

Viabilidad técnica, económica y ambiental de la electrificación de aeronaves deportivas ligeras (LSA)

Technical, economic, and environmental feasibility of electrifying light Sport Aircraft (LSA)

Nicolás E. Herrera Aguilar¹   Álvaro Espinel Ortega¹  Adriana M Vega¹ 

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

Resumen

Introducción: la sustitución de motores de combustión interna por sistemas de propulsión eléctrica constituye una alternativa para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos y las emisiones en aeronaves deportivas ligeras (LSA).

Objetivo: Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de sustituir un motor de gasolina por un motor eléctrico alimentado por batería en una aeronave MXP-150.

Metodología: se realizó una caracterización energética de una aeronave MXP-150 equipada con un motor ROTAX® 912 ULS de 100 hp, mediante el análisis de 20 ciclos de vuelo reales. Se determinó el consumo de combustible y la demanda energética para una hora de vuelo, y se estimó la energía obtenible del AVGAS® 100LL consumido. Posteriormente, se compararon la eficiencia térmica del motor de combustión interna y la eficiencia electromecánica de un motor ROTEX REB-90 de 80 kW y 93 % de eficiencia. Finalmente, se analizaron los costos operativos y las emisiones de CO₂.

Resultados: se obtuvo un consumo de 2,60 L de combustible y una demanda neta de energía de 8,29 kWh por circuito de tráfico aéreo. Esta demanda puede ser atendida mediante un sistema de baterías acoplado al motor eléctrico. Se determinó una mejora aproximada del 60 % en la eficiencia energética, una reducción del 67 % en los costos operativos por hora de vuelo y la eliminación de las emisiones directas de propulsión, evitando 41,11 kg de CO₂ por hora.

Conclusiones: la sustitución propuesta presenta viabilidad técnica, económica y ambiental bajo las condiciones analizadas.

Palabras clave: Propulsión eléctrica, aeronave deportiva ligera (LSA), motores eléctricos, controladores de aviación, eficiencia energética, reducción de costes, reducción de emisiones de CO₂.

Abstract

Introduction: the replacement of internal combustion engines with electric propulsion systems represents an alternative for improving energy efficiency and reducing operating costs and emissions in light sport aircraft (LSA).

Objective: to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of replacing a gasoline engine with a battery-powered electric motor in an MXP-150 aircraft.

Methodology: an energy characterization was performed on an MXP-150 aircraft equipped with a 100-hp ROTAX® 912 ULS engine through the analysis of 20 actual flight cycles. Fuel consumption and energy demand for one hour of flight were determined, and the energy obtainable from the AVGAS® 100LL consumed was estimated. Subsequently, the thermal efficiency of the internal combustion engine was compared with the electromechanical efficiency of an 80-kW ROTEX REB-90 motor with 93% efficiency. Finally, operating costs and CO₂ emissions were analyzed.

Results: a fuel consumption of 2.60 L and a net energy demand of 8.29 kWh per traffic pattern circuit were obtained. This energy demand can be met using a battery system coupled to the electric motor. An approximate 60% improvement in energy efficiency and a 67% reduction in operating costs per flight hour were determined, together with the elimination of direct propulsion emissions, avoiding 41.11 kg of CO₂ per hour.

Conclusions: the proposed replacement is technically, economically, and environmentally feasible under the conditions analyzed.

Keywords: Electric propulsion, light-sport aircraft (LSA), electric motors, aviation controllers, energy efficiency, cost reduction, CO₂ emission reduction.

¿Cómo citar?

Herrera NE, espinel Á, Vega AM. Viabilidad técnica, económica y ambiental de la electrificación de aeronaves deportivas ligeras (LSA). Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2)e-21115796

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15796>

Recibido: 19/04/26

Revisado: 27/05/26

Aceptado: 14/07/26

Online: 25/08/26

Correspondencia

neherreraa@udistrital.edu.co



¿Por qué se realizó el estudio?

Este estudio se llevó a cabo para evaluar la viabilidad técnica de convertir una aeronave deportiva ligera (LSA, por sus siglas en inglés), propulsada por un motor de combustión interna convencional, a un sistema de propulsión eléctrica por baterías. La investigación tuvo como objetivo cuantificar los requerimientos energéticos de la aeronave en condiciones reales de operación, estimar los beneficios ambientales asociados a la eliminación del consumo de combustibles fósiles y valorar el potencial de la propulsión eléctrica como una alternativa sostenible para la aviación ligera en Colombia.

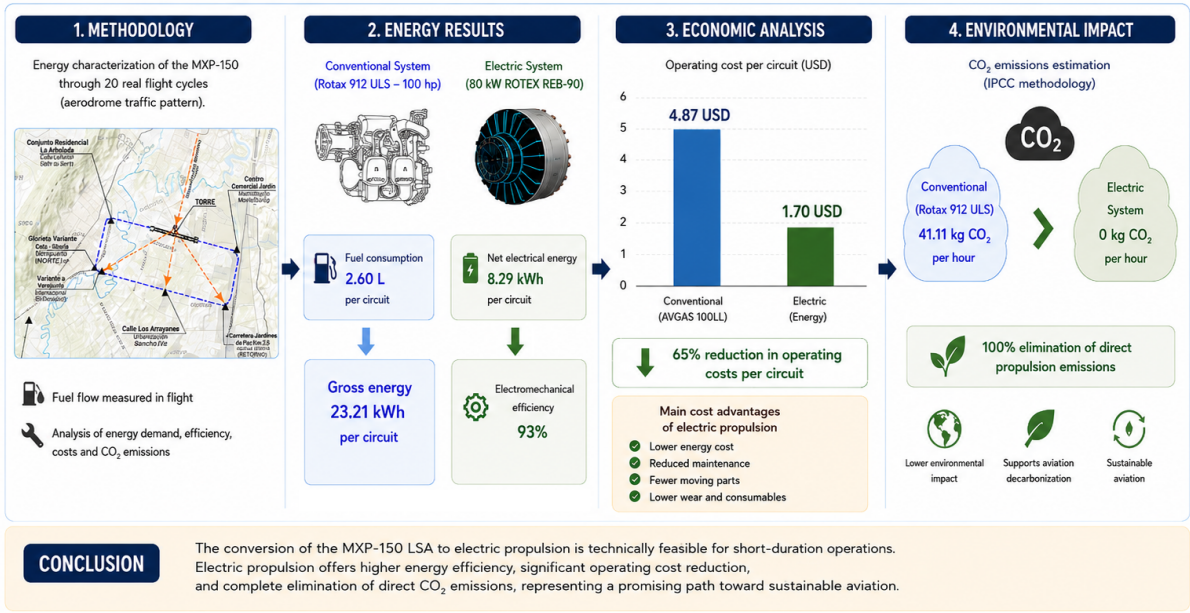
¿Cuáles fueron los hallazgos clave?

El análisis demostró que las tecnologías actuales de propulsión eléctrica pueden satisfacer la demanda energética de operaciones de corta duración con aeronaves LSA. Asimismo, la sustitución de AVGAS 100LL por energía eléctrica redujo los costos energéticos operativos en aproximadamente un 65 % y eliminó las emisiones directas de CO₂ en vuelo asociadas a la combustión del combustible.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Los resultados proporcionan evidencia cuantitativa que respalda la viabilidad técnica, económica y ambiental de la propulsión eléctrica en aplicaciones para aeronaves ligeras. El estudio aporta datos experimentales obtenidos en vuelo que pueden servir de base para futuros proyectos de electrificación de aeronaves, debates normativos e iniciativas de aviación sostenible en Colombia. Además, establece un marco metodológico para evaluar los requerimientos energéticos y las reducciones de emisiones asociadas a la conversión de aeronaves convencionales a sistemas de propulsión eléctrica.

Graphical Abstract



Introducción

Los combustibles fósiles, incluyendo carbón, productos petrolíferos y gas natural, son actualmente las principales fuentes de energía utilizadas en aplicaciones como la generación de energía, el transporte, la industria y la agricultura; Sin embargo, también representan una de las principales causas de contaminación y cambio climático. (1). Además, las inversiones en nuevas tecnologías para la generación de energía y mejoras en movilidad y propulsión eléctricas y políticas globales como el Acuerdo de París buscan limitar el uso de estos combustibles y frenar el cambio climático (2).

