
Implementación de un sensor de presión diferencial en el sistema de turbina didáctica labjet 50 para determinar el flujo másico mediante el uso de parámetros de densidad y velocidad

Alfredo Villanueva Montellano, Shehret Tilvaldyev, Delfino Cornejo Monroy, Laura Rivera Cenicerros, Alejandra Flores Ortega

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Numerosos dispositivos o equipos utilizados en laboratorios de instituciones educativas son adquiridos en su presentación austera, esto por cuestiones de costo, sin embargo actualizaciones que conlleven a obtener de él un mejor aprovechamiento y desempeño pueden y son realizadas por los estudiantes y docentes de dichas instituciones, este es el caso del sistema de turbina LabJet 50, de la Universidad de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos. Este sistema fue objeto de una actualización en la que un sensor de presión diferencial HCLA12X5HD de la compañía Sensor Technics con rango de medición de -12.5 a 12.5 mbar le fue agregado con el objetivo de ser utilizado para conocer por la velocidad y flujo másico del aire a la entrada de este sistema. Este sistema cuenta con un Controlador Lógico Programable AB Micrologix 1100 de uso común en la industria, con un módulo de entrada de voltaje análogo 1762IF4 y un módulo de entrada para termopares 1762IT4 . El lenguaje de interface utilizado es el LabView de la compañía National Instruments, el cual es muy amigable para el diseño de pantallas de comunicación hombre máquina. El lenguaje de programación del PLC RsLogix 500. La actualización realizada permite que por medio del uso de las ecuaciones aplicable se puedan conocer valores de suma importancia en el análisis del funcionamiento de los turborreactores como son la velocidad del aire y el flujo másico a la entrada.

Palabras clave: Interface hombre-máquina, Visualización.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de motores de reacción didácticos han sido utilizados en los laboratorios de propulsión de diversas universidades en los últimos años. En estos sistemas, tanto como en aplicaciones reales, el parámetro de flujo másico es importante debido a que está en directa relación con las fuerzas aerodinámicas de un avión, específicamente con la sustentación y la resistencia.

El sistema LabJet 50 es una versión que no cuenta con una medición de flujo másico en la entrada de la turbina, y también

carece de medición de velocidad de flujo de entrada. A manera de mejorar esta carencia, al sistema se le adicionó un régimen integrado para la medición de presión en la entrada del motor de reacción que realiza mediciones mediante un manómetro.

Para poder aumentar el impacto a nivel académico de este equipo es necesario realizar la implementación de un sensor de presión diferencial a este sistema de medición integrado para eliminar la necesidad de un manómetro y crear una interfaz que muestre todos los parámetros de instrumentación del sistema LabJet 50, así

como la nueva cuantificación obtenida de flujo másico, mediante parámetros de densidad y velocidad.

El estudio de la aeronáutica como ciencia empezó desde épocas remotas cuando el hombre por primera vez imaginó el volar. Desde entonces esta vocación se ha ido desarrollando, y ha evolucionado de manera exponencial durante las últimas décadas. En la actualidad la mayoría de las aeronaves, tanto militares como civiles, utilizan motores de reacción, la idea de usar un motor de reacción fue sugerida por primera vez por Sir Frank Whittle en 1929 (MacIsaac y Langton, 2011). El motor de reacción es sin duda uno de los inventos de mayor importancia del siglo XXI.

Comúnmente llamadas también turbinas de gas, estas son actualmente empleadas para la propulsión de aviones y se han desarrollado como máquinas complejas, que comprenden varios sistemas necesarios para operar juntos como una entidad integrada (Ibid.).

Es por esto que la familiarización de estudiantes de materias relacionadas a la aeronáutica con estos principios de funcionamiento es de suma importancia. Los sistemas de motores de reacción didácticos cumplen esta finalidad, un sistema didáctico proporciona oportunidades experimentales y de investigación que incluyen investigaciones científicas, de ingeniería, termodinámicas y ambientales. Con una amplia instrumentación se pueden realizar experimentos relacionados con la física y la química, niveles de combustibles y llegar a una combustión óptima. Además de lo académico, estos sistemas didácticos son ideales para la familiarización de la turbina

de gas en general y la formación operativa de motores a reacción para la aviación.

En la actualidad no se cuentan con gran variedad de sistemas de motores de reacción didácticos. La empresa Turbine Technologies, LTD. desarrolló en los noventa el sistema MiniLab™ el cual ofrece una experiencia de operación real de un motor de reacción; se encuentra instrumentado con indicadores de rotación, presión de combustible y aire entrante, y medición de temperatura, presión, flujo de combustible, empuje y velocidad. También cuenta con una interfaz generada por el programa LabVIEW™ que permite la visualización de todos los parámetros mencionados. Otras empresas e institutos que han implementado sistemas similares son el Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica así como el Centro de Investigación Glenn de la NASA.

El sistema con el que se trabaja en este proyecto es desarrollado por la empresa Polaris Engenharia, llamado LabJet 50. De apoyo didáctico su principal finalidad es la familiarización de estudiantes con la operación de turborreactores y tiene un funcionamiento autónomo, en el cuál toda su alimentación, tanto eléctrica como de combustible, está contenida en el sistema. Este sistema se compone de un pequeño motor turborreactor instalado sobre una mesa de empuje, instrumentado de forma que hace posible visualizar los valores de presión y temperatura significativas, el empuje y rotación, para el auxilio de conocimiento de las características de este tipo de máquina en los trabajos de aulas prácticas.

Debido a que la principal finalidad de estos sistemas didácticos es la

familiarización con los conceptos teóricos sobre el funcionamiento de los motores de reacción es importante la medición de un parámetro de flujo másico ya que este está en directa relación con las fuerzas aerodinámicas de un avión y con el empuje del sistema en sí.

En los sistemas de motores de reacción didácticos, tanto como en aplicaciones reales, el parámetro de flujo másico está en directa relación con las fuerzas aerodinámicas de un avión, en específico con la sustentación y la resistencia, así mismo, el empuje de un sistema de propulsión depende directamente del flujo másico que pasa a través del sistema (Davis, 2003).

El sistema LabJet 50 no cuenta con una medición de flujo másico en la entrada de la turbina. También carece de medición de velocidad de flujo de entrada. Para poder llevar a cabo prácticas que den un correcto entendimiento sobre los motores de reacción, es necesario tener estos parámetros. También es necesario para lograr llevar a cabo investigaciones futuras sobre la mejora del rendimiento del combustible. El parámetro del flujo másico es fundamental para que este tipo de investigaciones se den a lugar (Saravanamuttoo et al., 2009).

El propósito de este estudio es el implementar un sensor de presión diferencial en el sistema LabJet 50 para determinar el flujo másico mediante parámetros de densidad y velocidad. Definir los parámetros de rango de medición, rango

de voltaje y el tipo de señal de salida que deberá de tener el sensor diferencial. Seleccionar un sensor de presión diferencial ideal para el proyecto dentro de los sensores existentes en el mercado.

