

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES AUDIBLES DEL BANCO DE PRUEBAS DIGITAL DE LAS BUJÍAS DEL MOTOR TURBOPROPULSOR TPE331

P. Melo ^{a b}, C. Lozano ^{a b}, J. Orduy ^a, I. Rodríguez ^b, F. Navarro ^b.

^a Departamento de Ingeniería Aeronáutica - Fundación Universitaria Los Libertadores.
Cra. 16 #63a-68, Sede Caldas - Bogotá, Colombia

^b Departamento de Ingeniería Aeronáutica - Escuela de Aviación del Ejército.
Aeropuerto Internacional El Dorado Nueva zona de Aviación General - Bogotá, Colombia

Email: pfmelod@libertadores.edu.co

RESUMEN

El banco de pruebas digital de las bujías para el motor turbopropulsor TPE331 es un producto innovador desarrollado por el Ejército Nacional de Colombia. Este banco de pruebas se utiliza en el Batallón de Aviones No. 1 para realizar las tareas de mantenimiento de las bujías de los Turbo Commander, lo que ha disminuido significativamente los riesgos auditivos, visuales y eléctricos asociados con el mantenimiento de las bujías. Además, ha mejorado la confiabilidad y los tiempos de mantenimiento, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y dinero.

Aunque el manual de mantenimiento estipula que los intervalos de descarga son un parámetro válido para descartar el buen estado de las bujías, el registro de las señales generadas por las pruebas realizadas en el banco permite generar un análisis estadístico e histórico del comportamiento de las bujías bajo condiciones operativas reales. Esto ha llevado a la propuesta de un análisis detallado de las señales audibles con el fin de encontrar correlación entre las señales y el comportamiento estructural y funcional de las bujías.

El documento presenta un análisis en los intervalos de tiempos históricos de las señales audibles obtenidas durante un período de seis meses de operación en el Batallón de Aviones No. 1 de cuatro bujías con diferentes características de desgaste estructural y operación. Se evalúan los valores entregados por el banco de pruebas de las bujías y en base a estos se realiza un análisis del comportamiento temporal de los resultados. Este enfoque innovador y detallado en el mantenimiento de las bujías tiene importantes implicaciones en la industria de la aviación y en el mantenimiento de motores turbopropulsores y permite determinar nuevas condiciones para evaluar el estado de las bujías.

Palabras clave: bujías, señales, mantenimiento, bancos de pruebas, aeronáutica.

INTRODUCCIÓN

En la aviación, cada componente desempeña un papel crucial en el funcionamiento seguro y eficiente de las aeronaves. Entre estos elementos fundamentales, las bujías se destacan como componentes esenciales en el sistema de encendido. El correcto funcionamiento de las bujías no solo influye en la eficacia de la ignición de motores, sino que también impacta directamente en la confiabilidad y seguridad del vuelo. Este papel vital de las bujías en las aeronaves ha llevado a una dedicación constante a la mejora y optimización de su mantenimiento.

En su papel investigativo, la Escuela de Aviación del Ejército Nacional de Colombia ha llevado a cabo un proceso de desarrollo tecnológico sumamente relevante. Este proceso se enfocó en la creación y

refinamiento de una herramienta esencial para el taller de aviónica del Batallón de Aviones: el banco de pruebas digital diseñado para la inspección auditiva de las bujías. El objetivo fundamental de esta iniciativa radica en cumplir con una de las especificaciones del manual de mantenimiento del TPE331 [1]. Dicha especificación establece que al aplicar 13 V a dos bujías conectadas a la caja de encendido, debe percibirse al menos una descarga eléctrica en un segundo. En el caso de aplicar 40 V, se espera que se escuchen dos descargas eléctricas en ese mismo lapso.

En el pasado, este proceso se ejecutaba manualmente, lo que generaba diversos inconvenientes, incluyendo el riesgo de descargas eléctricas para el operario, así como la exposición a niveles de ruido excesivos y la posibilidad de daños oculares. No obstante, con la implementación del banco de pruebas, se logró automatizar este proceso. Vale la pena destacar que la metodología utilizada en el desarrollo del banco se basa en una adaptación del método en V, incorporando variantes específicas relacionadas con la investigación [2].