La aviación es uno de los sectores más dependientes de los combustibles fósiles; a pesar de las mejoras orientadas a la eficiencia del motor, la aviación sigue siendo una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (3), principalmente debido a la altitud a la que operan las aeronaves, lo que provoca cantidades sustanciales de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera (4). En particular, los aviones deportivos ligeros representan un banco de pruebas ideal para la implementación de motores eléctricos, dado su peso ligero y sus perfiles de misión típicamente cortos. La transición de motores de combustión interna a sistemas de propulsión eléctrica en LSA no solo podría reducir las emisiones de gases contaminantes, sino también reducir los costes operativos y el impacto ambiental (5). No obstante, esta conversión plantea desafíos técnicos y económicos que requieren un análisis detallado para evaluar su viabilidad (6).

Este estudio se centra en evaluar el rendimiento energético de una aeronave LSA para analizar la viabilidad de la conversión a propulsión eléctrica. El objetivo principal es evaluar la energía actual de un avión LSA específico y determinar la viabilidad técnica de convertirlo a un sistema de propulsión eléctrica alimentado por batería (7). Para ello, se realizará una evaluación exhaustiva que abarca lo siguiente:

Análisis del consumo energético y la eficiencia térmica del motor de combustión interna existente: Se recopilarán datos operativos de vuelo para establecer una línea base de rendimiento energético bajo condiciones reales de operación a gran altitud.

Análisis económico y medioambiental: Se evaluarán los costes asociados a la conversión del sistema de propulsión, los requisitos de mantenimiento a largo plazo y el impacto ambiental derivado de la reducción de las emisiones directas de combustión.

En el contexto colombiano, un semillero de investigación compuesto por profesores y estudiantes construyó el primer avión eléctrico del país. Este esfuerzo está liderado por el Grupo de Investigación e Innovación Ambiental (GIAM) de la Universidad Pascual Bravo en Medellín, Colombia (8). La iniciativa surgió para abordar las emisiones de calor, la contaminación acústica, las partículas en suspensión y otras emisiones gaseosas. La aeronave alcanza una velocidad de 18 metros por segundo utilizando dos motores de 10 kW. CO₂

Como se señaló anteriormente, el desarrollo de este trabajo corresponde a un proyecto de investigación apoyado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, titulado Prototipo de Aeronave Eléctrica Tripulada Fase I. Este estudio tiene como objetivo apoyar la transición energética hacia motores eléctricos en el diseño de aeronaves ultraligeras, lo que supone una oportunidad

para la reducción de emisiones, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de costes operativos mediante la sustitución del motor de gasolina por un motor eléctrico alimentado por batería.

Marco de Referencia

Históricamente, estas aeronaves han utilizado gasolina de aviación (AVGAS-100LL) y, en algunos casos, gasolina de automóviles (MOGAS) como fuente principal de energía (9). El uso del AVGAS 100LL en aviones ligeros se remonta a mediados del siglo XX, cuando la aviación recreativa empezó a ganar popularidad (10). Con el desarrollo de motores más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, algunos modelos LSA han empezado a utilizar MOGAS sin plomo, que es una opción más asequible y accesible (11).

Aviones deportivos ligeros (LSA) llegaron a Colombia a finales del siglo XX; su popularidad aumentó debido a los menores costes operativos que los de los aviones convencionales y a la facilidad de mantenimiento (12). Empresas y escuelas de aviación comenzaron a importar modelos de fabricantes reconocidos como ZENITH AIR®, TECNAM® y PIPISTREL®, adaptando estos aviones a las condiciones geográficas y normativas colombianas (11). El fabricante AGROCOPTEROS®, posteriormente AEROANDINA®, y más recientemente WACSA SAS, construyeron cerca de 500 aviones LSA en Jamundí, Valle del Cauca, Colombia, la gran mayoría de los cuales fueron exportados. Cabe destacar que el modelo MXP-740® y actualmente el modelo MXP-150 KIMBAYA® son el equipo utilizado en el presente proyecto para implementar el prototipo.

Las normativas de aviación en Colombia están reguladas por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil), que establece los requisitos de operación, certificación y mantenimiento para las aeronaves LSA (13). Algunas regulaciones relevantes incluyen las siguientes:

- RAC 21 (Reglamento de Aviación Colombia): Este reglamento implica la certificación de aeronaves y componentes y es aplicable a la conversión de aeronaves a sistemas de propulsión eléctrica.
- RAC 91: Normas generales de operación para aeronaves, incluyendo restricciones y requisitos técnicos para aeronaves ligeras deportivas (LSA).
- RAC 23 y RAC 33: Relativos a los requisitos de aeronavegabilidad y la certificación de motores.
- RAC 26: Categoría de Aeronaves Ligeras. Enmienda 3.

En el contexto internacional, la Administración Federal de Aviación (FAA) (14) y la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) (15) han comenzado a actualizar sus marcos regulatorios para la aviación ligera con propulsión eléctrica. La FAA, a través de su programa MOSAIC (Modernización de Certificados Especiales de Aeronavegabilidad), ha propuesto ampliar los criterios de certificación para aeronaves LSA con sistemas de propulsión alternativos, reconociendo explícitamente la integración de motores eléctricos y baterías de alta densidad energética (14). Por su parte, la EASA, a través de su regulación CS-LSA y el marco normativo de la Enmienda 5 CS-23, establece los requisitos de aeronavegabilidad aplicables a aeronaves de aviación general y de categoría especial (15).



Además, la norma RTCA/DO-311A define los requisitos mínimos de rendimiento para las baterías recargables de iones de litio utilizadas en aeronaves, estableciendo criterios de seguridad para condiciones de fallo, sobrecarga y variaciones térmicas (16). Asimismo, el documento RTCA/DO-160G establece las condiciones ambientales y los procedimientos de prueba para equipos aeronáuticos, como vibraciones, temperatura, altitud y compatibilidad electromagnética (17). Finalmente, la norma IEEE 519 regula los límites de distorsión armónica en sistemas eléctricos, lo cual es pertinente para garantizar la calidad de la potencia suministrada al sistema de propulsión y evitar interferencias con los instrumentos de vuelo (18).

Estas normativas internacionales constituyen una referencia técnica indispensable para proyectos de conversión eléctrica como el presentado aquí (19).

Tabla 1 presenta una comparación entre motores de gasolina y motores eléctricos aplicados a aviones deportivos ligeros (LSA) (20).

Tabla 1. Comparación entre motores de gasolina y motores eléctricos en aviones de puerto ligero (LSA).

Parámetro	Motor de combustión interna de gasolina (ICE)	Motor eléctrico (alimentado por batería)	Justificación del cambio
Medio ambiente	Emite CO ₂ , NOx y partículas en suspensión.	Cero emisiones locales; reducción sustancial de contaminantes.	Apoya la sostenibilidad y reduce la huella medioambiental.
Eficiencia energética	Eficiencia energética: 25–40%; pérdidas significativas debido al calor y la fricción.	Eficiencia energética > 90–95%; pérdidas mínimas de energía.	Optimiza el uso de la energía almacenada y mejora el rendimiento.
Mantenimiento técnico	Numerosas piezas móviles expuestas al desgaste y altas temperaturas; requiere mantenimiento frecuente	Una sola pieza móvil (rotor); Bajo desgaste y mantenimiento mínimo.	Aumenta la fiabilidad y reduce los costes de mantenimiento.
Motor	Motor complejo y costoso debido a los componentes y la instrumentación.	Motor más barato, con menos componentes y un mantenimiento más sencillo.	Reduce el coste inicial y operativo de la aeronave.
Costes energéticos	La gasolina Avgas 100LL es costosa y contaminante; La eficiencia es baja (≈30%).	Electricidad más barata y limpia; eficiencia acercándose al 95%.	Reduce significativamente los costes operativos por hora de vuelo.
Innovación	Tecnología madura con pocas innovaciones disruptivas recientes.	Avances en baterías, controladores y materiales compuestos.	Impulsa la transformación tecnológica y la modernización de la aviación ligera.

Fiabilidad	Alta probabilidad de fallos debido a la complejidad y las demandas térmicas.	Alta fiabilidad debido a la simplicidad mecánica y menores demandas térmicas.	Mejora la seguridad operativa.
------------	--	---	--------------------------------

Metodología

La metodología para el desarrollo del presente estudio incluye las siguientes fases:

Selección del aeródromo para realizar los vuelos de prueba

Selección y detalles del circuito de patrón de tráfico para el aeródromo elegido.

Determinación teórica de la energía requerida para el circuito de patrón de tráfico en el aeródromo seleccionado.

Se instala un sistema de medición de combustible de precisión a bordo para determinar el consumo real de combustible.