Implementar al sistema un sensor de presión diferencial que de la medición del parámetro de presión dinámica a la entrada del motor de reacción. Mediante los parámetros calculados de densidad y velocidad llegar al cálculo del flujo másico en la entrada del motor de reacción. Crear una interfaz hombre-máquina que muestre las lecturas de los parámetros deseados.

Al utilizar un sistema didáctico los conceptos científicos en la física, termodinámica, aerodinámica y las matemáticas se combinan con una práctica experimental para demostrar los conceptos de las turbinas de gas en un sistema de propulsión. Por tal razón es de suma importancia el uso de estos sistemas para la enseñanza en ciencias aeronáuticas. Este equipo representa un sistema de propulsión, turborreactor, didáctico, con el cual se pretende dar un mejor entendimiento de los sistemas reales a alumnos de ciencias relacionadas.

MÉTODOS

En este capítulo se revisan la parte bibliográfica de la investigación. Los componentes y funcionamiento del sistema, principios teóricos de motores de reacción, el sistema para la medición de presión, así como una selección de componentes para el proyecto. La figura 1 muestra el desglose de este del sistema.

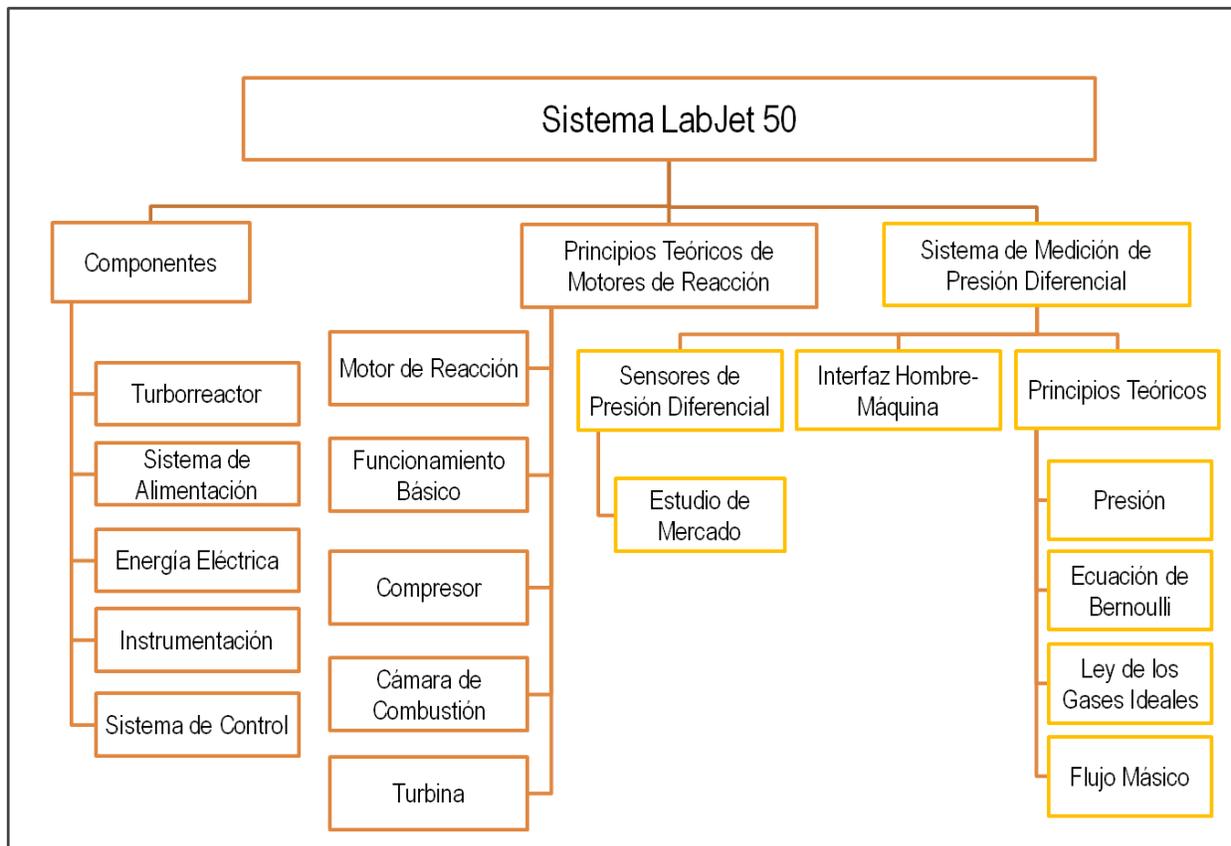


Fig. 1. Diagrama de organización.

Sistema LabJet 50

En esta investigación se trabaja con un sistema didáctico de motor de reacción el cual está instrumentado para una interacción física y visual con el usuario. El sistema utilizado, LabJet 50 es un equipo de apoyo didáctico cuya principal finalidad es la familiarización de alumnos con la operación de turborreactores y tiene un funcionamiento autónomo, en el cuál toda su alimentación, tanto eléctrica como de combustible, está contenida en el sistema.

Este sistema se compone de un pequeño motor turborreactor instalado sobre

una mesa de empuje, instrumentado para visualizar en pantalla los valores de presión, temperatura, empuje y rotación, para el auxilio de conocimiento de las características de este tipo de máquina en los trabajos de aulas prácticas.

Componentes

Turborreactor

El motor utilizado es un motor de reacción, turborreactor, Merlin 160 de la empresa Jets Munt Turbines, mostrado en la figura 2, es un turborreactor de un solo eje con un compresor centrífugo, una cámara de

combustión anular con doce vaporizadores de queroseno y una turbina axial de una sola fase.



Fig. 2. Turborreactor Merlin 160.

En la tabla 1 se muestran las especificaciones y parámetros importantes del motor Merlin 160.

Sistema de Alimentación

La alimentación del combustible para la turbina es hecha por un sistema auxiliar y un sistema principal. El sistema auxiliar está compuesto por un pequeño tanque de GLP (Gas Licuado del Petróleo), una llave de paso y una válvula de solenoide. El circuito es visualmente explicado en la figura 3.

Tabla 1. Características del motor turborreactor M160.

Parámetro	Valor
Empuje nominal	17Kg (38lb) a 118,000 RPM
Empuje a ralentí	0.8Kg (1.7lb)
RPM ralentí	32,000
Diámetro	110mm
Peso del motor	1,450g
Peso instalado	1,800g (4lb)
Combustible	Queroseno+ 4% aceite
Consumo	430g/min a 170N
Relación de compresión	3.2 a 1
Temperatura máxima de escape	650°C

El sistema principal está compuesto por un tanque de queroseno, una bomba de alimentación y una válvula de solenoide. El tanque tiene un conducto de abastecimiento, succión con retorno para el drenado de la línea de alimentación, salida inferior para la

alimentación de la bomba de combustible y un tubo con una finalidad doble, la primera el indicar el nivel de combustible y la segunda, el drenaje del tanque, esto se puede visualizar en la figura 4. La línea de alimentación posee una llave de paso para el

cerrado de alimentación que permite aislar el tanque de la línea para la posible sustitución

del filtro y el mantenimiento de la bomba.

