1137	1.15	14
P_{2e}	hPa	974.3642	1.16	14	1041.982	1.16	15
M_s	adim	1.02022	0.00441	20	1.02109	0.00441	20

Tabla 93. TP EXTECH PT30-SD. TP5: comparación según el espesor del diafragma.

Parámetros de desempeño	UM	Diafragma P2AI1					Diafragma P2AI2				
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	883.2	1.5	12	0.19	59	886.6	1.5	12	0.08	59
P_{5e}	hPa	1071.9	1.5	20	2.13	178	1225.4	1.5	18	3.33	173

Tabla 94. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según diafragma.

Parámetros de desempeño	UM	Diafragma P2AI1			Diafragma P2AI2		
		y	s(y)	$v = n_d - 1$	y	s(y)	$v = n_d - 1$
$\Delta\tau_{15}$	ms	0.700	0.144	2	0.550	0.058	2
$\Delta\tau_5$	ms	2.850	0.202	2	2.950	0.100	2

Con respecto a los resultados obtenidos, se demuestra que la variación:

- Del número de Mach es despreciable: de 1,020 22 a 1,021 09 (0.09 % << 5 %).
- De la presión del aire húmedo perturbado por la primera reflexión de la onda de choque es importante: 14,32 %, de 1 071,9 hPa a 1 225,4 hPa, valor esperado para satisfacer el alcance del proyecto.
- Del retardo de la respuesta del transmisor de presión ($\Delta\tau_{15}$) es importante: 150 μ s, de 0,700 ms a 0,550 ms (21,43 % >> 5 %).
- Del tiempo de estabilización no es importante: 100 μ s, de 2,850 ms a 2,950 ms (3,51 % < 5 %).

La Tabla 95 muestra comparativamente los parámetros ajustados de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43] cuando se aumenta el espesor del diafragma:

Tabla 95. EXTECH PT30-SD n/s TA87982: parámetros ajustados de la ecuación característica.

Parámetros de desempeño	UM	UM	$Y_{(AI1)}$	$Y_{(AI2)}$	$Y_{(TC10)}$
Coefficiente de amortiguamiento relativo	ζ_n	adim	0.7843	0.7858	0.7668
Frecuencia amortiguada	ω_d	rad/s	4.9616	5.1771	4.9395
Frecuencia natural angular	ω_n	rad/s	7.9974	8.3712	7.6954
Frecuencia natural lineal	f_n	ciclos/s	1.2728	1.3323	1.2248
Error de ajuste según Levenberg-Marquardt	s_a	adim	0.0939	0.0652	0.0426
	v_a	S	59	68	186

De la Tabla 95 se observa que al aumentar el espesor del diafragma, el desempeño dinámico del transmisor de presión con respecto a los valores de referencia del prototipo francés TC10:

- El coeficiente de amortiguamiento relativo ζ : cambia 2,48 % < 5 %.
- La frecuencia natural amortiguada $\widehat{\omega}_n$: cambia 8,78 % > 5 %.
- Al aumentar la energía asociada a la expansión de la onda de choque, el modelo ajustado según Levenberg-Marquardt explica “mejor estadísticamente” la distribución experimental, como lo demuestra el error de ajuste, disminuyendo desde 0,093 9 a 0,065 2.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de calcular los coeficientes de la ecuación característica del transmisor de presión evaluado a las presiones de operación. En este sentido, se pueden construir diafragmas de aluminio de diferentes espesores, disponibles de manera normalizada en el mercado.

4.5.6 Efecto de la humedad del aire

En la Figura 32 se muestra el mecanismo de secado del prototipo TC-02-(0.6/2):



Figura 32. TC-02-(0.6/2). Sistema de secado del aire en la cámara de expansión.

El aire seco de uso medicinal contenido en un cilindro fluye a la cámara de expansión del prototipo TC-02-(0.6/2) a través de la válvula de entrada (V1-entrada en la sección A-A), y se extrae por sobrepresión mediante la válvula de salida (V2-salida).

Para evaluar el proceso de secado, se registró la reducción de la humedad del aire introduciendo un datalogger HOBO U12-012 [79] 160 mm en el interior de la cámara de expansión (ver la Figura 33), programado con una frecuencia de muestreo $f_m = 10 \text{ Hz}$, y posteriormente, se realizan “disparos” para evaluar su desempeño dinámico.

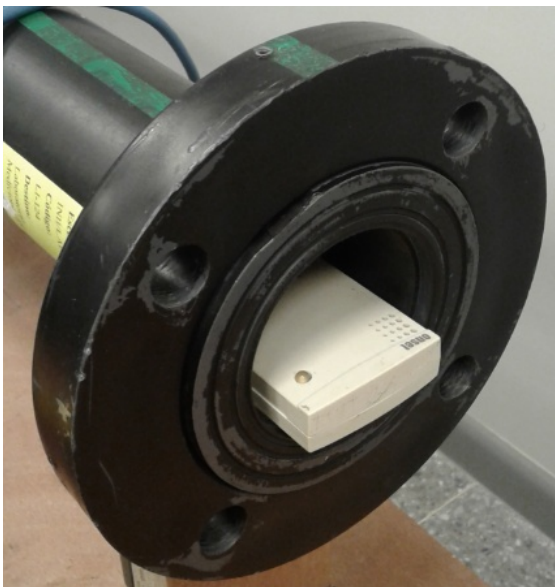


Figura 33. TC-02-(0.6/2). Colocación del datalogger en la cámara de expansión.

En el Gráfico 29 se observa el proceso continuo de secado mediante $n_c = 30$ ciclos de llenado-vaciado de la cámara de expansión del prototipo TC-02-(0.6/2):

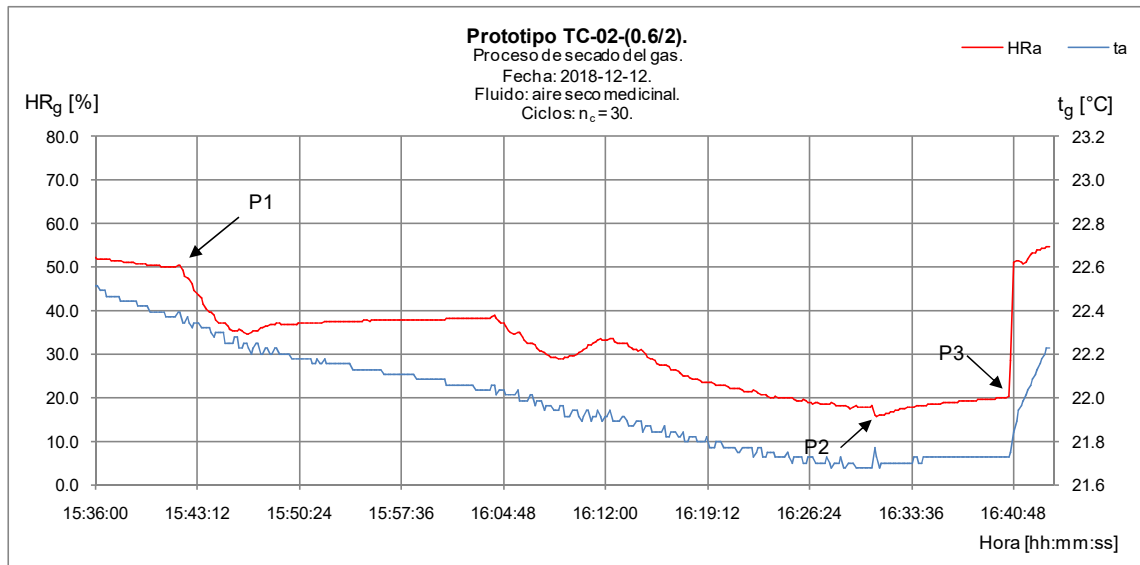


Gráfico 29. TC-02-(0.6/2). Proceso de secado del aire en la cámara de expansión.

El secado del aire atmosférico en la cámara de expansión comenzó a las 15:29 h (P1) y terminó a las 16:31 (P2), realizándose un “disparo” de prueba (P3) a las 16:40 h. La cuantificación de los hitos del proceso de secado se muestra en la Tabla 96:

Tabla 96. TC-02-(0.6/2). Proceso de secado del aire en la cámara de expansión.

Evento	Símbolo	Punto	Valor	t_g [°C]	HR_g [%]
Hora de inicio del secado	H_i	P1	15:29:30	22.82	68.08
Hora final del secado	H_f	P2	16:31:10	21.72	15.71
Hora del "disparo"	H_d	P3	16:40:30	21.72	20.11

Los resultados del secado del aire en la cámara de expansión se muestran en la Tabla 97:

Tabla 97. TC-02-(0.6/2). Resultados del secado del aire en la cámara de expansión.

Parámetros	Símbolo	UM	Valor
Tiempo de secado del aire húmedo	τ_g	mm:ss	01:01:40
Disminución de la humedad del gas	ΔHR_g	%	-52.37
Disminución de la temperatura del gas	Δt_g	°C	-1.10

En aproximadamente 1 h se redujo la humedad del aire en la cámara de expansión en 52,37 %: desde 68,08 % hasta 15,71 %, observándose una disminución de la temperatura de -1,10 °C: desde 22,82 °C hasta 21,72 °C, resultado de la expansión del aire seco.

Si se considera que el proceso descrito se realiza con el diafragma instalado, es importante controlar tanto la presión de llenado, que debe mantenerse por debajo en al menos 1 psi de la presión de ruptura del diafragma, como el tiempo de llenado, para evitar picos de presión que pudiesen dañar el diafragma antes del “disparo”.

La Tabla 98 muestra la trazabilidad de los “disparos” realizados el 28 de junio y el 6 de diciembre del 2018 en las instalaciones del Laboratorio Doctorado en Ingeniería-INII.

Tabla 98. TP EXTECH PT30-SD: identificación de los registros de mediciones.

Parámetros	Aire húmedo (AH)			Aire seco (AS)			
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D4
Registros de medición	Job1_2018_12_06_14_36_45_003	Job1_2018_12_06_14_36_45_004	Job1_2018_12_06_14_36_45_005	Job1_2018_12_13_13_49_16_001	Job1_2018_12_13_13_49_16_002	Job1_2018_12_13_13_49_16_003	
Fecha:	18-12-06			18-12-13			
Hora:	16:07:26	16:26:06	16:41:57	13:49:15	15:10:08	16:04:46	17:31:55
Tiempo entre "disparos" [h:mm:ss]		00:18:40	00:15:51		01:20:53	00:54:38	01:27:09

El tiempo entre “disparos” aumenta cuando se realiza el secado del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión del prototipo TC-02-(0.6/2).

La Tabla 99 muestra las condiciones del aire ambiental²⁶ durante las pruebas realizadas para evaluar el efecto del secado en los parámetros de desempeño del prototipo TC-02-(0.6/2):

Tabla 99. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.

Parámetros de desempeño	UM	Aire húmedo (AH)			Aire seco (AS)		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
T_1	°C	21.81	0.10	10	21.72	0.10	10
HR_1	%	70.2%	0.81%	9	20.1%	0.81%	9
P_{at}	hPa	879.01	0.15	9	878.68	0.15	9
Z	adim	0.999320	2.7E-05	17	0.999253	2.4E-06	23

La baja humedad relativa del aire ambiental, asociada a la época del año, colaboró en el proceso de secado, pero la temperatura y humedad relativa del aire en el interior de la cámara de expansión corresponden a los medidos previamente por el datalogger HOBO U12-012 [79], mientras que la presión atmosférica es medida por el barómetro [44].

El valor del factor de compresibilidad del aire, como consecuencia del proceso de secado del aire atrapado en la cámara de expansión, bajó en promedio 0,001 %.

En el Gráfico 30 se aprecian cualitativamente las respuestas dinámicas del transmisor de presión al exponerse a una perturbación tipo escalón, reproducidas en el prototipo TC-02-(0.6/2).

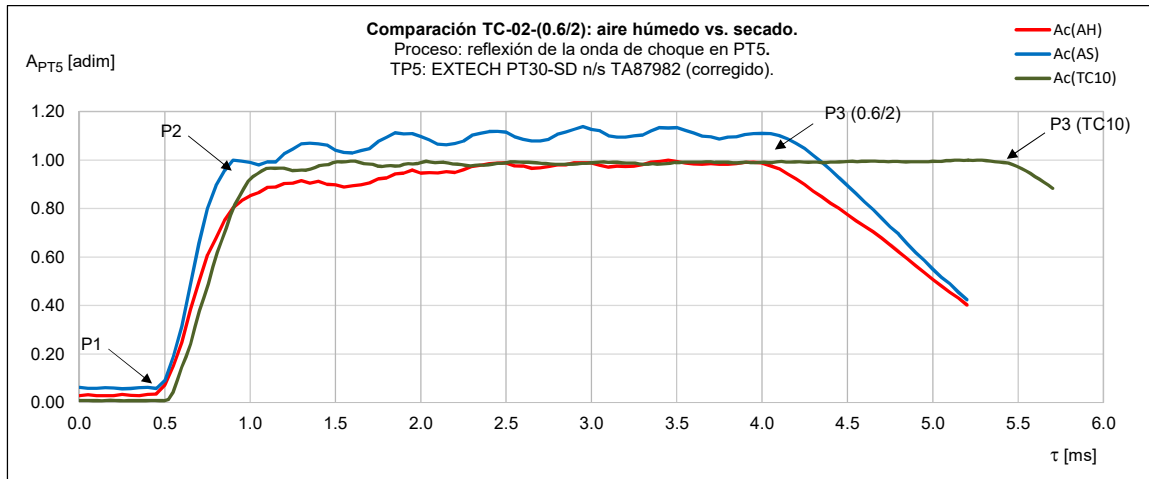


Gráfico 30. TP EXTECH PT30-SD: desempeño según la humedad del aire.

En la Tabla 100 se compara cuantitativamente el desempeño del prototipo TC-02-(0.6/2), al utilizarse como gas de operación en la cámara de expansión el aire secado:

Tabla 100. TP EXTECH PT30-SD. Ascenso y estabilización: comparación según la humedad.

Parámetros de desempeño	UM	Aire húmedo (AH)			Aire seco (AS)		
		y	s(y)	v = n _d - 1	y	s(y)	v = n _d - 1
$\Delta\tau_{15}$	ms	0.700	0.144	2	0.850	0.000	3
$\Delta\tau_5$	ms	2.850	0.202	2	2.700	0.065	3

Con base en los resultados obtenidos, se demuestra que:

- El tiempo de ascenso de la señal de presión aumentó $\approx 18\%$: 350 μ s.

Con respecto al prototipo francés TC10, los resultados son mayores $\approx 33\%$: 850 μ s vs. 638 μ s (ver la Tabla 63).

- El tiempo de estabilización de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque disminuyó $\approx 13\%$: 2,850 ms vs. 2,700 ms.

Referente al prototipo francés TC10, los resultados son menores $\approx 36\%$: 2,700 ms vs. 4,232 ms (ver la Tabla 63), manteniendo la forma de “ascenso más suave”.

En la Tabla 101 se muestran los parámetros que caracterizan el comportamiento dinámico del transmisor de presión EXTECH PT30-SD [43]:

Tabla 101. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: resultados de la calibración dinámica.

Parámetros de desempeño	UM	UM	Y(AH)	Y(AS)	Y(TC10)
Coefficiente de amortiguamiento relativo	ζ_n	adim	0.7843	0.7923	0.7668
Frecuencia amortiguada	ω_d	rad/s	4.9616	4.7014	4.9395
Frecuencia natural angular	ω_n	rad/s	7.9974	7.7059	7.6954
Frecuencia natural lineal	f_n	ciclos/s	1.2728	1.2264	1.2248
Error de ajuste según Levenberg-Marquardt	s_a	adim	0.0939	0.0904	0.0426
	v_a	S	59	59	186

De la Tabla 101 se concluye que los coeficientes de ajuste de la ecuación característica del transmisor de presión, incluyendo su calidad de ajuste numérico por Levenberg-Marquardt, no mejoran por encima del 5 %, demostrando su independencia de la humedad del aire.

La Tabla 102 muestra la cuantificación de la exactitud relacionada con la medición de la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque (P_5):

Tabla 102. TC-02-(0.6/2). Exactitud de P_5 : comparación según la humedad del aire.

Parámetros de desempeño	UM	Aire húmedo (AH)					Aire seco (AS)				
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p	y	$u_B(y)$	v_{ef}	$s_p(y)$	v_p
P_{1e}	hPa	883.2	1.5	12	0.19	59	882.9	1.5	12	0.19	79.0
P_{5t}	hPa	969.3	13.7	3442	N.A		1042.9	14.6	3684	N.A	
P_{5e}	hPa	1071.9	1.5	20	2.13	178	1072.1	1.5	20	1.33	253.0
$\delta(P_5)$	%	10.59%	N.A				2.80%	N.A			

La Tabla 102 demuestra que el secado del aire, cuando la geometría del prototipo de tubo de choque es la misma, en este caso la correspondiente al TC-02-(0.6/2), es eficaz para reducir el sesgo del comportamiento experimental con respecto al ideal: de 10,59 % a ¡2,80 %!

La reducción del sesgo a 2,80 % está asociada al efecto del secado del aire húmedo en la calidad de la medición del número de Mach, estimada en la reducción notable del sesgo de la medición indirecta de la presión P_{2t} (ver ecuación 168), como se aprecia en la Tabla 103.

En este sentido, se confirma la importancia de las mediciones de presión p_{2-1} y p_{2-2} , una vez reubicado el puerto de medición TP2-2 como se establece en la sección 4.5.4, para utilizar su diferencia como otro criterio de control metrológico del proceso de calibración dinámica.

Tabla 103. Exactitud de P_2 : comparación según la humedad del aire.

Parámetros de desempeño	UM	Aire húmedo (AH)			Aire seco (AS)		
		y	$u_B(y)$	v_{ef}	y	$u_B(y)$	v_{ef}
P_{1e}	hPa	883.37	1.15	14	887.27	1.15	14
P_{2t}	hPa	925.48	9.27	1719	962.37	9.60	1842
P_{2e}	hPa	974.36	1.16	14	979.58	1.16	14
$\delta(P_2)$	%	5.28%	N.A		1.79%	N.A	
M_s	adim	1.02022	0.00441	20	1.03564	0.00447	20

4.5.7 Estimación de la desviación del comportamiento ideal del aire húmedo

El proceso de secado del aire húmedo utilizando aire seco de uso medicinal demostró la reducción notable del sesgo en la reproducción de la presión P_5 , valor de referencia en el proceso de calibración dinámica del transmisor de presión.

En la sección 4.2.2.8 se estableció el procedimiento de corrección de la masa molar del aire secado y el coeficiente de compresibilidad Z , como criterio termodinámico para estimar la desviación de su comportamiento con respecto al gas ideal.

El secado del aire atrapado en la cámara de expansión confirmó la disminución de Z (Tabla 99):

$$\Delta Z_{secado} = \frac{(\bar{Z}_{AH} - \bar{Z}_{AS})}{\bar{Z}_{AS}} 100\% = \frac{(0,999\ 320\ 0 - 0,999\ 309\ 6)}{0,999\ 309\ 6} 100\% \cong 0,001\ \%$$

Sin embargo, con respecto a la referencia: $Z_{ref} = 1$, el error relativo es de dos órdenes mayor:

$$\Delta Z_{ref} = \frac{(\bar{Z}_{AS} - \bar{Z}_{ref})}{\bar{Z}_{ref}} 100\% = \frac{(0,999\ 309\ 6 - 1)}{1} 100\% \cong 0,069\ \%$$

Es decir, un contenido de vapor de agua de 69 partes por mil en el aire secado es responsable aparente de una desviación de la expansión isentrópica del 2,80 % (ver δP_5 en Tabla 102).

El uso del término “aparente” se justifica porque es posible otra causa en la desviación del comportamiento del aire secado con respecto al ideal, y es la fricción del frente de la onda de choque en las paredes interiores del tubo de la cámara de expansión.

Si no hay fricción, el frente de la onda de choque es normal, por lo tanto, independientemente de la posición del puerto de medición TP5 en la brida ciega de la cámara de expansión, el tiempo de activación del sensor de presión será el mismo.

Para verificar tal hipótesis, se introdujeron dos puertos de medición en la brida ciega: uno en el centro (posición que ocuparía rutinariamente el transmisor de presión patrón), y el otro en la periferia, que se rotaría, como se indica en la Figura 34:

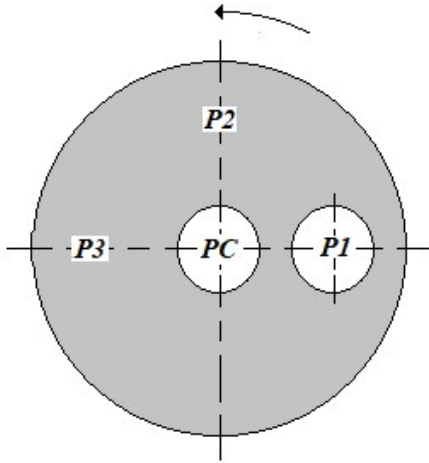


Figura 34. TC-02-(0.6/2). Puerto de medición TP5: evaluación de los tiempos de activación.

La Tabla 104 muestra la trazabilidad de los disparos realizados el 17 de enero del 2019, en las instalaciones del Laboratorio Doctorado en Ingeniería-INII.

Tabla 104. TP EXTECH PT30-SD n/s TA87982: identificación de los registros de mediciones.

Parámetros	Valores			
	P1	P2	P3	PC
Diafragma				
Registros de medición	Job1_2019_0 1_17_13_26_ 22_001	Job1_2019_0 1_17_13_26_ 22_002	Job1_2019_0 1_17_13_26_ 22_003	Job1_2019_0 1_17_13_26_ 22_004
Fecha:	19-01-17			
Hora:	13:54:44	14:42:02	15:09:13	15:35:22
Tiempo entre "disparos" [mm:ss]		47:18	27:11	26:09

En la Tabla 105 se reportan los parámetros²⁶ del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, considerado en equilibrio con el aire ambiental:

Tabla 105. TC-02-(0.6/2): parámetros del aire ambiental.

Parámetros	Valores			
	P1	P2	P3	PC
Posición				
$t_{\text{aire}} [^{\circ}\text{C}]$	21.1	21.2	21.3	21.4
$HR_{\text{aire}} [\%]$	68.0%	67.2%	67.3%	67.0%
$P_{\text{at}} [\text{hPa}]$	879.6	879.2	879.0	879.0
$Z [\text{adim}]$	0.9993145	0.9993133	0.9993137	0.9993131

Los resultados obtenidos en condiciones de precisión intermedia (tiempo promedio entre “disparos” igual a ≈ 33 min), se muestran en el Gráfico 31:

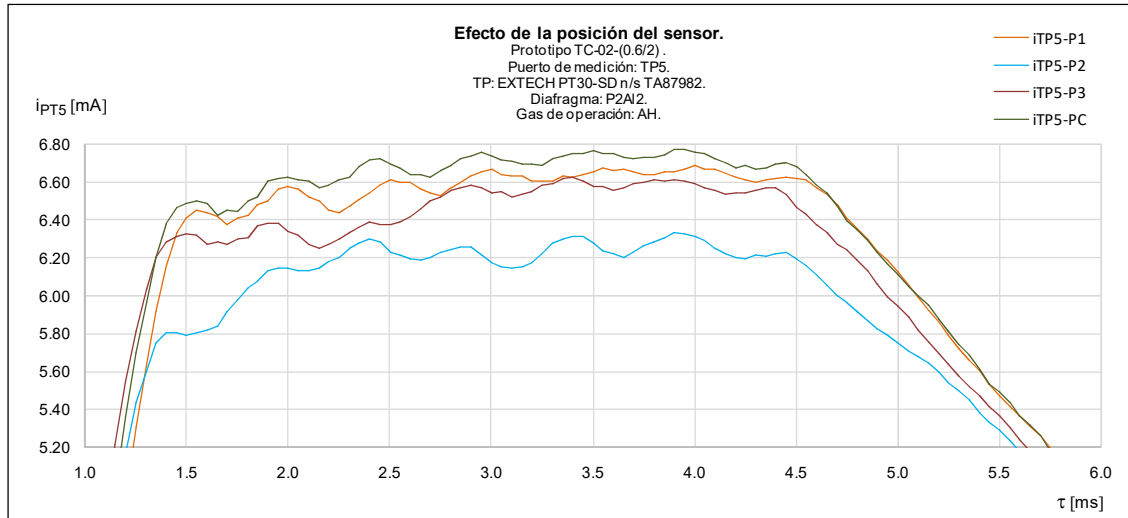


Gráfico 31. TP EXTECH PT30-SD: efecto de su posición en el puerto de medición TP5.

La Tabla 106 muestra las diferencias de las mediciones de la presión entre la posición central y las periféricas (Δ_{PC-P_i}), con respecto a la presión promedio del gas perturbado medida en PC (p_{5e}):

Tabla 106. TC-02-(0.6/2). TP5: diferencias de presión con respecto a la posición central.

Diferencias	p_{5e} [psi]	Δ_{PC-P1}	Δ_{PC-P2}	Δ_{PC-P3}
Máximas	5.20	-0.2%	-14.0%	-3.9%
Promedios	5.01	-3.3%	-17.8%	-7.1%
Mínimas	4.54	-6.6%	-25.0%	-12.9%

Los resultados obtenidos demuestran que la presión del gas perturbado medida en la posición central siempre es mayor que las mediciones perimétricas, afectadas por la fricción con la superficie interna del tubo de la cámara de expansión (por esa razón el signo negativo de las diferencias porcentuales).

El resultado obtenido demuestra que el aire húmedo como medio de transmisión de la onda de choque es responsable de la desviación de su comportamiento del gas ideal, por tanto, es importante realizar el secado del aire atmosférico atrapado para reducir el sesgo.

5 Las mediciones de las señales periódicas de presión: el tercer problema

5.1 Generalidades

Una vez calculados los coeficientes de la ecuación diferencial característica $\hat{\omega}_n$ y $\hat{\zeta}$ del sistema de medida de presión (ver la ecuación 12), con la exactitud experimental establecida, entonces en principio, es posible predecir su comportamiento ante una perturbación periódica.

Como se demostró en la sección 2.2.6, si la perturbación a la que es sometido un transmisor de presión es sinusoidal, su respuesta tendrá la misma forma, aunque la magnitud y fase pueden ser notablemente diferentes con respecto a las de la perturbación.

Este hecho coloca a las perturbaciones sinusoidales en una posición única en la calibración dinámica de todos los tipos de transductores de presión, y brinda a los experimentadores una idea de la importancia física del análisis de Fourier y el concepto de espectros de frecuencia [15]. Sin embargo, lograr reproducir perturbaciones sinusoidales perfectas es prácticamente imposible en el ámbito mecánico, pero si la perturbación reproducida es periódica y puede representarse por series de Fourier (ver la sección 2.2.7), entonces, la salida del transmisor de presión evaluado también puede ser representada por estas mismas sinusoides³³ aunque modificados en amplitud y fase: este constituye el **tercer problema** a resolver en el proyecto.

Cada uno de las sinusoides es detectado y mostrado por el transmisor de presión como si estuviera solo (principio de superposición) pero la función de respuesta es la suma de las sinusoides de salida [15].

Las funciones periódicas específicas usuales en la calibración dinámica de los transmisores de presión son las funciones sinusoidales, de onda cuadrada y de impulso, y muchos dispositivos especiales se han desarrollado para su reproducción [1, 5, 15].

Considerando que las aplicaciones de interés del proyecto están en el rango de baja amplitud y frecuencia, típicos del oleaje gravitacional (ver la Tabla 2), seguidamente se describen los generadores periódicos de presión basados en válvulas rotatorias, así como los intentos de desarrollar generadores periódicos de presión como patrones primarios.

³³ Es decir, la forma de la respuesta se mantiene.

5.2 Generadores de válvulas rotatorias

Los generadores de perturbaciones periódicas de presión basados en válvulas rotatorias, son generadores de masa variable en un volumen fijo, definido por la cámara entre el transductor de presión bajo prueba y el mecanismo de la válvula giratoria.

El diseño del generador permite generar pulsos de presión cuadrados por conmutación entre dos valores de la presión suministrada al transmisor de presión, que modifica periódicamente el flujo másico del fluido que entra al volumen fijo de la cámara [1].

En la Figura 35 se muestra la sección transversal del primer generador de perturbaciones periódicas de presión basado en una válvula rotatoria [15].

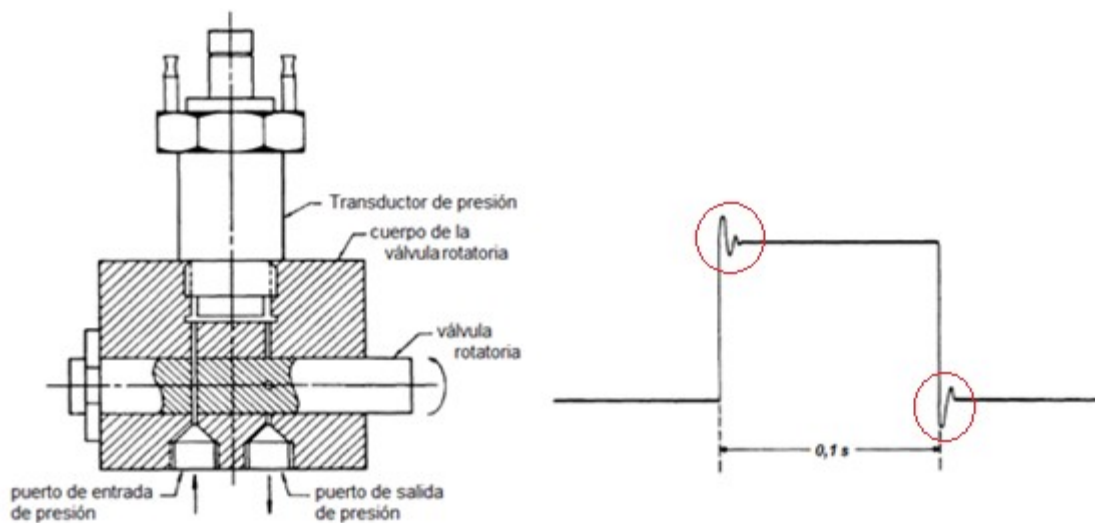


Figura 35. GPP de Hermann-Stiefelmeyer: sección de la válvula rotatoria y onda generada.

Construido por Hermann y Stiefelmeyer en 1956 [15], las fluctuaciones de presión se logran mediante la disposición adecuada de la válvula rotatoria y la fuente de gas a alta presión, mientras que la amplitud de presión se preajusta con precisión por medio de manómetros y sus correspondientes reguladores, no representados en la Figura 35.

Al ajustar la velocidad del motor de accionamiento, se abre y cierra secuencialmente la válvula a los períodos deseados, generándose un tren de ondas cuadradas ligeramente distorsionado, con la forma mostrada a la derecha de la Figura 35.

Si se incrementa la velocidad angular del motor, la distorsión del paso de presión será mayor por el efecto de resonancia asociado a la inercia de la columna de gas en la cámara, que funciona como un resonador de media onda. Como consecuencia, su utilidad para verificar el desempeño dinámico de un transmisor de presión está limitada a pulsos de períodos aproximadamente iguales a 100 ms, de amplitudes desde 10 hasta 15 psi (103,421 kPa) [15].