Los vuelos se realizan para registrar el tiempo y el consumo de combustible de cada tramo del circuito de tráfico en el aeródromo seleccionado.

Validación de los resultados mediante análisis de datos mediante comparación con las tablas de consumo del fabricante para el motor ROTAX® 912 ULS.

Determinación de los requisitos energéticos para dimensionar el sistema de baterías para un vuelo propuesto en patrón de tráfico de aeródromo.

Evaluación de los beneficios medioambientales y económicos asociados a sustituir el motor de combustión interna por el motor eléctrico alimentado por batería.

Evaluación de la viabilidad de implementar el prototipo para realizar un (1) circuito de patrones de tráfico.

Además, se tendrán en cuenta los siguientes componentes, que permitirán una descripción más adecuada de la validación científica del proceso y de la metodología propuesta.

Estandarización de las condiciones de vuelo: Los 20 vuelos de caracterización se realizaron bajo condiciones de vuelo en el Aeródromo de Guaymaral (SKGY). Se registraron o restringieron parámetros como la temperatura ambiente, el ajuste del altímetro, el viento superficial (dirección y velocidad), el peso total de la aeronave y la cantidad de combustible al arrancar el motor.

Estandarización del piloto: Todos los vuelos de medición fueron realizados por el mismo piloto certificado para minimizar la variabilidad entre operadores en la gestión del acelerador y la geometría del circuito de tráfico.

Protocolo de calentamiento del motor: Antes de cada vuelo de medición, se aplicaba un procedimiento estandarizado de calentamiento del motor de duración fija para asegurar condiciones térmicas uniformes al inicio de la adquisición de datos.

Protocolo de adquisición de datos: Los datos de consumo de combustible se registraban continuamente a la frecuencia nativa de muestreo del sensor mediante el ordenador MGL-FF1, y el piloto registraba manualmente las transiciones de segmento. Los archivos de datos en bruto de los 20 vuelos constituyen el conjunto de datos principal para el análisis estadístico descrito en la Sección 5.

Clasificación de variables y fuentes de datos

Tabla 2 presenta una clasificación estructurada de las variables empleadas a lo largo de la investigación. Las variables especificadas por el fabricante se refieren a datos obtenidos directamente de la documentación técnica proporcionada por los fabricantes de motores de combustión y motores eléctricos (21) (22), así como por la autoridad aeronáutica (UAEAC®/ICAO SKGY). Las variables estudiadas, en cambio, corresponden a cantidades medidas bajo condiciones reales de vuelo o calculadas a partir de dichas mediciones mediante el marco metodológico.

Tabla 2. Clasificación de variables

Variable	Unidad	Tipo de fuente	Fabricante	Estudiado por autores
Potencia máxima del motor de combustión	kW/CV	Fabricante	73,5 kW / 100 CV	-
Potencia máxima de motor de combustión continua	kW/CV	Fabricante	69,0 kW / 90CV	-
Consumo teórico de combustible	L/h	Fabricante	14,0-27,5 L/h	-
Eficiencia térmica de los motores de combustión	%	Fabricante	30%	-
Potencia nominal del motor eléctrico	kW	Fabricante	80 kW	-
Eficiencia de motores eléctricos	%	Fabricante	93%	-
Valor calorífico AVGAS 100LL	kWh/L	Fabricante	8,9 kWh/L	-

Elevación del aeródromo (SKGY)	Ft/m	EAU®	8,400 pies (2,557 m.s.n.m.)	-
Potencia máxima disponible de un motor de combustión	kW	Estudió	-	55 kW a 8.400 pies (corregido mediante la curva del fabricante, Fig. 8)
Consumo real de combustible por segmento	L	Estudiado/ Medido	-	0,17-0,78 L
Consumo total real de combustible	L	Estudió	-	2,6 L
Demanda energética	kWh	Estudió	-	23,21 kWh
Energía total requerida por las baterías	kWh	Estudió	-	8,29 kWh

Fig. 1 presenta el diagrama de bloques correspondiente a la metodología empleada en el desarrollo de este estudio. Este esquema ofrece una visión estructurada de las etapas teórica, experimental y de validación, desde la selección del aeródromo y la definición del patrón de tráfico hasta la evaluación de la viabilidad técnica, energética y ambiental del sistema propuesto. El diagrama permite la visualización de la secuencia lógica del proceso, así como la integración de datos experimentales con los modelos analíticos utilizados.

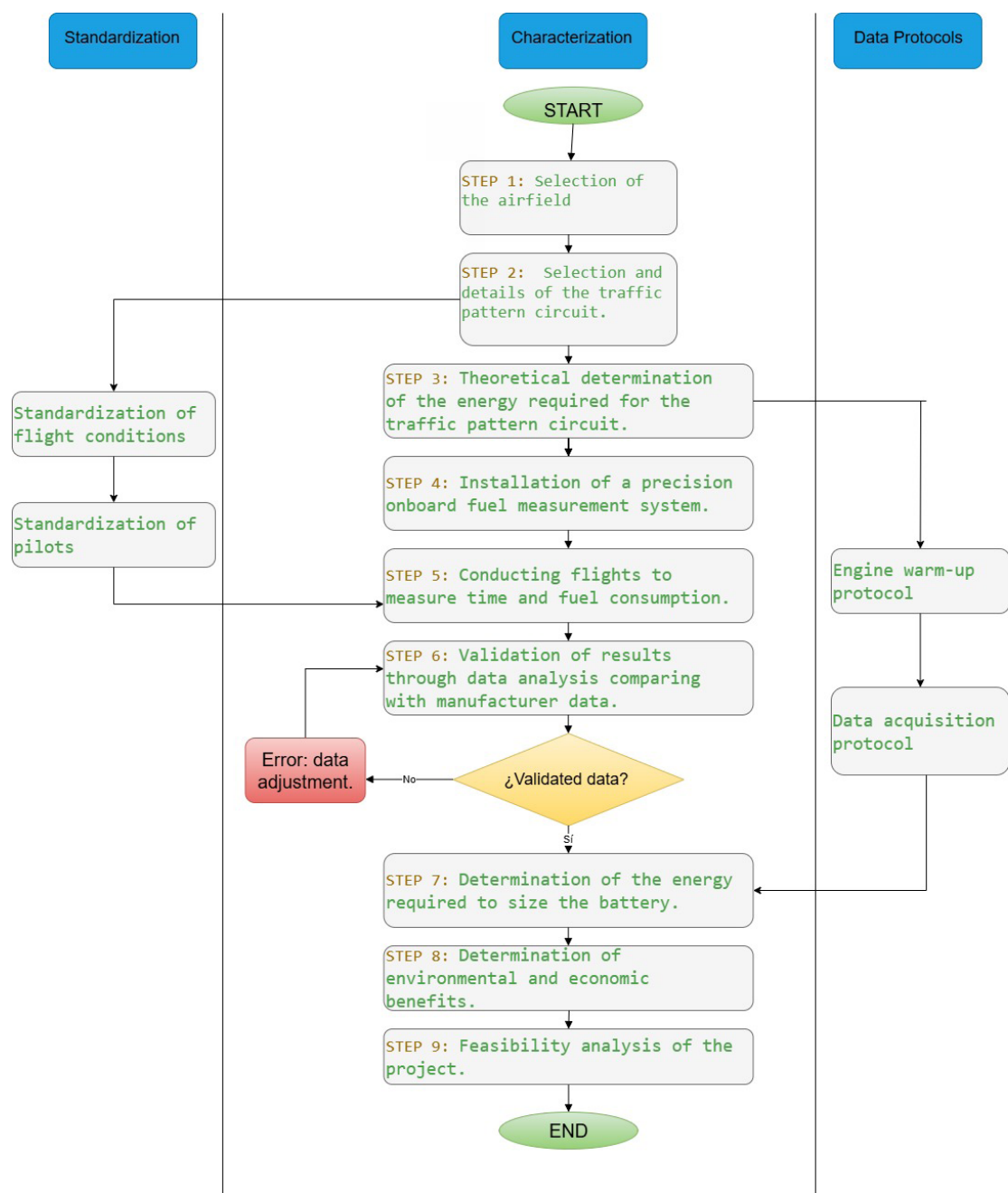


Figura 1. Diagrama bloque de la metodología empleada.

Estudio para determinar los aspectos técnicos, económicos y medioambientales implicados en el cambio a un motor eléctrico para aeronaves ligeras deportivas (LSA)

Selección del aeródromo para realizar los vuelos de prueba

El aeródromo seleccionado se encuentra en el municipio de Chía, Cundinamarca, en el centro de Colombia. Está designado por el código OACI-SKGY, denominado Flaminio Suárez, y los datos obtenidos directamente de la autoridad de aviación se presentan en Tabla 3.

