



Análisis tecnológico de la aviación para la transición energética

Technological Analysis of Aviation for Energy Transition

Omar Ramirez-Gonzalez ¹, Manuel Alejandro Fula-Rojas ²

¹Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: omramirezg@unal.edu.co

²Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Colombia. correo electrónico: mafula@unal.edu.co

Recibido: 24/08/2023. Aceptado: 24/08/2023. Versión final: 14/09/2023

Resumen

La transición energética global requiere un análisis del consumo de combustible líquido y eficiencias que permiten verificar ciertos usos que se dan o proponer mejores alternativas. Este estudio se enfoca en algunos aviones utilizados en Colombia, evaluando el consumo y las emisiones de CO₂ por persona en los trayectos Bogotá-Medellín y Bogotá-San Andrés. Para obtener una conclusión en cuanto a eficiencia se tiene en cuenta el parámetro de eficiencia dado por (pax-km) /L, donde lo ideal es maximizar este parámetro. Con el propósito de lograr una comprensión más completa de los dos tipos de motores analizados (turbofán y turboprop), se brinda una exposición detallada de su estructura y funcionamiento interno, respaldada por la revisión de la literatura. Además, se complementa el análisis con figuras y tablas comparativas que ilustran el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ por pasajero en aeronaves equipadas con estos motores, específicamente en los modelos ATR72, A320 y A321. Estos aviones, que incorporan dichos tipos de motores, se someten a una evaluación que incluye el cálculo de su eficiencia (pax-km) /L. Se realizaron entrevistas a expertos relacionados con el tema de la aeronáutica para enriquecer el análisis. Los resultados explican por qué los vuelos regionales se benefician del uso de turbopropulsores, mientras que en trayectos más largos se prefieren los motores turbofan. Este análisis es relevante para la toma de decisiones en la industria aeronáutica de Colombia y para la lucha contra el cambio climático global.

Palabras clave: Turbofán; Turboprop; Turbojet; Eficiencia energética, Jet A1, CO₂, Pax, A320, A319, ATR72.

Abstract

The global energy transition requires an analysis of liquid fuel consumption and efficiencies to verify certain uses that occur or propose better alternatives. This study focuses on some aircraft used in Colombia, evaluating fuel consumption and CO₂ emissions per person on the Bogotá-Medellín and Bogotá-San Andrés routes. To draw a conclusion regarding efficiency, the efficiency parameter given by (pax-km)/L is considered, where the ideal goal is to maximize this parameter.

In order to achieve a more comprehensive understanding of the two types of engines analyzed (turbofan and turboprop), a detailed exposition of their structure and internal operation is provided, supported by a literature review. Additionally, the analysis is complemented by comparative figures and tables illustrating fuel consumption and CO₂ emissions per passenger on aircraft equipped with these engines, specifically on the ATR72, A320, and A321 models. These aircraft, incorporating these engine types, undergo an evaluation that includes the calculation of their efficiency (pax-km)/L. Interviews were conducted with experts in the field of aviation to enrich the analysis. The results explain why regional

flights benefit from the use of turboprop engines, while longer routes prefer turbofan engines. This analysis is relevant for decision-making in Colombia's aviation industry and in the fight against global climate change.

Keywords: Turbofan; Turboprop; Turbojet; Energy efficiency, Jet A1, CO2, Pax, A320, A319, ATR72.

1. Introducción

En el año 2022, Colombia registró un consumo diario promedio de 302,000 barriles de combustible líquido, distribuidos de la siguiente manera: 142,000 barriles de gasolina, 135,000 barriles de diésel y 25,000 barriles de combustible Jet [1]. Con el Acuerdo de París, los países se comprometen a establecer Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) que describen sus esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y adaptarse al cambio climático [10]. Ante esta situación, surge la necesidad de enfocar el estudio en la eficiencia del combustible en la aviación civil colombiana por medio del parámetro (pax-km) /L. El objetivo de este artículo es abordar las siguientes preguntas: ¿Por qué se utilizan ampliamente los motores turboprop en trayectos regionales en Colombia, a pesar de que los motores turbofan son considerados más eficientes? ¿Es apropiada la distribución de aviones turboprop en trayectos regionales y aviones turbofan en trayectos de mayor distancia?

