



Recepción: 22/10/2018

Aceptación: 19/12/2018

Publicación: 05/02/2019

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

Mejoramiento de diseño de un banco hidroneumático para pruebas de inyectores del motor PT6 A-68C del avión A-29B Súper Tucano

Improvement of the design of a hydropneumatic bench for injector tests of the PT6 engine A-68C of the A-29B Super Tucano aircraft

Melhoria do projeto de uma bancada hidropneumática para testes de injeção do motor PT6 A-68C da aeronave Super Tucano A-29B

Santiago Alejandro López-Ortiz ^I
sa_lopez@epoch.edu.ec

Daniel Alejandro López-Velástegui ^{IV}
dani31934@yahoo.com

Lenin Santiago Orozco-Cantos ^{II}
lsorozco@epoch.edu.ec

Christian Fabricio Ocaña-Sánchez ^V
christianf-92@hotmail.com

Juan Pablo Chuquin-Vasco ^{III}
juan.chuquin@epoch.edu.ec

Correspondencia: sa_lopez@epoch.edu.ec

^I Magíster en Diseño Mecánico, Ingeniero Mecánico, Docente de Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Extensión Norte Amazónica, Chimborazo. Ecuador.

^{II} Magíster en Eficiencia Energética, Ingeniero Mecánico, Docente de Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Extensión Norte Amazónica, Chimborazo. Ecuador.

^{III} Magíster en Sistemas de Transporte de Petróleo y Derivados, Ingeniero Mecánico, Docente de Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Extensión Norte Amazónica, Chimborazo. Ecuador.

^{IV} Estudiante de Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Extensión Norte Amazónica, Chimborazo. Ecuador.

^V Estudiante de Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Extensión Norte Amazónica, Chimborazo. Ecuador.

Resumen

En este trabajo se analiza el funcionamiento de un banco hidroneumático para pruebas de inyectores de un motor de avión perteneciente a la fuerza Aérea Ecuatoriana, en una primera etapa se estudia la factibilidad de mejoramiento del banco con el fin de realizar una verificación del chorro de inyección bajo las condiciones de funcionamiento óptimo recomendado por el fabricante, se evidencia anomalías tanto en el funcionamiento del equipo como en el proceso de inspección de inyectores siendo el operador el mayor afectado en las pruebas de mantenimiento de los motores, por tal razón es vital implementar una alternativa de rediseño como parte de una mejora general del banco en base a los inconvenientes encontrados y a los nuevos requerimientos solicitados. El nuevo banco de pruebas brinda mayor efectividad y versatilidad al momento de observar los patrones de formas cónicas y defectos en la pulverización de combustible. Luego de las pruebas se verificó el correcto funcionamiento de las líneas de prueba primaria y secundaria y se obtuvo los patrones de chorro para ser comparados, las imágenes obtenidas por el sistema de visión artificial fueron de gran utilidad para la detección de defectos y medición de ángulo de aspersión.

Palabras Clave: Mejoramiento de diseño; hidroneumático; inyectores; mantenimiento; combustible; pulverización.

Abstract

This paper analyzes the operation of a hydropneumatic bench for injector tests of an aircraft engine belonging to the Ecuadorian Air Force, in a first stage the feasibility of improvement of the bank is studied in order to perform a verification of the injection jet Under the optimum operating conditions recommended by the manufacturer, abnormalities are evidenced both in the operation of the equipment and in the inspection process of injectors, with the operator being the most affected in the maintenance tests of the engines, for this reason it is vital to implement a alternative redesign as part of a general improvement of the bank based on the problems encountered and the new requirements requested. The new test bench provides greater effectiveness and versatility when observing the patterns of conical shapes and defects in the spraying of fuel. After the tests the correct operation of the primary and secondary test lines was

verified and the jet patterns were obtained to be compared, the images obtained by the artificial vision system were very useful for the detection of defects and angle measurement of aspersion.

Keywords: Improvement of design; hydropneumatic; injectors; maintenance; fuel; pulverization.