Tabla 3. Datos del aeródromo Guaymaral - Flaminio Suárez - OACI SKGY

Datos	Indicación
1 Coordenadas y ubicación ARP en AD	044845.00 N 0740354.30 W
2 Dirección y distancia desde (ciudad)	16 km
3 Altitud/Temperatura de referencia	Altitud: 8389 FT (2557)/T: 14°C
4 Ondulación Geoide en AD ELEV PSN	NIL
5 Variación/Año magnético (cambio anual)	8°O (2022)/0°1"O
6 Dirección	Unidad Administrativa Especial para la Aeronáutica Civil Aeródromo de Guaymaral

El aeródromo fue seleccionado porque es donde se encuentra el LSA-HJ417, disponible para el proyecto y equipado para vuelos con un motor de combustión interna. El vuelo del motor eléctrico está previsto para realizarse en el municipio de Flandes, departamento de Tolima, Colombia, en la pista del Aeroclub, donde opera la aeronave con matrícula OACI-SKGY en operaciones aerodeportivas.

Selección y detalles del patrón de tráfico en el aeródromo elegido

La caracterización energética de la aeronave ligera deportiva (LSA) se basa en un patrón de tráfico definido por la autoridad de aviación colombiana conforme a los estándares de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), como se muestra en Fig. 2. Tras la caracterización de la energía, se propone un sistema de propulsión con motor eléctrico, controlador y energía de un banco de baterías para realizar dos (2) circuitos de patrón de tráfico.

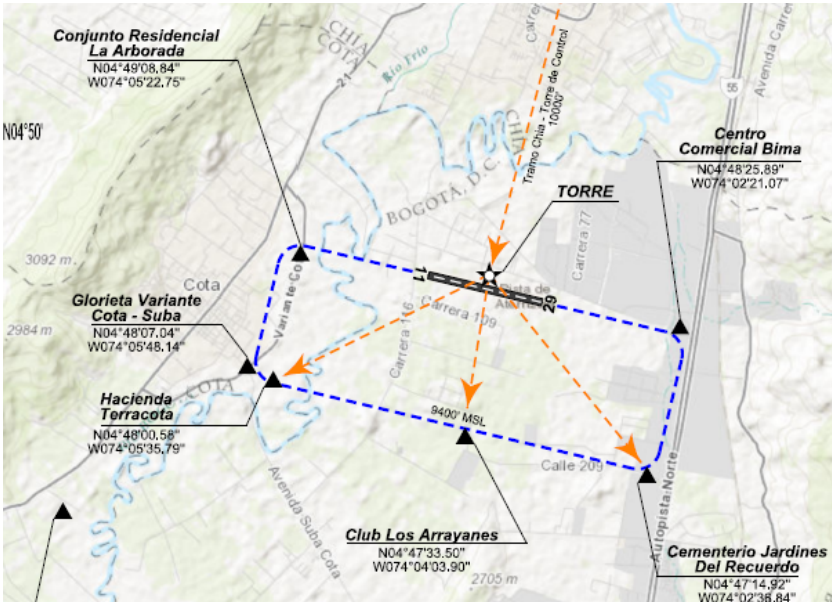


Figura 2. Patrón de tráfico propuesto de acuerdo con el AIP AD2-SKGY-1. EAU®

Fig. 3 muestra el patrón de tráfico estandarizado para el Aeropuerto de Guaymaral, con el código OACI: SKGY y el nombre Flaminio Suárez; La caracterización de la energía comienza con la rodada de despegue.

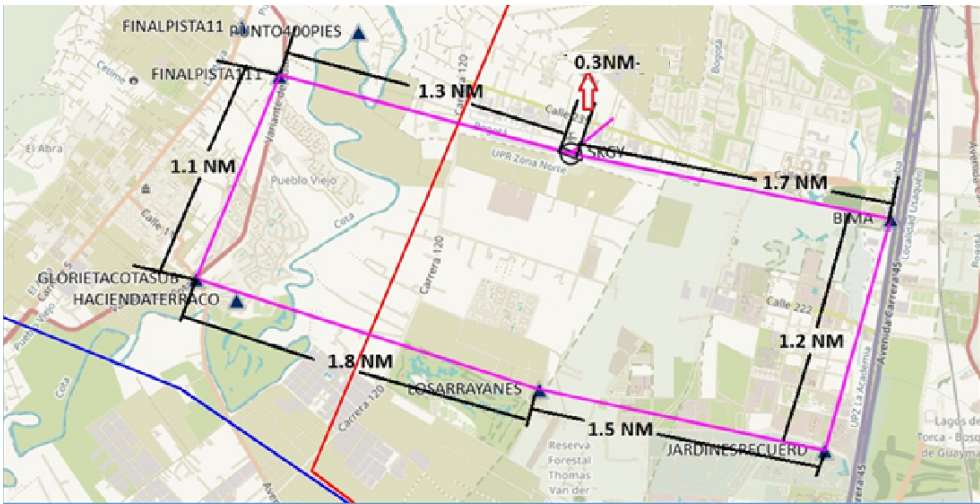


Figura 3. Patrón de tráfico a la derecha, pista 11-SKGY, implementado en AIRMATE®.

La implementación del patrón de tráfico por la derecha para la pista 11 se realizó mediante la herramienta gratuita de planificación de vuelos AIRMATE®, de la cual se obtuvieron las mediciones reales tras la implementación del modelo sobre la base de la Publicación de Información Aeronáutica (AIP) de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica de Colombia (EAUAC®). Para facilitar el análisis, los segmentos se describen según el patrón de tráfico de un circuito de aeródromo conforme a la OACI y el AIP para Guaymaral Flaminio Suárez Camacho, con el código SKGY. Tabla 4.

Tabla 4 .Caracterización de los patrones de tráfico para diferentes distancias y altitudes

Segmento	Punto de paso	Punto de paso	Nombre estandarizado del segmento	Longitud (nm)	Altitud (ft)	Diferencia de altitud (ft)
1	Posición de salida Pista 11	Punto de rotación	Giro de despegue con viento de cara en la pista 11	0,3	8.400	0
2	Punto de rotación	Centro Comercial BIMA	Segmento de vuelo con viento en contra	1,7	8.800	+400
3	Centro Comercial BIMA	Jardines del Recuerdo Field	Tramo con viento cruzado	1,2	9.400	+600
4	Jardines del Recuerdo Field	Rotonda COTA-SUBA	Segmento con viento de cola	3,3	9.400	+0

5	Rotonda COTA-SUBA	Complejo residencial La Arborada	Segmento básico	1,1	9.000	-400
6	Complejo residencial La Arborada	Umbral de la pista 11	Segmento final	1,3	8.400	-600
DISTANCIA TOTAL				8,9		

Determinación teórica de la energía para un patrón de tráfico en aeródromos

El fabricante del motor ROTAX® presenta en los siguientes gráficos y tablas las características de par y la potencia frente a las revoluciones por minuto del motor ROTAX 912 ULS, que es similar al motor instalado en el avión LSA del proyecto (21). El fabricante señaló que a una revolución máxima de 5,800 rpm, el motor no debería funcionar durante más de cinco (5) minutos para evitar posibles daños en el motor.

Tabla 5 presenta los datos más relevantes relacionados con las revoluciones del motor, potencia (kW)/(hp), presión de admisión de combustible (in. Hg) (múltiple), y par (Nm) – (ft·lb) (21).

Tabla 5. Relaciones entre el punto de funcionamiento y la presión del colector motor para el ROTAX® 912 ULS

Ajuste de potencia	Régimen del motor (rpm)	Rendimiento (kW)/(hp)	Par (nm)/ft.lb)	Presión del colector (en Hg)
Potencia de despegue	5.800	73,5/100	121,0/89,24	27,5
Potencia máxima. continua	5.500	69.0/90	119,8/88,36	27
75%	5.000	51,0/68	97,4/71,84	26
65%	4.800	44,6/60	88,7/65,42	26
55%	4.300	38,0/50	84,3/62,17	24

Con base en la información proporcionada por el fabricante, el consumo teórico de combustible y el consumo en litros por hora se determinan para cada condición de funcionamiento según los datos proporcionados. Figura 4. Tabla 6.