Las investigaciones que precedieron al desarrollo del banco se han focalizado en llevar a cabo pruebas a velocidad constante en el motor, con el propósito de contrastar los procedimientos de encendido en la fase de combustión [3]. En este contexto, se han empleado señales de tensión con diversos propósitos, como se documenta en investigaciones anteriores [6] [7] [8]. Paralelamente, estudios similares han empleado sistemas de adquisición de datos que combinan mediciones de voltaje y corriente para analizar el estado de las bujías [4]. Además, se ha explorado un enfoque que integra diagnósticos ópticos y eléctricos [5]. Para el caso de este estudio, el banco de pruebas desarrollado este se diferencia por la utilización de sensores auditivos en la adquisición de datos además de un software que automatiza la realización de pruebas y las almacena,

Ahora bien, una etapa crítica en el proceso de desarrollo tecnológico es la fase de pruebas en un entorno operativo real, que posibilitó el análisis exhaustivo de la información recopilada a lo largo de un período de seis meses. En esta etapa, se realizaron pruebas experimentales con un total de cuatro bujías en el taller de motores, con el propósito de evaluar su rendimiento y comportamiento en condiciones diversas. Estos ensayos se llevaron a cabo en escenarios que abarcan distintas condiciones operativas, lo que permitió una evaluación completa y representativa. La variable clave evaluada consiste en el intervalo de tiempo de las señales auditivas de descarga, registrándose mensualmente.

METODOLOGÍA

En esta sección, se detalla el enfoque metodológico empleado para llevar a cabo el análisis de las bujías utilizadas en las aeronaves Turbocommander del Ejército Nacional de Colombia. Se describe el proceso de selección de las muestras, la adquisición de señales de audio provenientes de las bujías, así como el análisis posterior de estas señales. Finalmente, se exponen los parámetros operativos registrados durante las pruebas en el banco de pruebas. Cada paso metodológico se presenta con el fin de proporcionar una comprensión detallada de cómo se llevó a cabo el estudio y se recopilaron los datos para su posterior análisis.

Selección de Muestras

Para llevar a cabo este análisis, se seleccionaron de manera cuidadosa cuatro (4) bujías usadas (Figura 1) las cuales son identificadas así: (a) B 47756 Bujía 300 H – buen estado, (b) B 47757 Bujía 760H – buen estado, (c) B47758 Bujía 800H– estado regular (d) B47759 Bujía fuera de servicio – con fallos, estas son puestas en servicio en las aeronaves Turbocommander dentro del Ejército Nacional de Colombia. Esta selección se realizó con el propósito de garantizar la representatividad de las muestras y abarcar un espectro de condiciones operativas y niveles de desgaste que pudieran ser observados en el campo, cabe anotar que la bujía B47759, no está operativa debido a que presenta fallos estructurales en los orificios del cuerpo superior de la bujía y presencia de óxido en electrodo central



Figura 1. Bujías seleccionadas para el análisis.

Adquisición de Señales de Audio

Las señales de audio de las bujías seleccionadas fueron adquiridas utilizando el banco de pruebas digital diseñado específicamente para la inspección auditiva de bujías de aeronaves. Este sistema permitió la captura precisa de las señales emitidas durante las pruebas, las cuales reflejaban los patrones sonoros generados por el encendido y funcionamiento de las bujías. El banco cuenta con un software diseñado para la automatización de la prueba, una fuente de alimentación controlable que permite la variación de la tensión, además con los elementos propios del sistema de ignición de la aeronave; la bujía se conecta en una zona de prueba que consta de una cámara anecoica y un protector visual similar al que se usa en el procedimiento de la soldadura con electrodo.



Figura 2. Banco de pruebas digital para la inspección auditiva de las bujías,

Análisis de Señales

Una vez adquiridas las señales, se realiza el procesamiento y análisis para ello se utiliza el software propio llamado Spark plug V 1.0 desarrollado en LabVIEW, este inicialmente filtra las señales adquiridas, calcula los picos altos de señal y registra el tiempo en que se genera este, posteriormente realiza la diferencia entre tiempos de los picos continuos, procede a determinar la media de estas diferencias y por último guarda la información obtenida.

Registro de Parámetros Operativos

Durante las pruebas en el banco de pruebas digital, se registraron los intervalos de tiempo en los cuales se operó el banco. Este registro incluyó los niveles de voltaje aplicados en un rango de 10 a 40 Voltios. Estos niveles adicionales proporcionaron información amplia, permitiendo correlacionar los patrones de señales auditivas con las condiciones eléctricas bajo las cuales las bujías estaban funcionando.

Tabla 1. Características de las bujías.

