

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN LA CORPORACIÓN CENTRO DE
DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS**



ROLDÁN ALONSO CALA BARÓN



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2013**

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN LA CORPORACIÓN CENTRO DE
DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS**

ROLDÁN ALONSO CALA BARÓN

**Monografía De Práctica Empresarial Presentada Para Optar Al Título De
Ingeniero Electrónico**

**Profesor Supervisor
JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA
Ingeniero Electrónico**

**Supervisor CDT de Gas
JHONATTAN FREDY MORENO BERNAL
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2013**

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, 05 de Julio de 2013

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS .	19
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	19
1.2 SERVICIOS OFRECIDOS POR EL CDT DE GAS.....	20
1.3 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA	21
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL:	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	22
3. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO.....	23
4. MARCO TEÓRICO [1]	25
4.1 METROLOGÍA BÁSICA	25
4.1.1 Magnitud y unidad	25
4.1.2 Medición o medida	26
4.1.3 Instrumento de medida y de indicación	26
4.1.4 Instrumento Patrón o Patrón	26
4.1.5 Calibración	27
4.1.6 Instrumento generador o medida materializada.....	27
4.1.7 Equipo de medición.....	27
4.1.8 Transductor	27

4.1.9	Sensor.....	27
4.1.10	Sistema de medición.....	28
4.1.11	Estabilidad	28
4.1.12	Rango de medición	28
4.1.13	Exactitud y precisión de medida.....	28
4.1.14	Resolución	29
4.1.15	Presión, presión neumática y presión manométrica [2]	29
4.1.16	Temperatura [3]	30
4.2	EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL MÓDULO DE MAGNITUDES SECUNDARIAS	30
4.2.1	Módulos de presión manométrica (desde ahora módulos de presión) 700P05, 700P27 y 700P29 Fluke	30
4.2.2	Condec Source 3000.....	33
4.2.3	2 RTDs 5609 Fluke	33
4.2.4	Termómetro 1524 Fluke	35
4.2.5	Bloque Seco 9142 Fluke	35
4.2.6	Multicalibrador 754 Fluke	37
4.2.7	Osciloscopio 123 Fluke	38
4.2.8	Multímetro y Probador de Aislamiento 1587 Fluke	38
4.2.9	Probador de Tierra 1623 Fluke	41
5.	DESARROLLO DEL PLAN DE TRABAJO	42
5.1	GUÍAS E INSTRUCTIVOS PARA LA OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL MÓDULO DE MAGNITUDES SECUNDARIAS	43
5.1.1	Equipos e instrumentos del módulo de magnitudes secundarias	43

5.1.2	Condec Source 3000 [11]	44
5.1.3	Módulos de presión 700P05, 700P27 y 700P09 Fluke [12]	46
5.1.4	Multicalibrador 754 Fluke [13]	47
5.1.5	Bloque Seco 9142 Fluke [15]	51
5.1.6	RTDs 5609 Fluke[6]	53
5.1.7	Termómetro 1524 Fluke [7].....	54
5.1.8	Multímetro y Probador de Aislamiento 1587 Fluke [18].....	58
5.1.9	Osciloscopio 123 Fluke [20]	62
5.1.10	Probador de Tierra 1623 Fluke [22] [23]	65
5.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ACEPTACIÓN.....	73
5.2.1	Desarrollo de las Pruebas de Funcionamiento y Aceptación	74
5.2.2	Conclusión pruebas de funcionamiento y aceptación	81
5.3	PRUEBAS FAT (FACTORY ACCEPTANCE TEST).....	81
5.3.1	Qué son las Pruebas FAT? [26].....	82
5.3.2	Diseño de la plantilla de registro de datos	82
5.3.3	Prueba de Presión.....	83
5.3.4	Prueba de Temperatura.....	103
5.3.5	Conclusiones Pruebas FAT	126
5.4	ACONDICIONAMIENTO DE M3TLAB	127
5.4.1	Tornillería de las puertas y compuertas de M3TLAB.....	127
5.4.2	Mecanismo de apertura de las puertas y compuertas de M3TLAB..	128
5.4.3	Cableado eléctrico.....	129

5.4.4	Canaletas para el cableado eléctrico.....	129
5.4.5	Acople entre actuadores y cableado eléctrico	129
5.4.6	Acople entre el cableado eléctrico y las luces de seguridad	130
6.	APORTES AL CONOCIMIENTO.....	131
6.1	METROLOGÍA.....	131
6.2	EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	131
6.3	USO DE HERRAMIENTAS.....	132
6.4	EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE I+D+I	132
	CONCLUSIONES.....	133
	BIBLIOGRAFÍA.....	134
	ANEXOS	138

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Plan de Trabajo.....	23
Tabla 2. Valores de prueba para las categorías de medición	41
Tabla 3. Rango y precisión de los módulos de presión	47
Tabla 4. Máximo error esperado para los módulos de presión	47
Tabla 5. Función de las teclas según el modo de operación.....	50
Tabla 6. Últimos botones del equipo.....	50
Tabla 7. Resumen de las funciones de medición y fuente	51
Tabla 8. Especificaciones básicas de la RTD 5609	54
Tabla 9. Resolución del instrumento según el transductor.....	54
Tabla 10. Teclas con única función	63
Tabla 11. Distancias entre picas en función de la profundidad del electrodo bajo prueba	70
Tabla 12. Especificaciones básicas del Probador de tierra 1623	73
Tabla 13. Resolución con el software	83
Tabla 14. Recomendación según la <i>clase del instrumento</i>	85
Tabla 15. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P05 ...	88
Tabla 16. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P27 ...	88
Tabla 17. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P09 ...	89
Tabla 18. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P05	90

Tabla 19. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P27	90
Tabla 20. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P09	91
Tabla 21. Especificaciones del bloque seco 9142.....	105
Tabla 22. Resultados obtenidos en la prueba #1	108
Tabla 23. Resultados obtenidos en la prueba #2	110

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Conexión Kelvin de 4 hilos	34
Figura 2. Conector INFO-CON.....	35
Figura 3. Configuración de pines entrada INFO-CON	36
Figura 4. Inserto del bloque seco	37
Figura 5. Categorías de medición en un sistema de distribución eléctrico	40
Figura 6. Vista superior del Condec Source 3000	44
Figura 7. Diagrama de funcionamiento del Condec Source 3000.....	45
Figura 8. Aspecto de los módulos de presión empleados.	46
Figura 9. Entradas y salidas de multicalibrador 754	48
Figura 10. Botones del panel principal del multicalibrador 754.....	48
Figura 11. Modo medición y fuente	49
Figura 12. Panel principal del bloque seco.....	51
Figura 13. Pantalla del bloque seco.	52
Figura 14. Estructura de la RTD 5609.....	53
Figura 15. Puertos de entrada y salida del termómetro 1524	55
Figura 16. Panel principal del termómetro 1524	56
Figura 17. Pantalla en modo numérico.....	57
Figura 18. Pantalla en modo gráfico	58

Figura 19. Puertos de entrada y salida del instrumento	59
Figura 20. Perilla giratorio para selecciona la magnitud de la medición	59
Figura 21. Botones complementarios del instrumento.....	60
Figura 22. Entradas de osciloscopio 123 Fluke.....	62
Figura 23. Teclas del osciloscopio 123 Fluke	63
Figura 24. Distribución de la pantalla del instrumento	64
Figura 25. Ejemplo del <i>sistema de puesta a tierra</i>	65
Figura 26. Probador de tierra 1623 Fluke.....	66
Figura 27. Perilla giratoria con las opciones de medición.....	68
Figura 28. Configuración caída de potencial con 3 polos y circuito equivalente ...	68
Figura 29. Pinza amperimétrica del Probador de tierra 1623	71
Figura 30. Diagrama del sistema de presión.	75
Figura 31. Recomendación de acoplamiento para los módulos de presión.....	76
Figura 32. Diagrama del sistema de temperatura	76
Figura 33. Configuración para realizar la medición de toma a tierra.....	80
Figura 34. Diagrama del sistema de presión para pruebas FAT	83
Figura 35. Diagrama del kit de interface.....	84
Figura 36. Estabilidad del sistema con el módulo 700P05	93
Figura 37. Estabilidad del sistema con el módulo 700P05	94
Figura 38. Histéresis entre desviación de indicación a los 5 segundos	95
Figura 39. Histéresis entre errores de indicación a los 15 segundos.....	96
Figura 40. Histéresis entre errores de indicación a los 30 segundos.....	97

Figura 41. Estabilidad del sistema con el módulo 700P27	98
Figura 42. Estabilidad del sistema con el módulo 700P27	100
Figura 43. Histéresis entre errores de indicación a los 5 segundos.....	101
Figura 44. Histéresis entre errores de indicación a los 15 segundos.....	102
Figura 45. Histéresis entre errores de indicación a los 30 segundos.....	103
Figura 46. Diagrama del sistema de temperatura para pruebas FAT.....	104
Figura 47. Posiciones para las RTDs en las dos pruebas	106
Figura 48. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en -10°C	113
Figura 49. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 10°C	114
Figura 50. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 20°C	115
Figura 51. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 30°C	116
Figura 52. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 100°C	118
Figura 53. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en -10°C	120
Figura 54. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 10°C	121
Figura 55. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 20°C	122
Figura 56. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 30°C	123
Figura 57. Indicación de temperatura para <i>set-point</i> en 100°C	124

GLOSARIO

METROLOGÍA: ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN: proceso que consta de una *evaluación* y una *validación*. En la *evaluación* el instrumento es sometido a unos procedimientos que ponen a prueba algunas de sus especificaciones metrológicas. En la *validación* se verifica si los resultados obtenidos de las especificaciones evaluadas, son compatibles con las dadas por el fabricante.

FAT: en inglés, Factory Acceptance Test (Pruebas de aceptación en fábrica). Son procedimientos de evaluación que se realizan a instrumentos de medición se realizan se realizan

SAT: en inglés, Site Acceptance Test (Pruebas de aceptación en sitio). Son procedimientos de evaluación que se realizan a instrumentos de medición bajo temperatura

LABORATORIO MÓVIL DE METROLOGÍA DE GAS NATURAL: vehículo especialmente acondicionado para el aseguramiento de la calidad del gas y la calibración de instrumentos asociados a su medición en sistemas de medición de gas natural.

MAGNITUDES SECUNDARIAS: presión, temperatura, tensión, corriente, frecuencia y resistencia.

INSTRUMENTO DE MEDIDA: es el dispositivo utilizado para realizar mediciones a la *magnitud que se desea medir (mensurando)*. Éste, genera una señal de salida que contiene información sobre el valor del *mensurando*.

INSTRUMENTO INDICADOR: es el que permite visualizar el valor contenido de la señal de salida del instrumento medidor.

INSTRUMENTO DE GENERACIÓN: es el instrumento que reproduce o proporciona una o varias magnitudes con su respectivo valor asignado.

TRANSDUCTOR: es un dispositivo que hace corresponder, según una relación determinada, a una magnitud de entrada, una de salida.

HOMOGENEIDAD AXIAL: aptitud del bloque seco de distribuir uniformemente el calor generado a lo alto (eje vertical) de su inserto.

HOMOGENEIDAD RADIAL: aptitud del bloque seco de distribuir radial y uniformemente al inserto el calor generado.

ESTABILIDAD: es la aptitud de un instrumento o sistema de medida para conservar constantes, mediante un intervalo de tiempo, sus características metrológicas.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN LA CORPORACIÓN
CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS

AUTOR(ES): ROLDÁN ALONSO CALA BARÓN

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

RESUMEN

Las actividades realizadas durante la práctica empresarial estuvieron enfocadas a caracterizar los equipos e instrumentos de medición asociados al Módulo de Magnitudes Secundarias, uno de los tres módulos principales que, estratégicamente, constituyen, dentro de un vehículo especialmente acondicionado, un laboratorio móvil de metrología de gas natural. Para su caracterización, los equipos e instrumentos fueron sometidos a pruebas de desempeño metrológico realizadas con unas metodologías que seguían lineamientos específicos que tuvieron como propósito validar el cumplimiento de las especificaciones y asegurar la confiabilidad de los resultados.

PALABRAS CLAVES:

Metrología, instrumentos de medición, pruebas de funcionamiento y aceptación, FAT.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: WORK EXPERIENCE IN TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT
CENTER OF GAS COMPANY

AUTHOR(S): ROLDÁN ALONSO CALA BARÓN

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

ABSTRACT

Along the work experience, the activities realized were focus into characterize the measurement instruments and equipment of the Secondary Magnitudes Module, one of the three main modules which, strategically, constitute, inside a vehicle specially conditioning, a metrological mobile laboratory of natural gas. The instruments and equipment were submitted, for characterize them, to metrological performance tests with methods that follows specific guidelines with the purpose to validate the fulfillment of the specifications and ensure the reliability of results.

KEYWORDS:

Metrology, metrological instruments and equipment, operation and FAT tests.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Este documento muestra lo que se realizó en la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas desde el 20 de diciembre del 2012 o inicio de la práctica empresarial (según el Acta 004-2013 aprobada por el Comité de Prácticas Empresariales de Ingeniería Electrónica), hasta el 19 de Abril de 2013 o fecha de finalización de la misma.

Además de hacer un repaso detallado por todas las actividades realizadas, se ordenó su ejecución de un modo tal que facilite la comprensión del documento y, a su vez, para que se evidencie qué partes del plan se desarrollaron y cuál ha sido la metodología empleada para lograrlo.

Para empezar, las actividades realizadas hacen parte de otras tantas que, en sinergia, buscan un mismo fin: el acondicionamiento del Laboratorio Móvil de Metrología (M3TLAB¹ desde ahora). Éste, es un vehículo que integra las disciplinas de la metrología física (volumen, presión neumática (desde ahora presión), temperatura y magnitudes eléctricas) y la metrología analítica (calidad del gas), con el fin de brindar una solución integral a una de las actividades más críticas para las empresas de transporte y distribución de gas natural: la transferencia de custodia y el aseguramiento de la calidad del gas natural.

Partiendo de este concepto, M3TLAB está dividido en 3 módulos principales: Módulo de Cantidad de Gas Natural, Módulo de Calidad de Gas Natural y Módulo de Magnitudes Secundarias. Y es en este último donde se circunscriben las actividades realizadas y, además, donde encuentran su objetivo. El módulo de Magnitudes Secundarias de M3TLAB es el campo de acción de la práctica empresarial.

Desde esta perspectiva específica, los títulos que engloban el desarrollo de las actividades en este informe son: Guías e Instructivos para la Operación de los equipos e instrumentos de magnitudes secundarias, Pruebas de Funcionamiento y

¹ Este nombre le fue asignado por las palabras *Laboratorio* (LAB), *Metrología*, *Movilidad*,

Aceptación a los equipos e instrumentos de magnitudes secundarias, Pruebas FAT (Factory Acceptance Test) a instrumentos asociados a las magnitudes presión y temperatura, y por último, Acondicionamiento de M3TLAB.

Dentro de los títulos globales, se mostrará cómo desarrollaron las Guías e Instructivos para la Operación de los equipos e instrumentos. En las Pruebas de Funcionamiento y Aceptación, se dará una explicación de lo que fueron y se enlistará lo que se probó, cómo y en dónde. En las Pruebas FAT se dirá lo que éstas significan, se mostrará la plantilla de datos diseñada para estas pruebas y el porqué de los datos incluidos. Además, se explicará cómo y en dónde fueron llevadas a cabo las pruebas, los materiales e instrumentos empleados y, al final, el análisis de los resultados obtenidos. Para terminar, en el Acondicionamiento de M3TLAB se nombrará el trabajo realizado para ponerlo a punto eléctrica y mecánicamente.

Además de lo nombrado, se hará una conclusión al finalizar cada una de las pruebas de aceptación, es decir, las de funcionamiento y de las pruebas FAT, y, para terminar, unas conclusiones finales del documento sobre lo realizado y cumplido en el tiempo transcurrido en el CDT de Gas.

1. CORPORACIÓN CENTRO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL GAS

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La Corporación CDT de GAS es una entidad de derecho privado y participación mixta, de carácter Científico y Tecnológico, sin ánimo de lucro, con patrimonio propio, que desde su creación busca generar un desarrollo sostenible del sector gas en Colombia, ejecutando actividades que propenden por la protección y el mejoramiento de la calidad de vida de los consumidores de gas y abarca temas estratégicos, como la ejecución de proyectos encaminados a brindar transferencia de tecnologías y conocimientos para el incremento de productividad y la competitividad de la industria nacional. Dentro de sus políticas, se ha dispuesto que la institución se mantenga como una entidad "neutral", "imparcial" e "independiente" para que apoye con "transparencia" las actividades relacionadas con innovación y desarrollo tecnológico en nuestro país; por ello, hoy sus Asociados Tecnológicos, son el Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL, la Universidad Industrial de Santander, El Instituto Nacional de Normalización ICONTEC, el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA y la Corporación CORASFALTOS y como Aliados Estratégicos Internacionales, el Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de Sao Paulo de Brasil y el Centro Nacional de Metrología de México CENAM.

Es desde esta perspectiva de desarrollo que la Corporación CDT de GAS trabaja actualmente en el proyecto del Laboratorio Móvil o M3TLAB. En él se integran los ámbitos académico, científico, tecnológico e industrial para su desarrollo conceptual y material. Además, estará dotado con equipos de alta tecnología que permitirán realizar muestreos de gas natural y ejecutar análisis en sitio.

Actualmente la Corporación cuenta con un Equipo de Trabajo multidisciplinario (Ingenieros mecánicos, químicos, de sistemas, industriales, electrónicos, etc.) de alta calidad técnica y humana; con un Laboratorio de Calibración y Ensayos acreditado por la Superintendencia de Industria y Comercio bajo los lineamientos de la norma NTC ISO / IEC 17025 en dos (2) de sus áreas principales; y un Organismo de Inspección acreditado según la NTC ISO / IEC 17020; con un Grupo de Investigación en Fluidos y Energía debidamente inscrito ante COLCIENCIAS con el cual ha diseñado, construido y puesto en servicio la infraestructura metrológica para calibración de medidores, herramientas básicas y fundamentales para apoyar con ciencia y tecnología el desarrollo de la industria

nacional, por lo que dentro de su valiosa infraestructura, cuenta con a) patrones primarios tipo campana gasométrica, tipo pistón, tipo coriolis y tipo gravimétrico, b) patrones secundarios tipo boquillas sónicas, cámara húmeda, banco de alto caudal y c) más de 400 instrumentos debidamente seleccionados y mantenidos con los cuales garantiza trazabilidad nacional e internacional de sus mediciones.

1.2 SERVICIOS OFRECIDOS POR EL CDT DE GAS

La Corporación CDT de GAS presta a sus clientes los siguientes servicios:

- Verificación de la calidad de equipos y accesorios: cilindros, válvulas, reguladores de presión, equipos de cocción, calentadores, evacuación de gases y mangueras.
- Servicio de Calibración de medidores de gas: rotámetros, medidores másicos, boquillas, medidores de desplazamiento positivo, etc.
- Calibración de elementos para medición de presión, temperatura, magnitudes eléctricas.
- Calibración de masas y balanzas.
- Desarrollo de proyectos de Investigación y transferencia de tecnología. (Como resultado de estos procesos, se diseñan, fabrican y suministran a los clientes equipos e instrumentos).
- Apoyo a las actividades nacionales de normalización.
- Formación de personal.
- Servicios de Ingeniería para la industria del gas.
- Inspección de sistemas de medición (a través del Organismo de Inspección).

1.3 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

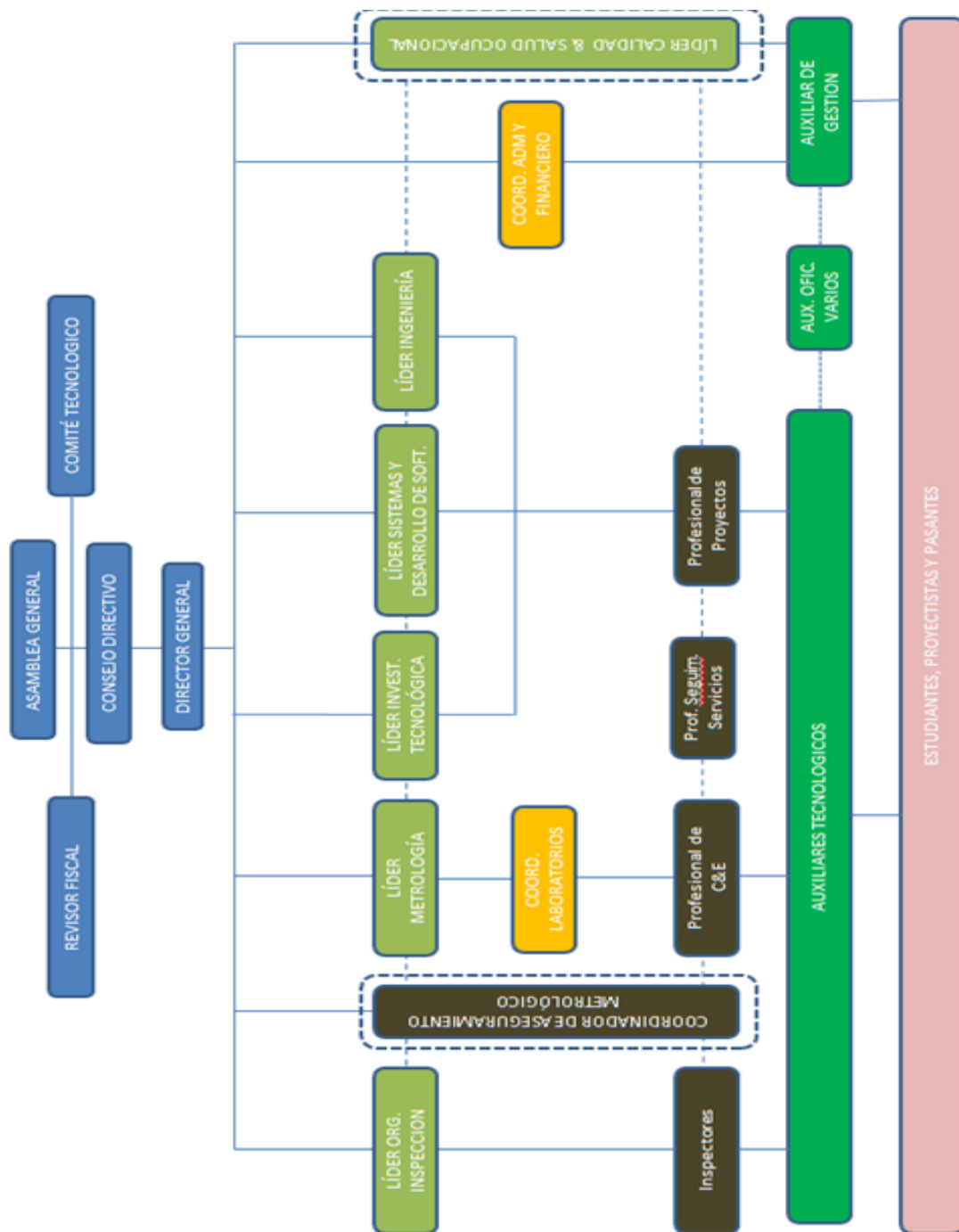


Figura 1. Organigrama del CDT de Gas
Fuente: Base de datos CDT de Gas

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

- Caracterizar y acondicionar los instrumentos de medición y generación del módulo de magnitudes secundarias (presión, temperatura, magnitudes eléctricas) del laboratorio móvil de metrología siguiendo procedimientos metrológicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Estudiar los manuales de los instrumentos: Bloque Seco Fluke 9142, RTD Fluke 5609, Termómetro Fluke 1524, Multicalibrador Fluke 754, Módulos de Presión 700p05, 700p09 y 700p27, Generador de Presión Condec Source 3000, Osciloscopio Fluke 123, Probador de Tierra Fluke 1623 y Probador de Aislamiento 1587.
- Diseñar y ejecutar procedimientos de evaluación de los instrumentos nombrados para evaluar y analizar sus características metrológicas.
- Realizar la integración de todos los instrumentos y accesorios asociados al banco de magnitudes secundarias y facilidades que componen el laboratorio móvil de metrología.

3. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO

El plan de trabajo propuesto, una vez arreglado según las fechas del comité, fue el siguiente:

Tabla 1. Plan de Trabajo

NOMBRE DE TAREA	Duración	Comienzo	Fin
PRACTICA EMPRESARIAL ROLDÁN CALA	95 días	lun 10/12/12	vie 19/04/13
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ACEPTACIÓN	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Bloque seco Fluke 9142	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Termómetro Fluke 1524	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
RTD Fluke 5609	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Multicalibrador Fluke 754	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Condec Source 3000	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Módulos de presión Fluke 700p05, 700p09, 700p27	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Multímetro y Probador de Aislamiento 1587	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Probador de Tierra Fluke 1623	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
Osciloscopio Fluke 123	10 días	lun 10/12/12	vie 21/12/12
PRUEBAS FAT (Factory Acceptance Test) A INSTRUMENTOS	10 días	lun 24/12/12	vie 04/01/13
Prueba #1 del sistema de presión	10 días	lun 24/12/12	vie 04/01/13
Prueba #2 del sistema de presión	10 días	lun 24/12/12	vie 04/01/13
Prueba #1 del sistema de temperatura	10 días	lun 24/12/12	vie 04/01/13
Prueba #1 del sistema de temperatura	10 días	lun 24/12/12	vie 04/01/13
ANÁLISIS PRUEBAS FAT	10 días	lun 07/01/13	vie 18/01/13
Análisis de la prueba #1 del sistema de presión	10 días	lun 07/01/13	vie 18/01/13
Análisis de la prueba #2 del sistema de presión	10 días	lun 07/01/13	vie 18/01/13
Análisis de la prueba #1 del sistema de temperatura	10 días	lun 07/01/13	vie 18/01/13
Análisis de la prueba #2 del sistema de temperatura	10 días	lun 07/01/13	vie 18/01/13
GUÍAS E INSTRUCTIVOS PARA LA OPERACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS Y EQUIPOS / ACONDICIONAMIENTO LABORATORIO MÓVIL	48 días	lun 21/01/13	mié 27/03/13
G. e I. para el Bloque Seco Fluke 9142	5 días	mié 23/01/13	mar 29/01/13
G. e I. para el Condec Source 3000	5 días	mié 23/01/13	mar 29/01/13
G. e I. para el Termómetro Fluke 1524	5 días	mié 30/01/13	mar 05/02/13
G. e I. para el Multicalibrador Fluke 754	5 días	mié 30/01/13	mar 05/02/13
G. e I. para el Osciloscopio Fluke 123	5 días	mié 30/01/13	mar 05/02/13
G. e I. para el Probador de Tierra Fluke 1623	38 días	mié 06/02/13	vie 29/03/13
G. e I. para el Multímetro y Probador de Aislamiento Fluke 1587	38 días	mié 06/02/13	vie 29/03/13
Acondicionamiento de Lab. Móvil	33 días	mié 06/02/13	vie 22/03/13

NOMBRE DE TAREA	Duración	Comienzo	Fin
PRUEBAS SAT (Site Acceptance Test) A INSTRUMENTOS	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
Módulos de presión Fluke 700p05, 700p09, 700p27	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
Condec Source 3000	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
Termómetro Fluke 1524	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
RTD Fluke 5609	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
Bloque seco Fluke 9142	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13
Multicalibrador Fluke 754	10 días	lun 08/04/13	vie 19/04/13

Fuente: Autor

4. MARCO TEÓRICO [1]²

Este numeral estará dividido en dos partes. En la primera parte se verán los términos que se han considerado como necesarios, principalmente, para entender en su totalidad el documento pero también, por otro lado, para empezar a adentrarse en el carácter metrológico, que caracteriza esta práctica empresarial. En la segunda parte, se nombrarán los equipos e instrumentos asociados al Módulo de Magnitudes Secundarias, los cuales involucraron la gran mayoría del trabajo realizado. Además, en la segunda parte, se nombrarán términos y conceptos específicos dentro de ellos que servirán, más adelante, para facilitar su entendimiento.

4.1 METROLOGÍA BÁSICA

La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. Partiendo desde este concepto, se enunciarán los términos que se han considerado necesarios para entender a cabalidad el documento.

4.1.1 Magnitud y unidad³

Una magnitud es la propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia. La unidad es una referencia, la cual es definida por convenio, según el sistema de magnitudes del que se trate (puede ser el Inglés, el Internacional, entre los principales).

Por ejemplo, el área de una hoja (magnitud), es una propiedad de un cuerpo que puede expresarse cuantitativamente por un número y por la unidad m² (para el sistema internacional).

² Gran parte de la terminología empleada en el Marco Teórico ha sido tomada del *Vocabulario Internacional de Metrología (VIM)- conceptos fundamentales y generales, y asociados-3ra Edición* traducida al español y publicada en el 2008.

³ Pág. 12 y 15 del VIM 3ra Edición respectivamente.

4.1.2 Medición o medida⁴

Es el proceso que consiste en obtener experimentalmente valores que pueden atribuirse a una magnitud.

4.1.3 Instrumento de medida y de indicación⁵

El dispositivo utilizado para realizar mediciones a la *magnitud que se desea medir o mensurando*⁶, es el instrumento de medida. Éste, genera una señal de salida que contiene información sobre el valor del *mensurando*. El instrumento indicador, es el que permite visualizar el valor contenido en la señal de salida del instrumento medidor.

Un instrumento de medida también puede ser un instrumento generador o un instrumento indicador, por ejemplo, un voltímetro, el cual mide *la diferencia de potencial entre los terminales de una resistencia de 100 Ω (mensurando)* y además, la visualiza en su pantalla.

4.1.4 Instrumento Patrón o Patrón⁷

Es el instrumento de medida que posee mejores características metrológicas en una calibración, de modo que sirve como referencia de comparación a otro instrumento de medida con inferiores características metrológicas.

Además, al ser el instrumento con mejores características metrológicas, es del que se obtiene el *valor verdadero* de medición. El *valor verdadero* de medición, es el que se acepta como el valor de medida perfecto, sin embargo, en la práctica es imposible de conocer.

⁴ Pág. 25 del VIM 3ra Edición

⁵ Pág. 42 del VIM 3ra Edición

⁶ Esta magnitud se debe describir, no basta solo con nombrarla. Por ejemplo, la VIM 3ra Edición, en la página 25, diferencia un mensurando definido como *la longitud de una varilla cilíndrica de acero a una temperatura de 23 °C* de otro mensurando definido como *la longitud de una varilla cilíndrica de acero a una temperatura de 20 °C*.

⁷ Pág. 53 del VIM 3ra Edición

4.1.5 Calibración⁸

Es la comparación, bajo condiciones específicas, de un instrumento de medida y un patrón. El instrumento de medida se considera como el instrumento bajo prueba mientras que el patrón, es el de referencia. La calibración se realiza para un *intervalo de calibración*, el cual puede ser todo el rango de medición⁹ del instrumento bajo prueba, o en un intervalo específico dentro del mismo.

4.1.6 Instrumento generador o medida materializada¹⁰

Es el instrumento que reproduce o proporciona una o varias magnitudes con su respectivo valor asignado.

4.1.7 Equipo de medición

Es un conjunto de, como mínimo, dos instrumentos, ya sea de medición, indicación, generación o una combinación entre estos.

4.1.8 Transductor¹¹

Es un dispositivo utilizado en medición, que hace corresponder, según una relación determinada, a una magnitud de entrada, una de salida.

Por ejemplo, las RTDs,¹² que serán explicadas más adelante, poseen un sensor que al ser sometido a una temperatura (magnitud de entrada) varía su resistencia (magnitud de salida).

4.1.9 Sensor¹³

Es el elemento de un sistema de medición directamente afectado por la acción del

⁸ Pág. 36 del VIM 3ra Edición.

⁹ En la siguiente página se encuentra su definición.

¹⁰ Pág. 43 del VIM 3ra Edición.

¹¹ Pág. 43 del VIM 3ra Edición.

¹² *Resistance Temperature Detector*.

¹³ Pág. 43 del VIM 3ra Edición.

fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir. Para su ejemplo, véase el numeral anterior.

4.1.10 Sistema de medición¹⁴

Es el conjunto de uno o más instrumentos y/o equipos de medida junto con otros dispositivos, adaptados para proporcionar valores de una o varias magnitudes, medidos dentro de intervalos especificados.

4.1.11 Estabilidad¹⁵

Es la aptitud de un instrumento o sistema de medida para conservar constantes, mediante un intervalo de tiempo, sus características metrológicas.

4.1.12 Rango de medición¹⁶

Conjunto de valores comprendido entre un límite inferior y un límite superior de una o varias magnitudes que puede medir un instrumento o un sistema de medida con una *incertidumbre instrumental*¹⁷ especificada bajo condiciones determinadas.

4.1.13 Exactitud y precisión de medida¹⁸

La exactitud es un término cualitativo que expresa la proximidad de un resultado de medida al *valor verdadero* de un mensurando.

La precisión, por el contrario, es un término cuantitativo que expresa qué tan cercanos estuvieron entre sí los resultados de medición, obtenidos en mediciones repetidas bajo condiciones especificadas.

¹⁴ Pág. 42 del VIM 3ra Edición

¹⁵ Pág. 49 del VIM 3ra Edición

¹⁶ Pág. 46 del VIM 3ra Edición

¹⁷ Según la VIM 3ra Edición, pág. 32, la incertidumbre es el “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”. La incertidumbre instrumental sería entonces la componente de la incertidumbre procedente del instrumento o del sistema de medida. En caso que sea del instrumento, debe venir especificada desde fábrica.

¹⁸ Pág. 29 del VIM 3ra Edición

Por ejemplo, en una calibración bajo condiciones ambientales constantes, se obtiene de un patrón que el *valor verdadero* es igual a 100 °C. En mediciones repetidas, se obtiene del instrumento bajo prueba cinco valores iguales: 90°C. De esto, se puede decir que el instrumento bajo prueba tiene una precisión del 100% pero una mala exactitud.