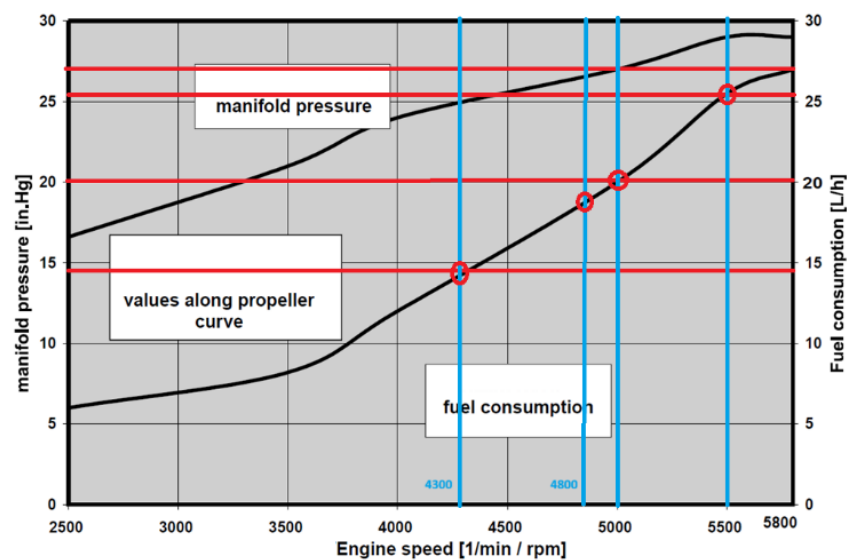


Figura 4. Consumo de combustible en litros/hora frente a rpm (21).

Tabla 6. Relaciones entre potencia (kW)-(hp), rpm del motor y consumo de combustible

Segmento	Nombre estandarizado del segmento	Potencia (%)	Potencia (kW)	Potencia (hp)	RPM	Consumo de combustible CCFT (L/h) (gal/h)
1	Segmento de despegue	100	74,6 kW	100 CV	5.800	27,5 L/h
2	Segmento con viento en contra (Ascenso)	90	69,0 kW	90 CV	5.500	26,0 L/h
3	Tramo con viento cruzado (Ascenso)	90	69,0 kW	90 CV	5.500	26,0 L/h
4	Segmento con viento de cola (Estabilizándose)	75	51,0 kW	68 CV	5.000	20,0 L/h
5	Segmento básico (Descenso)	65	44,0 kW	60 CV	4.800	18,0 L/h
6	Segmento final (Descenso)	55	38,0 kW	50 CV	4.300	14,0 L/h

Determinación teórica del consumo de combustible y energía para determinar el patrón de tráfico aeroportuario en Guaymaral-SKGY

El valor calorífico (calorífico) de AVGAS 100 LL expresado en kWh es de 8,9 kWh/L.

El consumo de combustible para cada tramo se determina de la siguiente manera:

$$CCT = CCFT * \left(\frac{1}{3600sg}\right) * (Tsg)$$

(1)

Donde

CCT = Consumo de combustible para la etapa expresado en litros.

CCFT= Consumo de combustible para el tramo según el fabricante (L/h). Ver la columna de la derecha en Tabla 7.

Tsg = Duración del consumo de combustible en la etapa.

Tabla 7. Determinación teórica del consumo de combustible según las especificaciones del fabricante del motor ROTAX® 912 ULS

Segmento	Nombre estandarizado del segmento	Longitud (nm)	Potencia (kW)	Tiempo (s)	Consumo de combustible en la etapa (L)	Energía total del eje del motor eléctrico kWh	KWh de energía
1	Giro de despegue con viento de cara en la pista 11	0,3	73.5	29	0,22	1,97	0,59
2	Segmento de vuelo con viento en contra	1,7	69.0	85	0,61	5,46	1,63
3	Tramo con viento cruzado	1,2	69.0	78	0,56	5,01	1,50
4	Segmento con viento de cola	3,3	51.0	150	0,83	7,41	2,13
5	Segmento básico	1,1	44.0	76	0,38	3,38	0,93
6	Segmento final	1,2	38.0	89	0,34	3,08	0,94
	TOTAL	8,8		507	2,95	26,32	7,71

La energía teórica necesaria para realizar el patrón de tráfico es de 7,71 kWh, con un consumo de combustible de 2,95 litros y una duración de vuelo de 507 segundos (8 minutos 27 segundos). La distancia recorrida es de 8,8 millas náuticas y la velocidad media es de 62,5 nudos.

Determinación del consumo real de combustible bajo condiciones del aeródromo de Guaymaral (OACI-SKGY)

Se instalaron el sensor FLOSCAN 201A® (23) y el instrumento FF1 fabricados por MGL Avionics®, con los que se planea obtener las mediciones reales de consumo de combustible para realizar el patrón de tráfico caracterizado en la primera parte de este documento.

Instalación de un sistema de medición de combustible de precisión a bordo

Para este proyecto, se utilizó una Aeronave Ligera Deportiva (LSA) afiliada al Club Colombiano de Aviación Deportiva – CCAD, registrada HJ417. Hasta la fecha, se han acumulado un total de 360 horas de vuelo, que han apoyado el proceso de caracterización, medición de combustible y determinación de la energía necesaria para realizar el patrón de tráfico. Figura 5.



Figura 5. MXP-150 tipo Kimbaya LSA. HJ-417. Disponible para el proyecto

El sistema implementado en la aeronave consiste en el sistema MGL-Avionics® FF1 y el sensor de flujo tipo turbina FLOSCAN® 201AV (23). El sistema de medición FF1 se instaló únicamente con la configuración que permitía la monitorización en tiempo real del consumo de combustible (24).

Los transductores de flujo de la serie 200 están diseñados para medir caudales en estado estacionario. Las precisiones y conteos de pulsos especificados se obtuvieron utilizando heptano en un soporte de flujo con bombas rotativas y son reproducibles en sistemas de flujo que utilizan bombas rotativas o de engranajes. Siguiendo las instrucciones del fabricante, el sistema de medición se instaló como se muestra en Fig. 6 y Fig. 7.



Figura. 6. Instalación del sensor FLOSCAN 201A en el avión LSA del proyecto.



Figura 7. Estado final de instalación del avión LSA del proyecto.

Resultados de las mediciones de consumo en vuelo

Para cada etapa de los 20 vuelos realizados, se tomaron mediciones en tiempo real vía se determinaron el medidor FLOSCAN 201A y el ordenador MGL-FF1, así como los siguientes valores de consumo de combustible. Cabe destacar la potencia real entregada a la altitud de Bogotá 8.400 pies (2.560 m.s.n.m.) difiere de las condiciones del nivel del mar especificadas por el fabricante; por lo tanto, debe aplicarse una corrección de potencia sobre el Base de la Curva mostrada en Fig. 8.

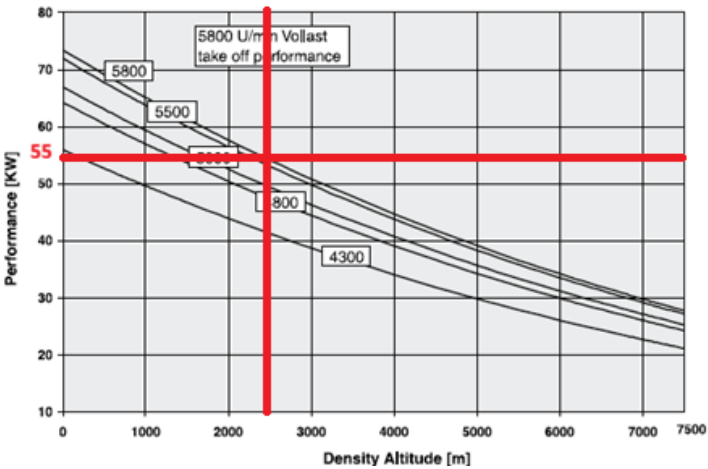


Figura 8. Configuración final de la instalación en el proyecto LSA de aeronaves (21).

Fig. 8 muestra que la potencia máxima disponible bajo las condiciones de elevación de la El aeródromo de Guaymaral (SKGY) tiene 55 kW. Los resultados mostrados en se obtuvieron en base a la corrección prescrita por el fabricante para tener en cuenta el aumento de altitud. Tabla 8.