En este trabajo, se abordará de manera general la termodinámica relacionada con los motores a reacción y se analizará el perfil alar de las aeronaves mencionadas para comprender y visualizar los motores en cuestión, con el apoyo de [7], [8]. Se utilizarán las aeronaves ATR72 la cual cuenta con un motor turboprop, A320 y A321 que cuentan con motores turbofan, que según [5] son de las más eficientes. Esas aeronaves se utilizan para analizar los trayectos Bogotá-Medellín y Bogotá-San Andrés. El cálculo de los consumos de combustible se basó en [3] y [9]. Para obtener opiniones de expertos en el tema, se consultaron a los especialistas mencionados en [12], [13], [14], [15].

En la actualidad, el transporte se ha convertido en una prioridad y necesidad para las personas, y se espera que sea amigable con el medio ambiente y más eficiente, sin importar el medio utilizado.

2. Planteamiento del problema

El constante aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero plantea una urgente necesidad de realizar un análisis que aborde diversos aspectos con el objetivo de reducir las emisiones de CO2. En este estudio, se enfoca

en la industria de la aviación en Colombia, donde el desafío fundamental es determinar si la asignación actual de rutas para aeronaves es la más eficiente en términos de consumo de combustible por tipo de avión, ya sea turbofan o turboprop, lo cual puede cuantificarse mediante el parámetro (pax-km)/L.

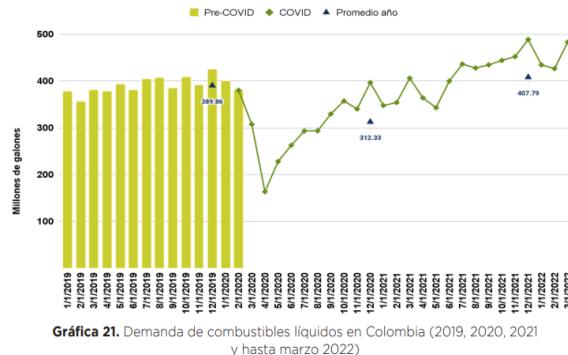
En caso de confirmarse la eficiencia de esta asignación, es esencial presentar las razones que respalden este rendimiento óptimo. Sin embargo, si se llega a la conclusión de que la distribución actual no es eficiente, se hace imperativo proponer una solución alternativa que sea eficaz. El propósito central de este estudio es contribuir al desarrollo de estrategias que promuevan la sostenibilidad y reduzcan el impacto ambiental de la aviación en Colombia.

3. Objetivo

Se propone la construcción de una tabla comparativa para analizar el consumo de combustible y la generación de CO2 por persona en cada tipo de aeronave junto al parámetro de eficiencia (pax-km) /L. Estos datos serán utilizados para evaluar y obtener conclusiones sobre la distribución actual de las aeronaves en Colombia que cuentan con turboprop y turbofan.

4. Estado del arte

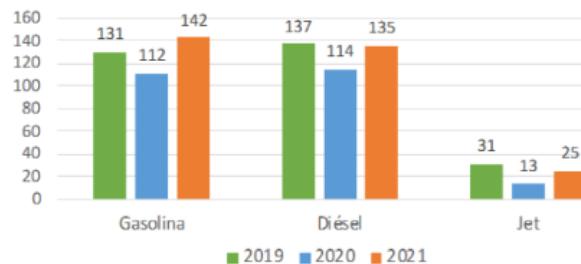
Colombia presentó un alza entre 2020 y 2021 en el consumo del combustible siendo el combustible Jet el que registró un mayor crecimiento (alrededor del 90%), la demanda pasó de 237 Mgat en 2020 a 451 Mgat en 2021. Según la UPME (Unidad de Planeación Minero - Energetica) se tiene la siguiente distribución del consumo de combustible en Colombia [1].