Resumo

Neste trabalho, a operação de um bocal de banco de ensaio hidropneumática de um motor a jacto que pertence à Força Aérea equatoriana analisados, numa primeira fase, a viabilidade de melhorar o banco é estudado de modo a realizar uma verificação do jacto de injeco sob condições de operação óptima recomendado pelo fabricante, anormalidades é evidente tanto o funcionamento do equipamento e o injector processo de inspecção sendo o operador a mais afectada na manutenção motor de teste, por esta razão, é vital para implementar um redesenho alternativo como parte de uma melhoria geral do banco com base nos problemas encontrados e nos novos requisitos solicitados. A nova bancada de testes oferece maior eficácia e versatilidade ao observar os padrões de formas cônicas e defeitos na pulverização de combustível. Depois de testar o bom funcionamento do teste de linha primária e secundária foi verificada e foi obtido padrões de jacto para comparação, as imagens obtidas pelo sistema de visão artificial foram úteis para a detecção de defeitos e a medição do ângulo de aspersion.

Palavras-chave: Melhoria do design; hidropneumática; injectores; manutenção; combustível; pulverização.

Introducción

Actualmente el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana “CIDFAE” se ha posicionado como un importante centro de desarrollo tecnológico de Fuerzas Armadas, con capacidad de enfrentar mayores proyectos, en beneficio del mejoramiento de la capacidad operativa para la defensa, disminuyendo la dependencia tecnológica extranjera. Es así que con la incorporación de los modernos equipos A-29 Súper Tucano a la flota de aviones de ataque ligero de la FAE ha permitido que nuestro país recobre su capacidad operativa enfocada a cumplir las operaciones aéreas en la región amazónica y en nuestras fronteras. Estos aviones están diseñados para operar en los escenarios más complejos de combate, incluyendo la capacidad de empleo nocturno, uso de armas inteligentes y tecnología de enlace de datos. La flota aeronáutica está

conformado por motores PT6 (Pratt & Whitney) de origen canadiense, es un motor turbohélice simple de pequeño tamaño y peso con una potencia de generación de 1.193 kW (1.600 SHP) (1) (Fuerza Aérea Ecuatoriana, 2017).

El banco de pruebas de los inyectores del motor PT6 A-68C actualmente es una combinación de dos bancos de prueba de motores anteriores que daba mantenimiento el Grupo Logístico No. 23, la orden técnica que manda el fabricante consiste en enviar Jet A1 a través de una cañería que maneja presiones en flujo primario de 20 y 60 psi, y en el flujo secundario de 30 y 60 psi, es decir probar la calidad de rociado del inyector cuatro veces consecutivas, por cada inyector; el motor PT-6 A-68C tiene 14 inyectores, lo que al final resulta probar 56 veces de forma manual el conjunto de inyectores. El banco de prueba requiere como entradas, presión neumática, y llenar en un reservorio aproximadamente 2.5 litros de combustible Jet A1 para que pase por una válvula reguladora de presión para que el operario regule las presiones anteriormente descritas una a la vez y de forma manual (2) (Guijarro, y otros, 2015).

La inspección de los inyectores pertenecientes al motor PT6 A-68C se realiza de una manera visual y empírica, a través de un equipo fabricado dentro de las instalaciones de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, el nivel de experiencia del técnico influye mucho en la efectividad del proceso, convirtiéndose la inspección en un procedimiento tedioso, razón que puede generar efectos negativos en los resultados de la operación, además afectando al personal involucrado debido a que se encuentra expuesto directamente a la contaminación por contacto del combustible con la piel, ojos y nariz durante un tiempo aproximado de una jornada de trabajo, afectando notablemente su salud. Estos efectos negativos durante el proceso de inspección hacen que el taller de mantenimiento tenga una baja productividad y confiabilidad de los componentes, los mismos que provocan retrasos en las reparaciones de las aeronaves.

Métodos y Materiales

El mejoramiento de diseño ayudará a mejorar las condiciones y características del banco de pruebas en el proceso de inspección para inyectores, para de esta manera contar con un entorno práctico y funcional, logrando una mayor interpretación de los resultados obtenidos en cada práctica a realizarse. Para eso es necesario analizar las condiciones de estado actual e identificar

limitaciones o defectos de funcionamiento, luego se puede agregar ciertas características al banco y generar una alternativa de diseño. Finalmente se implementan las mejoras y se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento del equipo.