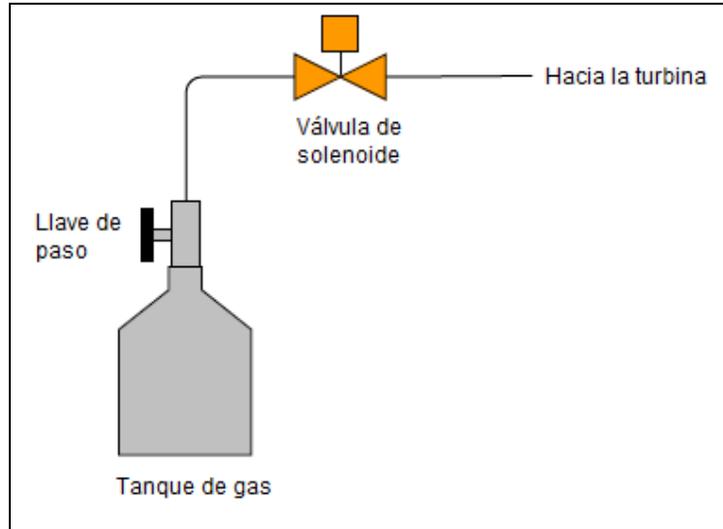


Fig. 3. Circuito de alimentación de gas.

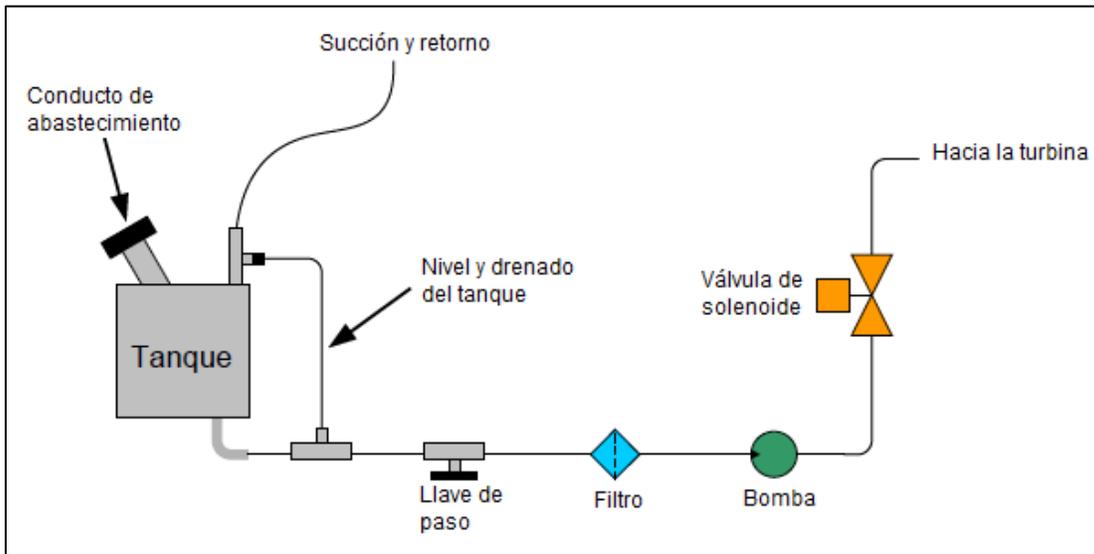


Fig. 4. Circuito de queroseno.

Energía eléctrica

El sistema es alimentado por un sistema de alimentación ininterrumpida

(UPS por sus siglas en inglés, comúnmente conocido simplemente como “Nobreak”) que posee una batería extra para permitir

una operación autónoma por más de una hora. Este sistema proporciona 110 voltios para el computador, monitor y fuentes del PLC y dos sensores, 24 voltios para el PLC y para los sensores, 12 voltios para las válvulas de solenoide, 5 voltios (todos los voltajes son de corriente directa) para el circuito del tacómetro. El sistema eléctrico recibe energía de 110/220 de la red, alimenta todos los circuitos y carga sus baterías internas, además de su batería extra. Para detalles del sistema eléctrico ver apéndice A.

Instrumentación

Además de contar con un sistema de alimentación de combustible y un sistema de abastecimiento eléctrico, el sistema LabJet 50 también cuenta con otros instrumentos adicionales que permiten su funcionamiento.

- a. Rotación: Sensor magnético fijado en la parte interna de la boquilla del compresor, accionado por un imán instalado en la tuerca del rotor del compresor.
- b. Temperatura: Termopares tipo K. (T0, T1, T2, T4)
- c. Presión: Sensores de presión con un rango de 0 a 4 bares, y una señal de salida de 4 a 20 mA. Alimentación de 24V (modelo Contech). (P0, P1, P2, P4)
- d. Empuje: Una celda de carga CSA-20, de la cual se dan sus característica sen la tabla 2 y un acondicionador de señal MKCT-3 descrito en la tabla 3.

Tabla 2. Celda de carga CSA-20

Parámetro	Valor
Capacidad	15 Kg _f
Sentido de trabajo	Tracción – Compresión
Alimentación	10 V (DC)
Señal de salida	mV – V +/- 10%

Tabla 3. Acondicionador de señal MKCT-3

Parámetro	Valor
Entrada	mV
Salida	4 a 20 mA
Alimentación para el sensor	12 V (dc)
Alimentación	110 / 220 V _{ac}

Sistema de Control

El sistema de control, automatización y supervisión de la turbina utiliza un PLC (Controlador Lógico Programable) conectado vía Ethernet a un CPU corriendo un programa de supervisión y circuitos auxiliares. La conexión del PLC con el CPU es de tipo “cruzado” hecha por un cable de tipo par trenzado con conectores RJ45 y los números de IP son 192.168.54.100 y 192.168.54.141 respectivamente.

El algoritmo de control de la turbina se divide en cuatro fases principales: partida o inicio, aceleración, mantenimiento y cierre o paro, que son descritos en el apéndice B y C. Se utiliza el lenguaje de programación en escalera RSLogix500 de la empresa Rockwell Automation, en dónde se consideran las situaciones de emergencia, las situaciones de fallas eléctricas o falta de energía y rutinas de fallas. Los componentes del sistema de control son el PLC y sus módulos de expansión, el CPU y monitor, y circuitos auxiliares. Estos se detallan a continuación.

a. PLC Micrologix 1100 y Módulos de Expansión

Para la descripción de las especificaciones del PLC utilizado en el

sistema y sus módulos de expansión ver la tabla 4 y 5 a continuación (Allen-Bradley, 2007, abril).