Más recientemente, en el 2000, Kobata y Ooiwa [61] desarrollaron un generador de perturbaciones periódicas de presión basado en una válvula rotatoria de diseño novedoso con respecto a la construida por Hermann y Stiefelmeyer en 1956 [15], para calibrar transmisores de presión en amplitudes hasta 10 kPa y una frecuencia fundamental entre 10 y 50 Hz.

La Figura 36 muestra la sección transversal de la válvula rotatoria, construida por Kobata y Ooiwa, [62] a lo largo de su eje de rotación. Cuando el rotor gira en sentido horario en el estator, se muestra que los dos transductores de presión unidos a los puertos del estator están, en principio, sujetos a las mismas presiones.

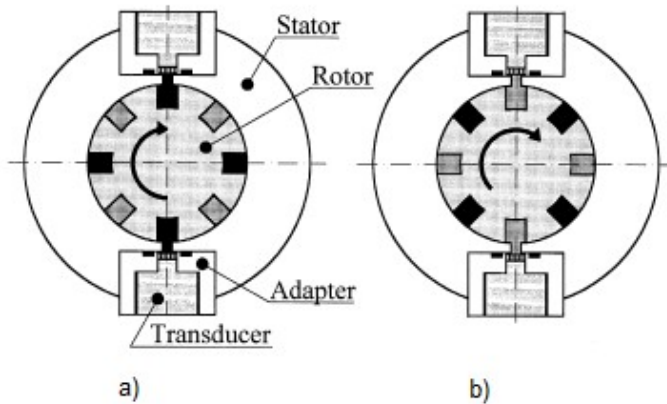


Figura 36. GPP de Kobata-Ooiwa: sección de la válvula rotatoria.

En el estado que se muestra en la Figura 36 a) se supone que los transmisores de presión están sujetos a la presión P_1 , y como el espacio libre entre el rotor y el estator es muy pequeño ($\approx 1\mu\text{m}$), el valor de la presión suministrada se mantiene constante en cada cavidad de detección.

En el estado que se muestra en la Figura 36 b), donde el rotor gira 45° con respecto a la posición a), los transmisores de presión están sujetos a la presión P_2 . A partir de entonces, estas secuencias se repiten, y los dos transmisores de presión están sometidos alternativamente a P_1 y P_2 , cuatro veces para una rotación completa del rotor, de manera que, en principio, la forma de onda generada es cuadrada, como se muestra en el Gráfico 32 [62]:

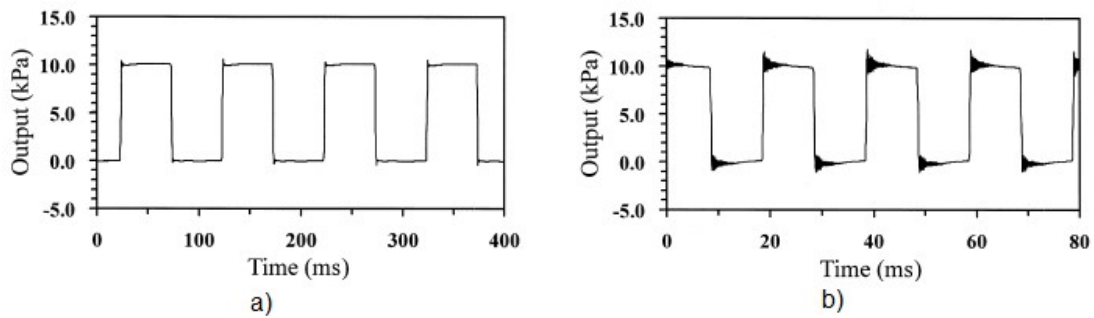


Gráfico 32. GPP de Kobata-Ooiwa: salida, según la frecuencia de rotación.

Para asegurar la estabilidad de la señal generada, Kobata y Ooiwa [61, 62] hicieron énfasis en los siguientes sistemas:

- Sistema de suministro del fluido de operación: se utilizó un controlador para ajustar la presión objetivo p_0 del aire seco a la entrada del estator de la válvula rotatoria, midiéndose con un manómetro de gran exactitud. La descarga se realiza a la atmósfera.
- Sistema de control de la velocidad angular del rotor de la válvula. Se utiliza la señal proveniente de un generador de pulsos de referencia para ajustar la frecuencia fundamental f_0 , retroalimentada de la medición digital generada por la interfaz (encoder) de un servomotor CD.

En el Gráfico 32 se aprecia cómo aumenta la distorsión de la forma cuadrada de la señal al incrementar la frecuencia de rotación del motor y por tanto, el período de la señal periódica: de $T_p = 100 \text{ ms}$ ($f_0 = 10 \text{ Hz}$) [caso a)] a $T_p = 20 \text{ ms}$ ($f_0 = 50 \text{ Hz}$) [caso b)], manteniendo constante la amplitud ($P_0 = 10 \text{ kPa} \pm 0,5 \text{ Pa}$).

Kobata y Ooiwa [61, 62] consideraron, al igual que Hermann y Stiefelmeyer [15], que la distorsión observada, dos veces en cada período, depende de la frecuencia de resonancia de la columna de aire dentro del rotor y el estator. Para reducirla consideraron en el diseño de la válvula rotaria los siguientes factores:

- ☑ Distancia entre la cavidad de los puertos de medición y el mecanismo de la válvula: 3 mm.
- ☑ Constancia de la presión de suministro en la cámara interna del mecanismo de la válvula.

De esta manera, lograron que la estabilidad de la presión y la forma de la onda cuadrada fuesen mejores que las reportadas por Hermann y Stiefelmeyer en 1956 [15].

Una primera aproximación del tren de pulsos cuadrados sin distorsión (onda cuadrada ideal), estaría representada³⁴ por la ecuación 201 [61]:

$$s(t) = \begin{cases} s_a & \forall mT_0 \leq t < m(T_0 + 1/2) \\ 0 & \forall m(T_0 + 1/2) \leq t < (m + 1)T_0 \end{cases} \quad \text{ecuación 201}$$

Donde:

s_a : Amplitud de la onda cuadrada obtenida de la calibración estacionaria.

m : Constante.

T_0 : Período de la onda cuadrada.

La representación por series de Fourier de la ecuación 201 está descrita por la ecuación 202 [61]:

³⁴ Se ha respetado la nomenclatura utilizada por los Kobata y Ooiwa.

$$s(t) = S_0 + \frac{2s_a}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \text{sen}[2\pi(2n-1)f_0 t] \quad \text{ecuación 202}$$

Donde:

$S_0 = 0,5 s_a$: Componente de corriente directa.

$f_0 = T_0^{-1}$: Frecuencia fundamental.

La ecuación 202 tiene infinitos componentes armónicos dominantes a múltiplos impares de la frecuencia fundamental, cuyas magnitudes a $(2n-1)f_0$ son [61]:

$$S_{2n-1} = \frac{2s_a}{(2n-1)\pi} \quad \text{ecuación 203}$$

El Gráfico 33 refiere la señal muestreada³⁵ ($f_m = 256f_0 = 2560 \text{ S/s}$), usando un transmisor de presión semiconductor cuando se reproduce una señal cuadrada de parámetros ($P_0 = 10 \text{ kPa}$; $f_0 = 10 \text{ Hz}$) [61]:

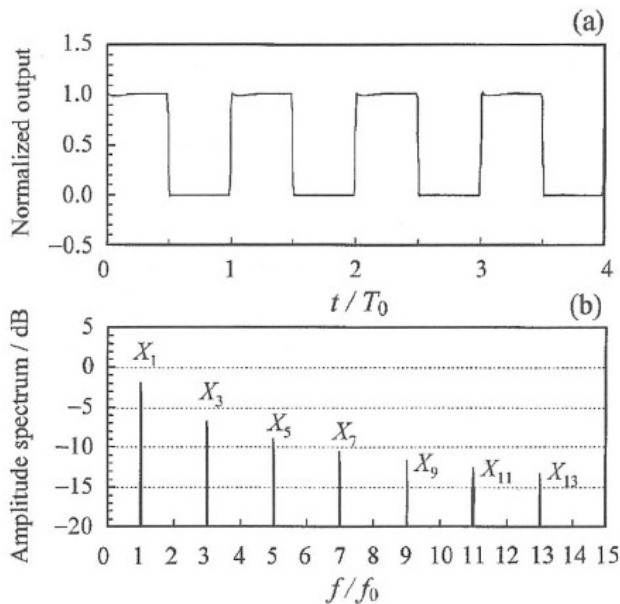


Gráfico 33. GPP de Kobata-Ooiwa: a) señal muestreada b) espectro de amplitud.

Donde:

X_{2n-1} : Amplitud medida por el transmisor de presión a la frecuencia f_0 .

³⁵ El espectro de amplitud de la señal se calculó utilizando la transformada rápida de Fourier para 64 períodos.

En el Gráfico 34 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en el rango $n = 1; 3; \dots; 7$, para $P_0 = 70 \text{ kPa}$ y $f_0 = (10; 11; \dots; 80; 79; \dots; 10) \text{ Hz}$ [61].

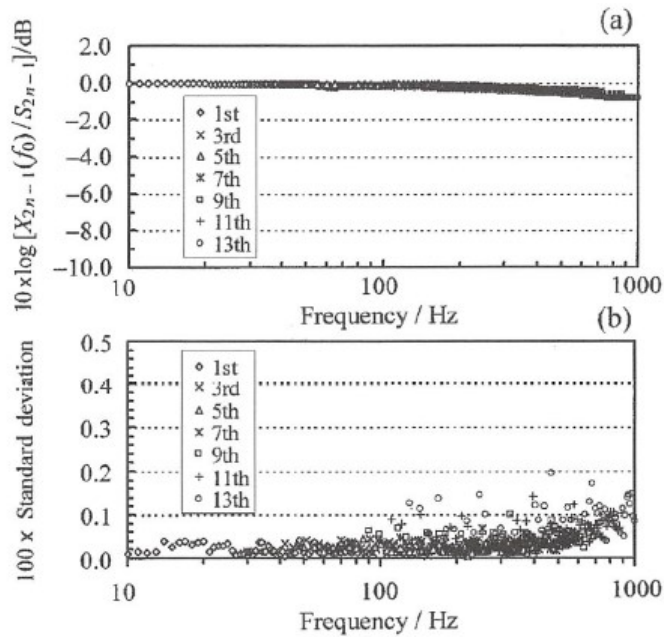


Gráfico 34. GPP de Kobata-Ooiwa: a) promedio b) desviación estándar.

Del Gráfico 34 se concluye que [61]:

- El promedio de la amplitud disminuyó aproximadamente 1 dB entre 10 Hz y 1 kHz.
- La desviación estándar máxima para los componentes fundamentales fue de $\leq 5 \times 10^{-4}$, y para todos los componentes $\leq 2 \times 10^{-3}$.

Con respecto a los resultados obtenidos, Kobata y Ooiwa [61, 62] consideran que en el estado actual se requiere de un transmisor de presión de referencia para la calibración dinámica de otro transmisor de presión.

En este sentido, actualmente no existe un generador periódico de presión reconocido por la comunidad metrológica que funcione como un patrón primario, aunque existen precedentes como el diseñado por Hilton en 1972 [63], que en esencia es un tubo llenado parcialmente de líquido, con uno de sus extremos abierto y el otro cerrado, montado sobre un agitador electrodinámico, para obtener una perturbación sinusoidal.

Hilton [63] reportó amplitudes dinámicas pico a pico de hasta $134,4 \text{ kPa}$ (19,5 psi), en el rango de frecuencias desde 15 Hz (66,7 ms) hasta 2 kHz (0,5 ms), estimando que la incertidumbre de la reproducción de la presión dinámica era aproximadamente igual a $\pm 5 \%$.

Hilten [63] recomendó abandonar la naturaleza primaria del método para reducir la incertidumbre de la medición de la presión, utilizando un transmisor de presión de referencia, en lugar de medir la amplitud de la aceleración pico a pico.

Cuatro años más tarde, Vezzetti [64] retomó el trabajo de Hilten [63], y atendiendo a su recomendación, introdujo un puerto de medición para instalar un patrón de referencia. Con las modificaciones realizadas Vezzetti [64] reportó incertidumbres de la reproducción de la amplitud de la presión dinámica igual a $\pm 4,14 \%$ para el rango de amplitudes dinámicas pico a pico de hasta $34,4 \text{ kPa}$ ($4,9 \text{ psi}$) y frecuencias desde 15 Hz hasta 2 kHz .

5.3 Requisitos de diseño

Si se aceptan las recomendaciones, tanto de Kobata y Ooiwa [61, 62] como de Hilten [63], acerca del uso de un sistema de medida de presión como patrón de referencia en lugar del método primario, es necesario considerar los siguientes criterios de diseño del generador de perturbaciones periódicas [5]:

- a) Para que la señal periódica de presión generada influya de igual manera en los sistemas de medida patrón y calibrando, sus sensores deben estar muy cerca en la cámara del generador.
- b) La forma de la señal generada debe ser sinusoidal, de modo que el efecto de los armónicos sea despreciable con respecto al efecto de la frecuencia fundamental.
- c) Los rangos de amplitud y frecuencia de la señal generada deben cubrir los rangos de operación del transmisor de presión o de la aplicación prevista.

En este sentido, el valor de la amplitud de la perturbación periódica generada debe ser lo suficientemente grande para permitir identificar posibles no linealidades en la respuesta de amplitud del sistema de medida de presión evaluado.

- d) El fluido de operación del generador periódico debe ser de la misma naturaleza que el medio: gas o líquido, donde se utilizará el transductor de presión.

A los criterios de diseño del generador de perturbaciones periódicas deben adicionarse las del sistema de medida de presión, si se desea que funcione como un patrón de referencia [5]:

- a) El coeficiente de sensibilidad estático del transmisor de presión \hat{S}_1 (ver la ecuación 109), no es suficiente para caracterizar su respuesta dinámica, aun para bajas frecuencias.

En general, la credibilidad de su uso es una limitación básica para utilizar el generador de perturbaciones periódicas de presión en un proceso de comparación.

Al respecto, es preferible cuantificar previamente las constantes invariantes en el tiempo de la ED característica del sistema de medida de presión: frecuencia natural (ω_n) y coeficiente de amortiguamiento relativo (ζ) (ver la sección 2.2.5).

- b) Debe considerarse que, en realidad, los coeficientes invariantes en el tiempo no son exclusivos del transmisor de presión, sino también del sistema de medida de presión, que incluye los sistemas de acondicionamiento de la señal eléctrica y de adquisición de datos.

En el proyecto, el acondicionamiento de la señal eléctrica de salida del transmisor de presión incluye, por las bondades referidas en la sección 2.1.2, un transmisor de presión, cuyo coeficiente de sensibilidad estático puede ser calculado en un generador de presión estacionario (ver la sección 3.2).

- c) La presión máxima de la señal reproducida en el generador periódico debe estar en el rango del comportamiento lineal del sistema de medida de presión de referencia.
- d) La frecuencia máxima de la señal reproducida en el generador periódico no debe exceder un quinto de la frecuencia natural del transductor de presión de referencia. para mantener la precisión de la calibración dentro del $\pm 4 \%$.

$$\frac{\omega}{\omega_n} \leq \frac{1}{5}$$

inecuación 204

- e) La calibración debe realizarse de forma continua o con un mínimo de diez frecuencias discretas, distribuidas a través del rango de frecuencias de interés.
- f) La distancia de separación del transductor de presión de prueba y de referencia en la cámara debe ser menor a 1/10 de la longitud de onda de la frecuencia de medición más alta utilizada.

Generalmente es imposible cumplir todos los criterios referidos, por lo que es de esperar obtener una coincidencia menor a la deseada entre la medición de la presión dinámica aplicada durante la calibración y la encontrada en el uso del instrumento de medición [5]: en este caso, en el diseño experimental deben cuantificarse sus efectos en la calidad de la definición de los parámetros de la perturbación: forma, frecuencia (ω) y amplitud (A).

Para el proyecto, es muy importante evaluar las desviaciones experimentales de las perturbaciones reproducidas en el prototipo de generador periódico con respecto a los siguientes requisitos:

- La forma sinusoidal, considerando que, aunque el oleaje gravitacional profundo es eminentemente sinusoidal [4], no lo es el de baja profundidad, que corresponde al alcance del proyecto (ver la sección 1.4).
- La diferencia de naturalezas de los fluidos: gas en la cámara del prototipo versus agua marina en la aplicación del sistema de medida evaluado.

5.4 Estado del arte

El intento de vincular la presión periódica a un método primario como el generador periódico de masa variable no ha tenido la misma suerte, por ejemplo, que el tubo de choque como generador aperiódico de presión, cuya tecnología basada en la teoría de la onda de choque normal ha sido plenamente reconocida por la comunidad metrológica dedicada a las mediciones dinámicas de presión, e incluso, existen ofertas comerciales.

Poco se ha hecho en este sentido desde el generador periódico de presión diseñado por Hilten en 1972 [63], para continuar el desarrollo de los generadores periódicos de presión, cuando las investigaciones relacionadas fueron financiadas por el gobierno norteamericano [5].

En comunicación personal con la Sra. Eliana Brazda, Administradora de ISA Standards, comentaba que "... el comité técnico ISA-37. Transductores de Medición, no ha estado activo desde el 2002, cuando se publicó la norma ISA-37.16.01-2002" [65].

5.5 Desarrollo del prototipo

El generador periódico de presión diseñado para funcionar como un volumen de control, permite la reproducción controlada de señales neumáticas periódicas para evaluar la respuesta dinámica de un transmisor de presión, caracterizado previamente en el prototipo de tubo de choque.

De la misma manera que Hermann-Stiefelmeyer [15] y después Kobata y Ooiwa [61, 62] previeron que una válvula rotatoria generaría un tren de pulsos cuadrados, se consideró que los flujos de entrada y salida de un volumen de control gobernado por dos válvulas a la entrada y salida, podría generar un tren de pulsos triangulares, de período y amplitud similares a los del oleaje gravitacional del Pacífico Central costarricense (ver las Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente),

La Figura 37 es un esquema simplificado del prototipo del GPP diseñado, de operación manual, compuesto por una cámara de medición de sección transversal constante, cuyos extremos terminan en bridas móviles de espiga (posición 3).

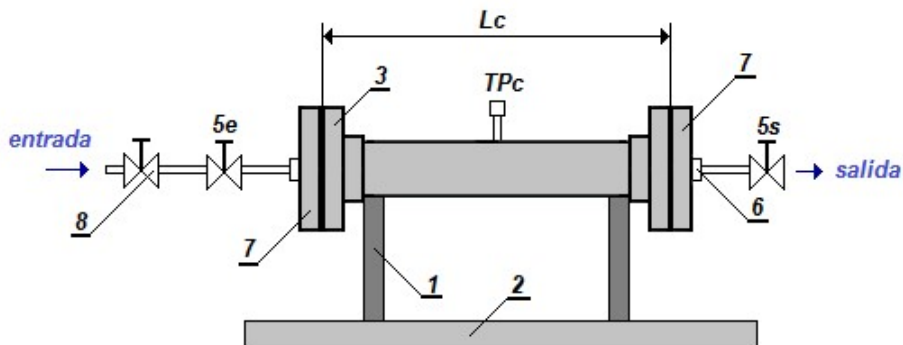


Figura 37. Generador periódico de presión: vista general del equipo y sus componentes.

El prototipo del generador periódico de presión está sostenido por soportes (posición 1) anclados a una mesa horizontal (posición 2) que asegura la nivelación y estabilidad de la operación del sistema, y consta de un puerto de medición, donde se instala el calibrando (TPc):

Los elementos externos a la cámara de medición del prototipo están unidos por niples de cañería 1/4 in con roscas 1/4 NPT externas en ambos extremos, mientras que solo uno de sus extremos está roscado internamente.

La rosca externa del niple permite su conexión a la brida ciega (posición 7), y su longitud está restringida por un tope (posición 6), lo cual evita el deterioro de la rosca del orificio de la brida ciega, mientras que la rosca interna permite la conexión de una boquilla de restricción.

Las boquillas de restricción son tapones monohoradados de diámetro 1 mm, que actúan como una restricción neumática de geometría constante, al reducir bruscamente el paso del flujo volumétrico del gas de operación.

La Figura 38 muestra la instalación de las restricciones a los niples de entrada (posición 4e) y salida (posición 4s) de la cámara de medición (ver las posiciones 9e y 9s).

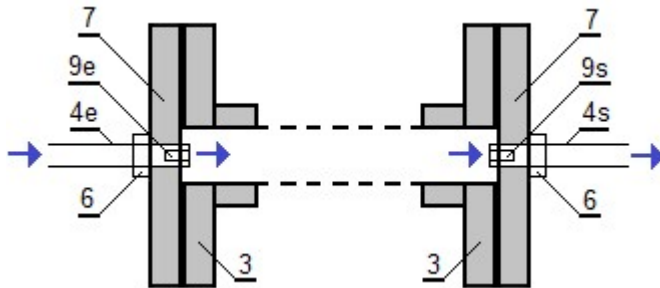


Figura 38. Generador periódico de presión: esquema simplificado de los elementos de control.

Los niples con las restricciones instaladas se enroscan en los orificios de las bridas ciegas (posición 7) a la entrada y salida de la cámara de medición, de manera que las restricciones sobresalen 5 mm de las caras interiores de las bridas ciegas (posición 7).

5.6 Procedimiento de reproducción de la señal periódica

Los parámetros de la señal periódica neumática que se reproducen experimentalmente en el prototipo del generador periódico de presión son los siguientes:

- Amplitud de la presión de operación (p_p).
- Período de operación (T_p).

La reproducción manual de la señal periódica neumática con los valores deseados se realiza por el siguiente procedimiento:

- Se instala el transmisor de presión en el puerto de medición TPc y se conecta al sistema de adquisición de datos según las instrucciones del fabricante.
- Se conecta la fuente de suministro del gas de operación, a la entrada de la válvula ON-OFF de ajuste fino (posición 8 - Figura 37).
- Estando totalmente abiertas las válvulas de control manual ON-OFF a la entrada (5e) y la salida (5s), se ajusta el flujo volumétrico del gas de operación, mediante la apertura cuidadosa de la válvula ON-OFF de ajuste fino (posición 8 - Figura 37), hasta una presión de operación inicial (p_{op_1}), cuyo valor se mide en tiempo real en la pantalla de la PC, utilizando el software del sistema de adquisición de datos.
- Una vez estabilizada la presión de operación inicial, se cierra manualmente la válvula 5s, y con un cronómetro, se mide el tiempo equivalente al período de la señal periódica a reproducir: alcanzado, se cierra 5e y de manera simultánea, se abre 5s.
- Si la presión máxima alcanzada en el volumen de control no es la deseada, se repite el proceso reajustando la válvula ON-OFF de ajuste fino (posición 8 - Figura 37) hasta alcanzarla, manteniendo el período; en ese momento, la configuración del prototipo GDP-01-M está lista para comenzar el proceso, y no debe ser manipulada.
- Seguidamente se programa el sistema de adquisición de datos en su función “TRIGGER”, para que comience a registrar los datos a partir de que se alcance p_{op_1} , y se detenga, transcurrido el tiempo de muestreo.
- Los resultados de las mediciones registradas se “salvan” en un archivo .xlsx.
- Sin alterar la configuración del circuito neumático, el proceso de repite bajo las mismas condiciones, las veces que sean pertinentes a los propósitos experimentales del ensayo.

5.7 Parámetros de desempeño

La validación del prototipo de GPP se basa en los siguientes parámetros:

- Espectro de amplitudes y frecuencia de la señal reproducida.
- Precisión intermedia de la amplitud y frecuencia de la señal periódica generada.
- Veracidad, comparando la señal de referencia reproducida en el generador periódico y medida por el patrón caracterizado previamente en el prototipo de tubo de choque.

La evaluación de la precisión de los parámetros de desempeño se realiza mediante la reproducción de una señal periódica de aire húmedo de período T_p y amplitud de presión 1 psi ($\approx 0,69$ dbar).

Durante la ejecución de los experimentos, se mantendrán constantes tanto el número de ciclos para cada corrida ($n = 5$) como la frecuencia de muestreo $f_m = 200$ Hz.

5.8 Resultados

5.8.1 Prototipo GPP-01-M.

El primer prototipo del generador periódico de presión construido, según los criterios establecidos en la sección 5.3, denominado GPP-01-M, se construyó entre **junio y octubre del 2018**, y su cámara de medición es un tubo de PVC cédula 40 [38] de diámetro nominal igual a 3 in (67,5 mm) constante y longitud $L_c = 313,15 \text{ mm}$.

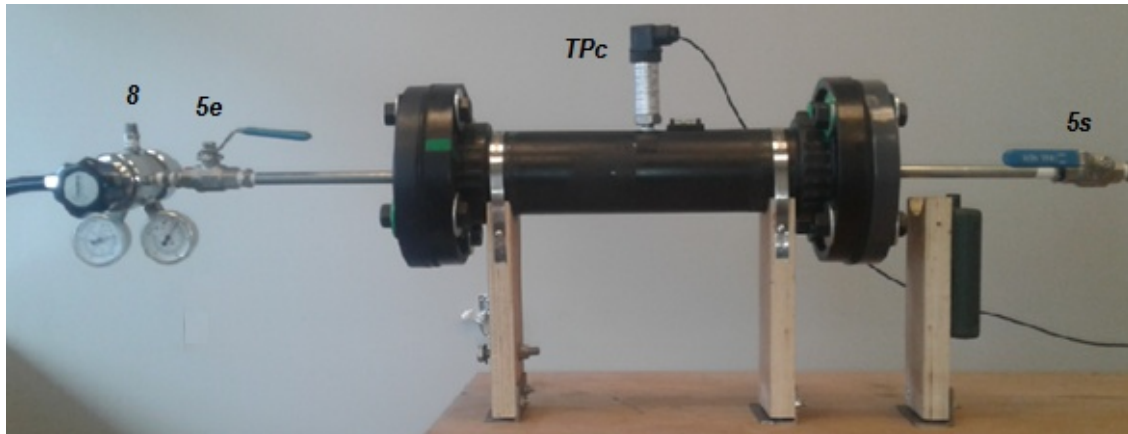


Figura 39. Prototipo GPP-01-M: vista general.

La validación del desempeño del prototipo GPP-01-M se realizó para una perturbación neumática de período $T_p = 10 \text{ s}$, próxima al período promedio del oleaje gravitacional en el Océano Pacífico Central costarricense ($T_p = 12,34 \text{ s}$) (ver la Tabla 2).

La Tabla 107 muestra la trazabilidad de las mediciones realizadas el 17 de diciembre del 2018:

Tabla 107. Prototipo GPP-01-M: identificación de los registros de medición.

Registros de medición:	Job1_2018_12_17_11_46_18_001	
Fecha de medición:	18-12-17	Hora: 12:39:39
Lugar de mediciones:	Laboratorio Doctorado en Ingeniería. INII (Finca 2)	

La Tabla 108 muestra las condiciones del aire ambiental durante las pruebas realizadas:

Tabla 108. Prototipo GPP-01-M: condiciones ambientales.

Parámetros	Símbolos	UM	Valores
Temperatura	t_a	°C	21.8
Humedad relativa	HR_a	%	71.2%
Presión atmosférica	P_{atm}	hPa	879.0

En el Gráfico 35 se muestra el tren de pulsos generados por el prototipo GPP-01-M:

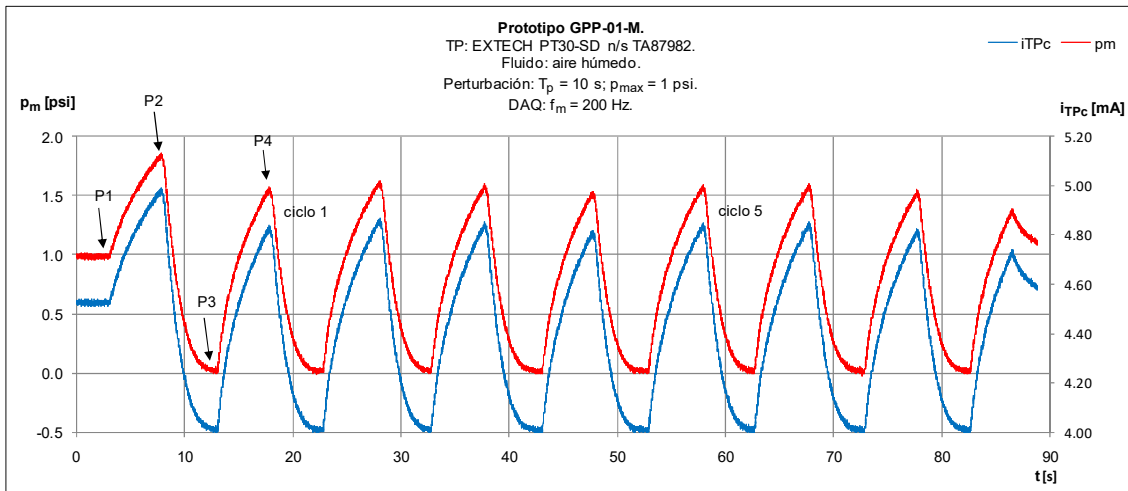


Gráfico 35. Prototipo GPP-01-M: reproducción experimental de una señal periódica.

Al ser un transmisor de presión, los valores analógicos de salida son corriente eléctrica CD (eje de ordenadas auxiliar), a las que corresponden valores nominales de presión sin corregir, según la ecuación 19.

El Gráfico 35 muestra que la presión inicial de operación $p_{op,1} = 1 \text{ psi}$ es el resultado de la manipulación previa de la válvula de ajuste fino (8) según el procedimiento de la sección 5.6, y que al cerrar la válvula de control (5s) (posición P1), la presión manométrica se eleva hasta el punto P2, para después caer a la presión mínima (P3) y estabilizarse a partir del ciclo 1.

Considerando la periodicidad evidente de la señal reproducida, se identifican gráficamente los hitos de la señal estabilizada para cada ciclo, en este caso, para el ciclo $n = 3$:

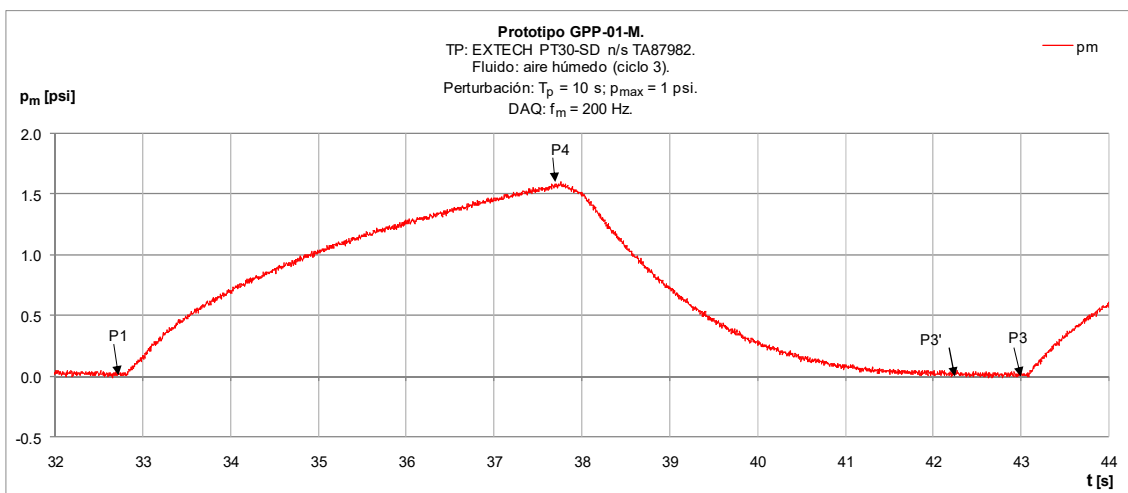


Gráfico 36. Prototipo GPP-01-M ciclo 3: representación de los hitos experimentales.