Análisis del estado actual del equipo

Determina las posibles fallas y averías mediante inspecciones visuales de los componentes del banco de pruebas durante su funcionamiento.



1. Válvula reguladora de presión
2. Tanque de combustible
3. Válvula de alivio
4. Filtro
5. Manómetro de presión
6. Válvula de bola
7. Manguera flexible
8. Boquilla

Figura. Componentes del banco original de inspección.

Fuente: (Autores)

La evaluación de los elementos principales del banco de inspección se determina de acuerdo a las condiciones físicas y funcionalidad con los siguientes estados.

-Bueno: Los componentes del banco están en óptimo estado.

-Regular: Los componentes del banco presentan un estado normal de funcionamiento.

-Malo: Las anomalías de los componentes son considerables

Tabla 1: *Evaluación del estado de los principales componentes del banco*





Componente	Observaciones	Estado
Válvula reguladora de presión	Tornillo de ajuste de presión gira con normalidad sin presentar oposición alguna. Perdidas de presión a la entrada del elemento. Falta de un instrumento de medición de presión. Baja capacidad de almacenamiento del combustible.	Regular
Tanque de combustible	No presenta fugas visibles del recipiente. Ausencia de un instrumento de medición para presión.	Regular
Válvula de alivio	Material compatible con fluido de trabajo. Rango de presión correcta. No presenta fugas en la conexión.	Bueno
Filtro	No presenta daños en el elemento filtrante ni golpes en la carcasa. Funcionalmente correcto. Material compatible con el combustible.	Bueno
Manómetro de presión	Rango de presión de acuerdo con la presión máxima de trabajo. No presenta golpes en la carcasa. El movimiento de la aguja normal.	Bueno
Válvula de bola	El material del elemento de control es compatible con el fluido. La apertura y el cierre se realizan con facilidad.	Regular
Mangueras flexibles	Primer tramo manguera de nitrilo. Material compatible con el fluido. Ausencia de fugas o pérdidas de presión.	Regular
Boquilla	Segundo tramo no es la manguera correcta para su propósito (su uso fue para permitir mayor flexibilidad en la inspección) Presenta buen estado sin oxidación, ni corrosión, ni golpes en las puntas las cuales puedan afectar la conexión con el colector del inyector.	Bueno

Fuente: (Autores)

La siguiente tabla muestra las condiciones en las que se realizan las pruebas de inspección y los inconvenientes detectados.

- Alto: Presentan elevados inconvenientes en el proceso.
- Medio: Presentan inconvenientes moderados en el proceso.
- Bajo: Presentan inconvenientes mínimos en el proceso.

Tabla 2: *Inconvenientes detectados en el proceso de inspección*

Inconveniente	Descripción
	<p>La despresurización del tanque se realiza mediante la válvula de alivio, esta técnica es utilizada con frecuencia durante el proceso de inspección debido a que se necesita variar las presiones de 60 a 20 o 30 psi.</p> <p>Grado: Medio</p>
	<p>La inspección se realiza con la presencia de dos técnicos, los mismos que se encuentran expuestos permanentemente al combustible cumpliendo con las funciones de calibrar las presiones en la válvula reguladora, verificar el estado del inyector mediante la pulverización.</p> <p>Grado: Alto</p>
	<p>Para la detección del cono es necesario el uso de iluminación artificial, la finalidad es poder contrastar de una mejor forma el área de pulverización y poder determinar los defectos presentes en los inyectores durante las pruebas.</p> <p>Grado: Alto</p>
	<p>La medición del ángulo cono de aspersión es imposible debido a que no cuenta con alguna técnica o tecnología que facilite detectar dicho parámetro.</p> <p>Grado: Alto</p>

Fuente: (Autores)

Debido a la evaluación del estado de los componentes del banco original y a la determinación de inconvenientes presentes en el sistema durante el proceso de inspección se plantea la alternativa de repotenciación con cambios y mejoras consistentes para un nuevo banco de pruebas.