Tabla 4. Descripción del PLC Micrologix 1100

Código	Alimentación de Entrada	Entradas Digitales	Entradas Análogas	Salidas Digitales	Salidas Análogas
1763-L16BBB	24V	(10) 24V	(2) Entradas en tensión 0 a 10V	(2) Relevadores aislados (2) 24V FET (2) 24V FET de alta velocidad	(1) RS-232 / 485 combinado aislado (1) Ethernet

Tabla 5. Descripción de los módulos de expansión del controlador

Código	Módulo
1762IF4	4 Entradas análogas (P ₀ , P ₁ , P ₂ , P ₄)
1762IT4	4 Canales de termopares (T ₀ , T ₁ , T ₂ , T ₄)

b. CPU y Monitor

El sistema utiliza un sistema operativo Windows XP Professional. Cuenta con un procesador Intel Pentium 4 de 3 GHz y tiene una memoria de 448 MB de RAM. El software de operación para la interfaz es el RSView32 y tiene la función de monitoreo y control entre el usuario y el sistema. También se cuenta con un sistema de alerta “Alerta 24 horas” que supervisa el correcto funcionamiento del UPS.

El monitor utilizado es un TEW15TO, una pantalla táctil LCD que cuenta con una resolución máxima de 1024x768; tiene 16.7 millones de colores y un ángulo de visión de 160° (horizontal) y 130° (vertical). Su voltaje es de 110-220 V (corriente alterna) con 50-60 Hz, y un consumo máximo de 40 W.

c. Circuitos Auxiliares

- Inversor eléctrico para el motor de inicio.
- Inversor eléctrico para el motor de la bomba de combustible.
- Relevador de accionamiento de la vela de ignición.
- Relevador de inicialización del computador.
- Regulador de voltaje para la vela de ignición.
- Amplificador de señal de rotación.

Principios Teóricos de Motores de Reacción

En esta sección se describen los principios teóricos que son utilizados o están relacionados con el funcionamiento del sistema LabJet 50.

Motor de Reacción

Se define al motor de reacción como aquel motor de combustión que origina un movimiento contrario al del flujo de los gases expulsados (Real Academia Española, s.f.). También se puede definir como un motor de avión que utiliza oxígeno atmosférico para quemar el combustible y produce un empuje hacia atrás de aire caliente y gases de escape (Merriam-Webster, s.f.).

En la actualidad la mayoría de las aeronaves, tanto militares como civiles, utilizan motores de reacción, que también son llamados turbina de gas. Estos motores a reacción vienen en variedad de formas y tamaños, según los requerimientos de la aeronave. Sin embargo, todos los motores a reacción tienen componentes fundamentales en común (NASA, s.f.).

La propulsión de aeronaves es una reacción a un flujo de aire o gas creado por un motor, la idea de usar una turbina de gas para crear un reactor fue sugerida por primera vez por Sir Frank Whittle en 1929. Y fue el mismo quién adoptó la patente de esta idea en 1930 (MacIsaac y Langton, 2011). La turbina de gas es sin duda uno de los inventos de mayor importancia del siglo XXI. El desarrollo de esta máquina empezó justo después de la Segunda Guerra Mundial, con aplicaciones eléctricas planeadas.

Las turbinas de gas modernas usadas para la propulsión de aviones son máquinas complejas que comprenden varios sistemas necesarios para operar juntos como una entidad integrada (MacIsaac y Langton, 2011). La complejidad del motor de reacción se ha ido desarrollando por varias décadas. Aunque los primeros motores de reacción fueron ineficientes, poco fiables y extremadamente ruidosos, la industria ha ido madurado, y se han convertido en una forma estándar de propulsión para la aviación civil (Saravanamuttoo et al., 2009).

Funcionamiento Básico

Para producir una expansión a través de una turbina de gas, se debe de proveer una relación de presiones. La primera etapa para lograr esto es la compresión del fluido con el que se trabajará. Si después de la compresión el fluido fuera expandido directamente al motor de reacción, la potencia o empuje desarrollado por la turbina de gas sería igual a la absorbida por el compresor (ibid.). El empuje de una turbina de gas puede ser incrementado por la adición de energía para aumentar la temperatura del fluido antes de la expansión. Cuando el fluido es aire, una forma muy eficiente de lograr esto es por medio de la combustión de un combustible en el aire que ha sido comprimido. La expansión del fluido caliente produce una mayor potencia de salida (MacIsaac y Langton, 2011).

Este proceso representa la forma más simple de una turbina de gas o de un motor de combustión interna, como se ilustra en la figura 5. Los tres componentes más importantes son el compresor, cámara de combustión y la turbina (Davis, 2003).

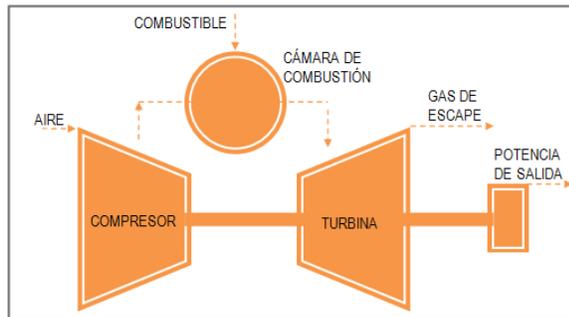


Fig. 5. Funcionamiento básico de una turbina de gas

Estos tres componentes también son conocidos como generador de gas (Mattingly, 2006) y se dice que es el “corazón” de la turbina de gas. Este componente lo tienen en común diferentes tipos de motores de reacción. (Farohki, 2009) Los principales tipos de motores de reacción en la aeronáutica son:

1. Turborreactor (Turbojet)
2. Turboventilador (Turbofan)
3. Turbohélice (Turboprop)
4. Turboeje (Turboshaft)

Sistema de Medición de Presión Diferencial

Como parte de un proyecto de investigación previo se construyó un sistema en la entrada de la turbina, con la finalidad de obtener mediciones de presión total y presión estática mediante un manómetro. Para el análisis teórico del motor es necesario calcular la velocidad de flujo para cada operación del motor, es decir, para cada nivel de rotación. Por lo tanto, se diseñó un sistema que, además de proporcionar una medida fiable del flujo, también se instala fácilmente. Un esquema

del sensor se muestra a continuación en la figura 6:

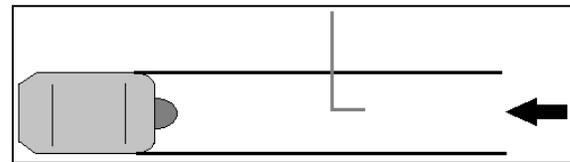


Figura 6 Esquema del sistema de medición de flujo.

La figura 7 muestra las partes empleadas para el sistema, las cuales son las siguientes:

1. Tubo de PVC de 10 cm de diámetro.
2. Medición de la presión estática y dinámica por tubo Pitot y una toma estática.
3. Manómetro digital para medir presiones estáticas y dinámicas.
4. Panel “Honeycomb” en la entrada del tubo de PVC dirige la corriente de aire y reduce la turbulencia en la entrada.
5. Sistema de rodamiento.