Fuente: UPME, Base en datos de SICOM (corte marzo 2022), Base de Junio de 2022

Figura 1. Demanda de combustible líquido. Fuente: [1]

En la figura 1 y 2 se observa que el gasto de combustible Jet disminuye considerablemente en el año 2020 y en 2021 presenta cierto crecimiento pero que no supera el consumo del 2019, este declive presenta su explicación por la época del COVID-19 cuando los gobiernos prohibieron la mayoría de los vuelos comerciales, por tanto, se esperaba una disminución radical en el consumo de combustible. Entre 2021 y 2022 con la reactivación de los aeropuertos se espera que el siguiente informe de la UPME presente un alza relativamente grande en ese consumo.



Fuente: ASGA, Minenergía, cálculos ACP.

Figura 2. Clasificación consumo de combustible. Fuente: [2]

La figura 3 presenta la distribución del consumo de combustible en Colombia en la transición 2020 y 2021, en 2021 se presenta un salto porcentual muy grande del consumo debido a la reactivación de aeropuertos. Se espera que en la comparación 2021 y 2022 ese incremento sea aún mayor.



Región	Consumo total (M cientos de galones)	Crecimiento del consumo anual (%)
Caribe	28	+59,62% 112,43%
Andina	19	-55,51% 87,32%
Pacífica	12	-54,87% 148,10%
Insular	2	-62,39% 100,46%
Amazonia	3	21,06% -14,13%
Orinoquia	2	-3,75% -2,75%

Fuente: UPME, Base en datos de SICOM (corte diciembre 2021), Base de junio de 2022

Figura 3. Crecimiento en el consumo de combustible Jet. Fuente:[1]

Para realizar la discusión en cuanto a favoritismo de cierto tipo de motores a reacción en determinadas zonas, eficiencia y costo de estos es importante entender cómo funciona un motor a reacción y que leyes lo gobiernan.

De manera muy resumida el funcionamiento de un avión se le atribuye a la segunda y tercera ley de Newton. La segunda ley dice que si existe un cambio en la cantidad de movimiento de un cuerpo es porque este está experimentando una fuerza.

De manera escalar:

$$p = m * v \quad (1)$$

La tercera ley es la de acción reacción.

A continuación, en la figura 4 se presenta un esquema de un motor a reacción en general con sus componentes básicos, se realiza un breve análisis de este para tener conocimiento de su funcionamiento.

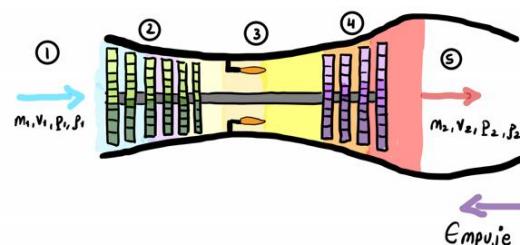


Figura 4. Generalización motor a reacción. Fuente: Adaptado de [4]

Se considera el motor como un volumen de control por tanto la masa que entra en (1) es la misma que sale por (5), para que exista un cambio en la cantidad de movimiento debe existir un cambio de velocidad entre (1) y (5). Cuando entra el aire por (1), el compresor (2) eleva la presión del fluido y la cámara de combustión (3) le brinda energía en forma de calor, en la turbina (4) se genera el cambio de velocidad del fluido, debido a que en esta existe un intercambio de energía que estaba en forma de presión y temperatura la cual se transforma en energía

cinética. Como el fluido experimenta un cambio de velocidad, por segunda ley de Newton se sabe que está experimentando una fuerza, la cual la realiza el motor sobre el fluido, cuando este sale por (5) por tercera ley de Newton el aire debe hacer una fuerza de igual magnitud y sentido contrario a la que le ejerce el motor, a esta fuerza se le llama **empuje** y es la que permite que el avión se desplace.