En la determinación gráfica de- las presiones al inicio (P1) y final (P3) del ciclo evaluado es necesario reconocer el efecto humano en la apertura y cierre de las válvulas 5e y 5 s (punto P3'), responsable del tiempo de retardo entre ciclos.

Los parámetros característicos de las señales neumáticas periódicas reproducidas en el prototipo GDP-01-M son los siguientes:

T_p : Período pico-pico [s].

A_p : Amplitud de la señal [psi]. Se calcula según la ecuación 205:

$$A_p = p_{c_max} - p_{c_min} \quad \text{ecuación 205}$$

Donde:

p_{c_max} : Presión manométrica máxima corregida del ciclo [psi].

p_{c_min} : Promedio de los valores corregidos mínimos al inicio y final del ciclo [psi].

t_r : Tiempo de retardo por el accionamiento humano sobre las válvulas [s].

$$t_r = t_{p3'} - t_{p3} \quad \text{ecuación 206}$$

Los resultados obtenidos para los primeros 5 ciclos reproducidos se muestran en la Tabla 109:

Tabla 109. Prototipo GPP-01-M: valores de los hitos de los ciclos reproducidos.

Evento	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 4		Ciclo 5	
	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]
Inicio	13.055	0.008	22.815	0.015	32.825	0.016	43.090	0.000	52.905	0.022
Máximo	17.845	1.563	28.065	1.624	37.755	1.598	47.755	1.531	57.945	1.589
Final	21.920	-0.001	32.120	0.002	42.210	0.002	51.570	0.000	61.965	0.005

Los resultados experimentales de cada ciclo de la señal experimental reproducida son procesados para calcular los parámetros característicos de la señal reproducida en el prototipo GPP-01-M:

$$T_p = (9,019 \begin{smallmatrix} +0,366 \\ -0,539 \end{smallmatrix}) s$$

$$A_p = (1,590 \begin{smallmatrix} +0,042 \\ -0,044 \end{smallmatrix}) psi$$

Los resultados demuestran que la variación promedio del período y la amplitud de la señal periódica de presión reproducidas manualmente en el prototipo GPP-01-M son grandes: del 5,02 % y el 4,54 % con respecto a los promedios del período y la amplitud respectivamente, y la causa está asociada al retardo en los procesos de cierre-apertura de las válvulas por la acción humana:

$$t_r = (954 \begin{smallmatrix} +38 \\ -24 \end{smallmatrix}) ms.$$

5.8.2 Prototipo GPP-02-A.

Para mejorar la reproducibilidad de ambos parámetros característicos de las señales periódicas, se diseñó un sistema de control automático para la apertura y cierre sincronizadas y alternadas de las válvulas ON-OFF, sustituyéndolas por válvulas ON-OFF solenoides controladas por un PLC.

Para satisfacer los nuevos criterios de diseño, se diseñó el prototipo GPP-02-A (ver la Figura 40), geoméricamente idéntico al manual pero adicionalmente dispone de dos válvulas solenoides ON-OFF 5e y 5s, controladas automáticamente por un PLC y dos puertos de medición: TPc_1 y TPc_2 , dónde se instalarían transmisores de presión para una posible comparación directa con un transmisor de presión patrón dinámico, caracterizado previamente en el prototipo de tubo de choque.

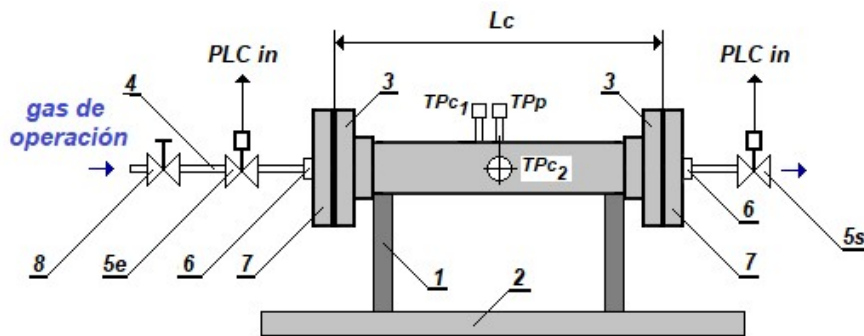


Figura 40. Prototipo GPP-02-A. Vista general.

En la Figura 41 se muestra el prototipo GPP-02-A, construido entre **octubre y diciembre del 2018**, con dos transmisores de presión instalados en los puertos TPp y TPc_1 :

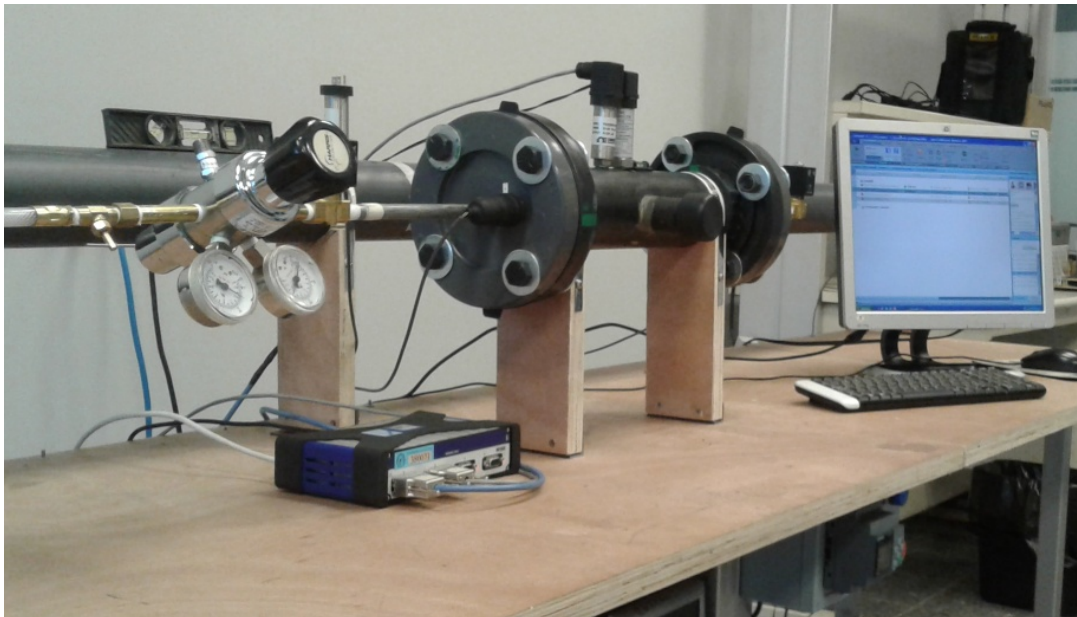


Figura 41. GDP-02-A: configuración de calibración por comparación de dos TP.

En esta configuración se observa que:

- ☑ El puerto de medición TP_{C_2} no se está utilizando, por lo que está sellado con un tapón.

El objetivo del puerto de medición TP_{C_2} es la instalación del calibrando.

- ☑ En la brida ciega está instalado un presostato, ajustado para proteger a los transmisores de presión instalados de una sobrepresión asociada a una posible falla del sistema de control automático de las electroválvulas.

Para reproducir experimentalmente la señal periódica de presión, el prototipo GPP-02-A consta de dos sistemas de control:

Primer sistema de control: igual que en el prototipo manual, compuesto por la válvula de ajuste fino (posición 8 - Figura 40) y las restricciones instaladas a la entrada y salida (posiciones 9e y 9s - Figura 40) de la cámara de medición.

Segundo sistema de control: compuesto por un PLC que controla los solenoides de las electroválvulas ON-OFF normalmente abiertas, instaladas a la entrada y salida (posiciones 9e y 9s - Figura 40) de la cámara de medición.

Para reproducir la señal periódica neumática con los parámetros deseados, se realiza el siguiente procedimiento:

- Se conecta la fuente de suministro del gas de operación a la entrada de la válvula ON-OFF de ajuste fino (posición 8 - Figura 40).
- Estando desconectado el segundo sistema de control, lo que implica que las electroválvulas de entrada y salida estén totalmente abiertas, se ajusta el flujo volumétrico del gas de operación mediante la apertura cuidadosa de la válvula ON-OFF de ajuste fino (posición 8 - Figura 40), hasta la presión de operación inicial deseada (p_{op_1}).

La presión de operación inicial (p_{op_1}) se ajusta mediante su medición en tiempo real en la pantalla de la PC, utilizando el sistema de medida compuesto por el sistema de adquisición de datos [42] y el transmisor de presión de la posición TP_p .

- Una vez estabilizada la presión de operación inicial en el valor deseado, se programan los siguientes parámetros del PLC: período de operación (T_{op}) y cantidad de ciclos (n_c), y se activa su rutina de control, mediante el cierre y apertura sincronizado de las electroválvulas, alcanzándose la amplitud final de la señal periódica reproducida.
- De manera simultánea, se activa manualmente el registro de las mediciones con el sistema de adquisición de datos [42], y concluidos los ciclos programados, los resultados son registradas en formato .xls para su posterior procesamiento.

- Sin alterar la configuración del circuito neumático, el proceso se repite bajo condiciones de repetibilidad las veces que se consideren pertinentes a los propósitos experimentales del ensayo.

La validación del desempeño del prototipo GDP-02-A se realizó, al igual que para el prototipo manual, para un período de valor próximo ($T_p = 10$ s) al período promedio del oleaje gravitacional en el Océano Pacífico Central costarricense ($T_p = 12,34$ s) (ver la Tabla 2).

La Tabla 110 muestra la trazabilidad de las mediciones realizadas el 18 de diciembre del 2018:

Tabla 110. Prototipo GPP-02-A: identificación de los registros de medición.

Registros de medición:	Job1_2018_12_18_11_02_58		
Fecha de medición:	18-12-18	Hora:	11:01:07
Lugar de mediciones:	Laboratorio Doctorado en Ingeniería. INII.		

La Tabla 111 muestra las condiciones del aire ambiental durante las pruebas realizadas:

Tabla 111. Prototipo GPP-02-A: condiciones ambientales.

Parámetros	Símbolos	UM	Valores
Temperatura	t_a	°C	21.8
Humedad relativa	HR_a	%	71.2%
Presión atmosférica	P_{atm}	hPa	879.0

En el Gráfico 37 se muestra el tren de pulsos generados por el prototipo GPP-02-A:

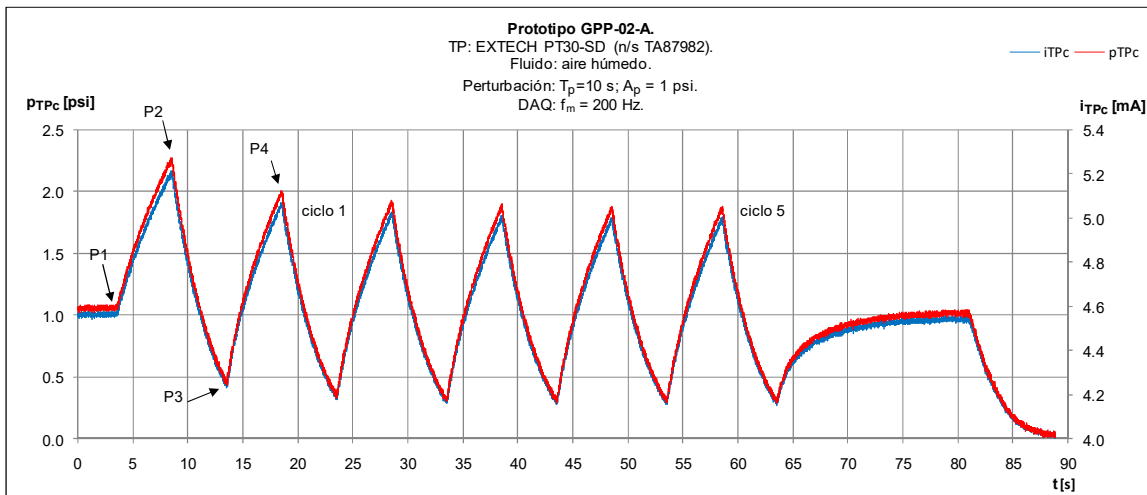


Gráfico 37. Prototipo GPP-02-A: reproducción de una señal periódica.

Considerando la periodicidad evidente de la señal reproducida, se identifican gráficamente los hitos de la señal estabilizada para cada ciclo, en este caso y con fines ilustrativos, para el ciclo n = 3:

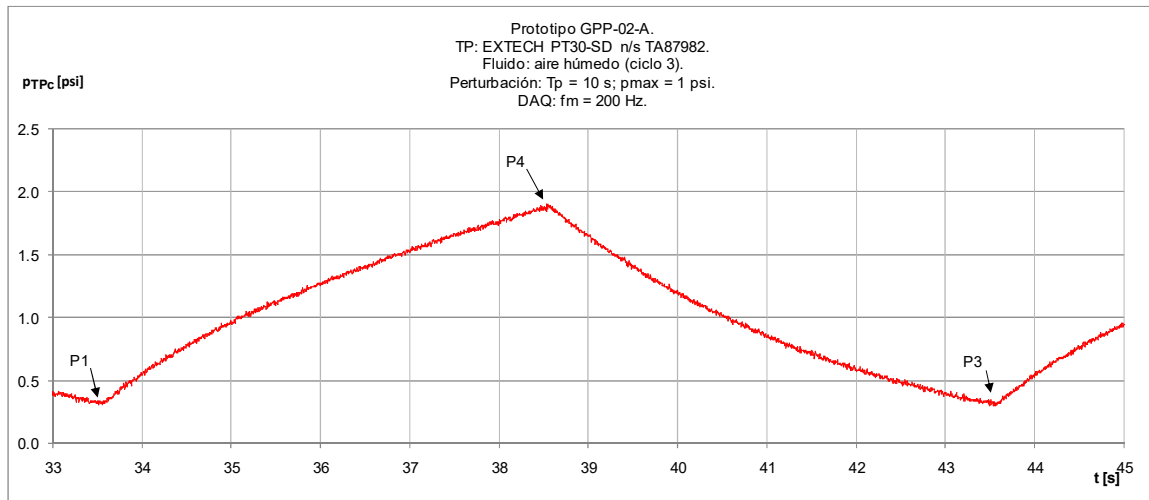


Gráfico 38. Prototipo GPP-01-M ciclo 3: representación de los hitos experimentales.

Con la automatización del proceso de apertura-cierre de las válvulas se elimina el tiempo de retraso por el accionamiento humano, de manera que el tiempo de terminación del ciclo 3 (P3) coincide con el de inicio del ciclo 4 (P1).

Los resultados obtenidos para los primeros 5 ciclos reproducidos se muestran en la Tabla 112:

Tabla 112. Prototipo GPP-02-A: valores de los hitos de los ciclos reproducidos.

Evento	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 4		Ciclo 5	
	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]	t [s]	p [psi]
Inicio	13.495	0.4370	23.500	0.3305	33.555	0.3043	43.545	0.2936	53.505	0.2949
Máximo	18.500	2.0071	28.565	1.9280	38.545	1.8975	48.530	1.8795	58.560	1.8832
Final	23.500	0.3305	33.555	0.3043	43.545	0.2936	53.505	0.2949	63.560	0.2873

Los resultados experimentales de cada ciclo de la señal experimental reproducida, son procesados para calcular los parámetros característicos de la señal reproducida en el prototipo GPP-02-A:

$$A_p = (1,618^{+0,022}_{-0,017}) \text{ psi}$$

$$T_p = (10,013^{+0,042}_{-0,053}) \text{ s} \Leftrightarrow f_p = (0,0999^{+0,1004}_{-0,0004}) \text{ Hz}$$

Los resultados demuestran que la variación promedio del período y la amplitud de la señal periódica de presión reproducidas automáticamente en el prototipo GPP-02-A, mejoraron notablemente con respecto al prototipo manual, bajando a 0,47 % y 1,19 % de acuerdo con los promedios del período y la amplitud respectivamente.

En el Gráfico 39 se comparan la señal promedio del ciclo 3, reproducida de forma automática en el prototipo GPP-02-A, con respecto a las señales de referencia sinusoidal y triangular con períodos y amplitudes corregidas iguales ($T_p = 9,998$ s; $A_p = 1,615$ psi):

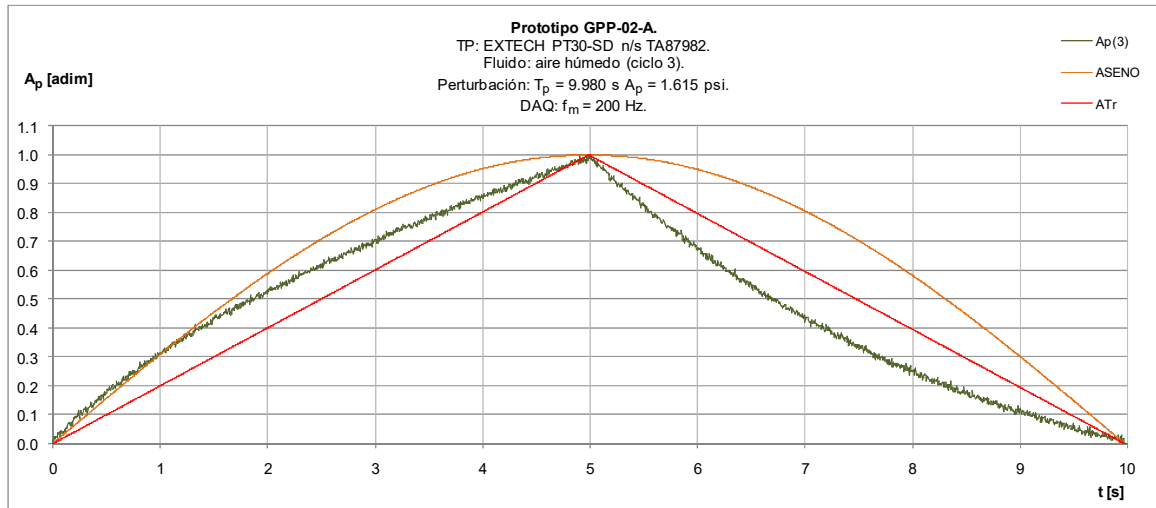


Gráfico 39. Prototipo GPP-02-A ciclo 3: comparación de las señales.

Del Gráfico 39 se aprecia que la suposición inicial de explicar la naturaleza de la señal generada por el prototipo GPP-02-A mediante un pulso triangular, no se cumplió por el comportamiento no lineal de las válvulas ON-OFF. Sin embargo, si la señal es periódica y satisface la condición de Dirichlet¹⁴, es posible “reconstruirla” con una serie de Fourier (ver sección 2.2.7).

Para su reconstrucción se utilizó el siguiente procedimiento:

- Se ajustó por regresión lineal mediante un polinomio de grado 3 la distribución experimental de la señal a cada lado del semiperíodo, en este caso: $L_p = 4,990$ s.

Tabla 113. Prototipo GPP-02-A: resultados del ajuste por regresión lineal (ciclo 3).

Rango	c_0	c_1	c_2	c_3	$s_a(A_p)$	$R^2(A_p)$
$0 \leq t < L_p$	0.02011	0.3304	-0.04488	0.003573	0.0069976	99.9%
$L_p \leq t < 2L_p$	4.076	-0.9332	0.07390	-0.002127	0.0067015	99.9%

- Se calcularon los términos y parámetros de la serie de Fourier para el ciclo analizado, según las ecuaciones de la sección 2.2.7:

Tabla 114. Prototipo GPP-02-A: términos y parámetros de la serie de Fourier (ciclo 3).

Símbolo	UM	1	2	3	4	5
$\omega_{n=1}$	rad/s	0.6277	0.6203	0.6296	0.6302	0.6215
$A_{n=0}$	adm	1.0224	0.9381	0.9535	0.9513	0.9237
$A_{n=1}$	adm	0.1645	0.1716	0.1672	0.1698	0.1706
THD	%	35.65%	34.05%	34.23%	33.94%	33.87%
RMS	adim	0.5188	0.4992	0.5024	0.5022	0.4955

- Se calculó $F_n(t)$ según la ecuación 30. En este caso, solo se tuvieron en cuenta los armónicos hasta $n = 9$, es decir, $F_9(t)$.

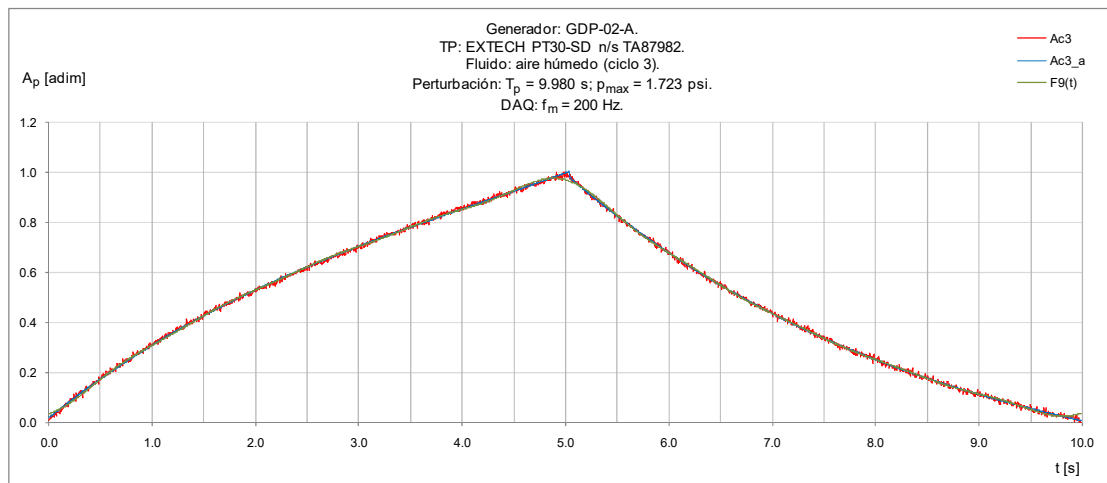


Gráfico 40. Prototipo GPP-02-A: comparación de las señales experimentales y ajustadas.

Los espectros de frecuencia y amplitud obtenidos del procesamiento de los cinco ciclos de la corrida identificada según la Tabla 110, se muestran en la Tabla 115:

Tabla 115. Prototipo GPP-02-A: espectros de frecuencia y amplitud ($T_p = 10$ s).

ω_n [rad/s]										
ciclo	n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.6277	1.2554	1.8831	2.5108	3.1385	3.7661	4.3938	5.0215	5.6492
2	0	0.6203	1.2405	1.8608	2.4810	3.1013	3.7215	4.3418	4.9620	5.5823
3	0	0.6296	1.2592	1.8887	2.5183	3.1479	3.7775	4.4070	5.0366	5.6662
4	0	0.6302	1.2604	1.8906	2.5208	3.1510	3.7813	4.4115	5.0417	5.6719
5	0	0.6215	1.2430	1.8644	2.4859	3.1074	3.7289	4.3504	4.9719	5.5933

A_n [adim]										
ciclo	n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.02243	0.16453	0.00034	0.00258	0.00004	0.00034	0.00001	0.00009	0.00001	0.00003
2	0.93806	0.17162	0.00014	0.00276	0.00001	0.00037	0.00000	0.00010	0.00000	0.00004
3	0.95352	0.16717	0.00014	0.00265	0.00001	0.00035	0.00000	0.00009	0.00000	0.00003
4	0.95134	0.16979	0.00014	0.00269	0.00001	0.00036	0.00000	0.00009	0.00000	0.00003
5	0.92375	0.17063	0.00013	0.00271	0.00001	0.00036	0.00000	0.00009	0.00000	0.00003

A continuación se muestra el mismo análisis, pero para una señal periódica con $T_p = 20$ s:

Tabla 116. Prototipo GPP-02-A: identificación del registro de medición ($T_p = 20$ s).

Registros de medición:	Job1_2018_12_18_11_02_58_008
Fecha de medición:	18-12-18 Hora: 12:50:05
Lugar de mediciones:	Laboratorio Doctorado en Ingeniería. INII.

Tabla 117. Prototipo GPP-02-A: condiciones ambientales ($T_p = 20$ s).

Parámetros	Símbolos	UM	Valores
Temperatura	t_a	°C	21.8
Humedad relativa	HR_a	%	71.2%
Presión atmosférica	P_{atm}	hPa	879.0

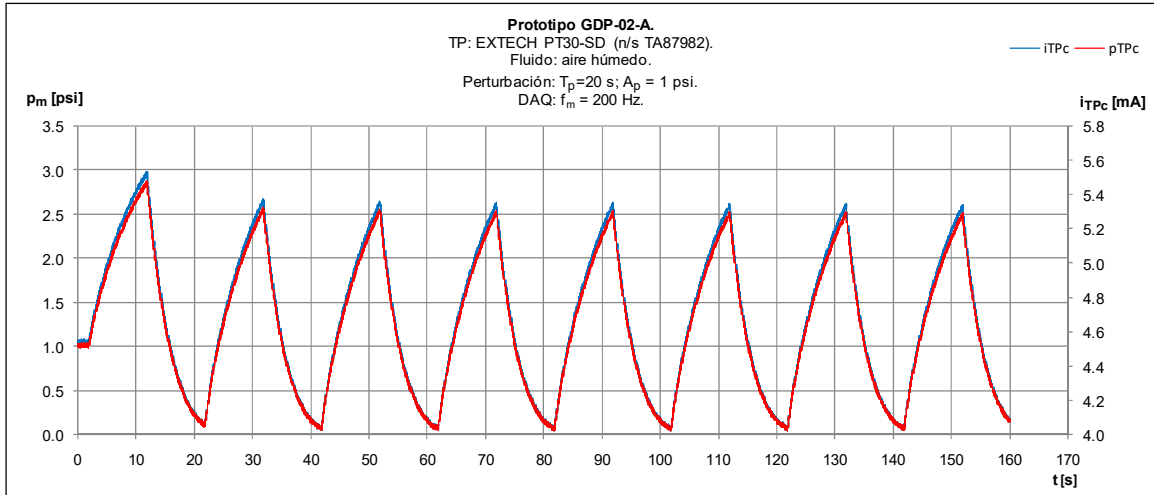


Gráfico 41. Prototipo GPP-02-A: reproducción de una señal periódica ($T_p = 20$ s).

Tabla 118. Prototipo GPP-02-A: resultados del ajuste por regresión lineal (ciclo 3).

Rango	c_0	c_1	c_2	c_3	$s_a(A_p)$	$R^2(A_p)$
$0 \leq t < L$	0.009749	0.1781	-0.01208	0.000416	0.003706	100.0%
$L \leq t < 2L$	6.697	-0.9504	0.04581	-0.000751	0.002225	100.0%

Tabla 119. Prototipo GPP-02-A: términos y parámetros de la serie de Fourier (ciclo 3).

Símbolo	UM	1	2	3	4	5
$\omega_{n=1}$	rad/s	0.3112	0.6203	0.6296	0.6302	0.6215
$A_{n=0}$	adm	0.8180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$A_{n=1}$	adm	0.1942	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
THD	%	36.26%	36.17%	35.81%	36.26%	36.16%
RMS	adim	0.4726	0.4747	0.3581	0.4727	0.4742

Los espectros de frecuencia y amplitud obtenidos del procesamiento de los cinco ciclos de la corrida identificada según la Tabla 116, se muestran en la Tabla 120:

Tabla 120. Prototipo GPP-02-A: espectros de frecuencia y amplitud ($T_p = 20$ s).

ω_n [rad/s]										
ciclo	n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.3112	0.6224	0.9336	1.2448	1.5560	1.8672	2.1784	2.4896	2.8008
2	0	0.3151	0.6302	0.9453	1.2604	1.5755	1.8906	2.2057	2.5208	2.8359
3	0	0.3075	0.6151	0.9226	1.2302	1.5377	1.8453	2.1528	2.4604	2.7679
4	0	0.3134	0.6268	0.9401	1.2535	1.5669	1.8803	2.1936	2.5070	2.8204
5	0	0.3126	0.6252	0.9378	1.2504	1.5630	1.8756	2.1882	2.5008	2.8134

A_n [adim]										
ciclo	n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.81801	0.19425	0.00095	0.00333	0.00006	0.00045	0.00001	0.00012	0.00000	0.00004
2	0.82688	0.19302	0.00099	0.00322	0.00006	0.00043	0.00001	0.00011	0.00000	0.00004
3	0.79153	0.19834	0.00106	0.00331	0.00006	0.00044	0.00001	0.00012	0.00000	0.00004
4	0.81931	0.19306	0.00098	0.00326	0.00006	0.00043	0.00001	0.00011	0.00000	0.00004
5	0.82502	0.19294	0.00100	0.00321	0.00006	0.00043	0.00001	0.00011	0.00000	0.00004

Los espectros obtenidos demuestran que el efecto de la frecuencia en la amplitud de los armónicos constitutivos de la señal periódica reproducida, es prácticamente nulo para el rango de frecuencias de las perturbaciones periódicas reproducidas en el prototipo GPP-02-A.

La robustez observada en el rango de frecuencia de las perturbaciones de interés para el proyecto (ver los espectros de amplitudes), permiten:

- Confirmar la decisión previa de no utilizar el filtro digital en el proceso de medición y registro con el sistema de adquisición de datos [42].

La decisión inicial estuvo enfocada a evaluar la distorsión de la señal reproducida por los ruidos de fondo, pero como se demostró, no son relevantes.

En este sentido, mientras que la distorsión de la señal reproducida en el generador periódico de Kobata-Ooiwa (ver la sección 5.2) se debe al efecto resonante de la cámara en la válvula rotatoria, en el prototipo GPP-02-A se debe al comportamiento no lineal de las válvulas de apertura-cierre.

Tabla 121. Prototipo GPP-02-A: distorsión armónica total.

Período promedio	Símbolo	UM	MIN	PROM	MAX
$T_p = 10,030 \text{ s}$ ($\omega_0 = 0,6264 \text{ rad/s}$)	THD	%	0.48%	34.35%	1.30%
$T_p = 20,100 \text{ s}$ ($\omega_0 = 0,3126 \text{ rad/s}$)	THD	%	0.32%	36.13%	0.13%

- Aplicar el marco GUM para evaluar la incertidumbre de las mediciones de la presión (ver la sección 2.3).
- Gestionar la trazabilidad metrológica de los sistemas de medición a través del coeficiente de sensibilidad estática del transmisor de presión (ver la sección 2.5.4.3).

Esta propiedad tiene gran importancia cuando no es posible determinar experimentalmente los coeficientes de la ecuación característica del transmisor de presión, bien porque no puede ser instalado en el prototipo de tubo de choque, o cuando el sistema de adquisición de datos no permite incrementar la frecuencia de muestreo para detectar los hitos de la expansión isentrópica del gas.

Los resultados de la validación del prototipo GPP-02-A se muestran en la Tabla 122:

Tabla 122. Prototipo GPP-02-A: resultados de la validación.