Requerimientos para la repotenciación

- Disponer de una cabina de inspección transparente y evitar salpicaduras al exterior y disminuir la exposición de contaminación a la que se encuentra el operario durante el proceso de inspección.
- Proveer de una conexión mediante cañería flexible para 1 inyector, en dos tipos de flujo que permita cambiar la presión de funcionamiento (20-60, 30-60 psi) mediante una interface.
- Facilidad en el montaje y desmontaje del elemento de inspección al sistema de distribución.
- Comprobación del estado y el funcionamiento de los inyectores pertenecientes a motores PT-6 mediante el ángulo de pulverización y una inspección visual.

Mejoramiento de diseño del banco de pruebas

El diseño preliminar que se muestra en la figura, tiene como finalidad presentar una buena relación entre el operario, la máquina y el ambiente buscando así incrementar la calidad de vida, seguridad, bienestar del operario.

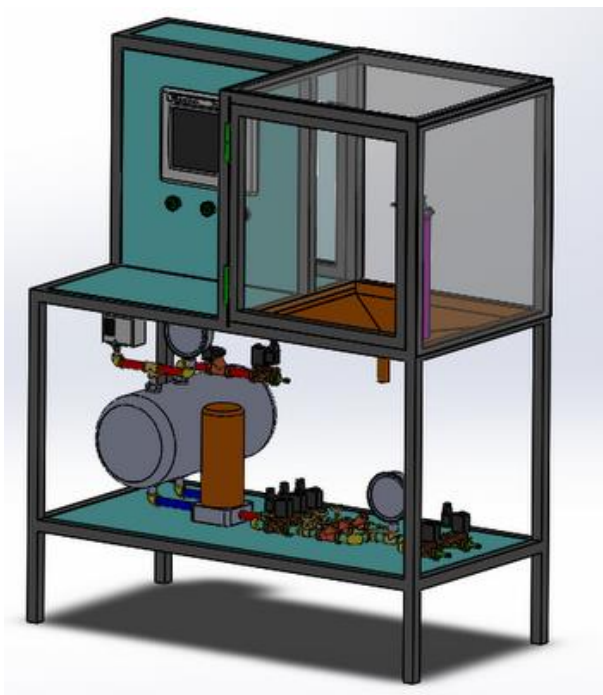


Figura 2. Alternativa de rediseño del banco de pruebas
Fuente: (Autores)

Estructura del banco

Una vez establecido el diseño final, se seleccionan los materiales correctos para la construcción del banco de pruebas. La selección de los materiales fue considerada bajo parámetros entre los cuales destacan la resistencia a la corrosión, disponibilidad y bajo costo.

Tabla 3. Características de la estructura general

Elemento	Material	Dimensiones
Estructura	Perfil cuadrado	1"x 2 mm de espesor
General	Ángulo	1"x 2 mm de espesor
	Platina	1"x 3.5 mm de espesor
	Tol galvanizado	1.5 mm de espesor
	Plancha acero inoxidable	2mm de espesor

Fuente: (Autores)

Parámetros de selección de equipos

Para la selección de componentes mecánicos y neumáticos es necesario conocer de manera precisa los siguientes parámetros.

Tabla 4. *Características de selección de componentes*

Manómetro	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de trabajo • Precisión requerida • Compatibilidad de materiales • Condiciones ambientales • Condiciones de trabajo
Presostato	Presión de ajuste <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de trabajo • Tipo de fluido
Válvula reguladora de presión	<ul style="list-style-type: none"> • Valores normales y límites de presión • Límites de temperatura • Pérdidas de presiones normales

Fuente: (Autores)

Montaje del inyector para las pruebas

El inyector se monta en la placa base y se asegura mediante pernos y tuercas tipo mariposa con el fin de que el elemento de inspección este fijo y no altere los resultados durante el proceso.

