

**Modernización del banco de pruebas Precision Pressure Test Set del Centro de Mantenimiento**

**Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana**

Arias Gallegos, Antonio Fabricio

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,

Automatización y Control

Ing. León Pérez, Paola Rita, MsC.

19 de marzo del 2020

## Curiginal

### Document Information

Analyzed document	Antonio Arias Proyecto de Titulación Revisión.pdf (D99412652)
Submitted	3/24/2021 4:30:00 AM
Submitted by	Paola León
Submitter email	rpleon1@espe.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	rpleon1.espe@analysis.ukund.com

### Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de Titulación REVISIÓN.pdf	4
	Document: Proyecto de Titulación REVISIÓN.pdf (D98841840)	
	Submitted by: rpleon1@espe.edu.ec	
	Receiver: rpleon1.espe@analysis.ukund.com	

1/22

Firma:



Ing. León Pérez, Paola Rita, MsC.

DIRECTORA



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "**Modernización del banco de pruebas Precision Pressure Test Set del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana**" fue realizado por el señor **Arias Gallegos, Antonio Fabricio** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de marzo de 2021

Firma:

**Ing. León Pérez, Paola Rita, MsC.**

C. C.: 1714599097



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Arias Gallegos, Antonio Fabricio**, con cédula/cedulas de ciudadanía n°172159589-8, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Modernización del banco de pruebas Precision Pressure Test Set del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 19 de marzo de 2021**

Firma

**Arias Gallegos, Antonio Fabricio**

C.C.: 172159589-8



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Arias Gallegos, Antonio Fabricio**, con cédula de ciudadanía n°172159589-8, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Modernización del banco de pruebas Precision Pressure Test Set del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 19 de marzo de 2021**

Firma

  
.....  
**Arias Gallegos, Antonio Fabricio**  
C.C.:172159589-8

## Índice de Contenido

Índice de Contenido .....	6
Índice de Tablas .....	12
Índice de Figuras .....	124
Resumen .....	18
Abstract.....	19
Capítulo I.....	20
Generalidades .....	20
Antecedentes.....	20
Planteamiento del Problema.....	23
Justificación e Importancia .....	25
Alcance.. ..	26
Objetivos.....	27
Objetivo General .....	27
Objetivos Específicos.....	27
Capítulo II.....	29
Fundamentación Teórica .....	29
Introducción .....	29
La Medición de los Datos de Aire .....	29
Los Datos de Aire y su Importancia .....	31

	7
Información de Datos de Aire para el Piloto .....	31
Información de Datos de Aire para Subsistemas claves .....	32
Instrumentos de Datos de Aire.....	34
Altímetro .....	34
Indicador de Velocidad Vertical .....	35
Indicador de Velocidad de Aire .....	37
Indicador de Número Mach .....	38
Metrología y Calibración de Instrumentos.....	40
Metrología y Calibración de Instrumentos de Presión .....	41
Barómetros Electrónicos.....	42
Capítulo III.....	45
Estado Actual y Diagnóstico.....	45
Descripción General .....	45
Componentes del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	45
Bomba de Vacío Varian SD-200.....	46
Barómetro Meriam 310EC10 TM.....	48
Manómetro Meriam 33KB35 TM .....	48
Reguladores de Presión.....	49
Válvulas .....	50
CEC 2500.....	50

Microprocesador Indicador de Presión.....	51
CEC 5000 Sputtered Thin Film.....	53
Diagrama Esquemático Eléctrico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	55
Diagrama Esquemático Neumático del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	56
Funcionamiento del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	56
Requerimientos Mínimos.....	56
Operación inicial del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	57
Calibración y Pruebas de Altímetros.....	57
Calibración y Pruebas de Indicadores de Velocidad .....	58
Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad en el Rango de 0 a 250 [kts] .....	59
Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad en el Rango de 0 a 250 [kts] .....	59
Calibración y Prueba de Indicadores de Mach.....	60
Diagnóstico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	61
Diagnóstico del Sistema Neumático del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” ..	62
Diagnóstico de los Elementos del Sistema Neumático del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	62
Diagnóstico del Funcionamiento del Sistema Neumático del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	66
Diagnóstico del Sistema Electrónico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” ..	67



Diagnóstico de los elementos del Sistema Electrónicos del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	67
Diagnóstico del Funcionamiento del Sistema Electrónico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....	69
Capítulo IV.....	70
Diseño e Implementación .....	70
Análisis de Filosofía de Operación del Banco de Pruebas .....	71
Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Altímetros .....	71
Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad .....	71
Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Match .....	72
Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Pruebas de Indicadores de Velocidad Vertical .....	72
Análisis de Requerimientos Técnicos del Banco de Pruebas.....	73
Análisis de Requerimientos Técnicos del Sistema de Instrumentación.....	73
Análisis de Requerimientos Técnicos del Sistema de Control.....	74
Modelo Físico de la Modernización del Banco de Pruebas .....	76
Selección de Componentes .....	77
Selección de Componentes del Sistema de Instrumentación.....	77

Criterios de Selección y Alternativas de los Componentes del Sistema de instrumentación.....	77
Matriz de Selección de los Componentes del Sistema de Instrumentación.....	81
Selección de Componentes del Sistema de Control.....	83
Criterios de Selección y Alternativas de los Componentes del Sistema de Control .....	83
Matriz de Selección de los Componentes del Sistema de Control .....	88
Diseño Propuesto para la Modernización del Banco de Pruebas.....	90
Diagramas de Flujo de Proceso para la Modernización del Banco de Pruebas .....	90
Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Altímetros .....	91
Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad....	92
Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Match .....	93
Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad Vertical .....	94
Diagramas Eléctricos para la Modernización del Banco de Pruebas .....	95
Diagrama Neumático para la Modernización del Banco de Pruebas.....	104
Distribución del Tablero de Control .....	105
Desarrollo del Software para la Modernización del Banco de Pruebas .....	106
Diagrama de Flujo del Programa Principal.....	107
Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Altímetros.....	108

	11
Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Bajas.....	109
Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Altas .....	110
Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match .....	111
Diagrama de Flujo Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical.....	112
Diseño de la Interfaz Hombre-Maquina para la Modernización del Banco de Pruebas .....	113
Arquitectura y Navegación de la Interfaz Hombre-Maquina .....	113
Distribución de Pantallas y Uso de Colores de la Interfaz Hombre-Maquina .....	114
Pantallas de la Interfaz Hombre-Máquina .....	115
Implementación y Montaje de la Modernización del Banco de Pruebas.....	118
Capítulo V.....	122
Pruebas y Resultados .....	122
Pruebas de Funcionamiento del Banco de Pruebas .....	122
Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Altímetros .....	122
Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad .....	123
Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match .....	124
Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical .....	125
Capítulo VI.....	127
Conclusiones y Recomendaciones .....	127

	12
Conclusiones.....	127
Recomendaciones.....	128
Bibliografía .....	129
Anexos.....	130

### Índice de Tabas

<i>Tabla 1 Requisitos de Incertidumbre para Instrumentos de Medición de Presión.....</i>	41
<i>Tabla 2 Cantidades y Rangos del Banco de Pruebas .....</i>	45
<i>Tabla 3 Lista de Partes del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” .....</i>	46
<i>Tabla 4 Características Técnicas de la Bomba de Vacío SD-200 .....</i>	47
<i>Tabla 5 Características Técnicas del CEC 2500.....</i>	51
<i>Tabla 6 Características Técnicas del UPR685 .....</i>	52
<i>Tabla 7 Características Técnicas del CEC 5000.....</i>	54
<i>Tabla 8 Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Altímetros.....</i>	58
<i>Tabla 9 Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad de Aire de 0 a 250 [kts]. .....</i>	59
<i>Tabla 10 Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad de Aire de 0 a 850 [kts]. .....</i>	60
<i>Tabla 11 Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Mach.....</i>	61
<i>Tabla 12 Tabla de Requerimientos Técnicos del Sistema de Instrumentación.....</i>	74
<i>Tabla 13 Requerimientos Técnicos del Sistema de Control .....</i>	75

Tabla 14	<i>Modelo Físico de la Modernización del Banco de Pruebas</i> .....	76
Tabla 15	<i>Alternativas para el Transmisor de Presión Absoluta</i> .....	78
Tabla 16	<i>Alternativas para el Transmisor de Presión Relativa</i> .....	79
Tabla 17	<i>Alternativas para el Transmisor de Presión Diferencial</i> .....	80
Tabla 18	<i>Matriz de Selección del Transmisor de Presión Absoluta</i> .....	81
Tabla 19	<i>Matriz de Selección del Transmisor de Presión Relativa</i> .....	82
Tabla 20	<i>Matriz de Selección del Transmisor de Presión Diferencial</i> .....	82
Tabla 21	<i>Alternativas para la Electroválvula Proporcional</i> .....	84
Tabla 22	<i>Alternativas para la Electroválvula Solenoide</i> .....	85
Tabla 23	<i>Especificaciones Técnicas de la Válvula Reguladora</i> .....	86
Tabla 24	<i>Alternativas para el Controlador Lógico Programable</i> .....	87
Tabla 25	<i>Especificaciones Técnicas de la Pantalla</i> .....	87
Tabla 26	<i>Matriz de Selección de la Electroválvula Proporcional</i> .....	89
Tabla 27	<i>Matriz de Selección de la Electroválvula Solenoide</i> .....	89
Tabla 28	<i>Matriz de Selección del Controlador Lógico Programable</i> .....	90
Tabla 29	<i>Componentes del Tablero de Control del Banco de Pruebas</i> .....	106
Tabla 30	<i>Pantallas de la Interfaz Hombre-Máquina</i> .....	116

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama esquemático del diseño propuesto</i> .....	27
Figura 2 <i>Sistema básico de datos de aire</i> .....	30
Figura 3 <i>Flujo de datos de aire a los subsistemas de aviónica</i> .....	33
Figura 4 <i>(a) Pantalla del altímetro. (b) Esquema mecánico del altímetro</i> .....	35
Figura 5 <i>(a) Pantalla del VSI. (b) Esquema mecánico del VSI</i> .....	36
Figura 6 <i>Escenarios del indicador de velocidad vertical</i> .....	37
Figura 7 <i>(a) Pantalla del ASI. (b) Esquema mecánico del ASI</i> .....	38
Figura 8 <i>(a) Pantalla del indicador de número Mach. (b) Esquema mecánico del indicador de número Mach</i> .....	40
Figura 9 <i>Bomba de Vacío Varian SD-200</i> .....	47
Figura 10 <i>Barómetro de Mercurio Merima 310EC10 TM</i> .....	48
Figura 11 <i>Manómetro Meriam 33KB35 TM</i> .....	49
Figura 12 <i>(a) Regulador de Presión Mego Afek 3 [bar] (b) Regulador de Presión Teknova 170 [lb]</i> .....	50
Figura 13 <i>Válvulas dosificadoras Hoke Incorp. 1325</i> .....	50
Figura 14 <i>Barómetro Digital CEC 2500</i> .....	51
Figura 15 <i>Microprocesador Indicador de Presión Dynisco uPR 685</i> .....	52
Figura 16 <i>Transductor de Presión CEC 5000</i> .....	53
Figura 17 <i>Esquema Eléctrico del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"</i> .....	55
Figura 18 <i>Esquema Neumático del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"</i> .....	56
Figura 19 <i>Compresor de aire del Banco de Pruebas</i> .....	62
Figura 20 <i>Bomba de vacío del Banco de Pruebas</i> .....	63

Figura 21	<i>Red de tuberías del Banco de Pruebas</i> .....	64
Figura 22	<i>Válvulas reguladoras de presión del Banco de Pruebas</i> .....	65
Figura 23	<i>Válvulas dosificadoras del Banco de Pruebas</i> .....	66
Figura 24	<i>Barómetro digital CEC 2500</i> .....	67
Figura 25	<i>Microprocesador Indicador de Presión UPR685</i> .....	68
Figura 26	<i>Transductor de Presión CEC 5000</i> .....	69
Figura 27	<i>Diagrama PI&amp;D del Proceso de Calibración y Prueba de Altímetros</i> .....	91
Figura 28	<i>Diagrama PI&amp;D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad</i> .....	92
Figura 29	<i>Diagrama PI&amp;D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Match</i> .....	93
Figura 30	<i>Diagrama PI&amp;D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad Vertical</i> .....	94
Figura 31	<i>Diagrama Eléctrico de Fuerza</i> .....	95
Figura 32	<i>Diagrama Eléctrico de Activación de Solenoides</i> .....	96
Figura 33	<i>Diagrama Eléctrico de Conexión de Equipos Electrónicos</i> .....	97
Figura 34	<i>Diagrama Eléctrico de las Entradas Digitales 1</i> .....	98
Figura 35	<i>Diagrama Eléctrico de las Entradas Digitales 2</i> .....	99
Figura 36	<i>Diagrama Eléctrico de las Salidas Digitales 1</i> .....	100
Figura 37	<i>Diagrama Eléctrico de las Salidas Digitales 2</i> .....	101
Figura 38	<i>Diagrama Eléctrico de las Entradas Análogas</i> .....	102
Figura 39	<i>Diagrama Eléctrico de las Salidas Análogas</i> .....	103
Figura 40	<i>Diagrama Neumático de la Modernización del Banco de Pruebas</i> .....	104
Figura 41	<i>Distribución del Tablero de Control del Banco de Pruebas</i> .....	105
Figura 42	<i>Diagrama de Flujo del Programa Principal</i> .....	107

Figura 43 <i>Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Altimetros</i> .....	108
Figura 44 <i>Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad</i> ..	109
Figura 45 <i>Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Altas</i> .....	110
Figura 46 <i>Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match</i> .....	111
Figura 47 <i>Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical</i> .....	112
Figura 48 <i>Arquitectura de la Interfaz Hombre-Máquina</i> .....	114
Figura 49 <i>Distribución de la pantalla 1 de la Interfaz Hombre-Máquina</i> .....	114
Figura 50 <i>Distribución de la pantalla 2 de la Interfaz Hombre-Máquina</i> .....	115
Figura 51 <i>Montaje de los elementos de control y conexión eléctrica</i> .....	119
Figura 52 <i>Montaje de los componentes de instrumentación/control y conexión neumática</i> .....	120
Figura 53 <i>Acoplamiento de los sistemas de instrumentación y control a los elementos patrón</i>	120
Figura 54 <i>Vista interior y exterior del montaje del tablero de control</i> .....	121
Figura 55 <i>Prueba de Funcionamiento de Comprobación y/o Calibración de Altimetro a 12.000 pies</i> .....	122
Figura 56 <i>Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad a 40 nudos</i> .....	123
Figura 57 <i>Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad a 200 nudos</i> .....	124
Figura 58 <i>Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match a 20.000 pies y 376 nudos</i> .....	125



Figura 59 <i>Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical de 2.000 a 4.000 pies</i> .....	126
---	-----

## Resumen

El Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” de la Israel Aircraft Industries (IAI) del Centro de Mantenimiento de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, basado en un sistema neumático generador de presión y vacío controlado de forma manual e instrumentado análogamente, con la capacidad de simular altitudes y velocidades para realizar la comprobación y/o calibración de instrumentos de vuelo como altímetros, indicadores de velocidad de aire, indicadores de match, indicadores de velocidad vertical; sin embargo, el modo de operación y la instrumentación del Banco de Pruebas condicionan a los procesos de comprobación y/o calibración a posibles fallas, y un funcionamiento deficiente. Se propuso la modernización del Banco de Pruebas con el objetivo de optimizar los procesos de comprobación y calibración y mitigar los posibles errores causados por la mala operación y toma de lecturas del personal técnico, de esta forma se mejora las prestaciones de los servicios que ofrece el centro de mantenimiento. Mediante el proceso del diseño e implementación de un sistema de instrumentación y control basado en la integración de un PLC, electroválvulas, transmisores de presión y una pantalla que cumplen con sus especificaciones técnicas los requerimientos funcionales y técnicos, se generó al personal técnico la capacidad de controlar y monitorear los procesos de comprobación/calibración y obtener una lectura digital y precisa de las altitudes y velocidades requeridas para el proceso de comprobación y/o calibración de los instrumentos de aire: altímetro, indicador de velocidad de aire, indicador de match e indicador de velocidad vertical brindado a la flota aérea de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

### Palabras clave

- **BANCO DE PRUEBAS**
- **PRESIÓN**
- **VACÍO**
- **MODERNIZACIÓN**

### **Abstract**

The "Precision Pressure Test Set" test bench of the Israel Aircraft Industries (IAI) of the Ecuadorian Air Force Maintenance Center, based on a manually controlled and similarly instrumented pneumatic pressure and vacuum generator system, with the ability to simulated altitudes and speeds to perform the checking and / or calibration of flight instruments such as altimeters, airspeed indicators, coincidence indicators, vertical speed indicators; However, the operating mode and the instrumentation of the Test Bench condition the verification and / or calibration processes to possible failures and poor performance. The modernization of the Test Bench was proposed with the aim of optimizing the verification and calibration processes and mitigating possible errors caused by poor operation and taking readings by technical personnel, thus improving the services provided. offers the maintenance center.

Through the process of designing and implementing an instrumentation and control system based on the integration of a PLC, solenoid valves, pressure transmitters and a screen that meet their technical specifications, functional and technical requirements, the technical staff was given the ability to control and monitor the verification / calibration processes and obtain a digital and precise reading of the altitudes and speeds required for the verification and / or calibration process of the air instruments: altimeter, air speed indicator, match indicator and indicator of vertical speed provided to the air fleet of the Ecuadorian Air Force.

#### **Key words**

- **TEST BENCH**
- **PRESSURE**
- **VACUUM**
- **MODERNIZATION**

## Capítulo I

### Generalidades

#### Antecedentes

El Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, nace con la aspiración de satisfacer las necesidades propias de la institución, y brindar soporte técnico y de mantenimiento de las aeronaves pertenecientes a los diferentes escuadrones de combate, transportes y rescate de los repartos de FAE, con la misión de ejecutar procesos técnicos y administrativos para dirigir actividades que se realizan a nivel de depósito en los departamentos de: Metrología, Mantenimiento de Aeronaves, Mantenimiento de la Defensa Aérea, Electrónica y Armamento.

Este Centro de Mantenimiento se encuentra ubicado en la ciudad de Latacunga, funciona en las inmediaciones Base Aérea “Cotopaxi”, sus instalaciones prestan las facilidades para ejecutar el tipo de trabajo que realiza; además se encuentran previamente certificadas, para su operación normal. Dentro de estas instalaciones se proporciona mantenimiento preventivo y correctivo a equipos electrónicos de comunicación, navegación e instrumentación de aviones privados, comerciales y militares, en su laboratorio se encuentran dotados con bancos de prueba, calibrados y certificados bajo las normas NIST/NBS (USA).

El Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” de la Israel Aircraft Industries (IAI), diseñado para probar y calibrar todo tipo de instrumentos de vuelo como altímetros, indicadores de velocidad de aire, indicadores de velocidad de ascenso, indicadores de velocidad MACH; está constituido por un barómetro y un manómetro de mercurio, indicadores de velocidad de aire, un sistema neumático alimentado por un compresor y controlado de forma manual por válvulas, un barómetro digital CEC 2500

mismo que se encuentra defectuoso y obsoleto, razón por la cual las tareas de calibración de los instrumentos, son realizadas mediante la activación y regulación manual de válvulas del sistema por parte los técnicos, y la lectura análoga de medidas en los instrumentos de mercurio, estas condiciones adicionales a las que se encuentra cualquier equipo de calibración, generan que las dichas tareas de mantenimiento y calibración sean vulnerables a fallas.

En la conferencia del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), National Aerospace and Electronics Conference-NAECON de 1993, (Young, 1993) publica el artículo científico "Fuzzy Controller for a Pitot-Static Test Set", mismo que desarrolla el diseño de un circuito de control neumático con lógica difusa en un banco de pruebas Pitot-estático para aeronaves en tierra, el sistema se diseñó con el objetivo de lograr presiones de salida deseadas a velocidades determinadas para simular tanto la velocidad del aire (presión dinámica) como la altitud (presión estática), además de control neumático durante una ejecución de prueba real de la aeronave, realiza tareas como: comprobación interna, ventilación y cálculos de error de presión, el software es realizado en lenguaje de programación C y ejecutado en un microprocesador MC 68000.

(Ludwig, 2009) En la Universidad de Tennessee-Knoxville, realizó la tesis "Flight Test and Evaluation of a Low-Cost, Compact, and Reconfigurable Airborne Data Acquisition System Based on Commercial Off The-Shelf Hardware", con el objetivo de desarrollar un sistema de adquisición de datos para investigación de aviación general y pruebas de vuelo de certificación basadas en un hardware comercial de bajo costo, en particular, un sistema de cabina de vidrio común para aeronaves experimentales. Se utilizó una computadora de plataforma para monitorear las comunicaciones de datos entre los diversos dispositivos del sistema electrónico de información de vuelo de la tecnología Grand Rapids (GRT). Luego, los datos monitoreados se exhibieron para su uso durante el vuelo y se registraron a bordo del avión para la reducción de datos posteriores al vuelo. El sistema y el software desarrollados se probaron en simulación

en hardware virtual y real. Se realizó una calibración de datos aéreos en vuelo y varios puntos comunes de prueba de certificación de estabilidad y control para evaluar y demostrar la utilidad del sistema.

(Abbas et al., 2011) presenta un enfoque para automatizar las técnicas de prueba de datos aéreos. Tradicionalmente, el sistema de prueba de datos de aire se programa manualmente con diferentes valores, utilizando el teclado numérico incorporado en el equipo, para calibrar los sensores de presión y altitud de un vehículo o avión. Este artículo presenta la implementación de una aplicación de ADS a través de la interfaz GPIB. La GUI desarrollada permite pruebas extensivas del sensor en tiempo limitado, se desarrolló una aplicación en LabVIEW que se comunica con ADTS a través de GPB, con el objetivo final de reducir la sobrecarga de trabajo del usuario, con una aplicación más dinámica y secuencias de valores de entrada, y estos valores se recogen uno por uno automáticamente en un intervalo regular establecido por el usuario. Finalmente, se registra un archivo de salida para su análisis. Este tipo de automatización ayuda a reducir drásticamente el tiempo de operación.

En el artículo científico (Malaquias & Thums, 2012) se presenta el diseño, desarrollo y fabricación de un tubo inalámbrico Pitot-estático para ser utilizado en pruebas de vuelo, donde se detalla la metodología del diseño mecánico y electrónico, calibración y prueba de validación de dicho sistema. Este tubo se utilizará para medir la velocidad, la presión estática (para determinar la altitud) y también los ángulos de ataque y deslizamiento lateral de la aeronave. El tubo de Pitot trabaja junto con un sistema de adquisición de datos llamado CEA-FDAS (Sistema de adquisición de datos de vuelo) que es un sistema de adquisición desarrollado en CEA - Centro de Estudios Aeronáuticos (Centro de Estudios Aeronáuticos), de la Universidad Federal de Minas Gerais (Oliveira, 2008).

Mediante la conferencia internacional de Ingeniería en Computación, Control, Redes, Electrónica y Sistemas Integrados, (Abdelrahman & Suliman, 2015) publican el artículo científico con título "Development of a Computer Based Aircraft Pitot-Static Instruments Test System", el mismo que se centra

en el diseño de un sistema de prueba de instrumentos Pitot-estáticos para aeronaves utilizando una computadora personal, el funcionamiento del principio general del sistema diseñado es que los transductores detectan la presión Pitot-estática y envían los valores equivalentes al convertidor análogo-digital (ADC) incorporado en el dispositivo de adquisición de datos (DAQ), el DAQ envía los valores correspondientes de la presión a la computadora portátil, donde se calcula los valores correspondientes de velocidades, altitud y número de Mach de acuerdo con algunos modelos matemáticos, y finalmente muestra los datos usando una ventana gráfica de interfaz de usuario (GUI) programada en Visual Basic para simular los instrumentos reales y permitir al usuario controlar los eventos de prueba. A diferencia de los otros sistemas de prueba existentes, el sistema desarrollado es fácil de usar, proporciona una buena precisión de medición y precisión. Además de eso, es portátil, por lo que se puede usar ya sea en la línea de vuelo o en el taller. El autor recomienda como una mejora a futuro de este diseño la utilización de una bomba de vacío de presión automática en lugar de la bomba manual del diseño, además de eso aumentar el rango de operación del sistema para incluir velocidades supersónicas y altitudes superiores a 15 km.

### **Planteamiento del Problema**

La Administración Federal de Aviación estadounidense (FAA) define una aeronave como aeronavegable si: la aeronave conforme a su diseño y tipo; está en condiciones legales y de ingeniería para un vuelo seguro (Gratton, 2015, p. 1); para ello las mediciones precisas de la velocidad y la altitud son esenciales para una operación segura y eficiente de la aeronave. Se necesitan mediciones de velocidad precisas, por ejemplo, para evitar la pérdida de control a bajas velocidades (condición de pérdida) y para evitar superación de las limitaciones aerodinámicas y estructurales de la aeronave a altas velocidades, así como mediciones precisas de altitud para asegurar la distancia de los obstáculos del terreno y mantener los mínimos de separación vertical prescritos a lo largo de las vías aéreas (Gracey, 1994, p. 1). Dichas

medidas son presentadas mediante los instrumentos de vuelo que incluyen el altímetro, el indicador de velocidad aérea, el Machmeter y el indicador de velocidad de ascenso (velocidad vertical), por tal motivo el mantenimiento y calibración de estos instrumentos son de esencial importancia para asegurar la aeronavegabilidad de las aeronaves.