Bujía	Id	Uso (H)	Operativa	Estado estructural
1	B 47756	300	Si	10/10
2	B 47757	760	Si	8/10
3	B 47758	800	Si	6/10
4	B 47759	780	No	2/10

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos durante el transcurso de seis meses de los intervalos de tiempo entre descargas eléctricas que se registraron en el banco de pruebas en un rango de 10V a 40V, en general se puede observar que las variaciones en las bujías identificadas B 47756, B 47757, B 47758 en los niveles de tensión superior a los 38V presenta una dispersión superior a los otros niveles, estos en un rango de 0,00760044 a 0,30656266 s, que se puede intuir al observar en la figura 3, para la bujía identificada como B 47759 que se operó en el banco simulando su operación normal, esto debido a que se encontraba fuera de los estándares de seguridad, se puede inferir que su dispersión en el transcurso de la prueba tienen una dispersión amplia, aunque no se consideraría por manual como defectuosa por motivos de no superar a los 10V el intervalo de tiempo de 1 segundo como tampoco supera con una tensión de 40V los 0,5 segundos.

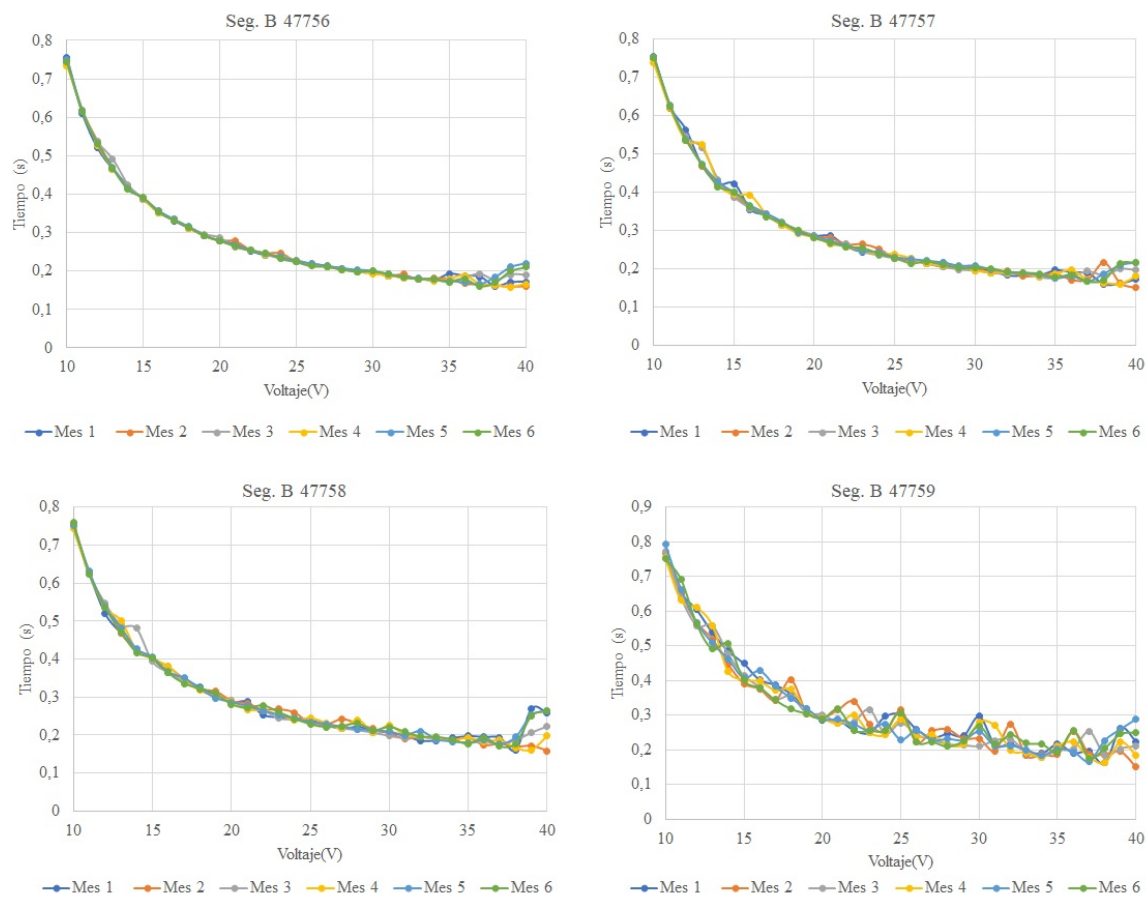


Figura 3. Datos adquiridos del seguimiento en seis meses de las bujías estudio en el banco de pruebas.