Para entrar en la termodinámica interna de los motores a reacción es importante hablar del ciclo termodinámico que los gobierna.

4.1. El ciclo Brayton

Los motores de reacción de los aviones funcionan con el ciclo Brayton real pero los modelos matemáticos se realizan con el ideal. A continuación, se presenta cada uno de ellos con sus respectivas consideraciones.

4.2. Ciclo Brayton real

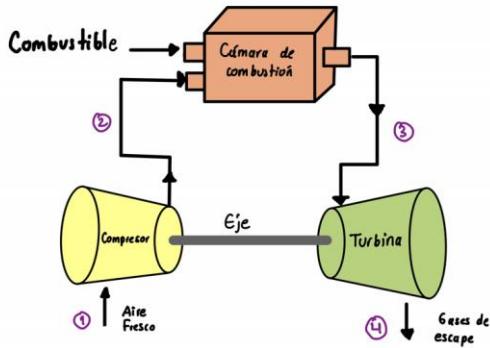


Figura 5. Ciclo Brayton real
Fuente: Adaptado de [8]

En este ciclo se utilizan dispositivos de volúmenes de control.

-En el tramo (1)-(2) se encuentra el compresor y la función principal de este es succionar el aire, elevar su presión y temperatura. En (2) el gas posee mucha energía en forma de presión.

-En el tramo de (2)-(3) se encuentra la cámara de combustión en la cual se inyecta combustible que reacciona con el aire que viene de (2) a elevada presión. En (3) el gas posee mucha presión y temperatura.

-En el tramo (3)-(4) se encuentra la turbina la cual cuenta con alabes que tienen un diseño aerodinámico especial que permite extraer la energía en forma de presión y temperatura que trae el aire en (3), dicha energía se convierte en energía cinética y cual se extrae como trabajo de flecha.

Como establece la segunda ley de la termodinámica es imposible transformar toda la energía en forma de calor en trabajo, la energía residual sale por (4)

4.3. Ciclo Brayton cerrado (idealizado)

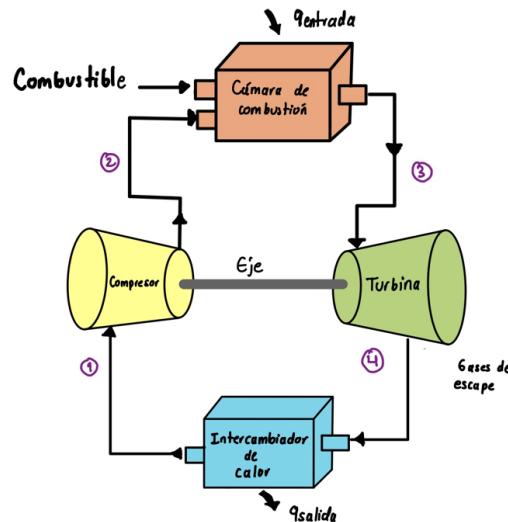


Figura 6. Ciclo Brayton ideal
Fuente: Adaptado de [8]

Se usa en los modelos matemáticos.

Para un buen análisis se hacen suposiciones como:

- Aire estándar
- El fluido de trabajo circula de manera continua en el ciclo.

- Todos los procesos son internamente reversibles
- El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor de una fuente externa.
- El proceso de escape es sustituido por un proceso de rechazo de calor.

Ver figuras 7 y 8:

1-2 Compresión isentrópica

2-3 Adición de calor a presión constante

3-4 Expansión isentrópica

4-1 Rechazo de calor a presión constante

Los procesos 1-2 y 3-4 son isentrópicos lo que quiere decir que la entropía permanece constante y es gracias a que los dispositivos se modelan reversibles y aislados térmicamente. Los únicos dispositivos que cambian la entropía son los intercambiadores de calor porque en ellos si existe transferencia de calor.