El tubo Pitot se dirige hacia la corriente de aire en el interior del tubo de PVC puesto cerca de la entrada de la turbina de gas.

Con respecto a la longitud del tubo, fue elegido aprovechando al máximo las dimensiones del banco del sistema LabJet 50, ya que la turbulencia en la entrada del tubo se reduce a partir de cinco veces el diámetro, y por tanto sería necesario colocar el Pitot a partir de esa distancia. Sería requerido un tubo con una longitud mucho mayor que el espacio disponible en la mesa de trabajo, es por esto que se coloca un panel de estructura “Honeycomb” en la

entrada del tubo, para uniformizar la corriente de aire.

El tubo no puede ser fijado a la base, ya que el sistema de medición de empujo sería inutilizado. Es por esto que el tubo debe de ser fijado directamente a la entrada

del motor. Para esto fue ideado un sistema simple de fijación mediante una cinta adhesiva. Para dar estabilidad lateral al tubo, así como para disminuir la fricción de apoyo en la base, pequeñas esferas fueron utilizados, semejando un sistema de rodamiento como se presenta en la figura 8:

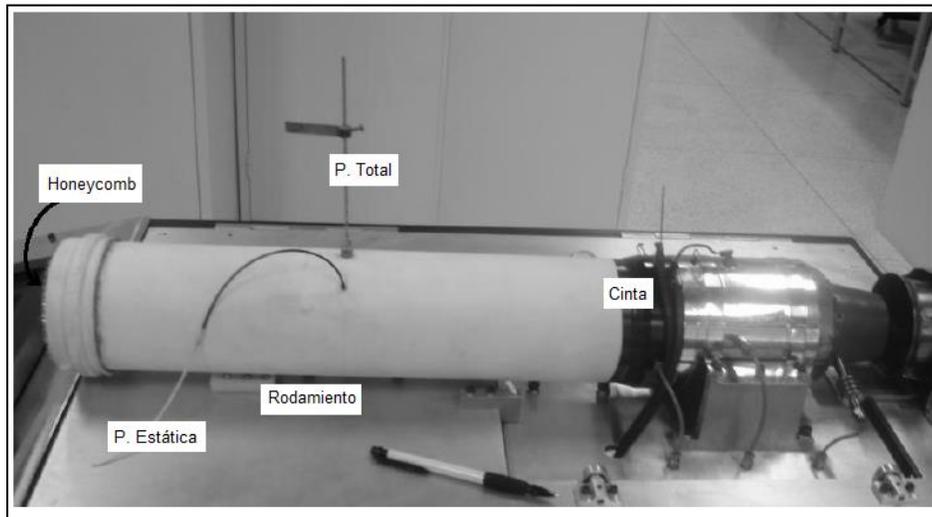


Fig. 7. Sistema LabJet 50 y sus componentes

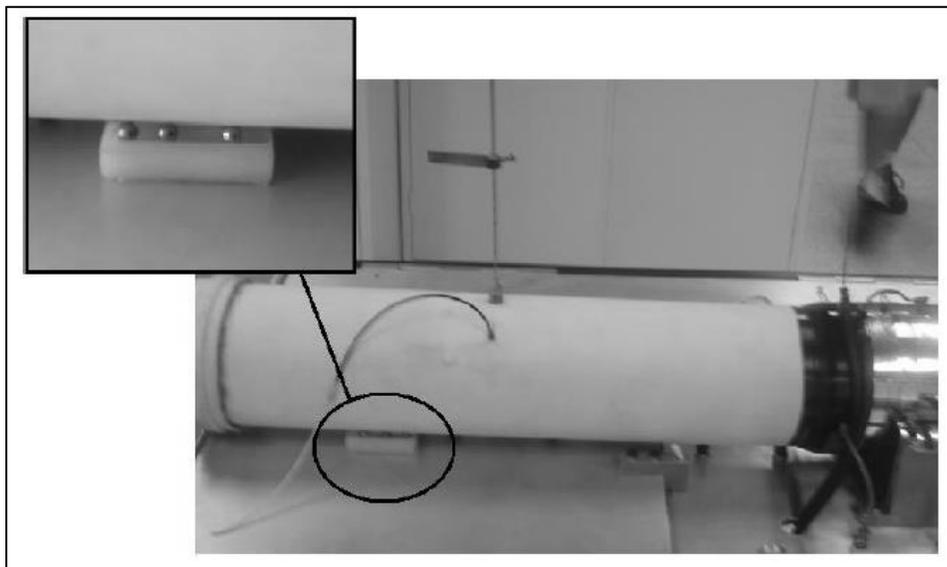


Fig. 8. Sistema de rodamiento instalado

Sensores de Presión Diferencial

El sistema adicionado para la medición de presión en la entrada del motor de reacción es sólo funcional si se cuenta con un manómetro. Para obtener mediciones directas se propone agregar un sensor de presión diferencial, el cuál restaría la toma de las dos presiones, la presión total y la presión estática, para darnos como dato la presión dinámica del flujo entrante.

Un sensor de presión diferencial actúa de igual manera que un sensor de gauge, en dónde se tiene una deflexión cero en el valor de la presión ambiental, es decir el valor P_2 . La salida del sensor es proporcional solo a la diferencia entre la entrada y la presión ambiental, y no es sensible a cambios de presión barométrica. En un sensor diferencial la cavidad de referencia es expuesta a otra entrada de presión (P_2). La deflexión cero del diafragma es obtenida cuando se tienen valores de entrada iguales en las dos posiciones ($P_1 = P_2$). En este caso la salida del sensor es proporcional no solo a una presión diferencial aplicada ($P_1 - P_2$), sino también a un cierto grado de presión estática ($(P_1 + P_2)/2$). Este efecto es llamado sensibilidad de presión estática (Soloman, 1999).

Existen medidores de presión diferenciales de diferentes rangos y marcas, el sensor debe de ser seleccionado de acuerdo a las necesidades del sistema de medición. En el mercado actual los sensores deben de ser seleccionados en base a los datos proveídos por el vendedor.

Sensor Technics HCLA12X5DB

Los sensores de presión HCLA realizan precisión de acondicionamiento de señales digitales y proporcionan una salida analógica y digital al mismo tiempo. Los sensores están calibrados y cuentan con temperatura compensada, utilizan una técnica de compensación especial para lograr una alta estabilidad de desviación y virtualmente nada de sensibilidad de posición. Están destinados a ser utilizados con gases secos no corrosivos. Todos los sensores de presión HCLA pueden ser modificados de acuerdo a los requerimientos específicos del cliente. Las aplicaciones típicas incluyen dispositivos médicos, instrumentación, sistemas de climatización, así como industriales, neumáticos y controles ambientales. Las especificaciones se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones del sensor HCLA12X5DB

Parámetro	Sensor
Rango de medición	-12.5 a +12.5 mbar
Voltaje de operación	4.5 – 5.5 V _{DC}
Salida	Digital / Analógica

Interfaz Hombre-Máquina

La ciencia del diseño interdisciplinario de interacción hombre-máquina comenzó mediante la combinación de métodos de recopilación de datos y el marco intelectual de la psicología experimental en conjunto con herramientas de gran uso desarrolladas a partir de la ciencia computacional (Snheiderman y Plaisant, 2005).