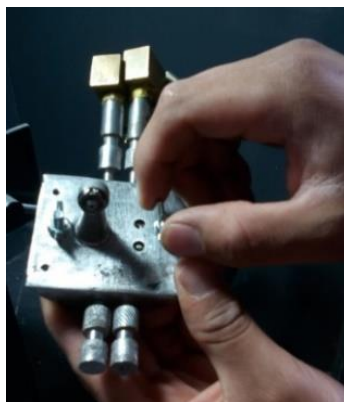


Figura 3. Montaje del inyector
Fuente: (Autores)

Las boquillas son los elementos de acople, entre las líneas y los colectores y deben ser colocadas correctamente, por tal razón es necesario identificar la entrada en el colector primario y secundario. Para una fácil identificación de las líneas se recomienda ubicar el punto de suelda tal como se muestra en la siguiente figura, este pequeño detalle indica el colector al cual debe ser conectado la línea primaria.



Figura 4. Indicador de punto de suelda
Fuente: (Autores)

El ensamble placa-inyector es colocado sobre una pequeña prensa modificada, que permite tener un posicionamiento fijo.

Resultados

Para verificar el funcionamiento óptimo del banco fue necesario someter a los inyectores a pruebas preestablecidas que generalmente forman parte de los procesos de mantenimiento habituales, entre las que se destacan las siguientes:

1. Inspección visual del cono de pulverización

La inspección visual es parte del correcto proceso de pulverización y mantenimiento de los inyectores, consiste en observar la forma básica del cono, tanto en vistas laterales como vista frontal y posterior.

2. Pruebas de pulverización en inyectores

Según lo dispuesto por el manual de mantenimiento de Pratt & Whitney se debe determinar que patrones rigen al cono pulverizado para ello se realiza una comparación entre imágenes reales tomadas del nuevo banco de pruebas con un inyector en buenas condiciones, como se puede

observar en la figura 5, la cual muestra un cono completamente definido que está acorde a los patrones señalados por el fabricante resultando ser una buena pulverización uniforme, mientras que la figura 6, muestra una forma cónica distorsionada relacionándose con un patrón skewness (asimétrico) ya que el cono no es uniforme y a su vez presenta spitting (escupir) que produce grandes gotas de combustible no atomizado.

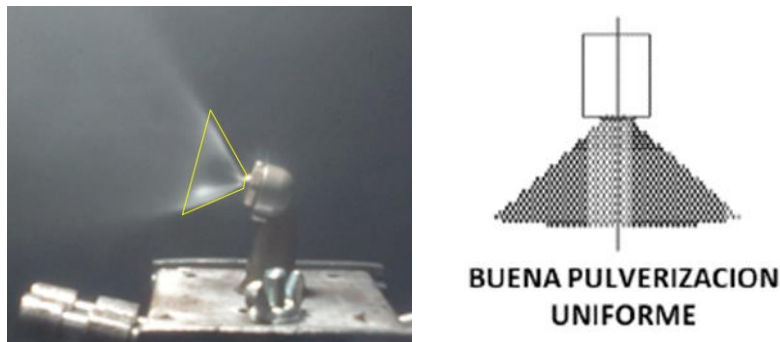


Figura 5. Comparación de imágenes reales con patrones de pulverizado
Fuente: (Autores)

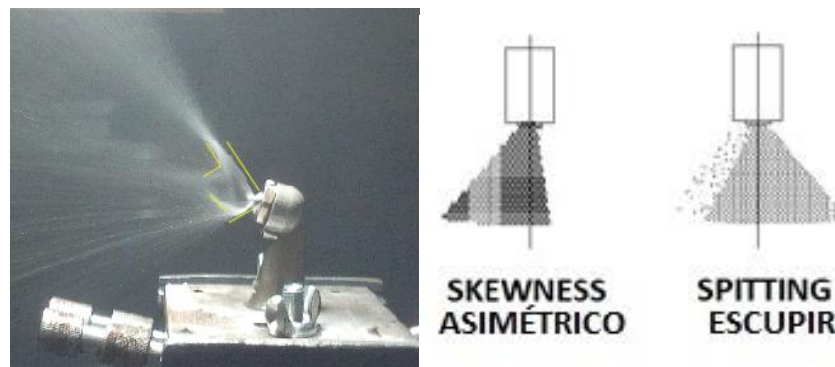


Figura 6-. Comparación de imágenes reales con defectos de pulverización
Fuente: (Autores)