Parámetro	Símbolo	UM	$T_p = 10,030 \text{ s}$			$T_p = 20,100 \text{ s}$		
			MIN	PROM	MAX	MIN	PROM	MAX
Frecuencia fundamental	$\omega_{n=1}$	rad/s	0.0056	0.6258	0.0044	0.2513	0.5625	0.0677
Componente directa	$A_{n=0}$	adm	0.0341	0.9578	0.0646	0.1636	0.1636	0.6544
Amplitud del armónico fundamental	$A_{n=1}$	adm	0.0042	0.1687	0.0029	0.0388	0.0388	0.1554
Valor cuadrático medio	RMS	adim	0.0081	0.5036	0.0152	0.0924	0.4505	0.0242

Los resultados obtenidos en el desarrollo del prototipo de generador de perturbaciones periódicas de presión GPP-02-A se presentaron, como póster, en el 19. Congreso Internacional de Metrología (CIM2019), celebrado entre el 24 y el 26 de septiembre del 2019 en París, Francia [78] y un ejemplo de su aplicación en la calibración del datalogger Global Water WLI6U-030-050 [66], fue publicado en la sección “3.5. Applications” [81] y puede ser consultado íntegramente en el Anexo 2 - 6.

6 Conclusiones

Aunque los resultados obtenidos han sido discutidos oportunamente, se considera relevante retomar los siguientes aspectos:

C1. En la definición del estado del arte del procedimiento de calibración dinámica de los transductores de presión, y atendiendo a los objetivos propuestos en la pasantía en el PTB [74], se confirmó que, independientemente de las presiones y frecuencia de operación de la aplicación, el procedimiento de calibración dinámica de los transductores de presión es un procedimiento genérico que debe incluir:

- La reproducción de una presión de referencia por un sistema de medición independiente.

Así, en el caso del “dropping-ball”, los estudios actuales están direccionados a la medición del pulso de presión a partir de su efecto en la distancia recorrida por un LASER basado en el efecto Doppler [76], mientras que, en la tecnología del tubo de choque, el salto de presión ($p_5 - p_1$) se mide a partir de la teoría de la onda de choque normal.

- La reproducción experimental de perturbaciones similares al oleaje gravitacional del Océano Pacífico Central costarricense.

En el caso del PTB WG 1.33, el uso del “dropping-ball” es adecuado por la forma de las curvas asociadas a la presión de los gases de la combustión de las municiones ensayadas.

Para efectos de la tesis doctoral, el tubo de choque se utiliza para calcular los coeficientes de la ecuación característica del calibrador, que es el patrón de referencia en el generador de perturbaciones periódicas de presión. El generador de perturbaciones periódicas no es un patrón, sino un medio de comparación donde se verifica el desempeño del calibrando utilizado en la medición indirecta de la altura del oleaje.

- El cálculo de los parámetros dinámicos del transductor de presión.

En el caso de los transductores de presión, su dinámica está caracterizada por una EDL IT de segundo orden, con los siguientes parámetros: la frecuencia natural (ω_n) y el coeficiente relativo de amortiguamiento (ζ). Estos coeficientes invariantes en el tiempo deben ser calculados a partir de su función de transferencia en el dominio de Laplace, reproduciendo señales experimentalmente en un generador de perturbaciones, y posteriormente, regresar sus valores al dominio del tiempo.

Cuando no es posible calcularlos, por ejemplo, por las dimensiones del sistema de medida evaluado o la baja frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos, entonces es conveniente el uso del coeficiente de sensibilidad del transductor de presión, estimado experimentalmente en un generador de perturbaciones estacionarias, o en un dispositivo de apertura rápida, como ocurre en el PTB WG1.33.

- ☑ La evaluación de la incertidumbre de las mediciones de presión.

La evaluación de la incertidumbre de las mediciones de presión debe considerar la naturaleza del régimen de mediciones. Si se considera que en el rango de aplicación de la tesis doctoral, las señales de presión son de baja amplitud y frecuencia, la evaluación de sus mediciones corresponde al marco GUM [16].

- ☑ La trazabilidad de las mediciones dinámicas de presión al SI.

La trazabilidad de las mediciones dinámicas de presión aparentemente pasa por su conexión a las mediciones “estacionarias” reproducidas en un dispositivo que, además de la perturbación, sea capaz de generar una zona estable de presión donde se mida en régimen prácticamente “estacionario”.

En el PTB WG01.33 esta región es reproducida automáticamente en la cámara de presión del “dropping-ball”, de manera que pueda establecerse la relación entre el paso óptico del LASER medido por un vibrómetro y la presión medida por un transductor de presión con sensor extensométrico, calibrado previamente en una balanza de presión [76].

En esta tesis doctoral, dicha región es reproducida en la zona de la primera reflexión de la onda de choque del prototipo de tubo de choque, y estimada a partir de la ecuación termodinámica de la expansión isentrópica del gas de operación.

La expansión isentrópica del gas depende, además de su naturaleza “perfecta”, de las mediciones estacionarias de las siguientes magnitudes, todas trazables al SI:

- La presión y temperatura del gas en reposo.
- El número de Mach del frente de onda, que depende de la longitud y el tiempo de viaje entre dos puntos en la sección de expansión del prototipo de tubo de choque.

C2. Bajo el principio de la metrología productiva, se consideró, desde el principio del proyecto, el uso del aire atmosférico como fuente de suministro de gas de operación barata y abundante, sin restricción, lo que permitiría realizar “disparos” de manera sistemática. Sin embargo, su efecto en el sesgo de la reproducción experimental de las presiones teóricas, según la teoría de la onda de choque normal, propició el desarrollo de un procedimiento de secado del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión del tubo de choque, que demostró ser una alternativa válida ante el uso de:

- ☑ Gases de alta pureza, que requieren de la certificación de su pureza.
- ☑ Mecanismos de extracción del aire húmedo atrapado en la cámara de expansión, utilizando bombas de vacío complejas y caras que, además, pueden afectar la integridad de los sensores instalados y de los diafragmas.

C3. El mecanismo de “disparo” que provoca el estallido del diafragma en el tubo de choque es un factor que se tuvo en cuenta en el diseño del prototipo.

Aunque el LMD-ENSAM utiliza un mecanismo de disparo “sofisticado”, los resultados comparativos, en términos de tiempo de respuesta del transmisor de presión EXTECH PT30-SD, demostraron que el estallido del diafragma por sobrepresión es satisfactorio.

Está claro que la presión de disparo depende del espesor y material del diafragma, sin embargo, el interés es evaluar si influye en el tiempo de estabilización de la presión de la primera reflexión de la onda de choque.

Los resultados obtenidos con diafragmas hechos de láminas de aluminio de espesor 10,2 μm y 14,7 μm , demostraron que la clave del éxito en la uniformidad de los disparos está en la estructura que los soporta entre las bridas de los tubos que conforman las cámaras del tubo de choque.

C4. El número de puertos de medida en el tubo de choque para lograr su operación eficiente es de cuatro, distribuidos de la siguiente forma:

Uno en la cámara de compresión, para verificar inicialmente la presión de ruptura del diafragma y ajustar las funciones de registro del software del sistema de adquisición de datos.

Dos en el tubo que conforma la cámara de expansión del tubo de choque, para medir la velocidad del frente de la onda de choque y calcular el número de Mach.

Uno en la brida ciega al final de la cámara de expansión del tubo de choque, para medir la presión del gas perturbado por la primera reflexión de la onda de choque.

C5. Con respecto a la longitud de las cámaras de compresión y expansión del tubo de choque, su influencia no es tan importante como el número de puertos de medición o la calidad del gas de operación.

Si bien la longitud de la cámara de expansión mejora el tiempo de estabilización, se demostró que este factor puede ser compensado con un sistema de adquisición de datos de alta frecuencia de muestreo.

La sobrefrecuencia de muestreo con respecto a la frecuencia de Nyquist para conservar la exactitud de la señal digitalizada no tiene sentido en esta aplicación dinámica, que busca “retratar” la secuencia de puntos para reconstruir eventos de escasos “milisegundos de vida”.

C6. La calidad de las mediciones de la corriente eléctrica de salida de los transmisores de presión constituyó durante el desarrollo del patrón de presión dinámica, un elemento clave de gestión metrológica.

El uso de una fuente de corriente eléctrica CD que, en conjunto con un multímetro digital, incrementara la confiabilidad de la exactitud del amperímetro del sistema de adquisición de datos, sin necesidad de su calibración externa, permitieron generar las matrices de validación “en corriente”, y el paso posterior a presión, en un ambiente de trazabilidad metrológica sostenida.

Al respecto, es importante destacar que la selección de la fuente de corriente eléctrica CD se hizo en el marco de la metrología productiva. Aunque esta filosofía puede ser ajena a un proceso de investigación, en el caso de la tesis doctoral, constituyó una referencia inevitable, buscando siempre los equilibrios técnico-económicos.

- C7.** Los resultados obtenidos durante la visita al LMD-ENSAM, en París, Francia, han constituido una referencia del “desempeño meta” durante las etapas de desarrollo del patrón de presión dinámica, especialmente la tecnología del tubo de choque.

La versión final: TC-02-(0.6/2) demostró un desempeño satisfactorio en comparación con los obtenidos en el tubo de choque francés TC10, especialmente en los coeficientes ajustados de la ecuación característica del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982, siempre que se opere con aire con baja humedad.

Los resultados demostraron, además, que las tecnologías utilizadas por ambos laboratorios son compatibles, especialmente el tubo de choque TC10 como generador de perturbaciones aperiódicas en un amplio rango de presiones, reproducibles razonablemente por el prototipo TC-02-(0.6/2).

La compatibilidad tecnológica permitiría realizar las intercomparaciones [73] entre ambos sistemas de medida, y así demostrar la trazabilidad de las mediciones mediante un protocolo formal al LMD-ENSAM, que ha obtenido el reconocimiento del Instituto Nacional de Metrología³⁶ de Francia, como depositario de los patrones nacionales de presión dinámica.

La estrategia del LMD-ENSAM es interesante: un laboratorio de calibración de una universidad tecnológica que podría ser reconocido por el LCM³⁷, como depositario de un patrón nacional de presión dinámica.

³⁶El LNE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais) es el Instituto Nacional de Metrología de Francia.

³⁷El LCM (Laboratorio Costarricense de Metrología) es el Instituto Nacional de Metrología de Costa Rica.

C8. Se desarrolló un patrón de presión dinámica que permite gestionar la trazabilidad metrológica de transductores de presión con salida eléctrica, utilizados en mediciones dinámicas de presión en el rango de bajas frecuencias: desde 2,435 rad/s hasta 0,317 rad/s, y amplitudes desde 2,81 hasta 42,31 kPa (0,28 dbar hasta 4,23 dbar), equivalentes a las alturas máximas de oleaje desde 0,29 hasta 4,22 m, propias de la climatología del oleaje gravitacional en el Pacífico central costarricense.

El patrón dinámico de presión desarrollado es un complejo sistema de medida, integrado por los siguientes instrumentos de medida:

- Sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX440B n/s 0009E5008567, con cuatro canales de medición independientes y sincronizados, 24 bit de resolución, software HBM catman Easy-AP versión 4.2 y frecuencia de muestreo ajustable hasta 40 kHz.
- Transmisor de presión OMEGA PX4200-030GI n/s 56901 con sensor resistivo semiconductor, calibrado en las instalaciones del laboratorio de presión del LCM, que funciona como patrón de presión estacionaria.
- Transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982 con sensor resistivo metálico, cámara de medición y comportamiento subamortiguado, que funciona como patrón de presión dinámico.
- Prototipo de generador de perturbaciones estacionarias GPE-01 como medio de comparación isobárico regulable, para calibrar los transmisores de presión por comparación directa.
- Prototipo de tubo de choque TC-02-(0.6/2), capaz de reproducir perturbaciones tipo escalón de amplitud unitaria.
- Prototipo de generador de perturbaciones periódicas de presión GPP-02-A, capaz de reproducir perturbaciones periódicas similares en forma a la triangular, y cuyo espectro de amplitudes es insensible a la frecuencia en el rango validado.

Los prototipos de los generadores de perturbaciones dinámicas de presión construidos se encuentran en un mismo puesto de trabajo, con las siguientes características:

- De diseño abierto, es decir, los equipos pueden desinstalarse o reinstalarse, según las demandas de los procesos.
- Modulares, es decir, los componentes de un equipo son intercambiables, especialmente las cámaras y bridas ciegas.

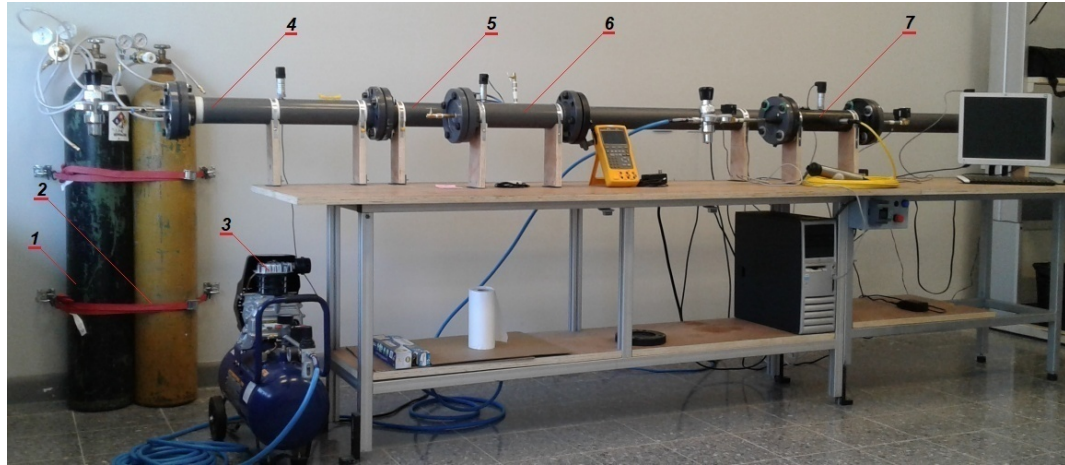


Figura 42. Generadores dinámicos de trabajo: vista general del puesto de trabajo.

Las fuentes de gas se encuentran a la izquierda: nitrógeno industrial de pureza 95 % (cilindro negro - posición 1), aire seco comprimido de uso medicinal (cilindro amarillo - posición 2) y el compresor recíprocante (posición 3).

El generador de perturbaciones aperiódicas de presión basado en la tecnología del tubo de choque se encuentra detrás. Su cámara de compresión (posición 4) está conectada por el sistema de bridas a la cámara de expansión (posición 5).

Delante y alineados se encuentran los prototipos de generador estacionario de presión (posición 6) y de perturbaciones periódicas (posición 7).

7 Líneas futuras de trabajo

Los resultados presentados demuestran la importancia de emprender las siguientes líneas futuras de trabajo:

- L1.** Definir las estrategias de ajuste de las respuestas del patrón de presión dinámica a las perturbaciones aperiódica y periódica obtenidas en los prototipos de generadores de perturbaciones TC-02-(0.6/2) y GDP-02-A.

En el proyecto se utilizaron los métodos numéricos de Levenberg-Marquadt y de regresión lineal por mínimo cuadrados ordinarios para los ajustes de las respuestas del patrón de presión dinámica a las perturbaciones aperiódicas y periódicas respectivamente, sin embargo, sus calidades pueden ser mejoradas, utilizando otras técnicas matemáticas.

- L2.** Desarrollar un método primario alternativo para medir la presión de la primera reflexión de la onda de choque.

El patrón primario de presión dinámica validado se basa en el supuesto teórico de que la onda de choque producida al estallar el diafragma, se expande isentrópicamente.

El sesgo obtenido de 2,80 % al secar el aire retenido en la cámara de expansión es excelente, considerando que en el campo de la ingeniería los errores relativos por debajo del 5 % son aceptados ampliamente. Sin embargo, partiendo del hecho de que no se han encontrado reportes formales de veracidad en las aplicaciones del tubo de choque (se da por sentado que el comportamiento del gas en la cámara de expansión es ideal), sería importante otro método alternativo de carácter primario.

Una posible aplicación sería similar a la utilizada por el PTB, es decir, medir la perturbación del recorrido de un LASER que atraviese el fluido de operación en la cámara de expansión del prototipo de tubo de choque TC-02-(0.6/2), con la gran diferencia de que el fluido de operación, a diferencia del “dropping-ball” del PTB, es un gas y no un líquido.

- L3.** Desarrollar un método primario para medir la amplitud y frecuencia de la perturbación periódica generada en el prototipo GDP-02-A.

En la tesis doctoral actual, el prototipo de generador de perturbaciones periódicas GDP-02-A es un medio de comparación que reproduce, con la precisión reportada, una señal periódica parecida a una triangular, pero con la falta de linealidad en sus laderas por el efecto de las válvulas.

El prototipo desarrollado dispone de una restricción a la entrada y salida de la cámara de medición, que podría ser utilizada para, con diferentes diámetros, determinar sus capacitancias e indirectamente, el flujo volumétrico.

8 Bibliografía

1. Hjelmgren, J. Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey. SP REPORT 2002:34. SP Swedish National Testing and Research Institute.
http://www.vibrationdata.com/tutorials/2002_34.pdf
2. JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition. 2008. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
3. BIPM Workshop on Metrology for Dynamic Measurement. 15-16 November 2012. Venue: BIPM, Sèvres France. http://www.bipm.org/en/conference-centre/bipm-workshops/dynamic_measurement/
4. Eiscstädt, S. Analysis of Dynamic Measurements. Evaluation of Dynamic Measurement Uncertainty. Thesis for: Ph.D. Faculty of Mathematics and Natural Sciences. Technical University of Berlin. January 2012.
https://www.researchgate.net/publication/230634277_Analysis_of_Dynamic_Measurements_-_Evaluation_of_Dynamic_Measurement_Uncertainty
5. ISA-37.16.01-2002. A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers. Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). 2012-11-21.
6. Documento de referencia. Volumen I. Universidad de Cantabria (UC). Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C). Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas. España. Diciembre del 2000. http://smc.ihcantabria.es/SMC25/descargas-smc2_5-espana/
7. Silva, R. Análisis y descripción estadística del oleaje. Serie Docencia SD/49. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Septiembre 2005. ISBN 970-32-2813-15.
<https://es.scribd.com/document/257147542/Analisis-y-Descripcion-Estadistica-Del-Oleaje-SERIES-II-UNAM>
8. Lizano, O. Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. Ciencia y Tecnología, 25(1-2): 43-56. 2007 - ISSN: 0378-0524.
http://miocimar.ucr.ac.cr/sites/default/files/articulos/CLIMATOLOGIA_DEL_VIENTO_Y_OLEAJE_FRENTE_A_LAS_COSTA.pdf

9. Fofonoff, N.P. and Millard, R.C. Unesco technical papers in marine science 44. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Endorsed by Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standard and SCOR Working Group 51. Unesco 1983.
<https://darchive.mblwhoilibrary.org/bitstream/handle/1912/2470/059832eb.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Aquadopp Profiler 1 MHz. Technical specifications.
<https://www.nortekgroup.com/export/pdf/Aquadopp%20Profiler%201%20MHz.pdf>
11. Thompson, A and Taylor, B. NIST SP 811. The NIST Guide for the use of the International System of Units (SI). <https://www.nist.gov/physical-measurement-laboratory/special-publication-811>
12. Hoffmann, K. Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas.
http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/applications/stressanalysis/refbook/Strain_Gauge_Measurements_Book_ES.pdf
13. IEEE Std 1241™-2010. Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. Revision of IEEE Std 1241-2000. January 14, 2011.
14. Ogata, K. Dinámica de sistemas. Primera edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 1978 (629 páginas).
15. Schweppe J. L., Eichberger, L. C., Muster, D. F., Michaels, E. L. and Paskusz, G. F. Methods for the dynamic calibration of pressure transducers. NBS Monograph 67. December 12, 1963.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc13252/m2/1/high_res_d/NBS%20Monograph%2067.pdf
16. JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition. September 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
17. ISO 5725-1:1994(E). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions.
18. ISO 5725-3:1994(E). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 3. Intermediate measures of the precision of a standard measurement method.
19. Montgomery, D. Design and analysis of experiments. Fifth edition. John Wiley and sons, Inc.
20. NIST-SEMATECH. Engineering Statistics Handbook. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>

21. Díaz Tey, A. Development of an alternative procedure to verify “in situ” volumetric diaphragm type gas meters for residential use. 17 International Congress of Metrology. Paris. 2015. <https://doi.org/10.1051/metrology/20150008010>
22. Arendacká, B.; Teubner, A.; Eichstaedt, S.; Bruns, T.; Lester, C. Random effects ANOVA in uncertainty evaluation. Measurement 2013. Proceedings of the 9th International Conference, Smolenice, Slovakia. http://www.measurement.sk/M2013/doc/proceedings/039_Arendacka-1.pdf
23. Draper, NR.; Smith, H. Applied Regression analysis. Second edition. John Wiley & Sons. 1981.
24. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data: The role of measurement uncertainty in conformity assessment. https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_106_2012_E.pdf
25. Montgomery, D. Introduction to statistical quality control. Sixth edition. John Wiley and sons, Inc.
26. ISO/IEC 17043:2010. Conformity assessment — General requirements for proficiency testing.
27. Calibration and Measurement Capabilities (CMCs). BIPM. <http://kcdb.bipm.org/appendixC/search.asp?iservice=M/Pres.3.4.2>
28. EURAMET Project 1078. Development of methods for the evaluation of uncertainty in dynamic measurements. <http://www.euramet.org/technical-committees/search-tc-projects/>
29. EURAMET Project IND09. Traceable dynamic measurement of mechanical quantities. From 1 september 2011 to 31 august 2014. https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/traceable-dynamic-measurement-of-mechanical-quantities/?L=0&tx_euramettcp_project%5Baction%5D=show&tx_euramettcp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=9b2402057205a673ee251f61abd88211
30. ISO 9000:2015. Quality management systems - Fundamentals and vocabulary.
31. Calibration certificate. D-K-1586-01-00. HBM P3TCP+MX440B. 2016-06-29.
32. Calibration_Certificate_Example_QV2558_20181101_MX840B. https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/calibration/Calibration_Certificate_Example_QV2558_20181101_MX840B.pdf

33. FLUKE 753/754 Documenting Process Calibrator. Users Manual. July 2011.
https://la.flukecal.com/products/process-calibration-tools/multifunction-calibrators/calibrador-de-procesos-con-documentaci%C3%B3?quicktabs_product_details=4
34. FLUKE 8845A/8846A Digital Multimeter. Users Manual. July 2006, Rev. 3, 3/11.
file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/884xa_umeng0300.pdf
35. Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges. Edition 01/2003 Pages 43.
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/archiv/Publications/Guidelines/DKD-R_6-1_2016_englisch.pdf
36. I-CAL-GUI-017/v4.0/2019/04. Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers EURAMET Calibration Guide No. 17 Version 4.0 (04/2019).
<https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
37. Procedimiento ME-003 para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros. Edición digital 1. Centro Español de Metrología (CEM).
<https://www.cem.es/es/divulgacion/documentos/me-003-procedimiento-calibracion-manometros-vacuometros-manovacuometros>
38. ASTM D1785-15. Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedules 40, 80, and 120.
39. C635-1000 1000mm Spring-Tempered Steel Rule with Millimeter Graduations, Graduations at mm and 1/2mm on Both Sides.
<https://www.starrett.com/metrology/product-detail/C635-1000>
40. Mitutoyo. Measuring Instruments Catalog. Catalog No. US-1005.
<https://www.mitutoyo.com/3d-flip-book/us-1005-mitutoyo-catalog/>
41. OMEGA PX4200 Series. Silicon on Sapphire Pressure Transmitter with Optional Loop Powered Pressure Monitor. <https://www.omega.com/pressure/pdf/PX4200.pdf>
42. HBM. B3031-15.0 en public. QUANTUMX. Operating manual.
<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A03031.pdf>
43. Pressure transducers (for use with Extech SD 750 pressure datalogger). Models PT30-SD, PT150-SD and PT300-SD. User guide. EN-V1.4 2/13.

44. SD700-EU-EN V2.4 07/13. Barometric Pressure/Humidity and Temperature Datalogger EXTECH SD-700. <https://www.transcat.com/media/pdf/SD700data.pdf>
45. LACOMET 11640719. Certificado de calibración del transmisor de presión EXTECH PT30-SD n/s TA87982. Fecha de calibración: 2019-11-08.
46. Downes, S.; Knott, A. and Robinson, I. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors. National Physical Laboratory (NPL). Dynamic Measurement of Mechanical Quantities. PTB-Mitteilungen 125 (2015), No. 2 (pages 24 – 37).
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2015/Heft2/PTB-Mitteilungen_2015_Heft_2.pdf
47. Downes, S; Knott, A. and Robinson, I. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors. National Physical Laboratory (NPL). January 28, 2017. Philosophical Transactions of the Royal Society. <http://rsta.royalsocietypublishing.org/>
48. Downes, Stephen; Knott, Andy and Ian Robinson. Uncertainty estimation of shock tube pressure steps. NPL. XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”. 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic.
https://www.researchgate.net/publication/303749768_Uncertainty_estimation_of_shock_tube_pressure_steps
49. Rivkin, S.L. Propiedades termodinámicas de los gases. Editorial MIR. Moscú. 1979.
50. Mohr, P.; Taylor, B. and Newell, D. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010. Reviews of Modern Physics, volume 84, october –december 2012. DOI: 10.1103/RevModPhys.84.1527. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/codata.pdf>
51. Picard, A; Davis, R S; Gläser, M and K Fujii. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrologia 45 (2008) 149–155 (doi:10.1088/0026-1394/45/2/004).
52. Wieser, M.. and Coplen, T.. Atomic weights of the elements 2009. IUPAC Technical Report. Pure Appl. Chem., Vol. 83, No. 2, pp. 359–396, 2011. doi:10.1351/PAC-REP-10-09-14.
<http://iupac.org/publications/pac/pdf/2011/pdf/8302x0359.pdf>
53. V E. Bean, W. J. Bowers Jr., W. S. Hurst and G. J. Rosasco. Development of a Primary Standard for the Measurement of Dynamic Pressure and Temperature. Metrologia 1993/1994. 747-750.
54. Sarraf, C. and Damion, JP.. A Method for Dynamic Calibration of Pressure Transducers. Laboratoire de Métrologie Dynamique LNE - ARTS ET METIERS ParisTech. 7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements LNE Paris 15 - 16 October 2012.

55. Model 901A10. Instrumented Shock Tube. Installation and Operating Manual Document 21354. Revision C. ECN: 46605. PCB Piezotronics.
http://pcbpiezotronics.ca/contentstore/docs/PCB_Corporate/Pressure/Products/Manuals/901A10.pdf
56. NISTIR 4828. Proceedings. Workshop on the Measurement of Transient Pressure and Temperature. 23-24 April 1991. Editors: Bean, Vern E. and Rosasco, Gregory J.
<https://archive.org/details/workshoponmeasur4828bean/page/42>
57. High frequency shock tube model 9901C. Document DS-0106 rev A. PCB Piezotronics.
http://pcbpiezotronics.ca/contentstore/docs/PCB_Corporate/Pressure/Products/Manuals/901A10.pdf
58. Persico, G.; Gaetani, P. and Guardone, A. Dynamic calibration of fast-response probes in low-pressure shock tubes. Measurement Science and Technology. Volume 16 number 9. Pages 1751-1759. 2005-07-25. Institute of Physics Publishing. (doi: 10.1088/0957-0233/16/9/006). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/16/9/006/meta>
59. Crede, WA. The design and construction of a shock tube facility. Master Thesis. Missouri University of Science and Technology. 1965.
<http://scholarsmine.mst.edu/do/search/?q=The%20design%20and%20construction%20of%20a%20shock%20tube%20facility%2C%20Missouri&s>
60. Doebelin, EO. Measurement systems. Application and design. Fourth edition. McGraw-Hill International Series. Mechanical Engineering Series. 1990 (960 pages) (first version: 1966).
61. Kobata, T; Ooiwa, A. Square-wave pressure generator using a novel rotating valve. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Metrologia. March 2003. DOI: 10.1088/0026-1394/36/6/30. <https://www.researchgate.net/publication/230955678>.
62. Kobata, T; Ooiwa, A. Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator. Sensors and Actuators 79 _2000. 97–101.
63. Hilten, JS., Lederer, PS. and Sethian, J. A simple hydraulic sinusoidal pressure calibrator. National Bureau of Standards Technical Note 720, USA. April 1972.
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnicalnote720.pdf>
64. Vezzetti, CF., Hilten, JS., Mayo-Wells, JF. and Lederer, P.S. A new dynamic pressure source for the calibration of pressure transducers. National Bureau of Standards Technical Note 9174, USA. June 1976. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir74-503.pdf>

65. Díaz Tey, A. Comunicación personal con la Sra Eliana Brazda, Administradora de ISA Standards. 2019-05-20.
66. WL16 Data Logger. Covers WL16S and WL16U Data Loggers. Publication Number 38300112. 2009-11-30. <http://www.globalw.com/downloads/WL16/WL16.pdf>
67. HBM. B00521_04_E00_01 en public. P8AP Absolute pressure transducer. Datasheet. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B02086.pdf>
68. LACOMET 11660719. Certificado de calibración del transmisor de presión OMEGA PX4200-030GI n/s 56901. Fecha de calibración: 2019-11-08.
69. 9th. international workshop on analysis of dynamic measurements. Invitation from Prof. Dr. Markus Bär. Head of Department 8.4 “Mathematical modelling and Data Analysis”. PTB. 2016-07-06.
70. Díaz Tey, A.; Marín, J. Development of a dynamic standard to evaluate the metrological performance of pressure measurement systems. 9th. International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. PTB. Berlín, Alemania. November 9 to 10, 2016.
<http://mathmet.org/projects/dynamic/workdyn/dynamic2016/downloads/>
https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_8/8.4_mathematische_modellieru
ng/8.42/DYNAMIC2016/Preliminary_Programme.pdf
71. Díaz Tey, A.; Govaere, G. and Marín, JE. Development of a dynamic standard of pressure. Paris. 2015. 18th International Congress of Metrology, 1 0 (2017) 40 2.
<https://doi.org/10.1051/metrology/201714002>
72. Sarraf, C. Invitation in Paris between September 25 and 27. 2016-04-06.
73. Preparation of a dynamic pressure intercomparison between the Dynamic Measurement Laboratories of the University of Costa Rica (UCR) and the École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM). Guest researcher: Alberto J. Díaz Tey. Engineering Research Institute (INII). University of Costa Rica (UCR). 2017-12-04. Paris. Francia.
74. Markus, Bär. Invitation as guest researcher. PTB. 2017-02-22.
75. Bruns, Th; Franke, E and Kobusch, M. Linking dynamic to static pressure by laser interferometry. Metrologia 50 (2013) 580–585. [doi:10.1088/0026-1394/50/6/580](https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/6/580)
76. Slanina, O., Quabis, S., Derksen, S., Herbst, J. and Wynands, R. Comparing the adiabatic and isothermal pressure dependence of the index of refraction in a drop-weight apparatus. Applied Physics B (2020) 126:175. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-07519-z>

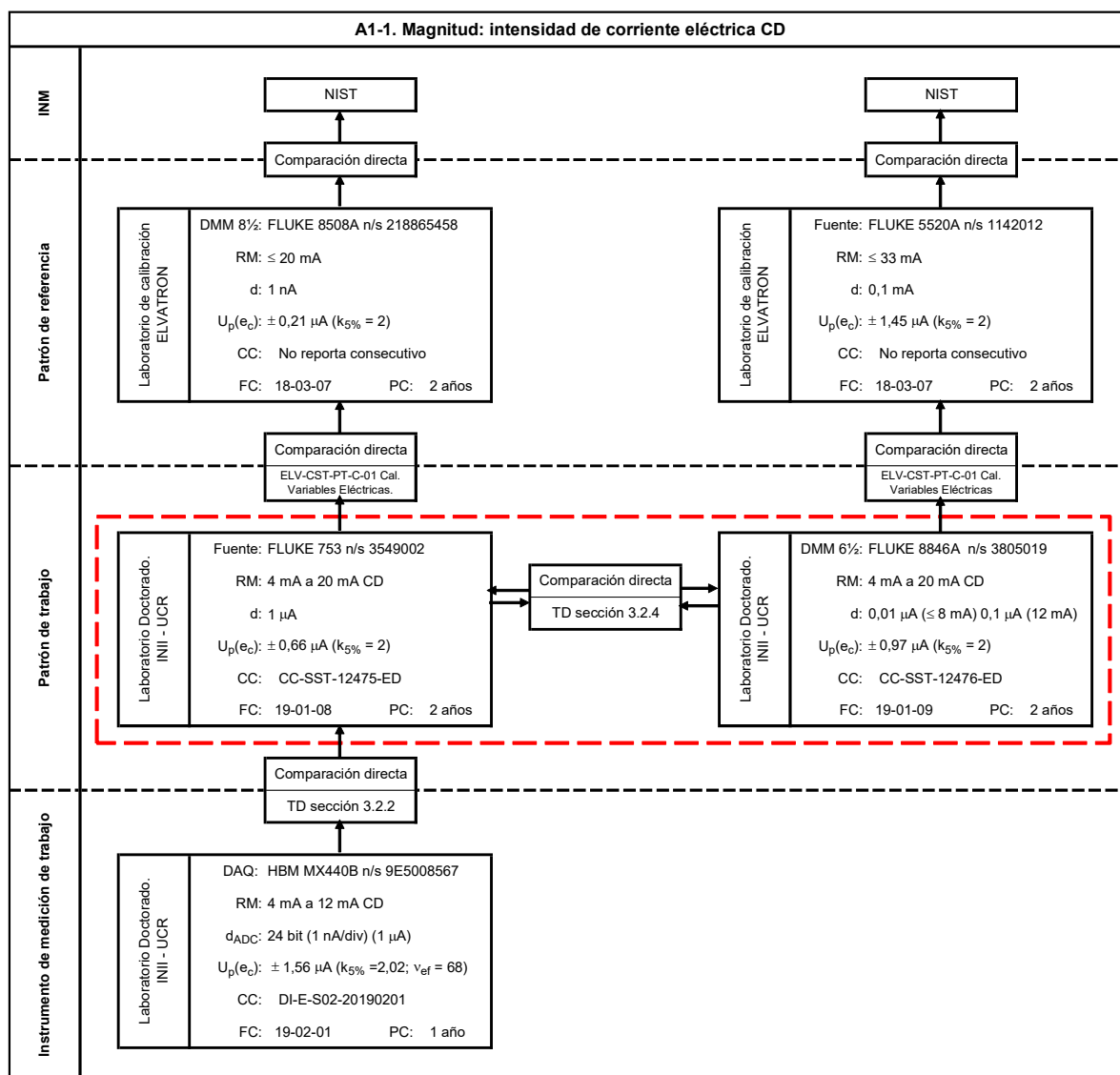
77. Díaz Tey, A. and Govaere, G. La inexactitud del número de Mach de la onda de choque en el tubo de choque. Simposio de Metrología 2018. Centro Mexicano de Metrología (CENAM). Querétaro. México. <https://www.cenam.mx/Memorias/doctos/sm2018/pdf/1904.pdf>
78. Development of a generator of periodic pressure disturbances Mr DIAZ TEY, Mr PADILLA VIQUEZ, Mr GOVAERE VICARIOLLI - University of Costa Rica / Costa Rica. CIM2019. 19th International Metrology Congress. Del 24 al 26 de septiembre del 2019. París. Francia.