4.1.14 Resolución¹⁹

Es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación. Por lo tanto, para un instrumento indicador, es la mínima diferencia perceptible entre indicaciones visualizadas.

4.1.15 Presión, presión neumática y presión manométrica [2]

La *presión*, es la magnitud que expresa la cantidad de fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie

$$P = \frac{F}{A} \quad (Ec.1)$$

Donde P = presión, F= fuerza y A = área sobre la que se aplica la fuerza. La unidad de presión, depende del sistema de unidades en que se exprese la fuerza y el área. Por ejemplo, en el Sistema Internacional, para fuerza expresada en Newton (N) y área en metro cuadrado (m²), la unidad de presión es Pascal (Pa). Por otro lado, para el sistema Inglés, para fuerza expresada en Libras (lb) y área en pulgada cuadrada (inch²), la unidad de presión es psi.

Para continuar, la *neumática* es la tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía. Por lo tanto, la *presión neumática*, es la presión generada por el aire.

Por otro lado, la *presión atmosférica* es la presión ejercida por el aire contenido en la atmósfera por encima del *cero absoluto*. El *cero absoluto*, es un estado idealizado con una presión cero, que se obtiene al retirar todas las moléculas contenidas dentro de un recipiente, de modo que no se ejerzan fuerzas en sus paredes internas. La *presión atmosférica* varía según diversos factores como la

¹⁹ Pág. 48 del VIM 3ra Edición

posición geográfica, la latitud, el clima, entre otros. De modo que según el lugar en la tierra, se tiene una *presión atmosférica local*.

Para terminar, la *presión manométrica*, es aquella que mide la diferencia entre presión de algún medio (p.e. un tanque) y la *presión atmosférica local*. Las presiones que tienen como punto de referencia la *presión atmosférica local*, son llamadas *presiones relativas*, y se distinguen porque al final de la unidad en la que es expresada, se le adiciona una *g*. De modo que, por ejemplo, psi ahora sería *psig*.

4.1.16 Temperatura [3]

La *temperatura* es la magnitud física que expresa el grado o la cantidad de energía calorífica de una sustancia, de acuerdo con una escala establecida.

La *temperatura*, normalmente se expresa (unidades) en Kelvin (K), grados Celsius (°C) o grados Fahrenheit (°F).

4.2 EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL MÓDULO DE MAGNITUDES SECUNDARIAS

A continuación, se nombrarán los equipos e instrumentos que conforman el Módulo de Magnitudes secundarias de M3TLAB, junto con el papel que cumplen dentro del mismo. Además, para los equipos que se considere necesario, se explicará el principio bajo el que opera, acompañado de fundamentos teóricos que permitirán facilitar la comprensión de su funcionamiento y su modo de operación.

4.2.1 Módulos de presión manométrica (desde ahora módulos de presión) 700P05, 700P27 y 700P29 Fluke

Los módulos de presión son instrumentos medidores de presión manométrica que poseen un cable de salida, el cual envía una señal digital al instrumento que se haya escogido para ser su indicador. Para nuestro caso, el instrumento indicador de presión será el Multicalibrador 754, que se mostrará más adelante. Además, la alimentación necesaria para que los módulos funcionen también la reciben del Multicalibrador 754.

Para los módulos de presión, se hace necesario explicar dos conceptos teóricos que, más adelante, se empleará para poder comprender los análisis a los que serán sometidos.

4.2.1.1 Histéresis

La histéresis es la deformación de tipo permanente o temporal que presenta un elemento cuando ha sido sometido a algún esfuerzo.

En manometría, ésta característica metrológica se evalúa mediante la diferencia entre el error o la indicación del instrumento para un *mismo punto cualquiera de un intervalo* en una prueba metrológica (p.e. el punto en el 50% del intervalo de calibración) cuando el instrumento ha sido sometido, bajo las mismas condiciones específicas, a un ciclo completo en el intervalo de la prueba: una secuencia ascendente y otra descendente²⁰. Siguiendo con el ejemplo:

$$\text{Histéresis} = |\text{Indicación 50\% ascenso} - \text{Indicación 50\% descenso}|$$

De manera general:

$$\text{Histéresis} = |\text{Indicación en } P \text{ ascenso} - \text{Indicación en } P \text{ descenso}| \quad (\text{Ec.2})$$

Donde P = *mismo punto cualquiera de un intervalo*.

4.2.1.2 Clase del instrumento o clase de exactitud²¹

La *precisión de un instrumento*²² es un indicativo de la *clase del instrumento* y puede, entre otras, estar indicada en %FS²³. La *clase del instrumento* está asociada con el máximo error esperado de un instrumento de medición operando bajo condiciones específicas, principalmente, condiciones ambientales controladas.

Debido a lo anterior también se denomina error a %FS. El error a %FS está determinado del siguiente modo:

²⁰ Las secuencias en ascenso y en descenso se explicarán más adelante, en la Prueba FAT de presión.

²¹ Pág. 50 del VIM 3ra Edición

²² La *precisión del instrumento* es diferente de la precisión de medida. La *precisión del instrumento* es una característica que debe ser especificada por el fabricante.

²³ Full Scale o Escala completa.

$$Error \%FS = \frac{(Máximo error esperado) * 100\%}{Escala Completa} \quad (Ec.3)$$

La Escala Completa es el *span*²⁴ del instrumento. Por ejemplo, el rango de medición del módulo 700P09 es de 0 a 1500 psig, por lo tanto, el valor de la Escala Completa sería 1500 psig.

Para determinar lo que se esperaría fuera el máximo error esperado, basta con despejarlo de la ecuación. Por lo que quedaría:

$$Máximo error esperado = \frac{Error \%FS * Escala Completa}{100\%} \quad (Ec.4)$$

A su vez:

$$Máximo error esperado \geq |Error indicación| + |Incertidumbre| \quad (Ec.5)$$

Donde:

$$Error indicación = Indicación Instrumento bajo prueba - Indicación patrón \quad (Ec.6)$$

La unidad del máximo error esperado, el error de indicación y de la incertidumbre es psig. Un instrumento puede considerarse *fuera de clase*²⁵, cuando la sumatoria entre los valores absolutos del error de indicación y la incertidumbre de los resultados obtenidos sea mayor al máximo error esperado, calculado a partir de la precisión en %FS (a menos que el requerimiento de error, estipulado por el cliente, sea otro).

Cuando se esté tratando el instrumento más adelante, en las actividades desarrolladas, se determinará el valor correspondiente al máximo error esperado para cada módulo de presión partiendo de la precisión en %FS que especifica el manual del fabricante.

Para terminar, la *clase del instrumento* es una característica que diferencia, en

²⁴ *Span* = |(Límite superior del rango de medición) – (Límite inferior del rango de medición)|

²⁵ Un instrumento de medida se considera *fuera de clase* cuando, al ser calibrado o tras un proceso de comparación, no cumple con las especificaciones de desempeño previstas para su uso. Debido a eso, debe ser *ajustado*, es decir, modificado internamente para que las indicaciones que proporciona correspondan a las necesidades previstas para su uso.

calidad, a un instrumento de otro. Entre menor sea su clase, más cerca del *valor verdadero* estará la medida realizada porque su precisión es mayor. Además, normalmente, entre menor sea su clase, más costoso será.

4.2.2 Condec Source 3000

El Condec Source 3000 es el equipo que se utilizará como generador de presión neumática (desde ahora presión). Más adelante, se explicará muy detalladamente su forma de uso y de generación.

4.2.3 2 RTDs 5609 Fluke

Las RTDs 5609 Fluke, son los transductores empleados en la medición de temperatura. RTD, por sus siglas en inglés *Resistance Temperature Detector*, es, como su nombre lo indica, un detector de temperatura resistivo el cual posee un sensor que cambia su resistencia en función de la variación de la temperatura a la que es sometido. Para nuestro caso, el sensor es altamente sensible y será nombrado más adelante, en las actividades desarrolladas.

La estructura de las RTDs (que se verá gráficamente más adelante) puede dividirse en 3 partes: sensor, cuerpo y salida. Por ahora, se explicará el cuerpo del transductor y su salida. El cuerpo de las RTDs está conformado por 4 hilos, los cuales están configurados del modo *conexión Kelvin de 4 hilos* [4]. El cuerpo de las RTDs es la que influirá en el método de determinar la resistencia del sensor. Esta configuración en particular, permite aislarla y determinarla a través de la ley de ohm con la mayor exactitud posible ya que, para las otras configuraciones del cuerpo del transductor, de 2 hilos o 3 hilos, el método de determinar la resistencia del sensor no excluye las resistencias de los hilos, haciéndolos menos exactos. La Figura 2 permite ver la configuración nombrada.

Como se puede apreciar, el método consiste en aplicar una corriente conocida I a través de los dos cables exteriores (1 y 4) que tienen una resistencia R_{c1} y R_{c4} . Al aplicar la corriente conocida, se genera una tensión en la resistencia del sensor $R(t)$ ($V(t)$) y una tensión en los cables R_{c1} (V_1) y R_{c2} (V_2). El objetivo es aislar los voltajes indeseados (V_1 y V_2) de $V(t)$ para que, al aplicar la ley de ohm a $R(t)$, su valor sea más exacto. Para eso, “estratégicamente”, se conectan otros 2 cables (2 y 3) en los terminales del sensor $R(t)$, uno en cada extremo. Cada cable tendrá su

resistencia asociada R2 y R3. Sin embargo, como al otro extremo de los cables se conectaría el voltímetro para medir V(t), se garantizaría que la corriente I conocida no fluiría a través de los cables, dejando como corolario que V2=0V y V3=0V.

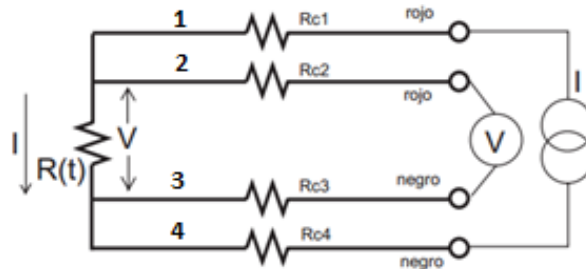


Figura 2. Conexión Kelvin de 4 hilos
Fuente: ARIAN Control & Instrumentación [5]

Así, cuando el voltímetro mida la tensión al extremo de los cables 2 y 3, obtendrá el voltaje de R(t). Finalmente, se aplica la ley de ohm del siguiente modo:

$$R(t) = \frac{V(t)}{I} \quad (Ec.7)$$

Al conocerse el valor de R(t), puede determinarse el valor de temperatura medido. El instrumento indicador es el que se encarga de medir R(t), midiendo V(t) y generando I. Además, como la resistencia y la temperatura no tienen una relación lineal, traduce el valor de la resistencia en uno de temperatura teniendo en cuenta algunos parámetros como el coeficiente de temperatura del sensor (α), resistencia al punto triple del agua, es decir, a 0,01 °C, entre otros.

Para finalizar, los 4 hilos del cuerpo de la RTD están acoplados a un conector INFO-CON (vea la Figura 3). Éste tipo de conector es una de las opciones de salida que provee el fabricante y se escogió pensando en el acople que tendría con el Termómetro 1524 Fluke que se verá más adelante. El conector INFO-CON, para la RTD, cuenta con 5 pines de salida, cuatro para los 4 hilos de la RTD y el quinto, con una función muy peculiar. El quinto pin contiene la información que el instrumento indicador necesita para traducir la indicación del sensor en temperatura (a la que fue sometido) dentro de una memoria, así, se cargan automáticamente los coeficientes propios de la RTD cada vez que se conecta a un instrumento indicador diferente o a una entrada diferente del mismo instrumento (como es el caso nuestro que se verá a continuación con el termómetro 1524

Fluke).

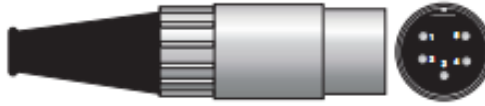


Figura 3. Conector INFO-CON

Fuente: Guía de usuario del transductor [6]

4.2.4 Termómetro 1524 Fluke

Este instrumento se utilizará para la indicación de temperatura.

Por ahora, se verá lo referente a sus canales de entrada. El Termómetro 1524 Fluke posee dos canales de entrada, denominados T1 y T2 (más adelante se verán gráficamente), los cuales cuentan con unos conectores INFO-CON, que permiten acoplarse al conector de salida de las RTDs 5609 Fluke. La configuración de pines, para el caso del termómetro, se ve en la figura 4. El conector INFO-CON del termómetro tiene 6 pines, cuatro para los 4 hilos del cuerpo del sensor y dos para el dispositivo de memoria que permite cargar las características únicas de las RTDs, permitiendo al instrumento configurarse de manera única para cada entrada. Como se dijo antes, el conector de las RTDs también posee esa característica. Esto permite que los parámetros internos del instrumento se actualicen cada vez que una RTD diferente se conecte a alguno de los canales de entrada.

4.2.5 Bloque Seco 9142 Fluke

Este instrumento se utilizará como generador de temperatura.

El principio de generación del bloque seco está basado en el *Principio de Peltier*. Éste, consiste en aplicar una diferencia de potencial a un módulo para hacer pasar, a través de la unión de dos materiales distintos que conforman el módulo, una corriente eléctrica y, de este modo, generar temperatura. Entre los dos materiales existe un equilibrio de cargas que se descompensa cuando se aplica la corriente eléctrica. Como consecuencia, mientras uno de los materiales se enfría, el otro se calienta. Además, si se invierte la polaridad del diferencial de potencial, el material

que antes enfriaba se calentará y viceversa.

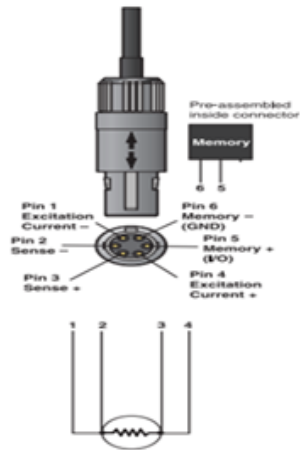


Figura 4. Configuración de pines entrada INFO-CON

Fuente: Guía técnica del usuario del instrumento [7]

Este principio se puede considerar como el inverso del *Efecto Seebeck*. Efecto utilizado para el principio de los termopares, donde una variación de temperatura en una de las juntas de dos materiales distintos, genera una diferencia de potencial entre ellas.

A pesar de que el bloque seco genera temperatura, necesita un medio para la transmisión de calor generado. Las RTDs (5609 para nuestro caso) deben ser inmersas dentro de un inserto, éste es el accesorio que transmite la temperatura a las RTDs. Además, les permite mantenerse en una posición estable a diferentes alturas. Hay muchas opciones de selección de inserto en el catálogo de Fluke. Estos difieren en tamaño y en la distribución de los orificios para insertar las sondas de temperatura. Sin embargo, el escogido fue la opción C, tal como se muestra en la figura 5.

Para el bloque seco, se hace necesario explicar dos conceptos teóricos que, más adelante, se emplearán para poder comprender los análisis a los que será sometido.

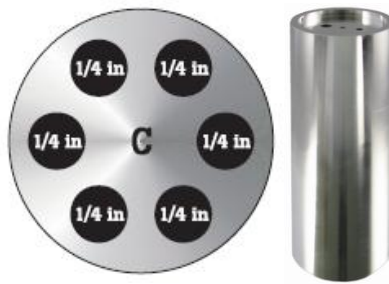


Figura 5. Inserto del bloque seco
Fuente: Guía técnica del instrumento [8]

4.2.5.1 Homogeneidad Axial y Homogeneidad Radial

La homogeneidad axial es la aptitud del bloque seco de distribuir uniformemente el calor generado a lo alto (eje vertical) de su inserto. La necesidad de nombrar (y evaluar en una prueba más adelante) este parámetro, reside en que no todas las RTDs podrán ser inmersas a la misma profundidad, por lo que es necesario tener en cuenta la desviación que ésta produce en la medición de temperatura.

Además, también hay que tener en cuenta la desviación por homogeneidad radial del bloque seco, la cual se define del mismo modo que la homogeneidad axial pero, a diferencia de ésta, aplica radialmente y no a lo alto del inserto.

De modo que idealmente, por ejemplo, dos RTDs de iguales características metrológicas que estén inmersas en el inserto a alturas diferentes, medirían la misma temperatura. Sin embargo, bien es sabido que en realidad no se cumple en un ciento por ciento y, por lo tanto, hay que tener en cuenta estos dos parámetros en la influencia de las desviaciones de temperatura entre las indicaciones de dos RTDs que se comparan en un mismo inserto.

4.2.6 Multicalibrador 754 Fluke

Dentro del módulo de magnitudes secundarias, este equipo es el más versátil de todos. Principalmente, funcionará como instrumento indicador de presión, sin embargo, también se empleará para la medición y generación de las magnitudes eléctricas principales: tensión, corriente, frecuencia y resistencia.

Por último, debe decirse que también puede emplearse para la indicación de

temperatura tanto de RTDs como de termopares, sin embargo, debido a las características del Termómetro 1524 Fluke (se verá más adelante), se reserva para lo nombrado en el párrafo anterior.

4.2.7 Osciloscopio 123 Fluke

Este instrumento se utilizará para la medición e indicación de magnitudes eléctricas. Más adelante se adentrará detalladamente en su forma de uso.

4.2.8 Multímetro y Probador de Aislamiento 1587 Fluke

Este instrumento, además de medir las magnitudes eléctricas básicas (tensión AC y DC, corriente AC y DC, frecuencia y resistencia), puede indicar temperatura y medir la resistencia de aislamiento de un circuito eléctrico, la cual es su función principal.

La guía de la medición de la resistencia de aislamiento del CHAUVIN ARNOUX GROUP dice que la resistencia de aislamiento “expresa la calidad del aislamiento entre dos elementos conductores. El conjunto de instalaciones y equipos eléctricos respeta unas características de aislamiento para permitir su funcionamiento con toda seguridad, desde cables de conexión hasta motores o generadores. Para el aislamiento de los conductores eléctricos se usan materiales que presentan una fuerte resistencia eléctrica cuya calidad se ve alterada al cabo de los años por las exigencias a las que son sometidos y que, a su vez, da lugar a un aumento de las corrientes de fuga indeseables y peligrosas”²⁶ [9]. He aquí la importancia de monitorear la resistencia de aislamiento periódicamente.

Para entender más a fondo el comportamiento del instrumento, se explicará, en el siguiente apartado, unas categorías que permiten diferenciar en calidad entre uno y otro instrumento, a partir de la seguridad que puede ofrecer durante la medición de alguna magnitud eléctrica.

²⁶ Tomado de la Guía de Medición de Aislamiento, disponible en: http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/3681/CAT_Guia_de_Medicion_de_Aislamiento.pdf. [Accedido: 14-may-2013].

4.2.8.1 Categorías de Medición [10]

Es muy importante conocer las categorías de medición que fueron estipuladas por la IEC (en español, Comisión Electrotécnica Internacional) con el objeto de establecer nuevas normas de seguridad en los circuitos de protección de las entradas de los multímetros o medidores eléctricos. Las categorías se enumeran en orden creciente según la energía disponible del entorno eléctrico dentro de un sistema de distribución eléctrica (ver figura 6) y, por lo tanto, entre mayor sea la categoría, más precauciones de seguridad deben tener los instrumentos y sus accesorios asociados para proteger al operador y al mismo sistema de distribución bajo prueba. La pregunta que nos lleva a la razón principal de estas normas de seguridad y de designación de las categorías es ¿Proteger los operarios y al sistema bajo prueba contra qué? La respuesta: *picos o transitorios de tensión y descargas eléctricas*. Si bien una *descarga eléctrica* no es tan peligrosa para un sistema de distribución eléctrica o para un operario, como sí lo es un *pico o transitorio de tensión*, es necesario que el multímetro también cuente con un circuito de protección contra ese suceso indeseado. Normalmente, los *picos o transitorios de tensión* no se presentan, a diferencia de las *descargas eléctricas*, en entornos de categorías I y II, debido a que son atenuados a medida que recorren la impedancia del sistema. Como consecuencia, y debido a los riesgos inherentes al suceso, tanto para los sistemas de distribución eléctrica como para el operador, se tratarán más profundamente los *picos o transitorios de tensión*. Finalmente, puede decirse que las categorías de medición están basadas en la energía disponible del entorno eléctrico y el peligro que ésta puede causar al operario y al sistema de distribución eléctrica a causa de una contingencia indeseada, principalmente, un *pico o transitorio de tensión*.

Los *picos o transitorios de tensión* son valores momentáneos de una tensión tan elevada (en entornos CAT III y CAT IV, en el peor de los casos, pueden alcanzarse tensiones de hasta unos varios miles de voltios) que puede generar en la peor situación, cuando se está realizando una medición de alto voltaje (1000 V, por ejemplo), un arco eléctrico entre las puntas del instrumento de medición. La caída de un rayo, por ejemplo, en una línea de transmisión eléctrica, puede causar un pico o transitorio de energía tal que lo genere. En caso de que el multímetro o medidor no cuente con el circuito de protección debido cuando se presenta el fenómeno del arco eléctrico, puede hacer que se presente un cortocircuito entre los terminales de prueba que den paso a corrientes peligrosas que no solo dañen el sistema de distribución eléctrica, sino también lesionen al operario. Por eso, entre más cerca se esté de una fuente de energía mayor, más alta debe ser la

categoría porque, aunque no siempre se presentará el fenómeno nombrado, estos circuitos pueden entregar corrientes muy grandes que ante una eventual contingencia indeseada, pueden causar efectos irreversibles.

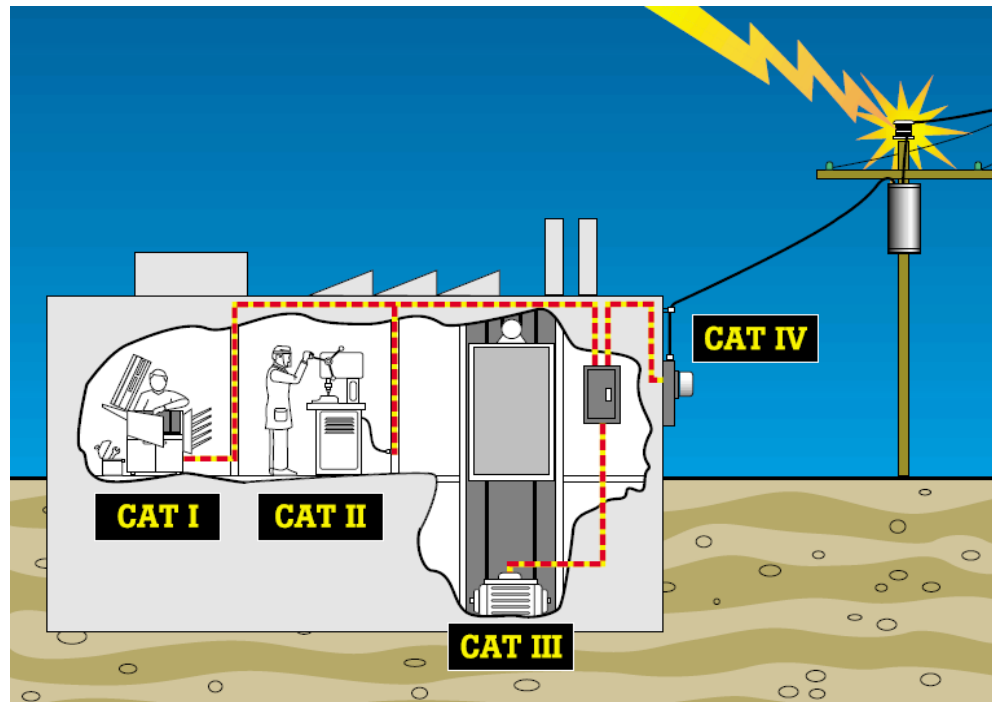


Figura 6. Categorías de medición en un sistema de distribución eléctrico
Tomado de: El ABC de la seguridad en las mediciones eléctricas [10]

De lo dicho en los dos párrafos anteriores, también puede inferirse que entre mayor sea la corriente de cortocircuito del entorno del sistema de distribución eléctrica, mayor deberá ser la categoría, en consecuencia, entre menor sea la impedancia del entorno del sistema, la categoría también deberá ser mayor.

La tabla 2 demuestra lo dicho en el párrafo anterior y muestra los valores con que son probados los instrumentos de medición y sus accesorios para categorizarlos. La impedancia de la fuente de comprobación, como puede observarse, es otro parámetro importante en la designación de las categorías y en las pruebas que para éstas se realizan. Dicha impedancia es la que amortigua paulatinamente los *picos o transitorios de tensión*. Para finalizar, se pueden dividir los voltios aplicados sobre la impedancia de la prueba para cuantificar la corriente a que fueron probados los instrumentos de medición y sus accesorios, con el objeto de

garantizar una protección tanto al sistema de distribución eléctrico bajo prueba como al operario.

Tabla 2. Valores de prueba para las categorías de medición

Categoría de medición	Tensión de operación (CD o CA-rms a tierra)	Pico del pulso transitorio (20 repeticiones)	Fuente de comprobación ($\Omega = V/A$)
CAT I	600 V	2500 V	Fuente de 30 Ohm
CAT I	1000 V	4000 V	Fuente de 30 Ohm
CAT II	600 V	4000 V	Fuente de 12 Ohm
CAT II	1000 V	6000 V	Fuente de 12 Ohm
CAT III	600 V	6000 V	Fuente de 2 Ohm
CAT III	1000 V	8000 V	Fuente de 2 Ohm
CAT IV	600 V	8000 V	Fuente de 2 Ohm

Tomado de: El ABC de la seguridad en las mediciones eléctricas [10]

4.2.9 Probador de Tierra 1623 Fluke

El Probador de Tierra 1623, es un equipo especializado en medir la *resistencia de tierra*²⁷ de un sistema eléctrico. Debido a que el equipo puede aplicar tres métodos diferentes para hallar esta resistencia y a que, para hacerlo en cada método, utiliza configuraciones específicas con sus terminales de entrada y salida, se dejará la toda la información pertinente para más adelante ya que, en conjunto, facilita y simplifica el entendimiento tanto de los conceptos teóricos como del modo de emplear el equipo.

²⁷ Se llamará *resistencia de tierra* a la totalidad de las resistencias que puede medir el equipo de medición. Como se verá más adelante, según el método empleado, el equipo determinará una u otra resistencia.

5. DESARROLLO DEL PLAN DE TRABAJO

Como se dijo en la introducción del documento, lo desarrollado se puede resumir en cuatro grandes grupos que, cronológicamente, se han realizado así:

1. Pruebas de Funcionamiento y Aceptación.
2. Pruebas FAT.
3. Guías e Instructivos para la Operación de los Equipos e Instrumentos del Módulo de Magnitudes Secundarias.
4. Acondicionamiento de M3TLAB.

Sin embargo, para facilitar la comprensión de las pruebas, de los sistemas inmersos en ellas, de sus procedimientos y, finalmente, visto desde una perspectiva más amplia, para facilitar la comprensión del documento, se ha decidido que el desarrollo del mismo no se realice cronológicamente según las actividades realizadas.

Por lo tanto, el orden que seguirá este documento es el siguiente:

1. Guías e Instructivos para la Operación de los Equipos e Instrumentos del Módulo de Magnitudes Secundarias.
2. Pruebas de Funcionamiento y Aceptación.
3. Pruebas FAT.
4. Acondicionamiento de M3TLAB.

Como se dijo, el orden anterior está pensado para facilitar la comprensión del documento. Esto, debido a que lo realizado en las Guías e Instructivos para la Operación de los Equipos e Instrumentos fue traducir (si se requería) y redactar lo más significativo de los manuales de operación de los equipos e instrumentos, mientras, a la par, se iban estudiando, con el fin de maximizar su uso para beneficio del M3TLAB.

De este modo, se puede aprovechar parte de lo realizado en estas guías e instructivos para mostrar y explicar desde un principio el funcionamiento de los instrumentos y sus configuraciones que, más adelante, harán parte de los procedimientos de las Pruebas de Funcionamiento y Aceptación y de las Pruebas FAT.

5.1 GUÍAS E INSTRUCTIVOS PARA LA OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS E INSTRUMENTOS DEL MÓDULO DE MAGNITUDES SECUNDARIAS

En este numeral se mostrará todo lo relacionado con el funcionamiento y las configuraciones básicas de operación de los equipos e instrumentos del módulo de magnitudes secundarias de M3TLAB. Adicional a esto, se agregarán algunas configuraciones más avanzadas con el objeto de facilitar la comprensión de las pruebas desarrolladas que serán nombradas más adelante.

5.1.1 Equipos e instrumentos del módulo de magnitudes secundarias

Los equipos e instrumentos escogidos para el soporte de este módulo fueron escogidos tras un proceso de comparación de características metrológicas entre muchos otros de diferentes fabricantes. Este proceso fue llevado a cabo por el Ing. Jhonattan Fredy Moreno Bernal.

Además, éstos se subdividen en 3 grupos que, a su vez, representan las magnitudes que abarcan el Módulo de Magnitudes Secundarias de M3TLAB. Cada subgrupo contiene los equipos e instrumentos que sirven de apoyo para la magnitud correspondiente:

- ➔ **TEMPERATURA:** Bloque Seco 9142 Fluke, Termómetro 1524 Fluke, 2 RTDs 5609 Fluke y Multicalibrador 754 Fluke.
- ➔ **PRESIÓN:** Condec Source 3000, Multicalibrador 754 Fluke y Módulos de Presión 700P05, 700P27 y 700P29.
- ➔ **MAGNITUDES ELÉCTRICAS:** Multicalibrador 754 Fluke, Osciloscopio 123 Fluke, Probador de Tierra 1623 Fluke y Multímetro y Probador de Aislamiento 1587 Fluke.

El único equipo que dará soporte a los 3 grupos es el Multicalibrador 754 por su versatilidad de funcionamiento y sus características metrológicas. Sin embargo, tendrá poco uso para temperatura debido a que las características metrológicas de los otros instrumentos asociados esta magnitud superan considerablemente las suyas.

5.1.2 Condec Source 3000 [11]

Para empezar, en la figura 7 se puede observar la parte superior del Condec Source 3000:

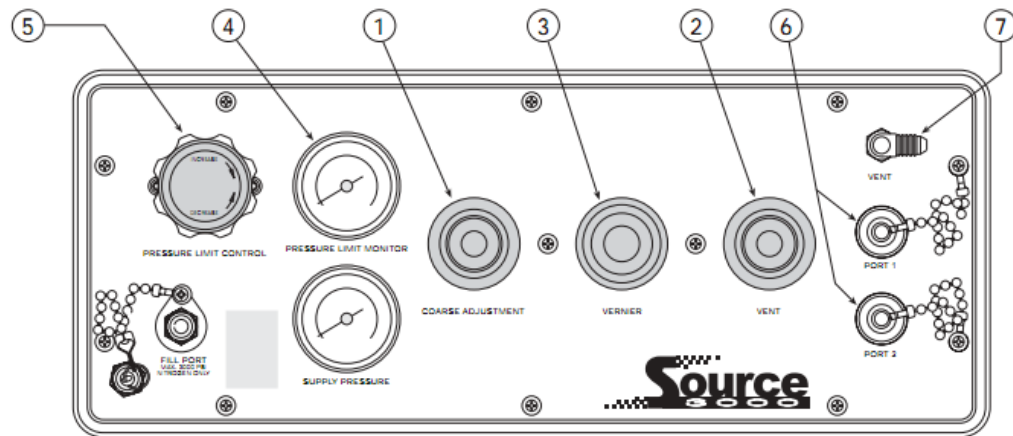


Figura 7. Vista superior del Condec Source 3000

Fuente: Manual del equipo [11]

Donde:

1. *Coarse Adjustment*: Es la perilla de la válvula manual *Pressure Valve* (se verá más adelante como *Pressure Increase*, en la figura 7). A través de ésta, se presuriza la línea de salida ya que obstruye, hasta que se abre, el suministro de aire proveniente del regulador *Pressure Limit Control* (5).
2. *Vent*: Es la válvula de venteo para despresurizar el sistema.
3. *Vernier*: Es una perilla de ajuste fino. Es un pequeño compartimento con un volumen pequeño y un pistón, el cual lo ocupa a lo ancho. Si el pistón está en la parte más alta del compartimento, cuando la perilla *Vernier* comience a hacerlo descender, la presión en la línea aumentará. Por el contrario, si el pistón está en la parte más baja del compartimento, cuando la perilla *Vernier* comience a hacerlo ascender, la presión en la línea disminuirá.
4. *Pressure Limit Monitor*: Es un manómetro a la salida del regulador de la perilla *Pressure Limit Control* (5).
5. *Pressure Limit Control*: Es un regulador de la presión proveniente del cilindro interno del Condec Source 3000.
6. *Port1* y *Port2*: Son los puertos de salida del Condec Source. Tienen un

accesorio puesto por defecto que los mantiene sellados. Además, entre *Vent* (2) y estos puertos de salida, hay un filtro que regula la despresurización para que el venteo se dé controladamente. Estos filtros se ven en la figura 7 y son llamados *Filter*.