Por lo tanto, la Fuerza Aérea Ecuatoriana cuenta con el Centro de Mantenimiento Aeronáutico acantonado en la Base Aérea “Cotopaxi” en la ciudad de Latacunga, unidad encargada de realizar las inspecciones del nivel de depósito, entre ellas las tareas de mantenimiento y calibración de los instrumentos de vuelo de las diferentes aeronaves de la institución, mediante el empleo del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”, diseñado para probar y calibrar todo tipo de instrumentos de vuelo a través de un sistema neumático generador de presión y vacío e instrumentos de medición de presión análogos y digitales que pueden simular la altitud y velocidad de los equipos abordo de la aeronave; sin embargo, los sistemas e instrumentos electrónicos de este equipo no se encuentran en funcionamiento y su reparación se dificulta a razón de la obsolescencia de sus componentes, ocasionando que las tareas de mantenimiento sean realizadas de una forma totalmente manual y análoga susceptible de fallas, como es el error de paralaje, afectando directamente la calibración de los instrumentos, perjudicando así el cumplimiento óptimo y eficaz de las tareas que lleva a cabo el personal del Centro de Mantenimiento de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

En vista de lo anterior, en este proyecto se plantea el proceso de modernización del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” del Centro De Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, que pretende mejorar la metodología y eficiencia de operación de la calibración de instrumentos de vuelo, mediante la digitalización de instrumentos y la automatización del sistema.



## **Justificación e Importancia**

La Fuerza Aérea Ecuatoriana, consciente de la necesidad de proporcionar un soporte técnico y de calidad, tanto a sus propias aeronaves de entrenamiento, combate y transporte, así como a las aeronaves civiles, ha creado el Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, cumpliendo con los controles de calidad más exigentes, brinda los servicios de mantenimiento de aviones, motores, hélices y equipos de aviónica, trabajo que se realiza en estricto apego a las normas internacionales con la finalidad de garantizar la seguridad en las operaciones de vuelo, optimizar el tiempo de reparación y reducir costos.

Los instrumentos de vuelo están sujetos a exigentes requisitos de seguridad, para garantizar un funcionamiento preciso y su compatibilidad global, de igual manera requieren un equipo de prueba altamente confiable que satisfaga la gran variedad de exigentes requisitos en todas las áreas y tareas: desde calibración y mantenimiento hasta investigación y desarrollo; Por lo que el presente proyecto propone modernizar el Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set" del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, mediante la automatización del sistema electroneumático, la digitalización de instrumentos de medida, con el objetivo de obtener una mejora en la precisión y eficiencia en las tareas de mantenimiento y calibración, optimizar el tiempo de reparación, reducir costos, aumentar la disponibilidad operacional, y asegurar la aeronavegabilidad de las aeronaves de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

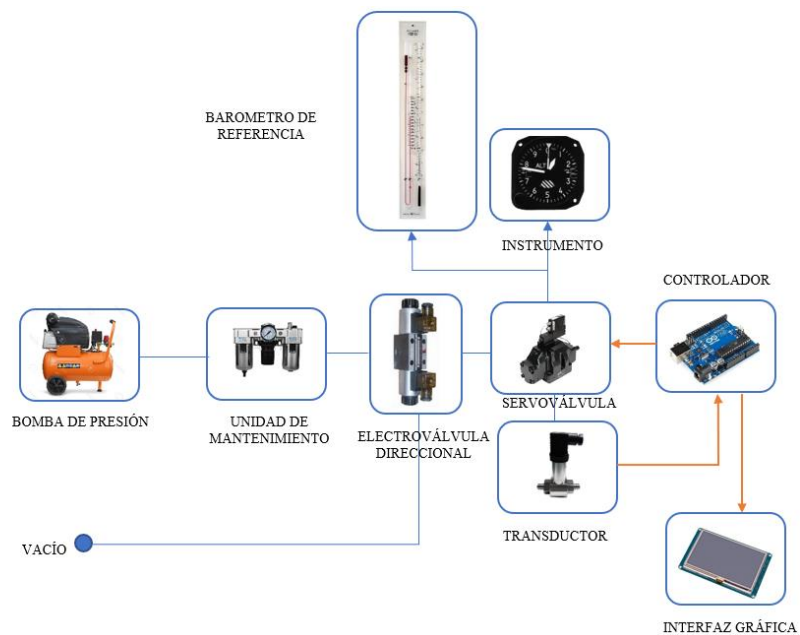
## Alcance

Para realizar la modernización del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set" del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana se pretende diseñar e implementar de un sistema electroneumático generador de presión y vacío, el mismo que tendrá la capacidad de simular velocidades y altitudes, que se encuentran en los rangos y escalas de los diferentes instrumentos aeronáuticos; el sistema tendrá por fuente de alimentación neumática un compresor de aire capaz de entregar hasta máximo 110 PSI, suficiente para alcanzar presiones correspondientes a los rangos de velocidad y altitud, seguido de una unidad de mantenimiento con el fin de filtrar cualquier partícula extraña o de suciedad en el sistema de cañerías desde el compresor hasta el Banco de Pruebas. El sistema estará controlado principalmente por un servo válvula y serie de solenoides que permitirá la salida de presiones específicas a velocidades deseadas.

A continuación, a este sistema se implementa el sistema de instrumentación y su respectiva digitalización, por medio de un transductor de presión estática y un transductor de presión dinámica que cumplan las especificaciones técnicas en cuanto a precisión y resolución de las medidas. Las medidas de presión entregadas por los transductores como señales eléctricas, serán enviadas a una placa electrónica Arduino de alta gama (o similar), en donde se programará los algoritmos que permitan calcular a partir de la presión estática y dinámica la velocidad y altitud requerida, en función de la regulación de la presión de aire del sistema. Complementado a la instrumentación y procesamiento realizado, se instalará una pantalla TFT-LCD, en donde se permitirá visualizar un sistema SCADA, para la manipulación y control del operador técnico que manipulará el sistema. El sistema SCADA contará con funciones básicas como es el control de la consigna ya sea en las unidades de pies o nudos, el cambio del sistema a modo altimétrico y modo velocímetro, así como también permitirá determinar posibles fugas en el instrumento aeronáutico. A continuación, en la figura 1 se presenta un diagrama esquemático de del sistema propuesto.

**Figura 1.**

*Diagrama esquemático del diseño propuesto.*



## Objetivos

### *Objetivo General*

Modernizar el Banco de Prueba “Precision Pressure Test Set” del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana para la calibración de instrumentos aeronáuticos (altímetros, velocímetros, indicadores de mach y climb’s).

### *Objetivos Específicos*

- Diseñar e implementar un sistema electroneumático generador de presión y vacío, que permita que el Banco de Pruebas sea capaz de simular velocidades y altitudes de aeronaves.

- Implementar un sistema de control que permita automatizar los procedimientos manuales que se llevan a cabo por parte del operador técnico, para realizar las mediciones simuladas con el Banco de Pruebas.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita ingresar la altitud o velocidad deseada, configurar el modo de operación y monitorear fugas de presión en el proceso de calibración de los instrumentos.
- Obtener una lectura digital con una adecuada resolución, que permita optimizar el tiempo empleado en la calibración y lectura de las medidas del Banco de Pruebas.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento del Banco de Pruebas modernizado.

## Capítulo II

### Fundamentación Teórica

#### Introducción

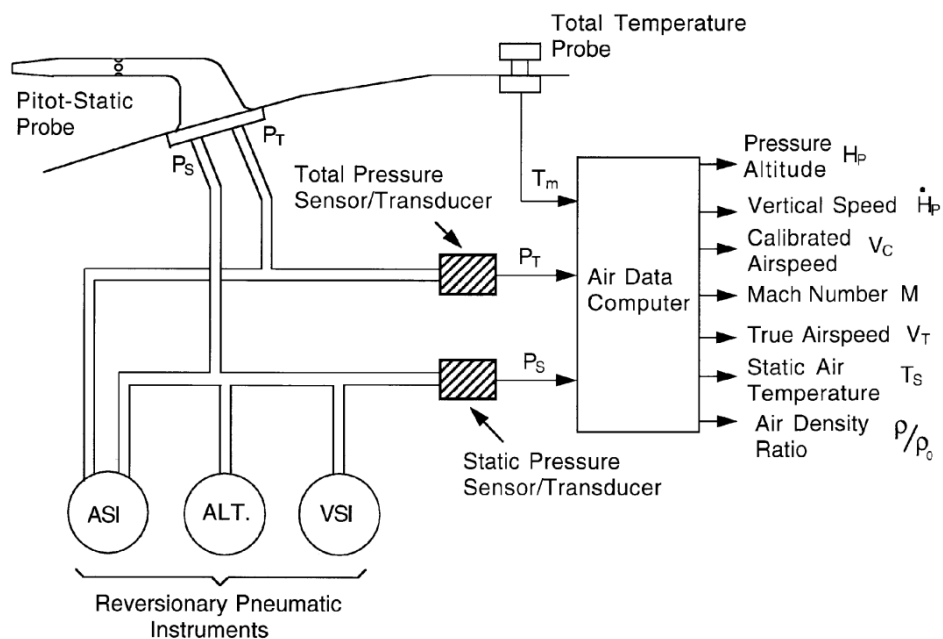
Las mediciones precisas de los sistemas de datos de aire son esenciales para una operación segura y eficiente de la aeronave, estos sistemas proporcionan al piloto información sobre cantidades consideradas de suma importancia, tales como altitud de presión, velocidad de aire, velocidad vertical, número de Mach, etc. La aeronavegabilidad de una aeronave se puede ver comprometida por la imprecisión para determinar la velocidad de una aeronave, necesaria para evitar la pérdida de control a bajas velocidades (condición de pérdida) y para evitar la superación de las limitaciones aerodinámicas y estructurales de la aeronave a altas velocidades, mientras que la precisión para determinar la altitud asegura el poder mantener la separación vertical mínima reducida (RVSM, "Reduced Vertical Separation Minimum") en las aerovías.

#### La Medición de los Datos de Aire

Las cantidades de los datos de aire se derivan de tres mediciones básicas, obtenidas por sensores anexados a una sonda, la cual mide la presión total o (Pitot), la presión estática y la temperatura total del aire, en la figura 2 se observa el ejemplo de un sistema básico de datos de aire. La presión total,  $P_T$ , se mide a través de un sensor de presión absoluta (o transductor) conectado a un tubo Pitot que se posiciona frente a la corriente de aire en movimiento, esto mide la presión de impacto,  $Q_C$ , es decir la presión ejercida para que la corriente de aire en movimiento descanse en relación con el tubo Pitot, más la presión estática,  $P_S$ , de la corriente de aire libre, es decir,  $P_T = Q_C + P_S$ .

Figura 2.

Sistema básico de datos de aire



Nota Fuente: (Collinson, 2011)

La presión estática de la corriente de aire libre,  $P_S$ , se mide mediante un transductor de presión absoluta conectado a un orificio, ubicado adecuadamente, de forma que la presión de la superficie sea casi la misma que la presión de la atmósfera circundante. A pesar de que la ubicación exacta de los orificios de presión estática e inclusive del tubo Pitot está determinada principalmente por experimentación; las aeronaves militares de alto rendimiento, generalmente aquellas que pueden alcanzar velocidades supersónicas, tienen una sonda Pitot/estática combinada, que se extiende por delante de la aeronave lo más lejos posible, evitando los efectos de la interferencia aerodinámica y/o las ondas de choque generadas por la estructura de la misma.

La tercera medición, es decir, la temperatura de aire medida (o indicada),  $T_m$ , se la realiza mediante un sensor de temperatura incorporado en una sonda, montada en la superficie de la aeronave.

Esto proporciona la medida de la temperatura de la corriente de aire libre,  $T_S$ , más el aumento cinético de la temperatura, debido a que la sonda está diseñada para mandar a descansar el aire con respecto a la misma, la que se conoce como temperatura total del aire,  $T_T$ . Al conocer la relación de recuperación de la sonda, permite derivar el factor de corrección del efecto de calentamiento cinético y obtener la medida de la temperatura de la corriente de aire libre o temperatura estática del aire,  $T_S$ , esencial para el cálculo de la velocidad verdadera,  $V_T$ , de la aeronave.

A partir de las mediciones de presión estática,  $P_S$ , presión total,  $P_T$ , y la temperatura estática de aire,  $T_S$ , es posible derivar las siguientes cantidades:

- Altitud de presión,  $H_P$ . Se obtiene de la medición de  $P_S$ , suponiendo una atmosfera estándar.
- Velocidad vertical,  $\dot{H}_P$ . Se deriva básicamente al diferenciar  $P_S$ .
- Velocidad de aire calibrada,  $V_C$ . Se deriva directamente de la presión de impacto,  $Q_C$ , que a su vez se deriva de la diferencia de presiones estáticas y totales ( $Q_C = P_T - P_S$ ).
- Número Mach,  $M$ . Esta es la relación entre la velocidad verdadera,  $V_T$ , y la velocidad local del sonido,  $A$ , es decir,  $M = V_T/A$ .

### **Los Datos de Aire y su Importancia**

A continuación, se analiza la importancia y el uso de las cantidades de los datos de aire de altitud de presión, velocidad vertical, velocidad de aire calibrada, número de Mach y velocidad verdadera del aire por parte del piloto y los subsistemas claves de aviónica de la aeronave.

### ***Información de Datos de Aire para el Piloto***

El piloto obtiene la información de todas las cantidades de datos de aire descritas anteriormente por medio de los instrumentos respectivos o pantallas multifunción, cada uno de los datos son

importantes en varias fases de vuelo o para el cumplimiento de la misión. Sin embargo, existen dos cantidades básicas consideradas fundamentales para la operación de cualquier avión, desde un avión ligero hasta un avión caza supersónico, son la altitud de presión y la velocidad de aire calibrada. La altitud de presión es la altura de la aeronave sobre el nivel del mar, obtenida de la medición de la presión estática asumiendo una atmósfera estándar, y la velocidad de aire calibrada es aquella que, bajo condiciones estándar a nivel del mar, daría la misma presión de impacto que la medida en el avión (Collinson, 2011).

Una medida precisa de la altitud del avión es esencial para que el piloto tenga un control de la ruta de vuelo en el plano vertical, y poder realizar un franqueamiento de obstáculos en un vuelo de instrumentos, durante el acercamiento y aterrizaje, y como requerimiento de las autoridades de Control de Tráfico Aéreo (ATC, por sus siglas en inglés) para garantizar una RSVM segura en las aerovías.

La importancia de la velocidad de aire calibrada es que proporciona una medida directa de la presión de impacto, que, junto con la medida del ángulo de incidencia, ángulo entre la dirección de flujo de aire y la línea de referencia del perfil aerodinámico del ala, determinan los momentos y fuerzas de sustentación y arrastre que actúan sobre la aeronave. Estos momentos y fuerzas aerodinámicas determinan la capacidad de maniobra y vuelo del avión, de igual forma su rendimiento en términos de alcance, velocidad, altura de operación, etc. Por lo tanto, las velocidades críticas que afectan la capacidad de control o seguridad de la aeronave están especificadas en términos de la velocidad de aire calibrada.

### ***Información de Datos de Aire para Subsistemas claves***

En la actualidad existen aeronaves equipadas con sistemas y subsistemas de aviónica que replazan una gran cantidad de tuberías que transportaban los datos de aire a cada uno de los respectivos instrumentos en la cabina, estos sistemas tienen el objetivo de detectar los parámetros físicos y

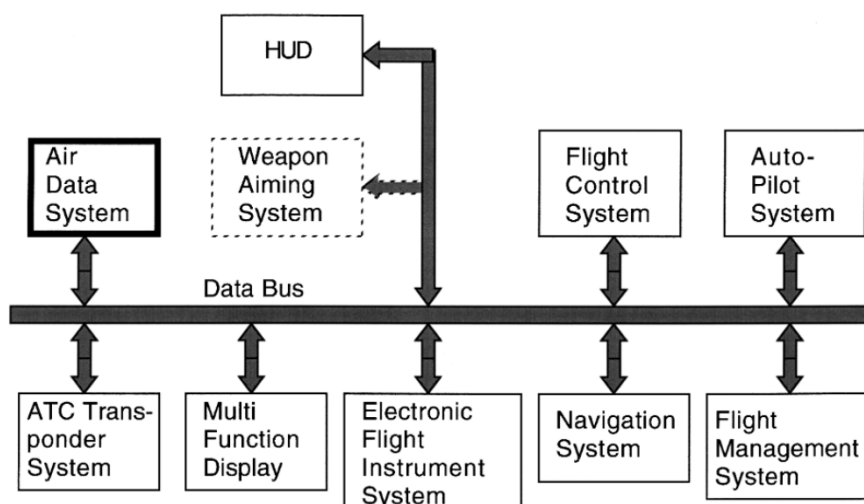


transformarlos en señales visibles por medio de su representación en pantallas o instrumentos de vuelo.

Se observa en la figura 3, el flujo de los datos aire a los diferentes subsistemas de aviónica.

**Figura 3**

*Flujo de datos de aire a los subsistemas de aviónica*



*Nota:* Fuente: (Collinson, 2011)

El transponder de control de tráfico aéreo informa automáticamente al sistema de control de tráfico aéreo la altitud de presión de la aeronave. Las autoridades ATC especifican y corrigen los niveles de vuelo que las aeronaves mantienen en el espacio aéreo controlado en términos de la altitud de presión, sin embargo, esta altitud puede diferir de la altitud real debido a variaciones de una atmósfera no estándar, variaciones proporcionales a la altitud de la aeronave.

El sistema de control de vuelo de una aeronave realiza ajustes automáticos a las ganancias del sistema, en términos de velocidad de aire calibrada y altitud de presión, con el objetivo de compensar la variación en la efectividad de la respuesta y control de la aeronave.

## **Instrumentos de Datos de Aire**

Los instrumentos de datos de aire (o manométricos) proporcionan al piloto y técnicos de mantenimiento de aeronaves la información clave necesaria para el funcionamiento básico de la altitud y velocidad del avión, obtenidas de las mediciones de la atmósfera. A continuación, se describe los diferentes instrumentos utilizados para realizar tan esenciales mediciones.

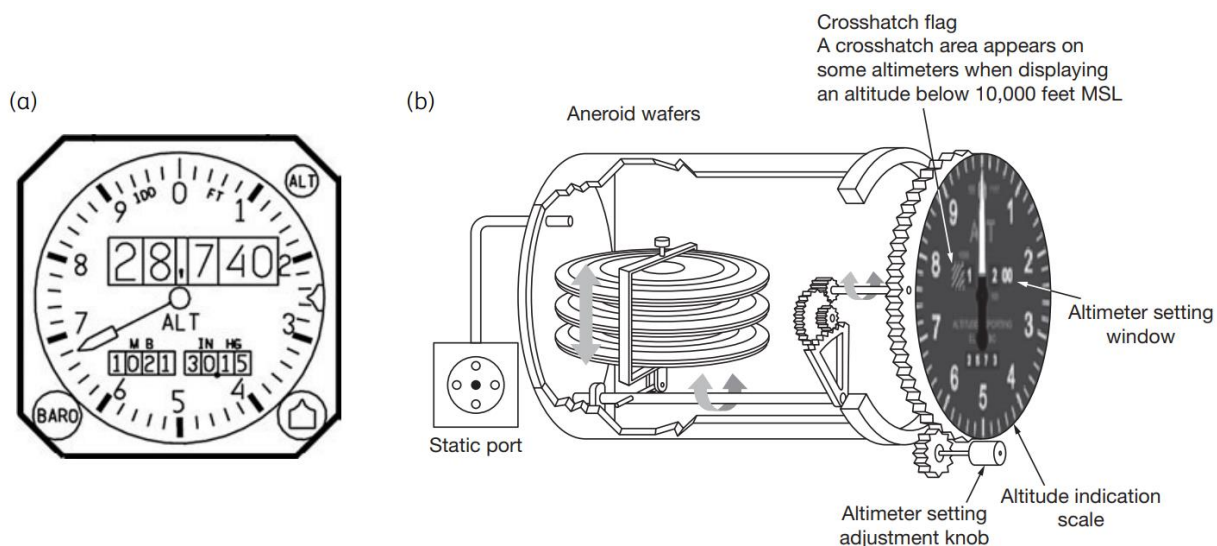
### ***Altímetro***

El altímetro de un avión es esencialmente un barómetro aneroide calibrado, que detecta cambios en la presión atmosférica a medida que la aeronave sube o baja y da una indicación visual de la altura barométrica (Wyatt, 2015). En la figura 4 se ilustra la pantalla y un esquema mecánico básico del altímetro. El instrumento se encuentra formado por diversos componentes ubicados dentro de una caja sellada, la cual está conectada a la presión atmosférica del aire, a través del puerto estático.

El altímetro consiste en un diafragma de triple cápsula aneroide. Una cápsula aneroide es una cápsula sellada que se evacua a una presión interna de 29.2 pulgadas de mercurio (Hg), estas cápsulas se expanden y contraen libremente a los cambios en la presión estática, una presión estática más alta contrae las cápsulas y una presión más baja que la presión interna del instrumento permite que las cápsulas se expandan. Las cápsulas se encuentran acopladas mecánicamente a las agujas que indican sobre un dial adecuadamente calibrado, lo que traduce la contracción y expansión de las cápsulas en un movimiento lineal muy pequeño al mecanismo de engranajes, a través de un eje oscilante, moviendo las agujas para indicar la disminución y aumento de la altitud respectivamente.

**Figura 4**

(a) Pantalla del altímetro. (b) Esquema mecánico del altímetro



Nota Fuente: (Wyatt, 2015)

### **Indicador de Velocidad Vertical**

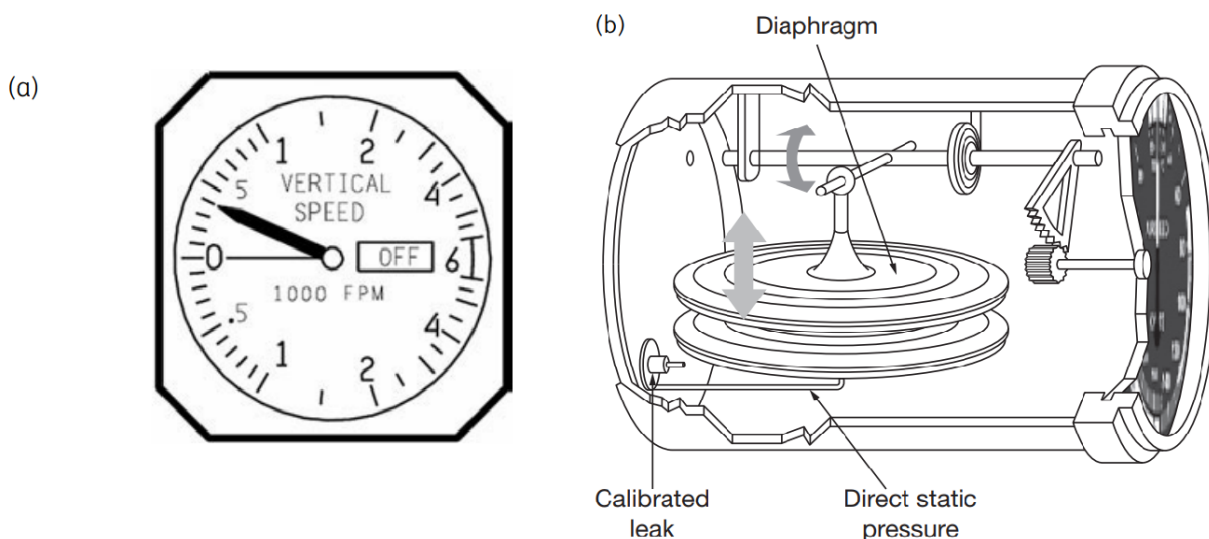
El indicador de velocidad vertical (VSI, "Vertical-Speed Indicator"), o indicador de velocidad de ascenso (RoC, "Rate of Climb"), basa su funcionamiento en la velocidad de cambio de la presión atmosférica e indica la componente vertical de la velocidad de la aeronave (Wyatt, 2015). El VSI muestra prácticamente si la aeronave está ascendiendo o descendiendo en referencia al vuelo en el plano horizontal, indicando la velocidad de ascenso o descenso con una única aguja que se desplaza sobre un dial normalmente graduado en miles pies por minuto (fpm).

El instrumento está conformado por una cápsula sensible a la presión, un orificio calibrado (o fuga calibrada) y un mecanismo de engranaje para transmitir y amplificar la contracción y expansión de la cápsula hacia la aguja, todos los mecanismos están alojados dentro de una caja hermética conectada a la presión estática, a pesar de operar únicamente a partir de esta presión es considerado un instrumento de

presión diferencial, considerando que el interior de la cápsula se conecta directamente a la línea estática del sistema Pitot-estático, y la zona exterior a la cápsula pero dentro de la caja sellada está conectada a la misma línea estática, pero a través del orificio de fuga calibrada, como se observa en la figura 5 se detalla el esquema mecánico y la pantalla del instrumento.