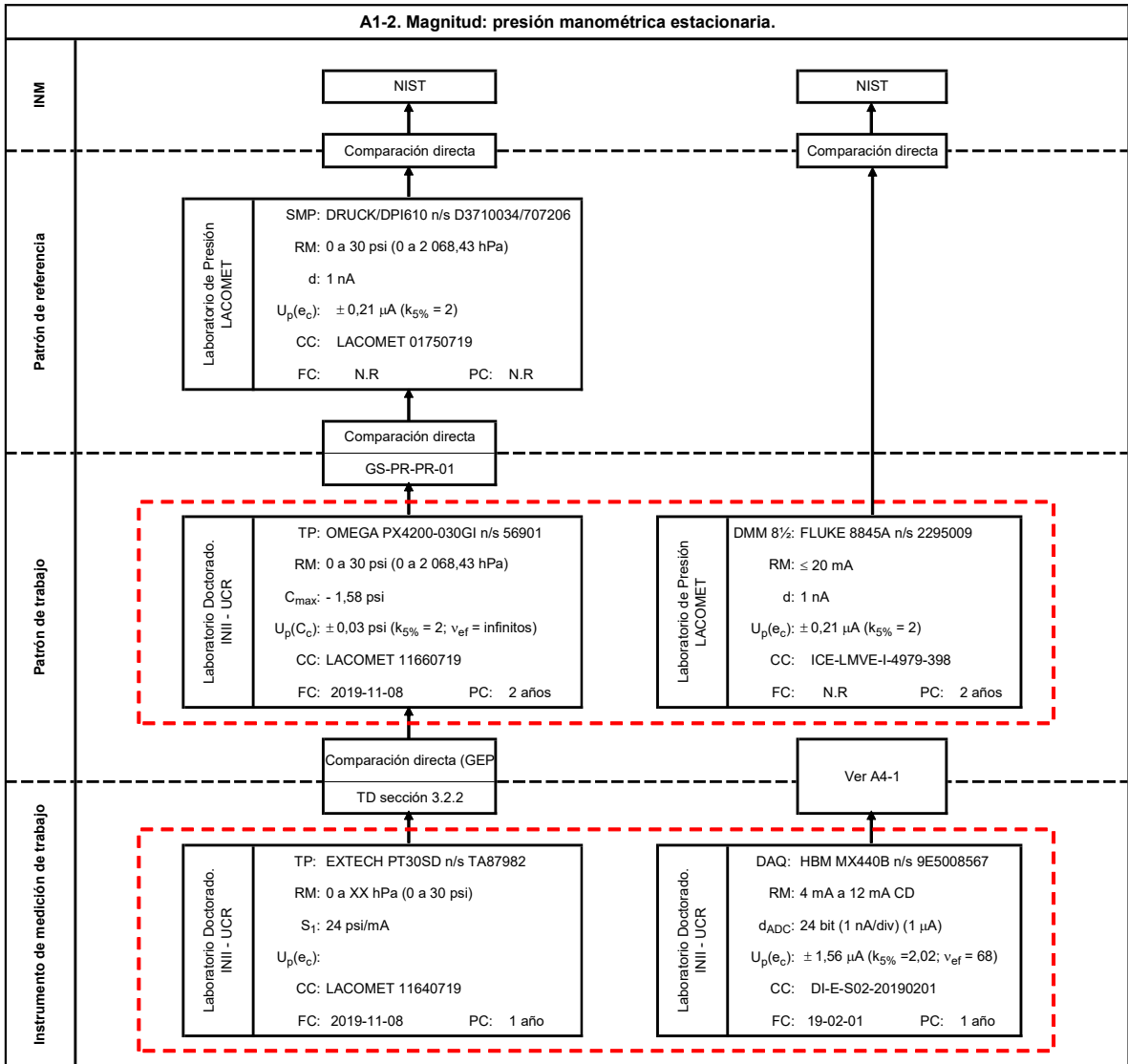
Poster. Mechanics Quantities.

https://www.cim2019.com/files/pdf/CIM2019_Programme-GB_web-V11.pdf
79. HOBO U12-012 Data Logger Specifications. <https://www.onsetcomp.com/datasheet/U12-012>
80. Cengel, Y A., Cimbala, J.M. & Turner, R.H. (2017). Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. Singapore: McGrawHill. Fifth edition.
81. Díaz Tey, A. and Govaere, G. Development of a dynamic pressure standard of low amplitudes and frequencies. Measurement Science and Technology. Meas. Sci. Technol. 33 (2022) 034004 (11pp). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ac3783>

9 Anexos

Anexo 1. Patrón dinámico de presión: cartas de trazabilidad metrológica de las mediciones





Anexo 2. Publicaciones y presentaciones en Congresos y Talleres Internacionales relacionados con la tesis doctoral.

1. Díaz, A. Development of an alternative procedure to verify "in situ" volumetric diaphragm type gas meters for residential use. 17th International Congress of Metrology. Paris. 2015 (ver documento en formato PDF en páginas 1 a 8).

https://cfmetrologie.edpsciences.org/articles/metrology/abs/2015/01/metrology_metr2015_08010/metrology_metr2015_08010.html

<https://doi.org/10.1051/metrology/20150008010>

2. Díaz, A; Marín, J.E. Development of a dynamic standard to evaluate the metrological performance of pressure measurement systems. 9th. International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. PTB. Berlín, Alemania. November 9 to 10, 2016.

<http://mathmet.org/projects/dynamic/workdyn/dynamic2016/downloads/>

https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_8/8.4_mathematische_modellieru

ng/8.42/DYNAMIC2016/Preliminary_Programme.pdf

3. Díaz, A; Govaere, G. and Marín, J.E. Development of a dynamic standard of pressure. Paris. 2017. 18th International Congress of Metrology. 2017 (ver documento en formato PDF en páginas 9 a 16).

<https://doi.org/10.1051/metrology/201714002>

4. Díaz, A. and Govaere, Georges. La inexactitud del número de Mach de la onda de choque en el tubo de choque. Simposio de Metrología 2018. Centro Mexicano de Metrología (CENAM). Querétaro. México (ver documento en formato PDF en páginas 17 a 22).

<https://www.cenam.mx/Memorias/doctos/sm2018/pdf/1904.pdf>

5. Díaz, A., Padilla G., Govaere, G. Development of a generator of periodic pressure disturbances - University of Costa Rica / Costa Rica. CIM2019. 19th International Metrology Congress. Del 24 al 26 de septiembre del 2019. París. Francia. Poster. Mechanics Quantities.

https://www.cim2019.com/files/pdf/CIM2019_Programme-GB_web-V11.pdf

6. Díaz, A. and Govaere, G. Development of a dynamic pressure standard of low amplitudes and frequencies. Measurement Science and Technology. Meas. Sci. Technol. 33 (2022) 034004 (11pp). (ver documento en formato PDF en páginas 23 a 33).

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ac3783>

Development of an alternative procedure to verify "in situ" volumetric diaphragm type gas meters for residential use

Alberto J. Díaz Tey.

Universidad de Costa Rica. San José de Costa Rica. Centroamérica.

Résumé. Cet article montre les performances métrologiques du compteur de gaz portable mis au point pour les mesures de volume dans le domaine, quand il fonctionne à différentes conditions à l'obtention du diplôme, mais similaires à ceux que vous pouvez trouver au cours périodique "in situ" des inspections de compteurs à gaz de type à diaphragme par NTC 5730: 2009. Les effets de la température des gaz et les positions dans le volume mesuré par portables compteurs de gaz, à des pressions différentes de jauge "en amont" de sa restriction, ont été comparés avec le volume mesuré par mouillé compteur de gaz de la chambre, connectés en série et considéré comme étalon de référence. Le premier facteur (température du gaz) était statistiquement significative (ANOVA $\alpha = 5\%$) pour l'air sec, mais pas pour l'azote, cependant, quand désaligné (second facteur), les différences de volumes de gaz était statistiquement significative. La reproductibilité expérimentale de prototype B14, dans la plage de température de 21,0 °C à 26,0° C, et pression manométrique de 1 742 Pa à 240 Pa 2, sont: $\pm 0,98\%$ (azote) et $\pm 1,16\%$ (air sec) pour un volume d'essai de 21 l, ce qui confirme le caractère approprié de l'utilisation de l'azote comme fluide de travail dans le champ. Ces résultats appuient l'utilisation de compteur volumétrique portable en étalon sur le terrain dans la gamme de 4,6 L/min à 5,4 L/min, si examiné les recommandations de ce document.

1 Introduction.

In mid-2009 a distributor of natural gas in Barranquilla city, Colombia, requested the collaboration to develop an alternative method for verification "in situ" the accuracy of the diaphragm type gas meters for domestic use.

In Colombia, metrological control operations related to the subsequent verification of these measuring instruments are performed through a representative sample of the population installed in a stationary pneumatic bank at different flows, however, is allowed during periodic reviews to facilities for supply of natural gas intended for residential use, the application of an alternative procedure, provided that the requirements of OIML R137-1&2:2012 [1] are satisfied with respect to the uncertainty of measurement.

From these requirements, a portable gas meter was developed (prototype B14), able to indirectly measure the volume of gas to actual operating conditions, from the test time and volumetric gas flow, adjusted by linear regression to the gauge pressure "upstream" restriction and discharging to atmosphere. Once successfully tested

the procedure of graduation [2], and before validating alternative verification procedure "in situ" of diaphragm type gas meter, we proceeded to verify the behavior of portable gas meter outside the range of graduation of influential variables in measuring the gas volume.

As an alternative procedure, its development involved an extensive validation [3], to ensure that the results meet the requirements of reference procedure [1, 4], related to its use as a portable volumetric standard.

For this purpose, were installed in series with the portable volumetric meter, a diaphragm type gas meter, with the function of generating the equivalent pneumatic resistance, and a wet chamber gas meter, which act as a reference standard [3, 5].

With the pneumatic circuit ready, were reproduced in the laboratory the conditions that would be encountered during periodic inspections, and its effects were evaluated by designing two experiments nested in three levels:

In the *first experimental design*, the gas temperature for each operating gauge pressure "upstream" of restriction of portable gas meter (prototype B14), was varied, keeping the rest gas meters aligned.

* Auteur de correspondance : teyalh@ice.co.cr

Its purpose is to evaluate if the volume difference between gas volumes measured, when all gas meter are aligned, is statistically independent of the gas temperature.

In the *second experimental design*, type diaphragm gas meter was placed in two different positions with respect to wet chamber gas meter, maintained constant gas temperature for each operating gauge pressure "upstream" of restriction of portable gas meter (prototype B14).

Its purpose is to evaluate if the volume difference between gas volumes measured, when gas meter are out of alignment, is statistically independent of its positions.

In both experimental designs, the gas volumes measured by the portable (prototype B14) and the wet chamber gas meters were calculated, adjusted according to its calibration reports but referred to the conditions of gas to (P₁, T₁) "upstream" of restriction of portable gas meter (prototype B14).

To evaluate whether the deviation of the corrected gas volume measured by the portable gas meter is significant or not with respect to reference, an Analysis of Variance (ANOVA) to the generated data matrix was applied, after statistically processing [6].

Below are the results, which complement the preliminary study [2], and confirm the use of portable gas meter as a working standard, in the alternative procedure of verifying the accuracy of the diaphragm type gas meter for home use in their periodic review.

2 Materials and methods.

2.1 Portable gas meter.

The portable gas meter is a measurement system developed for measuring volume of a compressible fluid flowing through a restriction in a given time [2].

Its adjustment equation is defined by equation 1 [2]:

$$\hat{q}_v = \sum_{i=0}^2 \hat{a}_i \times (p_1)^i \quad (1)$$

Where:

\hat{q}_v : Volumetric flow to the thermodynamic conditions of gas "upstream" of the restriction during graduation, in L / min.

\hat{a}_i : Least-squares coefficients of the polynomial fit graduation, referred in its calibration certificate (see Table 2).

p_1 : Gas gauge "upstream" of the restriction, in inH₂O.

Note 1. It is usual for the unit of measurement of gauge pressure refers to the Anglo-American system. Its equivalence in the International System of Units (SI) is 1 inH₂O_(60°F) = 248,84 Pa [7].

In Table 1, the thermodynamic parameters of the gas "upstream" of restriction of gas meter are reported.

Table 1. Thermodynamic parameters of gas.

Graduation date	Operating fluid	($t_1 \pm \Delta t_1$) _g °C	($P_{1g} \pm \Delta P_{1g}$) _g inH ₂ O
14-04-02	Dry air	24,2 ± 0,5	406,4 ± 1,2
14-04-15	Nitrogen	24,1 ± 0,5	407,4 ± 0,6

Note 2. The static gauge pressure "upstream" of the restriction of portable gas meter at its graduation varies from 6 inH₂O to 10 inH₂O at intervals of 0,2 inH₂O, however, domestic application is in the interval from 7 inH₂O to 9 inH₂O.

The adjustment coefficients for B14 prototype in function of gas operation are reported in Table 2.

Table 2. Adjustment coefficients (B14 prototype).

Símbolo	Aire seco	Nitrogeno	Unidad de medida		
$\hat{a}_0 \pm s(\hat{a}_0)$	2.007 011	0.194 170	2.154 800	0.140 500	L/min
$\hat{a}_1 \pm s(\hat{a}_1)$	0.411 493	0.040 700	0.385 801	0.040 700	(L/min)/inH ₂ O
$\hat{a}_2 \pm s(\hat{a}_2)$	-0.006 000	0.002 920	-0.003 177	0.003 540	(L/min)/(inH ₂ O) ²

Where:

$s(\hat{a}_i)$: Standard deviation of the minimum-square estimate of the adjustment coefficients.

2.2 Reference standard gas meter.

As standard reference an wet chamber gas meter was used, with the following metrological characteristics:

Table 3. Wet chamber gas meter: metrological characteristics.

Value of division / Appreciation	Measurement interval, (L/min)		^{a)} MPE
	< 2	> 2	
10 mL / 1/2	0,2	< 2	± 1%
	≥ 2	≤ 6	± 0,5 %
	> 6	≤ 8	± 1 %

^{a)}Maximum permissible error.

The reference standard gas meter was calibrated twice in the Carl Poe Laboratory, using as a reference standard a volumetric bell American Bell Prover s/n 277. Its maximum drift is reported in Table 4.

Table 4. Maximum drift of relative error by volume of reference standard gas meter.

Graduation Date	Traceability	Maximum drift (Δe_{rel}^{Max})
2011-05-10	NIST 12169734	0,071 % / año
2014-03-06	NIST 11200311	

Currently the period assigned between external calibration is two years.

2.3 Chronometer.

A digital chronometer was used with the following metrological characteristics to measure testing time:

Table 5. Metrological characteristics of digital chronometer.

Measurement interval: to	Resolution	MPE
9 h 59 min 59 s 99 cs	1 cs	± 0,002 %

The digital chronometer is calibrated annually by comparison with a pulse counter of a sinusoidal signal generated by a controllable source of high accuracy.

2.4 Diaphragm type gas meter.

The diaphragm type gas meter was installed in series between the reference standard gas meter and portable gas meter, so, with its pneumatic load, emulate real field situation.

Although the quality of volume measurements of diaphragm type gas meter are not relevant to the present study, its metrological characteristics correspond to those of a volumetric meter 1.6 [8].

2.5 Pneumatic installations.

To perform the *first experimental design*, a pneumatic bench was constructed, where all gas meters are aligned and installed in series, and portable gas meter always discharging to atmosphere, as shown in Figure 1.

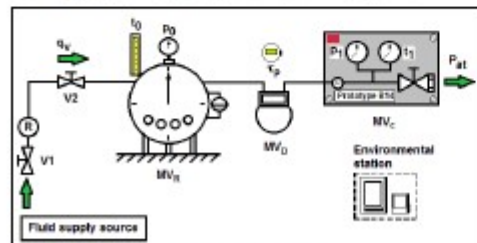


Figure 1. Simplified diagram of first experimental design.

Where:

V1: Open / close valve.

Ⓜ: Pressure regulator.

V2: Fine regulator valve.

MV_R: Reference standard gas meter.

p₀ and t₀: Manometer and thermometer of reference standard gas meter.

t_p: Chronometer.

MV_D: Diaphragm type gas meter.

MV_P: Portable gas meter.

p₁ and t₁: Manometer and thermometer of portable gas meter.

P_{at}: Atmospheric discharge.

To perform the *second experimental design*, which considers different positions of diaphragm type gas meter with respect to reference standard gas meter, the following installations were designed:

First scheme: the type diaphragm gas meter is aligned to portable gas meter but located in lower position with respect to the reference standard gas meter (see Figure 2).

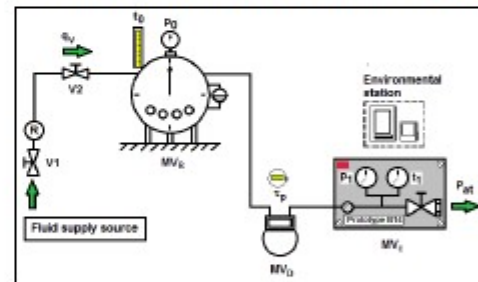


Figure 2. Simplified diagram of the first scheme.

Second scheme: the type diaphragm gas meter is in upper position relative to the portable and reference standard gas meters, aligned with each other (see Figure 3).

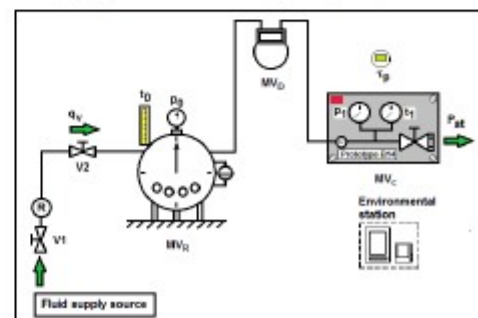


Figure 3. Simplified diagram of the second scheme.

Note 3. The main functions and characteristics of the components of the measuring system referred in Figures 1, 2 and 3 can be consulted at [2].

2.6 Corrected volume of gas.

2.6.1 Portable gas meter.

The gas volume measured by the portable gas meter is defined by Equation 2.

$$V_{cm} = \tau_p \times \dot{q}_v = \tau_p \times \sum_{i=0}^2 \hat{a}_i \times (p_1)^i \quad (2)$$

Where:

V_{cm} : Measured volume of gas, depending on the fitting equation (see equation 1), in L.

τ_p : Test time measured by the chronometer, in min.

Note 4. The test time is the delay in reaching diaphragm type gas meter cumulative volume of 21 L.

The volume corrected but referred to gas conditions at graduation portable gas meter, it is calculated according to equation 3.

$$V_{cg} = V_{cm} \times (1 + 0,01 \times e_{cr})^{-1} \quad (3)$$

Where:

V_{cg} : Volume corrected but referred to gas conditions (P_g, T_g) during its graduation, based on its calibration certificate, in L.

e_{cr} : Relative error by volume, based on its calibration certificate depending on the volumetric flow, in %.

2.6.2 Reference standard gas meter.

The gas volume measured by the reference standard gas meter is calculated according to equation 4.

$$V_{p0} = \frac{V_{pm}}{1 + 0,01 \times (e_{pr} + \Delta e_{der})} \quad (4)$$

Where:

V_{p0} : Corrected volume based on gas conditions (P_0, T_0), in L.

V_{pm} : Gas volume measured by the reference standard meter, from the final and initial volumes of test, in L.

e_{pr} : Relative error in volume, based on its calibration certificate according to the volumetric flow, in %.

Δe_{der} : Drift correction of relative error in volume, in %. Its mathematical expectation is zero but contributes to measurement's uncertainty [9].

2.7 Corrected volume and referred to the gas conditions (P_1, T_1).

As the operating gas pressure is too low ($p_{1\max} \leq 9,0 \text{ inH}_2\text{O}$), the calibration occurs practically at atmospheric pressure, therefore, can be considered acceptable that the effect of the compressibility factor of the gas behavior is negligible, that is, $Z = 1,000$ [10].

Under these circumstances, the gas can be treated as ideal, and for comparing the measured volumes of gas in different thermodynamic states, the Clapeyron equation is used [10], which in its general form is defined by equation 5.

$$V_1 = V_0 \times FCP \times FCT \quad (5)$$

Where:

FCP and FCT : Correction factors for pressure and temperature respectively, dimensionless.

Note 5. The subscripts 0 and 1 refer to the thermodynamic conditions of gas initial and final from the point of view of measurement.

The pressure correction factor is calculated according to equation 6.

$$FCP = \frac{P_0}{P_1} = \frac{(p + P_{at})_0}{(p + P_{at})_1} \quad (6)$$

Where:

P y p : Absolute and gage static gas pressure respectively, in inH_2O .

P_{at} : Atmospheric pressure, in inH_2O .

The temperature correction factor is calculated according to equation 7.

$$FCT = \frac{T_1}{T_0} = \frac{(273,15 + t)_1}{(273,15 + t)_0} \quad (7)$$

Where:

T and t : Thermodynamic and Celsius gas temperatures, in K and °C respectively.

2.7.1 Portable gas meter.

In the case of portable gas meter, equation 5 takes the following form:

$$V_{c1} = V_{cg} \times FCP_c \times FCT_c \quad (5.1)$$

Where:

V_{c1} : Volume corrected to gas conditions (P_1, T_1) during its operation, in L.

For the pressure correction factor, equation 6 takes the form:

$$FCT_p = \frac{P_g}{P_1} = \frac{(p + P_{at})_g}{(p + P_{at})_1} \quad (6.1)$$

For the temperature correction factor, equation 7 takes the form:

$$FCT_t = \frac{T_1}{T_0} = \frac{(273,15 + t)_1}{(273,15 + t)_0} \quad (7.1)$$

2.7.2 Reference standard gas meter.

In the case of reference standard gas meter, equation 5 takes the following form:

$$V_{p1} = V_{p0} \times FCT_p \times FCT_t \quad (5.2)$$

Where:

V_{p1} : Volume corrected at gas conditions (P_1, T_1) "upstream" the restriction of portable gas meter, in L.

For the pressure correction factor, equation 6 takes the form:

$$FCT_p = \frac{P_0}{P_1} = \frac{(p + P_{at})_0}{(p + P_{at})_1} \quad (6.2)$$

For the temperature correction factor, equation 7 takes the form:

$$FCT_t = \frac{T_1}{T_0} = \frac{(273,15 + t)_1}{(273,15 + t)_0} \quad (7.2)$$

2.8 Difference of corrected volumes relating to gas conditions (P_1, T_1).

The difference of corrected volumes relating to conditions gas (P_1, T_1), hereinafter referred simply as volume difference, is defined by equation 8.

$$\Delta V_{c1} = V_{c1} - V_{p1} \quad (8)$$

Where:

ΔV_{c1} : Volume difference, in mL.

2.9 Precision estimate of difference of corrected volumes.

To evaluate the precision of volumes difference of portable gas meter, B14 prototype was constructed and an experiment was designed compensated for nested three levels of operation for each gas (dry air and nitrogen) [6]:

Level 1. Gauge pressure "upstream" of the restriction ($i = 1; 2; \dots; p = 3$).

Level 2-1. Gas temperature "upstream" of the restriction portable gas meter (experimental design 1).

Level 2-2. Relative position of the diaphragm type gas meter relative to reference standard gas meter (experimental design 2).

In general, for Level 2: $j = 1; 2; q = 3$.

Level 3. Results of measurements of corrected volume of gas ($k = 1; 2; n = 3$).

The continuous random variable analyzed (volume difference) is represented as $(\Delta V_{c1})_{ijk}$.

For evaluating the effect "relative position" (level 2 of the experimental design 2), the operation gas temperature remained approximately constant (see Table 6.2).

2.10 Processing measurements.

Measurements of the output variable (difference volumes) are arranged in matrix form and the compliance with the following theoretical assumptions is evaluated:

- ✓ The agreement of the experimental distribution of the measured variable ΔV_{c1} with normal probability distribution proposed.
- ✓ The homogeneity of variances of the series of measurements ΔV_{c1} (homoscedasticity) according to Bartlett test [11].

If the above assumptions are met, statistically evaluate incompatible values (outliers) consecutively applying the Cochran and Grubbs tests [6].

If the presence of an "outlier" is confirmed, the causes that originate are analyzed and corrective and / or preventive actions are taken, as the case.

To evaluate the effect of each of the factors mentioned and their statistical interaction, ANOVA was applied [6].

Depending on the results of ANOVA are reported for interest in this study, the following estimates of the volumes difference [6]:

- Large average ($\overline{\Delta V_{c1}}$).
- Repeatability standard deviation [$s_r(\Delta V_{c1})$].
- Reproducibility standard deviation [$s_R(\Delta V_{c1})$].

3 Results.

The measurements were performed in Baranquilla, Colombia, from April 24 to May 13, 2014. The average environmental behavior in the period is referred in Tables 6.1 and 6.2.

Table 6.1. Ambient conditions (*experimental design 1*).

Gas	$t_a \pm \Delta t_a$	$HR \pm \Delta HR$	$P_{at} \pm \Delta P_{at}$
Gas	°C	%	hPa
Air	23,7 ± 5,0	48,6 ± 9,8	1 011,7 ± 1,0
Nitrogen	23,8 ± 5,0	49,3 ± 10,0	1 012,2 ± 0,6

Table 6.2. Ambient conditions (*experimental design 2*).

Gas	$t_a \pm \Delta t_a$	$HR \pm \Delta HR$	$P_{at} \pm \Delta P_{at}$
Gas	°C	%	hPa
Dry air	23,8 ± 0,4	45,0 ± 1,4	1 013,0 ± 0,0
Nitrogen	24,3 ± 0,6	49,5 ± 1,4	1 012,5 ± 0,0

Once the matrices of the output variable for each experimental design, statistical tests passed successfully applied consecutively, without any value statistically incompatible detected, the ANOVA was applied with a significance level $\alpha = 5\%$. ANOVA results for the *experimental designs 1* and *2* are reported in Tables 7.1 and 7.2 respectively.

Table 7.1. Experimental design 1: results of ANOVA ($\alpha = 5\%$) for operating fluid.

Source	Dry air	Nitrogen	Critical statistical		
	F_c	F_c	v_1	v_2	$F_{(1-\alpha)}(v_1, v_2)$
Factor 0 (φ_1)	0,04	1,18	2	3	5,14
Factor 1 (t_1)	5,28	0,55			4,76

Table 7.2. Experimental design 2: results of ANOVA ($\alpha = 5\%$) for operating fluid.

Source	Dry air	Nitrogen	Critical statistical		
	F_c	F_c	v_1	v_2	$F_{(1-\alpha)}(v_1, v_2)$
Factor 0 (φ_1)	1,50	0,10	2	3	5,14
Factor 1 (ΔH)	10,13	28,31			4,76

Where:

$v_1 = p - 1$ and $v_2 = p$: Degrees of freedom.

Tables 8 refers pooled parameters that define the volume difference precision for the *experimental designs 1* and *2*.

Table 8.1. Experimental design 1: volume difference precision, in mL.

Gas	$^a) \overline{\Delta V_{ct}}$	$^a) \sigma_r(\Delta V_{ct})$	$^a) \sigma_g(\Delta V_{ct})$
Dry air	-91 (-0,43%)	90 (0,43%)	244 (1,16%)
Nitrogen	-31 (-0,15%)	106 (0,51%)	206 (0,98%)

Table 8.2. Experimental design 2: volume difference precision, in mL.

Gas	$^a) \overline{\Delta V_{ct}}$	$^a) \sigma_r(\Delta V_{ct})$	$^a) \sigma_g(\Delta V_{ct})$
Dry air	98 (0,47%)	89 (-0,42%)	329 (1,56%)
Nitrogen	304 (1,45%)	163 (0,78%)	898 (4,28%)

^{a)} Percentage (%) referred to 21 L.