7. *Vent*: es por donde se expulsa el aire para la despresurización que se habilita a través de *Vent* (2)

Para entender mejor las partes del Condec Source y explicar más a fondo su funcionamiento, veamos la siguiente figura:

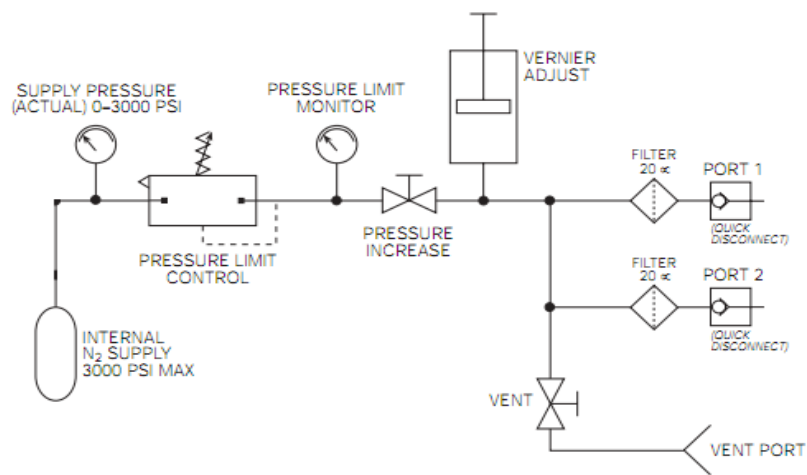


Figura 8. Diagrama de funcionamiento del Condec Source 3000
Fuente: Manual del equipo [11]

El *Internal N2 Supply* es el cilindro interno antes nombrado. Éste cilindro también, al igual que el regulador *Pressure Limit Control* (5), tiene a su salida un manómetro. A través de la perilla *Pressure Limit Control* (5), se regula la presión máxima a la que puede ser sometida la línea de salida. Presión proveniente del suministro de aire desde *Internal N2 Supply*. Es necesario aclarar que el sistema del Condec Source 3000 está diseñado para operar con nitrógeno (N₂), sin embargo, el fabricante expresó que puede operar con aire debidamente secado y filtrado.

Una vez regulada la presión de *Pressure Limit Control*, la perilla *Coarse Adjustment* (1) es la que se encarga de su presurización, a través de la válvula *Pressure Increase*. Cuando se presuriza la línea de salida, la válvula *Vent* debe

estar totalmente cerrada (se logra con la perilla que lleva su nombre). De este modo, los puertos de salida de la línea *Port1* y *Port2* (6) se mantendrán presurizados.

Quedaría por decir que el diagrama permite que sea más entendible la explicación dada para la perilla de ajuste fino *Vernier* (3). Esta perilla es la que modifica la posición del pistón *Vernier Adjust* para presurizar o despresurizar la línea de salida según su posición inicial y la dirección de giro.

5.1.3 Módulos de presión 700P05, 700P27 y 700P09 Fluke [12]

La siguiente figura ilustra el aspecto de los módulos empleados:



Figura 9. Aspecto de los módulos de presión empleados.

Fuente: Manual del instrumento [12]

Donde:

1. Adaptador métrico NPT ¼.
2. Salida con información digital.

Los módulos miden la presión mediante un microprocesador interno que envía la información digital por un cable de salida. Para empezar con estos tres instrumentos de medida, la tabla 3 muestra el rango de medición de los módulos y su precisión asociada.

Como los módulos de presión no son instrumentos indicadores, se necesita, para su indicación, un instrumento con una buena resolución, de otro modo, las

características metrológicas de los módulos no podrían ser aprovechadas.

Tabla 3. Rango y precisión de los módulos de presión

MODELO	RANGO DE MEDICIÓN (psig)	ERROR O PRECISIÓN
700P05	0 a 30	0,025 %FS
700P27	0 a 300	0,025 %FS
700P09	0 a 1500	0,025 %FS

Fuente: Manual del instrumento [12]

De la tabla 3, la *clase del instrumento* es 0.025%. Aplicando la ecuación 4 (Ec.4) para hallar el máximo error de indicación permisible, se obtienen, para cada modelo, los siguientes valores:

Tabla 4. Máximo error esperado para los módulos de presión

MODELO	RANGO DE MEDICIÓN (psig)	MÁXIMO ERROR ESPERADO (psig)
700P05	0 a 30	0,0075
700P27	0 a 300	0,075
700P09	0 a 1500	0,375

Fuente: Autor

Más adelante, la tabla 4 servirá para los análisis de la prueba de presión en las pruebas FAT.

5.1.4 Multicalibrador 754 Fluke [13]

Para empezar, veamos la distribución de sus principales entradas y salidas:



Figura 10. Entradas y salidas de multicalibrador 754
Fuente: Manual del equipo [13]

Donde:

1. Entrada HART.
2. Conector del módulo de presión.
3. Entrada y salida de termopares.
- 4, 5. Terminales de entrada para medir tensión, frecuencia y RTD de tres o cuatro hilos.
- 6, 7. Terminales para generar o medir corriente, medir resistencia y RTD, y suministrar alimentación de bucle.
- 8, 9. Terminales de salida para generar tensión, resistencia, frecuencia y simular RTD.

Para continuar con la distribución externa del equipo, veamos el panel principal de botones:



Figura 11. Botones del panel principal del multicalibrador 754
Fuente: Flickr de yahoo [14]

Para el encendido y apagado del equipo se debe presionar la tecla circular color verde (●). Una vez encendido, la tecla *Measure/Source* (MEASURE/SOURCE) determina cómo va a funcionar el equipo. Estas son las opciones:

1. Modo Medición: medición de la magnitud seleccionada.
2. Modo Fuente: fuente o simulación de la magnitud seleccionada.
3. Modo Medición y Fuente: realiza medición y fuente simultáneamente.

Para pasar de un modo de funcionamiento a otro se debe seguir oprimiendo la tecla *Measure/Source*. Además, la pantalla del equipo permite saber cómo está funcionando:



Figura 12. Modo medición y fuente
Fuente: Manual del equipo [13]

En la figura 12 se puede observar la distribución de la pantalla cuando se ha escogido el modo medición y fuente simultáneamente. Ésta figura también sirve para explicar la distribución de la pantalla para los otros dos modos de funcionamiento: si está en modo medición se verá toda la pantalla como el recuadro dispuesto para *Measure*, es decir, sólo se vería 8.005 mA (para este caso). De igual modo si el equipo se encuentra en modo fuente, se vería en toda la pantalla lo disponible para *Source*, es decir, 150.0 °C (para este caso).

Para seguir con la explicación, es necesario decir que, según el modo en que esté operando el equipo, algunas teclas tendrán opciones diferentes. Para comprender mejor lo dicho, veamos la tabla 5:

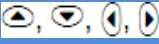
Tabla 5. Función de las teclas según el modo de operación

Tecla	Modo de Funcionamiento	
	Medición	Fuente
	Corriente en mA	Corriente en mA
	Voltaje DC	Voltaje DC
	Termopar y RTD	Simulación RTD
	Medición de presión	
	Resistencia y Continuidad	Simulación de resistecia
	Voltaje AC y Frecuencia	Frecuencia

Fuente: Manual del equipo [13]

Para terminar con las teclas, hay algunas que, sin importar el modo en que se encuentre el equipo, siempre cumplen funciones particulares. Algunas de éstas, como se indicará en la tabla 6, tienen una función secundaria si la opción *Calculadora* ha sido habilitada.

Tabla 6. Últimos botones del equipo

Tecla	Función	Calculadora habilitada
	Configuración para parámetros de funcionamiento	
	Pasa de modo HART a modo Analógico	Selecciona raíz cuadrada
	Borra datos numéricos escogidos y pone a cero el módulo de presión	
	Confirma un valor numérico o una selección de parámetro	Escoge el símbolo =
F1,F2,F3,F4	Son opciones que cambian en función del menú o submenú en que se encuentre la pantalla	
	Ajusta el brillo del fonde de la pantalla	
	Flechas de navegación y de ajuste de intensidad de la pantalla	Provee las funciones aritméticas + - x /
Teclado Numérico	Ingresar valores numéricos para fuente o para cálculos	

Fuente: Manual del equipo [13]

Para seleccionar la *Calculadora*, se debe presionar alguna de las teclas *F1*, *F2*,

F3, F4 ya que es en la pantalla donde se presenta la opción.

A modo de resumen del equipo, la tabla 7 muestra las funciones de medición y generación con sus rangos de medición asociados.

Tabla 7. Resumen de las funciones de medición y fuente

Función	Medida	Fuente
 Voltios CC	0 V a ± 300 V	0 V a ± 15 V (10 mA máx)
 Voltios CA	0,27 V a 300 V valor eficaz, 40 Hz a 500 Hz	Sin fuente
 Frecuencia	1 Hz a 50 kHz	Onda sinusoidal p-p de 0,1 V a 30 V, u onda cuadrada de pico de 15 V, onda sinusoidal de 0,1 Hz a 50 kHz, onda cuadrada de 0,01 Hz
 Resistencia	0 Ω a 10 k Ω	0 Ω a 10 k Ω
 Corriente continua	0 mA a 100 mA	0 a 22 mA fuente o inmersión
 Continuidad	Un tono y la palabra Corto indica continuidad	Sin fuente
 Termopar	Tipos E, N, J, K, T, B, R, S, C, L, U, BP o XK	
 RTD (2-W, 3-W, 4-W)	100 Ω Platino (3926) 100 Ω Platino (385) 120 Ω Níquel (672) 200 Ω Platino (385) 500 Ω Platino (385) 1000 Ω Platino (385) 10 Ω Cobre (427) 100 Ω Platino (3916)	
 Presión	29 módulo que van de 0 a 1 pulg. H ₂ O (250 Pa) a 0 a 10.000 psi (69.000 kPa)	
 Alimentación de bucle	26 V	

Fuente: Manual del equipo [13]

5.1.5 Bloque Seco 9142 Fluke [15]

Para empezar, el bloque seco tiene un rango de generación de -25 a 150 °C. Veamos la figura 13, que muestra el panel principal del bloque seco:



Figura 13. Panel principal del bloque seco
Fuente: Guía del usuario del instrumento [15]

Donde:

1. *Pantalla*: Dispositivo LCD monocromático de 240x160 pixeles. Más adelante se dará una explicación más detallada de la misma.
2. *Teclas de Flecha*: Permiten mover el cursor en la pantalla para modificar parámetros de funcionamiento. Además, usando las teclas de flecha ▲ y ▼, se ajusta el contraste de la pantalla estando situado en la ventana principal.
3. *Tecla Enter*: Permite seleccionar menús y confirmar nuevos parámetros.
4. *Tecla SET POINT*: Permite modificar el valor de referencia de temperatura deseado. El bloque seco estará inactivo (sin enfriar ni calentar) hasta ser habilitado a través de esta tecla.
5. *Tecla °C/°F*: Permite cambiar la unidad de temperatura indicada a °C o °F.
6. *Tecla Menú*: Permite el acceso a menús y submenús de parámetros y configuraciones.
7. *Tecla Exit*: Permite salir a la ventana principal y cancelar parámetros modificados.
8. *Teclas de función*: A través de estos 4 botones (F1, F2, F3, F4) se accede a los submenús de parámetros y configuraciones. Por esto, tendrán una función diferente dependiendo de donde se encuentre.

Para completar el panel frontal del instrumento, a continuación se verá en detalle su pantalla:

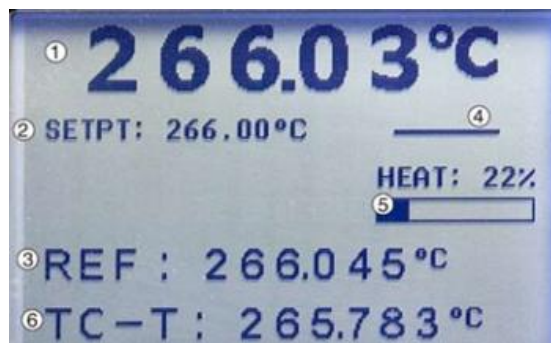


Figura 14. Pantalla del bloque seco.

Fuente: Guía del usuario del instrumento [15]

Donde:

1. *Temperatura de la fuente de calor:* Indicación de la medición de temperatura del bloque más reciente. La temperatura que indica aplica para el modelo 9143.
2. *Temperatura del punto de referencia:* Punto de referencia seleccionado.
3. *No aplica para este instrumento:* Aplica para el modelo 9143.
4. *Estado de estabilidad:* Muestra el estado actual de la estabilidad del horno. Cuando la línea oscilante se hace horizontal, la temperatura se encuentra en estado estable, sino, sigue en el transitorio.
5. *Estado de Calentamiento/Enfriamiento:* Este gráfico mostrará, según el punto de referencia a donde se dirige y desde donde viene, HEAT (calentando), COOL (enfriando) o CUTOOUT (detención). El porcentaje indica la potencia utilizada para lograr alcanzar el nuevo punto de control.
6. *No aplica para este instrumento:* Aplica para el modelo 9143.

Para seleccionar un valor deseado de temperatura, se presiona el botón *Set-pt* (4). En la pantalla principal habrá un seleccionador sobre el valor del mismo que se podrá modificar con las *Teclas de Flecha* (2). Una vez modificado este valor, se presiona la *Tecla Enter* (3). El bloque seco empezará a buscar el valor de temperatura seleccionado.

Cuando el bloque seco, a través de un sensor de un lazo de control interno, detecta que se encuentra a ± 0.03 °C (por defecto) del valor deseado, emite un sonido agudo en forma de pito y, adicional a esto, en la pantalla la línea oscilante se hace horizontal simbolizando estabilización. Éste valor puede modificarse si así se desea.

5.1.6 RTDs 5609 Fluke[6]

Básicamente, la RTD 5609 se ve de la siguiente manera:



Figura 15. Estructura de la RTD 5609

Fuente: Página oficial de Fluke [16]

Donde:

1. Sensor de temperatura.
2. Cuerpo del transductor.
3. Salida del transductor.

He aquí las especificaciones básicas del sensor del transductor:

Tabla 8. Especificaciones básicas de la RTD 5609

SENSOR	RANGO DE MEDICIÓN	COEFICIENTE DE TEMPERATURA (α)	PRECISIÓN
PT - 100	-200 a 670 °C	0.03925 $\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ @ 0.1 °C

Fuente: Guía del usuario de la RTD [6]

La RTD 5609 cuenta con un sensor de platino que a 0 °C, debería tener una resistencia de 100 Ω . Este sensor, varía su resistencia en función de la temperatura a la cual se le exponga. De modo que cuando aumenta la temperatura, aumenta la resistencia. Éste tipo de sensores son utilizados en sistemas o aplicaciones en que se requiere una precisión muy alta de medición, como es el nuestro.

El cuerpo las RTDs y su salida, corresponden a una *conexión kelvin de 4 hilos* y a un conector INFO-CON respectivamente. Estos, ya fueron explicados en el marco teórico.

5.1.7 Termómetro 1524 Fluke [7]

Para empezar, la resolución correspondiente del termómetro 1524, según el transductor empleado, es de la siguiente manera:

Tabla 9. Resolución del instrumento según el transductor

TRANSDUCTOR	RESOLUCIÓN (°C)
RTD	0,001
Termistor	0,001

TRANSDUCTOR	RESOLUCIÓN (°C)
Termopar	0,01

Fuente: Guía técnica del instrumento [7]

Puede verse que tiene una buena resolución para el transductor que nos interesa, la RTD. La siguiente figura muestra sus entradas y salidas principales:



Figura 16. Puertos de entrada y salida del termómetro 1524

Fuente: Guía del usuario del instrumento [7]

Donde:

1. Conector para comunicación serial.
2. Canal 1 para RTD o termopar.
3. Canal 2 para RTD o termopar.
4. Conector de adaptador externo para recarga del instrumento.

La entrada de los canales T1 y T2 son unos conectores INFO-CON. Estos, ya fueron explicados en el marco teórico. Para continuar con la distribución externa del instrumento, veamos su panel principal de botones:



Figura 17. Panel principal del termómetro 1524
Fuente: Guía técnica del usuario del instrumento [7]

Donde:

1. Encendido y apagado del instrumento.
2. Tecla de función especial: habilita las funciones en letra amarilla.
3. Enciende o apaga la luz de la pantalla.
4. *STATS*: Permite al usuario ver datos estadísticos: el mínimo, el máximo, el promedio y la desviación estándar de las lecturas para cada canal del siguiente modo:
 - 1ra pulsación: MÁX (máximo).
 - 2da pulsación: MIN (mínimo).
 - 3ra pulsación: MED (promedio).
 - 4ta pulsación: DES EST (desviación estándar).
5. Cambia las unidades de temperatura a °C o °F.
6. *HOLD*: La 1ra pulsación retiene el valor en la pantalla y bloquea el instrumento. La 2da pulsación lo libera.
7. *SETUP*: Esta tecla da acceso al menú de configuraciones para el instrumento, y a los submenús para los canales T1 y T2. A través de éste, el usuario reconfigura el instrumento y los parámetros del sistema.
8. *SAVE*: Guarda la medida como punto de datos registrado.
9. *Flechas UP y DOWN*: Estas teclas permiten seleccionar opciones dentro del campo en el menú que se encuentre. En el modo gráfico, las flechas cambian la escala del mismo.
10. *ENTER*: Selecciona y guarda la modificación realizada.
11. *RECALL*: Permite al usuario revisar, eliminar, o enviar datos almacenados por el puerto serial.

12. *NEXT*: Es utilizada para moverse a través del menú.

Como se dijo, la *Tecla de función especial (2)* habilita otras funciones, específicamente, las que están en letras amarillas sobre algunas teclas. Estas funciones combinadas se activan de la siguiente manera y cumplen el siguiente papel:

1. (2)+(4) *RESET*: Restaura los datos estadísticos.
2. (2)+(5) : Muestra, además de la temperatura en la unidad seleccionada, el valor de la resistencia medida en caso que la entrada sea una RTD o la tensión si es termopar. Este valor aparecerá en la parte baja del instrumento.
3. (2)+(6) *TREND*: Cambia del modo numérico al modo gráfico y viceversa.
4. (2)+(10) *HOME*: Lleva a la pantalla principal.
5. (2)+(8) *LOG*: Menú de registro de datos.

Como pudo apreciarse de las características de las funciones combinadas, además del modo numérico, hay un modo gráfico. Según el modo escogido, la pantalla del instrumento se verá de una forma u otra.

La figura 18 muestra la pantalla para el modo numérico. Esta gráfica permite apreciar una de las características principales del instrumento que, hasta ahora, no había sido nombrada: indicación simultánea de ambos canales. La simultaneidad de las lecturas se utilizará en todos los procedimientos realizados con la magnitud temperatura y su beneficio principal es que simplifica el sistema de medición.

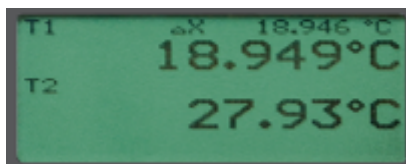


Figura 18. Pantalla en modo numérico

Fuente: Guía técnica del usuario del instrumento [7]

Siguiendo con lo anterior, la figura 19 muestra la pantalla para el modo gráfico. Este modo permite la visualización del comportamiento de la temperatura a través del tiempo, graficando los datos de lectura.

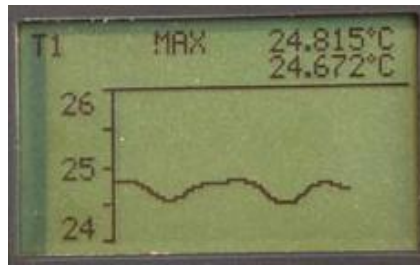


Figura 19. Pantalla en modo gráfico

Fuente: *Measure, graph and record three sensor types with one tool* [17]

Continuando con la pantalla en modo gráfico, la escala de tiempo (eje horizontal) no es ajustable, se ajusta por defecto. La gráfica se extiende hacia la derecha para dar paso a los datos que le siguen paulatinamente. Por el contrario, la escala de temperatura (eje vertical) es ajustable usando las *flechas UP* y *DOWN* para incremento o decremento de la escala. Los rangos de indicación disponibles son ± 0.01 , ± 0.1 , ± 1.0 , $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

Para finalizar con el modo gráfico, es posible generar el gráfico de datos en el tiempo para ambos canales. Por defecto, el instrumento la generará para el canal T1 pero, presionando la tecla *NEXT* (12), se verá la del canal T2. De este modo, el instrumento guardará los datos de los 2 canales para las gráficas individuales aunque solo 1 de los 2 sea mostrado en la pantalla principal. Además, en la parte superior de la pantalla, se muestra algún dato estadístico y, bajo él, el valor actual.

Para terminar con el instrumento, se explicará la función *AUTO LOG* pues se utilizará para las pruebas FAT para temperatura. Sin embargo, cuando se esté en esa parte del documento, para recordar la función, también se nombrará. Esta función habilita un registro de datos automático por un periodo de tiempo deseado o hasta que se llene su memoria que, aproximadamente, se logra con 15000 datos. Su habilitación y configuración se realiza mediante la tecla combinada *LOG* ((2)+(8)). Una vez allí, el instrumento pedirá que se configure nombre, fecha, rata de muestreo y ranura de almacenamiento, entre otras cosas.

5.1.8 Multímetro y Probador de Aislamiento 1587 Fluke [18]

Para empezar, veamos las entradas y salidas del instrumento:

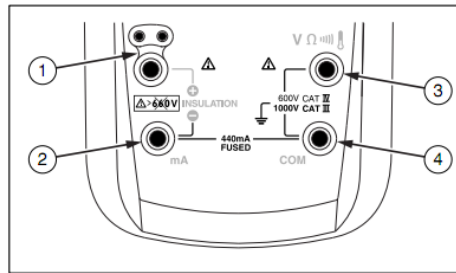


Figura 20. Puertos de entrada y salida del instrumento
Fuente: Manual de usuario del instrumento[18]

Donde:

- 1 y 2. Son los terminales de entrada para medir aislamiento, + y – respectivamente. Además, se utilizan para medir corriente y frecuencia.
- 3 y 4. Son los terminales de entrada para medir el resto de las magnitudes eléctricas y temperatura.

Continuando con sus partes, éste posee una perilla giratoria que, según donde sea posicionada, seleccionará la magnitud a medir. El extremo que selecciona la magnitud es el más delgado y se reconoce porque tiene una marca circular en su punta. La figura 21 muestra con claridad lo explicado y las opciones de medición. La primera posición posible, de izquierda a derecha (sentido horario), es *OFF*. Sólo cuando la perilla selecciona *OFF* el instrumento se apaga.



Figura 21. Perilla giratorio para selecciona la magnitud de la medición
Fuente: Página oficial de TMG [19]

En la mayoría de las posiciones diferentes a *OFF* (excepto en voltaje DC (alto voltaje), dos posiciones más adelante), hay 2 opciones de medición denotadas con

un color diferente. Las primeras y principales, se ven con un tinte blanco. Éstas, partiendo en sentido horario desde *OFF*, son: Voltaje AC, Voltaje DC (alto voltaje), Voltaje DC (en mV), Ohms, continuidad, corriente AC (en mA) y resistencia de aislamiento. Las segundas, se ven con un tinte azul. Éstas, partiendo desde *OFF* y en sentido horario, son: aplicación de un filtro pasa bajas, temperatura, capacitancia, diodo, corriente DC (en mA) y suavizado.

En primera instancia, por defecto, el instrumento seleccionará la magnitud denotada con el color blanco. Para cambiar a la segunda opción, el instrumento cuenta con una tecla redonda color azul que, al ser presionada, cambia de una magnitud a otra. La figura 22 muestra, en la parte inferior derecha, la tecla nombrada. En la imagen también se ve otra tecla redonda pero en la parte inferior izquierda, ésta, es para variar el brillo de la pantalla.



Figura 22. Botones complementarios del instrumento

Fuente: Página oficial de TMG [19]

Además, en la figura 22 se ve:

1. *HOLD*: Mantiene un valor en la pantalla. En la prueba de aislamiento, para la prueba.
2. *MINMAX*: Inicia la retención de los valores mínimo, máximo y promedio.
3. *HZ*: Activa la medición de frecuencia para voltaje y corriente AC
4. *RANGE*: Cambia el rango de medición de la prueba.
5. *INSULATION TEST*: Da inicio a la prueba de aislamiento cuando la perilla se encuentra en la posición debida (última en sentido horario).

Las funciones más peculiares de este instrumento son la medición de alto voltaje, la aplicación del filtro pasa bajas y la medición de la resistencia de aislamiento, por lo tanto, se explicarán más detalladamente.

Para empezar, el filtro pasa bajas es un agregado a la medición de voltaje AC y

por eso son las dos opciones para la misma posición de la perilla. Una vez se está midiendo voltaje AC y se presiona el botón azul para activarlo, la señal se desvía a un filtro que bloquea las frecuencias no deseadas superiores a 800Hz mientras que el instrumento continúa midiendo voltaje.

Para continuar, el instrumento es capaz de medir hasta 1000 V AC y DC. Para hacerlo, tiene unas puntas de medición especialmente diseñadas para altos voltajes²⁸. Para realizar la medición de alto voltaje, se deben tener en cuenta las precauciones enunciadas cuando se explicaron las categorías de medición en el marco teórico y utilizar el rango de medición adecuado con la tecla *RANGE* del instrumento, según el punto de la distribución eléctrica.

Por último, el instrumento cuenta con una función muy particular: la medición de la resistencia de aislamiento de un circuito. Para hacerlo, el instrumento genera una tensión de salida que puede escogerse (con la tecla *RANGE*) entre 50, 100, 250, 500 y 1000 V y, debido a eso, es necesario que el circuito bajo prueba esté sin energía. Adicional al voltaje generado, también entrega una corriente en función de la resistencia de aislamiento del circuito bajo prueba. De este modo, utilizando como principio la ley de Ohm, determina la resistencia de aislamiento:

$$\text{Resistencia de aislamiento} = \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Corriente de la fuente}} \quad (\text{Ec.8})$$

Para hacer la prueba, se deben conectar las puntas en los terminales 1 y 2 descritos anteriormente y llevar la perilla giratoria, en sentido horario, hasta la última posición. Una vez allí, seleccionar el rango de medición deseado con la tecla *RANGE*. Cuando se tenga esto listo, se presiona la tecla *INSULATION TEST* y se da inicio a la prueba. Como se dijo antes, es necesario que el circuito bajo prueba esté sin energía. Sin embargo, el instrumento realiza una verificación antes de generar la tensión de salida escogida y, en caso que el circuito esté energizado con un voltaje superior a los 30 V AC o DC, en la pantalla saldrá el símbolo ⚡ y abandonará la prueba. Una vez desenergizado el circuito, se puede reiniciar la prueba.

Cuando está todo listo y se presiona la tecla *INSULATION TEST*, el instrumento, al pasar la verificación, indica la resistencia de aislamiento en MΩ o GΩ. Si la resistencia es mayor que el rango de visualización máxima, el multímetro muestra el símbolo >.

²⁸ Las puntas de medición y el instrumento cumplen con las normas CAT III y CAT IV IEC 61010.

5.1.9 Osciloscopio 123 Fluke [20]

Para empezar, el osciloscopio, como dato importante y fundamental de su funcionamiento, tiene un ancho de banda de 20 MHz. A continuación se observan las entradas del instrumento:

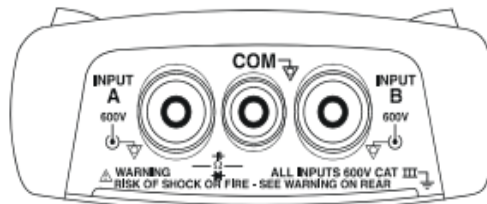


Figura 23. Entradas de osciloscopio 123 Fluke
Fuente: Manual de usuario del instrumento [20]

Donde²⁹:

INPUT (Entrada) A: Siempre se puede usar la entrada A (es roja aunque en la figura no puede apreciarse) para una medición de una sola entrada.

INPUT (Entrada) B: Para mediciones en 2 señales diferentes, se usa esta entrada (es gris aunque en la figura no pueda apreciarse) junto con la A roja.

COM: Puede utilizar la entrada común como una tierra para mediciones de baja frecuencia, continuidad, resistencia, diodo y capacitancia.

Continuando con sus partes, veamos las teclas de su panel principal en la figura 24. Las teclas que corresponden a las flechas arriba, abajo, izquierda y derecha, permiten la movilidad y navegación a través de las opciones posibles que ofrece la pantalla. Las opciones dependen del menú o submenú en que se encuentre el usuario.

La tecla *SAVE/PRINT* cumple una doble función. Si un cable RS-232 se conecta a su costado (única salida del instrumento), al ser presionada, automáticamente habilitará la conexión a una impresora para imprimir la gráfica actual. Normalmente, al ser presionada, muestra 3 opciones, éstas, son:

²⁹ Éstas entradas con las puntas correspondientes se encuentran categorizadas hasta 600 V CAT III.



Figura 24. Teclas del osciloscopio 123 Fluke
Fuente: Página oficial de CONRAD-UK [21]

1. *Save...*: Al seleccionarla, aparecerán números con un cuadro a su lado que corresponden a las ranuras de memoria disponible para almacenar una configuración o la pantalla completa. Los cuadros que estén color negro, simboliza que es una ranura de memoria llena. Si está vacío, no se ha almacenado dato aún y si se presiona sobre uno de éstos, se guardará el dato o la pantalla completa.
2. *Recall...*: Al seleccionarla, aparecerán los mismos números de ranuras. Debe seleccionarse una que esté llena y, al hacerlo, aparecerá la pantalla o configuración guardada.
3. *Delete...*: Elimina datos guardados en las ranuras mencionadas.

Continuemos con las teclas y sus respectivas funciones:

Tabla 10. Teclas con única función

TECLA	FUNCIÓN
	Encendido y apagado del instrumento
	Cambia la intensidad de la pantalla
HOLD RUN	Retiene o libera la pantalla
AUTO	Cambia la medición entre modo automático y manual

Fuente: Manual de usuario del instrumento [20]

Al igual que en el bloque seco 9142, es a través de los cuatro botones *F1, F2, F3, F4* que se accede a submenús, configuraciones de medición y demás opciones dependiendo de lo que se encuentre mostrando la pantalla.

Para proceder con las siguientes teclas, lo más conveniente es mostrar la distribución de la pantalla, la cual se ve del siguiente modo:

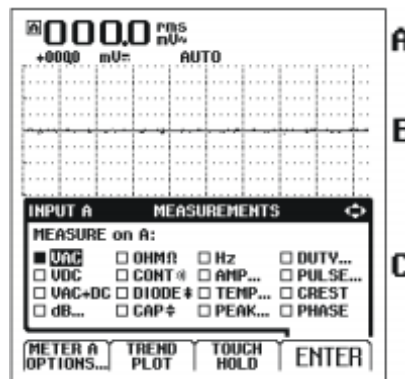


Figura 25. Distribución de la pantalla del instrumento

Fuente: Manual de usuario del instrumento[20]

Donde:

Área de Lectura (A): Indica las lecturas numéricas con su unidad correspondiente.

Área de Onda (B): Área dedicada a la indicación de la lectura (forma de onda o señal eléctrica) tomada en función del tiempo.

Área del Menú (C): Muestra el menú que provee opciones disponibles a través de las teclas de función *F1, F2, F3* y *F4*.

Del *Área de Onda*, queda por decir que es allí donde las teclas grises (3 teclas) del instrumento, que se observaron en la figura 24, realizan su función. Como se puede notar, hay 2 teclas iguales las cuales tienen designado en sus extremos *mV* y *V*. Estas teclas idénticas cambian la escala del eje Y de la forma de onda, una para la *INPUT A* y otra para la *INPUT B*. La tercera tecla, tecla tiene la misma función que las dos anteriores pero ésta altera el eje X (tiempo) para ambos canales.

Del *Área del Menú*, queda por decir que es allí donde los botones amarillos (dos)

del instrumento, que se observaron en la figura 24, despliegan su función. La tecla amarilla de la izquierda muestra las opciones de medición y graficado para la *INPUT A*, mientras que la de la derecha, lo hace para la *INPUT B*. En la figura 25 se ven las opciones que se despliegan al presionar la tecla amarilla izquierda, es decir, las opciones de medición y graficado para el canal A. Más abajo de ese menú, se ven tres opciones más para graficado que deben ser escogidas con las teclas *F1*, *F2* y *F3*.

Además, en el *Área del Menú*, también se despliegan las opciones para las teclas *USER OPTIONS* (opciones de usuario) y *SCOPE MENU* (menú del osciloscopio). La tecla *USER OPTIONS* muestra: modificar la grilla, la fecha, la hora, selección de lenguaje, entre las más importantes. Para el caso de la tecla *SCOPE MENU*, se verán opciones como habilitar y deshabilitar el canal, seleccionar entre AC y DC, invertir la gráfica, entre otros.

5.1.10 Probador de Tierra 1623 Fluke [22] [23]

Para empezar, el *sistema de puesta a tierra* es el punto o unión eléctrica en que todos los caminos de las corrientes de un sistema de distribución eléctrica convergen para aterrizarse. El *sistema de puesta a tierra* se conecta directamente a una *toma de tierra*, la cual se constituye por uno o varios *electrodos* (o polos a tierra) enterrados en el suelo. La siguiente figura permite entender con mayor claridad lo anterior:

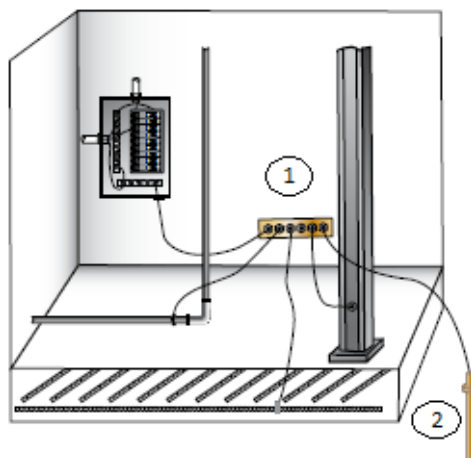


Figura 26. Ejemplo del *sistema de puesta a tierra*
Fuente: Medida de la resistencia de la toma de tierra [23]

Donde:

1. Sistema de puesta a tierra
2. Toma de tierra (electrodo o polo a tierra)

La función principal de la *toma de tierra* es brindar una salida a corrientes altas e indeseadas del sistema eléctrico, como la contingencia ante corrientes de falla, las cuales pueden ser: descargas electrostáticas, atmosféricas o cortocircuito. Esto, garantizando que las superficies metálicas y elementos conductores (ajenos a los que se encargan del transporte de la energía), no estén energizados, mediante la conexión equipotencial de estos elementos a un punto de referencia común o tierra, el cual, idealmente, debería tener una resistencia eléctrica de $0\ \Omega$ y, por lo tanto, de 0V.