**Figura 5**

(a) Pantalla del VSI. (b) Esquema mecánico del VSI



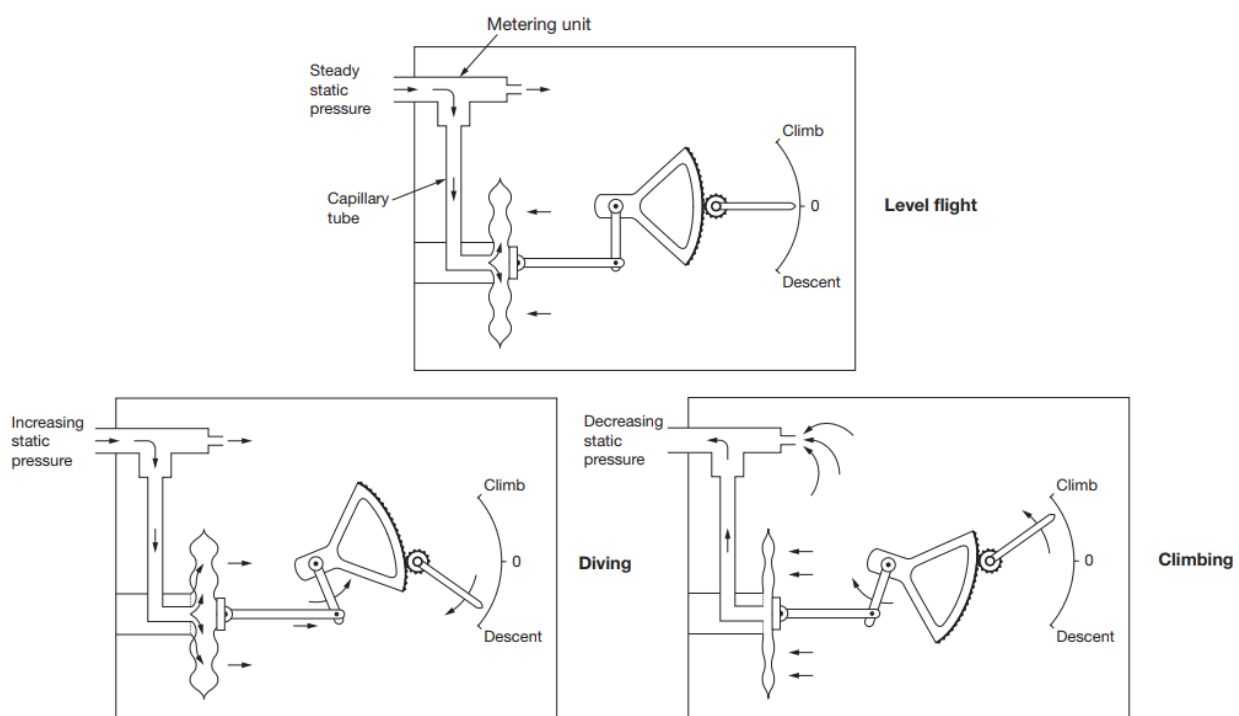
*Nota Fuente:* (Wyatt, 2015)

Cuando la aeronave está en el suelo o a nivel de vuelo, las presiones al interior de la cápsula y del instrumento son iguales, y la aguja indica un valor de cero. Sí la aeronave asciende o desciende, la presión dentro de la cápsula varía inmediatamente, sin embargo, por el efecto de dosificación del orificio de fuga calibrada, la presión que envuelve a la cápsula mantiene un valor más alto o bajo durante un corto tiempo, permitiendo que la cápsula se contraiga o expanda. Esto ocasiona una diferencia de presión entre el interior de la cápsula y el exterior envolvente de la misma, que se transmite e indica a través del

movimiento de la aguja, si la aeronave está ascendiendo o descendiendo con su respectivo valor de velocidad vertical. En la figura 6 se observa los tres escenarios antes descritos.

**Figura 6**

*Escenarios del indicador de velocidad vertical*



*Nota Fuente:* (Wyatt, 2015)

### ***Indicador de Velocidad de Aire***

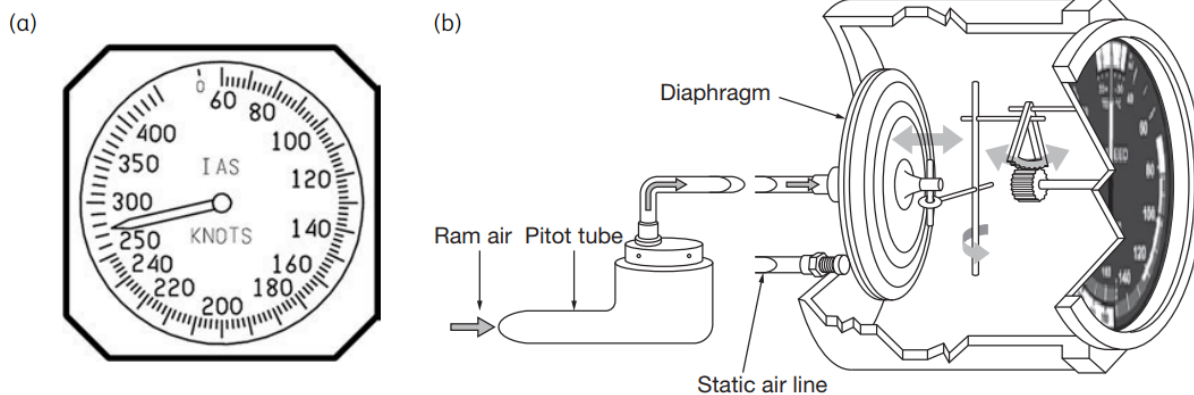
El anemómetro o indicador de velocidad de aire (ASI) es un medidor de presión diferencial sensible que mide e indica rápidamente la diferencia de presión entre la dinámica y presión estática, midiendo la diferencia de presión generada en el aire por la aeronave en movimiento (presión dinámica) y el aire estático, e indicando la velocidad relativa de la aeronave con respecto a la masa de aire en que se desplaza. Cuando la aeronave se mueve a través del aire, la presión de Pitot aumenta en relación a la

presión del aire estático, esta diferencia queda registrada por la aguja de velocidad en el dial del instrumento. La velocidad de aire es medida en millas por hora, o nudos por hora.

Su construcción es similar a los otros instrumentos de aire, sin embargo, es el único instrumento que utiliza la presión de Pitot, consta de una caja sellada dentro de la cual se aloja una cápsula aneroide conectada mediante mecanismos y engranajes, a la aguja indicadora del instrumento. La cápsula aneroide mantiene en su interior la presión de Pitot gracias a la toma conectada directamente al tubo Pitot, mientras que el interior del instrumento y envolviendo a la cápsula se mantiene a la presión ambiente, proveniente de la toma estática. En la figura 7 se ilustra el esquema mecánico del ASI.

**Figura 7**

*(a) Pantalla del ASI. (b) Esquema mecánico del ASI*



Nota Fuente: (Wyatt, 2015)

### **Indicador de Número Mach**

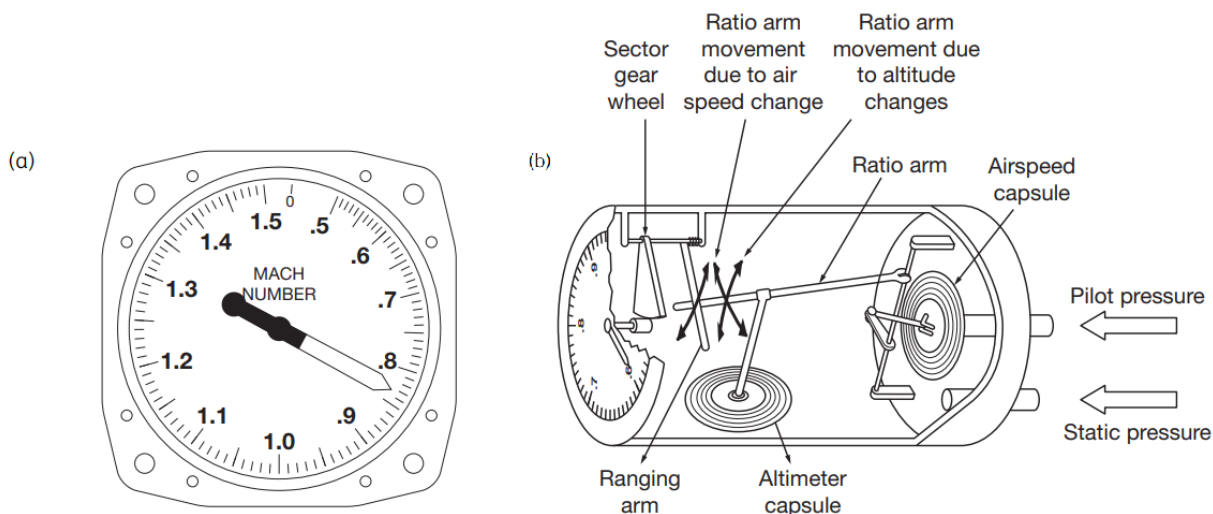
A velocidades altas de aire, las cargas de aire tienen un efecto creciente sobre la estructura de la aeronave. Durante el vuelo, el avión perturba el aire circundante generando ondas de presión, que a medida que el avión se acerca a la velocidad del sonido, el aire empieza a comprimirse en los bordes de

ataque de las alas y se vuelve turbulento alrededor del fuselaje. Estos cambios tienen un efecto adverso en la elevación, la resistencia, la estabilidad y los controles de la aeronave (Wyatt, 2015). Por lo tanto, a todas las aeronaves que tienen la capacidad de volar a altas velocidades, se establece una velocidad crítica por los efectos antes mencionados. Para una aeronave, el número Mach (llamado así por el físico austríaco Ernst Mach) se define como la relación entre la velocidad verdadera del aire dividida por la velocidad local del sonido. El número crítico de Mach de una aeronave se define como Mach máximo operativo (MMO, por sus siglas en inglés), esto permite un margen por debajo para maniobrar normalmente.

En un indicador de número Mach, la relación velocidad verdadera de aire y velocidad local del sonido se deriva de un mecanismo de velocidad de aire corregido por un mecanismo de altitud, por lo tanto, la cápsula aneroide de velocidad de aire está conectada directamente a la presión de Pitot y envolviendo la cápsula la presión estática, de esta forma la cápsula responde a la diferencia de presión Pitot-estática, a medida que la cápsula se expande con el aumento de velocidad los mecanismos transmiten el movimiento. La cápsula de altitud está expuesta a presión estática, respondiendo así solo a cambios de altitud, la expansión de la cápsula de altitud se transmite de igual forma mediante los mecanismos. El resultado de la combinación de los movimientos de estos dos mecanismos ilustrados en la figura 8, se transmite a través del brazo mecánico de rango, haciendo que la aguja indicadora se desplace sobre el dial.

**Figura 8**

(a) Pantalla del indicador de número Mach. (b) Esquema mecánico del indicador de número Mach



Nota Fuente: (Wyatt, 2015)

### Metrología y Calibración de Instrumentos

La necesidad de medir bien ha conducido a la ciencia metroológica que tiene por objeto el estudio de los sistemas de medida y la determinación de magnitudes. El proceso de medir bien no solo se garantiza con el uso de procedimientos e instrumentos adecuados, sino que además se debe garantizar la equivalencia y normalización de las unidades de medida. La infraestructura metroológica debe ser compatible y estar ligada a las infraestructuras internacionales, y para ello cada país debe disponer de laboratorios donde se puedan calibrar los instrumentos de medición. La compatibilidad entre países se asegura mediante comparaciones periódicas de los patrones de medida. Todo este proceso se llama trazabilidad (Creus, 2009).

Dentro de la metrología está situada la calibración, el proceso de comparación periódica entre instrumentos de exactitud no verificada, con un patrón de referencia o un sistema de exactitud con el



objeto de asegurar una exactitud trazable según normas internacionales. La calibración deberá realizarse con una tolerancia especificada, siendo la tolerancia la desviación permitida con relación al valor, pudiendo expresarse en las unidades de medida, en porcentaje de medida o porcentaje de lectura.

Con el término “patrón” y sus similares son conocidos aquellos instrumentos, escalas o métodos utilizados en el proceso de calibración para conocer la incertidumbre de la medición, siendo este el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando (OMM, 2014).

### ***Metrología y Calibración de Instrumentos de Presión***

Las mediciones de la presión deben ser tan exactas como lo permita la tecnología, con sujeción a unos condicionantes económicos realistas, y los procedimientos de medición y calibración han de ser uniformes en todo el mundo(OMM, 2014). Por lo tanto, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se ha visto en el deber de establecer un nivel de exactitud necesario para que la medición de la presión cumpla con los requisitos de sus diversas aplicaciones. Los requisitos se detallan en la tabla1.

**Tabla 1**

#### *Requisitos de Incertidumbre para Instrumentos de Medición de Presión*

<b>Requisito</b>	<b>Valor</b>
Rango de medición	500 a 1080 [hPa]
Incertidumbre de medición requerida	0,1 [hPa]
Resolución	0,1 [hPa]
Constata de tiempo del sensor	20 [s] / 2 [s]
Tiempo medio de obtención	1 [min]

Por lo general, la medición de la presión atmosférica con fines meteorológicos u otras aplicaciones se la realiza por medio de los instrumentos denominados barómetros, ya sean estos electrónicos,

aneroides o de mercurio. Sin embargo, según la (OMM, 2014) para ser considerados como instrumentos operativos deben cumplir los siguientes requisitos:

- Los instrumentos deben ser calibrados y controlados periódicamente con respecto a un barómetro patrón de trabajo mediante procedimientos aprobados.
- Toda variación de la exactitud debe ser muy inferior a los márgenes de tolerancia.
- Las lecturas del instrumento no deberían verse afectadas por variaciones de temperatura.
- El instrumento debe emplazarse en un entorno cuyas condiciones exteriores no originen errores de medición.
- El instrumento debería ser de lectura fácil y rápida, y su diseño debe asegurar que la desviación típica de las lecturas sea inferior a un tercio de la exactitud absoluta establecida.

El método más recurrente por tradición para medir la presión atmosférica corresponde al barómetro de mercurio cuyo principio consiste en equilibrar la presión con el peso de una columna de mercurio, líquido que permite alcanzar la exactitud requerida. Sin embargo, a pesar de la excelente estabilidad y exactitud de estos instrumentos, últimamente están siendo remplazados por los barómetros electrónicos de exactitud similar y de mayor facilidad de lectura.

### ***Barómetros Electrónicos***

Por lo general los barómetros de última generación son dotados de transductores para transformar la respuesta del sensor en una magnitud eléctrica análoga (corriente continua o alterna con frecuencia relacionada) o digital (protocolos normalizados de comunicación de datos) que mantienen relación con la presión real. La visualización de las salidas análogas digitalizadas o de las salidas digitales se da mediante monitores o sistemas de adquisición.

Existen transductores utilizados para medir el desplazamiento de la cápsula aneroide de un barómetro como los detectores de desplazamiento capacitivo, potenciométricos o extensómetros

ubicados estratégicamente en el sensor. Por otro lado, es posible realizar mediciones de presión atmosférica utilizando el efecto piezoeléctrico (piezorresistivo) al utilizar elementos de cuarzo cristalino como transductores de presión absoluta, elemento idóneo por sus características de estabilidad, reducidos efectos de temperatura y sus características de frecuencia reproducibles con precisión (OMM, 2014).

Una configuración común para obtener las mediciones con el efecto piezoeléctrico es un puente de Wheatstone plenamente activo, que puede estar constituido por semiconductores medidores de deformación o por medidores piezorresistivos unidos a un fino diafragma circular. La presión aplicada a este diafragma dota de una carga distribuida produciendo un esfuerzo de flexión, que crea una deformación proporcional a la presión aplicada, desequilibrando el puente. Así pues, la salida del puente es proporcional a la diferencia neta de la presión que actúa sobre el diafragma (OMM, 2014). La salida del puente de Wheatstone es alimentada por corriente continua, para transformar la salida en una señal normalizada.

### ***Lectura de los Barómetros electrónicos***

El barómetro electrónico permite realizar lecturas exactas de la presión atmosférica circundante, o de cualquier espacio conectado al instrumento por medio de un tubo. La exactitud del instrumento depende de la exactitud con que haya sido calibrado, de la eficiencia de la compensación de temperatura, y de la deriva a lo largo del tiempo de calibración (OMM, 2014). Los barómetros provistos de más de un elemento sensor calculan la media de las mediciones de cada sensor y determina la presión con una resolución de aproximadamente 0,1 hPa.

### ***Errores y fallos de los barómetros electrónicos***

La variación continua o incremental de una indicación a lo largo del tiempo, debida a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medida, definida deriva por (OMM, 2014), es la

principal fuente de error de un barómetro electrónico. Por lo que es recomendable verificar las correcciones de calibración en intervalos frecuentes, con el fin de mantener el instrumento en funcionamiento aceptable.

La temperatura es otra fuente considerable de error en estos instrumentos, pues para mantener el estado de la calibración, el barómetro electrónico debe permanecer a una temperatura constante. Sin embargo, algunos barómetros disponen de un control de temperatura y la respectiva corrección electrónica de la presión para disminuir considerablemente el error. La variación de la calibración depende también en gran medida del historial térmico del barómetro puesto que una exposición prolongada a temperaturas diferentes de las de calibración puede ocasionar desviaciones en la calibración a medio o largo plazo (OMM, 2014).

Como todos los dispositivos electrónicos de medición sensibles, los barómetros electrónicos deberían protegerse y alejarse de fuentes generadoras de campos magnéticos intensos, como transformadores, computadoras, radares, etc. Aunque ello no suele ser un problema, puede producir un aumento del ruido que perjudicaría la precisión del dispositivo.

## Capítulo III

### Estado Actual y Diagnóstico

#### Descripción General

El Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set” de la Israel Aircraft Industries Ltd. diseñado para la comprobación y calibración todo tipo de instrumentos de aire de aviación como altímetros, indicadores de velocidad de aire, indicadores de velocidad vertical, indicadores de Mach etc. Su funcionamiento se basa fundamenta en un sistema neumático instrumentado con la capacidad de generar vacío y diferentes presiones con el objetivo de simular las variables de proceso en los rangos presentados en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Cantidades y Rangos del Banco de Pruebas*

<b>Variable</b>	<b>Rango</b>	<b>Unidad</b>
Altitud	-1,000 a 30,000	Pies
Bajas velocidades de aire	0 a 250	Nudos
Altas velocidades de aire	250 a 850	Nudos

#### Componentes del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”

El Banco de Pruebas está constituido por distintos elementos y equipos tanto electrónicos como neumáticos, en la tabla 3 se presenta la lista de partes del banco Pressure Test Set.

**Tabla 3**

*Lista de Partes del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"*

<b>Descripción</b>	<b>Número de Parte</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Fabricante</b>
Barómetro de Mercurio	Modelo: 310EC10 TM Serie: 190180-X1	1	Meriam Inst.
Manómetro Múltiple	Modelo: 33KB35 TM Serie: 19018X1	1	Meriam Inst.
Regulador de Presión	170 Lb/Sq.	1	Teknova
Regulador de Presión	3 Bar	2	Mego-Afek
Válvulas Dosificadoras	1325X2	8	Hoke Incorp.
Barómetro Digital	Type CEC 2500-0001	1	IMO Delaval
Microprocesador Indicador de Presión	UPR 685	1	Dynisco Corp.
Transductor de Presión 0-15 psi	09384/Cec-500	1	IMO Delaval
Bomba de Vacío	Varian SD-200	1	Varian

#### ***Bomba de Vacío Varian SD-200***

La bomba de vacío mecánica de paletas rotativas de dos etapas Varian SD-200 que se observa en la figura 9, permite la generación de vacío mediante la extracción del aire de las redes de tuberías neumáticas del sistema, equipada con un motor monofásico 115/230 [V], 60 [Hz] y las características técnicas de la tabla 4.

Figura 9

Bomba de Vacío Varian SD-200



Tabla 4

Características Técnicas de la Bomba de Vacío SD-200

	50 [Hz]	60 [Hz]
Etapas de bomba de paletas	2	2
Velocidad de rotación nominal	1500 [t/min]	1800 [RPM]
Desplazamiento de aire libre	15.7 [m3/h]	18.8 [m3/h]
Desplazamiento de aire método Pneurop	12 [m3/h]	15 [m3/h]
Presión base	1.10-4 [mbar]	
Capacidad de aceite	0.8 [litros]	
Tasa de potencia	0.37 [kW]	
Peso	26.5 [kg]	

**Barómetro Meriam 310EC10 TM**

El barómetro Meriam modelo 310EC10 TM que se observa en la figura 10, es un barómetro de mercurio de lectura directa, diseñado para operar con una presión máxima de 250 [PSI] en un rango de 35 [inHg], el instrumento cuenta con una escala en miles de pies de altura en un rango de -1,000 a 200,000 [pies] y una conexión al proceso de 1/8 NPT. Implementado en el sistema para realizar la medición de la presión atmosférica e indicar la altura respectiva.

**Figura 10**

*Barómetro de Mercurio Merima 310EC10 TM*

**Manómetro Meriam 33KB35 TM**

El manómetro Meriam modelo 33KB35 TM que se observa en la figura 11, es un manómetro de múltiples tubos de rango de 60 [inHg], dentro de la misma caja compacta se encuentran dos sistemas manométricos de lectura directa individual, de agua y mercurio con un rango de 0 a 290 [nudos] y de 200 a 900 [nudos] respectivamente, diseñado para operar con una presión máxima de 350 [PSI] y una conexión



al proceso de 1/8 NPT. Este instrumento realiza la medición de la presión manométrica e indica la velocidad de aire correspondiente.

**Figura 11**

*Manómetro Meriam 33KB35 TM*



***Reguladores de Presión***

El sistema neumático del Banco de Pruebas cuenta con tres reguladores de presión instalados en diferentes puntos de las líneas neumáticas con el objetivo de regular la presión de las líneas neumáticas y la presión suministrada a los instrumentos. Dos reguladores de presión tipo válvula marca Mego-Afek con rango de 3 [bar], se observa en la figura 12(a) configurados a una presión de 0.5 y 1 [bar], un regulador de presión tipo válvula marca Teknova de 170 [lb] observado en la figura 12(b), configurado a una presión de 30 [PSI].

**Figura 12**

(a) Regulador de Presión Mego Afek 3 [bar] (b) Regulador de Presión Teknova 170 [lb]

**Válvulas**

Existen ocho válvulas dosificadoras marca Hoke Incorp. de la serie 1325 como se muestran en la figura 13, ubicadas en el panel frontal del Banco de Pruebas, para la manipulación de apertura y cierre en las líneas de presión y desfogues del sistema neumático.

**Figura 13**

Válvulas dosificadoras Hoke Incorp. 1325

**CEC 2500**

El CEC 2500 que se observa en la figura 14, es un barómetro digital de alta precisión diseñado para monitorear presiones barométricas de hasta 15.5 [psi], la precisión está dentro de los  $\pm 0.025\%$  de lectura

en un rango de temperatura de 55°F a 95°F. Este equipo es diseñado para uso sobre una mesa de trabajo, tan solo mide 3.78 [in] de alto, 7.56 [in] de ancho y 6.75 [in] de largo, con una pantalla LED continua. El transductor de presión que utiliza es un diafragma de silicio difuso de alta estabilidad. A continuación, se detalla las características técnicas en la tabla 5.

**Figura 14**

*Barómetro Digital CEC 2500*



**Tabla 5**

*Características Técnicas del CEC 2500*

<b>Especificaciones</b>	
Lectura de presión	Presión atmosférica ambiental
Exactitud	±0.025% de lectura
Estabilidad a largo plazo	±0.05% de la escala por tres meses.
Voltaje de alimentación	105 a 125[V] ac, 50/60 [Hz]
Potencia disipada	50 [W]
Actualización de pantalla	2.5 lecturas por segundo
Rango de temperatura de funcionamiento	75°F±20°F
Peso	5.0 [lbs]

### ***Microprocesador Indicador de Presión***

El UPR685 que se observa en la figura 15, es un indicador de presión flexible y programable diseñado para sensores basados en galgas extensiométricas de 350 ohmios como transductores de

presión. Este equipo incorpora tanto un display digital como un display de barra analógica para mostrar unidades de ingeniería con una resolución aproximada de 0.05%, encapsulado en una carcasa compacta de 96 [mm] x 96 [mm] y se proyecta detrás del panel 160 [mm]. En la tabla 6 se observan las características técnicas del equipo.

**Figura 15**

*Microprocesador Indicador de Presión Dynisco uPR 685*



**Tabla 6**

*Características Técnicas del UPR685*

<b>Especificaciones</b>	
Voltaje de alimentación	100-125 [VAC], 50/60 [Hz]
Exactitud	±0.1% escala máxima
Rango de temperatura de funcionamiento	0-60[°C]
Tipo de entrada	350 [ohms] puente galgas exten.
Sensibilidad de entrada	0-1 a 0-4 mV/V
Pantalla	Display LED 5 dígitos
Rango de temperatura de funcionamiento	99.900 unidades
Unidades de ingeniería	PSI, BAR, Kg/cm2, Kpa, Mpa, inHg

***CEC 5000 Sputtered Thin Film***

Los transductores de presión de película fina pulverizada de la serie CEC 5000 de la figura 15, tienen características de rendimiento altamente estables, incluso en condiciones ambientales extremas. La tolerancia a la vibración a 35 g de vibración sinusoidal máxima de 10 Hz a 2000 Hz es 0.03% FRO / g para el rango de 15 psi, y menos del 0.001% para 1000 psi y más. El error combinado de linealidad, histéresis y no repetibilidad es de + 0,1% para la salida de rango completo. Estos transductores también son insuperables para mantener su calibración y se probaron a + 0,1% durante 18 meses. El rango de temperatura de funcionamiento es de -65 ° F a + 300 ° F y el rango de temperatura compensada es de -65 ° F a + 250 ° F. El cero térmico y el cambio de sensibilidad sobre el rango de temperatura compensado es de + 0,005% FRO / ° F.