Para lograr una visualización más efectiva, se efectúa la suma de las dispersiones. Esto posibilita la identificación de patrones similares en niveles superiores a 35 V. Es importante resaltar que se observan picos significativos en los valores de 10 V a 15 V para las bujías B 47757 y B47758. En cuanto al comportamiento de la bujía B47759, únicamente muestra similitud en los niveles de 19V y 20V. En los demás niveles, su comportamiento varía en comparación con las bujías en buen estado.

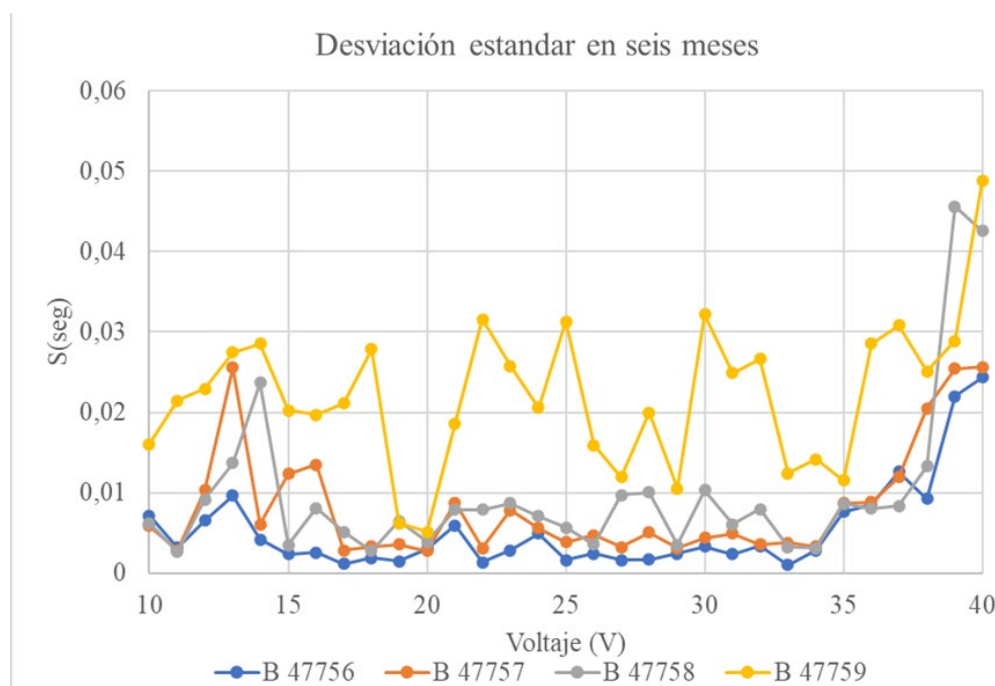


Figura 3. Desviación estándar de los seis meses de prueba de los datos obtenidos en el banco de pruebas.

Es relevante destacar que la bujía B 47759 presenta valores más elevados de dispersión sumatoria en comparación con las otras bujías. Asimismo, esta superioridad se refleja tanto en el nivel mínimo de dispersión, observado a 20V, como en el nivel máximo de dispersión, evidente a 40V

Tabla 2. Valores de dispersión en las cuatro bujías.

Id Bujía	B 47756	B 47757	B 47758	B 47759
Sumatoria dispersión (s)	0,16503537	0,25523966	0,30656266	0,68681157
Dispersión mínima (s)	0,00098319	0,00276671	0,00260051	0,00515031
Dispersión máxima (s)	0,02436186	0,02561222	0,04557866	0,04875661

Dada su condición, era de esperar que la bujía con un comportamiento destacado fuera la B 47756, mientras que la bujía B47757 y B47758 mantienen una tendencia similar hasta los 37V, en los niveles 38V a 40V la bujía B47758 presenta una variación significativa.

CONCLUSIONES

En primer lugar, se llega a la conclusión de que, aunque el manual de mantenimiento del motor establece que el intervalo de tiempo es un factor determinante para categorizar una bujía como no operativa, es esencial considerar otros elementos de identificación para emitir un veredicto adecuado sobre el estado de la bujía. En el estudio presentado, se observa que, a pesar de presentar daño estructural, la bujía no excedió los límites establecidos por el manual. Por ejemplo, a 10 V, el máximo intervalo de tiempo registrado fue de 0.7509 segundos, lo cual no supera el umbral de un segundo. Del mismo modo, a 40V, el intervalo de tiempo máximo fue de 0.2501 segundos, lo que también se mantiene por debajo del límite de 0.5 segundos requerido para identificar la bujía como no funcional.