Una buena pregunta para hacerse sería ¿Por qué medir resistencia y no impedancia, si los sistemas de distribución eléctrica entregan corriente alterna? Bueno, esto se debe a que la componente resistiva de la impedancia para estos sistemas es mucho mayor que la reactiva debido a las frecuencias de trabajo.

Antes de explicar el funcionamiento del equipo de medición, veamos la figura 27, la cual muestra las partes principales y los terminales de entrada y salida que lo conforman:

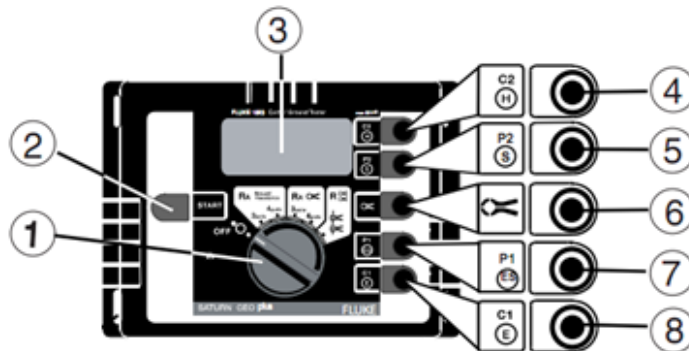


Figura 27. Probador de tierra 1623 Fluke
Fuente: Manual de usuario del equipo de medición [22]

Donde:

1. Perilla giratoria que selecciona la opción de medición. Más adelante se verán las opciones para la medición de la *resistencia de tierra*.
2. *START*: da inicio a la medición según la función seleccionada.
3. Pantalla LCD.
4. Conector *H/C2* para la *pica de inyección de corriente*
5. Conector *S/P2* para la *pica de referencia de potencial*
6. Conector  para la *pinza amperimétrica de medición*
7. Conector *ES/P1* para *opción de 4 polos*
8. Conector *E/C1* para el *electrodo bajo prueba*

Además, hay una novena opción para la *pinza amperimétrica de generación*, la cual requiere de los terminales *H/C2* y *E/C1* para su conexión.

Como se indicó, la perilla giratoria es la que selecciona la opción de medición. Según la opción escogida por ella, el equipo de medición aplicará un método de medida con una configuración particular de entradas y salidas para determinar la *resistencia de tierra*. El manual explicita claramente la configuración de entradas y salidas según el método escogido.

Antes de enunciar los métodos de medida, veamos la figura 28, la cual permite observar las opciones de la perilla giratoria. En sentido horario, después de *OFF*, que apaga el equipo, se cuenta con cinco opciones más. A continuación, se verán los métodos de medición de la *resistencia de tierra* del equipo de medición según la opción escogida, tomando la opción *OFF* como referencia (posición 0) para nombrar las otras cinco posiciones:

1. Método de caída de potencial: Corresponde a la posición 1 y 2. La posición 1 aplica para mediciones de resistencia de tierra de 2 y 3 polos. La posición 2, igual pero para 4 polos.
2. Método selectivo: Corresponde a la posición 3 y 4. El de la posición 3 es llamado medición de resistencia selectiva de 3 polos con pinza amperimétrica. El de la posición 4 igual, pero con 4 polos.
3. Método de la medida sin picas: Corresponde a la última posición, la 5. También es llamado medición del bucle de tierra sin estaca. Es un método especial del equipo de medición en que emplea dos pinzas amperimétricas.

Para empezar con el método de caída de potencial, es necesario aclarar que éste no determina la resistencia del *sistema de puesta tierra*, sino que determina, y es el más utilizado para hacerlo, la resistencia de la *toma de tierra* de un sistema

eléctrico. Normalmente, los instrumentos que lo ejecutan se denominan telurómetros. Para llevarlo a cabo, antes que nada, es necesario desconectar el o los electrodos de la *toma de tierra del sistema de puesta a tierra*.



Figura 28. Perilla giratoria con las opciones de medición
Fuente: Página oficial de Optimum Stores [24]

Para entender la forma en que el método determina la resistencia *de la toma de tierra*, se explicará el caso en que la perilla se gire hasta la posición 1, es decir, método de caída de potencial con 2 y 3 polos (se explicará con 3 polos). La figura 29 muestra la configuración correspondiente para realizar la medición (mitad izquierda) y su circuito equivalente (mitad derecha).

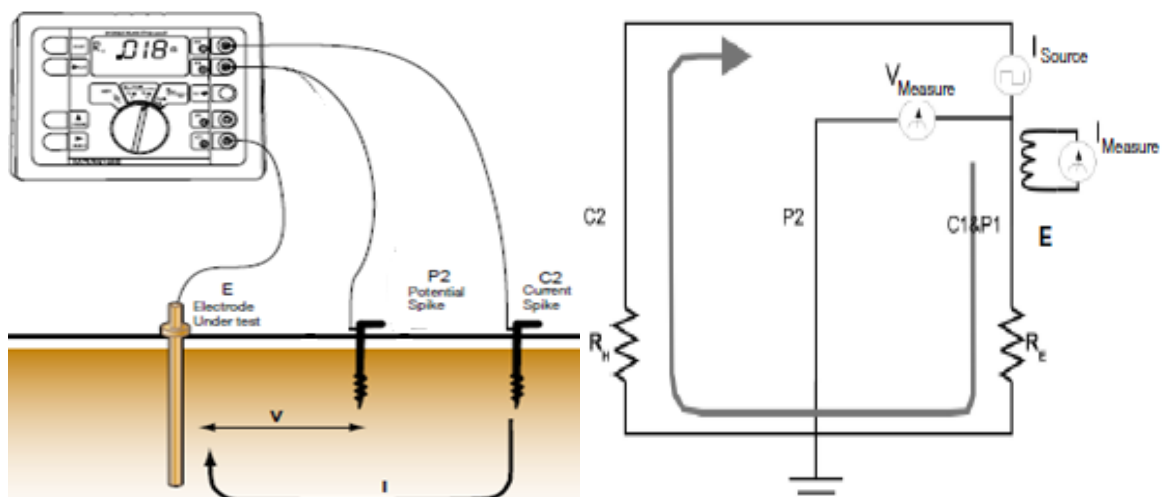


Figura 29. Configuración caída de potencial con 3 polos y circuito equivalente
Fuente: Medida de la resistencia de la toma de tierra [23]

Para las conexiones entre los terminales del equipo de medición y los elementos del sistema, se emplea un cable de prueba que, desafortunadamente, aporta al valor de la resistencia medida si hay distancias de varios metros entre ellos. El *electrodo bajo prueba (E)* se debe conectar al terminal *E/C1*. Una pica (accesorio del equipo de medición), llamada *de referencia potencial (P2)*, debe conectarse en *S/P2*, entre el *electrodo bajo prueba* y la segunda pica. La segunda pica, llamada *de inyección de corriente (C2)* y su resistencia aparece referida como R_H , es la que se conecta a *H/C2* y es la que se encuentra más lejos del *electrodo bajo prueba*. Más adelante se hablará de las distancias que debe haber entre ellos. Además, es importante que las picas y el electrodo se encuentren en línea recta.

El funcionamiento es el siguiente: Internamente, el equipo de medición tiene una fuente de tensión que entrega una corriente $I_{Measure}$ que hace fluir por un transformador, el cual induce una corriente I_{Source} (en la mitad derecha de la figura 29 pueden apreciarse las dos corrientes nombradas). Esta I_{Source} es la que se hace fluir por la *pica de inyección de corriente* y por el *electrodo bajo prueba*. La corriente pasa a través de la tierra para completar el circuito. La *pica de referencia de potencial*, funciona como un voltímetro que permite medir la diferencia de potencial entre el terminal *E/C1* y un punto distante en la tierra por donde fluye la corriente con una tensión idealmente de 0V, de modo que el valor resultando es el de *E/C1*, es decir, el de la caída de potencial del *electrodo bajo prueba*. No siempre se obtiene el valor correcto de la caída de potencial del *electrodo bajo prueba* si no se respeta la distancia que debe haber entre éste y las picas. Básicamente, para obtener un resultado confiable de la resistencia de la *toma de tierra*, la *pica de referencia de potencial* debe estar en un punto tal que se encuentre por fuera del *área de influencia* tanto del *electrodo bajo prueba* como de la *pica de inyección de corriente*, es decir, por fuera de la caída de tensión en las proximidades de estos dos elementos debida a la corriente que circula por ellos. De modo que la *pica de referencia de potencial* queda entre las *áreas de influencia* de estos elementos para, al medir la caída de potencial, evitar adicionarle tensión si se entierra cerca de la *pica de inyección de corriente*, o disminuirle, si se entierra cerca del *electrodo bajo prueba*.

El *área de influencia* depende de la profundidad a la que es enterrado el *electrodo bajo prueba*. Fluke aconseja que a una profundidad menor de 6 m (siempre mayor a 0.5 m), hayan 20 m del *electrodo bajo prueba* a la *pica de referencia de potencial*, y de ésta última a la *pica de inyección de corriente*, otros 20 m. En total, entre *electrodo bajo prueba* y la *pica de inyección de corriente*, la cual es la más lejana, 40 m. Para profundidades mayores, Fluke recomienda guiarse con la

siguiente tabla:

Tabla 11. Distancias entre picas en función de la profundidad del electrodo bajo prueba

Profundidad del electrodo que se está comprobando (E)	Distancia desde E a la pica de referencia de tensión (P2)	Distancia desde E a la pica de inyección de corriente (C2)
6	50	82
8	62	100
20	81	131
30	100	161

Fuente: Medida de la resistencia de la toma de tierra [23]

De ese modo, el equipo medidor, sabiendo una corriente y midiendo el diferencial de potencial nombrado (*V Measure* en la figura 29), aplica la ley de Ohm para determinar la resistencia de la *toma de tierra*. Sin embargo, y desafortunadamente, la corriente que utiliza el equipo de medición para determinar la resistencia de la *toma de tierra* no es *I Source*, sino la corriente de la fuente *I Measure*. El segundo método, que se explicará más adelante, subsana este error con una configuración particular. Para la obtención del resultado, en todos los métodos, se debe pulsar la tecla *START* y esperar hasta que el valor del resultado se indique en la pantalla.

Para finalizar con el método de caída de potencial, la otra opción posible del equipo de medición es el método de caída de potencial de 4 polos (posición 2 de la perilla). En ésta opción, tanto la entradas *E/C1* como la *ES/P1* deben ir conectadas hasta el *electrodo bajo prueba*. De ese modo, se elimina la influencia de las puntas de prueba (el cable que conecta el terminal del equipo de medición al *electrodo bajo prueba*) ya que el equipo determina, a través de *ES/P1*, su diferencia de potencial. De modo que cuando mide *V Measure*, le resta la tensión de las puntas de prueba y con el valor resultando determina la resistencia de *toma de tierra* aplicando la ley de Ohm.

Continuando con los métodos de medición de la resistencia de tierra, se tiene el segundo mencionado, el método selectivo, el cual corresponde a las posiciones 3 y 4 de la perilla. Éste método es una variante al de caída de potencial en el que no se requiere desconectar el *electrodo bajo prueba*.

Como se había dicho, el método selectivo emplea un pinza amperimétrica durante el proceso de medida. Esta pinza es llamada *pinza amperimétrica de medición* y se observa en la figura 30. El equipo de medición tiene 2 de éstas que utiliza en simultáneo en el método sin estacas, el cual se explicará más adelante.



Figura 30. Pinza amperimétrica del Probador de tierra 1623

Fuente: Página oficial de Fluke [25]

Debido a que en el método de caída de potencial se presenta el problema de que no hay manera de saber qué tanta corriente se induce en la *pica de inyección de corriente*, el método selectivo surge como solución, solventando el problema empleando una pinza amperimétrica y, por lo tanto, mejorando el método de caída de potencial.

Básicamente, la configuración del sistema de medición es la misma y hay que seguir las mismas recomendaciones para las distancias entre las picas y el *electrodo bajo prueba*, pero ahora se emplea una pinza amperimétrica. Esta pinza, denominada *pinza amperimétrica de medición*, es un transformador de corriente, el cual mide la corriente que fluye a través del punto del circuito en que se acople. De modo que si, por ejemplo, esta pinza se coloca en el *sistema de puesta a tierra*, medirá la corriente que fluye por él, lo mismo para la *toma de tierra*. Como consecuencia, este método no solo puede medir la resistencia de la *toma de tierra*, sino también del *sistema de puesta a tierra*, e incluso, la resistencia de la parte del circuito del sistema eléctrico que se desee conocer, siempre teniendo como referencia un punto distante con una caída de potencial de 0V (punto en que es enterrada la *pica de referencia de potencial*). Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el método anterior, un conector se acoplaba desde el terminal *E/C1* hasta el *electrodo bajo prueba* ya que era éste el elemento del cual se deseaba medir la diferencia de potencial, ahora, ese conector debe acoplarse al mismo punto del circuito en que se acopla la *pinza amperimétrica de medición* para que el

equipo mida la tensión en ese punto y, al aplicar la ley de Ohm, obtenga como resultado la resistencia del punto del circuito que se quería medir.

La *pinza amperimétrica de medición* debe conectarse al terminal 6 (de la figura 27), denotado con el símbolo . En el caso que, por ejemplo, se acoplara la pinza al *sistema de puesta a tierra*, el conector desde *E/C1* debe ir ahí también. Para el caso en que se acoplara al *electrodo bajo prueba*, cuando el equipo medidor determine la resistencia de la *toma de tierra*, ya no utilizará la corriente *I Measure* para determinarla, sino que utilizará *I Source*, obteniéndose un resultado de medición más exacto en comparación con el de caída de potencial. Del mismo modo para la resistencia del *sistema de puesta a tierra*, sin embargo, es necesario aclarar que cuando ésta se determina, debido a que el otro punto para el diferencial de potencial sigue siendo la *pica de referencia de potencial*, está incluida también la resistencia de la *toma de tierra*. Con el método de medición sin picas si puede medirse exclusivamente la resistencia del *sistema de puesta a tierra*. Si quisiera saberse esta resistencia con el método de medición selectiva, habría que hacer dos mediciones: la primera para determinar la resistencia desde el *sistema de puesta a tierra*, y la segunda de la *toma de tierra*. Finalmente, restando la primera con la segunda, se conseguiría determinarla.

Para terminar con éste método, quedaría la opción de medición de la posición 4. La medición de resistencia selectiva de 4 polos con pinza amperimétrica tiene la misma variante que la opción de la posición 2 para el método de caída de potencial: eliminar la influencia de las puntas de prueba para obtener un resultado más exacto. La configuración adicional es la misma nombrada para la posición 2.

Por último, está el método que hace particularmente especial al equipo, el de medición sin picas. El probador de tierra 1623 es de los pocos modelos en el mercado que lo emplean para determinar la *resistencia de tierra*. Para este método, se utilizan, únicamente, dos pinzas amperimétricas, la *pinza amperimétrica de medición* empleada en el método anterior, y la *pinza amperimétrica de generación*. Además, al igual que el último método explicado, no es necesario desconectar el *electrodo bajo prueba*.

La *pinza amperimétrica de generación* tiene un transformador que puede generar una tensión conocida con una frecuencia especial³⁰ en un punto cualquiera del circuito del sistema de distribución eléctrico. La corriente de generación siempre

³⁰ Según el fabricante, una frecuencia de 128 Hz.

irá hacia la *toma de tierra* para aterrizarse. La *pinza amperimétrica de medición*, al igual que en el método anterior, mide la corriente que fluye por el punto en que se haya acoplado. De modo que si, por ejemplo, se acopla la *pinza amperimétrica de generación* en el extremo superior del *electrodo bajo prueba*, y la *pinza amperimétrica de medición* en el extremo inferior, justo antes de la tierra³¹, el equipo utilizará la corriente que mide la *pinza amperimétrica de medición* y la tensión conocida generada por la *pinza amperimétrica de generación* para determinar, a través de la ley de Ohm, la resistencia de ese *electrodo bajo prueba*. Del mismo modo aplica para la medición de la resistencia del *sistema de puesta a tierra*, como puede notarse, esta vez sí puede medirse exclusivamente esta resistencia sin que se incluya en el resultado de la medición la de la *toma de tierra*. Esto se consigue si se acopla la *pinza amperimétrica de medición* antes del o de los electrodos de ésta, y la *pinza amperimétrica de generación* a la entrada del *sistema de puesta a tierra*. En general, se puede determinar la resistencia de cualquier sección del circuito del sistema de distribución eléctrico de ese modo.

La *pinza amperimétrica de generación* debe conectarse a los terminales *H/C2* y *E/C1*, mientras que la *pinza amperimétrica de medición*, al terminal 6. Tras presionar la tecla *START*, el equipo determina automáticamente la resistencia de la tierra, nuevamente, aplicando la ley de Ohm con los valores de tensión y corriente nombrados anteriormente.

Para terminar, las especificaciones básicas del Probador de tierra 1623, las cuales cambian de un método a otro, son las que se ven en la siguiente tabla:

Tabla 12. Especificaciones básicas del Probador de tierra 1623

Modo de Medición	Opciones	Rango de medición*	Resolución*	Error (% de lectura)
Caída de potencial	3 y 4 polos	(1) 0,001 - (2)19,99 kΩ	(1)0,001 - (2)10 Ω	5
Selectivo	3 y 4 polos	(1) 0,001 - (2)19,99 kΩ	(1)0,001 - (2)10 Ω	10
Sin picas	4 polos	(1) 0,001 - (2)199,9 Ω	(1)0,001 - (2)0,1 Ω	10
* Los número (1) y (2) son rangos automáticos del instrumento, por eso, un valor individual para cada uno				

Fuente: Manual de usuario del equipo [22]

5.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ACEPTACIÓN

-Las Pruebas de Funcionamiento y Aceptación, son aquellas que se deben hacer a

³¹ Superficie o suelo del terreno.

los equipos e instrumentos para validar y comprobar que han llegado desde fábrica cumpliendo con su funcionamiento básico. Cumplir con el funcionamiento básico se refiere a que el encendido, el apagado y las opciones de medición, generación o indicación de cada equipo o instrumento no tengan ningún problema. Aunque en estas pruebas no se evalúa el desempeño metrológico de estos para verificar que las especificaciones son las prometidas, también debe realizarse una evaluación de las mismas.

Además, no debe confundirse pruebas de funcionamiento y aceptación con pruebas de calibración ya que no hay una comparación con un patrón de referencia. Sin embargo, las pruebas de calibración se le harán más adelante a los instrumentos y equipos de medición para determinar si requieren o no ajuste. Este proceso de calibración no hizo parte de las actividades realizadas.

Las pruebas de funcionamiento y aceptación deben llevarse a cabo inmediatamente después de recibir los equipos e instrumentos para ponerse en contacto con el proveedor o proveedores en caso de algún error o falla.

5.2.1 Desarrollo de las Pruebas de Funcionamiento y Aceptación

El desarrollo de estas pruebas se llevó a cabo en el Laboratorio de Calibración y Ensayos del CDT de Gas. Para las magnitudes temperatura y presión, se probaron todos los equipos e instrumentos que las conciernen en un único sistema de prueba ya que el sistema realizado así lo permitía. Para magnitudes eléctricas, por el contrario, se comprobó el funcionamiento uno a uno.

5.2.1.1 Presión

Antes de ejecutar esta prueba se realizó la presurización del cilindro interno del generador de presión neumática Condec Source 3000. El manual especifica una serie de pasos para hacerlo³². Este procedimiento fue llevado a cabo por el Ing. Jhonattan Fredy Moreno Bernal.

Una vez presurizado el cilindro interno se realizó la prueba. El sistema de presión fue el siguiente:

³² Pág. 7 del manual del instrumento, en el numeral 2.1, *Pressure Cylinder Filling*.



Figura 31. Diagrama del sistema de presión.

Fuente: Autor

Donde:

1. Equipo generador: Condec Source 3000
2. Instrumento medidor: Módulo de presión Fluke
3. Instrumento indicador: Multicalibrador 754 Fluke

Para el acople de los módulos de presión, Fluke recomienda, para evitar daños mecánicos, una manera de realizar el acople del cuerpo del módulo con los conectores. La figura 32 muestra, a la izquierda, la manera correcta de realizar el acople, mientras que, en el medio y la derecha, las incorrectas.

Se conectó el módulo de presión directamente al *Port1* del Condec Source 3000 y su cable de salida al Multicalibrador 754. Al tener listo el montaje del sistema de presión, se procedió a realizar la prueba de funcionamiento y aceptación. Se probó módulo por módulo, empezando con el 700P05. El procedimiento fue el siguiente:

1. Elevar, lentamente, la presión a través de la perilla *Coarse Adjustment* del generador hasta abarcar casi todo el rango de medición del módulo, no todo para evitar sobrepresurizarlo.
2. Verificar que el Multicalibrador 754 indica e incrementa su valor paulatinamente.
3. Despresurizar el sistema a través de la perilla *VENT*.

4. Desmontar el módulo de presión y montar el siguiente.
5. En caso de haber realizado la prueba con los 3 módulos de presión, pasar al siguiente paso, sino, realizar los mismos pasos anteriores con el nuevo módulo.
6. Desmontar y bodegar todos los elementos del sistema de presión.

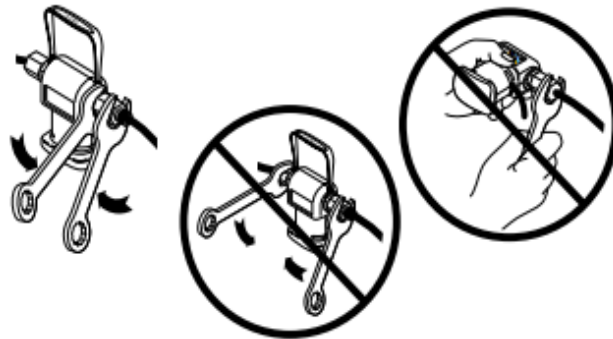


Figura 32. Recomendación de acoplamiento para los módulos de presión
Fuente: Instrucciones de los módulos de presión [12]

5.2.1.2 Temperatura

El sistema de temperatura fue el siguiente:



Figura 33. Diagrama del sistema de temperatura
Fuente: Autor

Donde:

1. Instrumento Generador: Bloque Seco 9142 Fluke
2. Transductor: 2 RTDs 5609 Fluke
3. Instrumento Indicador: Termómetro 1524 Fluke

Adicional a lo que se ha dicho de los elementos de este sistema de temperatura, las RTDs tiene un acople cilíndrico y pequeño que les permite aislar térmicamente la temperatura ambiente y la del inserto. Éste acople está hecho de un material especial y se debe poner en el cuerpo de las RTDs, justo antes del inserto.

Una vez realizado el montaje del sistema de temperatura con el material aislante en el cuerpo de la RTD, el procedimiento fue el siguiente:

1. Configurar el *set-point* del bloque seco a -25°C .
2. Una vez estabilizado, dejar ahí por 5 min y verificar las indicaciones arrojadas por el termómetro.
3. Modificar el *set-point* del bloque seco a 20°C .
4. Una vez estabilizado, dejar ahí por 5 min y verificar las indicaciones arrojadas por el termómetro.
5. Modificar el *set-point* del bloque seco a 100°C .
6. Una vez estabilizado, dejar ahí por 5 min y verificar las indicaciones arrojadas por el termómetro.
7. Llevar al Span (150°C) el bloque seco.
8. Una vez estabilizado, dejar ahí por 5 min y verificar las indicaciones arrojadas por el termómetro.
9. Llevar a temperatura ambiente por recomendación.
10. Desmontar y bodegar los elementos del sistema.

Durante la prueba se notó una característica del bloque seco que ya había sido nombrada: al llegar a $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ alrededor del valor seteado, el instrumento emite un sonido agudo o alarma. Adicional a esto, en la pantalla principal muestra una línea ondulada mientras se acerca al *set-point* y, al llegar al mismo o a $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ su valor, se hace una línea recta, simbolizando estabilización.

Una vez bodegados los elementos del sistema de medición, se procedió a verificar el funcionamiento de los instrumentos empleados para magnitudes eléctricas.

5.2.1.3 Magnitudes Eléctricas

Para estas pruebas, se comprobó el funcionamiento de los equipos e instrumentos magnitud por magnitud del siguiente modo:

Medición e indicación:

1. Medición de Tensión DC: Se utilizó una batería tipo C. Con ésta se probaron el multicalibrador 754, el osciloscopio 123 y el multímetro y probador de aislamiento 1587.
2. Medición de Tensión AC: Se utilizó un tomacorriente para la prueba. Se probaron el multicalibrador 754, el osciloscopio 123 y el multímetro y probador de aislamiento 1587.
3. Medición de Corriente AC: Se utilizó un generador eléctrico y una resistencia de precisión de la sala de magnitudes eléctricas con lo que se probaron el osciloscopio 123, el multicalibrador 754 y el multímetro y probador de aislamiento 1587.
4. Medición de Corriente DC: Se utilizó un generador eléctrico y una resistencia de precisión de 100 Ω de la sala de magnitudes eléctricas. Con lo que se probaron el termómetro 123, el multímetro y probador de aislamiento y el multicalibrador 754.
5. Medición de Frecuencia: Se utilizó el tomacorriente. Se probaron el multicalibrador 754, el multímetro y probador de aislamiento 1587 y el osciloscopio 123.
6. Medición de resistencia: Se utilizó una resistencia de precisión 100 Ω . Se probaron el multicalibrador 754, el multímetro y probador de aislamiento 1587 y el osciloscopio 123.
7. Continuidad: Se utilizaron las puntas de los instrumentos y caimanos del laboratorio para comprobarlo.
8. Medición de diodo: Se utilizó un diodo. Se probaron multicalibrador 754, el multímetro y probador de aislamiento 1587 y el osciloscopio 123.
9. Medición de temperatura: El multímetro y probador de aislamiento 1587 trae un termopar tipo k. Se comprobó la temperatura ambiente con él.

Además de lo nombrado, durante todas las pruebas se revisó, para el osciloscopio 123, que siempre estuviera graficando los valores medidos de voltaje, corriente y frecuencia.

Generación e indicación:

Como ya se había dicho, el único equipo de magnitudes eléctricas capaz de generar es el multicalibrador. No solo eso, sino que es capaz de medir y, simultáneamente, generar. Para eso, el botón llamado *Measure/Source*, al ser presionado tres veces, se configura para hacer ambas cosas a la vez.

1. Generación e indicación de Tensión DC: Como el multicalibrador cuenta con dos salidas específicas para generación y dos para medición, se conectaron las salidas a las entradas y, en un principio, así se comprobó. Sin embargo, para garantizarlo de otro modo, se utilizó el osciloscopio 123 para la medición de tensión que estaba generando el multicalibrador y la batería tipo C para medirle la tensión.
2. Generación de Corriente DC: Para esto se armó un circuito con una resistencia y un led. Cuando el led encendió, se comprobó su capacidad de generación de corriente.
3. Generación de Frecuencia: Se continuó con el circuito del led y tras comprobar que se encendía y se apagaba periódicamente, se comprobó su funcionamiento.

Prueba de Resistencia de Aislamiento:

Como se dijo, el único instrumento capaz de realizar la prueba de resistencia de aislamiento es el Multímetro y Probador de Aislamiento 1587. Para esta prueba, se utilizaron 2 generadores eléctricos del laboratorio de ensayos y calibraciones.

Para realizarla, se colocaron las puntas del instrumento en las salidas del generador eléctrico. Se comprobó que ninguno de ellos estuviera energizado y se dio inicio a la prueba. Fue necesario presionar el botón *INSULATION TEST* del instrumento y se verificó que indicaba un valor en GΩ. Lo mismo se hizo para el 2do generador arrojando los mismos resultados.

Prueba de Resistencia de Tierra:

Como se indicó, el único instrumento del módulo de magnitudes secundarias capaz de realizar la medición de la *resistencia de tierra* es el Probador de Tierra 1623 Fluke. Para ésta, el manual del usuario del instrumento provee circuitos diseñados específicamente para realizarla. El siguiente procedimiento (puede verse también en la figura 34) fue probado en el laboratorio de calibración y

ensayos del CDT de Gas:

Medición de la resistencia del *sistema de puesta a tierra* empleando el método de medición sin picas³³: [22]

1. Seleccione la función .
2. Conecte las pinzas amperimétricas:
 3. La pinza de inducción a los terminales *H/C2* y *E/C1*.
 4. La pinza de detección al terminal  usando el cable adaptador.
5. Coloque las pinzas amperimétricas alrededor del *sistema de puesta a tierra* a medir. Estas deben estar separadas, como mínimo, 10 cm.
6. Pulse *START* y empezará la medición. Manténgalo pulsado para una medición continua.
7. Al mostrarse “✓”, habrá finalizado la medición.

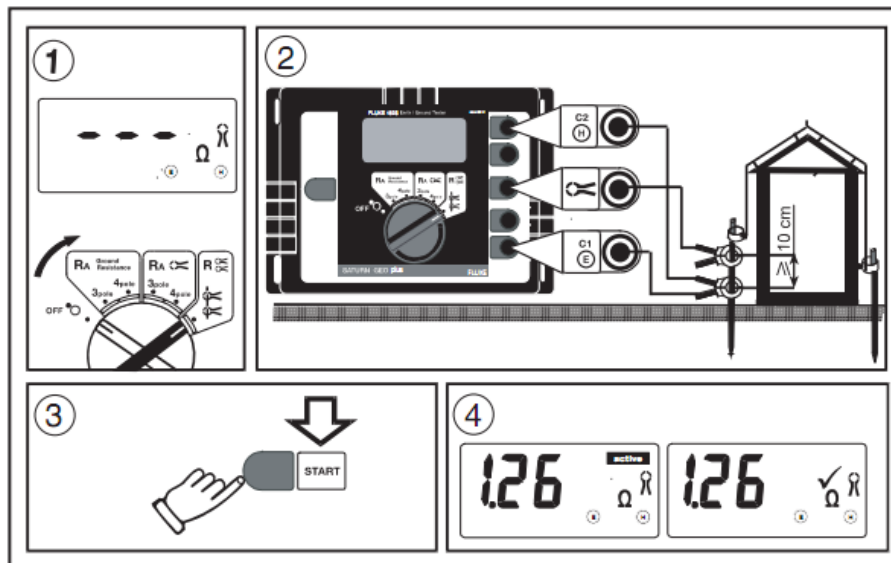


Figura 34. Configuración para realizar la medición de toma a tierra
Fuente: Manual del usuario del instrumento [22]

Tras esperar por unos segundos y verificar que el instrumento indicaba un valor de 0.8Ω en su pantalla, se dio por finalizada la prueba.

³³ Pág. 12 y pág. 13 del manual de usuario del instrumento

5.2.2 Conclusión pruebas de funcionamiento y aceptación

Tras las pruebas de funcionamiento y aceptación realizadas, se concluyó que todos los equipos e instrumentos del módulo de magnitudes secundarias cumplían con su funcionamiento básico y, por lo tanto, no era necesario contactarse con el proveedor para alguna inconformidad. En especial, sorprendió la facilidad de uso de cada uno de ellos.

Ya terminada esta prueba, se pudo proseguir a las pruebas de calibración para evaluar metrológicamente los instrumentos de medición e indicación de cada subgrupo de magnitudes del módulo de magnitudes secundarias (Presión, Temperatura y Mag. Eléctricas), comparándolos con instrumentos patrones de referencia del Laboratorio de Calibración y Ensayos.

Por necesidad de acelerar procesos para cumplimiento de fechas programadas con la entrega del proyecto, se encargaron las pruebas de calibración de los instrumentos a los profesionales de calibración y ensayos con que cuenta el CDT de Gas.

5.3 PRUEBAS FAT (FACTORY ACCEPTANCE TEST)

Tras las pruebas de calibración de los instrumentos del módulo de magnitudes secundarias, se continuó con la evaluación del desempeño metrológico de los mismos. En estas pruebas, se evaluaron específicamente los equipos e instrumentos involucrados con las magnitudes presión y temperatura.

Para lograr lo mencionado, se decidió que la prueba FAT, para cada magnitud, constara de 2 partes. Para presión, la primera parte, sería realizada en el Laboratorio de Calibración y Ensayos del CDT de Gas y, la segunda, fuera del mismo, pero al lado de él. De este modo, el comportamiento metrológico de los equipos e instrumentos sería evaluado bajo condiciones ambientales controladas (primera parte) y bajo condiciones ambientales variables (segunda parte). Para temperatura, la prueba sólo se realizaría bajo condiciones de temperatura variables pero también constaría de 2 partes, la primera, con una inmersión total de las 2 RTDs en el inserto del bloque seco y, la segunda, una de las RTDs tendría una inmersión parcial respecto a la inmersión total. Más adelante se entrará más detalladamente a las condiciones de las pruebas.

Realizadas las pruebas y los análisis de los datos, se podrá hacer una intercomparación entre las dos pruebas de cada magnitud que nos acercaría más verazmente a la respuesta de la pregunta: ¿Cumplen los equipos e instrumentos con las especificaciones del fabricante? Y no sólo eso, ya que también se tendrían indicios de cuál podría ser el desempeño de los mismos en campo.

5.3.1 Qué son las Pruebas FAT? [26]

Son pruebas que verifican que los equipos e instrumentos recibidos funcionan de acuerdo con las especificaciones. Las pruebas de aceptación se realizan de acuerdo con procedimientos específicos, definidos por quien las realiza. Al participar en un proceso de prueba de aceptación, se puede obtener un conocimiento más profundo acerca de cómo funcionan.