**Figura 16**

*Transductor de Presión CEC 5000*



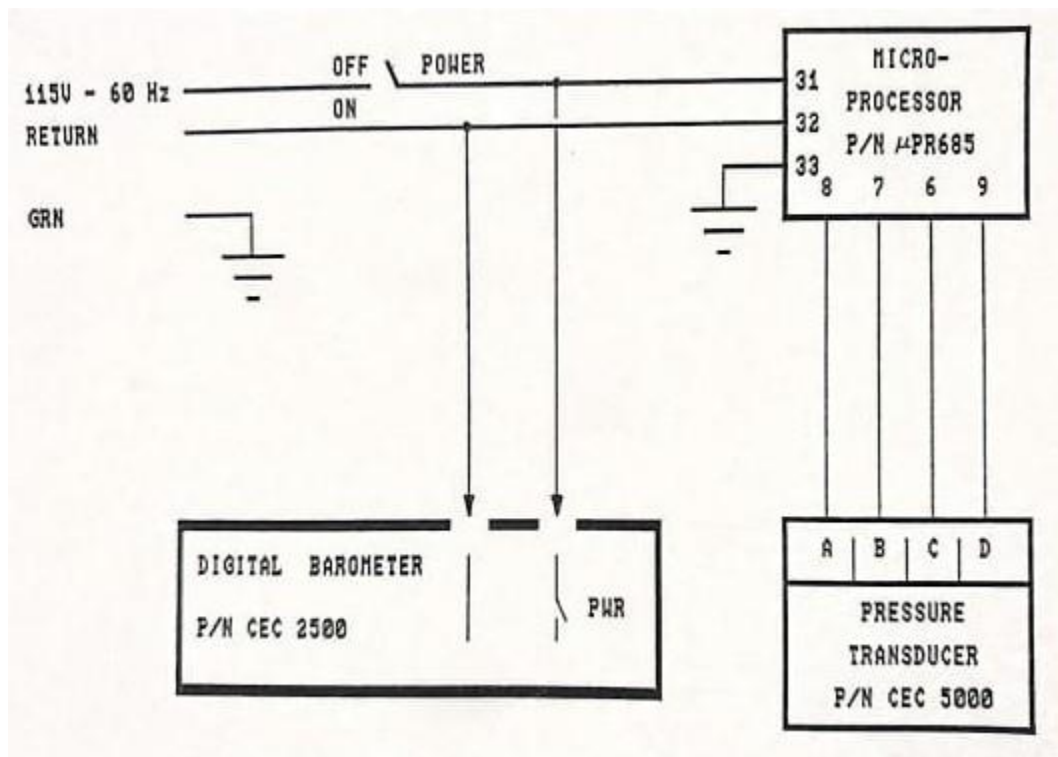
**Tabla 7***Características Técnicas del CEC 5000*

<b>Especificaciones</b>	
Rango estándar	0-15 [psi]
Presión de prueba	2 veces la presión nominal
Alimentación	10 [Vdc]
Rango de salida	30 [mV]
Resistencia de entrada	500 [ohms]
Error combinado de linealidad	± 0.1.%
Estabilidad de calibración	± 0.1.% 18 meses
Rango de temperatura de funcionamiento	-65° F a 300° F
Rango de temperatura compensada	-65° F a 250° F

Diagrama Esquemático Eléctrico del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"

Figura 17

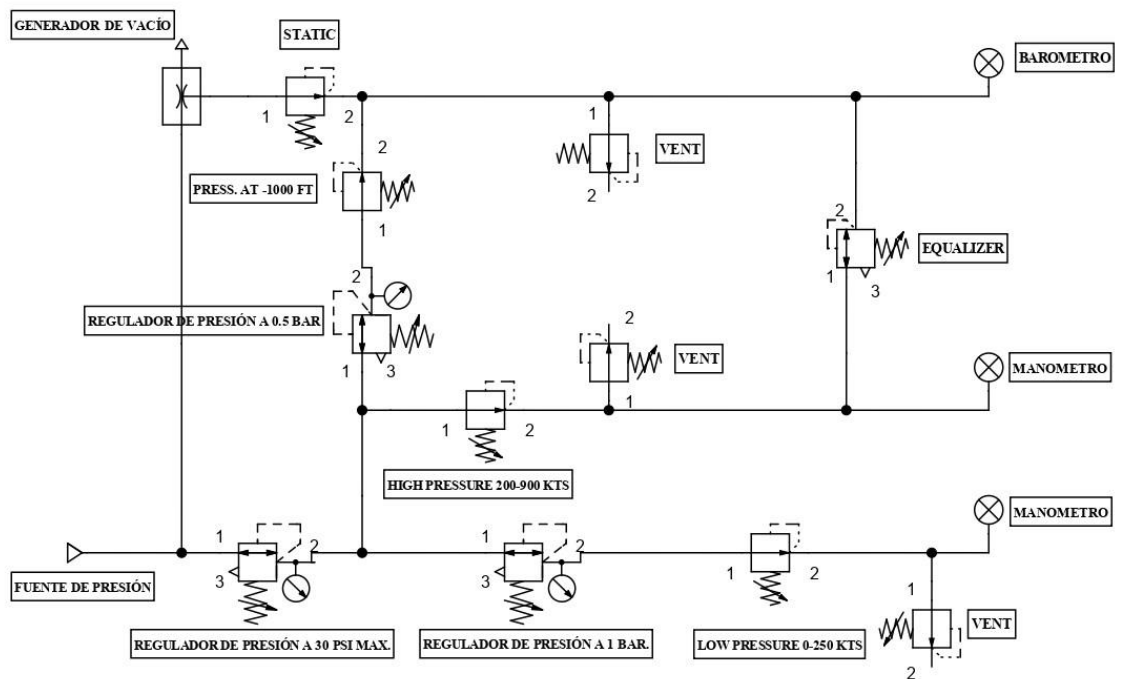
Esquema Eléctrico del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"



## Diagrama Esquemático Neumático del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"

Figura 18

Esquema Neumático del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"



## Funcionamiento del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"

### Requerimientos Mínimos

Para asegurar el normal funcionamiento del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set" es necesario cubrir con los dos siguientes requerimientos operativos:

- Fuente de presión: 60 [psi].
- Fuente de alimentación: 110[V]/60[Hz]



### ***Operación inicial del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"***

Previo al funcionamiento normal y continuo del Banco de Pruebas es necesario el cumplimiento y verificación de las siguientes indicaciones:

- Conectar la fuente de presión y el generador de vacío al puerto de presión y vacío respectivamente.
- Ajustar los reguladores de presión a los valores de 30 [psi], 1[bar] y 0.5 [bar] correspondientes al esquema neumático.
- Verificar que las tres válvulas de liberación "VENT" estén abiertas.
- Verificar que el barómetro de mercurio indique la presión barométrica ambiental.
- Verificar que ambos manómetros indiquen el valor de cero.
- Asegurar cuando se encuentre realizando las pruebas, sus ojos estén al nivel del punto más alto del líquido del barómetro y/o manómetros.

### ***Calibración y Pruebas de Altímetros***

1. Antes de realizar la prueba es necesario verificar la presión barométrica indicada por el barómetro y ajustar el altímetro según corresponda.
2. Conectar la unidad bajo prueba (UUT, "Unit Under Test") al punto de salida Ps y configurar las válvulas como se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Altimetros.*

<b>Nombre de la Válvula</b>	<b>Abierta</b>	<b>Cerrada</b>
STATIC		X
PRESS. TO -1000 FT		X
VENT (STATIC)		X
EQUALIZER	X	
LOW PRESSURE		X
VENT (LOW PRESSURE)		X
HIGH PRESSURE		X
VENT (HIGH PRESSURE)		X

3. Abrir la válvula STATIC y verificar la UUT según el valor indicador en el barómetro de mercurio o si es conveniente, según la lectura del indicador digital.
4. Al finalizar la prueba, abrir la válvula VENT (STATIC).
5. Si se requiere probar lecturas superiores a la presión barométrica, se mantiene la misma configuración de la tabla 8, excepto que se abrirá la válvula PRESS TO -1000 FT.

### ***Calibración y Pruebas de Indicadores de Velocidad***

La prueba y calibración de los indicadores de velocidad de aire se realizan usando el manómetro múltiple de agua y mercurio. Con el manómetro de agua el indicador de velocidad de aire se puede probar en el rango de 0 a 250 [kts] y con el manómetro de mercurio se puede probar hasta 850 [kts].

***Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad en el Rango de 0 a 250 [kts]***

1. Antes de realizar la calibración y/o prueba, verificar que el manómetro de agua indique el valor de cero.
2. Conectar la UUT al punto de salida Pt LOW y configurar las válvulas del Banco de Pruebas como se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad de Aire de 0 a 250 [kts].*

<b>Nombre de la Válvula</b>	<b>Abierta</b>	<b>Cerrada</b>
STATIC		X
PRESS. TO -1000 FT		X
VENT (STATIC)	X	
EQUALIZER		X
LOW PRESSURE		X
VENT (LOW PRESSURE)		X
HIGH PRESSURE		X
VENT (HIGH PRESSURE)		X

3. Abrir la válvula LOW PRESSURE 0 – 250 KTS, y comprobar con el manómetro de agua comprobar la lectura de la UUT.
4. Al finalizar la prueba, abrir la válvula VENT (LOW PRESSURE).

***Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad en el Rango de 0 a 250 [kts]***

1. Antes de realizar la calibración y/o prueba, verificar que el manómetro de mercurio indique el valor de cero.
2. Conectar la UUT al punto de salida Pt HIGH y configurar las válvulas del Banco de Pruebas como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad de Aire de 0 a 850 [kts].*

<b>Nombre de la Válvula</b>	<b>Abierta</b>	<b>Cerrada</b>
STATIC		X
PRESS. TO -1000 FT		X
VENT (STATIC)	X	
EQUALIZER		X
LOW PRESSURE		X
VENT (LOW PRESSURE)		X
HIGH PRESSURE		X
VENT (HIGH PRESSURE)		X

3. Abrir la válvula HIGH PRESSURE 200 – 900 KTS, y comprobar con el manómetro de agua comprobar la lectura de la UUT.
4. Al finalizar la prueba, abrir la válvula VENT (HIGH PRESSURE).

#### ***Calibración y Prueba de Indicadores de Mach***

1. Antes de realizar el proceso de calibración y/o prueba, verificar que el barómetro indique la presión barométrica ambiental y que los manómetros de agua y mercurio indiquen el valor de cero.
2. Conectar la toma de aire estática de la UUT a la salida Ps del Banco de Pruebas, y la toma de aire dinámica del instrumento conecte a la salida Pt HIGH del Banco de Pruebas.
3. Configurar las válvulas del Banco de Pruebas como muestra la tabla 11.

**Tabla 11**

*Configuración de las Válvulas del Banco de Pruebas para Calibración y Prueba de Indicadores de Mach.*

<b>Nombre de la Válvula</b>	<b>Abierta</b>	<b>Cerrada</b>
STATIC		X
PRESS. TO -1000 FT		X
VENT (STATIC)		X
EQUALIZER	X	
LOW PRESSURE		X
VENT (LOW PRESSURE)	X	
HIGH PRESSURE		X
VENT (HIGH PRESSURE)		X

4. Abrir la válvula PRESS TO -1000 FT y ajusta el barómetro e indicador digital a cero.
5. Cerrar la válvula EQUALIZER, y por medio de la válvula HIGH PRESS 200-900 KTS, suministrar presión dinámica para obtener la lectura de Mach.
6. Este proceso se repite para las diferentes altitudes.
7. Al finalizar la lectura de Mach por cada una de las altitudes, y que el puntero del indicador regresó a cero y antes de continuar con la prueba de altitud restante, cierre primero la válvula VENT (HIGH PRESS) y luego ingrese las altitudes requeridas usando la válvula VENT (STATIC).

#### **Diagnóstico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”**

Tras realizar el análisis respectivo de los componentes, la operación y el funcionamiento, se determina que el Banco de Pruebas está constituido básicamente de dos sistemas. Un sistema neumático con la capacidad de generar vacío y diferentes presiones, con el objetivo de simular altitudes y velocidades de aire dentro del rango de los instrumentos de aire de una aeronave. Y un sistema de instrumentación electrónica encargado del monitoreo de las unidades de ingeniería generadas por el sistema anterior.

### ***Diagnóstico del Sistema Neumático del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"***

La accesibilidad del sistema neumático del Banco de Pruebas permite realizar una inspección visual de cada uno de sus elementos con el fin de determinar la existencia de posibles defectos en los mismos.

### ***Diagnóstico de los Elementos del Sistema Neumático del Banco de Pruebas "Precision Pressure Test Set"***

#### ***Compresor de Aire***

Para identificar el estado y funcionamiento del compresor se procede a realizar una inspección visual básica, donde no se encontró ninguna fuga de aceite, ni daños visibles en las mangueras, los filtros se encuentran en buen estado y limpios y se verificó que el nivel de aceite es el adecuado. Se energiza el compresor y procede a realizar una inspección auditiva, descartando la existencia de algún ruido anormal como sobresfuerzo o algún golpeteo en su funcionamiento. Finalmente se comprobó que el valor de la presión es el correcto y no presenta variaciones.

#### **Figura 19**

*Compresor de aire del Banco de Pruebas.*



#### ***Generador de Vacío***

Con un similar procedimiento se diagnostica el estado y funcionamiento del generador de vacío con una inspección visual y auditiva, sin encontrar alguna fuga de aceite al exterior, el aceite se encuentra

dentro del rango recomendable para su funcionamiento, el filtro se encuentra moderadamente limpio y en funcionamiento no presenta alguna anomalía respecto al ruido o vibraciones.

### **Figura 20**

*Bomba de vacío del Banco de Pruebas*



### **Red de Tuberías**

La red de tuberías comprende la línea principal que es la que sale del conjunto compresor, líneas secundarias entendiéndose por aquellas que se derivan de la línea principal a las tomas de utilización y las líneas de servicio que surten el aire comprimido a los elementos neumáticos. Antes de realizar el diagnóstico de la red se verifica que en el punto de demanda de aire la presión requerida sea la correcta, en este caso una presión mínima de 60 [psi]. Se continua con el reconocimiento de la instalación y verifica que todas las tuberías se encuentran debidamente sujetas y conectadas, la línea cuenta con el escape adecuado en caso de presentarse sobrepresiones. Se abre el suministro de aire de forma gradual hasta alcanzar la presión de operación de 30 [psi], una vez alcanzado este valor la red no presenta sacudidas, ni ruidos extraños al normal funcionamiento, finalmente se comprueba que no existen fugas en conexiones.

**Figura 21**

*Red de tuberías del Banco de Pruebas*



### ***Válvulas Reguladoras de Presión***

Se procede a realizar el diagnóstico de las tres válvulas reguladoras de presión cerrando el suministro de aire comprimido y se libera la red completamente de flujo de aire, se comprueba manualmente el correcto funcionamiento de cada una de las válvulas. En las conexiones roscadas se observa la utilización de teflón a fin de evitar fugas y mediante la utilización de la herramienta adecuada se verifica la fijación de las conexiones y de la válvula. Se reanuda el suministro de aire de forma gradual hasta llegar a la presión de operación y se comprueba la correcta y constante regulación del aire comprimido en las válvulas.



**Figura 22**

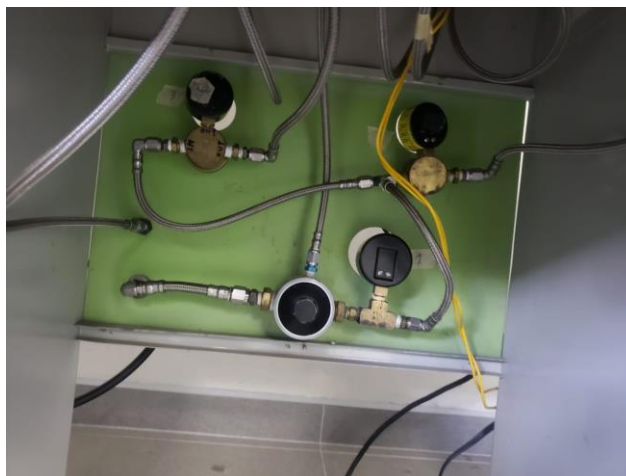
*Válvulas reguladoras de presión del Banco de Pruebas*

**Válvulas**

De similar manera para realizar el diagnóstico de las válvulas dosificadoras se procede a cerrar el suministro de aire comprimido y liberar la red cualquier flujo de aire. Se inspecciona de forma visual encontrando las conexiones adecuadamente ajustadas, cubiertas con teflón y se comprueba manualmente el correcto funcionamiento de las válvulas. Se reanuda el suministro de aire hasta cumplir con la presión de operación y se comprueba la inexistencia de anomalías, fugas o defectos en el funcionamiento de las válvulas.

**Figura 23**

*Válvulas dosificadoras del Banco de Pruebas*



### ***Diagnóstico del Funcionamiento del Sistema Neumático del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”***

Posterior al diagnóstico individual de cada elemento del sistema neumático se puede concluir que ningún componente del sistema presenta algún daño o falla que pueda incurrir en un mal funcionamiento del sistema, sin embargo, se realiza un diagnóstico funcional del mismo en busca de alguna falla en el circuito neumático.

Con el apoyo del diagrama del circuito neumático del Banco de Pruebas y la comprensión del aspecto funcional del sistema total, incluyendo la construcción y función de cada uno de los componentes se procede a llevar a condiciones iniciales cada uno de los componentes neumáticos y posterior se ejecuta a cabalidad y de manera secuencial cada una de las instrucciones de cada proceso de comprobación y calibración del banco de pruebas, cabe especificar qué se realizan los procedimientos conjuntamente con los medidores analógicos propios del banco e instrumentos calibrados.

En conclusión, el sistema neumático se encuentra totalmente funcional y operativo para la calibración y comprobación de los instrumentos de aire de aviación.

### ***Diagnóstico del Sistema Electrónico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”***

### ***Diagnóstico de los elementos del Sistema Electrónicos del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”***

#### ***Barómetro Digital CEC 2500***

El barómetro digital se encuentra empotrado a una estructura metálica del banco de pruebas, sin embargo, se tiene acceso al componente por medio de una tapa posterior de la estructura, con una breve inspección visual se puede determinar que no se encuentra la presencia de algún indicador de manipulación o daño estructural del componente. Sin embargo, al alimentar el componente con el voltaje nominal recomendado en las especificaciones técnicas y su respectiva verificación, no se observa ningún indicador de que el equipo se encuentre en funcionamiento.

#### **Figura 24**

*Barómetro digital CEC 2500*



#### ***Microprocesador Indicador de Presión UPR685***

El microprocesador de igual manera se encuentra empotrado a una estructura metálica con un acceso al componente por medio de una tapa posterior de la estructura, de manera visual y pronta el componente se encuentra en buen estado sin presentar algún tipo de anomalía.

Se procede a alimentar el componente con el voltaje nominal respectivo y su posterior verificación, con ayuda del diagrama eléctrico del Banco de Pruebas se comprueba cada una de las conexiones al transmisor de presión y se enciende el componente. Para su diagnóstico se procede a suministrar y variar la presión hacia transmisor y paralelamente al barómetro de mercurio, sin embargo, la pantalla indica una medida constate que no corresponde a una medida de ingeniería o algún tipo de mensaje de error del equipo.

### **Figura 25**

*Microprocesador Indicador de Presión UPR685*



### ***Transmisor de Presión CEC 5000***

Por medio de investigación de las especificaciones técnicas del transmisor de presión se identifica que es un transmisor de 4 hilos con salida de 4-20 [mA], para su diagnóstico se procede a identificar y alimentar a los 2 terminales de alimentación con el voltaje nominal y colocar una resistencia eléctrica de precisión entre los dos terminales de salida seguida de un amperímetro en el rango adecuado, se conecta el transmisor a la línea de proceso y se suministra y varia la presión, sin embargo, el transmisor no genera ninguna variación de corriente, ni tampoco una constante dentro del rango de 4 a 20 [mA].

**Figura 26**

*Transductor de Presión CEC 5000*



***Diagnóstico del Funcionamiento del Sistema Electrónico del Banco de Pruebas “Precision Pressure Test Set”***

Como se verificó con anterioridad los componentes electrónicos del sistema no están operando con un correcto funcionamiento, por tal motivo el funcionamiento del sistema electrónico que hace referencia a la instrumentación y digitalización de las medidas de ingeniería está totalmente obsoleto.

Teniendo en consideración el año de fabricación, la tecnología y las posibilidades de realizar el mantenimiento correctivo de los componentes, serán extraídos completamente del sistema electrónico y remplazados por los elementos considerados en su posterior diseño.

## Capítulo IV

### Diseño e Implementación

Posterior al diagnóstico del estado actual de los sistemas del Banco de Pruebas se determina que, los componentes neumáticos se encuentran en excelente estado y por consiguiente el sistema neumático es totalmente funcional, permitiendo la generación y manipulación de presión y vacío con el fin de simular altitudes, número mach, velocidades de aire y de ascenso y descenso en los instrumentos a ser comprobados y/o calibrados; a pesar de que los componentes electrónicos presentan diferentes fallas en su funcionamiento, el Banco de pruebas tiene implementados instrumentos analógicos: barómetro de mercurio (altímetro, número mach, velocidad de ascenso/descenso), manómetro relativo (velocidades bajas) y manómetro diferencial (velocidades altas, número mach), que permiten la instrumentación respectiva para la comprobación y/o calibración de los diferentes instrumentos de aire.

La modernización del Banco de Pruebas está sujeta a cumplir con requerimientos funcionales establecidos tanto por el personal técnico operario, como por el alcance y objetivos establecidos en el presente proyecto:

- Simulación de altitud, velocidad de aire, número mach y velocidad de ascenso/descenso.
- Medición y monitorización de altitud, velocidad de aire, número mach y velocidad de ascenso/descenso.
- Automatización de los procesos de comprobación y calibración de instrumentos.

## **Análisis de Filosofía de Operación del Banco de Pruebas**

### ***Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Altimetros***

En el proceso de calibración y pruebas de altímetros conectamos el UUT a la salida Ps y posterior se configura las válvulas dosificadoras de presión según la tabla 8, el operario procede a manipular la válvula PRESS. TO – 1000 FT o la válvula STATIC para generar presión o vacío respectivamente, estas válvulas dosificadoras son abiertas hasta obtener la altitud deseada posterior se cierran completamente manteniendo así la presión o vacío dentro de la línea de proceso correspondiente a la altura simulada y la respectiva verificación del UUT con el barómetro de mercurio.

Este proceso se repite para todas y cada una de las altitudes consideradas en el proceso de comprobación y/o calibración, al terminar el proceso se abre la válvula VENT con el objetivo de aliviar la presión en la línea de proceso y desconectar el UUT de la salida Ps.

### ***Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad***

Este procedimiento se lleva a cabo conectando el UUT en la salida Pt LOW o Pt HIGH para velocidades bajas o velocidades altas respectivamente, se configura las válvulas dosificadoras según la tabla 9 o 10 según corresponda, el operario manipula la válvula LOW PRESSURE o HIGH PRESSURE para generar presión en línea de proceso hasta llegar a la velocidad deseada, posterior se cierra la válvula por completo con el objetivo de mantener la presión correspondiente a la velocidad simulada tanto en el UUT como en manómetro relativo o manómetro diferencial para su respectiva verificación.

De igual forma este proceso se repite para todas y cada una de las velocidades consideradas en el proceso de comprobación y/o calibración, al terminar el proceso se abre la válvula VENT (LOW PRESSURE)

o válvula la VENT (HIGH PRESSURE) con el fin de desfogar la presión en la línea de proceso y desconectar el UUT de la salida correspondiente.

#### ***Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Match***

La comprobación y/o calibración de indicadores match se inicia con la conexión de la toma de aire estática del UUT a la salida Ps y la toma de aire dinámica del UUT a la salida Pt HIGH, luego se procede a configurar las válvulas dosificadoras según lo indicado en la tabla 11, con las válvulas EQUALIZER y VENT (LOW PRESSURE) abiertas el operario manipula la válvula PRESS. TO -1000 FT hasta llegar a una altitud inicial comprobada con el barómetro de mercurio, a diferencia de los anteriores procedimientos la válvula PRESS. TO -1000 FT queda semiabierta según la altura establecida.

Se procede a cerrar la válvula EQUALIZER con el fin de mantener constante la altitud anteriormente simulada y poder manipular la válvula HIGH PRESSURE para generar presión dinámica al UUT y simular las velocidades consideradas en el proceso de comprobación y/o calibración conjuntamente con el manómetro diferencial, para la posterior verificación del número match correspondiente, este proceso se repite para cada una de las combinaciones de altitudes y velocidades consideradas.