3. Verificación de Etapas de pulverización

En la figura 7, se muestra un inyector funcionar a 20 psi en línea primaria, aquí se puede observar las etapas que cumple a medida que va aumentando progresivamente la presión de inyección de líquido, en la etapa de 2 y 3 se produce goteo, en la etapa 4 produce un cono distorsionado, en la 5 forma una burbuja cerrada conocida también como etapa de cebolla, en 6 y 7 la burbuja se abre en forma de tulipán hueco donde el combustible se desintegra en gotas grandes y por último en la

etapa 8 la superficie se endereza dando como resultado un definido spray de cono hueco con gotas muy finas.

Las etapas son satisfactorias para los tres tipos de presiones tanto para línea primaria como secundaria, como punto de semejanza y comparación para la pulverización de cada inyector.

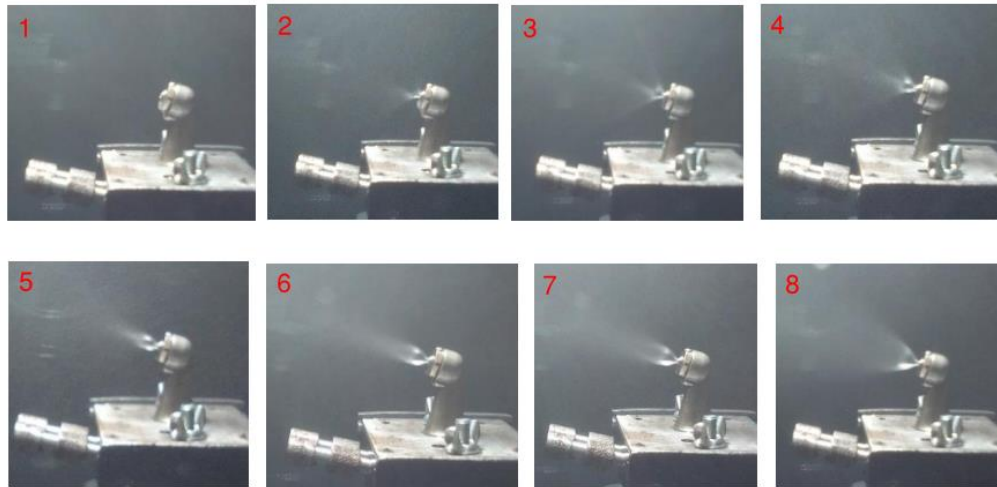


Figura 7. Etapas de pulverizado
Fuente: (Autores)

4. Cono de pulverización con visión artificial

Gracias a un procesamiento de imágenes, esencialmente detección de bordes y filtros de contorno como segmentación aplicados sobre los píxeles brindándonos mejor calidad de imagen y un enfoque más preciso del objeto.

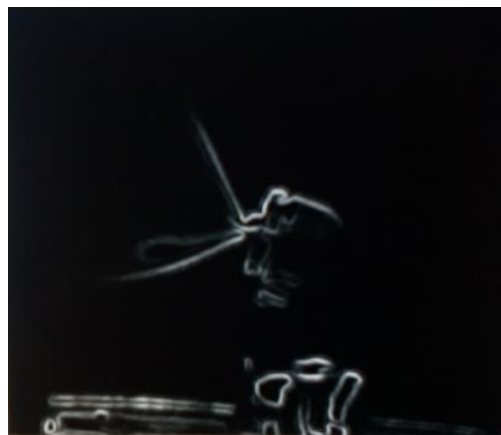


Figura 8. Visualización de contorno del inyector dúplex y sus aristas mediante visión artificial a 60 psi en línea primaria
Fuente: (Autores)

5. Medición de los ángulos de pulverización

Mediante el software se puede obtener mediciones de ángulos en la línea primaria con 20 y 60 psi de presión y en línea secundaria con 30 y 60 psi de presión, se toman 10 muestras de ángulos en referencia a la apertura del cono uniforme desarrollado en la punta del inyector con estos valores se verifica el correcto funcionamiento del inyector de acuerdo a lo establecido por el fabricante, el inyector dúplex de doble orificio presenta mejor versatilidad de pulverización debido al superior manejo de presiones bajas y altas de combustible.