El diseño de una interfaz de usuario es una sub-categoría de un área de estudio llamada interacción persona-computador (HCI, en inglés, Human Computer

Interaction). La HCI es el estudio, planificación y diseño de cómo las personas y las computadoras van a trabajar juntas para que las necesidades de una persona sean cumplidas de manera satisfactoria y efectiva (UNESCO, s.f.).

La interfaz de usuario es la parte de una computadora, y sus programas, que las personas pueden ver, escuchar, tocar, hablar a, o entender y dirigir. La interfaz de usuario tiene esencialmente dos componentes: entrada y salida (input, output). La entrada es como una persona comunica sus necesidades o deseos a la computadora, a través de aparatos como el teclado, ratón y voz propia. La salida es como la computadora da los resultados de sus cálculos y requerimientos al usuario, el mecanismo más común es la pantalla.

Una interfaz adecuada va a proveer una mezcla de mecanismos de entradas y salidas que van a satisfacer las necesidades del usuario, sus capacidades y delimitaciones, de la manera más efectiva. La mejor interfaz es aquella que pasa desapercibida, y que permite que la atención del usuario se enfoque en la información y tareas que se tengan que realizar (Galitz, 2007).

LabVIEW

El programa LabVIEW™ es una plataforma de programación gráfica que ayuda a escalar desde el diseño hasta la fase de pruebas. Ofrece herramientas para resolver problemas y es innovador, rápido y eficiente (National Instruments. s.f.).

Selección de Componentes

En el capítulo anterior se revisó el marco teórico, ahí se definen los diferentes tipos de componentes que pueden ser seleccionados para el proyecto. Los componentes a utilizar se muestran en el siguiente listado, se dividen de acuerdo a la etapa del proyecto en que fueron utilizados.

Sensor de Presión Diferencial

Para seleccionar el modelo de sensor que se requería para el sistema, y así tener una selección óptima, se utilizaron los datos obtenidos con equipos de medición por Idair Espinosa y Paulo Greco en procesos iterativos experimentales previos.

- Determinar el rango de medición del sensor.
- Definir las características de compatibilidad eléctrica.
- Definir qué tipo de señal se busca para enviar los datos del sensor a la computadora.
- Seleccionar el sensor de presión diferencial que cumpla con las características óptimas para el sistema, tomando en cuenta el costo y disponibilidad de este.

Micro-Controlador

- Utilizar un micro-controlador que trabaje como una tarjeta de adquisición de datos y que cumpla con las necesidades eléctricas y de E/S del sistema.

Integración de Componentes

- Cable RS232: Para la conexión del micro-controlador a la computadora.

- Fuente de Voltaje: Para la alimentación del sensor y el micro-controlador se utiliza una fuente externa conectada directamente al micro-controlador, alimentando 5 voltios.
- Misceláneos: Cable, pinzas, cinta adhesiva, etc.

Interfaz Hombre-Máquina

- Seleccionar el lenguaje de programación deseado de acuerdo a las necesidades de visualización de la interfaz, tomando en cuenta la comodidad del usuario.
- Como parámetro a considerar también es importante la compatibilidad que exista entre el programa elegido y el sistema LabJet 50.

Calibración del Sensor

- Para calibrar el sensor de presión diferencial es necesario utilizar un manómetro para marcar el cero del sensor a condiciones ambientales del lugar en dónde se trabaja.

Micro-Controlador

- Realizar la conexión física del micro-controlador, al que será conectado el sensor de presión diferencial elegido.
- Programar el micro-controlador para recibir la señal del sensor de presión diferencial directamente a la computadora.

- Alimentar el circuito del micro-controlador a través de una fuente de voltaje externa.

Integración de Componentes

Al tener estos componentes, se procede a realizar la integración física del sistema.

Al tener estos componentes, se procede a realizar la integración física del sistema.

- Conectar el sensor a las tomas de presión total y presión estática del sistema, a través de mangueras que llevan el flujo de manera aislada.
- Realizar la conexión eléctrica del sensor al micro-controlador y alimentación del mismo.
- Conectar el micro-controlador al computador, por medio del puerto serial RS232.

Interfaz Hombre-Máquina

- Definir la estructura de la interfaz.
- Crear las rutinas y sub-rutinas de operación.
- Diseñar las pantallas que incluyan indicadores numéricos de los datos de presión (P_1 , P_2 , P_3 , P_4), temperatura (T_1 , T_2 , T_3 , T_4), empuje (kg_f), rotación del motor de partida y de la turbina (RPM) durante la operación del sistema, tacómetro para visualizar la rotación del motor de reacción en base al porcentaje de movimiento de la palanca de

aceleración del sistema. Y todos los datos requeridos para el proyecto.

RESULTADOS

Selección de Componentes

Sensor de Presión Diferencial

Rango de Medición. Para presión total de 92 kPa y para la presión estática se obtienen valores de entre los 85 kPa. Esto nos establece un rango para el sensor diferencial de 7 kbar , alrededor de 7 mbar.

Rango de Voltaje. Los voltajes de alimentación para este tipo de sensores según lo mostrado en el marco teórico esta alrededor de 12 VDC.

Tipo de Señal. Las señales análogas se pueden manipular fácilmente de manera matemática; pero estas requieren de transductores para que la señal sea traducida al lenguaje computador. Esta acción es realizada por un micro-controlador o un programa adecuado de computadora. (Tan y Jiang, 2007).

El sensor seleccionado, debido a que cumple las características propuestas, es el sensor HCLA12X5DB con un rango de -12.5 a +12.5 mbar, señal análoga de salida de 0.25 a 4.25 voltios.

Interfaz Hombre-Máquina

Se utiliza el software LabVIEW para realizar la interfaz que sirve para que el usuario pueda visualizar los parámetros medidos en el sistema, incluyendo las mediciones adicionales, de una manera sencilla y amigable.

Calibración del Sensor

Se utiliza el micro-manómetro Digital TSI 8705MGB, el cual cuenta con un rango de medición de -1245 a 3735 Pa. Calcula y muestra una velocidad de lectura cuando se conecta a un tubo de Pitot y cuenta con una precisión de +-1% en lectura de +-1 Pa.

Micro-Controlador

El circuito de la tarjeta de adquisición de datos está basado en un solo micro-controlador PIC18F4550. El circuito tiene como elementos un oscilador de cristal, un circuito integrado a la interfaz serial MAX232. La interfaz serial MAX232 permite la comunicación directa con la computadora. Este dispositivo fue diseñado por otro grupo dentro del mismo equipo que trabajo en el proyecto.