#### ***Análisis de la Filosofía de Operación de la Calibración y Pruebas de Indicadores de Velocidad Vertical***

Se procede a conectar el UUT a la salida Ps y a continuación se configura las válvulas dosificadoras según la tabla #, mediante la manipulación de la válvula STATIC el operario configura la rata de ascenso y/o descenso del instrumento dejando la válvula semiabierta, el aumento o disminución de la presión genera la variación de altitud correspondiente donde el operario cronometrará el tiempo entre las altitudes consideradas en el proceso de comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad vertical.



## **Análisis de Requerimientos Técnicos del Banco de Pruebas**

### ***Análisis de Requerimientos Técnicos del Sistema de Instrumentación***

El sistema de instrumentación tiene como función medir las magnitudes físicas de las variables de proceso, convertirlas a magnitudes eléctricas y procesarlas con el fin de proporcionar información al sistema de control del Banco de Pruebas. Por lo tanto, en base al análisis de la filosofía de operación de del Banco de Pruebas a continuación se determina cada una de las variables de los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos.

*Altímetros:* En la comprobación y/o calibración de altímetros, el operario genera presión o vacío a fin de simular menores o mayores altitudes a la altura de campo, mediante un barómetro de mercurio mide la presión atmosférica y determina de manera directa en el barómetro la respectiva altitud simulada por el Banco de Pruebas.

*Indicadores de Velocidad:* La calibración y comprobación de indicadores de velocidad está clasificado en velocidades bajas y altas en base a la construcción del circuito neumático del Banco de Pruebas donde se identifica un manómetro individual para cada una de ellas, en las condiciones de operación de comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad estos manómetros miden la presión relativa y permiten la lectura directa de la velocidad de aire.

*Indicadores de Match:* Mediante el análisis de la operación de comprobación y/o calibración de indicadores match, se determina que el operario suministra presión a la toma de aire estática y dinámica del instrumento, mediante la el barómetro se mide la presión atmosférica correspondiente a la altitud simulada y con el manómetro de mercurio se mide la presión diferencial correspondiente a la velocidad de aire a esa altitud, por lo tanto, la presión atmosférica y la presión diferencial son las variables a medir en este proceso.

*Indicadores de Velocidad Vertical:* En la comprobación y/o calibración de los indicadores de velocidad vertical, el operario conecta a la línea de proceso del altímetro el instrumento, y mediante la generación de presión o vacío simula una velocidad de ascenso o descenso, para lo cual mide por medio el barómetro el cambio de presión atmosférica y cronometra el tiempo del proceso. En este proceso se determina como variables a ser medidas la presión atmosférica y el tiempo.

En la tabla 12 se detalla los procesos y las variables a ser consideradas para el sistema de instrumentación con sus respectivos rangos según el análisis de los procesos. Cabe recalcar que las tres variables están presentes individualmente o combinadas en todos los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos en el Banco de Pruebas.

**Tabla 12**

*Tabla de Requerimientos Técnicos del Sistema de Instrumentación.*

Proceso	Variable	Rango		Unidad
Calibración y pruebas de altímetros	Presión Atmosférica	4.630	-8.870	[psi]
Calibración y prueba de indicadores de Velocidad	Presión Relativa	0	1.515	[psi]
Calibración y prueba de indicadores de número match	Presión Diferencial	1.515	27.601	[psi]
Calibración y prueba de indicadores de velocidad vertical	Tiempo	N/A		[s]

### ***Análisis de Requerimientos Técnicos del Sistema de Control***

El sistema de control tiene como objetivo controlar las variables de proceso: altitud, velocidad, número match y velocidad de ascenso/descenso en función de la información recibida por el sistema de instrumentación: presión barométrica, diferencial y relativa; realizando acciones de control establecidas

mediante actuadores, con el fin de automatizar y optimizar los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos.

En base al diagnóstico del estado actual del Banco de Pruebas y el análisis de su filosofía de operación, se identifica que el Banco de Pruebas posee como actuadores del proceso las válvulas dosificadoras operadas manualmente para el control de las variables de proceso. En referencia a los requerimientos funcionales del proyecto, la modernización del Banco de Pruebas se alinea a la automatización de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos, por lo tanto, se identifica como requerimiento técnico la necesidad de adquirir e implementar actuadores con la capacidad de regular automáticamente la presión y/o vacío con el objetivo de controlar las variables de los procesos.

Otro requerimiento funcional de la modernización es la implementación de una interfaz gráfica que le permita al usuario la operación y el monitoreo de los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos, por lo tanto, la implementación de una pantalla y el desarrollo de una interfaz máquina-hombre (HMI) es considerado un requerimiento técnico del proyecto.

Por consiguiente, se determina la necesidad de adquirir e implementar un controlador con la capacidad de integrar los sensores, actuadores y la pantalla con el propósito de recibir, procesar y generar las diferentes señales que permitan el monitoreo, control y presentación de las variables de proceso de comprobación y/o calibración de instrumentos del Banco de Pruebas. A continuación, se tabula los requerimientos determinados anteriormente en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Requerimientos Técnicos del Sistema de Control*

Proceso	Requerimiento técnico	Descripción
---------	-----------------------	-------------

<b>Control</b>	Actuadores	Ocho actuadores que permitan la regulación de presión de los procesos.
	Controlador	Capacidad de procesar 1 señales exteriores (8 actuadores, 3 sensores)
<b>Monitoreo</b>	Pantalla	Capacidad de integrar HMI para control y monitoreo de los procesos.

### Modelo Físico de la Modernización del Banco de Pruebas

Se procede a elaborar el modelo físico del Banco de Pruebas de comprobación y/o calibración de instrumentos de aire por contrastación de un instrumento patrón aplicado a la industria aeronáutica (ver tabla 14), basado en el estándar ANSI/ISA 88, con el propósito de identificar y jerarquizar los componentes básicos del banco, determinado:

- Unidad
- Módulos de equipo
- Módulos de control

**Tabla 14**

*Modelo Físico de la Modernización del Banco de Pruebas*

<b>Modelo físico ANSI/ISA 88</b>			
<b>Célula de proceso</b>	<b>Unidad</b>	<b>Módulo de equipo</b>	<b>Módulo de control</b>
Laboratorio de Electrónica del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana Latacunga-Ecuador.	Metrología	Sistema de instrumentación	Transmisor de presión absoluta.
			Transmisor de presión relativa.
			Transmisor de presión diferencial.
		Sistema de control	Electroválvula reguladora de presión.
			Electroválvula solenoide.
			Controlador

## **Selección de Componentes**

### ***Selección de Componentes del Sistema de Instrumentación***

La instrumentación del Banco de Pruebas solo es posible a través de una buena especificación, selección e implementación de la instrumentación óptima en los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos contribuyendo como un factor de aumento de calidad y eficiencia de los mencionados. La selección de los componentes del sistema de instrumentación generalmente se basa en las consideraciones de proceso, importancia de las especificaciones de las variables, la importancia del dato de medición en el proceso y al aspecto económico.

### ***Criterios de Selección y Alternativas de los Componentes del Sistema de Instrumentación***

A continuación, se realiza un análisis de los procesos y la variable a ser medida en cada uno de ellos con el objetivo de establecer los criterios de selección de los instrumentos y las alternativas disponibles para la instrumentación del Banco de Pruebas.

### ***Instrumentación de la Calibración y Prueba de Altímetros***



En la comprobación y/o calibración de altímetros corresponde determinar la altitud simulada como variable de proceso, la determinación de la altitud está basada en la variación vertical de la presión de la atmósfera. Por lo tanto, es necesario un instrumento con la capacidad de determinar la altitud mediante la medición de la presión atmosférica a la que se encuentra expuesta la UUT.

La selección de un transmisor de presión depende sobre todo del punto de referencia; el transmisor de presión absoluta mide la presión respecto de una presión de referencia que es el vacío y es el único capaz de medir la presión atmosférica, por lo que se puede utilizar para medir la presión barométrica.

Los criterios de selección que se determinan para el transmisor de presión absoluta en los procesos de comprobación y/o calibración de altímetros son: el rango, la resolución y el precio del instrumento. A continuación, se propone dos alternativas factibles para la instrumentación en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Alternativas para el Transmisor de Presión Absoluta*

Componente	Transmisor de presión absoluta	
Imagen referencial		
Marca y modelo	IFM-PT0507	NOSHOK-100
Tipo de presión	absoluta	absoluta
Salida	análoga /4-20 [mA]	análoga /4-20 [mA]
Voltaje de operación	8 - 30 [V]	10 - 30 [V]
Temperatura de proceso	0 - 80 [°C]	0 - 80 [°C]
Rango de presión	0 - 14.5 [psi]	0 – 14.5 [psi]
Precisión	0.5%	0.25%
Precio	211.72 [usd]	1,158.00 [usd]

### ***Instrumentación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad***

Para el proceso de comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad se determina como variable de proceso la velocidad de aire simulada, variable determinada mediante la diferencia de la presión dinámica y estática proporcionadas al UUT. En consecuencia, se ve la necesidad de contar con un instrumento capaz de medir la diferencia entre las dos presiones.



De igual forma la selección de un transmisor de presión depende de del punto de referencia, en este caso la diferencia de presión para determinar la velocidad de aire es medida en referencia a la presión

estática o atmosférica, por lo tanto, se selecciona un transmisor de presión relativa, dado que, este tipo de transmisor mide la presión con respecto a la presión atmosférica.

Se determina el rango, la precisión y el costo como los criterios de selección del transmisor en la instrumentación del proceso de comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad, a continuación, se presenta en la tabla 16 las alternativas disponibles para el efecto.

**Tabla 16**

*Alternativas para el Transmisor de Presión Relativa*

Componente	Transmisor de presión relativa	
Imagen referencial		
Marca y modelo	IFM-PQ3809	NOSHOK-62
Tipo de presión	relativa/diferencial/vacío	relativa/absoluta
Salida	digital/análoga 4-20 [mA]	análoga /4-20 [mA]
Voltaje de operación	8 - 30 [V]	10 - 30 [V]
Temperatura de proceso	0 - 70 [°C]	0 - 80 [°C]
Rango de presión	-14.6 - 14.6 [psi]	0 – 14.5 [psi]
Precisión	0.5%	0.25%
Precio	261.79 [usd]	946.00 [usd]

### ***Instrumentación de la Calibración y Prueba de Indicadores de Match***



En la comprobación y/o calibración de indicadores de match corresponde determinar la el número match como variable de proceso, esta variable se la define por relación velocidad de aire y velocidad local del sonido derivada de un mecanismo de velocidad de aire corregido por un mecanismo de altitud, por esta razón el número match se determina mediante una relación de la velocidad de aire y la altitud.

Por lo tanto, es necesario implementar un instrumento con la capacidad de determinar el número match correspondiente a la relación de diferencia de presión entre la presión dinámica (velocidad) y la presión estática (altitud) a la que se encuentra expuesta la UUT. Por lo tanto, se selecciona un transmisor de presión diferencial que permite obtener la diferencia de presión de la presión atmosférica correspondiente a la altitud simulada y la presión manométrica que corresponde a la velocidad simulada.

Los criterios de selección que se determinan para el transmisor de presión diferencial en los procesos de comprobación y/o calibración de indicadores de match son: el rango, la resolución, la sensibilidad y el precio del instrumento. A continuación, en la tabla 17 se propone dos alternativas factibles para la instrumentación.

**Tabla 17**

*Alternativas para el Transmisor de Presión Diferencial*

Componente	Transmisor de presión diferencial	
Imagen referencial		
Marca y modelo	IFM-PQ3809	Honeywell-FP2000
Tipo de presión	relativa/diferencial/vacío	Diferencial
Salida	digital/análoga 4-20 [mA]	análoga /4-20 [mA], 0-5[V]
Voltaje de operación	8 - 30 [V]	15 - 28 [V]
Temperatura de proceso	0 - 70 [°C]	-40 - 100 [°C]
Rango de presión	-14.6 - 14.6 [psi]	0 - 14 [psi]
Precisión	0.5%	0.25%
Precio	261.79 [usd]	695.20 [usd]



### ***Instrumentación de la Calibración y Pruebas de Indicadores de Velocidad Vertical***

En base al análisis de la filosofía de operación se determina que para la comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad vertical es necesario el conocimiento del tiempo transcurrido entre diferentes altitudes. En vista que ya se realizó el análisis de la instrumentación para determinar altitudes queda simplemente determinar un instrumento que permita medir el tiempo transcurrido, sin embargo, los diferentes controladores de procesos manejan diferentes métodos para el cronometraje, por tal razón, se considera la opción de medir el tiempo mediante el uso del controlador.

### ***Matriz de Selección de los Componentes del Sistema de Instrumentación***

Como resultado del análisis de los criterios para la selección de componentes del sistema de instrumentación para la modernización del Banco de Pruebas, se obtuvo la propuesta de dos alternativas para cada componente que cumplen con los requerimientos funcionales y técnicos para la instrumentación del proceso correspondiente.

A continuación, se utiliza el proceso analítico jerárquico como método de selección en función de los criterios más relevantes (rango, precisión y costo) para la instrumentación del Banco de Pruebas, con el fin de seleccionar la alternativa más acertada. Se presenta la matriz final de selección del proceso y adjunto a este proyecto se encuentra el desarrollo del método en el anexo A.

#### ***Transmisor de Presión Absoluta:***

Mediante el análisis de la tabla 18 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación del transmisor de presión absoluta.

### **Tabla 18**

#### ***Matriz de Selección del Transmisor de Presión Absoluta***

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.250	0.167	0.900	0.644
<b>Alternativa 2</b>	0.750	0.833	0.100	0.356
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: Transmisor de Presión IFM-PT0507.

*Transmisor de Presión Relativa:*

Mediante el análisis de la tabla 19 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación del transmisor de presión relativa.

### **Tabla 19**

*Matriz de Selección del Transmisor de Presión Relativa*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.875	0.167	0.900	0.805
<b>Alternativa 2</b>	0.125	0.833	0.100	0.195
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: Transmisor de Presión IFM-PQ3809.

*Transmisor de Presión Diferencial:*

Mediante el análisis de la tabla 20 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación del transmisor de presión diferencial.

### **Tabla 20**

*Matriz de Selección del Transmisor de Presión Diferencial*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.813	0.167	0.888	0.781
<b>Alternativa 2</b>	0.188	0.833	0.113	0.219
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: Transmisor de Presión IFM-PQ3809.

### ***Selección de Componentes del Sistema de Control***

En búsqueda de solventar los requerimientos funcionales y técnicos del sistema de control del Banco de Pruebas se ve la necesidad de analizar los criterios y alternativas disponibles para la selección de los diferentes componentes del sistema, con el objetivo de proponer una óptima y eficaz automatización y monitoreo de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos de aire.

### ***Criterios de Selección y Alternativas de los Componentes del Sistema de Control***

#### ***Criterios de Selección y Alternativas de los Actuadores***

Para implementar la automatización de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos de aire en el Banco de Pruebas es necesario el remplazo de los actuadores de operación manual por componentes que permitan la regulación precisa y automática de presión y vacío en los diferentes procesos.

Todos los actuadores de operación manual del Banco de Pruebas son válvulas dosificadoras de presión que mediante la apertura y cierre total de las mismas le permiten al operario regular y mantener la presión y el vacío generado al interior de las líneas de proceso, sin embargo, en base al análisis de la filosofía de operación del Banco de Pruebas se identificó la existencia de determinadas válvulas que requieren estar en un estado de semiabiertas con el propósito de controlar las variables simuladas en el proceso de comprobación y/o calibración de los instrumentos.



Por este motivo se ve la necesidad de seleccionar un actuador que permita ejercer una regulación de la presión de una manera proporcional y precisa. Las electroválvulas proporcionales permiten controlar y regular un fluido en función de una señal eléctrica, que puede ser corriente o voltaje. La asociación de

estas válvulas a una electrónica de pilotaje permite mejorar su nivel de precisión, estas válvulas por lo general son aplicadas en el control de posición, en vista de tener la capacidad de generar un control proporcional preciso, permitiendo un manejo exacto de la presión.

Se plantea como criterios de selección de las electroválvulas proporcionales las características de: rango de presión, características eléctricas, precisión, conexión al proceso y costo económico. A continuación, en la tabla 21 se presenta las alternativas disponibles.

**Tabla 21**

*Alternativas para la Electroválvula Proporcional*

Componente	Electroválvula proporcional	
Imagen referencial		
Marca y modelo	Festo-VPPX	CAMOZZI-LR
Conexión al proceso	Rosca G 1/4,1/8	absoluta
Rango de presión	0 - 10 [bar]	análoga /4-20 [mA]
Precisión	1%	8 - 30 [V]
Voltaje de funcionamiento	24 ±10% [V]	0 - 80 [°C]
Señal de control	0 - 10[V]/4 - 20[mA]	0 - 14.5 [psi]
Consumo eléctrico	7 [W]	0.2 [psi]
Precio		



Sin embargo, en vista del costo económico que tiene una electroválvula proporcional y por motivo de necesitarse ocho actuadores para la automatización del Banco de Pruebas, se ve la posibilidad de

proponer la selección de un componente más económico buscando mantener un funcionamiento óptimo dentro de la automatización.

Una opción claramente más económica sería optar por una electroválvula solenoide, componente electromecánico diseñado para controlar el flujo en la línea de proceso; cabe aclarar que su única función es el control del fluido y no la regulación, esto dado por las dos únicas posiciones de las electroválvulas solenoides, totalmente abierto y totalmente cerrado, sin embargo mediante el uso conjunto de la electroválvula solenoide y una válvula reguladora de presión se puede regular la presión de una manera más precisa similar al funcionamiento de la electroválvula proporcional con un bajo presupuesto. A continuación, se presenta la propuesta de selección de la electroválvula solenoide en la tabla 22.

**Tabla 22**


*Alternativas para la Electroválvula Solenoide*

Componente	Electroválvula solenoide	
<b>Imagen referencial</b>		
<b>Marca y modelo</b>	Burkert-6013	IFM-PT0507
<b>Configuración</b>	ON/OFF	Absoluta
<b>Voltaje de funcionamiento</b>	24 [V]/ 50 [Hz]	análoga /4-20 [mA]
<b>Temperatura de operación</b>	-10 - 100 [°C]	8 - 30 [V]
<b>Conexión al proceso</b>	Rosca G 1/8, ¼	0 - 80 [°C]
<b>Fluido</b>	aire comprimido/agua/aceite	0 - 14.5 [psi]
<b>Viscosidad máxima</b>	21 [mm <sup>2</sup> /s]	0.2 [psi]
<b>Precio</b>		

La válvula reguladora o válvula de estrangulación regulan el caudal del fluido. La regulación es producto del estrangulamiento del fluido del aire comprimido en ambos sentidos, hacía el escape y hacía la alimentación del aire. A continuación, en la tabla 23 se detalla las especificaciones técnicas de la válvula.

**Tabla 23**

*Especificaciones Técnicas de la Válvula Reguladora*

Componente	Válvula reguladora
Imagen referencial	
Función	Estrangulación
Conexión al proceso	QS-8
Caudal nominal	256 [l/min]
Presión de funcionamiento	0.2 - 10 [bar]
Medio de funcionamiento	aire comprimido
Temperatura ambiente	-10 - 60 [°C]

***Criterios de Selección y Alternativas del Controlador***



El controlador es considerado el elemento fundamental del sistema de control, esto se debe a que este componente cumple con las funciones de adquisición de datos, procesamiento de señales y ejecuta las acciones de control por medio de los actuadores del sistema. El controlador tener la capacidad de manejar el número total, rangos y tipos de señales del sistema, permitir la integración de las diferentes tecnologías y/o componentes del sistema y permitir una automatización eficaz de los procesos, capacidades cubiertas por un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en ingles).

Según el análisis de requisitos técnicos del sistema de control, a continuación, en la tabla 24 se proponen dos alternativas a ser consideradas. Cabe mencionar que se determinó como criterios de

selección de los PLC's: ciclo de ejecución, la capacidad y características de las entradas y salidas, módulos funcionales, comunicación, compatibilidad, servicios del proveedor y el costo económico.

**Tabla 24**


*Alternativas para el Controlador Lógico Programable*

Componente	Controlador Lógico Programable	
Imagen referencial		
Marca y modelo	Panasonic-FP0R-C16	Allen Bradley-Micro870
E/S Digitales	16 (8/8)	24 (14/10)
E/S Analógicas	Opcional FP0R-A42	Opcional 2080-IF2
Memoria de programa	EEPROM	FRAM
Capacidad de programa	16 k	20 k
Velocidad de proceso	0.08 [us]	0.08 [us]
Comunicación	RS485	RS23/RS485
Precio		

Por requerimiento funcional se establece la implementación de una pantalla táctil programable al sistema de control, la misma que permite la programación de una HMI para monitorear los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos proporcionando en tiempo real datos e información de los mismos. A continuación, en la tabla 25 se presenta las especificaciones técnicas de la pantalla.

**Tabla 25**

*Especificaciones Técnicas de la Pantalla*

Componente	Pantalla
Imagen referencial	
Marca y modelo	Panasonic-GT03T
Puerto de comunicación	RS422/RS485
Voltaje nominal	24 [V]
Potencia de consumo	1.9 [W]
Dimensiones	98x86x28 [mm]
Protección	IP67

### ***Matriz de Selección de los Componentes del Sistema de Control***

En base al análisis de los criterios para la selección de componentes del sistema de control para la modernización del Banco de Pruebas, se propone dos alternativas para los actuadores (electroválvula proporcional y electroválvula solenoide) y el controlador asegurando que las mismas cumplan con los requerimientos funcionales y técnicos para el control de los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos.

Se procede a aplicar el método de proceso analítico jerárquico con el propósito de seleccionar los componentes más acertados para el sistema en función de los criterios considerados tanto para los actuadores (rango, precisión y costo) como para el controlador (características, dimensiones y costo). Se presenta la matriz final de selección del proceso y anexo a este proyecto se encuentra el desarrollo del método para cada componente.

#### ***Electroválvula Proporcional:***

Mediante el análisis de la tabla 26 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación de la electroválvula proporcional.



**Tabla 26***Matriz de Selección de la Electroválvula Proporcional*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.813	0.167	0.888	0.781
<b>Alternativa 2</b>	0.188	0.833	0.113	0.219
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: Electroválvula proporcional Festo-VPPX.

*Electroválvula Solenoide:*

Mediante el análisis de la tabla 27 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación de la electroválvula solenoide.

**Tabla 27***Matriz de Selección de la Electroválvula Solenoide*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.813	0.167	0.888	0.781
<b>Alternativa 2</b>	0.188	0.833	0.113	0.219
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: Electroválvula solenoide Burkert-6013.

*Controlador Lógico Programable:*

Mediante el análisis de la tabla 28 se determina que la alternativa 1 es la mejor opción a seleccionar para la adquisición e implementación del PLC.

**Tabla 28***Matriz de Selección del Controlador Lógico Programable*

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Total</b>
<b>Alternativa 1</b>	0.813	0.167	0.888	0.781
<b>Alternativa 2</b>	0.188	0.833	0.113	0.219
<b>Ponderación</b>	0.258	0.120	0.621	

Alternativa 1: PLC Panasonic-FP0R-C16.

### **Diseño Propuesto para la Modernización del Banco de Pruebas**

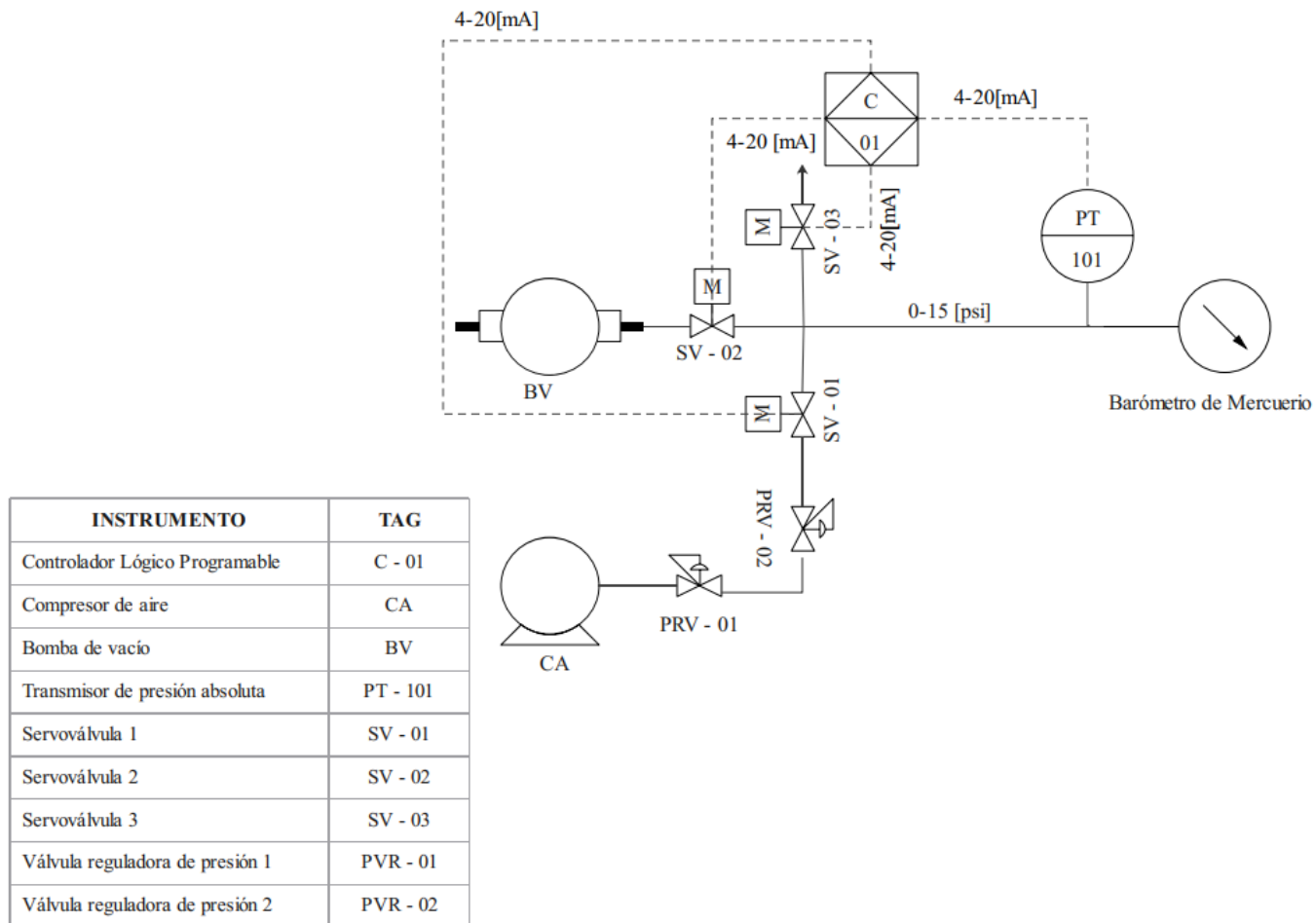
#### ***Diagramas de Flujo de Proceso para la Modernización del Banco de Pruebas***

Posterior a la descripción general, análisis de filosofía de operación y determinar el modelo físico del Banco de Pruebas, se realiza la elaboración de los diagramas de flujo de los procesos del banco que ilustra las relaciones entre los principales componentes del banco.

**Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Altímetros**

**Figura 27**

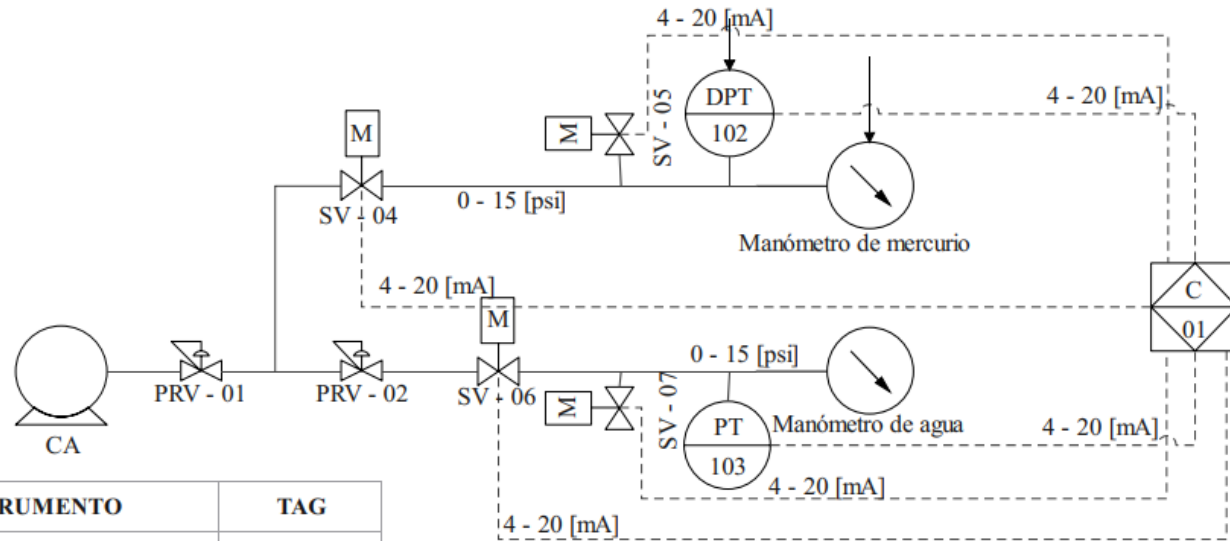
Diagrama PI&D del Proceso de Calibración y Prueba de Altímetros



**Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad**

**Figura 28**

Diagrama PI&D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores **de Velocidad**

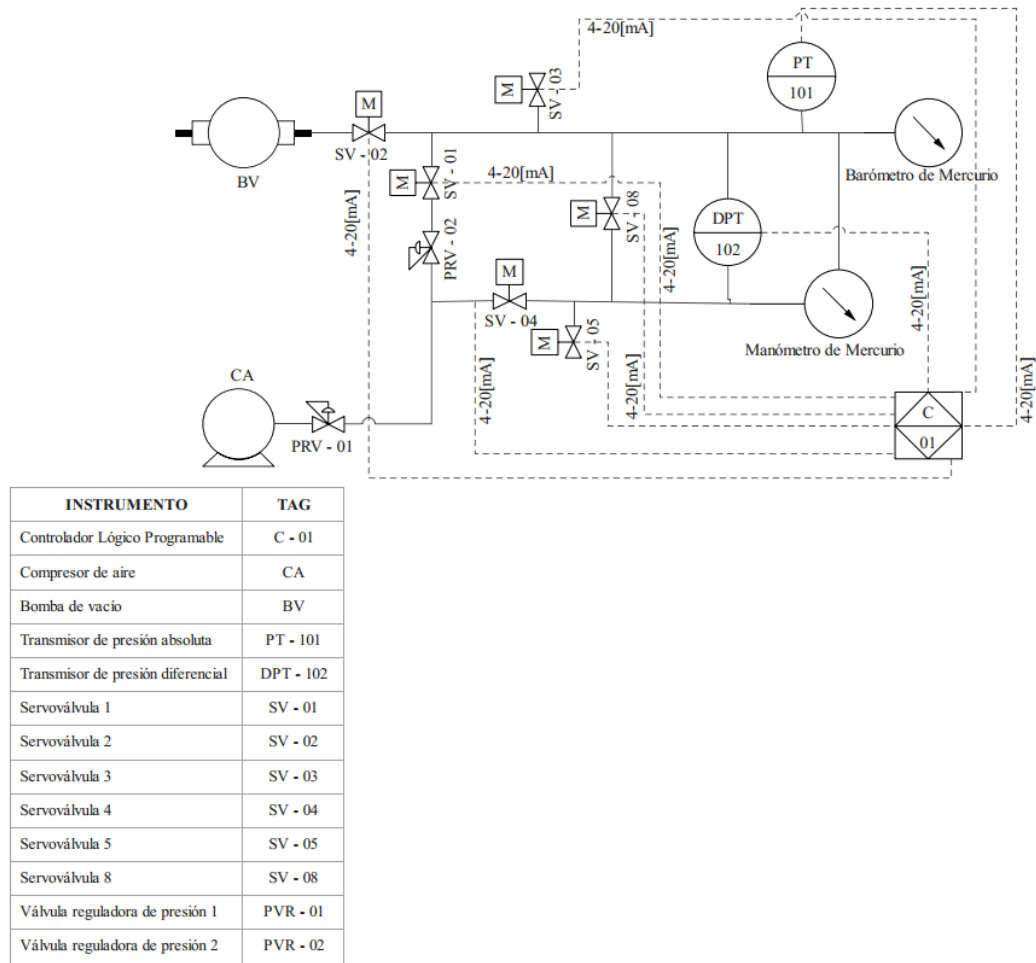


INSTRUMENTO	TAG
Controlador Lógico Programable	C - 01
Compresor de aire	CA
Transmisor de presión diferencial	DPT - 102
Transmisor de presión relativa	PT - 103
Servoválvula 4	SV - 04
Servoválvula 5	SV - 05
Servoválvula 6	SV - 06
Servoválvula 7	SV - 07
Válvula reguladora de presión 1	PVR - 01
Válvula reguladora de presión 2	PVR - 02

**Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Match**

**Figura 29**

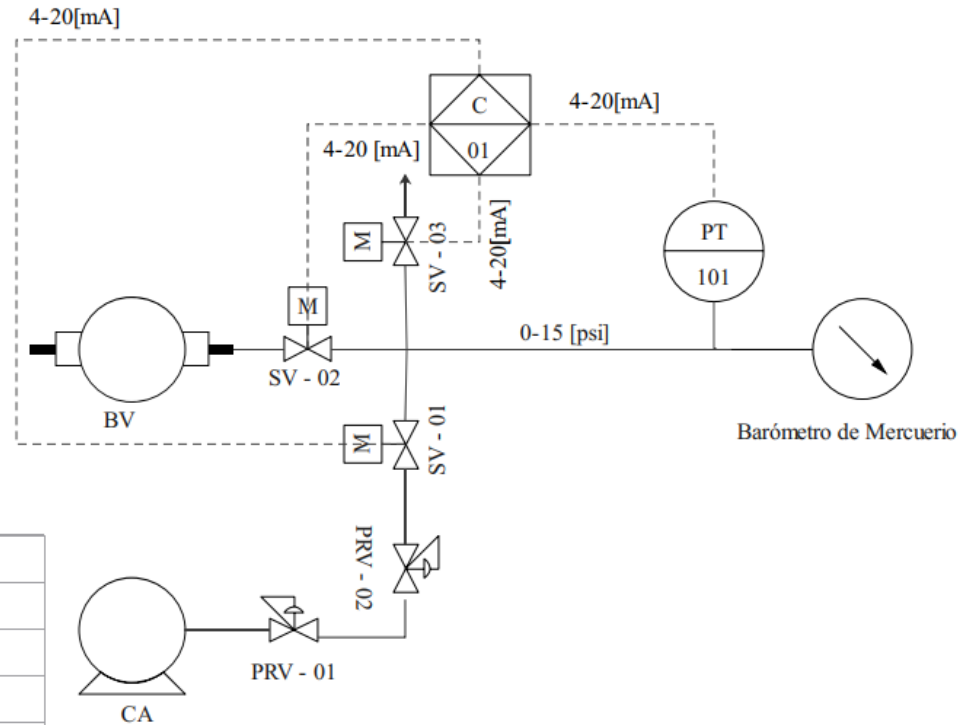
**Diagrama PI&D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Match**



**Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad Vertical**

**Figura 30**

*Diagrama PI&D del Proceso de Calibración y Prueba de Indicadores de Velocidad Vertical*



INSTRUMENTO	TAG
Controlador Lógico Programable	C - 01
Compresor de aire	CA
Bomba de vacío	BV
Transmisor de presión absoluta	PT - 101
Servoválvula 1	SV - 01
Servoválvula 2	SV - 02
Servoválvula 3	SV - 03
Válvula reguladora de presión 1	PVR - 01
Válvula reguladora de presión 2	PVR - 02

**Diagramas Eléctricos para la Modernización del Banco de Pruebas**

**Figura 31**

*Diagrama Eléctrico de Fuerza*

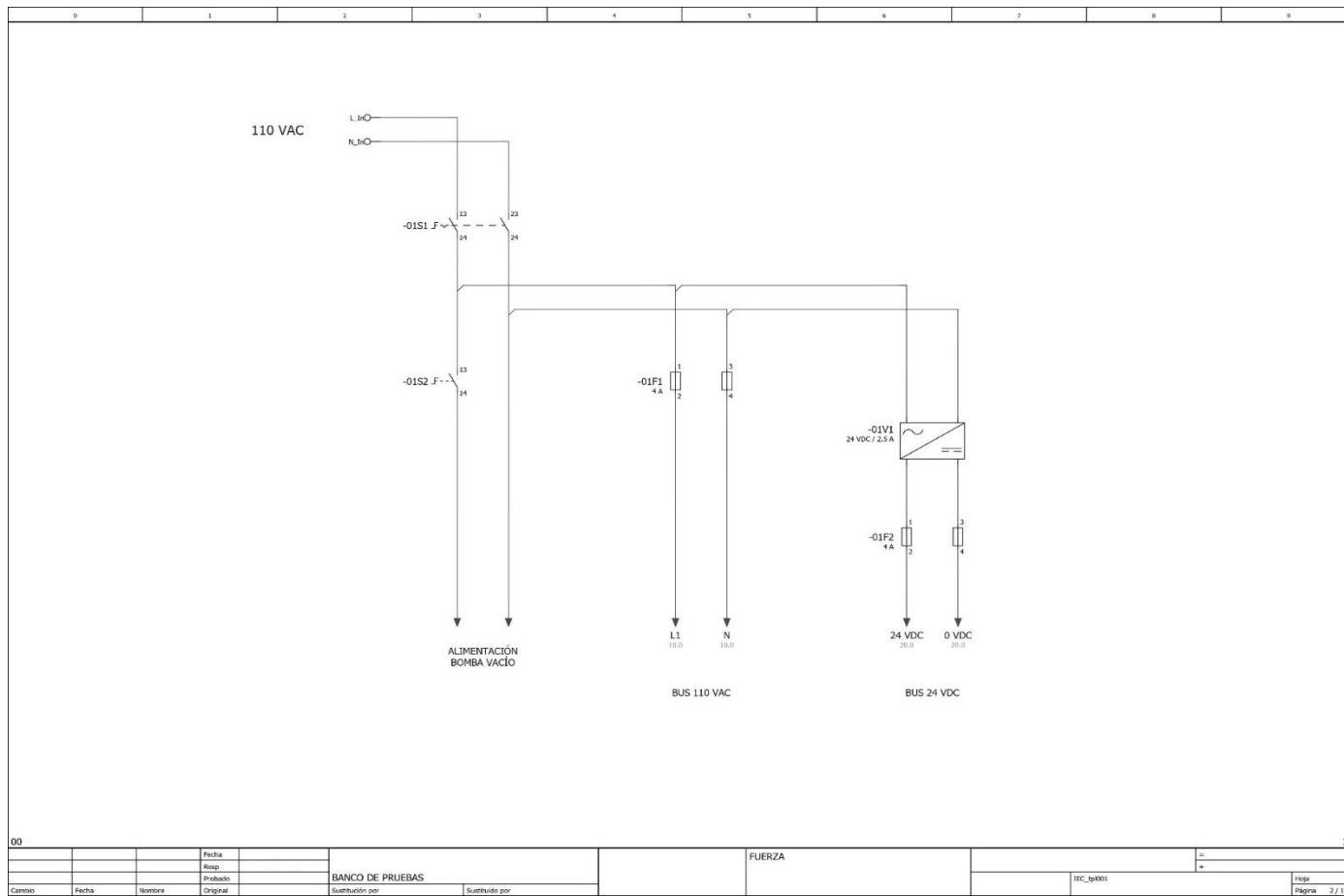
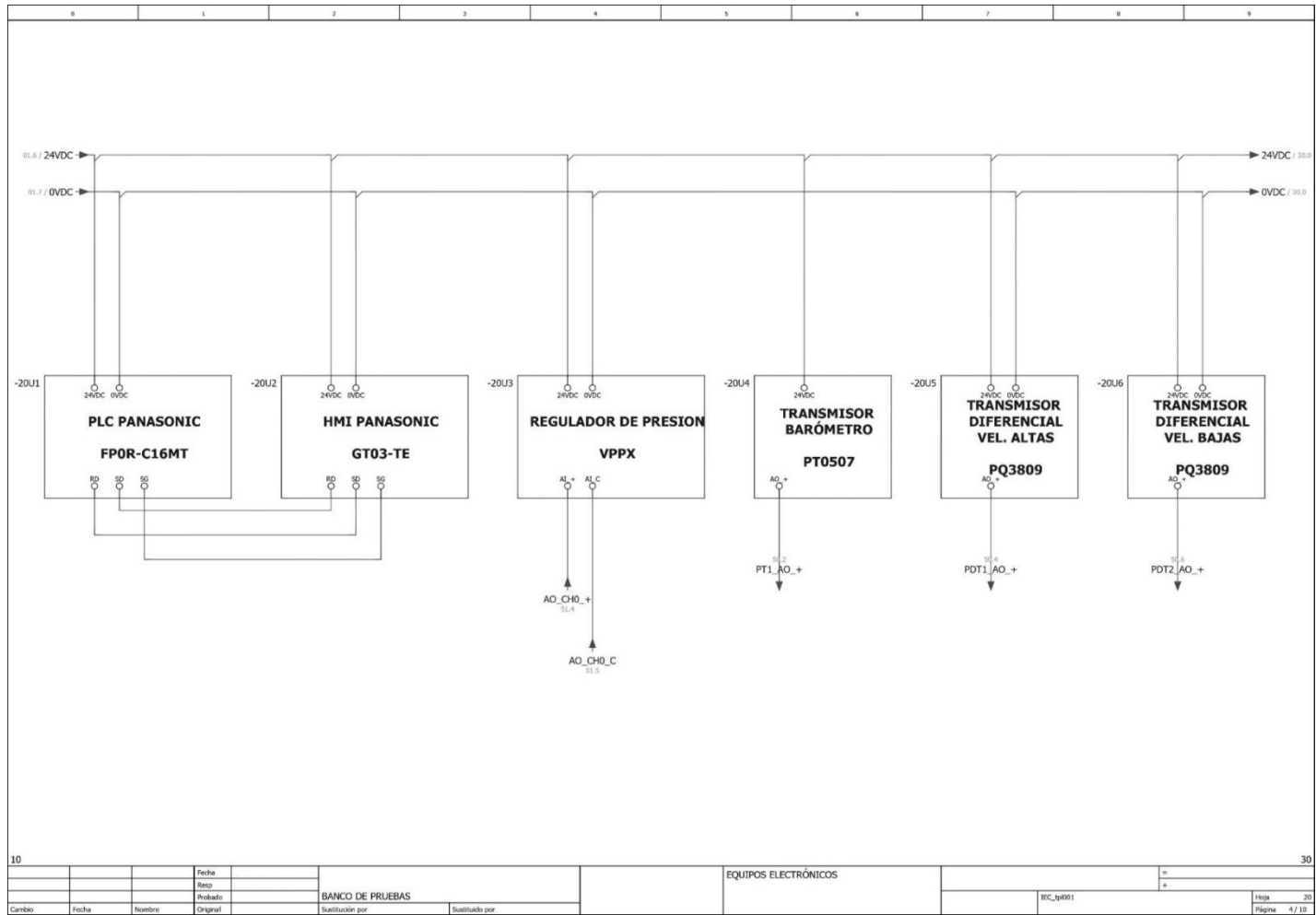






Figura 33

Diagrama Eléctrico de Conexión de Equipos Electrónicos



**Figura 34**

*Diagrama Eléctrico de las Entradas Digitales 1*

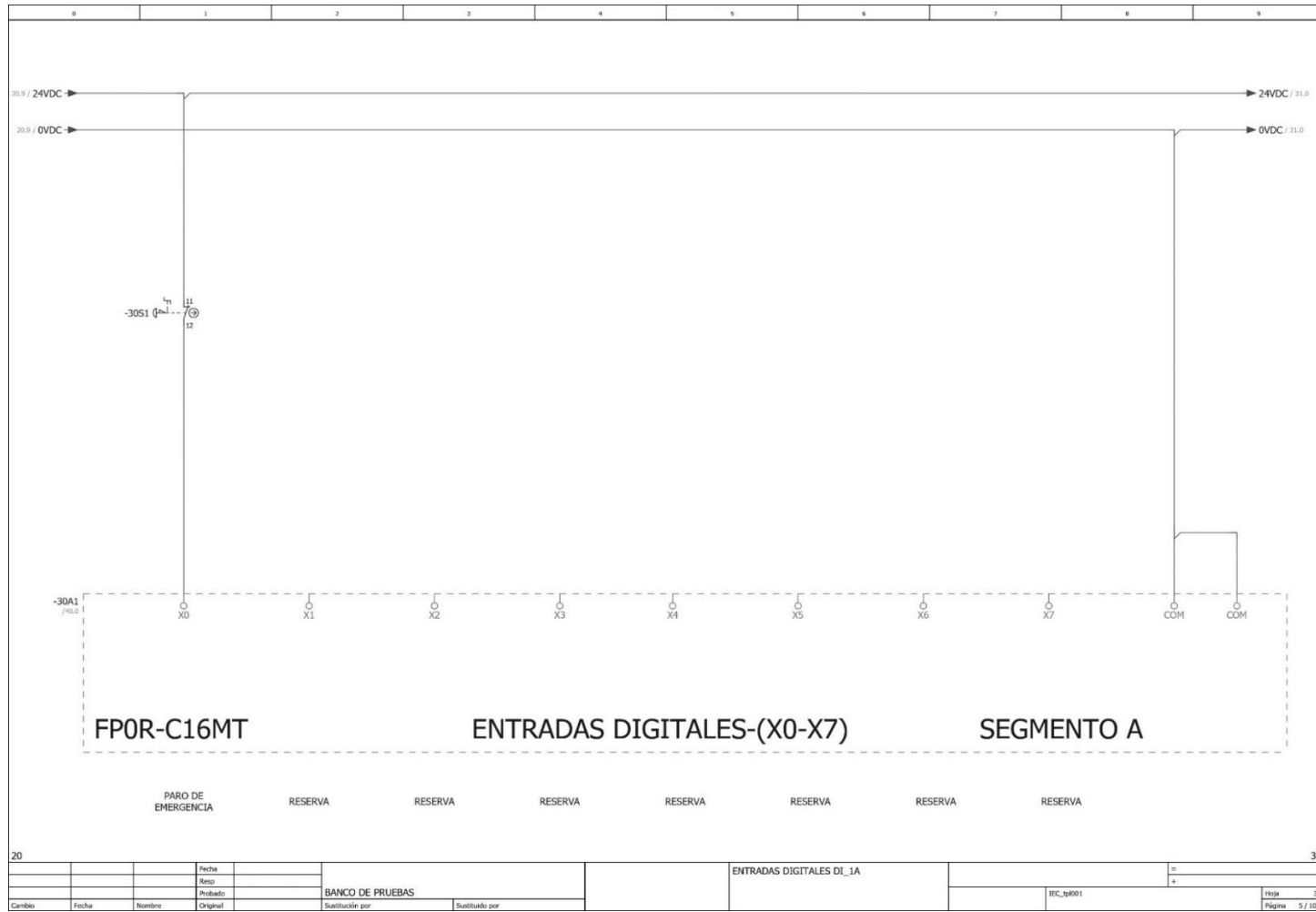
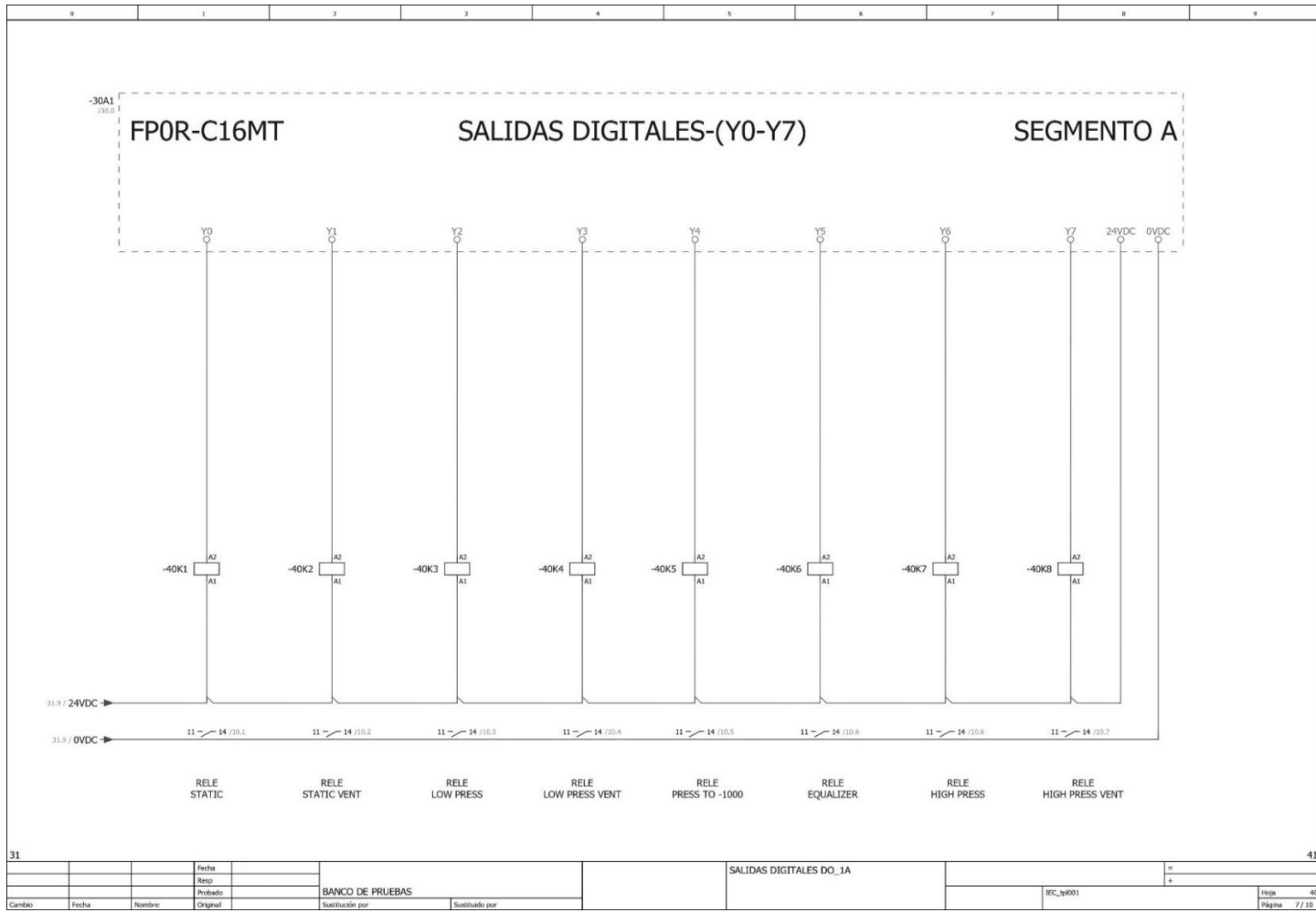