Tabla 8 Determinación del consumo real de combustible a partir de mediciones obtenidas en veinte (20) vuelos

Segmento	Nombre estandarizado del segmento	Longitud (nm)	Potencia (kW)	Tiempo (s)	Consumo de combustible en la etapa (L)	Energía kWh
1	Giro de despegue con viento de cara en la pista 11	0,3	55	29	0,17	1,51
2	Segmento de vuelo con viento en contra	1,7	54	85	0,48	4,29
3	Tramo con viento cruzado	1,2	54	78	0,44	3,94
4	Segmento con viento de cola	3,3	50	150	0,78	7,00
5	Segmento básico	1,1	47	76	0,38	3,38
6	Segmento final	1,2	43	89	0,34	3,08
TOTAL		8,8		507	2,60	23,21

Así, la energía bruta necesaria para completar el patrón de tráfico es de 23,21 kWh, el consumo de combustible es de 2,60 L y la duración del vuelo es de 507 s (8 min 27 s). La distancia recorrida es de 8,8 millas náuticas, con una velocidad media de 62,5 nudos.

Tratamiento estadístico de variables calculadas

Esta sección describe el enfoque estadístico empleado para caracterizar las variables de rendimiento obtenidas en Tabla 7. Se realizó la estimación de parámetros poblacionales para las magnitudes relevantes, y la repetibilidad de la medición se evaluó mediante estimadores basados en la muestra; Para ello, se consideraron 20 mediciones para cada una de las trayectorias.

Las magnitudes sujetas a estimación fueron las siguientes:

- Media muestral ($\bar{C}_i$): estimación de la tendencia central de cada variable, derivada de la muestra de vuelos reales. $\bar{C}_i$

$$\bar{C}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_{ij}, n = 20 \quad (2)$$

- Desviación estándar (S_i): dispersión de las observaciones respecto a la media poblacional. S_i

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (C_{ij} - \bar{C}_i)^2} \quad (3)$$

- Error estándar de la media: precisión de la estimación de a partir de la muestra; un error estándar más bajo implica una mayor fiabilidad de la media como predictor. $SE_i = \frac{S_i}{\sqrt{n}}$
- (4)

- Coeficiente de variación (CV_i): medida de la homogeneidad relativa de la variabilidad. $CV_i = \frac{S_i}{\bar{C}_i} \times 100\%$
- (5)

Teniendo en cuenta lo anterior, la estimación se realiza mediante la Tabla 9.

Tabla 9. Tratamiento estadístico

Segmento	Nombre estandarizado del segmento	Consumo de combustible en la etapa (L)	Media muestral	Desviación estándar	Error estándar de la media	Coefficiente de variación
1	Giro de despegue con viento de cara en la pista 11	0,17	0,1700	0,00480	0,00107	2,82%
2	Segmento de vuelo con viento en contra	0,48	0,4800	0,01162	0,00260	2,42%
3	Tramo con viento cruzado	0,44	0,4400	0,01149	0,00257	2,61
4	Segmento con viento de cola	0,78	0,7825	0,01736	0,00388	2,22%
5	Segmento básico	0,38	0,3800	0,00691	0,00154	1,82%
6	Segmento final	0,34	0,3400	0,00920	0,00206	2,71%

Según la teoría de caracterización aeronáutica experimental, valores inferiores al 5% se consideran indicativos de una repetibilidad satisfactoria en las mediciones. En los casos en que supere este umbral, se discutirá la fuente de variabilidad y se propondrán medidas de mejora (calibración de sensores, estandarización de perfiles de vuelo, aumento del tamaño de la muestra). Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados de los 6 segmentos con un criterio de referencia del < 5% proporcionan una base explícita para fortalecer la investigación y sus hallazgos. CV_1, CV_2, CV_3

Determinación de la energía neta necesaria para completar el patrón de tráfico del aeródromo

La aeronave utilizada en este proyecto está equipada con un motor de combustión interna ROTAX® de 100 hp (21) cuyas especificaciones proporcionadas por el fabricante se resumen en Fig. 9:

WEIGHT		kg	lb
Engine with propeller speed reduction gearbox i = 2.43		56.6	124.5
Exhaust system		4.0	8.8
Overload clutch		1.7	3.7
Engine suspension frame		2.0	4.4
External alternator		3.0	6.6
Air guide baffle		0.8	1.8
Airbox		1.3	2.8
PERFORMANCE			
73.5 kW		100 hp	5800 1/min.
TORQUE			
128 Nm		94 ft. lb.	5100 1/min.
MAX RPM*			
		5800 1/min.	
BORE		STROKE	
84.0 mm		3.13 in	61.0 mm
		2.4 in	
DISPLACEMENT		FUEL	
1352 cm³		min. MON 85 RON 95*	
82.6 cu in		min. AKI 91*	

Figura 9. Características del motor de combustión interna Rotax 912 ULS.

Para el motor de combustión interna utilizado en las pruebas de la marca ROTAX®, modelo 912 ULS, con una potencia de 100 hp (74,6 kW) y alimentado con AVGAS 100LL, el fabricante especifica una eficiencia del 30% (25).

Determinación de la energía suministrada por el sistema de baterías para alimentar el motor eléctrico

Para determinar la energía requerida por el motor eléctrico, la unidad seleccionada para el proyecto es un ROTEX REB-90 con una potencia nominal de 80 kW, con una eficiencia específica del fabricante del 93% (22) (26). Tabla 10.

Tabla 10. Energía neta necesaria para tener en cuenta la eficiencia del motor eléctrico

La energía neta requiere kWh	Eficiencia de los motores eléctricos (%)	Energía total requerida por el motor eléctrico kWh
7,71	93	8,29

Como se muestra en Tabla 8, la energía eléctrica que debe suministrar el paquete de baterías para completar el patrón de tráfico es de 8,29 kWh, lo que permite una duración de vuelo de 8 min 27 s (27).

Análisis de costes para la viabilidad económica

Esta sección presenta un análisis de viabilidad económica para convertir un avión MXP-150 LSA, actualmente equipado con un motor de combustión interna ROTAX® 912 ULS de 100 hp (21), a un sistema de propulsión eléctrica alimentado por batería (28). Para esta comparación, la energía total requerida para el patrón de tráfico se reporta en Tabla 7 y se consideraron el contenido energético por litro de AVGAS 100LL (29). Estos datos se utilizaron como base para estimar el coste del combustible asociado a completar el patrón de tráfico, como se muestra en Tabla 9. Se utilizó el tipo de cambio de pesos colombianos (COP) a dólares estadounidenses (USD) a fecha 29 de marzo de 2026, junto con el coste por litro de AVGAS 100LL en Colombia (30). Tabla 11.

Tabla 11. Coste total de combustible para el patrón de tráfico

Energía suministrada por kWh de gasolina	Energía por litro de gasolina AVGAS 100LL (kWh/L)	Volumen de	Coste por litro de gasolina AVGAS 100LL (COP \$)	Tipo de cambio de USD (\$) a (COP \$)	Coste por litro de gasolina AVGAS 100LL (USD \$)	Coste total de la gasolina para el patrón de tráfico (USD \$)
23,22	8,90	2,61	6.869,22	3.672,17	1,87	4,87

Para la segunda parte, el análisis se basó en la energía eléctrica requerida por el motor seleccionado ROTEX REB-90, 80 kW, y el coste por kWh en Bogotá, Colombia, utilizando la tarifa para el estrato residencial 3 de marzo de 2026. Estas entradas se utilizaron para estimar el coste total de electricidad para el vuelo eléctrico propuesto, como se muestra en Tabla 12.

Tabla 12. Coste total de energía eléctrica para el vuelo propuesto

Energía eléctrica requerida (kWh)	Coste por kWh (COP\$)	Coste total de energía eléctrica (COP \$)	Coste total de energía eléctrica (USD \$)
7,49	834,12	6.245,14	1,7

Los resultados anteriores indican que, desde la perspectiva del análisis de costes, el coste total asociado al uso de gasolina para el circuito de vuelo con un motor de combustión interna es sustancialmente mayor que el coste total de la energía eléctrica necesaria para operar el sistema eléctrico propuesto alimentado por baterías. Específicamente, cuando se proyectan horas de vuelo equivalentes y se contabilizan los costes de combustible, la gasolina representa una fracción significativamente mayor del coste operativo total que la electricidad consumida durante las horas de operación previstas.

Los resultados muestran una ventaja sustancial para la opción eléctrica. Según el escenario operativo propuesto, el coste total asociado al uso de gasolina para el patrón de tráfico asciende a 4,87 USD, mientras que el coste total de la energía eléctrica requerida para el mismo ciclo de funcionamiento cuando se utiliza el motor eléctrico es de 1,7 USD. Esta disparidad corresponde a una reducción aproximada de costes del 65% al pasar a la propulsión eléctrica. Si se mantienen durante el horizonte operativo proyectado, estos ahorros indican un impacto favorable en la viabilidad económica del proyecto.