El propósito de la prueba de aceptación en fábrica (FAT) es evaluar el desempeño metrológico de los equipos e instrumentos y determinar si hay conformidad entre los resultados obtenidos y las especificaciones dadas por el fabricante que quieran evaluarse.

5.3.2 Diseño de la plantilla de registro de datos

El diseño de las plantillas fue realizado bajo la supervisión del Ing. Jhonattan Fredy Moreno Bernal. El propósito de éstas fue evaluar específicamente algunas características de los equipos e instrumentos.

Se decidió hacer un registro de la variación de la temperatura ambiente en el decurso de la prueba para observar su influencia en los resultados. Un medidor multivariable Kestrel [28] (tomado del Lab. de Calibraciones y Ensayos) fue el utilizado para la medición y registro de valores ambientales durante las pruebas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñó una plantilla de datos para cada magnitud que se mostrará más adelante, cuando se profundice específicamente en cada prueba.

5.3.3 Prueba de Presión³⁴

El sistema de presión utilizado para realizar las pruebas fue el mostrado en la siguiente figura:

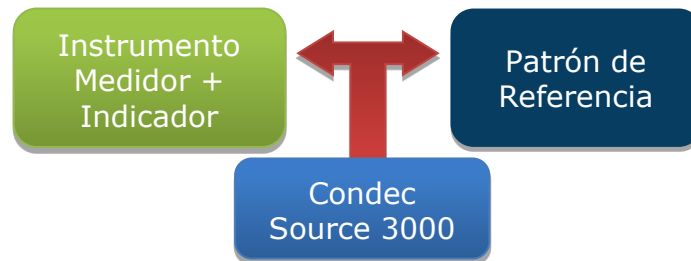


Figura 35. Diagrama del sistema de presión para pruebas FAT
Fuente: Autor

Para empezar, el patrón de referencia utilizado fue el medidor e indicador de presión PC-507 Presys [28], disponible en el Laboratorio de Calibración y Ensayos del CDT de Gas y escogido debido a sus características metrológicas.

Se llama *Medidor + Indicador* a la unión conformada por el módulo de presión correspondiente y, en este caso, un software de adquisición de datos instalado en un PC. Se decidió utilizar un software como interfaz para la indicación ya que éste permite una resolución mayor a la del Multicalibrador 754:

Tabla 13. Resolución con el software

Módulo de Presión	Rango de medición (psig)	Resolución con Multicalibrador 754 (psig)[29]	Resolución con el software ³⁵ (psig)
700P05	0-30	0.001	0,00001
700P27	0-300	0.01	0,0001
700P09	0-1500	0.1	0,001

Fuente: Autor

³⁴ Durante la prueba de presión, el estudiante fue direccionado a través de las siguientes normas: NTC 5152 de 2011, NTC 4494 de 1998 y OIML R-84 de 2003. Si bien no todas son específicamente para los instrumentos tratados, ayudan a lo que, en un plano general, se necesita: llevar a cabo una buena práctica metrológica.

³⁵ La resolución con el software que se presenta en la tabla fue determinada experimentalmente.

El Condec Source 3000 es quien suministra aire para generar presión neumática. Esta vez, no hubo necesidad de presurizarlo pues con lo que contenía desde las pruebas de funcionamiento y aceptación era suficiente.

El software hace parte del *700PCK Pressure Module Calibration Kit* [30]. El kit cuenta con una interface a la que debe conectarse el cable de salida del módulo y, a su vez, la interface cuenta con una salida serial para ser conectada a un PC. La figura 36 muestra el diagrama empleado.

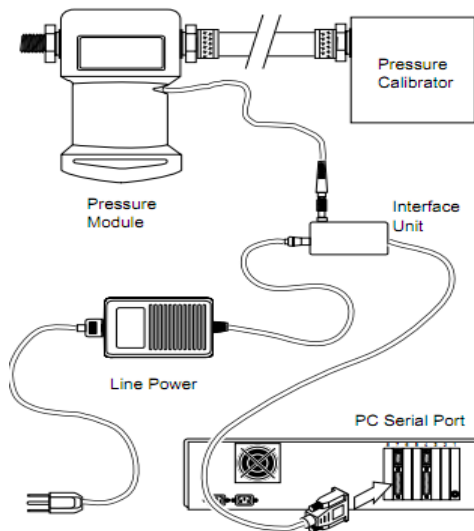


Figura 36. Diagrama del kit de interface
Fuente: Página oficial de OBIAT [31]

5.3.3.1 Plantilla de datos para Presión

La plantilla se diseñó con el propósito de, al analizar los datos, evaluar lo siguiente:

- Estabilidad del sistema de presión.
- Módulos de presión 700P05, 700P27 y 700P09: Histéresis.

Basado en esos criterios y bajo la supervisión del Ing. Jhonattan Fredy Moreno Bernal, se decidió que el formato contara con lo siguiente:

1. Ascenso y Descenso: La prueba, para cada módulo de presión, se divide en

dos partes o secuencias, ascenso y descenso. En el ascenso, la presión del sistema se va subiendo manual y lentamente partiendo desde 0 psig hasta llegar al límite superior del rango de medición del instrumento. En el descenso, se hace lo mismo que en ascenso pero se parte desde el límite superior del rango de medición del instrumento (en donde termina el ascenso) y se va despresurizando el sistema hasta llegar a 0 psig.³⁶

2. 10 *set-points*³⁷ distribuidos uniformemente: Para cada parte o secuencia de la prueba, es decir, en ascenso y en descenso, se establecen 4 *set-points* más (+) el Cero (0 psig). Es decir, que en total, se establecieron 8 *set-points* más (+) el cero en ascenso y el cero en descenso. Los *set-points* han sido seleccionados teniendo como referencia la tabla 14.

Tabla 14. Recomendación según la *clase del instrumento*

Clase del instrumento	Mínimo número de <i>set-points</i> de prueba (sin contar el Cero)
Precisión $\leq 0,5$ %FS	8
Precisión $> 0,5$ %FS	6

Fuente: Base de datos CDT de Gas

Además, *set-points* deben estar distribuidos uniformemente a lo largo del rango de medición del instrumento: 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en ascenso y 100%, 75%, 50%, 25% y 0% en descenso.

3. En cada *set-point*, se registrarán 5 datos: Dos simultáneamente en $t = 0s$ ³⁸: uno del patrón de referencia y otro de la indicación del software de interfaz. Los otros tres datos se tomarán de la indicación del software a los 5, 15 y 30 segundos después de $t=0s$, con el fin de evaluar estabilidad del sistema de presión.
4. Temperatura ambiente mínima y máxima durante la prueba: el medidor multivariable o Kestrel, tiene una función capaz de almacenar los valores mínimos y máximos de temperatura.
5. Observaciones, si las hay.

³⁶ El ascenso y descenso también pueden ser a lo largo de un intervalo de interés dentro del rango de medición del instrumento.

³⁷ Valores deseados o puntos de prueba.

³⁸ $t = 0s$ es cuando la indicación del patrón, en ascenso o en descenso, muestra, mientras se acercaba lentamente con el Condec Source 3000, el valor deseado.

La plantilla se agregará al documento más adelante, al mostrar los resultados obtenidos.

5.3.3.2 Procedimiento para el registro de datos

Como ya se ha dicho antes, la prueba se dividirá en 2 partes, una dentro del Laboratorio de Calibración y Ensayos del CDT de Gas (condiciones ambientales controladas) y otra fuera del mismo (condiciones ambientales variables). Sin embargo, el procedimiento para el registro de datos será el mismo para ambas pruebas y para cada uno de los módulos de presión dentro de cada prueba:

1. Iniciar el registro de datos de temperatura en el Kestrel.
2. Presurizar el sistema hasta el límite superior del rango de medición del módulo de presión con que se esté ejecutando la prueba.
3. Revisar la hermeticidad del sistema: con un detector de fugas (espuma de agua con jabón), revisar las partes del sistema en que se acoplan accesorios e instrumentos. También puede apreciarse en la estabilidad de la indicación de los instrumentos.
4. Si se generan burbujas en los acoples o se aprecia inestabilidad en las indicaciones, afianzar las conexiones del sistema.
5. Una vez verificada la hermeticidad del sistema, despresurizar el mismo a través de la válvula *VENT* del Condec Source 3000.
6. Despresurizado el sistema, realizar el ajuste a cero (0 psig) tanto en el módulo bajo prueba (el software de interfaz lo permite) como en el patrón de referencia (un botón en particular lo permite). Este ajuste siempre es necesario antes de iniciar cualquier prueba para sistemas de presión.
7. Una vez realizado el ajuste, proceder al registro de los primeros valores para cada *set-point* tal y como se explicó: simultáneamente entre la indicación del patrón y el software de interfaz en $t = 0s$. Después, sólo para la indicación en el software de interfaz, a los 5, 15 y 30 seg.
8. Anotar las observaciones si las hay.
9. La primera parte de la prueba para cada módulo siempre será la de ascenso: Acercarse lentamente hasta el *set-point* deseado. Debe realizarse cuidadosamente para evitar presurizar el sistema más allá del valor al que se desea llegar. No es recomendable despresurizar el sistema mientras se realiza la prueba en ascenso ya que sólo debe haber una tendencia (ascendente) durante la prueba. Lo mismo, pero al contrario, cuando se realiza la prueba en descenso y se despresuriza el sistema (tendencia

descendente).

10. Proceder inmediatamente, al llegar a la presión deseada, con el registro de datos mencionados en 6 y 7.
11. Seguir con los *set-points* especificados en el formato procediendo, en cada uno, como se explicó anteriormente.
12. Una vez terminada la parte de la prueba en ascenso, proceder con la parte de la prueba en descenso. En el intercambio entre la una y la otra, hay un *set-point* común: el límite superior del rango de medición del instrumento. En este intercambio, se procede de la siguiente manera: se presuriza el sistema un poco por encima de este límite (5 psig o menos) y, una vez allí, se espera, como mínimo, 5 minutos y se desciende lentamente hasta llegar nuevamente al límite superior del rango de medición del instrumento o a un valor cercano a éste.
13. Al llegar al límite superior del rango de medición o a un valor cercano a éste, proceder con el registro de datos.
14. Continuar con los siguientes *set-points* de la prueba hasta terminar con la secuencia en descenso.
15. Despresurizar el sistema.
16. Anotar en el formato los valores de temperatura mínimo y máximo registrados por el medidor multivariable Kestrel.
17. Cambiar el módulo de presión bajo prueba por otro que aún no la haya realizado y repetir todos los pasos anteriores. Si el procedimiento se ha realizado con los 3 módulos de presión, se da por concluida la prueba.
18. Desmontar y bodegar los elementos del sistema de presión

5.3.3.3 Resultado de prueba bajo temperatura controlada

Debido a las exigencias de simultaneidad requeridas al tomar los datos, esta prueba se realizó con la ayuda del estudiante en práctica Héctor Salazar. Tras seguir el procedimiento nombrado, los resultados obtenidos, para cada módulo de presión, fueron los mostrados en las Tablas 15, 16 y 17.

Tabla 15. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P05

Temperatura mínima	19,6°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	20,6°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
					5 s	15 s	30 s
Módulo 30 psig	ASCENSO	0,0	0,00000	0,00000	-0,00003	-0,00004	0,00000
		7,5	7,50800	7,50390	7,50374	7,50360	7,50349
		15,0	15,00900	15,00300	15,00130	15,00070	15,00033
		22,5	22,52600	22,50690	22,50490	22,50410	22,50310
		30,0	30,03200	30,01970	30,01870	30,01790	30,01680
	DESCENSO	30,0	30,01400	30,00160	30,00040	29,99910	29,99570
		22,5	22,51600	22,50780	22,50795	22,50817	22,50805
		15,0	15,00800	15,00320	15,00308	15,00315	15,00240
		7,5	7,50700	7,50660	7,50700	7,50790	7,50870
		0,0	-0,00200	0,00019	0,00014	0,00010	0,00005
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

Tabla 16. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P27

Temperatura mínima	19,9°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	20,1°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
		5 s			15 s	30 s	
Módulo 300 psig	ASCENSO	0	0,0000	0,0002	0,0005	-0,0005	-0,0002
		75	74,9600	75,0040	75,0045	75,0034	75,0048
		150	149,9300	150,0006	149,9960	149,9932	149,9915
		225	224,9900	225,0519	225,0485	225,0465	225,0420
		300	289,9700	290,0250	290,0200	290,0075	290,0000
	DESCENSO	300	299,9500	300,0300	300,0075	299,9920	299,9755
		225	224,9200	225,0055	225,0030	225,0027	225,0027
		150	149,9200	150,0030	150,0055	150,0110	150,0220
		75	74,9600	75,0150	75,0225	75,0275	75,0365
		0	0,0100	-0,0041	-0,0044	-0,0055	-0,0055
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

Tabla 17. Resultados obtenidos bajo condiciones controladas módulo 700P09

Temperatura mínima	19,6°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	19,9°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
					5 s	15 s	30 s
Módulo 1500 psig	ASCENSO	0	-0,0300	-0,0019	-0,0031	-0,0016	-0,0013
		375	375,0600	375,0026	375,0015	375,0055	375,0005
		750	750,0900	749,9993	749,9957	749,9978	750,0086
		1125	1125,1800	1125,0017	1125,0003	1124,9897	1124,9692
		1500	1500,1600	1499,9889	1499,9683	1499,9527	1499,9323
	DESCENSO	1500	1500,1200	1499,9857	1499,9641	1499,9497	1499,8457
		1125	1125,1400	1125,0063	1124,9965	1124,9815	1124,9624
		750	750,1200	750,0011	750,0135	750,0343	750,0586
		375	375,0700	375,0032	375,0062	375,0263	375,0478
		0	0,0100	0,0063	0,0052	0,0054	0,0053
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

5.3.3.4 Resultado de prueba bajo temperatura variable

Debido a las exigencias de simultaneidad requeridas al tomar los datos, esta prueba se realizó con la ayuda del estudiante en práctica Héctor Salazar. Además, resta por decir que, durante la prueba, el patrón de referencia se mantuvo dentro del laboratorio de calibración y ensayos del CDT de Gas mientras que, tanto los módulos de presión como el Condec Source 3000, estuvieron fuera del mismo. Tras seguir el procedimiento nombrado, los resultados obtenidos, para cada módulo de presión, fueron los mostrados en las Tablas 18, 19 y 20.

Tabla 18. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P05

Temperatura mínima	28,7°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	31,5°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
					5 s	15 s	30 s
Módulo 30 psig	ASCENSO	0,0	0,00200	0,00020	0,00010	0,00009	0,00002
		7,5	7,71500	7,70891	7,73889	7,77106	7,80733
		15,0	16,09500	16,07114	16,19062	16,27176	16,41767
		22,5	22,17700	22,16427	22,42067	22,73790	23,20422
		30,0	30,39300	30,39305	30,35946	30,29520	30,22454
	DESCENSO	30,0	30,00000	29,98867	29,99401	29,98093	29,91515
		22,5	22,44800	22,44312	22,44248	22,44110	22,43944
		15,0	14,95100	14,94907	14,94902	14,94846	14,94400
		7,5	7,46100	7,46132	7,46058	7,45890	7,45704
		0,0	-0,00200	0,00006	0,00008	0,00008	0,00007
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

Tabla 19. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P27

Temperatura mínima	30,4°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	33,1°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
					5 s	15 s	30 s
Módulo 300 psig	ASCENSO	0,0	0,0000	0,0047	0,0044	0,0042	0,0041
		75	76,8000	76,9667	76,6824	76,4606	76,2044
		150	149,5400	149,5664	150,2264	151,2462	151,2462
		225	230,3600	230,5944	230,6072	230,6518	230,7342
		300	300,5600	300,7545	301,7138	302,3282	303,3264
	DESCENSO	300	296,7000	296,9353	296,9341	296,9314	296,9250
		225	216,5700	217,0295	216,7315	216,5090	216,3801
		150	144,0100	144,2723	144,0437	144,2985	144,2937
		75	76,4300	76,7113	76,6247	76,5003	76,3816
		00	-0,2100	0,0204	0,0194	0,0180	0,0166
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

Tabla 20. Resultados obtenidos bajo condiciones variables módulo 700P09

Temperatura mínima	30,4°C	VALOR DESEADO [psig]	Puntos de prueba [psig]				
Temperatura máxima	33,5°C		Instrumento Patrón	Instrumento Bajo Prueba			
INSTRUMENTO	PRUEBA			Lectura Inicial	Valores en el tiempo (Estabilidad)		
					5 s	15 s	30 s
Módulo 1500 psig	ASCENSO	0,0	0,0100	0,0049	0,0060	0,0084	0,0060
		375	376,6100	376,5874	376,2826	376,5580	376,4884
		750	750,0300	749,8278	749,9098	750,0846	750,3017
		1125	1128,8100	1128,3899	1128,5693	1128,7777	1128,8642
		1500	1500,2400	1499,9325	1499,9908	1500,0786	1500,2002
	DESCENSO	1500	1502,3900	1501,1648	1501,1688	1501,2020	1501,2763
		1125	1122,4600	1122,2585	1122,2699	1122,3012	1122,3662
		750	751,7800	751,9566	751,7910	752,0141	752,1268
		375	372,8000	372,7967	372,7713	372,8922	372,9631
		0,0	-0,0400	0,0111	0,0107	0,0102	0,0054
OBSERVACIONES: No hay observaciones							

Fuente: Autor

5.3.3.5 Análisis de resultados

Los análisis de datos mostrados en las figuras 37 a 46, han sido realizados teniendo en cuenta que los parámetros que quisieron evaluarse fueron los siguientes:

- Estabilidad del sistema de presión.
- Módulos de presión 700P05, 700P27 y 700P09: Histéresis.

Para los análisis de resultados se muestran cinco figuras (tanto en la prueba bajo condiciones controladas como en la prueba bajo condiciones variables): dos para analizar estabilidad del sistema y tres para analizar la histéresis de los módulos.

Las figuras 37 y 38 corresponden a las de análisis de estabilidad del sistema de la prueba bajo condiciones controladas, mientras que, las 42 y 43 lo son para la prueba bajo condiciones variables. En estas figuras se muestran tres líneas de diferente color, cada una designada según la desviación de la indicación en el tiempo que representan para un intervalo de tiempo. De modo que se muestran las desviaciones a los 5 segundos (azul), a los 15 segundos (roja) y a los 30

segundos (verde). Para obtener estas desviaciones se aplicó lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Desviación indicación en } 5s &= (\text{Indicación en } t = 5s) - (\text{Indicación en } t = 0s) \\ \text{Desviación indicación en } 15s &= (\text{Indicación en } t = 15s) - (\text{Indicación en } t = 0s) \\ \text{Desviación indicación en } 30s &= (\text{Indicación en } t = 30s) - (\text{Indicación en } t = 0s) \end{aligned}$$

De manera general:

$$\text{Desviación indicación } T = (\text{Indicación en } T) - (\text{Indicación en } t = 0s) \quad (\text{Ec.9})$$

Donde T = tiempo que representa el intervalo.

Se tomó como referencia la indicación en $t = 0s$ ya que este valor se asume, al ser el punto de inicio para el intervalo de 30 segundos, como aquel que tiene una desviación de 0 psig. De modo que, al graficar los valores obtenidos de las desviaciones, se puede observar en las tendencias, tanto en acenso como en descenso, qué tanto varía la indicación a lo largo de la prueba.

Además de lo nombrado, se utilizará la *clase del instrumento* para evaluar la estabilidad del sistema. En la tabla 4, se pueden observar los valores de los máximos errores esperados obtenidos a partir de la *clase del instrumento*. De modo que se comparará la máxima desviación de indicación de presión (respecto a $t = 0s$) con el máximo error esperado. Esta comparación se realiza con el fin de evaluar rigurosamente la estabilidad del sistema de presión ya que si después de 30 segundos la desviación de la indicación de presión es menor que el máximo error esperado, se garantiza que el sistema de presión es lo suficientemente estable para mantener los módulos de presión *dentro de clase* y, en general, que sea compatible con las características metrológicas de estos.

Para el análisis de histéresis de los módulos de presión, se tienen las figuras 39, 40 y 41 para la prueba bajo condiciones ambientales controladas, y las 44, 45 y 46 para la prueba bajo condiciones ambientales variables. En cada una de estas figuras se observan dos líneas, una azul y una roja, que representan los valores de la desviación de indicación en ascenso y en descenso respectivamente, para un mismo intervalo de tiempo después de $t = 0s$. Esto permitirá observar qué tanta diferencia hay entre las indicaciones de presión durante el ascenso y durante el descenso.

5.3.3.6 Análisis de resultados bajo condiciones ambientales controladas

Debido a que el comportamiento de la desviación de indicación de presión fue similar para los tres módulos y, por lo tanto, también las figuras destinadas al análisis de histéresis, se mostrarán las figuras correspondientes a un solo módulo de presión, el 700P05, de modo que su análisis agrupe el de los otros dos.

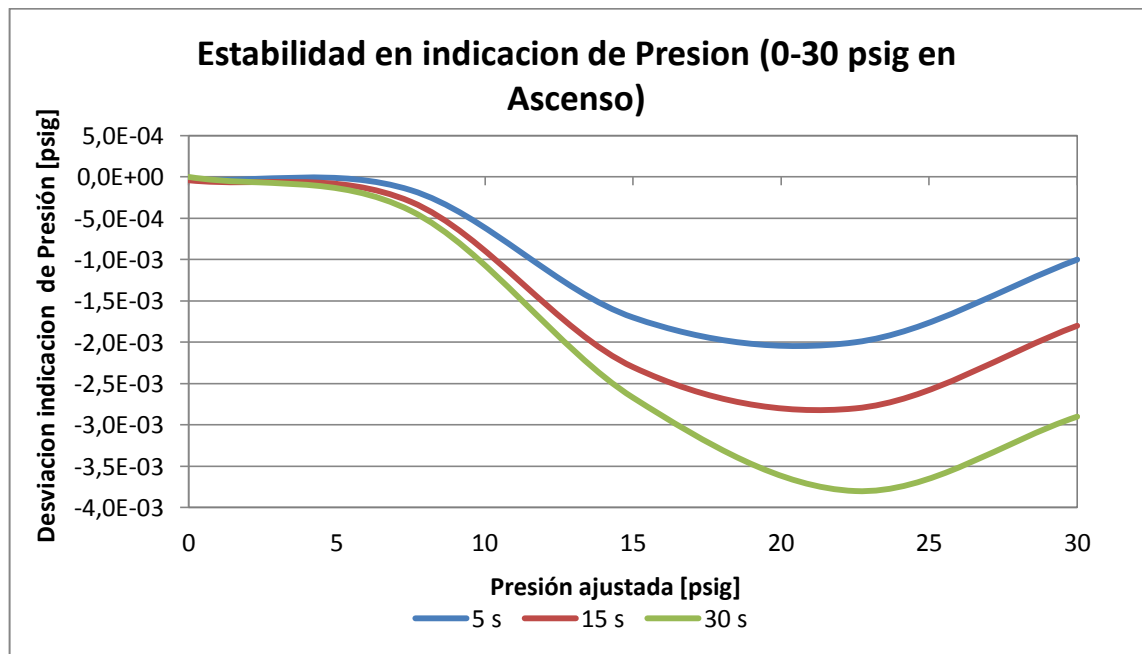


Figura 37. Estabilidad del sistema con el módulo 700P05
Fuente: Autor

La figura 37, que corresponde a la desviación de indicación de presión durante el ascenso, muestra claramente que a medida que transcurría el tiempo, la desviación se hacía cada vez mayor. Puede verse que desde 0 psig hasta 12,5 psig, el sistema tiende a estabilizarse ya que la diferencia entre las indicaciones es, a medida que transcurre el tiempo, cada vez menor, mientras que, desde 12,5 psig hasta 30 psig, el sistema, por el contrario, aumenta la diferencia a medida que transcurre el tiempo.

Además, se aprecia que es, aproximadamente, en 22,5 psig cuando se obtiene la mayor desviación de indicación de presión y es el punto en que la desviación

aumenta proporcionalmente con el tiempo. De modo que puede decirse que, en ascenso, entre el 75% y el 100% del rango de medición del módulo, es cuando el sistema presenta la mayor inestabilidad, obteniéndose un valor máximo de desviación de, aproximadamente, $3,8\text{E-}03$ psig. Si se compara este valor con el máximo error esperado para el módulo 700P05, el cual tiene un valor de $7.5\text{E-}03$ podemos decir que, en ascenso, el sistema tiene un comportamiento muy estable y que debería esperarse, una vez se llega al valor deseado, unos 15 segundos para el registro de datos.

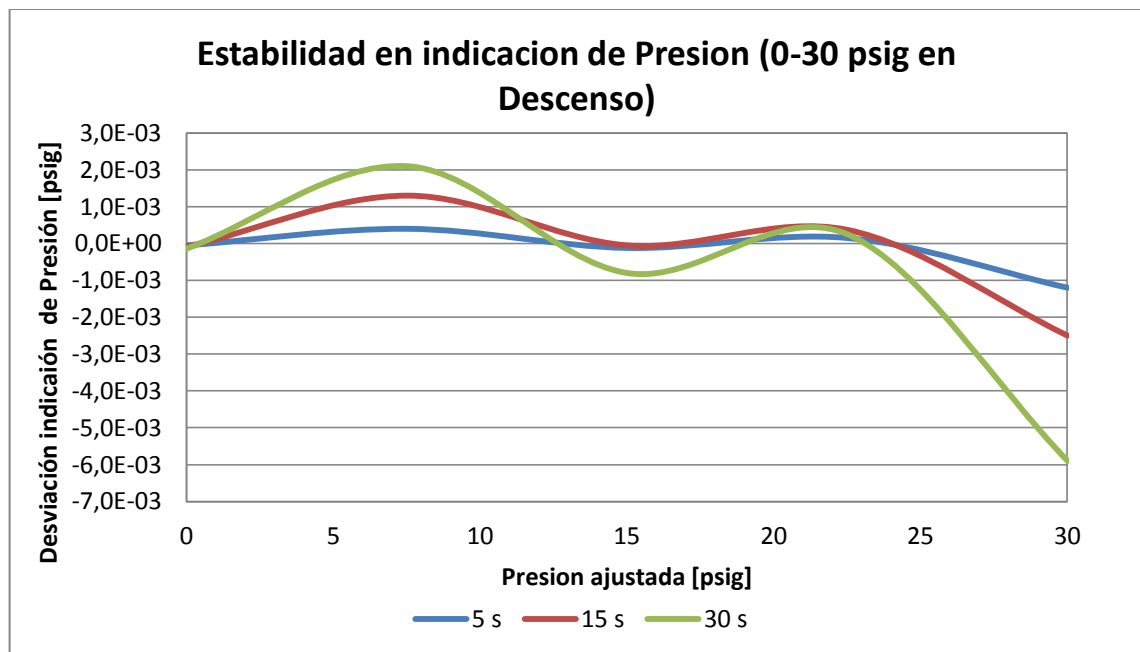


Figura 38. Estabilidad del sistema con el módulo 700P05
Fuente: Autor

La figura 38, que corresponde a la desviación de indicación de presión durante el descenso, muestra un comportamiento similar al visto en ascenso ya que a medida que transcurre el tiempo, la desviación se hace mayor. Sin embargo, puede verse que el sistema en descenso es más estable que en ascenso, a pesar que en 30 psig se haya obtenido la mayor desviación de indicación de la prueba. Incluso, en 22.5 psig logra tal grado de estabilidad que entre los 5 y 15 segundos de haber alcanzado este valor, la desviación no supera los $5\text{E-}04$ psig, y desde 15 psig a 30 psig, pareciera haberse estabilizado ya que la desviación entre una y otra indicación es casi imperceptible.

De modo que puede decirse que, en descenso, en el 100% (el primer *set-point* en descenso) del rango de medición del módulo, es cuando el sistema presenta la mayor inestabilidad, obteniéndose un valor máximo de desviación de, aproximadamente, $6E-03$ psig en 30 psig. Sin embargo, si se compara este valor con $7.5E-03$, valor que corresponde al máximo error esperado, se puede decir que el sistema, a pesar de esta desviación, es estable. De hecho, entre el 0% y el 75% del rango de medición del módulo, es cuando más estable se comporta el sistema durante toda la prueba. Faltaría por decir que, en descenso, debería esperarse, una vez se llega al valor deseado, unos 5 segundos para el registro de datos.

Finalmente, teniendo en cuenta la comparación realizada entre los valores máximos de desviación de la indicación de presión y el error máximo esperado, se puede concluir que el sistema de presión mantiene el módulo de 30 psig *dentro de clase*.

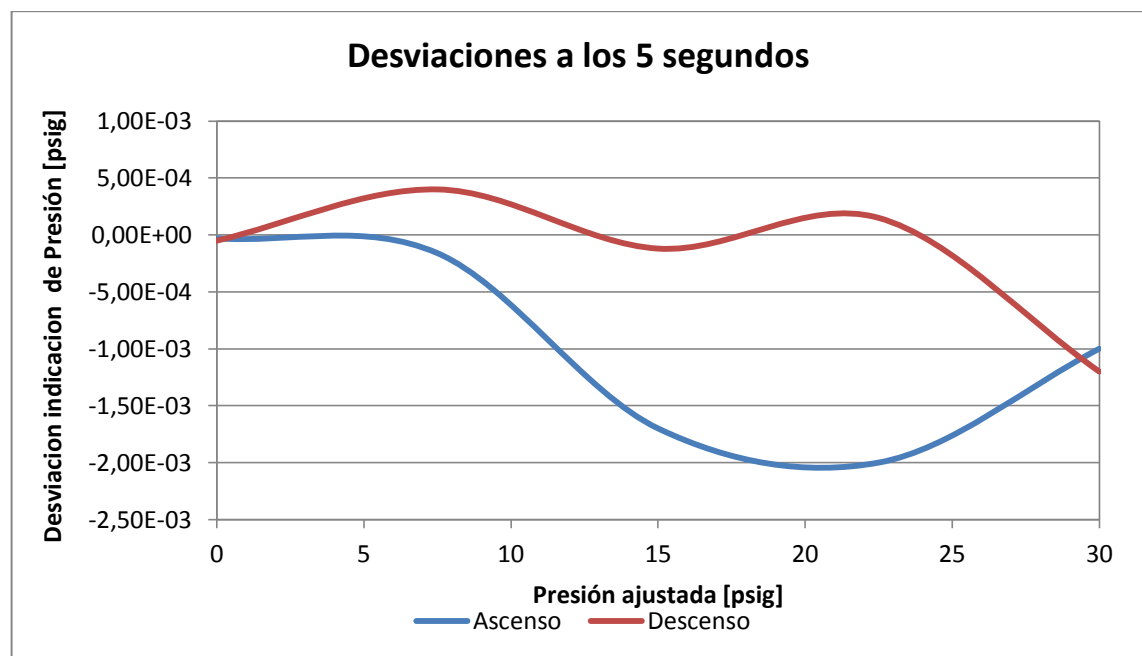


Figura 39. Histéresis entre desviación de indicación a los 5 segundos
Fuente: Autor

De la figura 39, que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 5 segundos, se puede observar que hay diferencias entre la

tendencia de aproximación para alcanzar el límite superior del rango de medición del instrumento partiendo desde 0 psig y la tendencia de aproximación para llegar a 0 psig partiendo desde el límite superior del rango de medición del instrumento. Este comportamiento evidencia el efecto de histéresis inherente al material del instrumento. Además, se puede apreciar que es en 22.5 psig, cuando se obtiene la diferencia máxima entre las desviaciones, es decir, la máxima histéresis, con un valor aproximado de $2.1\text{E}-03$ psig.

De la figura 40 que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 15 segundos, puede observarse que se presenta el mismo comportamiento para las tendencias de aproximación desde 0 psig hasta el límite superior del rango de medición del instrumento y viceversa, el cual se presenta debido al efecto de histéresis inherente al material del instrumento. Además, se puede apreciar que, nuevamente, es en 22.5 psig, cuando se obtiene la máxima histéresis, aproximadamente, de $3.3\text{E}-03$ psig.

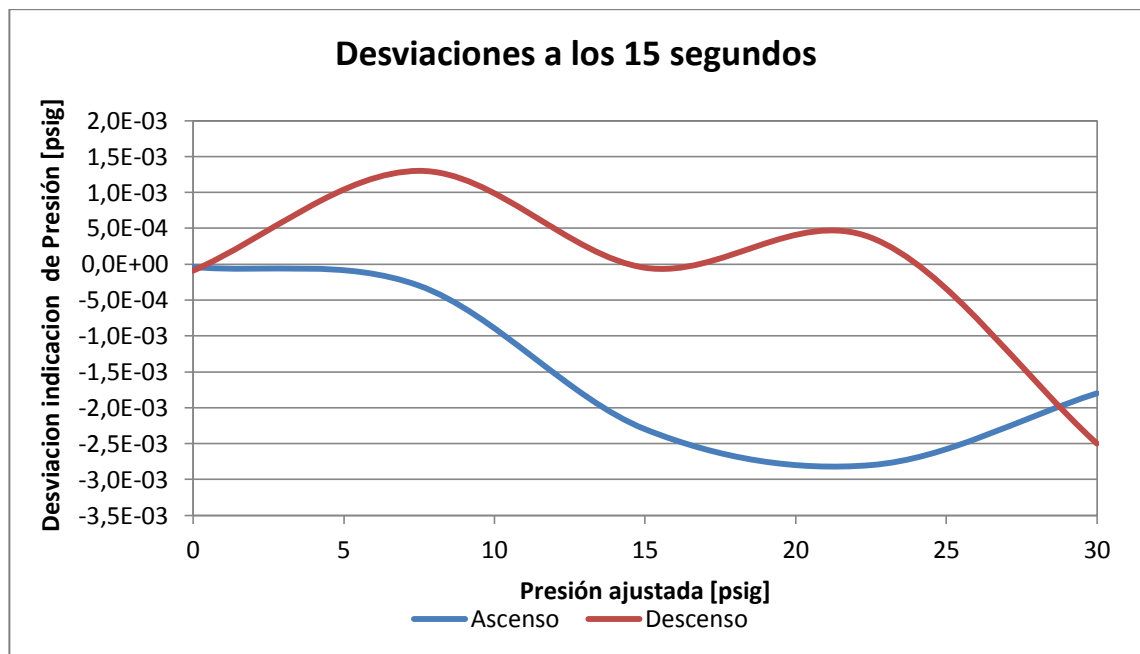


Figura 40. Histéresis entre errores de indicación a los 15 segundos
Fuente: Autor

De la figura 41, que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 30 segundos, se evidencia, nuevamente, las diferencias debidas a la histéresis inherente al material del instrumento. Además, debido a que otra vez

en 22.5 psig se observa la diferencia máxima entre las desviaciones, se puede concluir que es en ese punto donde el módulo de presión 700P05 presenta la mayor histéresis dentro del rango de medición del instrumento.