Integración de Componentes

Se realizan las conexiones tanto eléctricas como neumáticas del sensor de presión diferencial. Viendo el sensor desde la parte superior se pueden identificar los puertos de conexión, esto se puede apreciar en la figura 9. El puerto de alta presión se conecta al tubo de Pitot, y la toma de baja presión se conecta a la toma de presión estática del sistema.

Una vez realizada la conexión, el micro-controlador se alimenta directamente por medio de una fuente de voltaje externa que provee al circuito con 5 voltios de corriente. A su vez el micro-controlador se conecta mediante el puerto serial RS232 a la computadora que recibe la señal.

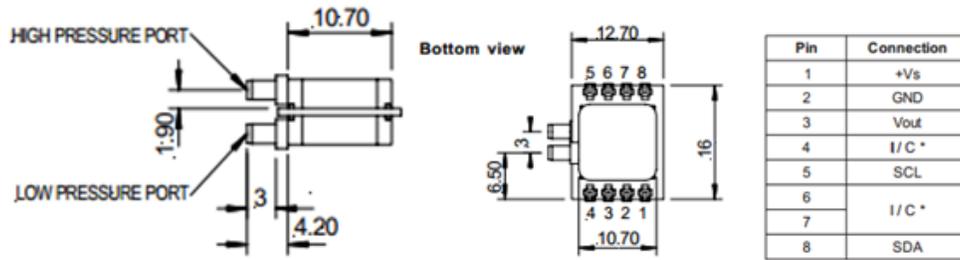


Fig. 9. Conexiones eléctricas y neumáticas del sensor HCLA12X5DB

Interfaz Hombre-Máquina

Para definir la estructura de la interfaz se requiere una visión gráfica de las operaciones ejecutadas en la programación en escalera del sistema. Se crean rutinas y sub-rutinas de operación de acuerdo a esta programación y aquellas que se requieren para un mejor funcionamiento.

La rutina “Principal” es la pantalla de la interfaz en la cual se visualizan y se tienen los elementos de control inicial del sistema, los cuáles se muestran en la figura 10.

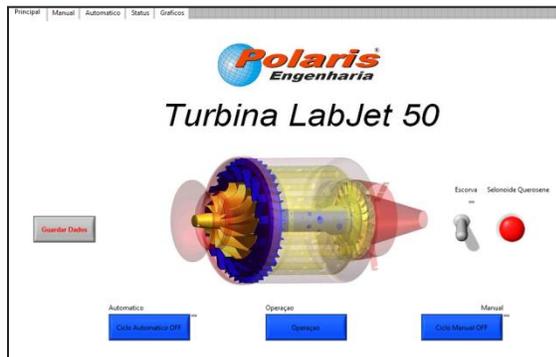


Fig. 10. Pantalla principal de la interface

En el ciclo “Manual” se visualizan las diferentes lecturas obtenidas por la instrumentación con la que cuenta el sistema: indicadores numéricos de presión, temperatura, empuje, rotación del motor de partida y de la turbina; un tacómetro para la

rotación del motor de reacción dado en porcentajes de movimiento de la palanca de aceleración del sistema; alarmas para fallas de temperatura y fallas de combustible; indicadores del sistema de ventilación y la válvula de queroseno; botones de inicio para el motor de partida, el encendido de la ignición y encendido del sistema de gas. Se añaden botones de interconexión entre las diferentes rutinas de funcionamiento de la interfaz, uno que lleva a la pantalla principal, a la pantalla de gráficos y a la pantalla de estatus. La visualización de la pantalla manual se muestra en la figura 11.

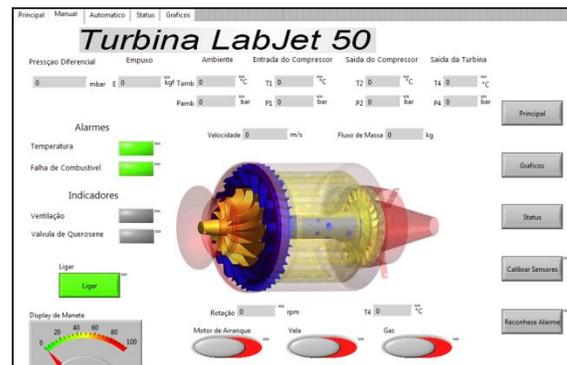


Fig. 11 Pantalla de ciclo Manual de la Interface

El ciclo automático de la interfaz es parecido al ciclo manual, exceptuando por los botones de inicio del motor de partida, la ignición y el gas, ya que estos parámetros son iniciados de manera automática por la

programación en escalera. La pantalla del ciclo automático se muestra en la figura 12.

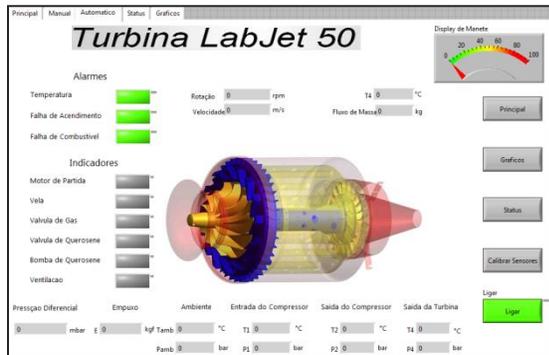


Fig. 12. Pantalla del ciclo Automático de la interface

La siguiente sub-rutina es la de “Estatus” la cual nos muestra el tiempo total, en minutos, que el sistema ha sido operado, la duración que tuvo la última operación del sistema y el número de operaciones que han sido realizadas en su totalidad. El sistema cuenta también con un PID, que es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción de corrección que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros, el proporcional (K_p), el integral (T_i), y el derivativo (T_d). El valor proporcional determina la reacción del error actual, el integral genera una corrección proporcional a la integral del error y el derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. (Snheiderman y Plaisant, 2005). La suma de estas tres variables es utilizada para ajustar el proceso vía un elemento de control, en este caso, el PLC. En la figura 13 se muestra la pantalla.

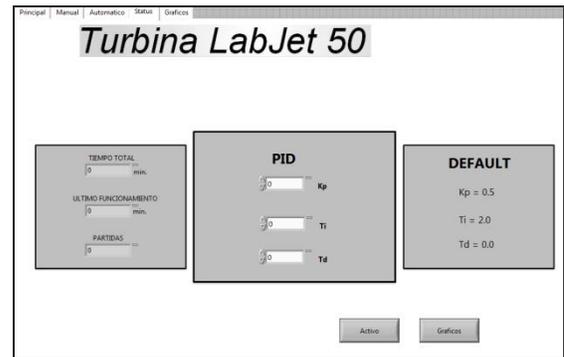


Fig. 13. Pantalla de Estatus de la interface

La pantalla de “Gráficos” en la interface se muestra dos gráficas de línea, estas muestran las distintas temperaturas y presiones durante el tiempo de la prueba, la primera muestra los valores de la presión ambiental, la presión a la entrada del compresor, la presión a la salida del compresor y la presión a la salida de la turbina. La segunda gráfica muestra los valores de temperatura en distintos puntos siendo estos la temperatura ambiente, la temperatura a la entrada del compresor, temperatura a la salida del compresor y la temperatura a la salida de la turbina del turborreactor. En la figura 14 se pueden apreciar los gráficos representativos de esta pantalla.