Estimación de emisiones CO_2

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha desempeñado un papel fundamental desde su creación en 1.988, proporcionando evaluaciones científicas de las causas, impactos y posibles estrategias de mitigación relacionadas con el cambio climático (31). A nivel internacional, iniciativas como el Acuerdo de París establecen compromisos para limitar el aumento de la temperatura global mediante la reducción de emisiones de GEI, promoviendo la transición hacia tecnologías energéticas más limpias y sostenibles, incluida la electrificación del transporte aéreo (32).

Dentro de este marco, las emisiones de CO_2 en el presente estudio se estimaron siguiendo las directrices metodológicas propuestas por el IPCC (2006), que establecen que las emisiones de la combustión de combustibles fósiles pueden calcularse en función del consumo de combustible y de un factor de emisión específico (33), como se muestra en la Ecuación (2):

$$Emissions\ CO_2 = Fuel\ Consumption * Emission\ Factor \quad (2)$$

Para la gasolina de aviación (AVGAS 100LL), el IPCC especifica un factor de emisión de 69,3 kg CO_2 /GJ, basado en un contenido medio de carbono de 18,9 kg C/GJ y su correspondiente conversión a dióxido de carbono. Para expresar este factor en términos volumétricos, se utilizó el valor calorífico del combustible, que, según la Sección 4.4 de este documento, es de 8,9 kWh/L. Realizando la conversión de energía: Tabla 13.

$$Emissions\ CO_2 = 69,3\ KG\ \frac{CO_2}{GJ} * 0.03204\ \frac{GJ}{L}$$

$$Emissions\ CO_2 = 2,22\ Kg\ \frac{CO_2}{L}$$

Tabla 13 Emisiones^{CO₂}

Volumen de combustible requerido (L)	Duración del patrón de tráfico	Número de patrones de tráfico por hora	Consumo de combustible (L/h)	Factor de emisión ($Kg \frac{CO_2}{L}$)	Emisiones ($kg \frac{CO_2}{hora}$)
2,61	507	7,1	18,52	2,22	41,11

En consecuencia, durante una hora de operación, la aeronave genera aproximadamente 41,11 kg de CO₂. Por lo tanto, sustituir el motor de combustión interna por un sistema de propulsión eléctrica evita directamente esta cantidad de emisiones durante la operación, lo que representa un beneficio ambiental significativo alineado con las estrategias globales del sector aeronáutico.

Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la conversión de una aeronave tipo LSA, originalmente equipada con un motor de combustión interna, a un sistema de propulsión eléctrica alimentada por batería es técnicamente factible para el perfil operativo evaluado. Los datos experimentales recogidos durante las pruebas de vuelo permitieron determinar el consumo real de combustible de la aeronave bajo condiciones de operación representativas.

Desde una perspectiva tecnológica, los resultados son coherentes con los reportados por (5), (7) y (16), quienes identifican la propulsión eléctrica como una de las alternativas más prometedoras para reducir el impacto ambiental de la aviación. Desde un punto de vista económico, sustituir el combustible AVGAS 100LL por energía eléctrica supone una reducción significativa de los costes operativos. El coste estimado de completar el patrón de tráfico utilizando energía eléctrica fue de aproximadamente 1,70 USD, mientras que el coste asociado al combustible convencional alcanzó los 4,87 USD. Esta diferencia representa una reducción de coste de aproximadamente el 65%.

En términos medioambientales, la investigación confirma los beneficios asociados a la electrificación de la aviación ligera. Sustituir el sistema de propulsión convencional por una planta motriz eléctrica elimina las emisiones directas en vuelo, contribuyendo así a los objetivos globales de descarbonización del sector aeronáutico. Finalmente, este estudio proporciona información cuantitativa que puede servir de referencia para futuras iniciativas de electrificación de aeronaves ligeras en Colombia, así como para el desarrollo de directrices técnicas y regulatorias que faciliten la integración de estas tecnologías en el sector aeronáutico nacional.

Conclusiones

El análisis energético realizado en el avión MXP-150 estableció que la ruta de vuelo propuesta requiere una demanda energética de aproximadamente 8,29 kWh, un valor que puede cubrirse con un sistema de propulsión eléctrica alimentado por batería. El diseño de dicho sistema se propone como trabajo futuro dentro del “Prototipo de Aeronave Eléctrica Tripulada Fase I”, actualmente

en desarrollo por el grupo de investigación GESETIC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Una comparación de la eficiencia térmica del motor de combustión interna con la del motor eléctrico demostró una mejora del orden del 60%, confirmando que la conversión es técnicamente factible para una Aeronave Ligera Deportiva (LSA) dentro del perfil operativo evaluado.

Desde un punto de vista económico, la conversión propuesta supone una reducción del 67% en el coste operativo por hora de vuelo, atribuible al menor número de componentes mecánicos y a la simplificación de los sistemas auxiliares. Estos resultados confirman una reducción general en los costes operativos, lo que apoya la viabilidad económica del proyecto.

Desde una perspectiva medioambiental, la electrificación de la aeronave elimina el consumo directo de combustible AVGAS 100LL durante el vuelo, logrando una reducción del 100% en las emisiones directas del sistema de propulsión y evitando la liberación de aproximadamente 41,11 kg de CO₂ por hora de funcionamiento. Además, la eliminación del uso de combustibles con plomo resulta en una reducción del 100% de las emisiones directas de este contaminante.

Finalmente, una revisión del marco regulatorio colombiano respalda la conclusión de que el proyecto es viable tanto legal como operativamente, dado que las normativas aerociviles aplicables a aeronaves LSA y las directrices establecidas en el RAC 21 contemplan el desarrollo, evaluación y certificación de modificaciones de este tipo bajo condiciones controladas de seguridad y aeronavegabilidad. Por ello, se concluye que el proyecto es viable técnica, económica y medioambientalmente, y representa una alternativa innovadora y relevante para avanzar en la transición energética de la aviación ligera en Colombia.

Este estudio establece una base sólida para la viabilidad técnica, económica y medioambiental de reemplazar un motor de gasolina por un motor eléctrico en una aeronave tipo LSA. Como continuación natural, se propone avanzar en el proyecto "Prototipo de Aeronave Eléctrica Tripulada Fase I", liderado por el grupo de investigación GESETIC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Los trabajos futuros se centrarán en la implementación experimental y la validación del rendimiento, con énfasis en la adquisición de componentes clave y la verificación bajo condiciones reales de funcionamiento.

Lista de abreviaturas

LSA Aeronaves ligeras deportivas

AVGAS Aviation gasolina

Grupo de Investigación GESETIC sobre Gestión de Sistemas Energéticos Basados en Tecnologías de la Información y la Comunicación

Combustible sostenible para aviación de SAF

Unidad Administrativa Especial Aerocivil de Aeronáutica Civil

OACI Organización de Aviación Civil Internacional

AGL Sobre el nivel del suelo

AMSL sobre el nivel medio del mar

Unidad Administrativa Especial Colombiana de Aeronáutica Civil de los EAU

Publicación de Información Aeronáutica del AIPC

Consumo de combustible CCT para la etapa expresado en litros

Consumo de combustible CCFT para la etapa según el fabricante

Duración del consumo de combustible en la etapa TSG

CCAD Club Colombiano de Aviación Deportiva

Concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero en gases de efecto invernadero en GEI

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático del IPCC

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Álvaro Espinel Ortega. **Curación de datos:** Nicolás Enrique Herrera Aguilar, Adriana Marcela Vega Escobar. **Análisis formal:** Álvaro Espinel Ortega, Nicolás Enrique Herrera Aguilar. **Investigación:** Álvaro Espinel Ortega, Nicolás Enrique Herrera Aguilar. **Metodología:** Álvaro Espinel Ortega, Nicolás Enrique Herrera Aguilar, Adriana Marcela Vega Escobar. **Dirección de Proyecto:** Nicolás Enrique Herrera Aguilar. **Recursos:** Álvaro Espinel Ortega. **Supervisión:** Álvaro Espinel Ortega, Adriana Marcela Vega Escobar. **Validación:** Álvaro Espinel Ortega, Adriana Marcela Vega Escobar. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Nicolás Enrique Herrera Aguilar, Adriana Marcela Vega Escobar. **Redacción - revisión y edición -Elaboración:** Álvaro Espinel Ortega, Nicolás Enrique Herrera Aguilar, Adriana Marcela Vega Escobar.