In the compendium of figures numbered as Figure 4 are shown, using Sheward control chart as a statistical tool [12], the metrological performances of the B14 prototype portable gas meter, in function of the volumes difference for experimental design 1 and operating gas.

Note 6. The procedure for establishing the control limits: Limits Warning (LA — —) and Limits of Action (LC — —) of the output variable evaluated are referred in Section 3 of [12].

Within the limits of Upper Warning (LAS) and Lower (LAD) [12], is expected that the results of any future calculation of the volumes difference are, whenever it takes place in the period assigned between external calibrations reference standard gas meter used (see Tables 2 and 3).

If reference standard gas meter drift is higher than expected, it is likely that the new results are in the band between the warning limits (LA) and action (LC) [12]; in this case, the calibration laboratory should review the assigned period between external calibrations of standard gas meter used.

The metrological performance of portable gas meter developed (prototype B14) when gas temperatures are different from graduation, but all gas meters are aligned, is shown in Figures 4.

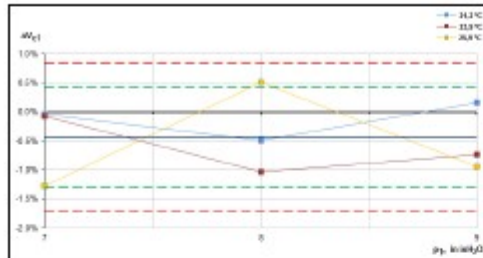


Fig. 4.1. Statistical limits of repeatability: dry air.

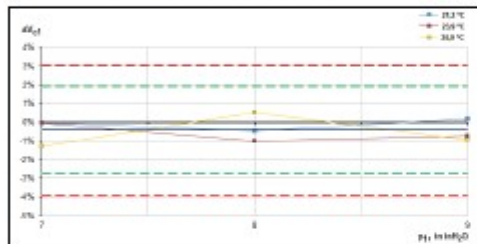


Fig. 4.2. Statistical limits of reproducibility: dry air.

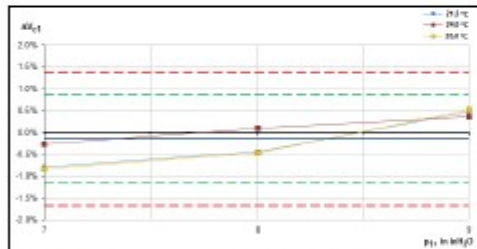


Fig. 4.3. Statistical limits of repeatability: nitrogen.

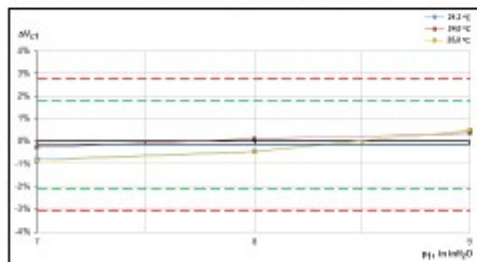


Fig. 4.4. Statistical limits of reproducibility: nitrogen.

4 Discussion.

For the experimental design 1, ANOVA results for $\alpha = 5\%$ (see Table 7.1) confirm that the effects of static gauge

pressure "upstream" restriction of portable gas meter are not statistically significant for volume difference in both: dry air and nitrogen.

In the case of gas temperature, ANOVA results for $\alpha = 5\%$ (see Table 7.1) confirm that its effects is not statistically significant for volume difference in nitrogen but it is significant for dry air.

In the case of experimental design 2, ANOVA results for $\alpha = 5\%$ (see Table 7.2) confirm that effects of relative position of diaphragm type meter for each reproduced gauge pressure is statistically significant in volume difference for both dry air and nitrogen.

In Table 9 are reported differences of repeatability obtained during graduation [2] of portable gas meter with respect to operating conditions (aligned).

Table 9. Differences of repeatability obtained.

Gas	^{a)} At graduation		^{a)} In field	
	$s_r(e_{rV})$	$s_R(e_{rV})$	$s_r(\Delta V_{r1})$	$s_R(\Delta V_{r1})$
Dry air	3 mL (0,014%)	3 mL (0,014%)	90 mL (0,43%)	244 mL (1,16%)
Nitrogen	5 mL (0,023%)	5 mL (0,023%)	106 mL (0,51%)	206 mL (0,98%)

^{a)} Percentage (%) referred to 21 L.

Although the variables are obtained by different methods, the comparison is valid because both express deviations from the same reference: gas volume corrected to (P_1, T_1) measured by the same reference standard gas meter.

It was expected that under conditions of graduation, the repeatability standard deviations were lower, however, the values obtained are still less than 1% required by the NTC 5730: 2009 [4].

Why not use the values of reproducibility? Because not apply for a simple verification in field of diaphragm type gas meter. This process happens, by the nature of the test, under conditions of repeatability, whose pooled values represent the maximum experimental variation obtained.

When reproducibility values be used? In the comparison of the results of different tests of the same type diaphragm gas meter. For example, if the gas meter is sent to a calibration laboratory for verification by the process reference [5].

5 Conclusions and recommendations.

Considering the temperature effect on volume difference when the operating fluid is dry air (see ANOVA Table 6.1), it is more important to control the temperature

variations of air supply that its value, when using the portable gas meter as volumetric field standard.

However, conditioning and control not only the temperature but also humidity, in verifying the diaphragm type gas meter, are complex and expensive technological operations when performed in field.

Although not expected, by the nature of the fluid and small height differences ($\Delta H < 1,5$ m), the effect of the relative position of the diaphragm type gas meter was significant in volumes difference, experimental results demonstrated the opposite: it is statistically significant ($\alpha = 5\%$) regardless of the nature of the gas (see Table 6.2 ANOVA).

However, its effect is significantly superior in nitrogen ($F_c = 28,31$) than dry air ($F_c = 10,13$).

This study complements the validation of graduation procedure of portable gas meter [2], and its results confirm the robustness of its metrological performance to the influential variables that are present in the field during verification of diaphragm type gas meter.

It is recommended:

1R. Using industrial grade nitrogen as operation gas. It was shown from the validation of graduation procedure of portable gas meter [2], its advantages over the "dry air":

- ✓ The portable power supply is much simpler: a cylinder with a high pressure regulator is sufficient.
- ✓ Its high purity and composition stability is ensured by the Provider.
- ✓ Generates better reproducibility in metrological performance of portable gas meter: 206 mL versus 244 mL ¡18 % better! (see Tables 7).

2R. When performing inspections "in situ" of diaphragm gas meters type according to NTC 5730: 2009 standard [4], keep aligned portable gas meter that acting as field standard, especially if nitrogen is used as working fluid.

3R. Use the OIML criterion [1] if the expanded uncertainty of the calibration of the diaphragm type gas meter is greater than 1%.

4R. Extend the study to other regions, for example higher or colder than Barranquilla city.

5R. Evaluate the technical advantages of digitizing temperature and gauge pressure measurements of gas operation with respect to higher prices of portable gas meter.

6R. Develop an alternative method to direct measurement of atmospheric pressure with a barometer.

Acknowledgements.

The author appreciated the valuable collaboration provided by the Caribbean Gas and Zambrano Group in the metrological solution presented.

References

1. OIML R 137-1&2. Gas meter. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. Edition 2012 (E). (<http://www.oiml.org/publications>)
2. Díaz Tey, Alberto J., Rojas Millán, Rafael. Validación del desempeño metroológico. Medidor volumétrico portátil para verificar "in situ" a los medidores de gas tipo diafragma de uso (<http://www.cdtde.gas.com/Descargas/Edicion%209/Revista%20MET&FTU%209.pdf>)
3. OIML V 2-200. Edition 2012 (E/F) (JCGM 200:2012). International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3rd edition 2008 version with minor corrections. (<http://www.oiml.org/publications/V%2002-200-e12.pdf>)
4. NTC 5730:2009. Revisión periódica de instalaciones para suministro de gas natural destinadas a usos residenciales y comerciales y sus correspondientes artefactos a gas. 2009-12-16.
5. ISO/IEC 17025:2005 (E). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Second edition. 2005.
6. ISO 5725-3:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method.
7. NIST Special Publication 811. Guide for the Use of the International System of Units (SI). 2008 Edition (<http://www.bipm.org/en/si/conversions.html>)
8. NTC 2728. Medidores de gas tipo diafragma. Primera actualización. 2005.
9. OIML G1-100 Edition 2008 (E) (JCGM 100:2008). GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition September 2008. 134 pages (<http://www.oiml.org/publications>).
10. Dietrich, Harald, "et al". Measuring instruments for gas. Gas Meter Testing of Gas Volume Meters whit Air at Atmospheric Pressure. PTB Testing Instructions. Volume 29. 2003.
11. Engineering Statistics Handbook (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook.htm>)
12. ISO 3534-2: 1993 (E/F). Statistics – Vocabulary and symbols. Part 2: Statistical quality control. First edition. 1993-06-01.

Development of a dynamic standard of pressure Élaboration d'une étalon de pression dynamique

Alberto J. Díaz Tey

Universidad de Costa Rica. San José de Costa Rica, Centroamérica (alberto.diaztey@ucr.ac.cr)

Georges Govaere Vicarioli

Universidad de Costa Rica. San José de Costa Rica, Centroamérica (georges.govaere@ucr.ac.cr)

José E. Marín Rodríguez

Universidad de Costa Rica. San José de Costa Rica, Centroamérica (jose.marinrodriguez@ucr.ac.cr)

Abstract. Based on the fact that there is no reported measurement and calibration capacity for dynamic pressure measurements, a reference standard is statistically characterized from the pressure of the first reflection of the shock wave produced by the expansion of a gas in a shock tube. The direct comparison of the pressure measurements in the stabilization time allows to evaluate the behavior of a pressure transducer by the effect of the validated aperiodic perturbation and thus, to infer its metrological performance in the indirect measurement of the height of the marine waves at depths of up to 25 m, very important in the design of maritime structures. The performance of reference standard was validated for air and 2 m length of the driven section. The results are reported in terms of reproducibility of the pressure in the laboratory by the standard uncertainty pooled, with relative uncertainty of 2,72% for disturbed air pressures equal to 137,01 hPa.

Résumé. Compte tenu du fait qu'il n'y a pas de mesure rapportée et la capacité d'étalonnage pour les mesures dynamiques de la pression, une norme de référence est statistiquement caractérisée à partir de la pression de la première réflexion de l'onde de choc produite par l'expansion d'un gaz dans un tube de choc. La comparaison directe des mesures de pression dans le temps de stabilisation permet d'évaluer le comportement d'un transducteur de pression par l'effet de la perturbation aperiodique validée et donc d'en déduire sa performance métrologique dans la mesure indirecte de la hauteur des ondes marines aux profondeurs de jusqu'à 25 m, très important dans la conception des structures maritimes. La performance de la norme de référence a été validée pour l'air et 2 m de longueur de la section entraînée. Les résultats sont rapportés en termes de reproductibilité de la pression dans le laboratoire par l'incertitude standard combinée, avec une incertitude relative de 2,72% pour les pressions d'air perturbées égales à 137,01 hPa.

1 Introduction.

Currently, measurements in dynamic processes are present in the technological, medical and academic sectors [1]. One of its most interesting applications is related to the design of coastal structures from the indirect calculation of the energy transferred by the wind to the surface of the sea [2], which depends, among other variables, on the average height of the waves.

From the simplifications of linear theory, waves can be treated as a progressive wave whose energy density doesn't depend on the wave period or the depth but only on the height and length of the wave:

$$E = \rho_{sw} \times g_1 \times \frac{H^2}{8} \times L \quad (1)$$

Where:

E : Energy density per surface unit of wave train, in $J \cdot m^{-1}$.

ρ_{sw} : Density of the sea water according to the equation of state of the sea water [3], in $kg \cdot m^{-3}$.

g_1 : Local acceleration of gravity, in $m \cdot s^{-2}$.

H : Height of the wave, in m.

L : Wave length, in m.

Although the theoretical model allows for simulations prior to design, in reality the wave height is a statistical function, which indirectly determines the average wave height from the pressure measurements performed by a transducer located on the seafloor, and disturbed stochastically by the waves of the sea [4]:

$$H = \rho_{sw} \times g_1 \times p^{-1} \quad (2)$$

Where:

p : Pressure measured by the pressure transducer, in kPa.

The metrological reliability of the generated databases has become an important aspect for researchers and engineers involved with mathematical modeling, who seek a technical - economic balance in their design proposals.

Since in the field of dynamic measurements there are no measurement and calibration capacities (CMC) published by the BIPM [5], it is not possible to make direct comparisons of measuring instruments with internationally recognized standards, as is common practice in measurements quasi-stationary [6].

It has been demonstrated that the metrological parameters resulting from the quasi-stationary calibration of a measurement system do not satisfactorily describe the accuracy of its behavior under dynamic operating conditions [1], but the replacement of the quasi-stationary calibration approach with the dynamic calibration

approach, requires the development of a measurement system that allows to define the dynamic pressure.

In the present context, the term "realization" is related to the reproduction of the dynamic pressure not from its definition but by building "... a highly reproducible standard based on a physical phenomenon" [6].

An independent physical phenomenon may be the pressure step that a shock wave produces during the isentropic expansion of an ideal gas. If the gas is dry air, then its value can theoretically be predicted according to the following equation [7]:

$$p_2(\tau) - p_1(\tau) = +\frac{7}{5} \times p_1(\tau) \times (M_1^2 - 1) \times [(2 + M_1^2) \times (5 + M_1^2)^{-1}] \quad (3)$$

Where:

$p_2(\tau)$: Pressure of the first reflection of the shock wave, in kPa.

$p_1(\tau)$: Pressure before the arrival of the shock wave (gas not disturbed), in kPa.

M_1 : Mach number of the shock wave, dependent on its speed and temperature.

The experimental reproduction of the described perturbation is performed in a shock tube, however, there are discrepancies in the international community regarding its use for metrological purposes: some national metrology institutes (INM) refer to it as the primary standard, while others use it as a measuring system that requires a reference transducer to determine the pressure.

If the shock tube is used as a reference standard, a reasonable doubt arises as to how to calibrate the reference transducer. However, if a high frequency sampling data acquisition system is available, it is possible to perform several measurements during the stabilization time (dwell time) of the first reflection of the shock wave.

During this stabilization time, the pressure variations are minimal and stochastic, so that the accuracy of their measurement can be estimated from the results of the calibration in quasi-stationary regime of the pressure transducer.

The goal of the present work is to present the procedure for estimate the accuracy of the reference standard of dynamic pressure from a statistical model associated with an experimental factorial design, where the effect of the burst of the diaphragm on the pooled standard deviation [8] of the pressure of the first reflection of the shock wave.

2 Materials and methods.

2.1 Pressure measuring system.

For the generation of the experimental data, a dynamic pressure measurement system was developed, consisting of:

- The prototype of shock tube, as generator of aperiodic disturbances of pressure.
- The pressure transducers,
- The analog to digital converter (CAD).
- The software of acquisition and digital recording of the results of the measurements.
- Personal computer (PC).
- Software for processing of metrological and statistical parameters.

Figure 1 shows the shock tube prototype built and installed in the Laboratory of Dynamic Measurements of the Institute of Engineering Research (INII) of the University of Costa Rica (UCR). The device is composed of two tubular polyvinyl chloride (PVC) sections with a constant outer diameter equal to 88.90 mm (3½ in).



Figure 1. Shock tube prototype. General view.

The wall thickness of the tubes is equal to 7.62 mm, so that their bursting resistance is greater than 6.48 MPa (940 psi), allowing their safe use in the application range.

Figure 2 shows a view of the high pressure chamber of the prototype shock tube, supported by supports (1) on a horizontal table (2) [the bubble level (9) allows its adjustment] to ensure the stability of the system operation.

Each section is joined by movable PVC flanges (3), which guarantee the sealing of the coupling by means of rubber seals and four properly adjusted bolts.

As an operating fluid, air supplied by a reciprocating compressor is used, via the hose (4), to the high-pressure chamber (5), 400 mm in length, by means of a fine adjustment device (6), which allows you to adjust the volumetric flow of air and keep it constant during filling.



Figure 2. Shock tube prototype. High pressure camera (driver section).

Between the flanges of the high (5) and low pressure (7) chambers is installed an aluminum of 0,1 mm thick diaphragm (see Figure 3), which bursting when its mechanical resistance is overcome by the gas pressure.



Figure 3. Shock tube prototype diaphragm.

To measure the pressure of the rarefaction wave after the diaphragm has burst, the pressure transducer (8) has been installed in the measuring port TP6.

Figure 4 shows the proper configuration of the shock tube prototype validation, where the low pressure chamber (7), of length equal to 2 m, terminates in a blind flange (10), in which the transducer (11) in the measuring port TP5.

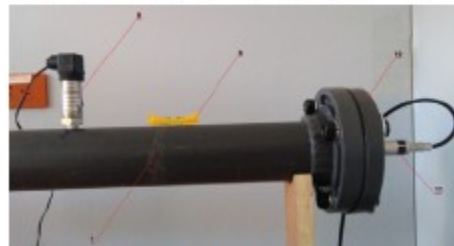


Figure 4. Shock tube prototype. Low pressure chamber (driven section).

When the diaphragm burst occurs, the front of the shock wave first activates the pressure transducer sensor installed in the measuring port TP2 (8), and then to the reference transducer sensor installed 500 mm "downstream" in the measuring port TP5 (11).

The sensors of the pressure transducers are installed on membranes, which when deformed by the action of the shock wave pressure, first converted into analog signals of direct voltage, and then, by means of a transmitter, in electrical signals of electric current of 4 to 20 mA.

Two pressure sensor designs were used:

- The first, of a metallic nature, is installed on a ceramic membrane.
- The second, a silicon semiconductor, is installed on a titanium membrane.

The analog current outputs from the pressure transducers are independently connected to measuring ports of the data acquisition (DAQ) systems, which first condition the measured analog signals and then digitize them synchronized way.

The digitized signals are manipulated by the software whose functions are:

- DAQ configure channels according to the characteristics of the connected transducers and the requirements of the measurement process, for example, its sampling frequency.
- Record the digitized measurements from the electrical transducers in .csv or .xlsx extension files.

2.2 Experimental design.

The validation of the performance of the prototype shock tube as a generator of aperiodic pressure signals included a pressure transducer, considered as a reference, installed in the TP5 measurement port (see Figure 5).



Figure 5. Experimental design: configuration of the TP5 measuring port.

A factorial type experiment [9] was designed to evaluate the effect of diaphragm rupture (see Figure 3) on the reproducibility of direct pressure measurements for each type of pressure sensor, with the aim of selecting the more suitable to function as a reference standard.

During the measurements the following experimental reproducibility conditions were maintained:

- The pressures p_1 and p_3 are measured experimentally with the reference transducer (11) located in the measuring port TP5 (see Figure 4 of this document).
- The sampling frequency of the data acquisition system is 4.8 kHz.
- Ambient air conditions (temperature and relative humidity) as well as atmospheric pressure were measured at the beginning and at the end of the process.

2.3 Statistical processing of measurements.

Once the parameters of interest are selected, the arrays of air pressure measurements are generated in the low pressure section:

- Matrix p_1 , corresponding to the direct measurements of the air pressure before the shock wave disturbance.
- Matrix p_3 , corresponding to direct measurements of air pressure after shock wave disturbance.

The matrices are processed statistically according to the following procedure [10]:

- Verification of the concordance of the experimental distribution with the normal one.
- Detection of possible outliers.
- Verification of equality of variances (homoscedasticity).
- Verification of equality of means by analysis of Variance (ANOVA).

The ANOVA is a powerful statistical tool [11] that allows to estimate, from an experimental design, the reproducibility of the measurements using the standard deviation of p_1 and p_3 pressures.

The above statistical tests were performed using the Minitab 17 application software.

The expanded uncertainty of the pressure of interest has an inferential sense, and for a coverage factor $k_p = 2$ represents a probability of coverage approximately equal to 95%. It is calculated according to the following equation:

$$U_p[\bar{p}_{1(t)}] = \pm 2 \times s_p[\bar{p}_{1(t)}] \quad (4)$$

Where:

$U_p[\bar{\beta}_{1(s)}]$: Expanded uncertainty of the historical average of evaluated pressure (p_1 or p_3), in hPa.

$s_p[\bar{\beta}_{1(s)}]$: Pooled standard deviation of the historical average of evaluated pressure (p_1 or p_3), in hPa.

$\bar{\beta}_{1(s)}$: Historical average of the historical average of evaluated pressure (p_1 or p_3), in hPa.

In general, the expanded uncertainty of the pressure of interest coincides with its warning limits (LA), and any values outside these limits should be considered as an alert for events that affect the natural variability of the measurement system.

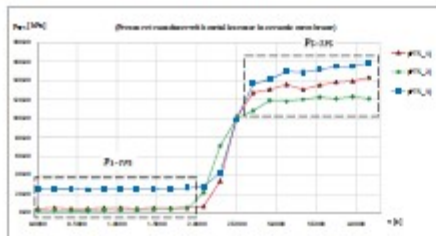
3 Results.

The validation was based on the experimental reproduction of the dynamic pressure p_3 in the prototype of shock tube, through the controlled "firing" at different moments, evaluating the precision, in terms of repeatability and reproducibility within the limits of the Laboratory of Measurements Dynamics, using the techniques of Experimental Design (DOE) [9].

In June 2017 several shots were made on the prototype shock tube, using the pressure transducers with two types of sensors, and the results of the digitized measurements were recorded in .xlsx files (Excel 2007).

3.1 Pressure transducer with metallic sensor in ceramic membrane.

The results of the air pressure measurements before and after being disturbed by the shock wave were as follows:



Graphic 1. Pressures measured in TP5 measuring port by pressure transducer with metallic sensor.

Once the theoretical assumptions of homoscedasticity and normality are satisfied, and considering that there aren't outliers, the ANOVA's shows that there are statistically significant differences between the averages of measurements series of p_1 (Table 1: P-value = 0,000 < α = 0,05) and p_3 (Table 2: P-value = 0,000 < α = 0,05).

Table 1. ANOVA: p_1 measurements on TP5 port.

Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Factor02	3	p1_D1 ; p1_D2 ; p1_D3				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Factor	2	2971.15	1485.57	7925.81	0.000	
Error	27	5.07	0.19			
Total	29	2982.23				
Pooled StDev						
0.433355						

Table 2. ANOVA: p_3 measurements on TP5 port.

Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Factor	3	p3_D1 ; p3_D2 ; p3_D3				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Factor	2	3810.7	1905.37	136.84	0.000	
Error	19	264.6	13.92			
Total	21	4075.3				
Pooled StDev						
3.73152						

The initial historical values of the parameters that characterize the prototype shock tube as secondary standard are shown in Table 3:

Table 3. Parameters of shock tube prototype.

Parameter	Unit of measure	$\bar{\beta}_1$	$s_p(\bar{\beta}_1)$	$\pm U_p(\bar{\beta}_1)$
Air pressure before disturbance	hPa	11,126	0,4334	0,8668
Air pressure after disturbance	hPa	137,006	3,7315	7,4630

Where:

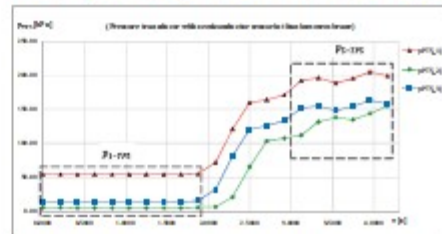
$$\bar{\beta}_1 = \bar{\beta}_{1(s)}$$

$$s_p(\bar{\beta}_1) = s_p[\bar{\beta}_{1(s)}]$$

$$U_p(\bar{\beta}_1) = U_p[\bar{\beta}_{1(s)}]$$

3.2 Pressure transducer with silicon semiconductor sensor in a titanium membrane.

The results of the air pressure measurements before and after being disturbed by the shock wave were as follows:



Graphic 2. Pressures measured in TP5 measuring port by pressure transducer with silicon semiconductor sensor.

Once the theoretical assumptions of homoscedasticity and normality are satisfied, and considering that there aren't outliers, the ANOVA's shows that there are statistically significant differences between the averages of measurements series of p_1 (Table 4: P-value = 0,000 < α = 0,05) and p_2 (Table 2: P-value = 0,000 < α = 0,05).

Table 4. ANOVA: p_1 measurements on TP5 port

Factor Information							
Factor	Levels	Values					
Factor	3	p1_D1 ; p1_D2 ; p1_D3					
Analysis of Variance							
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value		
Factor	2	12527.6	6263.78	1193024.69	0.000		
Error	24	0.1	0.01				
Total	26	12527.7					
Pooled StDev							
0.024882							

Table 5. ANOVA: p_2 measurements on TP5 port.

Factor Information							
Factor	Levels	Values					
Factor	3	p2_D1 ; p2_D2 ; p2_D3					
Analysis of Variance							
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value		
Factor	2	7539.9	3769.94	85.64	0.000		
Error	12	528.1	44.01				
Total	14	8068.0					
Pooled StDev							
6.63394							

The initial historical values of the parameters that characterize the prototype shock tube as secondary standard are shown in Table 6:

Table 6. Parameters of shock tube prototype.

Parameter	Unit of measure	β_1	$s_p(\beta_1)$	$\pm U_p(\beta_1)$
Air pressure before disturbance	hPa	24,499	0,0725	0,1449
Air pressure after disturbance	hPa	165,496	6,6339	13,2679

4 Discussion.

As a result of the execution of the experimental design, values related to the performance of the shock tube as reference standard were obtained. The present discussion focuses on the interpretation of the following metrological parameters obtained experimentally:

4.1 Air pressure before disturbance.

Currently the air pressure at rest is not a controllable parameter in the prototype of the shock tube. During the installation of the diaphragm, the low pressure section (driven section) was filled with air to the ambient thermodynamic parameters, which varied within the following limits:

Table 7. Limits environmental conditions during shooting in the prototype shock tube.

	t_a	HR_a	p_{at}
	°C	%	hPa
Average	24,6	70,8%	879,3
Variation	2,6	7,4%	1,7

Where:

t_a : Temperature of the ambient air.

HR_a : Relative humidity of the ambient air.

p_{at} : Atmospheric pressure.

Considering that:

- The accuracy reported by the manufacturers of both pressure transducers is the same and equal to 0.25% of the maximum of their measuring range (2 068,43 hPa),
- The resolution uncertainty of the DAQ is negligible (24 bit).

The expanded uncertainty of the measurement of resting air pressure depends on the reproducibility of its measurements.

Table 8. Difference of resting air pressure measurements between both pressure transducers.

	Δp_1	$u_{exp}(p_1)$	$s_p(\beta_1)$	$\pm U_p(\Delta p_1)$
Type of sensor	hPa	hPa	hPa	hPa
Metallic on ceramic membrane	13,37	3,0	0,4334	6,08
Semiconductor on titanium membrane			0,0725	5,97

Where:

Δp_1 : Difference of the measured air pressure at rest between both pressure transducers.

$u_{exp}(p_1)$: Standard uncertainty associated with the inaccuracy of the pressure transducer.

$s_p(\beta_1)$: Pooled standard deviation of the historical average of p_1 (see Table 3).

$\pm U_p(\Delta p_1)$: Expanded uncertainty of the measurement difference between both pressure transducers ($p \approx 95\%$).

The difference of p_1 measurements obtained between both pressure transducers can not be explained by the expanded uncertainty for a 95% confidence probability.

Under this circumstance, the relative uncertainty of both pressure transducers in the measurement of air pressure at rest is compared.

Table 9. Relative uncertainty of pressure measurement of air at rest.

Type of sensor	$u_r(\bar{p}_1)$ %
Metallic on ceramic membrane	3,90%
Semiconductor on titanium membrane	0,30%

Where:

$u_r(\bar{p}_1)$: Relative uncertainty of the historical average of p_1 . It's calculated according to the following equation:

$$u_r(\bar{p}_1) = \frac{s_p(\bar{p}_1)}{\bar{p}_1} \quad (5)$$

When the gas is at rest (quasi-stationary measurements), the pressure transducer with the semiconductor sensor mounted on a titanium membrane behaves better metrologically compared to the pressure sensor with ceramic membrane metal sensor.

However, the dynamic behavior will decide the selection of the pressure transducer which, together with the prototype shock tube, will function as a reference standard.

4.2 Pressure of disturbed air.

As measurements of the air pressure at rest, the expanded uncertainty of measuring air pressures disturbed by the shock wave depends on the reproducibility of their measurements.

Table 10. Difference of pressure measurement of disturbed air between both pressure transducers.

Type of sensor	Δp_2 hPa	$u_{EMP}(p_2)$ hPa	$s_p(\bar{p}_2)$ hPa	$\pm U_p(\Delta p_2)$ hPa
Metallic on ceramic membrane	28,49	3,0	3,7315	9,56
Semiconductor on titanium membrane			6,6399	14,55

Where:

Δp_2 : Difference of pressure measurement of disturbed air between both pressure transducers.

$u_{EMP}(p_2) = u_{EMP}(p_1)$: Standard uncertainty associated with the inaccuracy of the pressure transducer.

$s_p(\bar{p}_2)$: Pooled standard deviation of the historical average of p_2 (see Table 3).

$\pm U_p(\Delta p_2)$: Expanded uncertainty of the measurement difference between both pressure transducers ($p \approx 95\%$).

In these circumstances, other parameters that characterize the performance of the prototype shock tube are compared

to select the type of sensor that will work with this as a reference standard.

Table 11. Another parameters of shock tube prototype.

Type of sensor	$u_r(\bar{p}_2)$ %	\bar{t}_{1-5} ms	\bar{n}_{ps} samples	\bar{t}_s ms	\bar{f}_s Hz
Metallic on ceramic membrane	2,72%	1,18058	7	1,31944	757,8947
Semiconductor on titanium membrane	4,01%	1,52778	8	0,83333	1199,9999

Where:

$u_r(\bar{p}_2)$: Relative uncertainty of the historical average of p_2 . It's calculated according to the following equation:

$$u_r(\bar{p}_2) = \frac{s_p(\bar{p}_2)}{\bar{p}_2} \quad (5)$$

\bar{t}_{1-5} : Historical average of reaction time of the pressure transducer to step-type disturbance Δp_{1-5} .

\bar{n}_{ps} : Historical average of number of samples recorded by the DAQ at the time of pressure stabilization p_2 .

\bar{t}_s : Historical average of stabilization time of pressure p_2 .

\bar{f}_s : Historical average of frequency of the shock tube prototype. It's calculated according to the following equation:

$$\bar{f}_s = (\bar{t}_s)^{-1} \quad (5)$$

From Table 11 it is inferred that the pressure sensor with metallic sensor mounted on ceramic membrane behaves dynamically better to characterize the experimental step-like perturbation reproduced by the prototype of tube of shock.

This does not mean that the pressure transducer with titanium membrane semiconductor sensor is not able to measure dynamic events, but its inertia is higher compared to the selected pressure transducer.

The values of relative uncertainty of the pressure measurement as well as the stabilization time of the first reflection of the shock wave are comparable with those reported by other authors [1].

5 Conclusions and recommendations.

In general, the results of the statistical tests applied show that for a level of statistical significance $\alpha = 5\%$, the pressure values depend on the diaphragm factor, but not the variability of its series of measurements.