Tabla 5. Toma de datos de los ángulos de aspersion

N° Pruebas	Líneas inyector dúplex			
	L. Primaria		L. Secundaria	
	Presiones (psi)			
	20	60	30	60
	Ángulos			
1	72,40°	86,37°	79,25°	90,01°
2	71,05°	84,75°	81,03°	88,58°
3	73,20°	83,02°	80,18°	89,91°
4	73,51°	85,42°	79,96°	88,37°
5	72,17°	86,80°	79,31°	89,40°
6	73,11	84,51°	80,03°	90,05°
7	71,90°	83,28°	81,10°	87,98°
8	72,93°	84,78°	79,95°	91,63°
9	73,11°	84,99°	78,99°	89,15°
10	72,88°	85,03°	79,75°	89,37°
Promedio	72,626°	84,895°	79,827°	89,417°
Ángulo Aprox.	73°	85°	80°	89°

Fuente: (Autores)

Conclusiones

Mediante el mejoramiento de diseño del banco de pruebas para la inspección de inyectores, la implementación del nuevo sistema mecánico, electrónico y del software LabView se visualiza de manera fácil y precisa el comportamiento de la presión de combustible por medio de la

pulverización generada en el inyector. Es así que se puede realizar de manera segura todos los trabajos de mantenimiento de inyectores.

El banco de pruebas rediseñado y construido consta de un sistema mecánico-hidráulico que opera con presiones de (20, 30, 60) psi que dispone de alimentación con aire comprimido, así se puede medir la pulverización tanto en la línea primaria y secundaria con diferentes condiciones de funcionamiento. Además, el banco posee un sistema de control eléctrico y electrónico que es comandado por un interfaz.

El sistema automatizado con visión artificial desarrollado e implementado en el banco permite generar un registro de datos los mismos que son mostrados en documento de texto después del proceso, de esta manera los resultados pueden ser analizados por el operario cuando lo requiera, de esta manera se agiliza el proceso de recolección y análisis de datos. Por lo tanto se reducen los tiempos de realización de pruebas y se dispone la información de manera digital.

Referencias Bibliográficas

Fuerza Aérea Ecuatoriana. [En línea] 2017. [Citado el: 09 de Agosto de 2017.]
<https://www.fuerzaaereaecuadoriana.mil.ec/>.

Guijarro, Octavio y León , Gustavo. Diseño e implementación de un banco de pruebas para inyectores del motor pt6 a-68c perteneciente al grupo logístico no. 232. Ambato : s.n., 2015.

Rivas, A. Motores de Turbinas de Gas. 2003.

United Turbine. PT6 Curso Descriptivo y Caza Fallas. [En línea] [Citado el: 15 de 10 de 2017.]

AviationPros. [En línea] 2011. [Citado el: 07 de 12 de 2017.]
<http://www.aviationpros.com/article/10381485/pt6-fuel-nozzles>.

Lefebvre, Arthur y Mcdonell, Vincent. Atomization and Sprays. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2017.

Pratt & Whitney. PT6A Familiarisacion & Caza Fallas. [En línea] Septiembre de 2002.

CIDFAE. Repotenciación del banco de pruebas para inyectores del motor PT6. Ambato : s.n., 2017.

Chiguano, Edwin y Moreno, Nathaly. Diseño e implementación de un sistema traductor de lenguaje de señas de manos a un lenguaje de texto mediante Visión Artificial en un ambiente controlado. [En línea] 2011. [Citado el: 14 de Septiembre de 2017.] <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3915/1/CD-3682.pdf>. Pratt & Whitney . Maintenance Manual. [En línea] 06 de Junio de 2003.