Figura 36

Diagrama Eléctrico de las Salidas Digitales 1



**Figura 37**

*Diagrama Eléctrico de las Salidas Digitales 2*

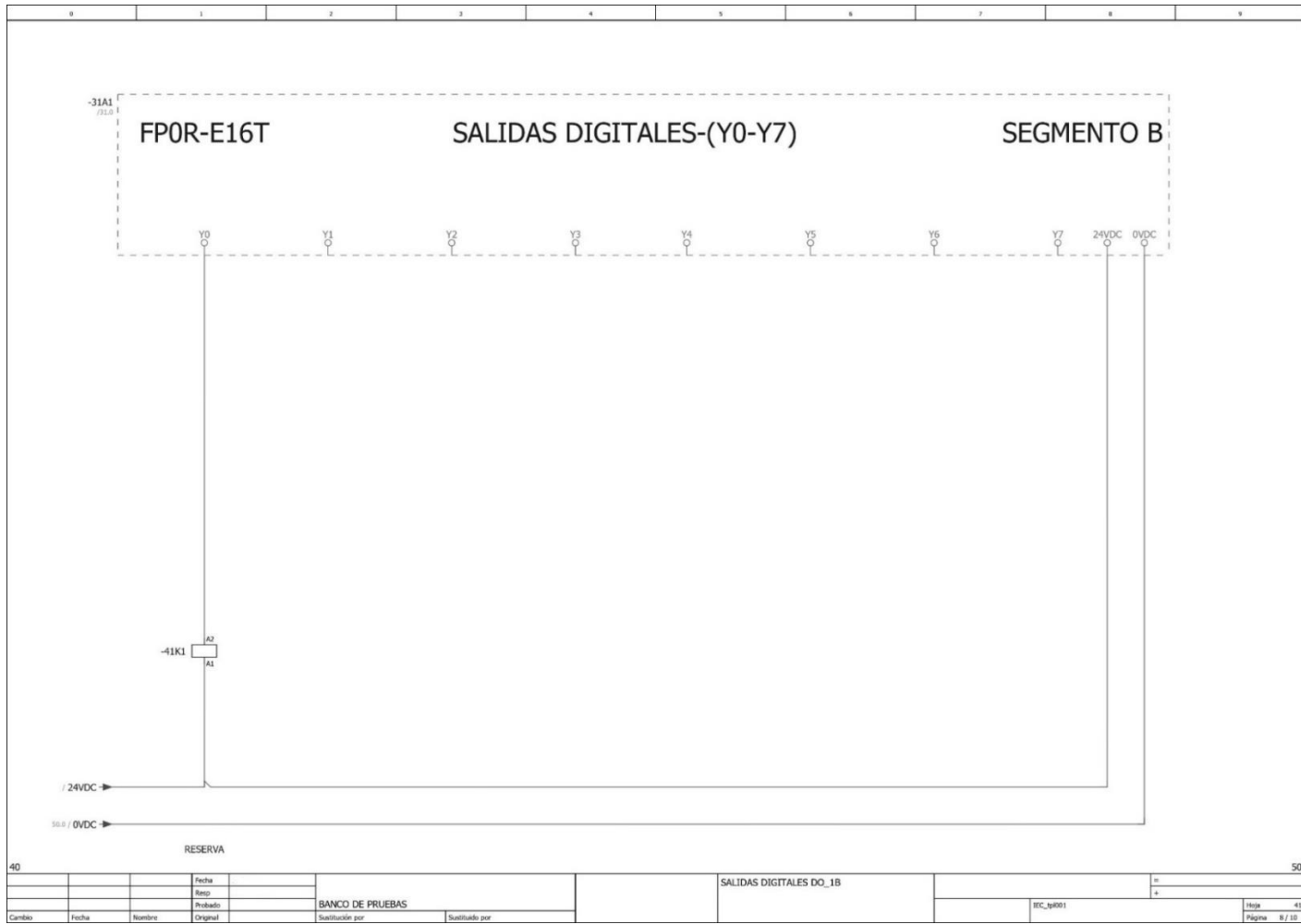
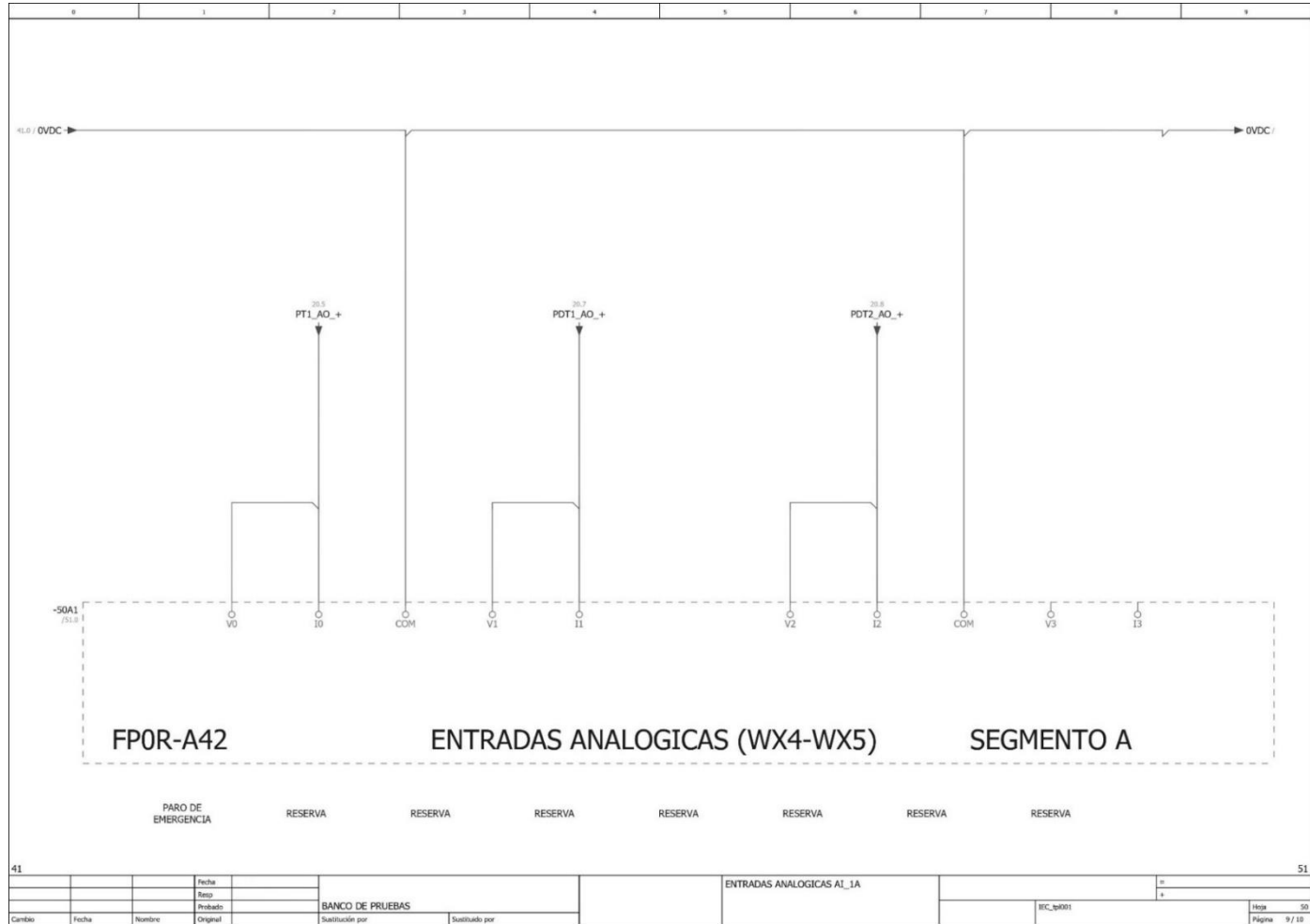


Figura 38

Diagrama Eléctrico de las Entradas Análogas

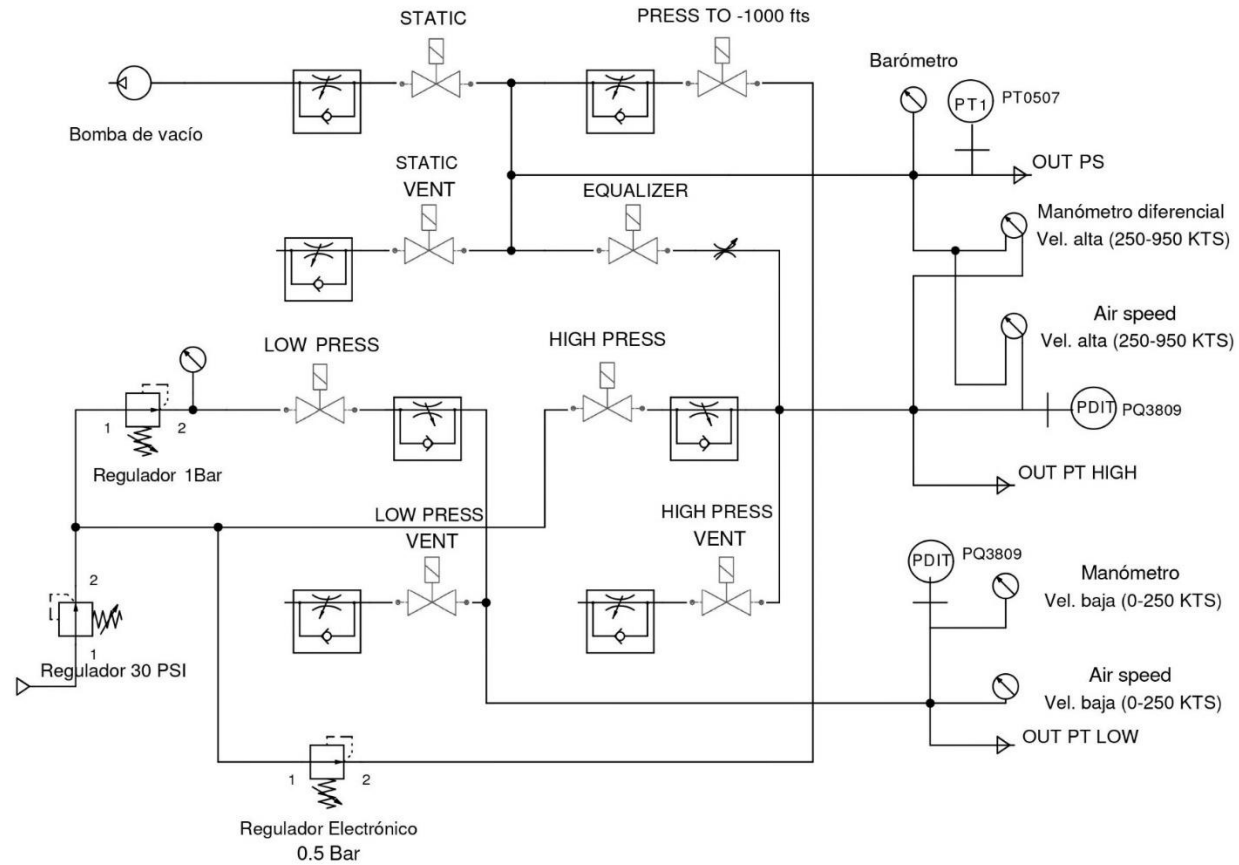




**Diagrama Neumático para la Modernización del Banco de Pruebas**

**Figura 40**

*Diagrama Neumático de la Modernización del Banco de Pruebas*



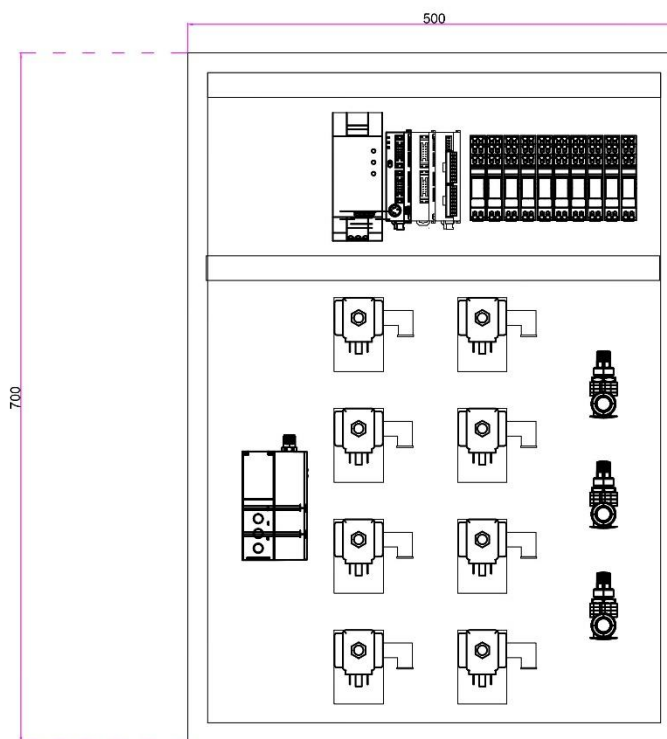


### ***Distribución del Tablero de Control***

En base a los diagramas de flujos de proceso y diagramas eléctricos que determinan la relación y ubicación funcional de los componentes del Banco de Pruebas se los distribuyó y ubicó en el tablero de control tomando en consideración las dimensiones de cada uno de los componentes como se observa en la figura 41.

**Figura 41**

*Distribución del Tablero de Control del Banco de Pruebas*



A continuación, en la tabla 29 se detalla los componentes instalados en la distribución del tablero de control del Banco de Pruebas.

**Tabla 29***Componentes del Tablero de Control del Banco de Pruebas*

<b>No.</b>	<b>Componente</b>
1	Fuente de alimentación; Sal 24V DC; 2.5 A
2	PLC Panasonic FP0R-C16
3	Módulo de entradas digitales AFP0RE16T
4	Módulo de entradas análogas AFP0RA42
5	8 Relés 110VAC/24VDC
6	8 Electroválvulas solenoide Burket-6013
7	Regulador de presión proporcional Festo-VPPX
8	Transmisor de presión absoluta IFM-PT0507
9	Transmisor de presión diferencial IFM-PQ3809
10	Transmisor de presión relativa IFM-PQ3809

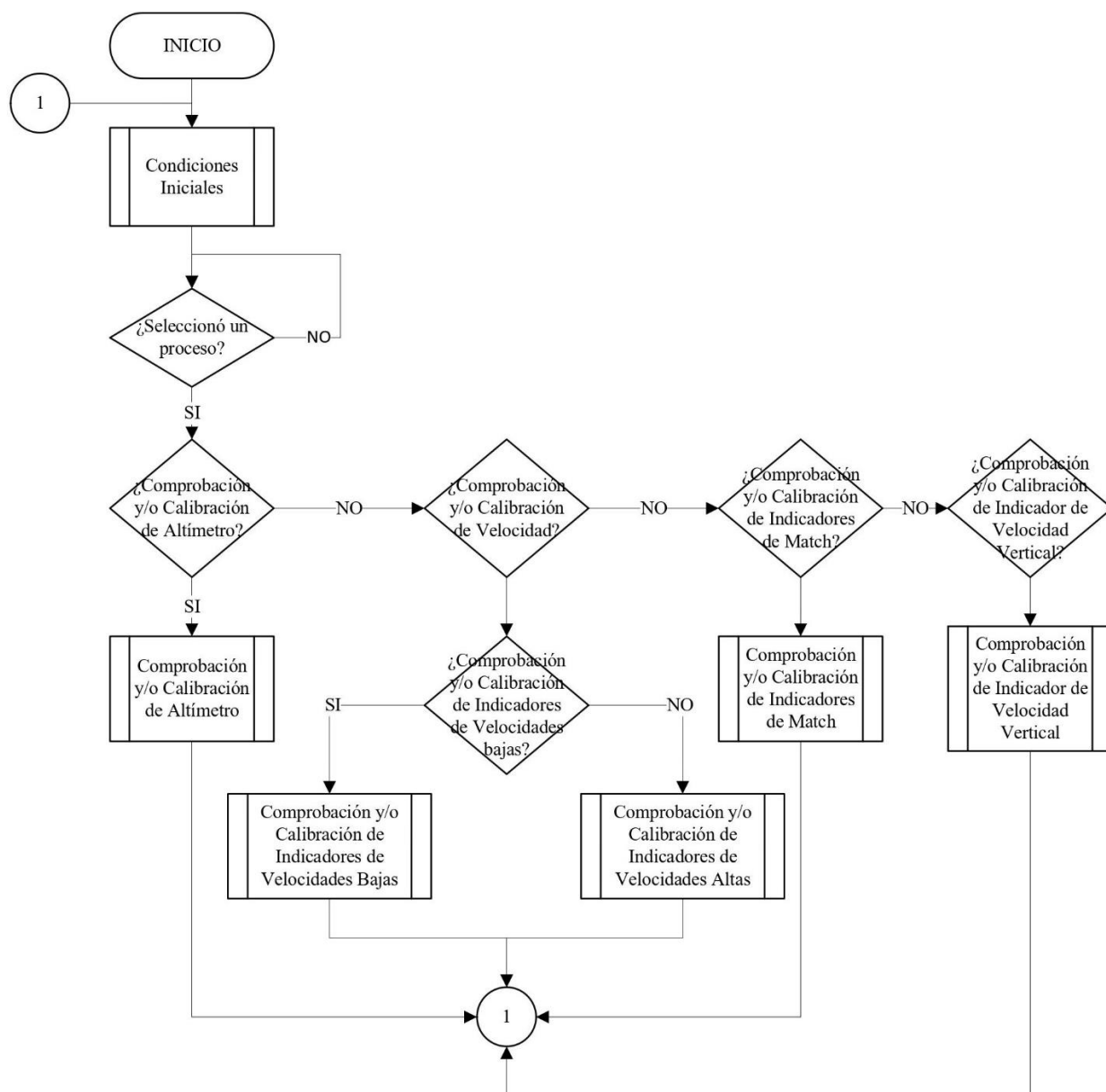
**Desarrollo del Software para la Modernización del Banco de Pruebas**

El desarrollo del software para el sistema de control de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos se los realizó en el software de programación FPWIN propio de la familia de PLC's Panasonic FP. La implementación del programa se encuentra adjunta a este documento en el anexo #. A continuación, se presenta la lógica de programación conceptualizada en los diagramas de flujo de cada uno de los procesos de la modernización del Banco de Pruebas.

### Diagrama de Flujo del Programa Principal

Figura 42

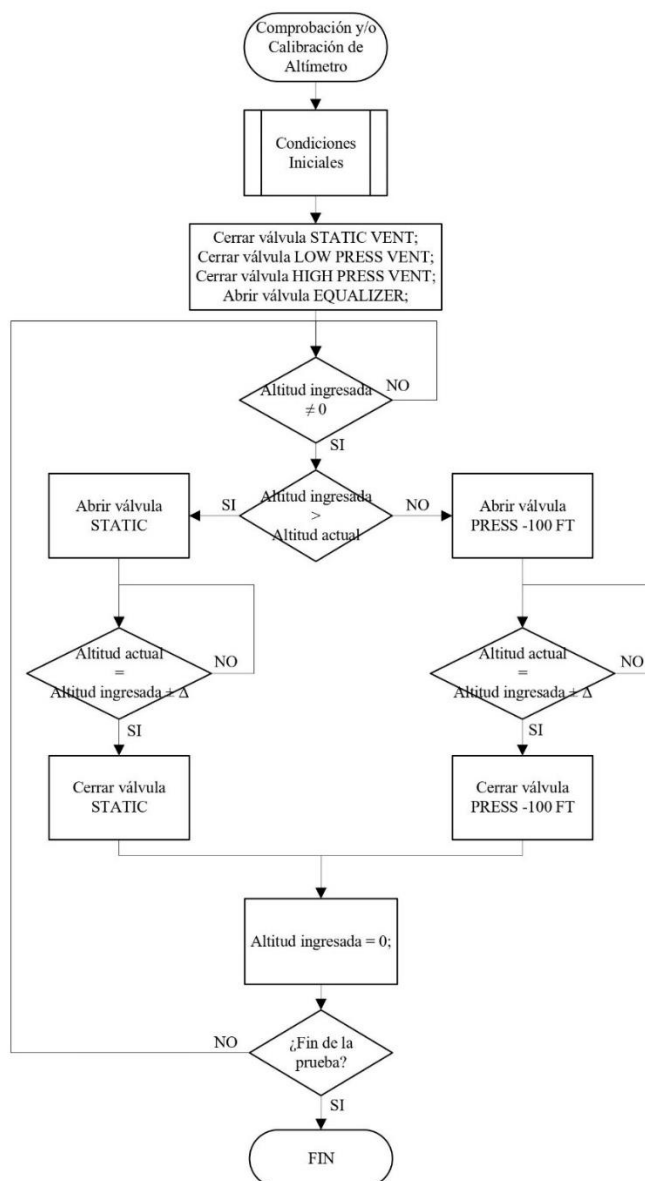
### Diagrama de Flujo del Programa Principal



**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Altimetros**

**Figura 43**

Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Altimetros



**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Bajas**

**Figura 44**

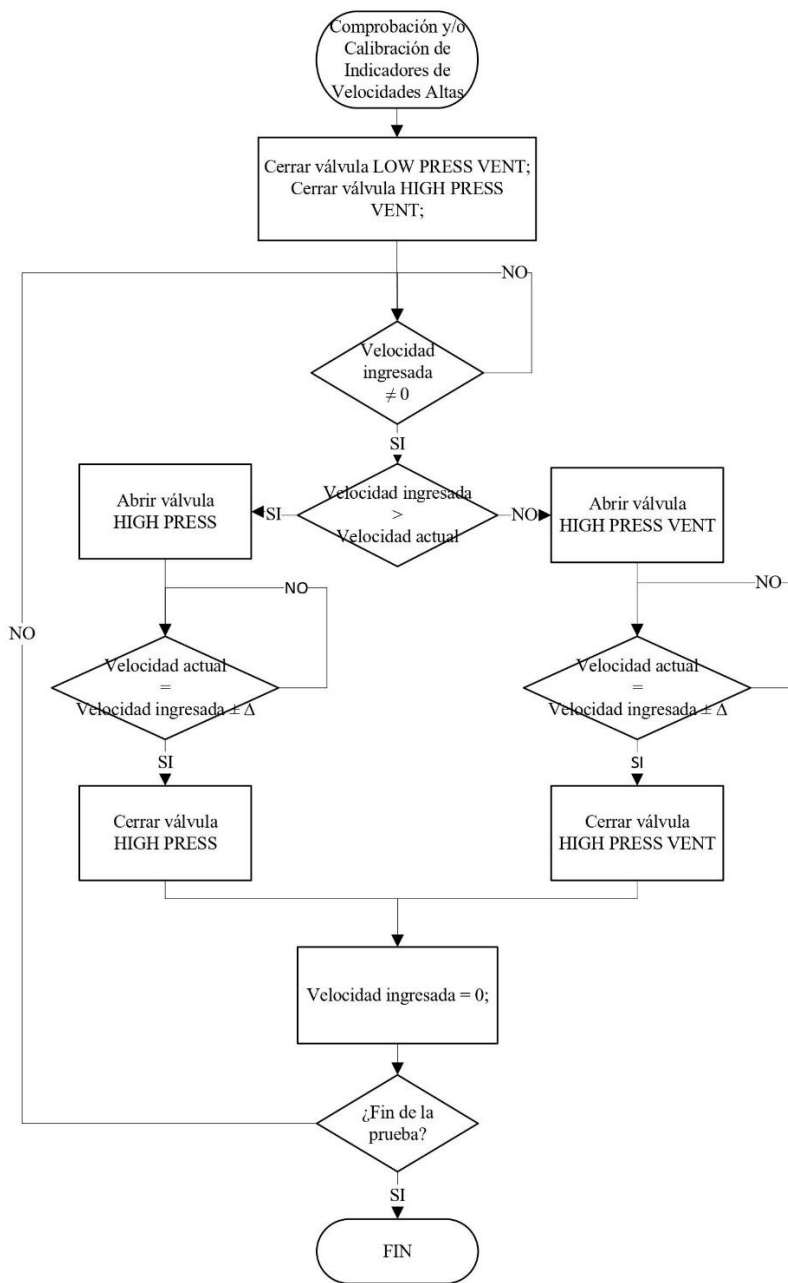
**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad**