The prototype shock tube together with the metal sensor pressure transducer installed in a ceramic membrane, is the reference standard of the Laboratory of Dynamic Measurements of the University of Costa Rica (UCR).

Its metrological characteristics are as follows:

Table 12. Reference standard of dynamic pressure. Metrological characteristics.

\bar{p}_1	$s_p(\bar{p}_1)$	\bar{p}_2	$s_p(\bar{p}_2)$	Unit of measure
11,13	0,072	137,01	3,732	hPa

It is recommended:

R1. Applying this procedure to higher burst pressures to increase the amplitude validated prototype shock tube.

The increase in the amplitude of the burst pressure of the diaphragm is achieved by using sheets of the same material but of a greater thickness or another type of material.

R2. Check the effect of atmospheric air humidity on the reproducibility of the air pressure disturbed by the first reflection of the shock wave (p_2), and in the stabilization time.

R3. Feed the matrices p_1 and p_2 to quantify the asymptotic limits of the corresponding pooled deviations.

4R. To evaluate the dynamic behavior of the pressure transducer selected as reference standard in other aperiodic devices, in order to quantify the reproducibility between laboratories.

Acknowledgements

The authors appreciated the valuable collaboration provided by the School of Mechanical Engineering and School of Chemistry of the University of Costa Rica in the metrological solution presented.

References

- Hjelmgren, Jan. Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey. SP REPORT 2002:34. SP Swedish National Testing and Research Institute (http://www.vibrationsdata.com/tutorials/2002_34.pdf).
- Documento de referencia. Volumen I. Universidad de Cantabria (UC). Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C). Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas. España. Diciembre del 2000 (http://smc.ihcantabria.es/SMC25/doscargas-smc2_5-espana/).
- Fofonoff, N.P. and Millard, R.C. Unesco technical papers in marine science 44. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Endorsed by Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standard and SCOR Working Group 51. Unesco 1983.

- Casarrín, Rodolfo Silva. Análisis y descripción estadística del oleaje. S/D49. Septiembre 2005. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional de México (UNAM).
- BIPM Workshop on Metrology for Dynamic Measurement. 15-16 November 2012. Venue: BIPM, Sèvres France (http://www.bipm.org/en/conference-centre/bipm-workshops/dynamic_measurement/).
- JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition. 2008 (<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>).
- ISA-37.16.01-2002. A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers. Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA). 2012-11-21
- JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edition. September 2008 (<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>).
- Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments. Fifth edition. John Wiley and sons, Inc.
- NIST-SEMAT. Engineering Statistics Handbook (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>).
- Arendacká, B.; Täubner, A.; Eisestäd, S.; Bruns, T.; Elster, C. Random effects ANOVA in uncertainty evaluation. Measurement 2013. Proceedings of the 9th International Conference, Smolenice, Slovakia. (http://www.measurement.sk/M2013/doc/proceedings/039_Arendacka-I.pdf).

La inexactitud del número de Mach de la onda de choque en el tubo de choque.

Ing. Alberto Juan Díaz Tey; M.Sc. e Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph.D.

Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII). Universidad de Costa Rica (UCR).

Ciudad de la Investigación. San José. Costa Rica

(506)8774 8227. alberto.diaztey@ucr.ac.cr

Resumen:

Si un sistema de medición utilizado para medir un evento dinámico, es calibrado en régimen estacionario, los parámetros reportados no son adecuados para evaluar su exactitud operativa.

El tubo de choque constituye uno de las vías para calibrar dinámicamente los sistemas de medición de presión, siendo el número de Mach de la onda de choque, uno de los parámetros relevantes en su caracterización como patrón dinámico de presión.

La cuantificación experimental de la calidad del número de Mach en el prototipo de tubo de choque del Laboratorio de Mediciones Dinámicas (LMD) de la Universidad de Costa Rica (UCR), fue una tarea previa imprescindible en su validación como patrón dinámico de presión ante la falta de consenso internacional.

1 Introducción.

Aunque está demostrado que los resultados de la calibración estacionaria de un sistema de medida [1] no permiten describir su comportamiento dinámico de operación [2], es usual que continúen calibrándose en régimen estacionario.

La principal razón de esta actitud es que la forma tradicional de asegurarla trazabilidad de las mediciones al SI no es válida porque no existen actualmente las CMCs reportadas al BIPM por los institutos nacionales de metrología [3].

La sustitución del enfoque de calibración estacionaria por el de calibración dinámica, requiere del desarrollo de un sistema de medida que permita la "realización" de la definición de la unidad de medida [1].

En el caso de Costa Rica, se requiere de un patrón dinámico que gestione la trazabilidad de las mediciones de presión con amplitudes y frecuencias máximas de 417 hPa (\approx 6 psi) y 1 Hz respectivamente, propias de la climatología del oleaje en el Océano Pacífico [4].

En el presente artículo se muestra el desempeño del prototipo de tubo de choque desarrollado en el LMD-UCR, con respecto a uno de las magnitudes influyentes: el número de Mach.

2 Marco teórico.

El tubo de choque es un generador de presiones aperiódicas, compuesto por dos cámaras de sección transversal constante, separadas por un diafragma colocado entre las bridas de unión (ver la Figura 1).

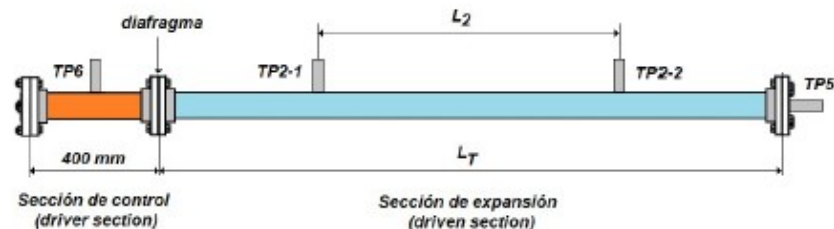


Figura 1. Tubo de choque: esquema simplificado.

Donde:

TP : Puertos de medición donde se instalan los transductores de presión.

L_T : Longitud total de la cámara de expansión [mm].

L_2 : Distancia entre los puntos medios de los puertos de medición TP2 [mm].

En general, la presión en la sección de control se incrementa mediante el flujo continuo de un gas de operación, hasta que se vence la resistencia del diafragma, que estalla y permite la expansión del gas.

La onda de choque resultante, que precede a la masa del gas de operación, activa a los sensores de los transductores de presión a su paso por los puertos de medición TP2.

Si el gas de la cámara de expansión es ideal, entonces la expansión del gas de operación es isoentrópica, y la presión de la primera reflexión de la onda de choque depende de la presión del gas ideal y del número de Mach [2, 5]:

$$p_5 = f(p_1, M_5) \quad (1)$$

Donde:

p_5 : Presión de la primera reflexión de la onda de choque [hPa].

p_1 : Presión del gas ideal en reposo [hPa].

M_5 : Número de Mach de la onda de choque.

El número de Mach es un parámetro adimensional que relaciona las velocidades de la onda de choque y del sonido:

$$M_5 = a_5 \times a_1^{-1} \quad (2)$$

Donde:

a_5 : Velocidad de la onda de choque [$m \cdot s^{-1}$].

a_1 : Velocidad del sonido en el gas en reposo [$m \cdot s^{-1}$].

La velocidad de la onda de choque se calcula según la siguiente ecuación:

$$a_5 = L_2 \times t_2^{-1} \quad (3)$$

Donde:

L_2 : Distancia medida entre los puertos de medición TP2 [m].

t_2 : Tiempo de desplazamiento de la onda de choque entre las posiciones TP2 [s].

La velocidad del sonido en el gas ideal en reposo está definida por sus condiciones termodinámicas:

$$a_1 = (k_1 \times R \times T_1 \times M_g^{-1})^{0.5} \quad (4)$$

Donde:

k_1 : Coeficiente isoentrópico del gas, adimensional.

R : Constante molar del gas [8]:

$$R^1 = 8,314\ 472(15) \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$$

T_1 : Temperatura termodinámica [K].

M_g : Masa molar del gas [$kg \cdot \text{mol}^{-1}$].

Como la expansión del gas de operación es en un medio ideal, sus parámetros termodinámicos son independientes de las variaciones de temperatura:

$$k_1 = c_p \times c_v^{-1} \quad (5)$$

Donde:

k_1 : Coeficiente isoentrópico, adimensional.

c_p : Calor específico del gas a presión constante [$kJ \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$] [7].

c_v : Calor específico del gas a volumen constante [$kJ \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$].

$$c_v = c_p - R \quad (6)$$

2.1 Evaluación de la incertidumbre.

La incertidumbre del número de Mach se estimó bajo condiciones de repetibilidad exclusivamente.

Suponiendo que las variables de las magnitudes físicas de la ecuación (1) son estadísticamente independientes, la varianza del número de Mach de la onda de choque se estimó aplicando la Ley de propagación de incertidumbres [8] a la ecuación (2):

$$u_c(M_5) = + \sqrt{u_{a_5}^2(M_5) + u_{a_1}^2(M_5)} \quad (7)$$

¹ Forma de reportar la incertidumbre estándar utilizada en el presente artículo. El número entre paréntesis es el valor numérico de la incertidumbre estándar referida a las últimas cifras del resultado dado.

Donde:

$u_c(M_s)$: Incertidumbre estándar combinada del número de Mach, adimensional.

$u_{a_s}^2(M_s)$: Varianza asociada a la velocidad de la onda de choque, adimensional.

$u_{a_1}^2(M_s)$: Varianza asociada a la velocidad del sonido, adimensional.

A continuación se expone el proceso de estimación de la incertidumbre de cada magnitud medida (variable):

a) Incertidumbre estándar aportada por la velocidad del frente de onda de choque:

$$u_{a_s}(M_s) = c_{a_s} \times u_c(a_s) \quad (8)$$

c_{a_s} : Coeficiente de sensibilidad [$m^{-1} \cdot s$].

$$c_{a_s} = \frac{\partial M_1}{\partial a_s} = a_1^{-1} \quad (9)$$

$u_c(a_s)$: Incertidumbre estándar [$m \cdot s^{-1}$].

b) Incertidumbre estándar asociada a la velocidad del sonido:

$$u_{a_1}(M_s) = c_{a_1} \times u_c(a_1) \quad (10)$$

c_{a_1} : Coeficiente de sensibilidad [$m^{-1} \cdot s$].

$$c_{a_1} = \frac{\partial M_s}{\partial a_1} = a_s \times (-a_1^{-2}) \quad (11)$$

$u_c(a_1)$: Incertidumbre estándar [$m \cdot s^{-1}$].

2.2 Prototipo de tubo de choque.

La Figura 2 muestra el prototipo de tubo de choque construido, denominado TC-01-2m, por los 2 m de su sección de expansión.

El dispositivo está compuesto por dos secciones tubulares de policloruro de vinilo (PVC) de diámetro exterior constante e igual a 88,90 mm (3½ in).

Los tubos y bridas son categoría ASTM SCH 80 para asegurar su uso seguro en el rango de aplicación.

Las bridas móviles entre las secciones de control y expansión (posición 3), garantizan la hermeticidad del acople y la instalación del diafragma, que es una lámina de aluminio de espesor 0,1 mm, que permite alcanzar presiones de ruptura del orden de los 4,5 psi.

Los transductores de presión instalados en los puertos de medición TP2 son OMEGA PX4200-030GI[®], destinados a detectar el paso del frente de la onda de choque y no para medir su presión, con salidas analógicas de 4 a 20 mA (CD) en el rango de medición manométrico hasta 206,8 kPa (\approx 30 psi).

Las salidas de 4 a 20 mA CD se conectan a los puertos de medición del DAQ HMB QuantumX MX440B[®] (posición 1), administrado por su software HBM catman Easy[®].

El fluido de operación es aire comprimido, y el flujo de entrada a la sección de control (posición 4), de 400 mm de longitud, se regula mediante una válvula de ajuste fino.

El fluido en la sección de expansión es aire seco a presión atmosférica, y su temperatura se considera igual a la del ambiente, registrándose cada 1 min con el DAQ EXTECH SD700 (posición 2).

La masa molar del aire seco en reposo en la cámara de expansión se calculó según las masas molares de sus constituyentes [9], considerando las incertidumbres reportadas de sus pesos atómicos [10]:

$$M_{a_s} = 28,965\ 46(45)\ g \cdot mol^{-1}.$$

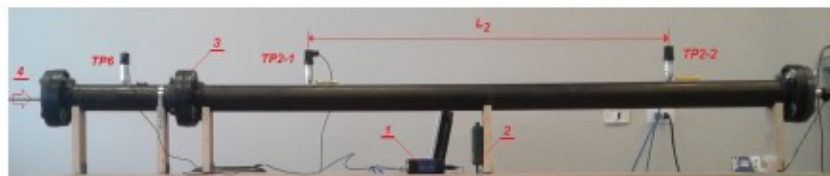


Figura 2. Prototipo TC-01-2m: vista general.

3 Resultados experimentales.

3.1 Distancia entre los puertos TP2.

Simplificando la geometría entre los puertos de medición TP2:

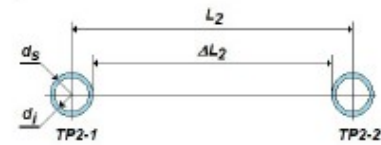


Figura 3. Prototipo TC-01-2m. Distancias características entre los puertos TP2.

La distancia entre los puertos de medición TP2 se estimó según la siguiente ecuación:

$$L_2 = \Delta L_2 + \left[(d_s - d_i) + \frac{d_i}{2} \right] \times 2 \quad (12)$$

Donde:

L_2 : Distancia entre la posición central de los orificios [mm].

ΔL_2 : Distancia entre los bordes interiores de los orificios [mm].

$(d_s - d_i)$: Corrección por la conicidad de la rosca NPT del vástago del transductor de presión [mm].

Para las mediciones de los parámetros referidos se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Regla rígida de acero atemperado Starrett C835[®].
- Pie de rey con indicación digital Mitutoyo CD-6"-CSX[®].

La longitud resultante entre las posiciones TP2 del prototipo TC-01-2m es:

$$L_2 = 1\,195,97(41) \text{ mm.}$$

La distancia entre los puertos de medición TP2 coincide con la distancia que recorre el frente de la onda de choque durante la expansión isoentrópica del gas de operación en el aire seco de la sección de expansión del prototipo TC-01-2m.

3.2 Realización del experimento.

Entre las 10:48 y las 12:08 h del 28 de junio del 2018 se realizaron tres "disparos" en el prototipo TC-01-2m para cuantificar la calidad de las mediciones del número de Mach en condiciones de repetibilidad.

Considerando que la temperatura del aire seco en reposo en el interior de la sección de expansión del prototipo TC-01-2m es igual a la temperatura del aire ambiental:

$$t_1 = T_a = 23,03(0,50) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces su coeficiente isoentrópico se calculó según la ecuación (5):

$$k_1 = 1,400\,5(24\,1)$$

La velocidad del sonido para las condiciones termodinámicas del aire seco en reposo se calculó según la ecuación (4):

$$\alpha_1 = 345,060\,8(1,525\,5) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Las mediciones registradas se exportaron un software de aplicación en Microsoft Excel[®], para detectar gráficamente el momento en que el frente de la onda de choque pasa por los sensores de los transductores de presión instalados en los puertos de medición TP2 (ver el Gráfico 1).

Utilizando los promedios de los "disparos" en el prototipo TC-01-2m (líneas continuas en azul y rojo), se observa que al pasar el frente de la onda de choque primero por TP2-1, y después por TP2-2, activa a los sensores de los transductores de presión, produciendo un salto de presión.

Los saltos perfectamente identificados permiten calcular el tiempo que el frente de la onda de choque invierte en recorrer la distancia L_2 :

$$t_2 = 3\,400,000(0,059) \text{ } \mu\text{s}$$

La variación del tiempo de recorrido en los tres "disparos" es despreciable, y solo es posible distinguirlo por la alta frecuencia de muestreo seleccionada en el DAQ: 1 muestra cada 100 μs .

Conocidas la distancia entre los puertos de medición TP2 y el tiempo invertido por el frente de la onda de choque en recorrerla, se calcula la velocidad del frente de la onda de choque según la ecuación (3):

$$\alpha_s = 351,755\,9(121\,5) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El número de Mach del frente de onda de choque se calcula según la ecuación (2):

$$M_s = 1,019\,4(45)$$

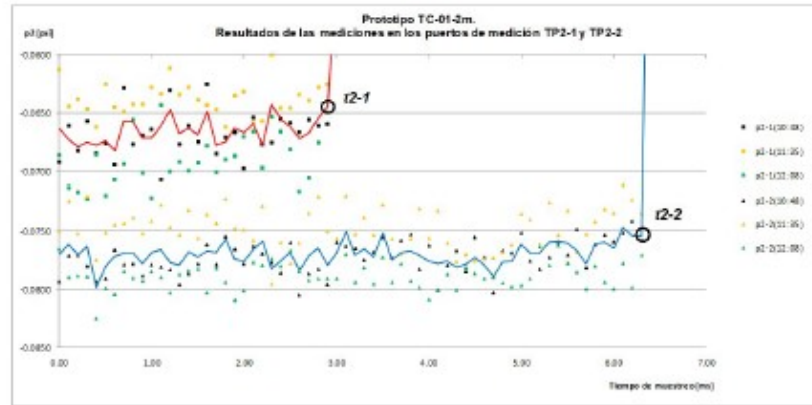


Gráfico 1. Prototipo TC-01-2m. Resultados de las mediciones en los puertos TP2.

4 Discusión de los resultados.

Si se comparara la calidad metrológica del número de Mach obtenidos en el LMD-UCR con los reportados por el National Physical Laboratory (NPL) [11]:

Tabla 1. Número de Mach: comparación.

Parámetro	TC-01-2m	NPL
$u_r(M_s)$	0.443%	0.105%

Donde:

$u_r(M_s)$: Incertidumbre relativa.

Se observa una importante diferencia porcentual. Analizando las causas, se compararon los resultados de las dos magnitudes influyentes en el número de Mach: las velocidades de la onda de choque y del sonido:

Tabla 2. Velocidades: comparación.

Parámetro	TC-01-2m	NPL
$u_{a1}(M_s)$	99.393%	17.920%
$u_{a2}(M_s)$	0.607%	82.080%

Donde:

$u_{a1}(M_s)$ y $u_{a2}(M_s)$: Incertidumbres que ambas velocidades aportan a la incertidumbre del número de Mach.

Es evidente que los efectos de ambas magnitudes están "cruzados": para el NPL la incertidumbre que aporta u_{a2} (82,080%) es

la más importante mientras que para el LMD-UCR es u_{a1} (99,393%).

Si se analiza el presupuesto de incertidumbre de la medición de la velocidad del sonido en el LMD-UCR:

Tabla 3. Parámetros termodinámicos. Comparación.

Símbolo	TC-01-2m	NPL
$u_r(t_s)$	2.187%	0.500%
$u_r(c_p)$	0.500%	N.R
$u_r(c_v)$	0.701%	N.R

Donde:

N.R: No reporta.

La diferencia de la calidad metrológica de las mediciones de la temperatura del aire seco en reposo es probablemente, la causa de las diferencias encontradas en M_s .

5 Conclusiones.

Si bien la calidad del M_s en el prototipo TC-01-2m es inferior a la reportada por el NPL, hay cuestiones técnicas que deben ser consideradas, por ejemplo, las presiones de operación entre ambos experimentos.

Sin embargo, como la "realización" de la presión dinámica se basa en el desarrollo de "... un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico" [1], entonces la calidad de la medición del M_s en el prototipo TC-01-2m debe mejorarse.

Para lograrlo, se proponen las siguientes acciones:

C1. Mejorar la calidad metrológica del termómetro utilizado para medir t_1 .

C2. Medir la temperatura del aire seco en el interior de la sección de expansión, y no en equilibrio térmico con el aire ambiental.

Pero antes de la implementación de las acciones anteriores, es necesario evaluar cuán significativa será su influencia en la incertidumbre de la presión de la primera reflexión de la onda de choque p_5 .

El enfoque productivo de la metrología definirá al final, la viabilidad de su implementación, teniendo en cuenta el alcance de la aplicación prevista.

Agradecimientos.

Los autores agradecen el valioso apoyo brindado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Costa Rica en la solución metrológica presentada.

6 Referencias.

- JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd Edition. 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- Hjelmgren, Jan. Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey. SP REPORT 2002:34. SP Swedish National Testing and Research Institute.
http://www.vibrationdata.com/tutorials/2002_34.pdf
- Calibration and Measurement Capabilities (CMCs). BIPM. Recuperado el 2015-02-15 de:
<http://kodb.bipm.org/appendixC/search.asp?iservice=M/Pres.3.4.2>
- Lizano. Omar G. Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. Ciencia y Tecnología, 25(1-2): 43-56. 2007.
http://miocimar.ucr.ac.cr/sites/default/files/articulos/CLIMATOLOGIA_DEL_VIENTO_Y_OLEAJE_FRENTE_A_LAS_COSTA.pdf
- Schwepe J. L., Eichberger, L. C., Muster, D. F., Michaels, E. L. and Paskusz, G. F. Methods for the dynamic calibration of pressure transducers. NBS Monograph 67. December 12, 1963.
https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc13252/m2/1/high_res_d/NBS%20Monograph%2067.pdf
- Mohr, P J and Taylor, B N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2002. Rev. Mod. Phys. 77 1–107. 2005.
<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.77.1>
- Rivkin, S. L. Propiedades termodinámicas de los gases. Editorial MIR. 1979.
- JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. September 2008.
<http://www.bipm.org/en/publications/guides/>
- Wieser M E 2006 Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem. 78 2051–86.
- Coplen T B and Peiser H S 1998 Pure Appl. Chem. 70 237–57.
- Downes, Stephen; Knott, Andy and Ian Robinson. Uncertainty estimation of shock tube pressure steps. NPL. XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry". 2015.

Development of a dynamic pressure standard of low amplitudes and frequencies

Alberto Juan Díaz Tey^{1,*} and Georges Govaere Vicarioli²

¹ Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

² Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

E-mail: alberto.diaztey@ucr.ac.cr

Received 26 July 2021, revised 17 October 2021

Accepted for publication 8 November 2021

Published 29 December 2021



CrossMark

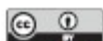
Abstract

The height of the gravitational wave is an influential magnitude in the estimation of its energy content, a very important parameter in the design of maritime structures such as piers and breakwaters; however, there are reasonable doubts among researchers regarding the quality of its measurement. The objective of the present work was to demonstrate that a stationary calibrated pressure transmitter allows the indirect calculation of the wave height with satisfactory accuracy despite the fact that it is a dynamic event as long as its frequency range is low, as is the case with the gravitational waves of the Costa Rican central Pacific Ocean: between 0.05 and 0.39 Hz. In the absence of a primary standard of periodic pressure disturbances, an alternate path was developed based on the characterization of the parameters of the differential equation characteristic of a pressure measurement system in a shock tube prototype from normal shock wave theory and subsequent verification in a periodic disturbance generator that its attenuation and delay are practically negligible at the frequency of 0.1 Hz. The effect of the different geometry of the chamber of the pressure measurement system used in the sea was evaluated pneumatically by comparison with the dynamic pressure standard in the prototype of the periodic disturbance generator, while the effect of the compressibility of the fluid was evaluated in water in the wave channel of the Laboratory of Maritime Engineering, Rivers and Estuaries of the University of Costa Rica. The results show that the pressure measured from the least-squared adjustment coefficients of an electric current transmitter obtained by stationary calibration is acceptable to estimate the climatology of the gravitational wave characteristic of the Costa Rican central Pacific Ocean with maximum errors of 136 mm in waves of height up to 1.4 m.

Keywords: dynamic calibration, pressure transducers, shock tube, periodic pressure generator

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

* Author to whom any correspondence should be addressed.



Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

1. Introduction

Currently, the applications of measurements in dynamic processes are increasingly relevant, covering different fields in the technological, medical, and academic sectors [1].

This work shows a very specific application related to the measurement of the height of the gravitational wave, a dynamic event characterized by waves with periods from 1 to 30 s and heights up to 15 m [2]. The energy content of the gravitational wave is transferred by the wind, and its estimation from the height of the wave defines the design of maritime structures such as marinas and breakwaters.

Fortunately, the gravitational wave on the coasts of the Costa Rican central Pacific Ocean is a dynamic event characterized by waves of low height and frequency: between 0.29 and 4.22 m and between 0.39 and 0.05 Hz respectively [3], by the “shield cone” effect that Cocos Island produces to gravitational wave trains formed in the far south Pacific Ocean near New Zealand.

The wave height is calculated indirectly by the pressure of the seawater column according to Bernoulli’s linearized equation [2], which for the case of interest represents between 2.81 and 42.31 kPa.

To measure the equivalent pressure of the wave height in the project range, it is possible to use the measurement system [4] GW WL16U-030-050 [5], composed of a measurement chamber and data acquisition (DAQ) system with low sampling frequency $f_m \leq 10$ Hz.

The measurement chamber is divided into two parts: one is a metallic resistive sensor on a silicon diaphragm exposed to the hydrostatic pressure of the seawater column, electrically connected to a conditioning circuit of the analog electrical signal with a transmitter of 4–20 mA DC electric current located in the other hermetic part of the measuring chamber.

The transmitter cables are connected to the DAQ by a flexible hollow tube of variable length depending on the model, which also allows compensation of the measurements by atmospheric pressure.

Two batteries allow for autonomy of the measurement system until the programmed download of the information through the communication port and the software to the personal computer (PC).

Figure 1 shows a simplified representation of both the gravitational wave (oscillating line in blue) of constant period (T_p) as well as the installation of the GW WL16U-030-050 measurement system on the seabed to measure the wave height:

Although the GW WL16U-030-050 [5] measurement system is used in a dynamic environment, its analog electrical output is converted into gauge pressure by means of a line of coefficients adjusted by the ordinary least-squares (OLS) method in a direct comparison with a standard pressure in an isobaric environment.

This contradictory situation between the stationary calibration of the measurement system and its application in a dynamic event caused a reasonable doubt among the researchers of the Laboratory of Maritime Engineering, Rivers and Estuaries (IMARES) of the UCR, for which it was proposed to demonstrate that the stationary calibration is suitable for

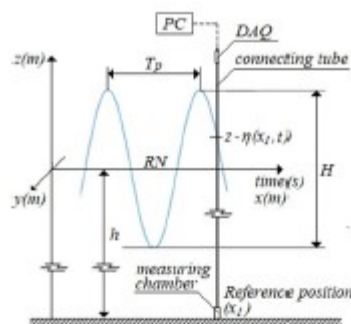


Figure 1. Installation of the measurement system at sea for a reference position.

measuring the height of the gravitational wave as a dynamic event in the range of the gravitational wave climatology of the central Costa Rican Ocean [3].

For this purpose, their corrected response under stationary conditions was compared with the response of a dynamic pressure standard previously characterized in a shock tube, when both were exposed to periodic disturbances reproduced experimentally in a pneumatic generator.

At the end of the process, its corrected response under stationary conditions was compared with the response of the dynamic pressure standard installed in the IMARES wave channel.

2. Materials and methods

2.1. Measurement of fluid pressure

Considering that the response p_T (hPa) of the pressure measurement system in a fluid at rest is linear:

$$p_T = S_0 + S_1 i_s \tag{1}$$

where i_s (mA) is the pressure transmitter output DC electric current, S_0 (hPa) is the adjusted intercept, and S_1 (hPa mA⁻¹) is the static sensitivity coefficient.

Then, the coefficients of equation (1) are estimated by the OLS method by direct comparison with a stationary pressure standard that defines its metrological traceability to SI [4]:

$$(S_0, S_1) \rightarrow (\hat{S}_0, \hat{S}_1).$$

The comparison is made in an isobaric comparator with adjustable pressure in the range of interest: up to 42.31 kPa, taking care that the standard and calibrating sensors are in the same plane and depth of the working volume.

If the quality of the calibrating response is linearly acceptable, then the fluid pressure is indirectly measured according to the following statistical model:

$$\hat{p}_T = \hat{S}_0 + \hat{S}_1 i_m \tag{2}$$

where \hat{p}_T (hPa) is the measured pressure of the fluid and i_m (mA) is the output of the measured pressure transmitter. In this case, the measurement system behaves like a zero-order system and is the simplest dynamically.

However, when the pressure measurement system is used to measure dynamic events such as sea waves, then the parameters set in steady state are not in principle adequate to estimate the pressure.

2.2. Response to a periodic disturbance

If that same pressure measurement system is disturbed by a perfect sinusoidal signal of amplitude A_p :

$$p(t) = A_p \sin(\omega t) \tag{3}$$

where ω (rad s⁻¹) is the frequency of the periodic disturbance and t is the time (s), then its response in the time domain is also a sinusoidal periodic function but modified in amplitude and phase with respect to the disturbance [6, 7]:

$$p_T(t) = A_p M[\sin(\omega t + \phi)] \tag{4}$$

where M (dimensionless) is the amplification and ϕ (rad) the phase shift of the response of the pressure measurement system.

The amplification of the response of the pressure measurement system is calculated according to the following equation [6, 7]:

$$M = [(1 - a^2)^2 + (2\zeta a)^2]^{-0.5} \tag{5}$$

where ζ (dimensionless) is the relative damping factor and a is an auxiliary variable:

$$a = \omega \times \omega_n^{-1} \tag{6}$$

where ω_n (rad s⁻¹) is the natural frequency of the pressure measurement system.

The offset of the response of the pressure measurement system is calculated according to the following equation [6, 7]:

$$\phi = -\tan^{-1} [(2\zeta a)(1 - a^2)^{-1}]. \tag{7}$$

The phase shift between the periodic disturbance and the response of the pressure measurement system ($\Delta\tau$) can be expressed in the time domain according to the following equation:

$$\Delta\tau = 1000 \frac{\text{ms}}{\text{s}} (\phi\omega^{-1}). \tag{8}$$

Therefore, the challenge is to determine the parameters ζ and ω_n .

2.3. Response to an aperiodic shock

If the sensor is exposed to an aperiodic, step-type disturbance of amplitude A_p :

$$p(t) = \begin{cases} 0 & \forall t < 0 \\ A_p & \forall t \geq 0 \end{cases} \tag{9}$$

the response in time ($\forall t \geq 0$) corresponds to an underdamped second-order measurement system ($\zeta < 1$) [6, 7]:

$$p_T(t) = A_p \left[1 - \frac{\text{EXP}(-\omega_d t)}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \cos^{-1}\zeta) \right] \tag{10}$$

where ω_d (rad s⁻¹) is the damped frequency

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n. \tag{11}$$

Once the parameters of the characteristic equation ω_n and ζ of the dynamic pressure standard have been calculated with the established experimental accuracy, then in principle it is possible to predict their behavior in the face of a periodic disturbance.

If the disturbance to which it is subjected is sinusoidal, its response will have the same shape, although the amplitude and phase may be remarkably different with respect to those of the disturbance.

2.4. Reconstruction of the response according to Fourier

However, a periodic signal does not necessarily have to be sinusoidal to evaluate the dynamic behavior of a pressure transducer, and in experimentation, it is practically impossible to reproduce it.