Para terminar, quedaría por decir que, como se dijo antes, los análisis realizados al módulo de presión 700P05 aplican del mismo modo a los módulos 700P27 y 700P09. De hecho, la conclusión dada para el sistema de presión, no sólo aplica para el módulo de presión de 700P05, sino para todos los módulos, ya que, en la comparación, siempre se cumplió el criterio de evaluación de estabilidad del sistema.

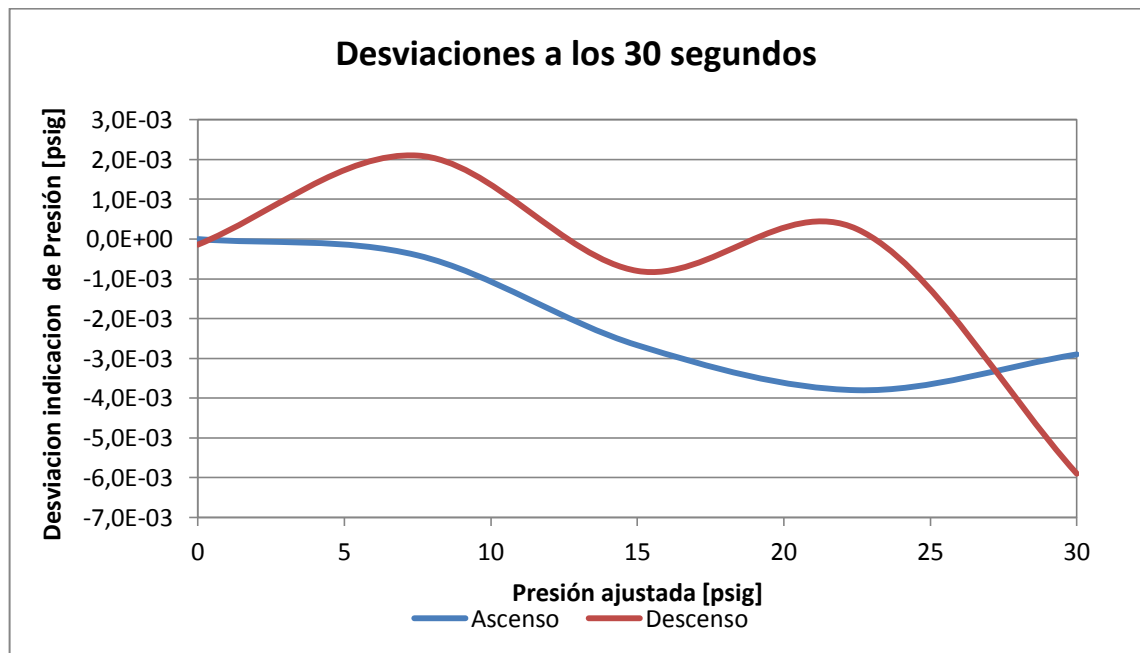


Figura 41. Histéresis entre errores de indicación a los 30 segundos
Fuente: Autor

5.3.3.7 Análisis de resultados bajo condiciones ambientales variables

A continuación, se mostrarán las figuras correspondientes a un solo módulo de presión, el 700P27, de modo que su análisis puede ser aplicado de la misma manera a los otros dos. Sin embargo, en este caso, a diferencia del anterior, no se presentan tendencias similares para los tres módulos debido a que las condiciones ambientales no fueron controladas.

La figura 42, que corresponde a la desviación de indicación de presión durante el ascenso, muestra que se sigue cumpliendo el mismo comportamiento visto en la prueba bajo condiciones controladas para las tendencias de estas desviaciones ya que a medida que transcurría el tiempo, la desviación se hacía cada vez mayor. Puede verse que en los puntos 150 psig y 225 psig, el sistema parece haberse estabilizado ya que la diferencia entre las indicaciones en el mismo *set-point* fue, a medida que transcurrió el tiempo, cada vez menor.

Además, se aprecia que en 300 psig se obtiene la mayor desviación de indicación de presión y es un punto en que, aún después de los 30 segundos, no se aprecia una tendencia de estabilización del sistema. Esta mayor desviación tiene un valor de 2,57 psig. Si se compara este valor con el máximo error esperado para el módulo 700P27, cuyo valor es de $7.5E-02$, puede verse que, en ascenso, el sistema no cumple con la condición de estabilidad definida.

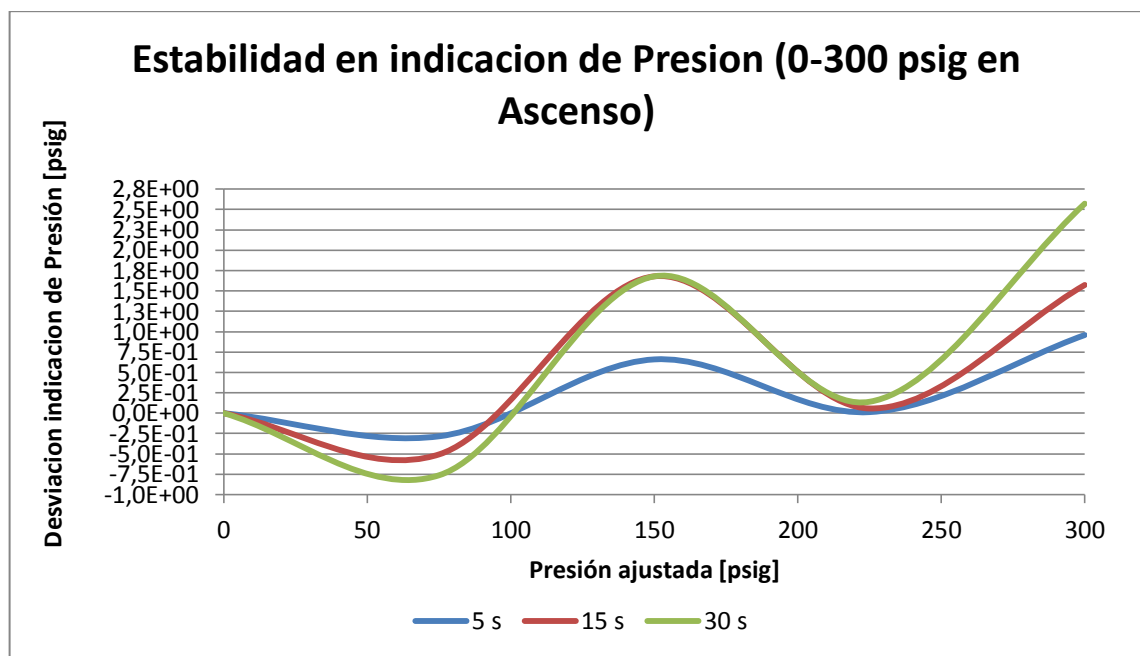


Figura 42. Estabilidad del sistema con el módulo 700P27
Fuente: Autor

Sin embargo, este comportamiento para las desviaciones de indicación de presión era de esperarse debido a la variación de la temperatura ambiente a la que fue

sometido el sistema durante la prueba. Si se revisa en la tabla de resultados los valores mínimos y máximos de la temperatura ambiente durante la prueba bajo condiciones ambientales variables, se verá que hay una diferencia aproximada de 3 °C. La influencia de esa variación debe ser tomada en cuenta en estas desviaciones ya que, si se considera la ecuación de un gas ideal:

$$\frac{P*V}{T} = R \quad (Ec.10)$$

Donde: P=presión (psig), V=Volumen (m³), T=temperatura (°C) y R=constante

Despejando P, se tendría:

$$P = \frac{R*T}{V} \quad (Ec.11)$$

Ahora, si se tiene en cuenta que el volumen de un gas depende del recipiente en que esté contenido y, durante la prueba, el volumen es constante a lo largo del sistema de presión, deja como única responsable de la variación de presión, la variación de la temperatura.

Finalmente, podría decirse que, una vez se llega al valor deseado, debería esperarse 15 segundos para tomar datos ya que es después de ese valor cuando el sistema muestra una tendencia a estabilizarse. De ese modo, tal y como se observa en los puntos 150 psig y 225 psig (tal vez también en 75 psig), la diferencia entre las indicaciones disminuye a medida que transcurre el tiempo, en consecuencia, podría garantizarse que el sistema de presión mantenga el módulo *dentro de clase*.

La figura 43, que corresponde a la desviación de indicación de presión durante el descenso, muestra un comportamiento diferente al visto hasta el momento ya que en 150 psig, la desviación no se hizo mayor con el tiempo si no que, por el contrario, disminuyó. Además, se puede apreciar que en toda la prueba, el sistema tuvo una tendencia a estabilizarse ya que la diferencia entre las indicaciones de un mismo *set-point* fue, a medida que transcurrió el tiempo, cada vez menor. De hecho, al igual que en ascenso, en 150 psig el sistema parece haberse estabilizado ya que no hay desviación apreciable entre las indicaciones en t = 15s y t = 30s.

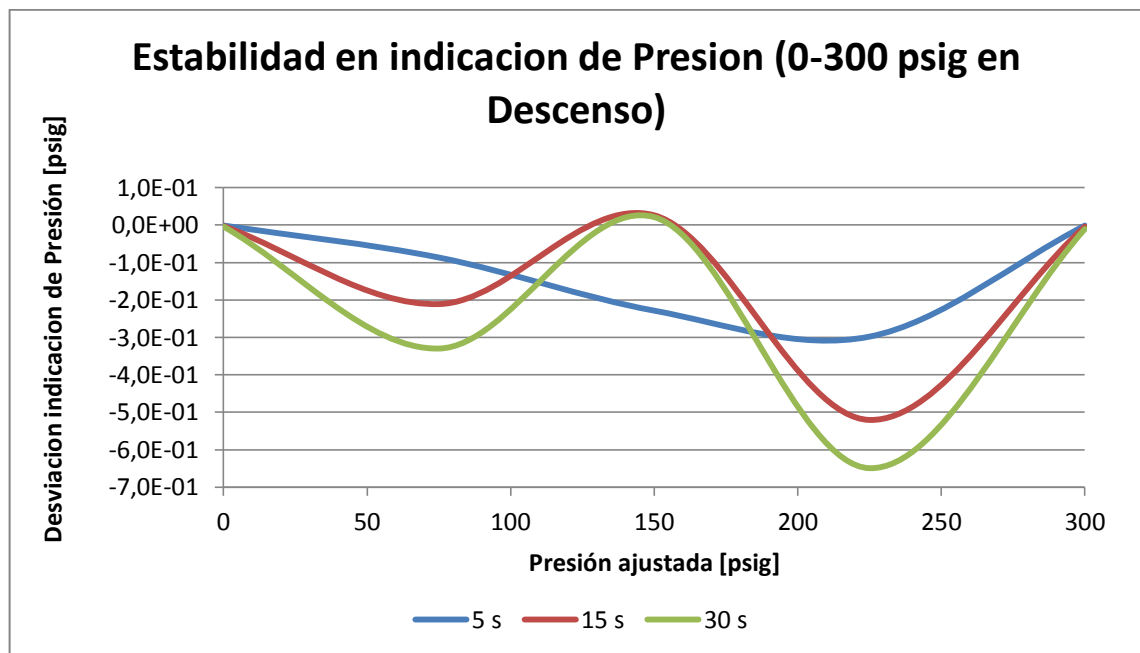


Figura 43. Estabilidad del sistema con el módulo 700P27
Fuente: Autor

Además, se aprecia que en 225 psig se obtiene la mayor desviación de indicación de presión, con un valor aproximado de $6.5E-01$ psig. Si se compara este valor con el máximo error esperado para el módulo 700P27, cuyo valor es de $7.5E-02$, puede verse que, en descenso, el sistema tampoco cumple con la condición de estabilidad definida, debido, principalmente, a las variaciones de la temperatura ambiente (tal y como se mostró para las indicaciones en ascenso). Sin embargo, si se comparan las desviaciones en ascenso y en descenso, puede verse que presentan el mismo comportamiento presentado para el módulo de presión 700P05 en la prueba bajo condiciones ambientales controladas: las desviaciones de indicación en descenso son menores que en ascenso y la estabilidad del sistema es mejor en descenso que en ascenso.

Para terminar, al igual que en ascenso, debería esperarse 15 segundos para el registro de los datos.

De la figura 44, que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 5 segundos, se puede observar que hay tendencias similares entre la aproximación para alcanzar el límite superior del rango de medición del instrumento partiendo desde 0 psig y la tendencia de aproximación para llegar a 0

psig partiendo desde el límite superior del rango de medición del instrumento. Este comportamiento es diferente al observado en la prueba bajo condiciones ambientales controladas, en la cual las tendencias de aproximación eran diferentes. Sin embargo, puede verse que las desviaciones de indicación son diferentes entre sí, debido al efecto de histéresis inherente al material del instrumento. Además, se puede apreciar que es en 300 psig, cuando se obtiene la diferencia máxima entre las desviaciones, es decir, la histéresis máxima, con un valor aproximado de 2.5 psig.

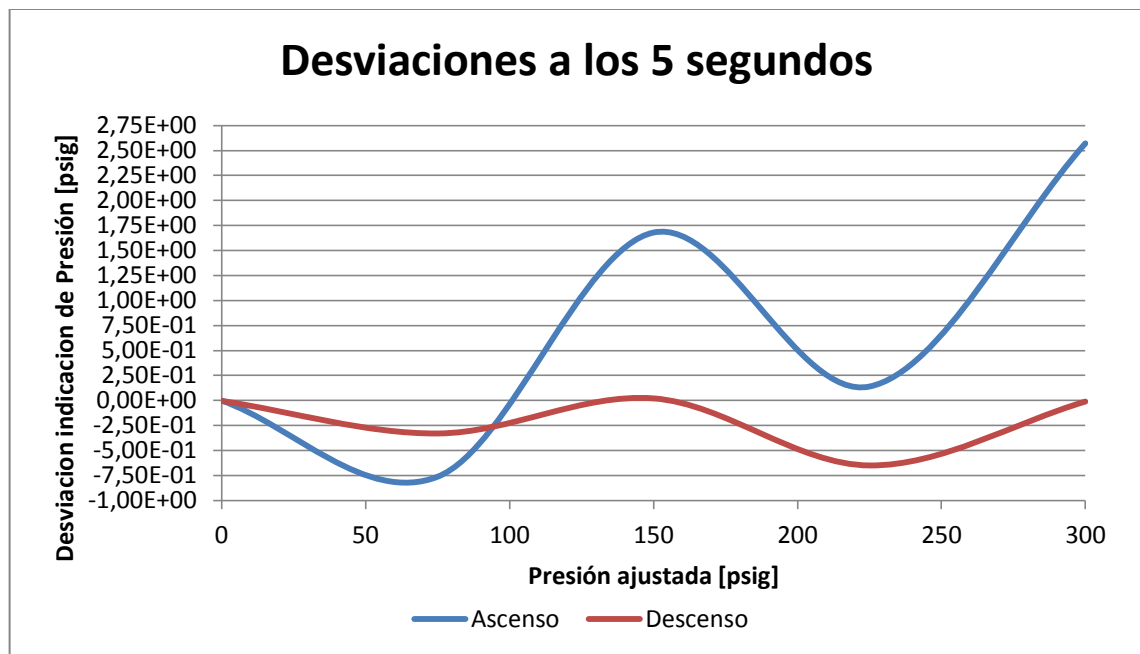


Figura 44. Histéresis entre errores de indicación a los 5 segundos
Fuente: Autor

De la figura 45, que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 15 segundos, se puede observar que presentan el mismo comportamiento visto hasta los 5 segundos, de modo que la tendencia de aproximación para alcanzar el límite superior del rango de medición del instrumento partiendo desde 0 psig y la tendencia de aproximación para llegar a 0 psig partiendo desde el límite superior del rango de medición del instrumento son similares pero con valores muy diferentes, evidenciando el efecto de la histéresis en el módulo de presión. Finalmente, se puede apreciar que en dos puntos, 150 psig y 300 psig, se obtuvieron los máximo valores de histéresis, aproximadamente

de 1.6 psig.



Figura 45. Histéresis entre errores de indicación a los 15 segundos
Fuente: Autor

De la figura 46, que corresponde a las desviaciones de indicación en ascenso y descenso a los 30 segundos, puede observarse que se presenta un comportamiento diferente al observado a los 5 y 15 segundos ya que las tendencias de aproximación son diferentes. Se puede apreciar que es en 300 psig cuando se obtiene la máxima histéresis, con un valor aproximado de 0.96 psig.

Para terminar, quedaría por decir que, como se dijo antes, los análisis realizados al módulo de presión 700P27 aplican del mismo modo a los módulos 700P05 y 700P09, y que, en general, se pudieron analizar bajo criterios específicos la estabilidad del sistema de presión y la histéresis inherente a las propiedades de los módulos, de ésta última, evidenciándose en cada gráfica destinada a su análisis sus efectos.

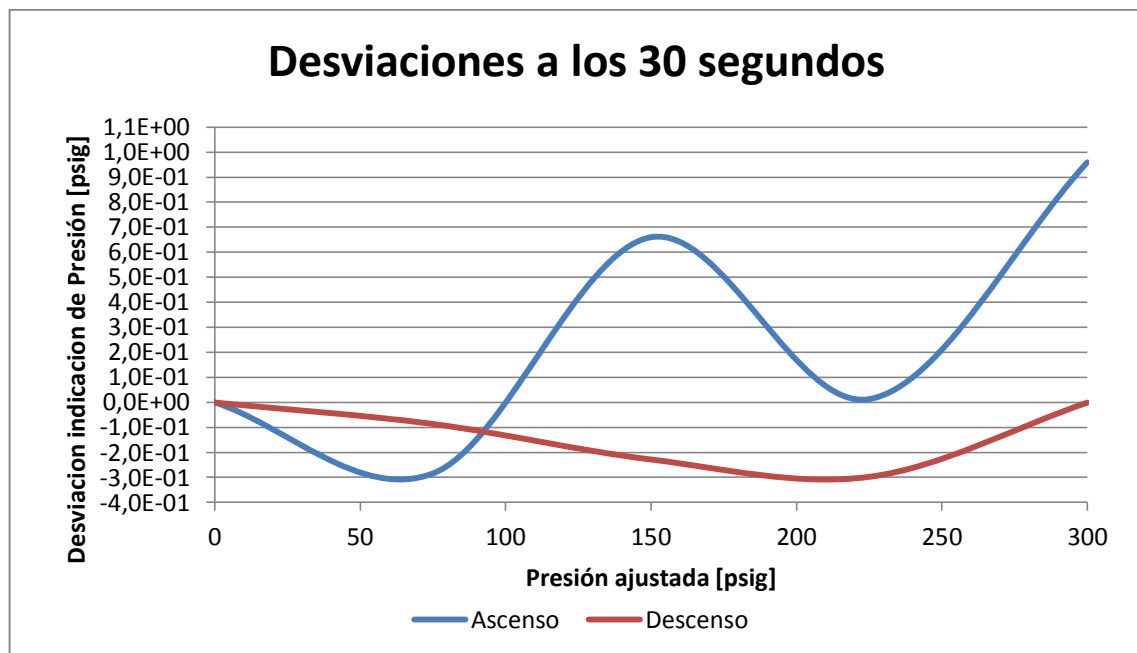


Figura 46. Histéresis entre errores de indicación a los 30 segundos
Fuente: Autor

5.3.4 Prueba de Temperatura³⁹

El sistema de temperatura utilizado para realizar las pruebas fue el mostrado en la figura 47.

Para empezar, el Bloque Seco 9142, que es el elemento generador de temperatura, cuenta con un sensor interno que le permite realizar el control necesario para llegar al *set-point* escogido por el usuario. Las lecturas de éste pueden ser transmitidas a un computador estableciendo una comunicación serial entre él y el puerto serial del bloque seco. Basta con habilitar en el menú del bloque seco la comunicación serial y escoger una tasa de baudios que esté en sincronía con el puerto del PC. La comunicación serial se realiza a través de un cable RS-232.

Para establecer la interconexión, se necesita de un software de interfaz, éste, es el 9930 *INTERFACE-IT*[32]. A través del mismo se puede, entre otras cosas,

³⁹ Durante la prueba de temperatura, el estudiante fue direccionado a través de las siguientes normas: EURAMET/cg-17/ v.02 de 2011, DKD-R 6-1 de 2003 y NTC 2262 de 1987. Si bien no todas son específicamente para los instrumentos tratados, ayudan a lo que, en un plano general, se necesita: llevar a cabo una buena práctica metrológica.

establecer un nuevo *set-point*, generar un registro de datos provenientes del sensor interno del bloque seco, mirar gráficamente el comportamiento del control de temperatura y cambiar los parámetros de control por defecto. El software 9930 *INTERFACE-IT* se usará para generar un registro de los datos del sensor interno que se guardará como un .txt.

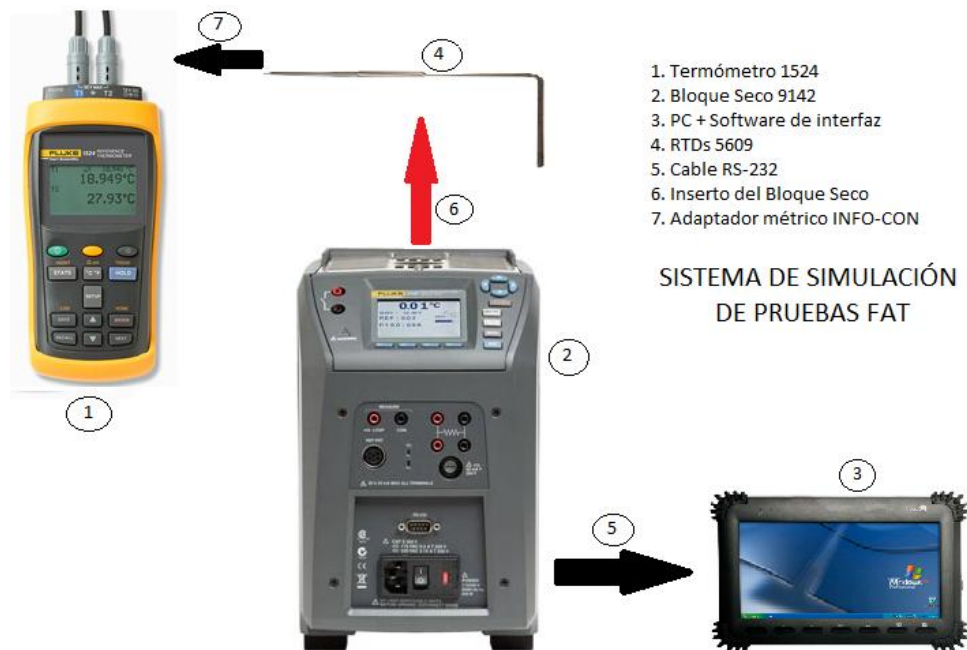


Figura 47. Diagrama del sistema de temperatura para pruebas FAT
 Fuente: Autor

Continuando con los elementos del sistema, las dos RTDs deben ser inmersas en el inserto del bloque seco. El termómetro 1524, como ya se ha explicado antes, recibe la información simultáneamente de las RTDs a través de un conector INFO-CON e indica la temperatura en °C o °F. Para esta prueba, al termómetro 1524 se le configurará una función llamada AUTO LOG. Esta función permite guardar y registrar hasta 15000 datos en la memoria del termómetro para, posteriormente, descargarlos en un archivo. Además, posee 25 espacios de memoria enumerados desde 01 hasta 25 que le permiten hacer diferentes registros, lo cual será de gran utilidad para esta prueba. El almacenamiento de los datos empezará una vez el bloque seco se haya estabilizado en el valor seteado. Esto se sabe pues, como se explicó antes, emite un sonido agudo y se puede confirmar porque se ve una línea recta en lugar de una ondulada en su pantalla principal.

De ese modo se tendrá una adquisición de datos mucho más efectiva ya que ha dejado de ser manual para ser automática. Sin embargo, se utilizará un Kestrel o medidor multivariable para tomar los datos de la temperatura ambiente a la que se desarrolla la prueba.

5.3.4.1 Plantilla de datos para Temperatura

La plantilla se diseñó con el propósito de, al analizar los datos, evaluar lo siguiente:

RTDs: Indicación respecto al *set-point*.

Bloque Seco: Homogeneidad, tiempo de establecimiento⁴⁰ y estabilidad.

Las desviaciones correspondientes tanto de homogeneidad axial y radial como de estabilidad del bloque seco, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21. Especificaciones del bloque seco 9142

ESTABILIDAD	HOMOGENEDAD AXIAL A 40mm	HOMOGENEIDAD RADIAL
[°C]	[°C]	[°C]
±0,01	±0,05	±0,01

Fuente: Guía de usuario del instrumento [15]

A pesar de ser diferentes, durante toda la prueba se tratará tanto a la homogeneidad axial como a la homogeneidad radial dentro de un solo término: Homogeneidad. La Tabla 21 servirá para, al final del análisis de datos, establecer si los resultados obtenidos satisfacen las especificaciones dadas por el fabricante.

Basado en esos criterios y bajo la supervisión del Ing. Jhonattan Fredy Moreno Bernal, se decidió que la prueba estuviera dividida en 2 partes, de modo que se probara la RTD #1 en 2 alturas y 2 posiciones diferentes en el inserto: La RTD #2, siempre tendrá la misma posición y una inmersión total en el inserto del bloque seco. La RTD #1, tendrá una posición1 y una inmersión total en la prueba #1

⁴⁰ Este término se ha reservado hasta ahora. Sin embargo, más adelante cuando se analice, se dirá su definición y cómo está relacionada con la prueba.

mientras que en la prueba #2, se elevará una $h=25,4\text{mm}$ respecto a su total inmersión y estará en la posición 2. La siguiente figura muestra gráficamente las posiciones para ambas pruebas:

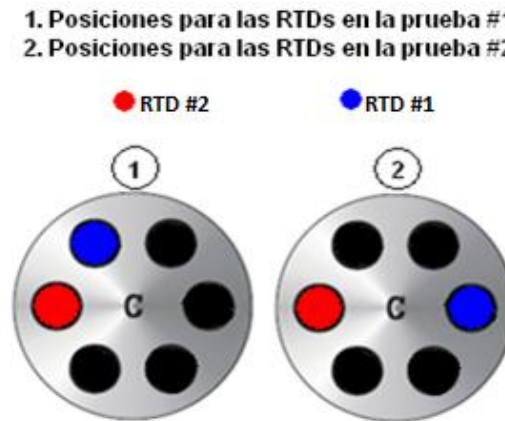


Figura 48. Posiciones para las RTDs en las dos pruebas

Fuente: Autor

Para cada prueba, se tomarán los siguientes datos:

1. 5 puntos distribuidos a conveniencia: Como el rango de interés del M3TLAB para temperatura es de -10 a 100°C , se escogieron los puntos -10 , 10 , 20 , 30 y 100°C . Estos valores, serán los *set-points* de temperatura para el bloque seco 9142.
2. Registro de datos en cada punto durante 10 minutos: el $t = 0\text{s}$ es cuando se escuche el pitido que emite el bloque seco indicando que se ha estabilizado en el valor seteado. Desde ese momento, debe empezar el registro de datos tanto del sensor interno del bloque seco desde el software de interfaz 9930 INTERFACE-IT como de indicación de temperatura en el termómetro 1524 con la función AUTO LOG. Cuando transcurran los 10 minutos, se finaliza el registro de datos en ambos.
3. Registro de datos cada 10 segundos de los valores indicados en el termómetro 1524. De ese modo, se podrá obtener una buena tendencia a lo largo de la prueba.
4. Registro cada minuto del valor de la temperatura utilizando el Kestrel: en caso de obtenerse resultados inadecuados, se deberá revisar la variación de la temperatura ambiente para decidir si influyó en los mismos.

La plantilla se agregará al documento más adelante, al mostrar los resultados obtenidos.

5.3.4.2 Procedimiento para el registro de datos

Como ya se ha dicho antes, la prueba se dividirá en 2 partes, una con inmersión total de ambas RTDs y la otra, con una de las RTDs con inmersión parcial. Las condiciones para las pruebas son las siguientes:

Prueba #1: → RTD #1: Inmersión total y posición #1
→ RTD #2: Inmersión total

Prueba #2: → RTD #1: $h = 25,4$ mm respecto a la inmersión total y posición #2
→ RTD #2: Inmersión total

A pesar de esto, el procedimiento para las 2 pruebas fue el mismo:

1. Habilitar la comunicación serial entre el bloque seco y el PC.
2. Verificar que el 9930 *INTERFACE-IT* reciba información del bloque seco.
3. Configurar la función AUTO LOG en el termómetro 1524 y seleccionar la primera ranura de memoria (01) para el registro de los datos, con una periodicidad de 10 segundos.
4. Realizar el precalentamiento del bloque seco: antes de la prueba, el bloque seco debe ser precalentado. Para esto se lleva al valor mínimo de generación (-25°C) y se deja 10 min. Después, se hace lo mismo para su valor máximo (150°C). Aquí también se verifica que todo el sistema funcione pues puede observarse la temperatura en los indicadores mientras transcurre el tiempo de precalentamiento.
5. Configurar el *set-point* inicial (-10°C) desde el software y esperar.
6. Al escucharse la alarma (pitido agudo) o verse la línea recta de estabilización del bloque seco, iniciar registro de valores del sensor interno del bloque seco desde el 9930 *INTERFACE-IT* e iniciar la función AUTO LOG en el termómetro 1524.
7. Esperar, para cada punto, aproximadamente 10 min.
8. Transcurrido este tiempo, finalizar el registro de datos en el AUTO-LOG y en el 9930 *INTERFACE-IT*.
9. Configurar nuevamente la función AUTO LOG pero ahora con la siguiente ranura de memoria para evitar sobrescribir datos.
10. Realizar los pasos 5 a 9, seleccionando cada vez un *set-point* diferente, hasta cumplir la secuencia ordenadamente: 10, 20, 30 y 100°C .

11. Al finalizar todos los puntos de la prueba, setear el bloque seco a temperatura ambiente por recomendación.
12. Desmontar y bodegar todos los elementos del sistema de temperatura empleados.

5.3.4.3 Resultados de la prueba #1

Para empezar, en el bloque seco se configuró un límite de estabilidad de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ para verificar que una vez entra en su estado estable alrededor del *set-point* seleccionado, no fluctúa más allá de éste valor.

Los resultados que se mostrarán en las Tablas 22 y 23, corresponden, para las RTDs en cada *set-point*, a los valores de temperatura máximo, mínimo y promedio obtenidos, no desde que el bloque seco emitía el pitido de estabilización, sino desde cuando indicaban una temperatura cercana al *set-point* ya que, como se analizará más adelante, el bloque seco, a pesar de alcanzar los límites de estabilización alrededor del *set-point*, tarda un tiempo de más en transmitir el calor necesario para que las RTDs lo indiquen. Para el sensor interno del bloque seco, sí se muestran estos mismos valores a partir del pitido de estabilización para cada *set-point*.