**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Altas**

**Figura 45**

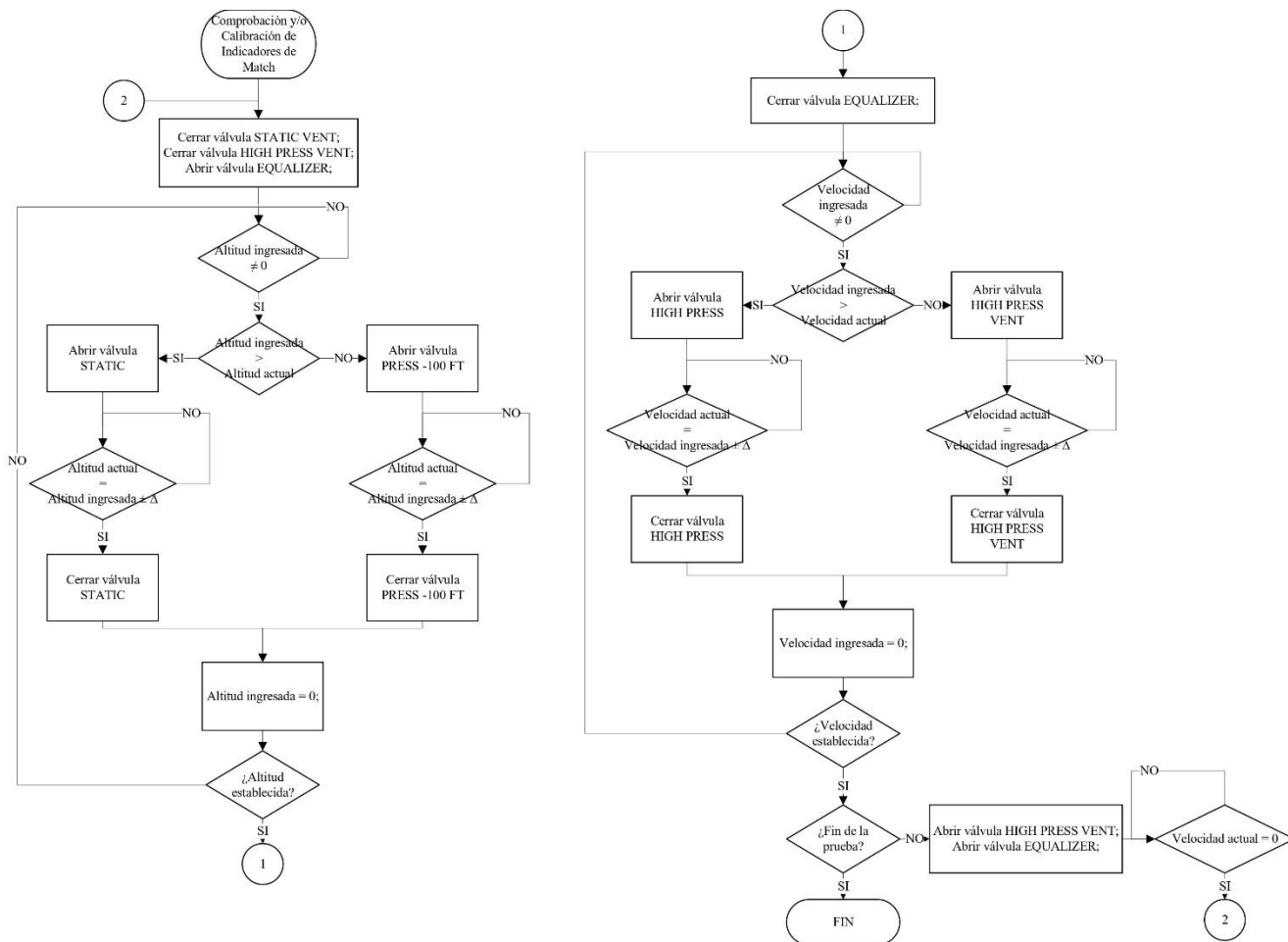
Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidades Altas



**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match**

**Figura 46**

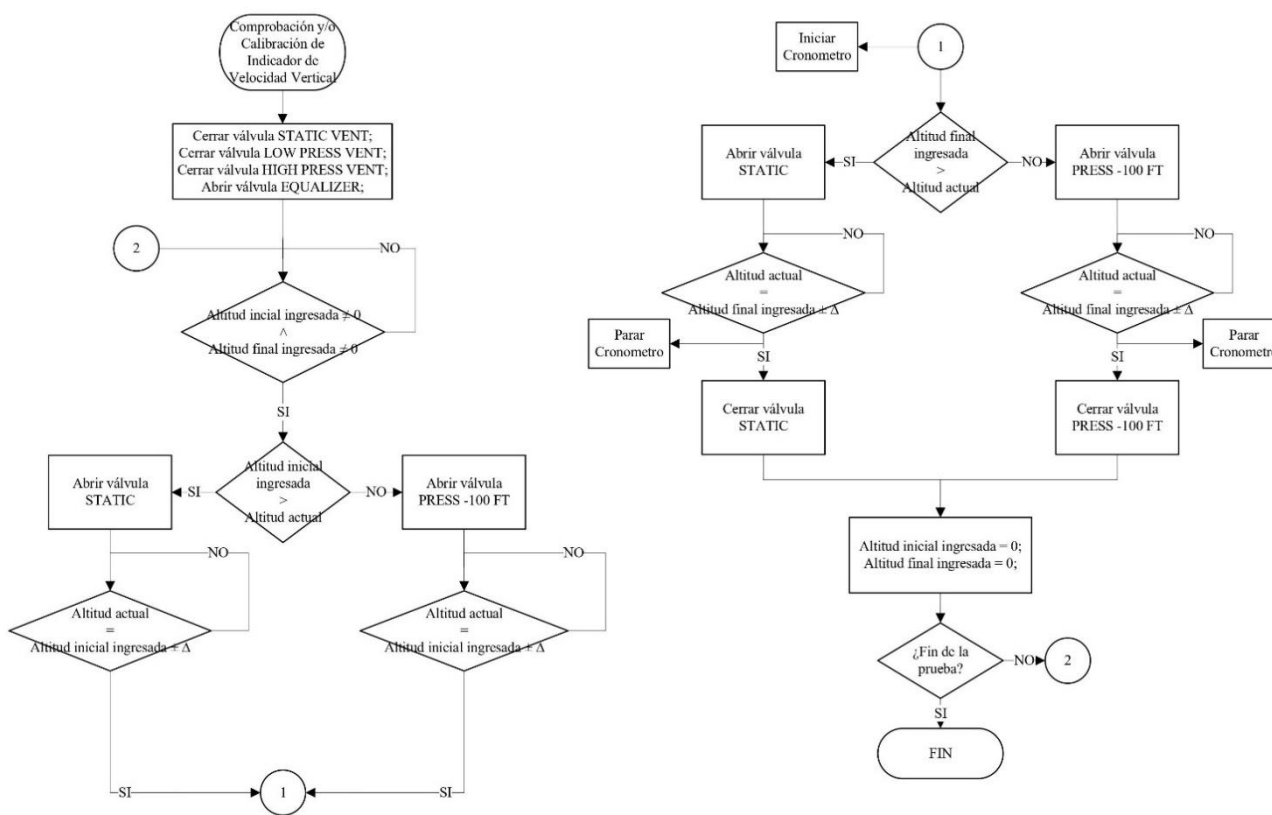
*Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match*



**Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical**

**Figura 47**

Diagrama de Flujo del Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical





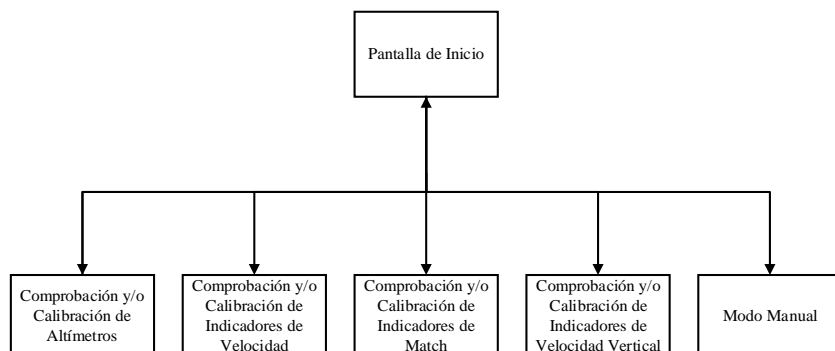
## **Diseño de la Interfaz Hombre-Maquina para la Modernización del Banco de Pruebas**

Con el propósito de cubrir la necesidad funcional de controlar y monitorear de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos en el Banco de Pruebas se propone la implementación de una interfaz hombre-máquina, como un elemento que proporciona la interacción del personal técnico con los sistemas de instrumentación y control del Banco de Pruebas. A continuación, se procede con el diseño de la interfaz determinando la arquitectura, navegación y distribución:

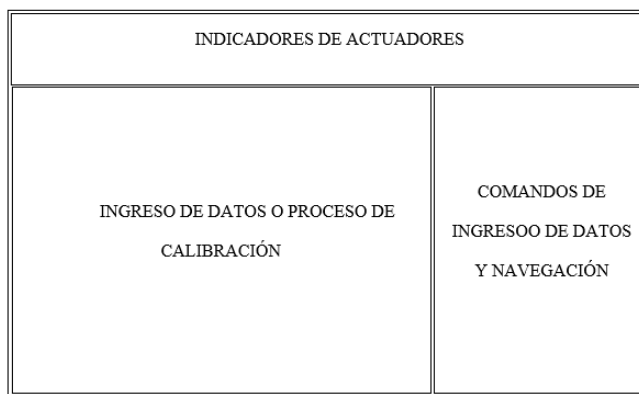
### ***Arquitectura y Navegación de la Interfaz Hombre-Maquina***

Para iniciar el desarrollo del diseño de la interfaz se empieza por definir las diferentes pantallas que se pone a disposición al personal técnico que opera el Banco de Pruebas para la interacción con el sistema de automatización y control de los procesos de comprobación y/ calibración de los instrumentos.

En la figura 48 se detallan cuáles son estas pantallas, la relación lógica que existe entre las mismas, permitiendo determinar la jerarquización y el modo de navegación dentro de la arquitectura de la interfaz en base al formato de visualización y control establecido para la interfaz de la modernización del Banco de Pruebas.

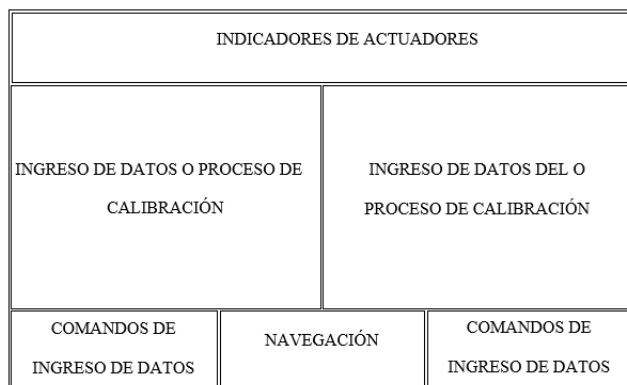
**Figura 48***Arquitectura de la Interfaz Hombre-Máquina****Distribución de Pantallas y Uso de Colores de la Interfaz Hombre-Maquina***

Como consiguiente en el diseño de la interfaz se define la distribución de las pantallas a manera de plantillas donde se define las diferentes tipologías de según corresponda a las pantallas antes determinadas. En estas plantillas se establece la ubicación de los diferentes componentes de cada pantalla indicando al ubicación y función de cada una. A continuación, se muestra las diferentes plantillas a utilizar en el diseño de la interfaz mostradas en las figuras 49 y 50.

**Figura 49***Distribución de la pantalla 1 de la Interfaz Hombre-Máquina*

**Figura 50**

*Distribución de la pantalla 2 de la Interfaz Hombre-Máquina*




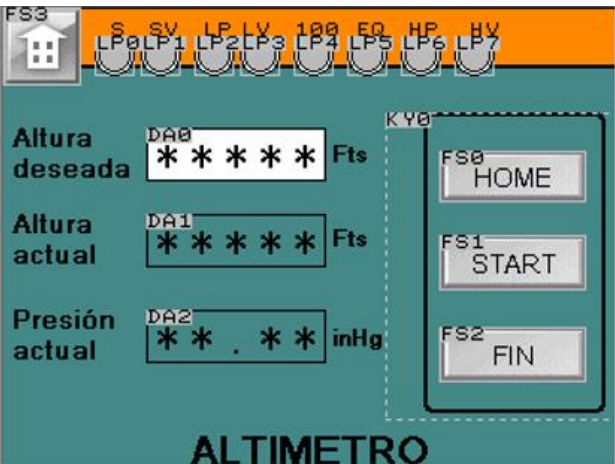
En base a la aplicación de la guía GEDIS parte del proceso de diseño de la interfaz hombre-maquina es indispensable la selección y aplicación a los diferentes elementos de las pantallas, en la tabla # se determina los colores a usar en la interfaz de la modernización del Banco de Pruebas.

### ***Pantallas de la Interfaz Hombre-Máquina***

En base a la aplicación de la metodología del diseño realizado para la interfaz hombre-máquina se obtiene como resultado el diseño de cada una de las pantallas que conforman la interfaz a implementar para el control y monitoreo de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos en el Banco de Pruebas. A continuación, en la tabla # se presenta el resultado del diseño de las pantallas.

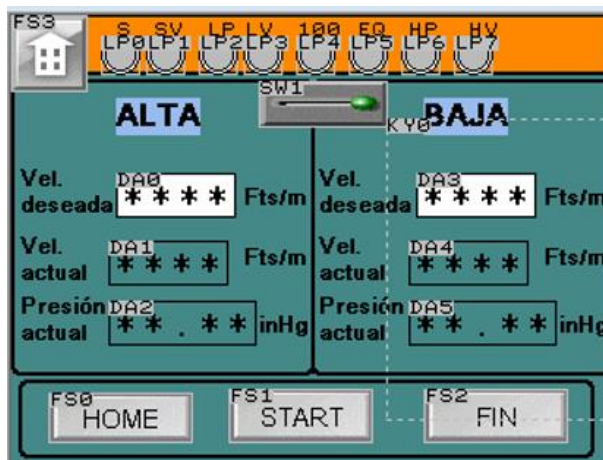
Tabla 30

Pantallas de la Interfaz Hombre-Máquina

Pantalla	Características	Imagen
<p>Inicio</p>	<p>Se presenta los diferentes procesos de comprobación y o calibración de instrumentos del Banco de Pruebas.</p>	
<p>Comprobación y/o Calibración de Altímetros.</p>	<p>Permite el ingreso de la altitud y muestra la altitud simulada al instrumento para su comprobación y/o calibración, adicional indica la activación de los diferentes actuadores.</p>	

Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad.

Permite la conmutación entre velocidades altas y bajas para el ingreso de la velocidad y permite observar la velocidad simulada al instrumento para su comprobación y/o calibración, adicional indica la activación de los diferentes actuadores.



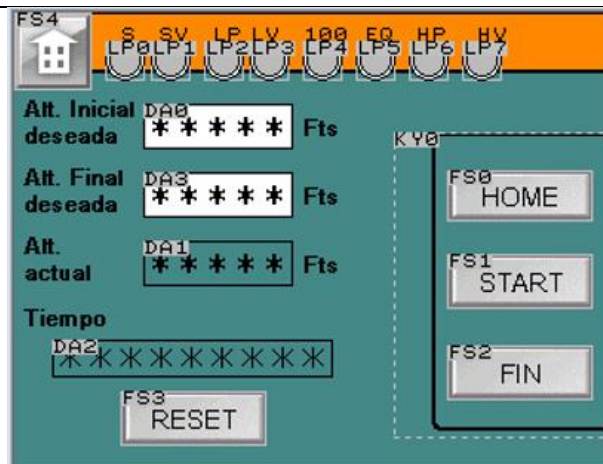
Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match.

Permite el ingreso de la altitud y velocidad y observarse las medidas simuladas al instrumento para su comprobación y/o calibración, adicional indica la activación de los diferentes actuadores.



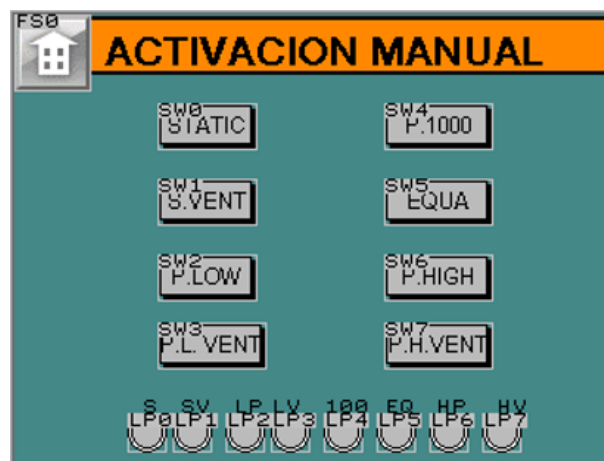
Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical.

Permite el ingreso de la altitud inicial y final y observar el tiempo transcurrido entre las mismas para la comprobación y/o calibración del instrumento, adicional indica la activación de los diferentes actuadores.



Modo manual

Permite el accionamiento de los diferentes actuadores de modo manual



### Implementación y Montaje de la Modernización del Banco de Pruebas

En base a los resultados y productos obtenidos de la etapa de diseño se procede a la implementación de cada una de las secciones y componentes distribuidos en el tablero de control, iniciando con la instalación de la canaleta y el respectivo riel DIN para el montaje de los componentes como se observa en la figura 51, de izquierda a derecha: borneras, fuente de alimentación de 24V DC, PLC Panasonic-FP0R-C16, Módulos de entradas digitales/análogas y contactores y relés, en base al diseño de distribución del tablero de control.

Se realiza el cableado de potencia y control en base a los diagramas eléctricos de cada uno de los elementos comprobando la conexión y prensado de los terminales mediante la verificación de continuidad.

**Figura 51**

*Montaje de los elementos de control y conexión eléctrica*



Posterior a esto se procede con la implementación de los componentes de instrumentación y control realizando el montaje de cada equipo en base a la distribución del tablero de control propuesta y se realiza las respectivas conexiones entre los mismos basado en los diagramas de flujo de procesos y el diagrama neumático presentado en el diseño de la modernización del Banco de Pruebas, como se observa en la figura 52.

**Figura 52**

*Montaje de los componentes de instrumentación/control y conexión neumática*



A continuación, como se observa en la figura 53 se realiza la conexión de los sistemas implementados a los elementos patrones del proceso: mediante el uso de acoples neumáticos hacia las líneas de proceso del tablero de control.

**Figura 53**

*Acoplamiento de los sistemas de instrumentación y control a los elementos patrón*



Para finalizar se establece la comunicación de la pantalla ubicada en la parte exterior del tablero de control hacia el controlador y la verificación del funcionamiento de cada uno de los componentes



implementados en el tablero de control, en la figura 54 se observa la vista interior y exterior de la implementación y montaje del tablero de control.

**Figura 54**

*Vista interior y exterior del montaje del tablero de control*



## Capítulo V

### Pruebas y Resultados

#### Pruebas de Funcionamiento del Banco de Pruebas

##### *Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Altímetros*

Se realiza las pruebas del funcionamiento del proceso de comprobación y/o calibración de altímetros mediante la simulación de las diferentes altitudes correspondientes a las tablas pruebas utilizadas por el personal técnico del Banco de Pruebas para la calibración de estos instrumentos, donde se verifica el funcionamiento de los sistemas de instrumentación y control mediante la constatación y comparación de la altitud simulada con barómetro de mercurio como elemento patrón de este proceso, obsérvese en la figura 55 la prueba de funcionamiento a 12.000 pies .

#### Figura 55

*Prueba de Funcionamiento de Comprobación y/o Calibración de Altímetro a 12.000 pies*



### ***Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad***

En el proceso de comprobación y/o calibración de Indicadores de velocidad se realiza las pruebas de funcionamiento del Banco de Pruebas con la ejecución del proceso de calibración de estos instrumentos, donde el personal técnico procede a ingresar las velocidades requeridas en este proceso y se constata la generación de las velocidades simuladas por los sistemas de instrumentación y control, comparando los datos obtenidos con los elementos patrones, manómetro de mercurio y manómetro de agua.

A continuación, en la figura 56 y 57 se observa la prueba de funcionamiento para velocidades bajas a 40 y 200 nudos respectivamente.

**Figura 56**

*Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad a 40 nudos*



**Figura 57**

*Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad a 200 nudos*



***Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match***

Para verificar el funcionamiento de la modernización del Banco de Pruebas para la comprobación y/o calibración de indicadores de match el proceso consiste en que el personal técnico ingrese la altitud requerida para la prueba mande a ejecutar la orden, el sistema de control genera la presión necesaria para simular dicha altitud, se espera que tanto que la altitud observada en la HMI como la barra de mercurio del barómetro lleguen a la altitud requerida.

Posterior se selecciona la opción de que permite el ingreso de velocidades, donde el técnico ingresa la velocidad respectiva a la altitud basado en la tabla del proceso de calibración de los indicadores de match, ejecuta la orden y de igual manera se espera la actuación del sistema de control para generar la velocidad simulada constatando el cumplimiento en la HMI como en el elemento patrón del proceso.

En la figura 58, se observa los resultados de la prueba de funcionamiento a 20.000 pies y 376 nudos respectivamente.

**Figura 58**

*Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Match a 20.000 pies y 376 nudos*



### ***Pruebas de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical***

La prueba de funcionamiento del proceso de comprobación y/o calibración de indicadores de velocidad vertical consta de que, el técnico mediante la interfaz implementada en el Banco de Pruebas ingresa la altitud inicial y final respectivas a la tabla del proceso de calibración del instrumento y ejecuta la orden, el sistema de control genera la presión requerida para simular la altitud, al llegar al primer punto automáticamente el cronómetro de la interfaz empieza a correr; paralelamente el sistema seguirá generando presión hasta llegar a la altitud final de la prueba donde el cronómetro procederá a parar, se puede constatar que el tiempo generado en la interfaz corresponde al intervalo de las altitudes mediante la comprobación visual del barómetro de mercurio.

**Figura 59**

*Prueba de Funcionamiento de la Comprobación y/o Calibración de Indicadores de Velocidad Vertical de 2.000 a 4.000 pies*



## Capítulo VI

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

- Se realizó la modernización del Banco de Prueba “Precision Pressure Test Set” del Centro de Mantenimiento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Ecuatoriana para la calibración de instrumentos aeronáuticos (altímetros, velocímetros, indicadores de mach y climb’s) considerando que:
- Se diseñó e implementó un sistema electroneumático capaz de generar presión y vacío para la simulación de altitudes y velocidades dentro de los rangos de operación de los diferentes aviones de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, con el objetivo de tener la capacidad de realizar los procesos de comprobación y/o calibración de sus instrumentos.
- Se cumplió con el diseño y la implementación de una interfaz hombre-máquina que permite el control y monitoreo de los procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos, concediendo a los técnicos del Banco de Pruebas la capacidad de seleccionar los diferentes procesos de comprobación y/o calibración, ingresar las diferentes altitudes y velocidades requeridas para el cumplimiento de los procesos.
- Se digitalizó la instrumentación de los procesos de comprobación y/o calibración de instrumentos con el objetivo de obtener de la visualización de la interfaz las diferentes medidas simuladas y de presión a fin de optimizar la lectura y el proceso de calibración, mediante la mitigación el error de paralaje.

## Recomendaciones

- Se recomienda el remplazo de los transmisores de presión implementados en el sistema de instrumentación por aquellos que presenten mejores características técnicas (rango y precisión) a fin extender los rangos de operación y mejorar la resolución en pro de tener la posibilidad de certificar el Banco de Pruebas ante la institución competente.
- Se recomienda el diseño e implementación de un circuito electroneumático que tenga la capacidad de manipular y controlar la velocidad de flujo de la presión y vacío, permitiendo la total automatización y optimización de los diferentes procesos de comprobación y/o calibración de los instrumentos.
- Se recomienda realizar el mantenimiento y la calibración de los diferentes instrumentos con el propósito de asegurar la fiabilidad y trazabilidad del Banco de Pruebas.



### Bibliografía

- Abbas, S. H., Khan, M. Y. A., & Pervez, I. (2011). Automation of Air Data Test System. *2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 480-484.  
<https://doi.org/10.1109/URAI.2011.6145867>
- Abdelrahman, A. A., & Suliman, S. (2015). Development of a computer-based aircraft pitot-static instruments test system. *2015 International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE)*, 149-154.  
<https://doi.org/10.1109/ICCNEEE.2015.7381446>
- Collinson, R. P. G. (2011). *Introduction to avionics systems* (3. ed). Springer.
- Creus, A. (2009). *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración* (Tercera). Alfaomega.
- Ludwig, C. G. (2009). *Flight Test and Evaluation of a Low-Cost, Compact, and Reconfigurable Airborne Data Acquisition System Based on Commercial Off-The-Shelf Hardware*. 85.
- Malaquias, I. M., & Thums, G. D. (2012). *DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WIRELESS PITOT TUBE FOR UTILIZATION IN FLIGHT TEST*. 5, 10.
- OMM. (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos*. Secretaría de la OMM.
- Wyatt, D. (2015). *Aircraft flight instruments and guidance systems: Principles, operations, and maintenance* (First edition). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Young, C. M. (1993). Fuzzy controller for a PITOT-STATIC test set. *Proceedings of the IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference-NAECON 1993*, 792-799.  
<https://doi.org/10.1109/NAECON.1993.290841>

**Anexos**