Financiación: no declara.

Conflicto de intereses: no declara. Aspectos éticos: no declara.

Referencias

1. Turiel A. Sin energía. Madrid: Editorial Alfabeto; 2022. ISBN: 978-84-17951-32-0.

<https://doi.org/10.3989/arbor.2023.807013>

2. Matteo CA. Sustentabilidad energética: un panorama en la industria petrolera global. Loginn Investig Cient Tecnol. 2022;6(1). <https://doi.org/10.23850/25907441.4741>

3.Bravo A, Vieira D, Ferrer G. Emissions of future conventional aircrafts adopting evolutionary technologies. J Clean Prod. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131246>

4. Torroba A. Descarbonizando los cielos: biocombustibles sostenibles de aviación. San José (Costa Rica): Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); 2023. ISBN: 978-92-9273-032-1. <https://hdl.handle.net/11324/21441>

5. Afonso F, Ferreira A, Ribeiro I, Lau F, Suleman A. On the design of environmentally sustainable aircraft for urban air mobility. *Transp Res Part D Transp Environ*. 2021;91:102688.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102688>
6. Zhao J, Xi X, Na Q, Wang S, Kadry SN, Kumar PM. The technological innovation of hybrid and plug-in electric vehicles for environment carbon pollution control. *Environ Impact Assess Rev*. 2021;86:106506. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106506>
7. Pattanayak T, Mavris D. Battery technology for sustainable aviation: a review of current trends and future prospects. *Appl Energy*. 2025;397:126356.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126356>
8. Institución Universitaria Pascual Bravo. ¡Primer avión eléctrico del país! [Internet]. Medellín: Institución Universitaria Pascual Bravo; 2021 Jul 21.
<https://pascualbravo.edu.co/primer-avion-electrico-colombia/>
9. Menéndez T. Evaluación de la sostenibilidad energética de la generación de combustible de aviación por electrorreducción de dióxido de carbono con Fischer-Tropsch [Internet]. Barcelona: Universitat de Barcelona, Facultat de Física; 2023.
<https://diposit.ub.edu/items/0e8735c6-b762-4668-b8cd-0872e0ad902b>
10. Diaz Tapia IV. Challenges of SAF production under the requirements of the ReFuelEU aviation initiative [Internet]. Hasselt (Belgium): Hasselt University; 2024.
<https://documentserver.uhasselt.be//handle/1942/43980>
11. Rendón MA, Sánchez R CD, Gallo M J, Anzai AH. Aircraft hybrid-electric propulsion: development trends, challenges and opportunities. *J Control Autom Electr Syst*. 2021;32(5):1244-1268.
<https://doi.org/10.1007/s40313-021-00740-x>
12. Martínez Salgado JA. Propuesta de ajuste a la estructura orgánica de la aeronáutica civil, para la integración segura de los drones al espacio aéreo en Colombia [Internet]. Bogotá (Colombia): Fundación Universitaria Los Libertadores; 2023.
<https://repository.libertadores.edu.co/items/29ffd8e1-4279-42f1-b8ce-197c80ebf379>
13. Rios-Chaparro C, Quintero-Arboleda B, Ortega I, Jaramillo-Suárez H, Zambrano G. Diseño, construcción y validación de componentes estructurales de una aeronave liviana categoría VLA para su uso en aspersión aérea. *Informador Téc*. 2022;86(2):171-193.

<https://doi.org/10.23850/22565035.3943>

14. Federal Aviation Administration (FAA). Light-Sport Category Aircraft [Internet]. Washington (DC): FAA; [cited 2026 Jul 20]. https://www.faa.gov/aircraft/gen_av/light_sport
15. European Union Aviation Safety Agency (EASA). CS-LSA Light Sport Aeroplanes [Internet]. Cologne (Germany): EASA; 2013 [cited 2026 Jul 20]. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-lsa-light-sport-aeroplanes>
16. Barrera TP, Bond JR, Bradley MK, Gitzendanner R, Darcy E, Armstrong J, et al. Next-Generation Aviation Li-Ion Battery Technologies—Enabling Electrified Aircraft. *Electrochem Soc Interface*. <https://doi.org/10.1149/2.F10223IF>
17. Lu K, Li A, Li L, Wang T, Wang J. Research on airworthiness test technology of radiation emission in civil aircraft flight control electronic system. *J Northw Polytech Univ*. 2022;40(2):337-343. <https://doi.org/10.1051/jnwpu/20224020337>
18. Çelik D, Khan MA, Khosravi N, Waseem M, Ahmed H. A review of energy storage systems for facilitating large-scale EV charger integration in electric power grid. *J Energy Storage*. 2025;112:115496. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115496>
19. Dalkıran A, Orhan Ö. Electric Aircraft's Technological and Regulatory Readiness at Airports. In: Karakoc TH, Yazar I, Dalkıran A, editors. *Electric-Oriented Aviation*. Cham (Switzerland): Springer Nature Switzerland; 2026. p. 165-191. https://doi.org/10.1007/978-3-032-15097-4_6
20. Detsios N, Theodoraki S, Maragoudaki L, Atsonios K, Grammelis P, Orfanoudakis NG. Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: a critical review. *Energies*. 2023;16(4):1904. <https://doi.org/10.3390/en16041904>
21. BRP-Rotax GmbH & Co KG. Operators manual for ROTAX engine type 912 series. 4th ed. Günskirchen (Austria): BRP-Rotax GmbH & Co KG; 2020. <https://www.flyrotax.com/products/912-uls-s>
22. MGM COMPRO. REB 90 electric motor [Internet]. Zlín (Czech Republic): MGM COMPRO; [cited 2026 Jul 20]. <https://mgm-compro.com/electric-motor/reb-90-80-kw/>
23. FloScan Inc. Series 200 Flow Sensor Specifications [Internet]. Seattle (WA): FloScan Inc.; [cited 2026 Jul 20]. https://www.peter2000.co.uk/aviation/shadin/floscan_manual_nov07.pdf

24. MGL Avionics. MGL Avionics produce electronic flight instruments for the Experimental and Sport aircraft markets [Internet]. Torrance (CA): MGL Avionics USA; [cited 2026 Jul 20]. <https://www.mglavionics.co.za/Infinitec/Manuals/FF1.pdf>
25. Morawska F, Kurzawska-Pietrowicz P, Jasiński R, Ziółkowski A. Alternative fuels for general aviation piston engines: a comprehensive review. *Energies*. 2025;18(19):5299. <https://doi.org/10.3390/en18195299>
26. Joshi PS, Kartik V. All-electric propulsion for medium/high altitude long endurance unmanned aerial vehicles: a feasibility study. In: AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024; 2024 Jul 29-Aug 2; Las Vegas, NV, USA. Reston (VA): American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA); 2024. Paper No.: AIAA 2024-3959. <https://doi.org/10.2514/6.2024-3959>
27. Buvarp D, Leijon J. Comparison of energy use, efficiency and carbon emissions of an electric aircraft and an internal combustion engine aircraft. In: AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024; 2024 Jul 29-Aug 2; Las Vegas, NV, USA. Reston (VA): American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA); 2024. Paper No.: AIAA 2024-4183. <https://doi.org/10.2514/6.2024-4183>
28. Avogadro N, Redondi R. Demystifying electric aircraft's role in aviation decarbonization: are first-generation electric aircraft cost-effective? *Transp Res Part D Transp Environ*. 2024;130:104191. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104191>
29. Goodge K, Withey P. An analysis of direct operating costs for the Wright Spirit electric aircraft. *Aerospace*. 2024;11(12):1007. <https://doi.org/10.3390/aerospace11121007>
30. Kong HM. Market viability of electric aircraft: overcoming challenges and unlocking potential. *Res Arch Rising Sch*. 2025. <https://doi.org/10.58445/rars.2359>
- 31 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol. 1, Orientación general y generación de informes. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES) para el IPCC; 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> <https://opsaa.iica.int/es/frame-5020>
32. Chen Cheng C, Pérez P, Chen Cheng A. Energía limpia y su importancia en el siglo XXI: una perspectiva desde los mandatos de la OEA. *REICIT*. 2025;4(2):150-168. <https://doi.org/10.48204/reict.v4n2.6758>



33. Camargo Caicedo Y, Mantilla-Romo LC, Vargas Sánchez JJ, Tovar Bernal F, Vélez-Pereira AM.
Aeronautical emissions in Colombia: an assessment of past and future budgets. Clean Eng Technol.
2025;28:101051. doi:10.1016/j.clet.2025.101051. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101051>