Adicional a esto, la última columna muestra la desviación entre estos mismos valores de las RTDs para cada *set-point*, con el fin de, más adelante, analizar la homogeneidad del bloque seco. De modo que los datos mostrados son los más relevantes de la prueba para su análisis. Los resultados obtenidos para la prueba #1 fueron los siguientes:

Tabla 22. Resultados obtenidos en la prueba #1

Temperatura Ambiente Inicial [°C]	34,10				
Temperatura Ambiente Promedio [°C]	32,05				
Temperatura Ambiente final [°C]	29,70				
Set Point [°C]		Sensor BS [°C]	RTD1 [°C]	RTD2 [°C]	DESVIACIÓN ENTRE RTDs [°C]
-10	Temperatura.	-9,9970	-9,9940	-9,9940	0,0000

Temperatura Ambiente Inicial [°C]	34,10				
Temperatura Ambiente Promedio [°C]	32,05				
Temperatura Ambiente final [°C]	29,70				
Set Point [°C]		Sensor BS [°C]	RTD1 [°C]	RTD2 [°C]	DESVIACIÓN ENTRE RTDs [°C]
	máxima				
	Temperatura mínima	-10,0040	-9,9990	-9,9990	0,0000
	Temperatura Promedio	-10,0012	-9,9960	-9,9961	0,0001
10	Temperatura. máxima	10,0040	9,9900	9,9900	0,0000
	Temperatura mínima	9,9960	9,9830	9,9830	0,0000
	Temperatura Promedio	9,9998	9,9887	9,9884	0,0003
20	Temperatura. máxima	20,0050	20,0020	20,0020	0,0000
	Temperatura mínima	19,9960	20,0000	19,9990	0,0010
	Temperatura Promedio	20,0004	20,0018	20,0015	0,0003
30	Temperatura. máxima	30,0050	30,0110	30,0110	0,0000
	Temperatura mínima	29,9960	30,0060	30,0050	0,0010
	Temperatura Promedio	30,0003	30,0092	30,0088	0,0004
100	Temperatura. máxima	100,0050	100,0370	100,0350	0,0020
	Temperatura mínima	99,9980	100,0210	100,0190	0,0020
	Temperatura Promedio	100,0009	100,0310	100,0302	0,0008

Fuente: Autor

5.3.4.4 Resultados de la prueba #2

Los resultados obtenidos para la prueba #2 fueron los siguientes:

Tabla 23. Resultados obtenidos en la prueba #2

Temperatura Ambiente Inicial [°C]	31,2				
Temperatura Ambiente Promedio [°C]	31,8				
Temperatura Ambiente final [°C]	32,5				
Set Point [°C]		Sensor BS [°C]	RTD1 [°C]	RTD2 [°C]	DESVIACIÓN ENTRE RTDs [°C]
-10	Temperatura. máxima	-9,9980	-10,0250	-10,0080	0,0170
	Temperatura mínima	-10,0060	-10,0260	-10,0120	0,0140
	Temperatura Promedio	-10,0013	-10,0250	-10,0102	0,0148
10	Temperatura. máxima	10,0050	9,9820	9,9930	0,0110
	Temperatura mínima	9,9960	9,9780	9,9900	0,0120
	Temperatura Promedio	10,0010	9,9807	9,9920	0,0113
20	Temperatura. máxima	20,0050	19,9940	20,0000	0,0060
	Temperatura mínima	19,9960	19,9890	19,9940	0,0050
	Temperatura Promedio	20,0000	19,9925	19,9978	0,0054
30	Temperatura. máxima	30,0050	30,0050	30,0050	0,0000
	Temperatura mínima	29,9950	29,9980	29,9940	0,0040
	Temperatura Promedio	29,9999	30,0023	30,0009	0,0014
100	Temperatura. máxima	100,0060	100,0360	100,0030	0,0330
	Temperatura mínima	99,9960	100,0140	99,9540	0,0600
	Temperatura Promedio	100,0007	100,0290	99,9909	0,0381

Fuente: Autor

5.3.4.5 Análisis de resultados

Las gráficas de las figuras 49 hasta la 58, representan los valores obtenidos para cada *set-point* de las dos pruebas. Éstas, han sido realizadas teniendo en cuenta que los parámetros que quisieron evaluarse fueron los siguientes:

- RTDs: Indicación respecto al *set-point*
- Bloque Seco: Homogeneidad, tiempo de establecimiento y estabilidad en el tiempo.

En cuanto a la indicación de las RTDs en el termómetro 1524, en cada gráfica se muestra una línea continua de diferente color para cada una. Para la RTD #1 una color carmesí indica sus valores de temperatura correspondiente, mientras que para la RTD #2, una color verde. Estas líneas, además de evidenciar los valores medidos de temperatura respecto al *set-point* escogido, servirán de apoyo para los análisis correspondientes de homogeneidad y tiempo de establecimiento.

En cuanto al análisis de la estabilidad del bloque seco, en cada gráfica se muestra una línea color azul que corresponde a los valores del sensor interno del bloque seco registrados por el software 9930 *INTERFACE-IT*. La tendencia de la línea para éstos gráficos será el criterio que permitirá determinar cómo es su desempeño en el tiempo, una vez se ha estabilizado alrededor de un *set-point*. Además, para afianzar el análisis, se tendrán en cuenta los valores de temperatura promedio de las tablas de resultados obtenidos.

Para el tiempo de establecimiento del bloque seco, se analizará la tendencia de las líneas de indicación de las RTDs ya que ésta es la evidencia de qué tanto tiempo se necesita esperar para obtener una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, una vez que el bloque seco se estabiliza en un *set-point*. Este tiempo de establecimiento es, a su vez, el tiempo que tarda el bloque seco en la transmisión de calor del valor deseado (*set-point*) al inserto.

Para el análisis de homogeneidad, se utilizará, nuevamente, la tendencia de las líneas de indicación de las RTDs pero, para este caso, como primer complemento, se compararán éstas tendencias entre los *set-points* iguales de ambas pruebas, es decir, se compararán las de -10°C para la prueba #1 y -10°C para la prueba #2, las de 10°C y 10°C, etc. Las comparaciones se nombrarán cuando se esté en el análisis de la prueba #2 y mientras se esté en el de la prueba #1, se hablará de la

homogeneidad entre las indicaciones de temperatura de las RTDs. Además, como complemento final, se tendrá en cuenta la última columna de las tablas de resultados obtenidos (desviación en °C entre indicaciones de las RTDs para un mismo *set-point*) y se hará la misma comparación anterior pero para las desviaciones en la temperatura promedio.

Por último, de las gráficas se dirá que en cada una de ellas se ha adicionado un límite superior e inferior de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ del *set-point*, que corresponde a la línea a trazos de color rojo. Ésta línea, si es necesario, será una referencia y un soporte más para el análisis de estabilidad e indicación tanto del sensor interno del bloque seco como de las RTDs.

Al final del análisis de las dos pruebas de temperatura, se establecerá si los resultados obtenidos satisfacen las especificaciones dadas por el fabricante que se vieron en la tabla 21.

5.3.4.6 Análisis de la prueba #1

Para evitar redundancias, de las figuras 49 a 53, en cuanto a indicación de las RTDs, puede notarse que la tendencia entre ellas es la misma y que respecto al *set-point* hay mucha similitud, por lo tanto, las lecturas obtenidas en todos los puntos seleccionados son válidas y sirven de soporte para los análisis posteriores. Puede apreciarse, además de lo nombrado, que mientras transcurría el tiempo las indicaciones de las RTDs, para las figuras 49 y 51, se iban acercando cada vez más al valor deseado. Para el caso de las figuras 50, 52 y 53, se hablará más adelante de lo diferente de su situación respecto a las otras dos, cuando se estén tratando los otros análisis de éstas gráficas.

Del mismo modo, para evitar redundancias en cuanto a estabilidad del bloque seco, de las figuras 49 a 53, se dirá que la línea azul permite inferir que una vez el bloque seco emite el pitido se estabiliza y garantiza que su temperatura interna no se salga de los límites definidos ($\pm 0.02^{\circ}\text{C}$). Además, puede apreciarse que en $t = 0\text{s}$ es cuando más lejos se encuentra del *set-point* seleccionado pero, una vez lo alcanza, se mantiene fluctuante a su alrededor. Particularmente, para el primer *set-point* de la prueba #1, si se tiene en cuenta que el valor promedio del sensor interno, tomado de la Tabla 22, es -10.0012°C , puede corroborarse que se ha estabilizado.

En cuanto a tiempo de establecimiento de la figura 49, se hace notorio que, a pesar que el bloque seco entra a su límite de estabilidad internamente desde $t = 0s$, tarda más tiempo en transmitir el calor necesario para que la temperatura en el inserto llegue al *set-point*. Esto último también se repite en todos los gráficos de la prueba #1, por lo que para cada una de ellas quedaría por decir qué tanto tiempo de más tarda en transmitir el calor necesario para alcanzarlo. Para el caso particular de $-10^{\circ}C$, es decir, de la figura 49, puede verse que, aproximadamente, las RTDs tardan 250 segundos en lograr una indicación estable. Sin embargo una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, sería a partir de 300 segundos (5 minutos).

De la figura 49 faltaría nombrar lo respectivo a la homogeneidad. Teniendo en cuenta que la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs fue de $0,0001^{\circ}C$, se puede decir, por ahora, que la distribución de calor en el inserto para las posiciones seleccionadas es uniforme.

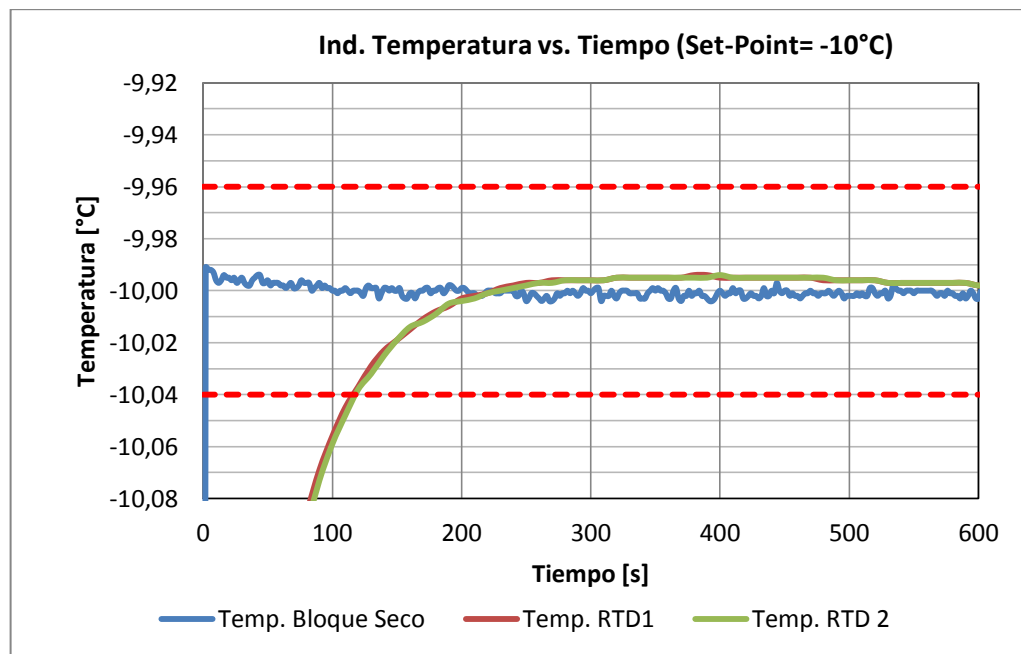


Figura 49. Indicación de temperatura para *set-point* en $-10^{\circ}C$
Fuente: Autor

En cuanto a indicación de las RTDs para la figura 50, puede verse que, a pesar de que a medida que transcurre el tiempo su temperatura se acerca al valor deseado,

hay una desviación de temperatura inferior a, aproximadamente, 0.01°C que al final de la prueba se mantiene proporcional. Para ese caso, se puede decir que el sensor interno del bloque seco es el que se encuentra desviado, teniendo en cuenta que las RTDs son transductores especializados en la medición de temperatura. Además, como se dijo antes, al establecerse una misma tendencia para las indicaciones de las RTDs, se garantiza que los datos de temperatura registrados son válidos y las descarta como principal fuente de error. Ésta explicación fundamenta, a su vez, la desviación de las indicaciones que se ven en las figuras 52 y 53, de las cuales se hablará más adelante.

De la figura 50, en cuanto a estabilidad del bloque seco, quedaría por hablar del valor de temperatura promedio de su sensor interno mostrado en la tabla 22 Este valor es 9.9998°C , lo que corrobora lo enunciado desde un principio para su estabilidad, dejando una desviación promedio de 0.0002°C .

En cuando a tiempo de establecimiento de la figura 50, puede verse que las RTDs tardan 300 segundos en lograr una indicación estable. Sin embargo, para este caso, una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524 sería a partir de 330 segundos (5.5 minutos).

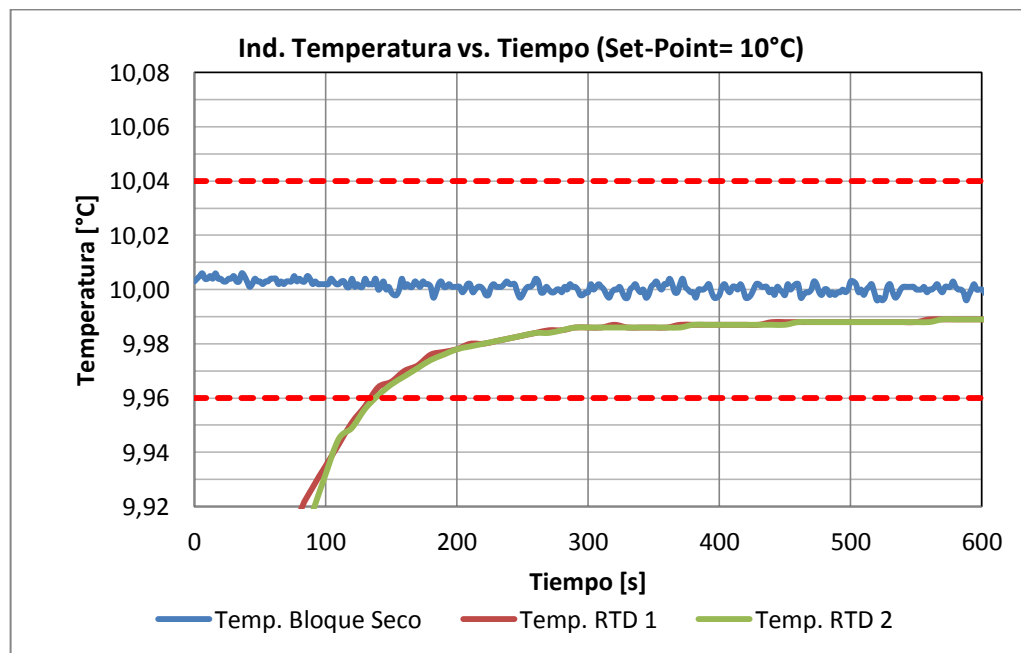


Figura 50. Indicación de temperatura para *set-point* en 10°C

Fuente: Autor

De la figura 50 faltaría nombrar lo respectivo a homogeneidad. Se puede decir, nuevamente, que la distribución de calor en todo el inserto para las posiciones seleccionadas es uniforme. Si se observa en la tabla 22 que la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs fue de 0,0003 °C, puede corroborarse. Además quedaría por decir que hasta ahora, de las dos desviaciones promedio vistas, ésta última es la mayor.

En cuanto a tiempo de establecimiento para el *set-point* en 20°C, puede verse que las RTDs tardan, aproximadamente, 250 segundos en lograr una indicación estable. Sin embargo, para obtener una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, sería a partir de 300 segundos (5 minutos).

De la figura 51, en cuanto a estabilidad del bloque seco, la tabla 22 muestra un valor de temperatura promedio de su sensor interno de 20,0004°C, dejando una desviación promedio de 0.0004 °C.

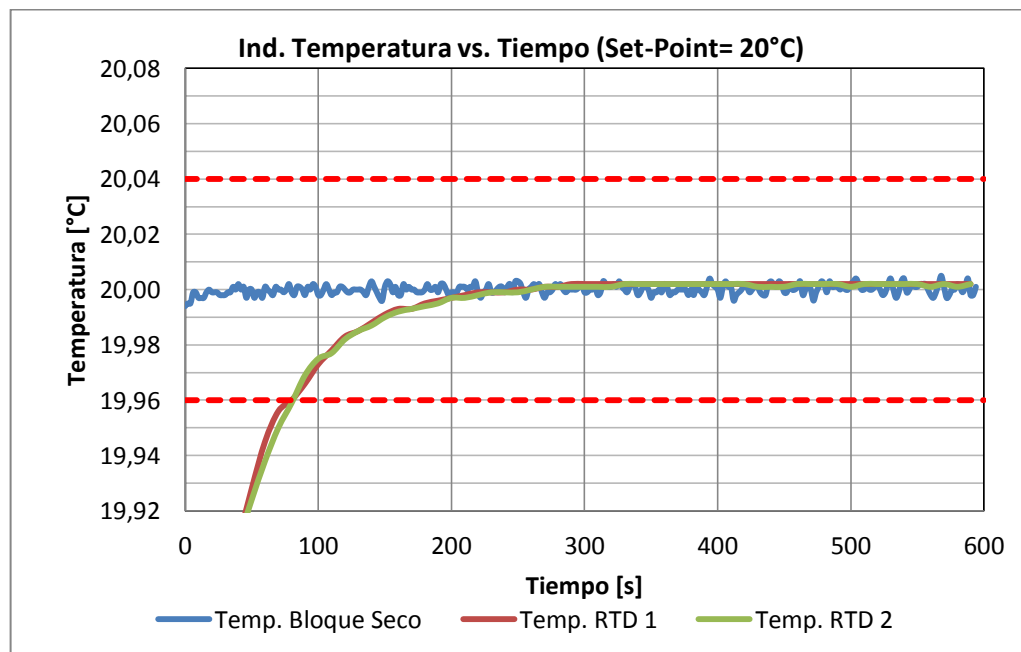


Figura 51. Indicación de temperatura para *set-point* en 20°C
Fuente: Autor

De la figura 51, quedaría por decir lo correspondiente a la homogeneidad.

Nuevamente, si nos fijamos en la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs que muestra la tabla 22 para el *set-point* en 20°C, puede decirse que la distribución de calor es uniforme. Además, teniendo en cuenta que el valor es 0,0003°C e igual que el obtenido para el *set-point* anterior, casi que podría concluirse que para posiciones contiguas y una inmersión total de las dos RTDs, es decir, y a una misma profundidad, la distribución de temperatura es uniforme. Sin embargo, antes de dar ésta conclusión, se esperará a los otros dos valores restantes.

En cuanto a indicación de las RTDs para la figura 52, puede verse que hay una desviación de temperatura inferior a 0.02°C respecto al sensor del bloque seco que al final de la prueba se mantiene proporcional. Del error que se presenta, debe tenerse en cuenta lo dicho anteriormente en la figura 50 para el *set-point* de 10°C.

De ésta misma figura, en cuanto a estabilidad del bloque seco, la tabla 22 muestra un valor de temperatura promedio de su sensor interno de 30,0003°C, dejando una desviación promedio de 0.0003 °C.

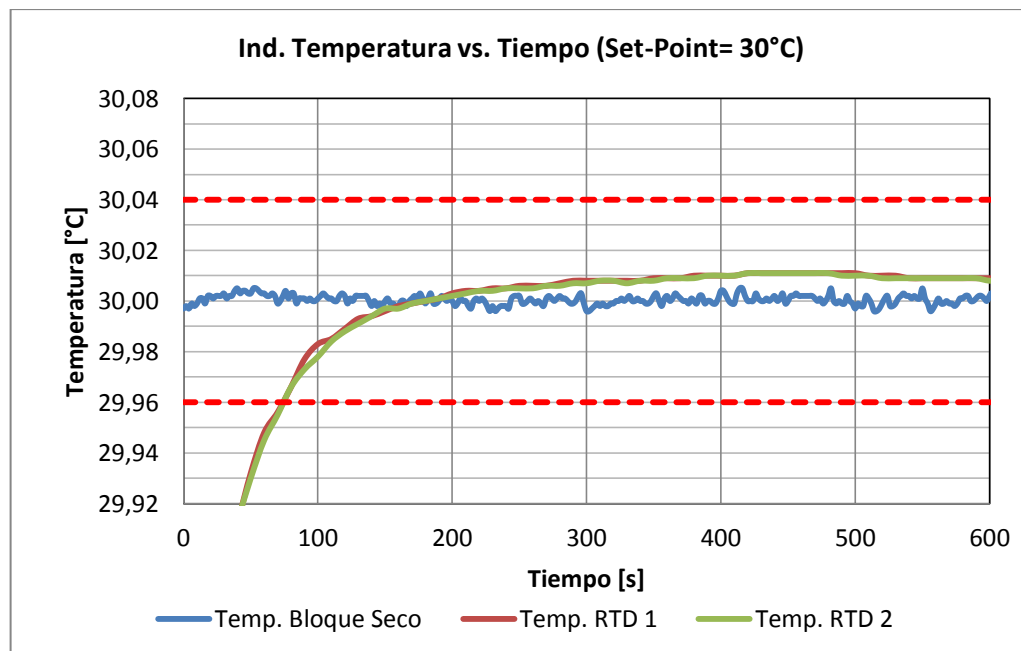


Figura 52. Indicación de temperatura para *set-point* en 30°C

Fuente: Autor

En cuanto a tiempo de establecimiento para la figura 52, puede verse que, aproximadamente, a partir de 250 segundos las RTDs en lograr una indicación estable. Sin embargo, para obtener una lectura confiable de las RTDs en el termómetro 1524, sería a partir de 330 segundos (5.5 minutos).

De la figura 52 faltaría nombrar lo respectivo a homogeneidad. Se puede decir, nuevamente, que la distribución de calor en todo el inserto para posiciones contiguas y alturas iguales dentro del inserto, es uniforme. Si se observa de la tabla 22 que la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs fue de $0,0004^{\circ}\text{C}$, puede corroborarse. Además quedaría por decir que hasta ahora, de las desviaciones promedio vistas, ésta última es la mayor. Ahora, aprovechando ésta tendencia que indica que a mayor temperatura se presenta una mayor desviación, se tendrá en cuenta de una vez la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs para un set point de 100°C que, al ser de 0.0008°C , evidencia que es cierta. De modo que a mayor temperatura, mayor desviación entre las RTDs se obtendrá dentro del inserto para posiciones contiguas y una misma altura.

En cuanto a indicación de las RTDs, puede verse que para un valor deseado de 100°C , se presenta el caso más crítico en cuanto a error, al acercarse al límite superior de 100.004°C . Puede apreciarse que la tendencia de las indicaciones de las RTDs es similar, lo que garantiza que los valores obtenidos son confiables y nuevamente, debe atribuirse como principal causante del error el sensor interno del bloque seco, el cual, al no registrar la temperatura adecuada, hace que el bloque seco genere más calor del debido.

De ésta misma figura, en cuanto a estabilidad del bloque seco, la tabla 22 muestra un valor de temperatura promedio de su sensor interno de $100,0009^{\circ}\text{C}$, dejando una desviación promedio de 0.0009°C .

En cuanto a tiempo de establecimiento para la gráfica de la figura 53, puede notarse que también es el caso más crítico ya que no es sino hasta el último minuto, en que las RTDs en lograr una indicación estable. Para éste caso, la lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524 se alcanzaría después de 540 segundos (9 minutos).

Finalmente, puede verse que, globalmente, hay tres tendencias marcadas. La primera, es la que fue anunciada en su momento para la desviación del valor de temperatura promedio entre las RTDs: a mayor temperatura, mayor desviación

entre ellas se obtendrá dentro del inserto para posiciones contiguas y una misma altura. La segunda y la tercera comparten una similitud: sus peores casos (no por eso inválidos) se presentan al principio y al final del rango de la prueba, es decir, en -10°C y 100°C . La segunda y tercera tendencia, corresponden a tiempo de establecimiento y estabilidad del bloque seco, ésta última, específicamente, en la indicación promedio de su sensor interno.

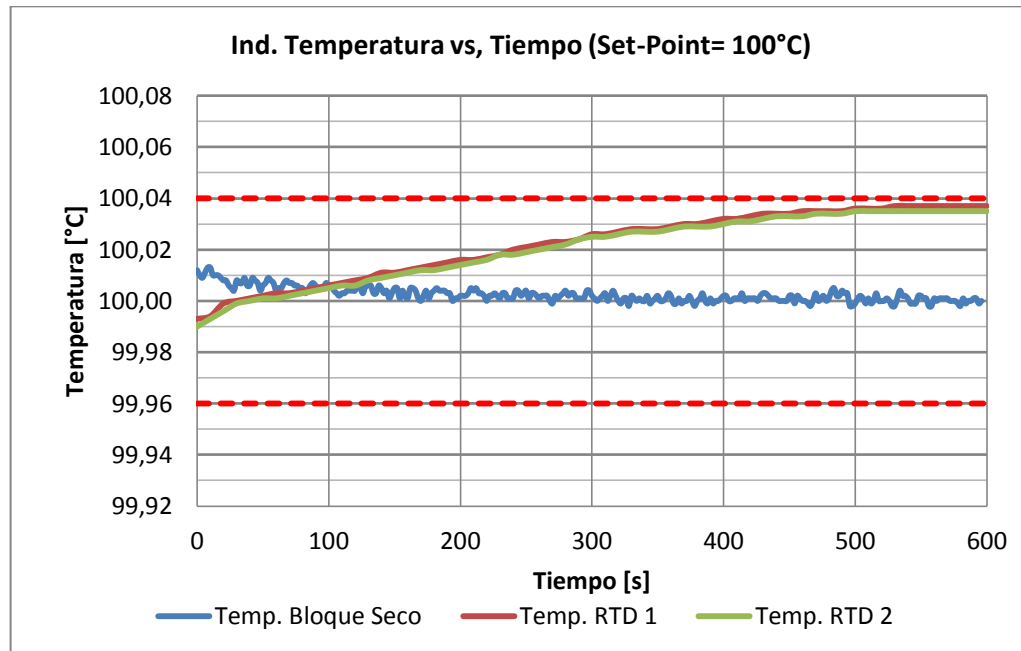


Figura 53. Indicación de temperatura para *set-point* en 100°C
Fuente: Autor

Para terminar, puede decirse que para temperaturas hasta 30°C y tal vez un poco mayores, un tiempo que garantiza que las lecturas en el termómetro serán confiables es 5.5 minutos. Para temperaturas muy altas, superiores a 100°C , lo mejor sería esperar unos 9 minutos para registrar lecturas confiables.

5.3.4.7 Análisis de la prueba #2

Para evitar redundancias, de las figuras 54 a 58, en cuanto a indicación de las RTDs, a pesar que hay diferencias entre ellas, es notorio que su tendencia es la misma, por lo tanto, los valores obtenidos en todos los puntos seleccionados son

válidos y sirven de soporte para los análisis posteriores. Lo que ya se dijo en cuanto a indicación de las RTDs en los párrafos del análisis de la prueba #1, también aplican para la prueba #2, por lo que, en este caso, se dejará hasta acá lo referente a éste parámetro. Sin embargo, los comportamientos por analizar y que son diferentes al resto, serían los que se ven en las figuras 57 y 58. La última observación que se hará es referente a la RTD #2, la cual, a pesar de mantenerse en la misma posición y a la misma profundidad en el inserto, en ninguno de los *set-points* iguales indicó el mismo valor de temperatura promedio (Véanse las Tablas 22 y 23)

Del mismo modo, para evitar redundancias en cuanto a estabilidad del bloque seco, de las figuras 54 a 58, se dirá que los análisis realizados para la prueba #1, aplican del mismo modo para la prueba #2. De hecho, la tendencia que se vio y se concluyó para este parámetro en la prueba #1, también se cumple para la prueba #2, por lo que hasta acá se deja lo correspondiente a su análisis.

Por lo tanto, se hará un énfasis principal en los parámetros tiempo de establecimiento y homogeneidad. En éste último, es en donde se tratará lo correspondiente al incremento de la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs. Del retardo en el tiempo de establecimiento entre las indicaciones de las RTDs que se observa en la mayoría de las gráficas se hablará cuando se trate este parámetro en cada figura pero, teniendo en cuenta la simultaneidad del tiempo de establecimiento para la prueba #1, puede decirse que el retardo surge como consecuencia de tener la RTD #1 en una posición y a una altura diferente en el inserto.

De la figura 54, en cuanto a tiempo de establecimiento, puede verse que es aproximadamente en 120 segundos para la RTD #2 y 150 segundos para la RTD #1, cuando logran una indicación estable. Sin embargo, para una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, debería esperarse unos 210 segundos (3.5 minutos). En este caso, la diferencia del tiempo de establecimiento es de, aproximadamente, 30 segundos y la indicación de la RTD #1 se encuentra retrasada respecto a la RTD #2.

En cuanto a la homogeneidad, para el set point en -10°C , puede verse que, desde el principio de la gráfica hasta el final, la diferencia entre las indicaciones de las RTDs es casi proporcional. La desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs, fue de $0,0148^{\circ}\text{C}$, mucho más alta que la obtenida para la prueba #1 en este mismo *set-point*, la cual fue de $0,0001^{\circ}\text{C}$. Ésta diferencia evidencia la influencia de

tener, principalmente, la RTD #1 a una profundidad diferente a la inmersión total en el inserto, de modo que, al haber aire entre la punta de la RTD y el final del inserto, no se obtiene una uniformidad en la distribución de calor, como la que podría esperarse cuando la RTD tiene una inmersión total.

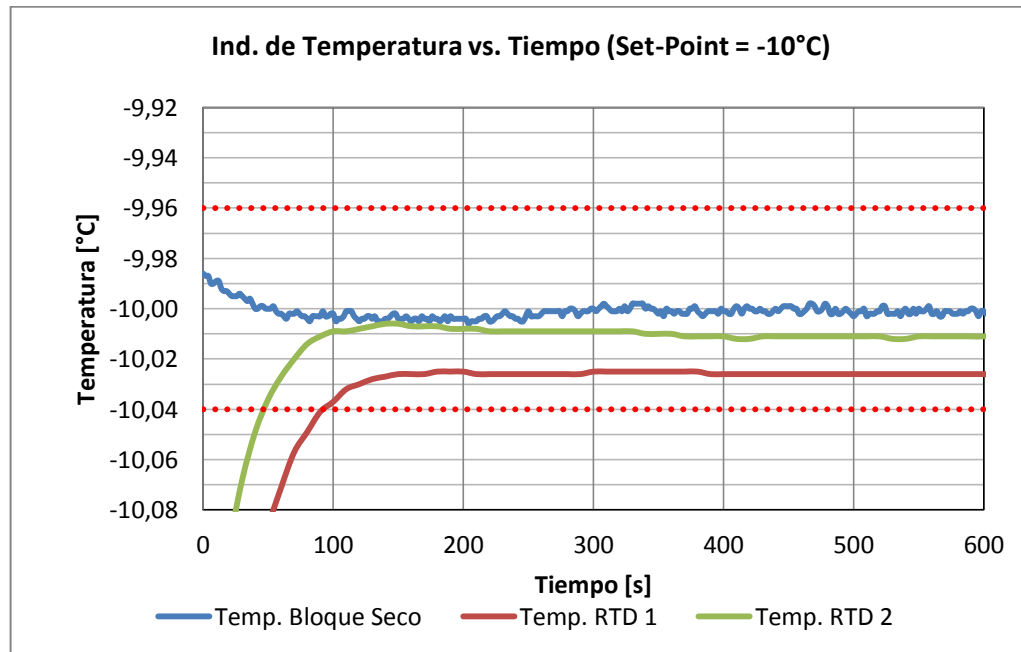


Figura 54. Indicación de temperatura para *set-point* en -10°C
Fuente: Autor

De la figura 55, en cuanto a tiempo de establecimiento, puede verse que es aproximadamente en 220 segundos para la RTD #2 y 240 segundos para la RTD #1, cuando logran una indicación estable. Para una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, debería esperarse unos 270 segundos (4.5 minutos). Para este caso, la diferencia de tiempos es de 20 segundos, 10 segundos menos que para el *set-point* anterior.

En cuanto a la homogeneidad, para el set point en 10°C, puede verse que la diferencia entre las indicaciones de las RTDs es casi proporcional. La desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs, fue de 0,0113°C, mucho más alta que la obtenida para la prueba #1 en este mismo *set-point*, la cual fue de 0,0003°C. Ésta diferencia evidencia, nuevamente, la explicación dada para el *set-point* en -10°C.

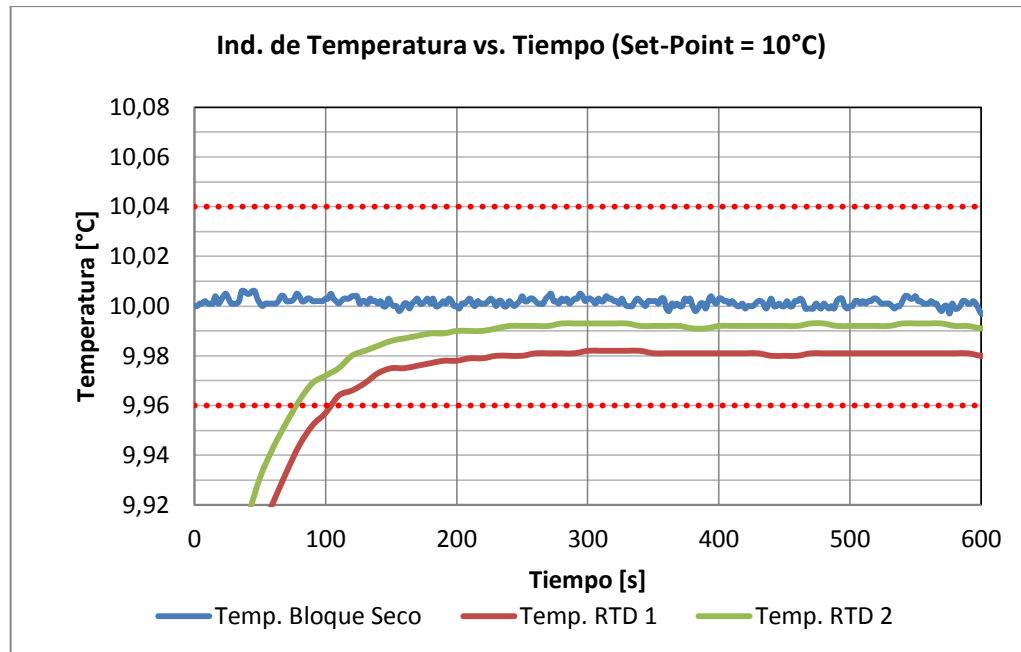


Figura 55. Indicación de temperatura para *set-point* en 10°C
Fuente: Autor

De la figura 56, en cuanto a tiempo de establecimiento, puede verse que es aproximadamente en 270 segundos para la RTD #2 y 280 segundos para la RTD #1, cuando logran una indicación estable. Sin embargo, para una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, debería esperarse unos 300 segundos (5 minutos). Para este caso, la diferencia de tiempos es de 10 segundos, nuevamente, 10 segundos menos que para el *set-point* anterior, lo que empieza a marcar una tendencia.

En cuanto a la homogeneidad, para la figura 56, puede verse que la diferencia entre las indicaciones de las RTDs es, nuevamente, casi proporcional y disminuye respecto a las dos anteriores. La desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs, fue de 0,0054°C, más alta que la obtenida para la prueba #1 en este mismo *set-point*, la cual fue de 0,0003°C. Ésta diferencia evidencia, nuevamente, la explicación dada para el *set-point* en -10°C y empieza a marcar una tendencia, de modo que a mayor temperatura, mayor uniformidad hay en la distribución de calor en el inserto.