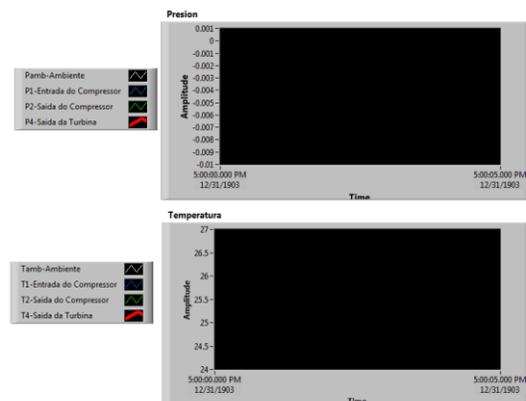


Fig. 14. Pantalla de gráficos de la interface

La computadora recibe los datos enviados por el sensor de presión diferencial a través del puerto de comunicación serial RS232, esta información es inicializada hacia la interfaz mediante la función “VISA Configure Serial Port” del programa LabVIEW. Esta función da inicio a la comunicación del puerto serial, especifica la velocidad de comunicación, la dirección de adquisición de los datos, y el tiempo en milisegundos entre cada lectura y escritura.

La información es recibida y escrita; el número de bits dado es convertido en una cadena de caracteres numéricos con los cuales se realiza la operación que pueda dar un valor de presión en la pantalla. Es decir, si se tuviera una medición máxima de 8 bits, el módulo sería de $2^8 = 256$, en condiciones ideales de lectura, estos son multiplicados por un factor de 25 y divididos por un factor de 1023, lo cual da la resolución de 6.2561; este valor es restado al factor de calibración, ($11.07145 - 6.2561 = 4.81$), y el resultado se aproxima al valor máximo de salida de voltaje que es de 4.25 según datos del fabricante. Este ciclo de lectura se ejecuta repetidamente cada 1500 milisegundos, tal velocidad es la ideal para visualizar y almacenar los datos.

Como adición final en el diagrama de bloque de la programación de la interfaz, y mostrado en la pantalla del ciclo “Manual” y del ciclo “Automático”, se agregan indicadores numéricos que nos muestran los valores calculados por la misma interfaz en cuanto a las lecturas del sensor de presión diferencial (HCLA12X5DB) añadido a la entrada del turborreactor, estos son valor de presión diferencial (mbar), velocidad del flujo de entrada (m/s), y flujo másico (kg/s).

El diagrama de bloque con los cálculos de cada elemento de la interfaz se encuentra en el apéndice E.

Por último se crea una sub-rutina la cual es utilizada para almacenar todos los datos obtenidos, durante un tiempo especificado, en una hoja de cálculo.

Para lograr esto, primero se crea una tabla de caracteres para cada uno de los encabezados de la hoja de cálculo, en el orden deseado. Estos datos se envían a través de un ciclo “While” el cual se dejará de ejecutar y almacenará los datos hasta presionar el botón “Guardar Datos”. Esta tabla de caracteres es creada fuera del ciclo, para que solo se escriban los títulos una sola vez. Dentro del ciclo se construye una tabla para los valores de lectura de los sensores y dispositivos del sistema LabJet 50. Cabe mencionar que el orden debe ser el mismo al de la tabla de encabezados. Una vez construida la tabla de lecturas se envían a un arreglo para concatenar múltiples elementos, estos elementos son escritos cada 1500 milisegundos.

CONCLUSIONES

Se logró la selección de un sensor capaz de realizar la medición de presión dinámica del sistema de una forma satisfactoria, los cálculos de para encontrar densidad, velocidad y flujo másico fueron realizados dentro del software de la computadora en vez del programa del PLC, facilitando así este proceso. El sistema de medición de presión diferencial cumple con el objetivo propuesta de medir el flujo másico entrante al motor de reacción del sistema LabJet 50 mediante parámetros de densidad y velocidad. La interfaz hombre-máquina cumple todas las necesidades de

interacción del usuario de manera sencilla y de fácil entendimiento.

El sistema didáctico LabJet 50 presenta diversas ventajas en la enseñanza de conceptos de funcionamiento de motores de reacción en las aulas prácticas. Las carencias de medición sistema LabJet 50 fueron satisfechas mediante el proyecto de investigación presentado. De una manera semejante se puede realizar la instrumentación de un sistema didáctico para otras universidades.

El no contar con módulo de expansión análogo para conectar ahí el nuevo sensor, requirió de un interface la cual fue realizada por medio de un microcontrolador y aumento las líneas de programación el LabView.

REFERENCIAS

Allen-Bradley. (2007, abril). MicroLogix 1100 Programmable Controllers; 1763-RM001B-EN-P -; Rockwell Automation.

Davis, M. (2003). The Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineer. McGraw Hill; First Edition. New York, United States.

Espinosa, I. Greco, P. Análise Teórica-Experimental da Microturbina M160. Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos.

Farohki, S. (2009). Aircraft Propulsion; John Wiley and Sons, Inc.; First Edition; Hoboken, United States.

Galitz, W. (2007). The Essential Guide to User Interface Design: An Introduction to GUI

Design Principles and Techniques; Wiley Publishing; Third Edition; Indianapolis, United States.

MacIsaac, B. Langton, R. (2011). Gas Turbine Propulsion Systems. John Wiley and Sons Ltd. First Edition. Chichester, England.

Merriam-Webster. (s.f.). Merriam-Webster Online: Dictionary and Thesaurus. <http://www.merriam-webster.com> (visitada Marzo 2013).

National Instruments. (s.f.). Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW. <http://www.ni.com/labview/esa/> (visitada Marzo 2013).

NASA. (s.f.) Glenn Research Center. <http://www.nasa.gov/centers/glenn/home/index.html> (visitada Marzo 2013).

Real Academia Española. (s.f.). Diccionario de la Lengua Española. <http://www.rae.es/rae.html> (visitada Marzo 2013).

Saravanamuttoo H.I.H. Rogers G.F.C. Cohen H. Straznicky P.V. (2009). Gas Turbine Theory. Pearson Education Limited. Sixth Edition; Harlow, England.

Shneiderman, B. Plaisant, C. (2005). Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction; Pearson Education; Fourth Edition; College Park, United States. 2005.

Soloman, S. (1999). Sensors Handbook; McGraw Hill; First Edition; New York, United States.

Tan, L. Jiang, J. (2007). Fundamentals Of: Analog and Digital Signal Processing; Author House.

UNESCO. (s.f.). Encyclopedia of Life Support Systems. <http://www.eolss.net/> (visitada Marzo 2013).