Aunque los intervalos de tiempo de la bujía no operativa no exceden los límites establecidos, se puede notar que, en comparación con los intervalos de tiempo de las otras bujías, estos son al menos 0.0323 segundos mayores en el nivel de 10V y 0.0252 segundos mayores en 40V.

Este estudio se centra en analizar el comportamiento de las bujías a lo largo de un período de seis meses en relación con el intervalo de tiempo definido en el manual de mantenimiento. Sin embargo, la evaluación del estado del componente podría mejorarse al incorporar otras variables, como la frecuencia, la amplitud del sonido de las bujías o el color de la chispa. Complementar el análisis con estas variables permitiría una evaluación más completa y precisa. Además, se podría explorar la utilización de nuevas técnicas para el mantenimiento predictivo, como se sugiere en las referencias [9] y [10].

El banco de pruebas desarrollado para determinar el intervalo de tiempo entre chispas de la bujía permite adquirir las señales, procesarlas y analizarlas, este proceso es novedoso y contribuye a la interpretación de los resultados de las señales entregadas por ello el banco debe entrar en un proceso de madurez tecnológica durante donde evolucione de una demostración en entorno operacional a un sistema completo y certificado [11].

REFERENCIAS

1. Allied-Signal / Garrett. 1983. *TPE331-10U Turboprop Engine Maintenance Manual*. Vol. FAA Approv
2. Cabrera Arias, Carlos Arturo, Fabian Steven Garay Rairan, Ingrid Arango Calderón, and Óscar Edilson Gómez Vargas. 2020. "Design of a Troubleshooting Digital Test Bench for the Beechcraft King C-90, 200, B200, 300 and 350 Aircraft GCU." *Ingeniería* 25(3):393–409. doi: 10.14483/23448393.16903.
3. Czarnigowski J, Jakliński P, Karpiński P. Comparison of dual and single spark ignition in operation of a large piston aircraft engine. *International Journal of Engine Research*. 2021;22(9):2884-2899. doi:10.1177/1468087420960965
4. Kyuregyan, N.S., Golentsov, D.A. & Flanden, V.S. The Features of Signal Recording and Data Processing in the Diagnosis of Spark Plugs Discharge Parameters in Gas-Turbine Engines (GTE). *Autom Remote Control* 80, 380–384 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0005117919020140>
5. Oliveira, C., Reis, J. L., Souza-Corrêa, J. A., Pino, A. D., & Amorim, J. (2012). Optical and electrical diagnostics of a spark-plug discharge in air. *Journal of Physics D*, 45(25), 255201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/255201>
6. Кузбеев, А. Т. (2021, 17 mayo). RU2766478C1 - Method of testing and checking serviceability of spark plugs of gas turbine engines - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/RU2766478C1/en>
7. Iwata, T. (1988, 13 octubre). US4987771A - Misfire detection device for an internal combustion engine - Google Patents. [https://patents.google.com/patent/US4987771A/en?q=\(F02P17%2f00\)](https://patents.google.com/patent/US4987771A/en?q=(F02P17%2f00))
8. Klein, H. (1988, 2 septiembre). US5159912A - Apparatus for electronic engine control with performance check for the final ignition stage - Google Patents. [https://patents.google.com/patent/US5159912A/en?q=\(F02P17%2f00\)](https://patents.google.com/patent/US5159912A/en?q=(F02P17%2f00))
9. Park P, Marco PD, Shin H, Bang J. Fault Detection and Diagnosis Using Combined Autoencoder and Long Short-Term Memory Network. *Sensors*. 2019; 19(21):4612. <https://doi.org/10.3390/s19214612>
10. M.D. Dangut, Z. Skaf and I.K. Jennions, An integrated machine learning model for aircraft components rare failure prognostics with log-based dataset. *ISA Transactions* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.001>.
11. Miguel Ibáñez, J. (2014). *Aplicaciones de la Teoría de Juegos a la Economía Industrial: niveles de madurez de la tecnología technology readiness levels*. TRLS. Una introducción (393.a ed.). Centro de Publicaciones del Ministerio de Industria, Energía y Turismo.