De la figura 57, en cuanto a tiempo de establecimiento, puede observarse que es

aproximadamente en 180 segundos para ambas RTDs cuando logran una indicación estable. Para una lectura confiable de la temperatura en el termómetro 1524, debería esperarse unos 200 segundos (3.3 minutos). Para este caso, en que no hay diferencia de tiempos, puede decirse, teniendo cuenta el decremento del tiempo de establecimiento presentado desde el *set-point* -10°C hasta 30°C, que a medida en que incrementa la temperatura, el tiempo de establecimiento se va haciendo simultáneo y entre 20°C y 30°C, se hace simultáneo. Para corroborar lo dicho, la gráfica de la figura 58 debería evidenciarlo, sin embargo, y al igual que en la prueba #1, no es sino hasta al final de la prueba que empieza a hacerse notoria una tendencia de estabilización por lo que no es posible decir con certeza si se estabilizan al mismo tiempo, aunque pareciera que así sucediera a los 600 segundos (10 minutos).

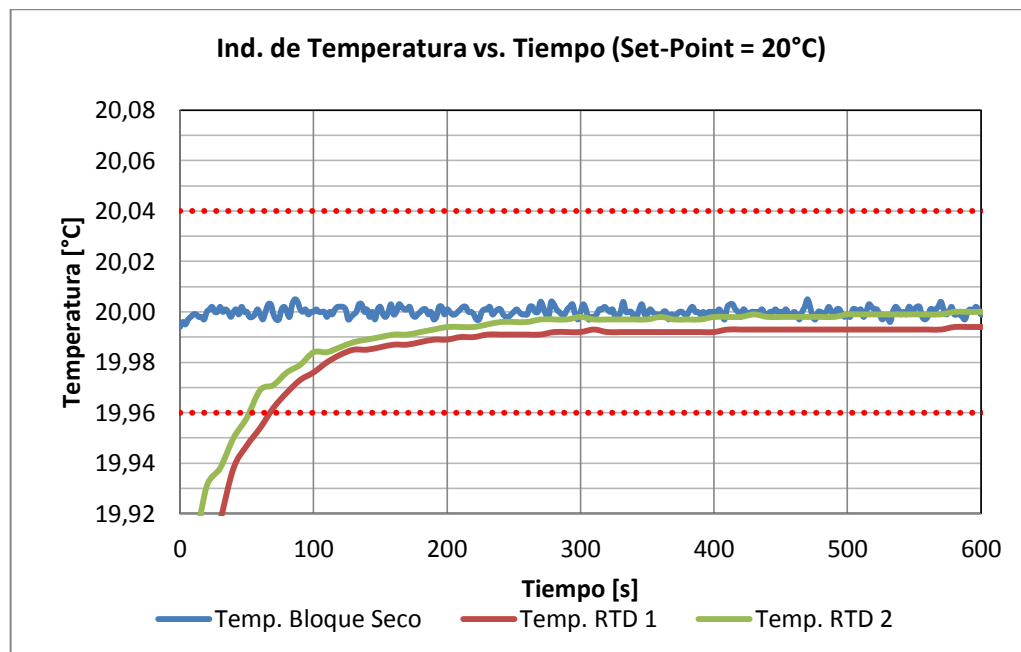


Figura 56. Indicación de temperatura para *set-point* en 20°C

Fuente: Autor

En cuanto a la homogeneidad, para la figura 57, puede verse que la diferencia entre las indicaciones de las RTDs es, nuevamente, casi proporcional y otra vez disminuye respecto a las anteriores. La desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs, fue de 0,0014°C, muy cercana a la obtenida para la prueba #1 en este mismo *set-point*, la cual fue de 0,0004°C. Puede notarse la tendencia

nombrada anteriormente, de modo que a mayor temperatura, mayor uniformidad hay en la distribución de calor en el inserto.

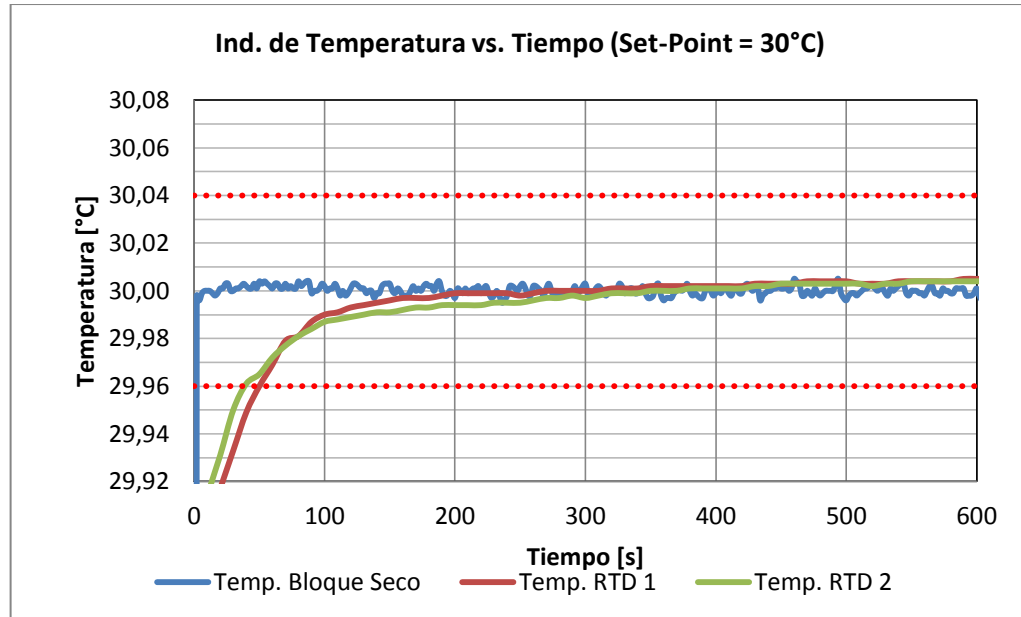


Figura 57. Indicación de temperatura para *set-point* en 30°C

Fuente: Autor

De la figura 57, en cuanto a indicación de las RTDs, se puede observar una tendencia que no se había presentado antes: sus líneas se cruzan mientras se aproximan al valor deseado. Esta situación debe asociarse a la posición y a la altura de la RTD #1 que debió recibir más calor que la RTD #2, haciendo que su temperatura se elevara (esto último puede corroborarse si se observa que para el *set-point* en 100°C, es la RTD #1 la que mide más calor de las dos). Para terminar con la indicación de las RTDs, en la figura 58 se observa un comportamiento inesperado ya que, si se tiene en cuenta la gráfica y los valores para el mismo *set-point* (100°C) en la prueba #1, es la RTD #1 la que tiene un comportamiento y unos valores similares, y no la RTD #2 como se esperaría, al ser la que se deja en la misma posición y con la misma inmersión en ambas pruebas.

En cuanto a la homogeneidad, para el *set-point* en 100°C, puede verse que la diferencia entre las indicaciones de las RTDs vuelve a ser muy grande e incluso desproporcional. La desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs fue de 0,0381°C, muy alejada a la obtenida para la prueba #1 en este mismo *set-point*,

la cual fue de $0,0008^{\circ}\text{C}$. Estos resultados no contradicen lo enunciado anteriormente sobre la tendencia de la homogeneidad en el inserto sino que, más bien, lo complementan, de modo que después de cierto punto de temperatura, la distribución de calor en el inserto deja de ser, nuevamente, uniforme. Sin embargo, es difícil decir en qué punto deja de serlo ya que habría que tener como referencia un punto intermedio entre 30°C y 100°C .

Otro aspecto importante que debe tenerse en cuenta es que, debido a la dispersión desproporcionada de los valores de temperatura vistos para la indicación de las RTDs y a que el tiempo de establecimiento en este punto no puede determinarse con certeza, puede que los valores obtenidos para homogeneidad también tengan que ser considerados particularmente para 100°C .

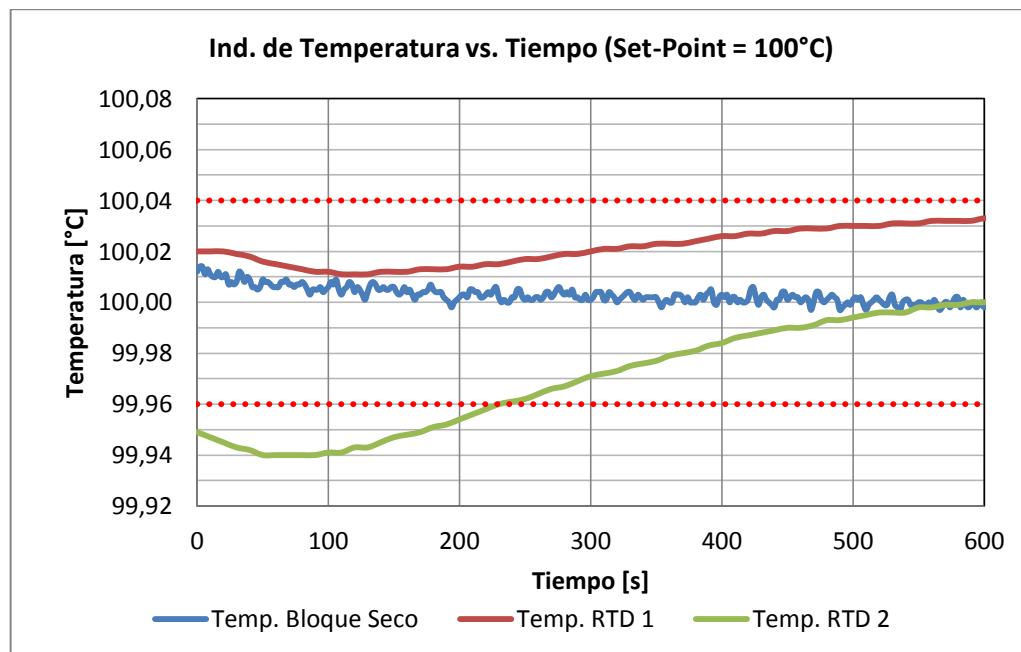


Figura 58. Indicación de temperatura para *set-point* en 100°C

Fuente: Autor

En general, en el análisis de la prueba #2, pueden verse 3 tendencias. La primera, es que el error entre las indicaciones de las RTDs respecto a los del sensor interno del bloque seco en los *set-points* extremos de la prueba (-10°C y 100°C), es mayor que en sus intermedios (10°C , 20°C y 30°C). La segunda es que el tiempo de establecimiento, a bajas temperaturas, no presenta una simultaneidad

como sí la presentaba en la prueba #1 pero, a medida que sube la temperatura, se hace simultánea. La tercera tendencia, es la que concierne a la homogeneidad, ésta, presenta la misma particularidad que para el tiempo de establecimiento, de modo que la distribución de calor para temperaturas bajas en el inserto del bloque seco no es totalmente uniforme pero a medida que sube la temperatura lo va siendo, sin embargo, a diferencia de la segunda tendencia, mientras se sigue incrementando la temperatura, la distribución de calor en el inserto no se mantiene uniforme.

Además, puede decirse que para el tiempo de establecimiento se corrobora lo que ocurrió en la prueba #1, en donde a temperaturas hasta de 30°C y tal vez un poco mayores, un tiempo que garantizaría una lectura confiable en el termómetro sería entre 5 y 5.5 minutos pero, para muy altas temperaturas, lo mejor sería esperar más de 9 o 10 minutos para registrar una temperatura confiable.

Teniendo en cuenta las tendencias globales para ambas pruebas, puede decirse que sus principales diferencias, como el retardo entre las indicaciones de las RTDs y la diferencia entre sí, surgen como consecuencia de tener la RTD #1 en una posición y una altura diferente en el inserto del bloque seco y, principalmente, de tener aire como segundo medio de transmisión de calor, de modo que no se obtiene la misma uniformidad en su distribución, como la que podría esperarse cuando la RTD tiene una inmersión total y tan solo hay un medio de transmisión de calor.

Por otro lado, la estabilidad del generador, parámetro que no dependía ni de las posiciones ni de las alturas de las RTDs, mantuvo su desempeño en ambas pruebas, lo que corrobora lo dicho en el párrafo anterior sobre las diferencias principales entre las dos pruebas, y confirma que el bloque seco 9142 tiene un gran desempeño metrológico.

Para terminar el análisis, quedaría por establecer si los resultados obtenidos satisfacen las especificaciones dadas por el fabricante. De la tabla 21, vemos que la especificación de la estabilidad es igual a $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Si se observa que en todas las gráficas de análisis de datos las líneas horizontales de la grilla están separadas entre sí 0.01°C , se puede decir que, para estabilidad, sí se satisface la especificación. Esto último, porque, una vez que el bloque seco entra en su estado estable alrededor del *set-point*, nunca supera en $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ su valor.

También de la tabla 21, en cuanto a homogeneidad radial, el valor especificado es

$\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Para establecer si se satisface o no, se empleará, de la tabla 22, la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs para cada set point. La tabla 22 corresponde a los resultados obtenidos en la prueba #1. Se decide tener en cuenta tan solo la prueba #1 ya que ésta se realizó con las RTDs a una misma altura. Si tomamos el valor máximo de la desviación enunciada, el cual corresponde a $0,0008^{\circ}\text{C}$, puede decirse que la homogeneidad radial obtenida, sí satisface, y con creces, la especificación dada por el fabricante.

Por último, en cuanto a homogeneidad axial, en la tabla 21 se ve que el valor especificado es $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Para este caso, para establecer si se satisface o no, también se utilizará el mismo criterio de evaluación empleado para la homogeneidad radial en el párrafo anterior pero utilizando la Tabla 23, la cual corresponde a los resultados obtenidos en la prueba #2, debido a que fue en esta prueba en la que hubo un cambio de altura para una RTD. En la comparación de los valores también debería tenerse en cuenta la desviación correspondiente a la homogeneidad radial, sin embargo, para ser más exigentes, no se tendrá en cuenta. De modo que, si se toma el valor máximo de la desviación entre las indicaciones promedio de las RTDs en la Tabla 23, el cual corresponde a $0,0381^{\circ}\text{C}$, puede decirse que la homogeneidad axial obtenida, sí satisface la especificación dada por el fabricante.

5.3.5 Conclusiones Pruebas FAT

En este apartado se mostrarán las conclusiones referentes a lo que se buscaba en las pruebas FAT en sí, es decir, desde un punto de vista global, como por ejemplo, si los equipos e instrumentos evaluados en las pruebas satisfacían las especificaciones dadas por los fabricantes. De modo que las conclusiones sobre el desempeño específico de un equipo o instrumento o de alguna de sus características se reservarán para más adelante, en las conclusiones finales del documento.

Como conclusión primordial de las pruebas FAT, es que todos los equipos e instrumentos de los sistemas de medida de temperatura y presión, satisfacen las especificaciones y los parámetros evaluados según los criterios preestablecidos, respondiéndose así a la pregunta realizada al principio de estas pruebas. Además, es necesario resaltar que no solo la satisfacen, sino que, en su gran mayoría, las superan enormemente, sorprendiendo su gran desempeño metrológico.

Otra conclusión por enunciar es que, debido a que los resultados fueron obtenidos, o bajo diferentes condiciones ambientales y/o bajo diferentes condiciones de comparación (como el hecho de tener a diferentes alturas las RTDs dentro del inserto), las pruebas FAT permiten esbozar lo que sería el desempeño de los equipos e instrumentos de las magnitudes presión y temperatura en campo.

Además, como consecuencia de las pruebas, también puede concluirse que, para todos los equipos e instrumentos de estas magnitudes, se pudo aprehender un conocimiento más profundo de su funcionamiento y de los recursos disponibles para maximizarlos, como es el caso de los software, los cuales facilitan el registro de datos y, por ejemplo, para el caso de los módulos de presión, mejoran su resolución.

5.4 ACONDICIONAMIENTO DE M3TLAB

A continuación se mostrarán las actividades realizadas contribuir al acondicionamiento eléctrico y mecánico de M3TLAB. Estas actividades empezaron una vez finalizada la construcción del vehículo. A pesar de su finalización, el vehículo requería unos cambios y ajustes, que lo mejoraran mecánicamente y aumentaran su vida útil.

Durante el acondicionamiento de M3TLAB siempre estuvieron trabajando alrededor de él, como mínimo, 10 personas, todos integrantes del grupo de desarrollo del mismo. Además, en el decurso de las actividades que se nombrarán a continuación, siempre hubo, como mínimo, otra persona colaborando.

5.4.1 Tornillería de las puertas y compuertas de M3TLAB

Para esta actividad, lo que se requería era cambiar los tornillos, tuercas y arandelas oxidables por tornillos, tuercas y arandelas inoxidable. La tarea, a pesar que era sencilla, fue bastante extensa ya que el M3TLAB cuenta con 2 puertas de acceso y 13 compuertas.

En un principio, se debió cortar y pulir los tornillos inoxidables ya que estos eran más extensos de lo que se requerían. Para estas acciones, el CDT de Gas cuenta

con un área de trabajo llamada Pruebas Hidrostáticas. Allí, con una prensa y un mototool, se cortaron según la altura requerida. Una vez cortados se procedía a pulirlos en un esmeril.

Finalmente, ya pulidos los tornillos, con las herramientas adquiridas para el uso exclusivo de M3TLAB, se procedió a cambiar la tornillería de sus puertas y compuertas.

5.4.2 Mecanismo de apertura de las puertas y compuertas de M3TLAB

En esta actividad se acondicionó el mecanismo de apertura y bloqueo de las puertas y compuertas de M3TLAB. Ese mecanismo está compuesto por bisagras, fallebas, tornillos tipo *micos* y guayas, entre otros, que requerían de un ajuste y, según el caso, un cambio por otras en mejor estado. Para el caso de las guayas, todas debieron ser cambiadas y, en el caso de que sus hilos se rompieran, estañadas.

Una vez terminados todos los ajustes, las puertas y compuertas podían bloquearse y desbloquearse con una llave que les permitía abrirse manualmente. Sin embargo, una necesidad de M3TLAB es que tuviera un sistema de apertura y bloqueo electrónico de modo que, con una alarma, se desbloqueara y bloquearan automáticamente las puertas.

Para lograr lo anterior, se empleó, en las 2 puertas y en 11 de las compuertas, un actuador eléctrico. Un actuador eléctrico es, básicamente, un motor con engranajes, el cual responde a un impulso eléctrico generando par, de modo que, al recibirlo, expande o contrae una pieza acoplada a su eje. Los actuadores se instalaron al lado del mecanismo mecánico y, en un principio, se mantuvieron desenergizados.

Para acoplar el actuador eléctrico al mecanismo de apertura y bloqueo, se utilizó una pieza mecánica llamada biela. La biela es la que se encarga de transmitir la fuerza generada por el actuador (cuando se le aplica un impulso eléctrico) al mecanismo de apertura y bloqueo. Para los actuadores instalados de un costado de M3TLAB, cuando su eje se contraía, bloqueaba el mecanismo, y cuando se expandía, lo desbloqueaba. Para el otro costado de M3TLAB, fue al contrario.

5.4.3 Cableado eléctrico

El cable utilizado fue uno de 4 hilos, cada uno con un color diferente. Todo el cableado partía o debía llegar hasta el sistema de protección y distribución eléctrica. En un principio, se procedió con el cableado principal del sistema eléctrico de M3TLAB, es decir, con los cables desde el sistema de protección y distribución eléctrica hacia el techo y las esquinas superiores. De ese modo, se podía distribuir el cableado principal hacia la parte media y baja de M3TLAB.

El cableado eléctrico continuó hacia la parte media interna y externa de M3TLAB, es decir, en su interior y hacia las puertas y compuertas de los compartimentos externos.

Finalmente, una vez terminado el cableado eléctrico de la parte media, se procedió al de la parte baja. La parte baja es por debajo del camión y debido a esto, se tuvieron varias complicaciones por lo incómodo que resultaba.

5.4.4 Canaletas para el cableado eléctrico

En la instalación de las canaletas, se quería, como principal requerimiento, que estuvieran en las posiciones menos visibles. En un principio, se instalaron las canaletas que soportaban el cableado eléctrico tanto de los actuadores de las puertas y compuertas como de la iluminación externa del M3TLAB, la cual, para ese momento, ya había sido instalada. Para terminar, se continuó con la Instalación de las canaletas que soportaban el cableado eléctrico de la iluminación interna de M3TLAB.

Durante este proceso se utilizó un taladro para la perforación de huecos y una remachadora que impidiera a las canaletas moverse de su sitio.

5.4.5 Acople entre actuadores y cableado eléctrico

Una vez finalizada la instalación de las canaletas, se procedió a acoplar los actuadores con el cableado eléctrico. El empalme empleado entre los cables de los actuadores eléctricos y su correspondiente color en el del cableado eléctrico, fue un tipo *western*, el cual permite una sujeción entre ellos muy fuerte. Sin embargo, para hacerlo aún más inseparable, cada empalme fue estañado.

5.4.6 Acople entre el cableado eléctrico y las luces de seguridad

Esta fue la última actividad de acondicionamiento realizada: acople de la red eléctrica con la Iluminación Normativa y de Seguridad para un vehículo. La Iluminación Normativa y de Seguridad fueron las luces en la parte baja que están sincronizadas con las señalizaciones direccionales y de frenado de un vehículo.

Debido a que el acople se realizó en la parte baja, es decir, bajo el camión, se tuvieron complicaciones por lo incómodo que resultaba y por el poco espacio que había.

6. APORTES AL CONOCIMIENTO

6.1 METROLOGÍA

En general, se aprehendió la importancia de la metrología y de su aplicación en la industria. Además de cuán fundamental es para el progreso de un país y, globalmente, para el progreso de la humanidad puesto que las mediciones son la base para el comercio y, a su vez, brindan confianza sobre la calidad de productos y/o servicios. Lo anterior sin decir que la metrología, al garantizar mediciones correctas en la prestación de servicios que satisfacen tanto al cliente como al proveedor (o fabricante), es un ejemplo de Justicia.

Además, a través de una capacitación, se aprendieron los principios básicos para estimar la incertidumbre de una medición, parámetro determinante para la confiabilidad de los resultados emitidos en las calibraciones.

6.2 EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

De todos los equipos e instrumentos del módulo de magnitudes secundarias se aprendió la forma de utilizarlos y, a través del manual, maximizarlos empleando sus funciones especiales. Además, de forma particular, de cada uno se aprendió en el momento en que se trató:

- Bloque Seco 9142 Fluke: Celdas Peltier, homogeneidad axial y radial, software 9930 INTERFACE-IT.
- RTDs 5609 Fluke: Conector Kelvin de 4 hilos, ajuste Callendar Van Dusen (que nunca fue nombrado en el documento).
- Termómetro 1524 Fluke: Conector INFO-CON.
- Módulos de presión 700P05, 700P27 y 700P09 Fluke: clase del instrumento, incertidumbre, software 700PCK Pressure Module Calibration Kit.
- Probador de tierra 1623 Fluke: determinar la resistencia de la toma de tierra por caída de potencial, resistencia selectiva y sin picas.
- Multímetro y Probador de aislamiento 1587 Fluke: La importancia de la resistencia de aislamiento, las Categorías de Medición.

Se aprendió a realizar plantillas con diseños basados en la evaluación y validación

de especificaciones de instrumentos de medición. Se conoció lo que son las pruebas de funcionamiento y aceptación, y de las pruebas FAT y SAT⁴¹, lo que son, cuándo deben hacerse, cómo y qué parámetros deben tenerse en cuenta.

Además de lo nombrado, se conocieron otros equipos e instrumentos empleados en la industria del gas. Por ejemplo, para la medición de cantidad de gas están los medidores rotativos, medidores tipo turbina y tipo diafragma, y para asegurar calidad del gas el cromatógrafo.

6.3 USO DE HERRAMIENTAS

Se adquirió conocimiento en materiales básicos de ingeniería y técnicas para su uso como son las herramientas (hombre solo, raches, copas, modos del taladro, entre otros), acoples (posilock, unión western, prensa estopa), tornillería (micos, diámetros, entre otros) y cables.

6.4 EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE I+D+I⁴²

Una de las experiencias más enriquecedoras fue la de haber trabajado con profesionales y estudiantes de muchas disciplinas de la ingeniería.

Durante el desarrollo de M3TLAB, se compartió con personal de Ingeniería Electrónica, Mecánica, Química e Industrial, de los cuales, en el día a día, además de pujar en sinergia buscando el mismo objetivo, se fue presentando un crecimiento de aprendizaje y enseñanza mutua que, en lo personal, permitió ampliar el conocimiento en todas estas áreas y optar por buscar soluciones innovadoras a los problemas que puedan presentarse.

⁴¹ *Site Acceptance Tests (Pruebas de Aceptación en Sitio)*. Estas pruebas fueron llevadas a cabo en un sistema de medición en Barranca y otro en Tunja por profesionales del CDT de Gas, quienes se desplazaron en el M3TLAB. El propósito de que fueran ejecutadas en estos dos sitios, fue que se probaran todos los equipos e instrumentos asociados a M3TLAB en situaciones climáticas extremas. Si se compara el propósito de las pruebas SAT con el de las pruebas FAT (para los equipos e instrumentos asociados a las magnitudes presión y temperatura), se verá que tienen su similitud puesto que estas últimas también fueron realizadas en dos escenarios extremos: *condiciones ambientales variables y condiciones ambientales controladas*.

⁴² Investigación + Desarrollo + Innovación

CONCLUSIONES

- Con las pruebas de funcionamiento y aceptación realizadas se comprobó que todos los equipos e instrumentos cumplían con su funcionamiento básico, mientras que las pruebas de aceptación FAT, demostraron que los equipos e instrumentos que se emplearán en las magnitudes presión y temperatura, funcionan de acuerdo a criterios preestablecidos y a las especificaciones dadas por el fabricante. Adicional a esto, se puede decir que las pruebas FAT permiten tener, en los equipos e instrumentos que fueron probados, un acercamiento al desempeño que tendrán en campo.
- Se verificó que el sistema de presión es muy estable, sin embargo, bajo condiciones ambientales variables, decae su estabilidad debido a que las fluctuaciones de temperatura hacen variar la presión del sistema.
- Se comprobó que las especificaciones de estabilidad y homogeneidad del Bloque Seco 9142 no solo se cumplían, sino que se superaban ampliamente, obteniéndose de éste un gran desempeño metrológico. Sin embargo, en la estimación de los errores para pruebas de desempeño metrológico en sistemas de temperatura, es necesario tener en cuenta las desviaciones referentes a homogeneidad axial y radial ya que, como fue comprobado, éstas influyen el resultado de la medición.
- Se observó que a bajas temperaturas y a temperaturas hasta de 30°C, un tiempo que garantizaría una lectura confiable de los valores medidos por las RTDs en el Termómetro 1524 sería entre 5 y 5.5 minutos pero, para muy altas temperaturas, lo mejor sería esperar más de 9 minutos.
- Se logró la integración de todos los equipos e instrumentos asociados al módulo de magnitudes secundarias de M3TLAB a través de la ejecución de las pruebas FAT y SAT. Además, se contribuyó a su acondicionamiento mecánico y eléctrico para que quedara plenamente funcional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BIPM, «VIM 3ra Edición Traducida al Español». [En línea]. Disponible en: http://www.inti.gob.ar/fisicaymetrologia/pdf/span_VIM.pdf. [Accedido: 08-may-2013].
- [2] MAQLAB, «INTRODUCCIÓN A LA NEUMÁTICA». [En línea]. Disponible en: http://maqlab.uc3m.es/NEUMATICA/Capitulo1/C1_indice.htm. [Accedido: 20-may-2013].
- [3] IPEM 56 Abraham Juarez, «ESTACIÓN METEOROLÓGICA». [En línea]. Disponible en: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/index.html>. [Accedido: 20-may-2013].
- [4] «Kelvin (4-wire) resistance measurement: Dc Metering Circuits». [En línea]. Disponible en: http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_8/9.html. [Accedido: 06-may-2013].
- [5] ARIAN Control & Instrumentación, «Pt100, su operación, instalación y tablas». [En línea]. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>. [Accedido: 06-may-2013].
- [6] Fluke Corp., «RTD 5608/5609 User's Guide». [En línea]. Disponible en: <http://download.flukecal.com/secure/5608-09 Ugeng0000.pdf?nvb=20130506203009&nva=20130506204509&token=0c4a106150cbcd9b012b8>. [Accedido: 06-may-2013].
- [7] Fluke Corp., «Termometer 1523/1524 Technical Guide». [En línea]. Disponible en: <http://download.flukecal.com/secure/1523-24 tgeng0200.pdf?nvb=20130506212421&nva=20130506213921&token=018a221197a07e3069638>. [Accedido: 06-may-2013].
- [8] Fluke Corp., «Fluke Brand Portal | powered by SyncForce». [En línea]. Disponible en: <http://fluke.informationstore.net/efulfillment.asp?publication=11272-eng>. [Accedido: 06-may-2013].
- [9] CHAUVIN ARNOUX GROUP, «Guía de Medición de Aislamiento». [En línea]. Disponible en: http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/3681/CAT_Guia_de_Medicion_de_Aislamiento.pdf. [Accedido: 14-may-2013].

- [10] Fluke Corp., «El ABC de la seguridad en las mediciones eléctricas». [En línea]. Disponible en: http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-175_nota.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [11] CONDEC, «Source 3000 Operation and Maintenance manual». [En línea]. Disponible en: http://www.4condec.com/docs/prodinfo/Condec_New_Site/manuals/m_65546_Source_3000.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [12] Fluke Corp., «Módulos de presión serie 700 Instrucciones». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/700pxx__isspa1200.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [13] Fluke Corp., «Multicalibrador 754 Manual de uso». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/75x____umspa0100.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [14] Flickr, «Calibrador Multifunção de Processos Fluke 754», 28-mar-2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.flickr.com/photos/eprcom/6175444106/>. [Accedido: 06-may-2013].
- [15] Fluke Corp., «Bloque Seco 9142 Guía del usuario». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/9142_43_ugspa0000.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [16] «5608 & 5609: Platinum Resistance Thermometer | Fluke Calibration: United States». [En línea]. Disponible en: <http://us.flukecal.com/products/temperature-calibration/probessensors/secondary-standard-prts/56085609-secondary-prts-cal-2?geop=1>. [Accedido: 06-may-2013].
- [17] Fluke Corp., «Measure, graph and record three sensor types with one tool». [En línea]. Disponible en: <http://www.firmtest.com/2009OctorberProduct/152X.pdf>. [Accedido: 06-may-2013].
- [18] Fluke Corp., «Multímetros de aislamiento 1587/1577 Manual de uso». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/15x7____umspa0200.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [19] Fluke Corp., «Fluke 1587 from TMG». [En línea]. Disponible en: http://www.tmgtestequipment.com.au/products/index.php?app=bkd0&ns=prods how&ref=Fluke_1587. [Accedido: 06-may-2013].

- [20] Fluke Corp., «Industrial ScopeMeter Fluke 123/124 Users Manual». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/123_124_umeng0400.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [21] Fluke Corp., «Fluke ScopeMeter 123/124». [En línea]. Disponible en: <http://www.conrad-uk.com/ce/en/product/122670/Fluke-ScopeMeter-123421-2-Channel-hand-held-oscilloscope-Scope-Meter-hand-heldBandwidth-20-MHz>. [Accedido: 06-may-2013].
- [22] Fluke Corp., «Probador de tierra 1623 Manual de uso». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/1623_umspa0000.pdf. [Accedido: 06-may-2013].
- [23] Fluke Corp., «Medida de la resistencia de la toma de tierra en edificios comerciales, residenciales y en plantas industriales». [En línea]. Disponible en: http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/3068345_6115_SPA_B_W.PDF. [Accedido: 06-may-2013].
- [24] «Fluke 1623 Basic GEO Earth Ground Tester | Optimum Stores». [En línea]. Disponible en: <http://www.optimumstores.com/fluke-1623-basic-geo-earth-ground-tester.html>. [Accedido: 06-may-2013].
- [25] Fluke Corp., «Pinzas para comprobación selectiva/sin picas». [En línea]. Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/eses/Accesorios/Sondas-Amperimetricas/EI-1623.htm?PID=55962>. [Accedido: 06-may-2013].
- [26] VAISALA, «Prueba de aceptación». [En línea]. Disponible en: <http://es.vaisala.com/sp/test/archive/services/deliveryprojects/Pages/acceptancetesting.aspx>. [Accedido: 07-may-2013].
- [27] Kestrel, «Kestrel 4500 Bluetooth Weather Tracker Anemómetro». [En línea]. Disponible en: <http://www.optical-systems.com/kestrel-4500-bluetooth-weather-tracker-anemometro-p-24151.html>. [Accedido: 07-may-2013].
- [28] PRESYS, «Calibrador de presión PC-507». [En línea]. Disponible en: <http://www.hispacontrol.com/presion/128-calibrador-de-presion.html>. [Accedido: 07-may-2013].
- [29] Fluke Corp., «Modulos de presión series 700 Datos técnicos». [En línea]. Disponible en: http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/productos/Fluke%20700PXX.pdf. [Accedido: 07-may-2013].

- [30] Fluke Corp., «700PCK Pressure Calibration Kit». [En línea]. Disponible en: http://assets.fluke.com/manuals/700pck__isspa0300.pdf. [Accedido: 07-may-2013].
- [31] Fluke Corp., «Fluke 700PCK Pressure Calibration Kit». [En línea]. Disponible en: http://www.obiat.com.au/fluke_700pck_pressure_calibration_kit.htm. [Accedido: 07-may-2013].
- [32] K. J. Astrom y L. Rundqwist, «9930 INTERFACE IT», en *American Control Conference, 1989*, 1989, pp. 1693–1698.

ANEXOS

Se encuentran en la carpeta *Anexos* de este CD