In general, a periodic half-period function L_p can be “reconstructed” from its corresponding Fourier series if the Dirichlet condition [7] is fulfilled:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \tag{12}$$

where $n = 1, 2, \dots, \infty$.

$$a_0 = \frac{1}{L_p} \int_{-L_p}^{L_p} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{L_p} \int_{-L_p}^{L_p} f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$L_p = 0.5T_p.$$

The amplitude and frequency of the harmonics of the reconstructed signal are calculated according to the following equations:

$$A_n = [a_n^2 + b_n^2]^{0.5} \tag{13}$$

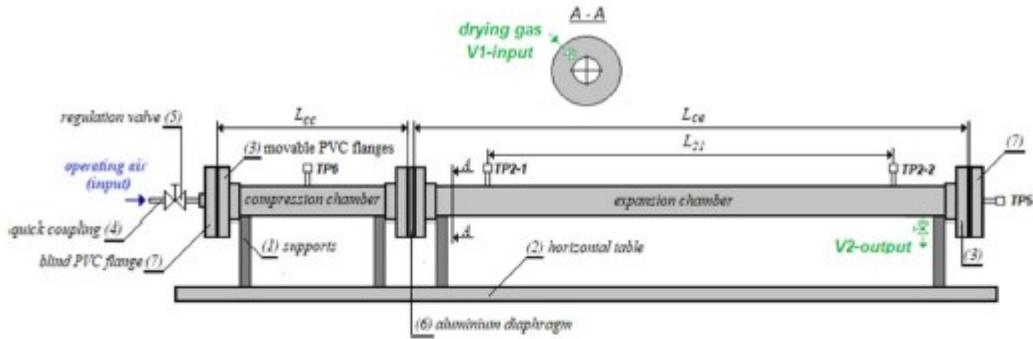


Figure 2. General schematic of the prototype shock tube TC-02-(0.6/2).

$$\omega_n = n\omega_0 \quad (14)$$

where $\omega_1 = \omega_0$ (rad s⁻¹) is the fundamental frequency.

Since the mean is not an is-biased estimator for a periodic function, it is preferable to use the root mean square value:

$$\text{RMS} = \left[\left(\frac{a_0}{2} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{A_n}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (15)$$

where $n = 1, 2, \dots, \infty$.

$a_0/2$ (dimensionless) is the direct component of the signal.

2.5. The shock tube

The shock tube [6–8] is an aperiodic step-type pressure disturbance generator, suitable for estimating the parameters ζ and ω_s of the pressure measurement system.

The prototype developed (figure 2) is made up of two schedule 80 [9] poly(vinyl chloride) (PVC) chambers of constant cross section (76.2 mm): the compression chamber of length $L_{cc} = 423.00$ (0.30) mm and the chamber expansion of length $L_{ce} = 2233.40$ (0.51) mm, between which an aluminum diaphragm (6) of defined thickness is installed.

The two PVC tubular chambers are supported by supports (1) to a horizontal table (2) that ensures the stability of the system's operation. Each section is joined by movable PVC flanges (3), which guarantee airtightness by means of their couplings with rubber gaskets and four suitably adjusted bolts.

The inlet of humid air from a compressor is connected by hose and quick coupling (4) to the compression chamber and is controlled by the regulation valve (5) which, when it abruptly opens, causes the necessary overpressure for the diaphragm (6) to burst.

If the air in the expansion chamber behaves like an ideal gas, it is possible to theoretically predict [6–8] the absolute pressure of the air disturbed by the first reflection of the shock wave P_{S1} (hPa):

$$P_{S1} = P_{21} \frac{\left(\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} + 2 \right) P_{21} P_{1e}^{-1} - 1}{\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1} + P_{21} P_{1e}^{-1}} \quad (16)$$

where P_{21} (hPa) is the theoretical absolute pressure of the disturbed gas at position TP2-1, γ_1 (dimensionless) is the isentropic coefficient of air, and P_{1e} (hPa) is the absolute pressure of the gas at rest.

The absolute pressure P_{21} is calculated according to [6–8]:

$$P_{21} = P_{1e} \left[1 + \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} (M_s^2 - 1) \right] \quad (17)$$

where M_s is the Mach number (dimensionless):

$$M_s = a_s a_1^{-1} \quad (18)$$

The speed of the shock wave a_s (m s⁻¹) is measured with two OMEGA PX4200-030G [10] gauge pressure transmitters installed in the measurement ports TP2-1 and TP2-2, which detect the passage of the front of the shock wave in time:

$$a_s = L_{21} \tau_2^{-1} \quad (19)$$

where τ_2 is the time taken by the front of the shock wave to travel the distance $L_{21} = 1194.50$ (0.42) mm.

The speed of sound a_1 (m s⁻¹) at the thermodynamic conditions of air at rest is calculated according to [6–8]:

$$a_1 = (\gamma_1 R T_1 M_g^{-1})^{0.5} \quad (20)$$

where $R = 8.3144621$ (75) (J mol⁻¹ K) [11] is the molar constant of the gas, T_1 (K) is the thermodynamic temperature, and $M_g = 0.2897$ (4.5 × 10⁻⁷) g mol⁻¹ is the molar mass of dry air [12].

The thermodynamic temperature of the air at rest T_1 (K) trapped in the expansion chamber is estimated assuming thermal equilibrium with the ambient air. Ambient air conditions: temperature, humidity, and atmospheric pressure are continuously measured and recorded with the DAQ EXTECH SD700 s/n Q774023 [13].

The still air gauge pressure is measured with the OMEGA PX4200-030G [10] s/n 56901 gauge pressure transmitter installed in the TP2-1 measurement port.

The referred measurement systems have been calibrated at the INM of Costa Rica in a stationary regime, thus guaranteeing metrological traceability to the SI.

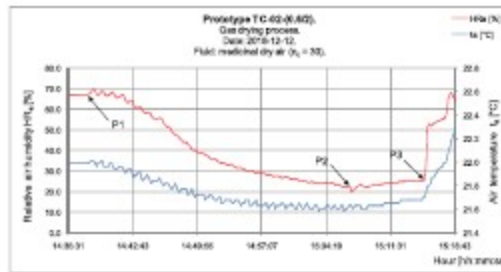


Figure 3. Air drying process in the expansion chamber.



Figure 4. Prototype TC-02-(0.6/2) built.

2.6. Measurement of pressure transmitter output

The DC electric current from the output of the pressure transmitters (i_m in equation (2)) is measured independently, simultaneously, and synchronized by each of the four input channels of the millimeter of the HBM QuantumX MX440B DAQ system [14] s/n 0009E5008567.

The millimeter calibration of the DAQ system is calibrated in steady state by direct comparison with DC electrical current signals from a FLUKE 753 [15] reference source, calibrated in a laboratory authorized by the manufacturer.

2.7. Drying the transmission gas

The means of displacement of the shock wave is the ambient air trapped in the expansion chamber during the assembly of the diaphragm but dried with dry air for medicinal use (purity $\approx 98\%$), which is supplied from its respective container to the expansion chamber through valve V1 and extracted by overpressure, with respect to atmospheric, with valve V2 (figure 2).

The reduction of air humidity is demonstrated by introducing the datalogger HOBO U12-012 [16] 160 mm into the expansion chamber with a sampling frequency of 10 Hz (figure 3).

The drying of the atmospheric air trapped in the expansion chamber is a continuous process of $n_c = 30$ fill-empty cycles with the medicinal dry air.

The drying starts at point P1, and point P2 ends with an effective reduction of the relative humidity up to 25% in 30 min before performing the shot at point P3.

Although the pressure of the gas disturbed by the first reflection of the shock wave remains constant, the duration of the event is so short that it could not be detected by the DAQ system of the GW WLI6U-030-050 [5].

For this reason, the pressure transmitter EXTECH PT30-SD [17] s/n TA87982 was dynamically characterized with a sensor of the same nature, and although the measurement chamber is smaller, it was considered that the resonant effect is similar.

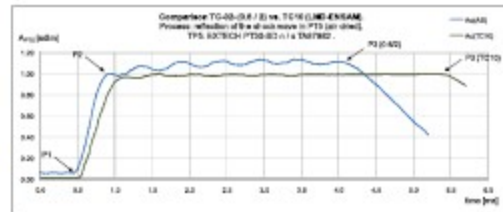


Figure 5. Pressure of the disturbed gas in the expansion chamber.

The gauge pressure measurement system consisting of the EXTECH PT30-SD pressure transmitter [17] and HBM QuantumX MX440B DAQ system [14] was considered the dynamic pressure standard of this project.

3. Results and discussion

3.1. Validation of the shock tube prototype

The validation [4] of the TC-02-(0.6/2) shock tube prototype (figure 4) was based on the measurement of its performance parameters when a $10.2 \mu\text{m}$ thick aluminum diaphragm bursts and its comparison with those previously obtained in the TC10 shock tube of the Laboratory of Dynamic Measurements of the École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (LMD-ENSAM) [18, 19], with the expectation of 5% of difference (figure 5).

The first performance parameter is the rise time of the air pressure at rest from its perturbation by the first reflection of the shock wave ($\Delta\tau_{15}$), and is defined by the milestones P1 (shock wave front impact) and P2 (response to disturbance of the sensor) of the EXTECH PT30-SD pressure transmitter installed in the measurement port TP5 (see figure 2).

In principle $\Delta\tau_{15} \rightarrow 0$ but the imperfection of its reproduction, due to the nature of the dynamic pressure standard, prevents its achievement.

Table 1. Comparison of performance parameters.

Parameters	MU	TC-02-(0.6/2) (AS)			TC10		
		y	s(y)	v	y	s(y)	v
$\Delta\tau_{15}$	ms	0.850	0.000	3	0.638	0.018	1
$\Delta\tau_5$	ms	2.700	0.065	3	4.232	0.092	1

Table 2. Trueness of measured pressures.

Parameters	MU	TP2-1			TP5		
		y	$u_r(y)$	v_{ef}	y	$u_r(y)$	v_{ef}
P_{1c}	hPa	887.27	0.13%	14	882.87	0.17%	12
P_{c-TP}	hPa	979.58	0.12%	14	1072.09	0.14%	20
P_{1-TP}	hPa	962.37	1.00%	1842	1042.86	1.40%	3684
$\Delta (P_{TP})$	%	1.79%			2.80%		

Table 3. Comparison of the adjusted parameters.

Parameters	Symbols	MU	y (TC-02)	y (TC10)
Relative damping coefficient	ζ_n	dm	0.7923	0.7668
Damped frequency	ω_d	rad ms ⁻¹	4.7013	4.9395
Angular natural frequency	ω_n	rad ms ⁻¹	7.7058	7.6954
Linear natural frequency	f_n	kHz	1.2264	1.2248
Adjustment error	sa	adim	0.0904	0.0426
	v_n	sample	59	186

The second performance parameter is the pressure stabilization time ($\Delta\tau_5$) defined by milestones P3 (the arrival of the rarefaction wave coming from the compression chamber of the shock tube causes the pressure drop) and P2.

In principle $\Delta\tau_5 \rightarrow \infty$ but the effect of the successive reflections of the expansion and rarefaction shock waves [7] shortens its constancy.

Table 1 shows the performance of the TC-02-(0.6/2) prototype with respect to the French TC10, measured with the dynamic pressure standard for a sampling frequency equal to 20 kHz, where $v = n_d - 1$ is the degrees of freedom and v is the number of ‘shots fired’.

The deviation from the supposed isentropic behavior of the shock wave expansion is estimated with the statistical criterion ‘trueness’ [20]. Table 2 shows the results of the comparison of the ‘trueness’ of the pressures measured in the measurement ports TP2-1 and TP5 of the shock tube prototype, where $u_r(y)$ is the relative uncertainty of the parameter y estimated according to the law of propagation of uncertainties [21] and v_{ef} the effective degrees of freedom according to Welch-Satterthwaite [21].

The responses of the corrected dynamic standard in both shock tubes, TC-02-(0.6/2) (in blue) and TC10 (in green), correspond to those of an underdamped second-order measurement system ($\zeta < 1$) according to equation (10), and although there are different methods to adjust the coefficients, the Levenberg–Marquardt numerical method was used (table 3),

based on an iterative algorithm of approximations that minimizes the residual of the adjustment.

The maximum relative error of the adjusted coefficients by the Levenberg–Marquardt numerical method in both shock tubes (table 3) did not exceed the 4.82% < 5% established as a goal.

3.2. The generator of periodic pressure disturbances

In 1972, Hilton [7] built a periodic pressure generator that was essentially a tube partially filled with liquid, with one end open and the other closed, mounted on an electrodynamic stirrer, to obtain a sinusoidal disturbance.

Based on the results obtained, Hilton [7] recommended abandoning the primary nature of the method and installing a reference pressure transducer alongside the calibrator.

In 1956 Hermann and Stiefelmeyer [7] built a periodic pressure generator based on a rotary valve that generated square signals slightly distorted by the effect of its sequential opening–closing.

More recently, in 2000, Kobata and Ooiwa [22, 23] developed a generator of periodic pressure disturbances based on a rotary valve of a novel design compared to the one built by Hermann and Stiefelmeyer in 1956 [7] to calibrate transmitters of pressure in amplitudes up to 10 kPa and fundamental frequency between 10 and 50 Hz.

Like their predecessors, Kobata and Ooiwa [22, 23] considered that a reference pressure transmitter is required for the dynamic calibration of another pressure transmitter.

3.3. The construction of the prototype

In the same way that Hermann and Stiefelmeyer [7] and later Kobata and Ooiwa [22, 23] predicted that a rotary valve would generate a train of square pulses, it was considered that the alternating and synchronized control of the inlet and outlet of the flow of air through valves could generate a train of triangular pulses, with a period and amplitude similar to those of the gravitational waves of the Costa Rican central Pacific.

To this end, the prototype GPP-02A (figure 6) was built between June and October 2018, consisting of a schedule 40 [9] PVC measuring chamber of constant cross section (76.2 mm) and length $L_c = 423.00$ (0.30) mm.

In the measurement chamber, there are two measurement ports: TPp and TPc displaced 90° in the same plane, where the dynamic pressure standard, previously characterized in the shock tube prototype, and the calibrating one are installed.

To experimentally reproduce the periodic pressure signal, the GPP-02A prototype consists of two control systems, the first consisting of the fine adjustment valve (8) and the second consisting of a programmable logic controller (PLC) that controls the solenoids of the ON-OFF valves normally open, installed at the inlet and outlet (positions 5e and 5s) of the measurement chamber.

To reproduce the pneumatic periodic signal with the desired parameters, the following procedure is carried out:

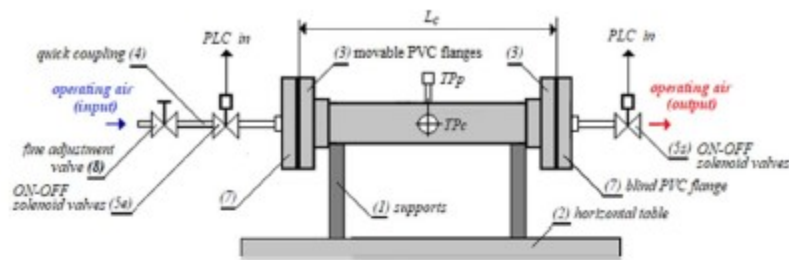


Figure 6. General diagram of the prototype of the generator of periodic disturbances GPP-02A.

- The operating gas supply source is connected to the inlet of the fine adjustment ON-OFF valve (8) and with the second control system disconnected, the flow is adjusted by carefully opening the fine adjustment ON-OFF valve (8) up to the desired initial operating pressure (p_{op}).
- The initial operating pressure is adjusted by measuring in real time on the PC screen the pressure of the dynamic pressure standard installed in the measurement port TPp.
- Once the initial pressure has stabilized at the desired value, the operating period and the number of cycles are programmed in the PLC, activating its control routine until the final amplitude of the reproduced periodic signal is reached.
- Simultaneously, the recording of the measurements is activated and once the programmed cycles are concluded, the results are downloaded for further processing. Without altering the configuration of the pneumatic circuit, the process is repeated under conditions of intermediate precision [20] as many times as deemed appropriate.

3.4. Validation of the prototype

The characteristic parameters of the periodic pneumatic signals reproduced in the GDP-02A prototype are peak-peak period T_p (s) and amplitude A_p (hPa):

$$A_p = (p_{c,max} - p_{c,min}) \quad (21)$$

where $p_{c,max}$ (hPa) and $p_{c,min}$ (hPa) are the maximum and minimum corrected gauge pressures of the cycle.

The results of a run composed of five reproduced cycles are shown in the figure 7.

The average results obtained (figure 8) were as follows:

$$T_p = (10.030^{+0.080}_{-0.070}) \text{ s}$$

$$A_p = (71.550^{+4.163}_{-2.262}) \text{ hPa.}$$

The initial assumption of explaining the nature of the signal generated by a triangular pulse was not fulfilled, but considering that the signal is periodic and satisfies the Dirichlet condition, it is 'reconstructed' with a Fourier series:

- The experimental distribution of the signal on each side of the half-period was adjusted by linear regression using a polynomial of degree 3, in this case $L_p = 5.015$ s,

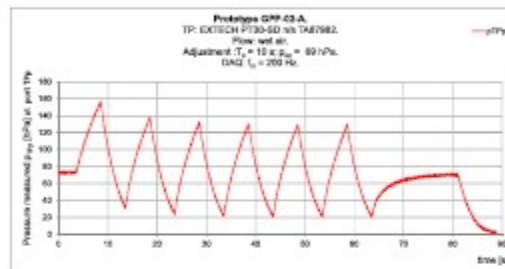


Figure 7. Reproduction of the periodic signal ($T_p = 10$ s).

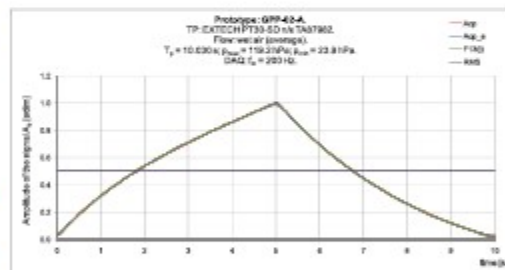


Figure 8. Comparison of the experimental and adjusted signals.

where $R^2(A_p)$ is the multiple correlation coefficient equal to 1,000 00 for both ranges (table 4).

- $F_n(t)$ is calculated according to equation (10). In this case, only harmonics were taken into account up to $n = 13$, that is, $F_{13}(t)$.
- The terms and parameters of the Fourier series (table 5) are calculated according to the equations in section 2.4.

The superposition of the measurements (red line) together with the curves fitted by the OLS method (blue line) and reconstructed by Fourier series (green line) demonstrate the agreement of the two approaches to explain the periodic event, where A_p (dimensionless) is the amplitude of the signal but refers to the maximum pressure of the cycle.

Table 4. Results of ordinary least-squares adjustment.

Ranges	C_0	C_1	C_2	C_3	$s_e(A_p)$
$0 \leq t < L_p$	0.02616	0.3334	-4599E-5	367E-5	40E-5
$L_p \leq t < 2L_p$	4.080	-0.9192	7108E-5	-198E-5	314E-5

Table 5. Fourier series terms and parameters.

Parameters	Symbols	MU	Values
Fundamental frequency	$\omega_n = 1$	rad s ⁻¹	0.6264
Direct component	$A_n = 0$	dm	0.9832
Amplitude of the fundamental harmonic	$A_n = 1$	dm	0.1701
Total harmonic distortion	THD	%	34.16
Root mean square	RMS	dm	0.5102

Table 6. Frequency and amplitude spectra (first part).

ω_n (rad s ⁻¹)						
0	1	2	3	4	5	6
0	0.6264	1.2529	1.8793	2.5058	3.1322	3.7586
A_n (dm)						
0.9832	0.1701	0.0002	0.0027	0.0000	0.0004	0.0000

Table 6. Part two (continued).

ω_n (rad s ⁻¹)						
7	8	9	10	11	12	13
4.3851	5.0115	5.6380	6.2644	6.8908	7.5173	8.1437
A_n (dm)						
0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

The frequency and amplitude spectra obtained from the processing of the average run are shown in table 6:

The spectra obtained show that the effect of frequency on the amplitude of the harmonics of the reproduced periodic signal is practically zero from the second harmonic. In this sense, the observed distortion estimated by the total harmonic distortion (THD = 34.16%) is attributable to the non-linear behavior of the opening-closing valves in the GPP-02A prototype.

In this regard, Kobata and Ooiwa [22, 23] reported that in their periodic generator the assignable cause was the resonant effect of the chamber on the rotary valve.

3.5. Applications

Considering that the geometry of the measurement chamber and the low sampling frequency of the GW WLI6U-030-050 [5] measurement system prevent its dynamic calibration in the prototype shock tube TC-02-(0.6/2) verified the hypothesis: 'the least-squared coefficients estimated in a stationary calibration allow the indirect calculation of the wave height with adequate accuracy in the range of low amplitude and frequency typical of the Costa Rican central Pacific Ocean.'



Figure 9. Installation of the GW WLI6U-030-050 on the GPP-02A.

Table 7. OLS fit coefficients.

S_0 (hPa)	$s(S_0)$ (hPa)	S_1 (hPa mA ⁻¹)	$s(S_1)$ (hPa mA ⁻¹)	R^2 (dm)	$s(PC_{eq})$ (hPa)
-229.035	1.7554	58.440	0.1508	0.99998	1.774

For this purpose, the GW WLI6U-030-050 [5] s/n 1604000374, hereinafter referred to as calibrant, was selected and installed in the TPC measurement port of the GPP-02A prototype (figure 9).

The verification of the hypothesis was carried out through the stationary calibration of the measurand and subsequent verification of its metrological performance in the face of a reproduced periodic disturbance.

3.6. Stationary calibration of the calibrant

The stationary calibration of the calibrant was based on the estimation of its least-squares coefficients by direct comparison with the stationary pressure standard OMEGA PX4200-030G [10] s/n 56901 calibrated in the Pressure Laboratory of the INM of Costa Rica, adjusting the operation of the prototype GPP-02A for its operation as an isobaric comparison medium (table 7).

3.7. Dynamic verification of the calibrant

The first verification of the metrological performance of the calibrant was carried out with humid air in the GPP-02A prototype (figure 9), using as references the stationary and dynamically corrected responses of the dynamic pressure standard.

Considering that the period of the disturbance reproduced in the GPP-02A prototype is $T_p = 10.015$ s the response of the dynamic pressure standard is defined by the parameters referred in table 8.

From table 8 it is concluded that the response of the dynamic pressure standard is practically not affected by the disturbance: there is no attenuation ($M = 1$) and the delay is negligible (206 μ m), and therefore, the pneumatic signal is a reference reliable to evaluate the response of the calibrant.

Considering that local acceleration of gravity $g_l = 9.7818$ m s⁻² and the density of water $\rho_w = 997.52$ kg m⁻³, then the comparative results in equivalent water column height (H), calculated from Bernoulli's linearized equation is shown in figure 10.

Table 8. Parameters of the response to periodic disturbance.

Parameters	Symbols	MU	Values
Auxiliary variable	a	dm	0.0001
Attenuation	M	dm	1.0000
Phase shift	ϕ	rad	-0.0001
Phase shift in time domain	ΔT (average)	μs	-206

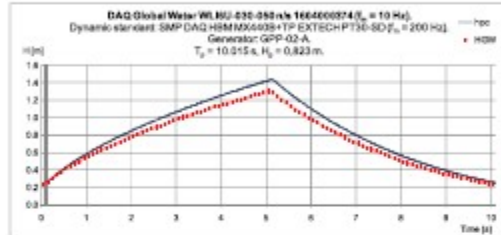


Figure 10. Comparative responses to a pneumatic disturbance.



Figure 11. IMARES wave channel.

3.8. IMARES wave channel

The second verification of the metrological performance of the calibrant was carried out with water in the IMARES wave channel (figure 11), using as a reference the installed pressure measurement system based on the electrical conductivity of the fluid.

In this case, the calibrant was submerged 1 m from the free surface to avoid the effect of the water column when the wave passed [2] and it was subjected to regular periodic disturbances of period $T_p = 1.8$ s.

Given the same density of the water in the wave channel, the comparative results in equivalent water column height calculated from Bernoulli is shown in figure 12.

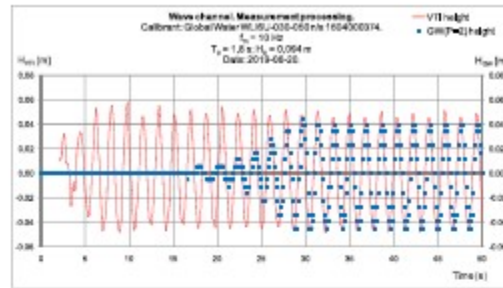


Figure 12. Comparison of the height measured in the wave channel.

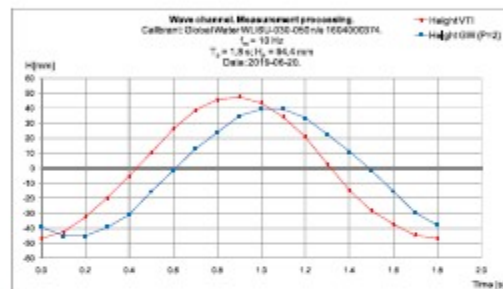


Figure 13. Comparative responses to a hydraulic disturbance.

Table 9. Head pressure comparison.

Statistics	GPP-02A (air)			Wave Channel (water)		
	H_p m	H_{CW} m	ΔH mm	H_p m	H_{CW} m	ΔH mm
Minimum	0.253	0.231	-21.3 (-8.4%)	0.092	0.084	-7.5 (-8.2%)
Average	0.823	0.747	-76.6 (-9.3%)	0.094	0.084	-9.9 (-10.5%)
Maximum	1.435	1.299	-135.9 (-9.5%)	0.098	0.084	-14.0 (-14.2%)

From the swarm of measurements, those corresponding to the four cycles were averaged between 30.5 and 37.9 s (figure 13).

The comparative results of the measurements in column of air and equivalents in water according to Bernoulli are shown in table 9.

4. Conclusions

From table 9 it can be seen that the relative errors of the measurements of the wave heights reproduced in air in the generator of periodic disturbances GPP-02A and in water in the wave channel of the CIMAR-UCR are of the same order: -9.3% vs

–10.5% despite the fact that the pressure measurement systems and the frequencies of the events were different, demonstrating the robustness of the approach.

Therefore, the height of the gravitational wave as a periodic low-frequency event can be measured with a measurement system of the type GW WL16U-030-050 [5] calibrated in steady state with maximum errors of 136 mm in waves of height up to 1.4 m.

As the frequency of the periodic disturbance is not relevant for the established scope, it is possible to use the conventional theoretical framework of the GUM to calculate the uncertainty of the wave height, but taking into account that it is an oscillating event therefore, it cannot apply parametric statistics [24] to estimate the pooled variability under intermediate precision conditions but the arcsine distribution function [21].

The metrological traceability of the indirect water column height measurement systems is managed through the least-squared estimation of the adjustment coefficients in the stationary calibrations.

This property is of great importance when it is not possible to experimentally determine the coefficients of the characteristic equation of the pressure transmitter, either because it cannot be installed in the shock tube prototype or when the DAQ system does not allow an increase in the sampling frequency to detect the milestones of the isentropic expansion of the gas.

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available upon reasonable request from the authors.

Acknowledgments

The Author acknowledges the valuable support of Dr. Sascha Eiscstädt (PTB) and Dr. Christophe Sarraf (LMD-ENSAM) in the development of this work.

Disclaimer

The equipment or commercial instruments identified here are only to ensure the integrity of the information. Such identification does not imply recommendation or endorsement by the author, nor does it imply that the identified equipment is necessarily the best available for this purpose.

ORCID iDs

Alberto Juan Díaz Tey  <https://orcid.org/0000-0002-2294-7655>

Georges Govaere Vicarioli  <https://orcid.org/0000-0002-0036-4571>

References

- [1] Hjelmgren J Dynamic measurement of pressure—a literature survey *SP Report 2002:34* (SP Swedish National Testing and Research Institute) (available at: www.vibrationsdata.com/tutorials/2002_34.pdf)
- [2] Silva Casarín R Análisis y descripción estadística del oleaje *Serie Docencia SD/49* (Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)) (Septiembre 2005) (available at: <https://es.scribd.com/document/257147542/Analisis-y-Descripcion-Estadistica-Del-Oleaje-SERIES-II-UNAM>)
- [3] Lizano O G 2007 Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica *Cienc. Tecnol.* **25** 43–56
- [4] JCGM 200:2012 2008 International vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd Edition (available at: www.bipm.org/en/publications/guides/)
- [5] WL16 Data Logger. Covers WL16S and WL16U data loggers Publication Number 38300112 (available at: www.globalw.com/downloads/WL16/WL16.pdf) (Accessed 30 November 2009)
- [6] ISA-37.16.01–2002 A guide for the dynamic calibration of pressure transducers Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA) (21 November 2012)
- [7] Schweppe J L *et al* Methods for the dynamic calibration of pressure transducers NBS Monograph 67 (available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc13252/m2/1/high_res_d/NBS%20Monograph%2067.pdf) (Accessed 12 December 1963)
- [8] Downes S, Knott A and Robinson I Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors National Physical Laboratory (NPL). Dynamic Measurement of Mechanical Quantities. PTB-Mitteilungen 125 2015 24–37 (available at: www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/2015/Hef2/PTB-Mitteilungen_2015_Heft_2.pdf)
- [9] ASTM D1785–15 2015 Standard specification for poly(vinyl chloride) (PVC) plastic pipe, schedules 40, 80, and 120 (available at: <https://www.astm.org>)
- [10] OMEGA PX4200 Series Silicon on sapphire pressure transmitter with optional loop powered pressure monitor (available at: www.omega.com/pressure/pdf/PX4200.pdf)
- [11] Mohr P J, Taylor B N and Newell D B 2012 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527–605
- [12] Picard A, Davis R S, Gläser M and Fujii K 2008 Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007) *Metrologia* **45** 149–55
- [13] SD700-EU-EN V2.4 07/13 Barometric pressure/humidity and temperature datalogger EXTECH SD-700 (available at: www.transcat.com/media/pdf/SD700data.pdf)
- [14] HBM. B3031-15.0 en public. QUANTUMX. Operating manual (available at: www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A03031.pdf)
- [15] FLUKE 753/754 Documenting Process Calibrator *Users Manual* (available at: https://a.flukecal.com/products/process-calibration-tools/multifunction-calibrators/calibrador-de-procesos-con-documentacion/C3%B3?quicktabs_product_details=4) (Accessed July 2011)
- [16] HOBO U12-012 Data logger specifications (available at: www.onsetcomp.com/datasheet/U12-012)
- [17] Pressure transducers (for use with Exttech SD 750 pressure datalogger) Models PT30-SD, PT150-SD and PT300-SD. User guide. EN-V1.4 2/13
- [18] Sarraf C Invitation in Paris between September 25 and 27 (accessed 6 April 2016)

- [19] Sarraf C Preparation of a dynamic pressure intercomparison between the dynamic measurement laboratories of the University of Costa Rica (UCR) and the École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) Guest researcher: Alberto J. Díaz Tey. Engineering Research Institute (INII). University of Costa Rica (UCR) (4 December 2017) (Paris, Francia)
- [20] ISO 5725-1:1994(E) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions
- [21] JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data—guide to the expression of uncertainty in measurement First edition (September 2008) (available at: www.bipm.org/en/publications/guides/)
- [22] Kobata T and Ooiwa A 2003 Square-wave pressure generator using a novel rotating valve *Metrologia* (<https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/6/30>)
- [23] Kobata T and Ooiwa A 2000 Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator *Sens. Actuators* **79** 97–101
- [24] NIST-SEMAT *Engineering Statistics Handbook* (available at: www.itl.nist.gov/div898/handbook/)