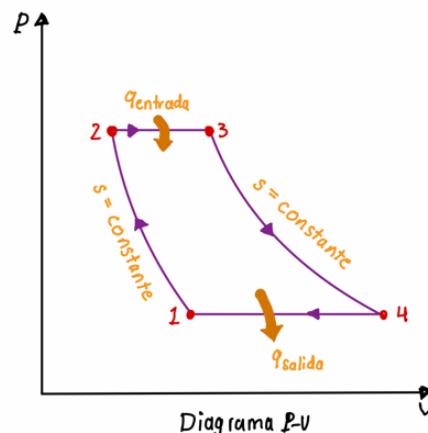
En 3 se da la temperatura máxima del ciclo, cuando se diseñan estos dispositivos la selección del material es crítica en ese punto, esa selección del material también limita la relación de presión que puede usarse.

4.4. Balance de energía

Para estos análisis se ignoran los cambios de energía potencial y cinética del sistema en cuestión. Las siguientes ecuaciones salen de [6] y [8].

$$(q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}}) + (w_{\text{entra}} - w_{\text{sale}}) = h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}$$

$$\begin{aligned} q_{\text{entra}} &= h_3 - h_2 = C_p * (T_3 - T_2) \\ q_{\text{salida}} &= h_4 - h_1 = C_p * (T_4 - T_1) \end{aligned} \quad (2)$$



4.5. Eficiencia térmica del ciclo

$$\begin{aligned} \eta_{\text{termica Brayton}} &= \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{entra}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entra}}} \\ &= 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

4.6. Diagramas más representativos del ciclo

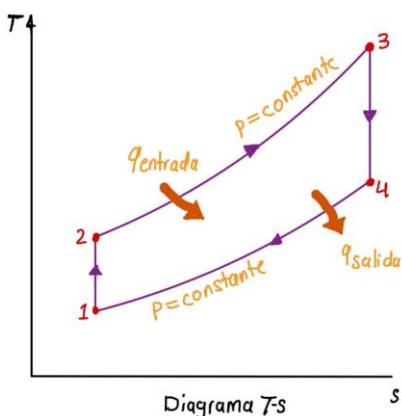


Figura 7. Diagrama T-s
Fuente: Adaptado de [8]

En la figura 7, 'T' representa la temperatura, expresada en cualquiera de las unidades de medida correspondientes, como grados Celsius (°C). Por otro lado, 's' representa la entropía específica, cuyas unidades también pueden expresarse en diversas medidas, como julios por kilogramo (J/kg).

En la figura 8, 'P' representa la presión y se expresa en diversas unidades de medida, como kilopascales (kPa). Por su parte, 'v' representa el volumen específico, que también puede expresarse en varias unidades, como metros cúbicos por kilogramo (m^3/kg).

4.7. Turbofán

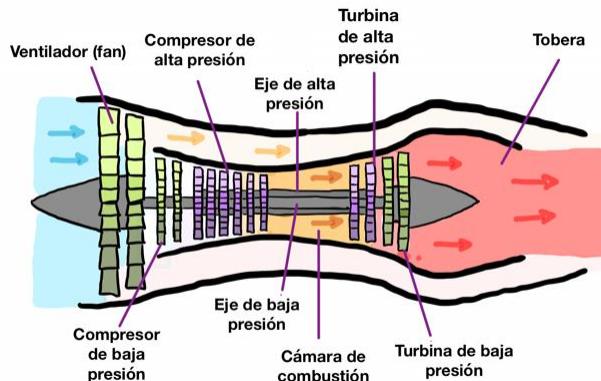


Figura 9. Turbofán
Fuente: Adaptado de [4]

La parte estructural del motor se caracteriza por la presencia de un ventilador (fan) en la parte delantera, como se muestra en la figura 9. Después de pasar por el ventilador, el aire se divide en dos corrientes: una que ingresa a la cámara de combustión y otra que pasa a través de la Nacelle. El aire que circula por esta última se utiliza tanto para la propulsión como para el enfriamiento estructural. La relación entre la cantidad de aire que ingresa a la cámara de combustión y la que circula por fuera de ella se conoce como relación de derivación (BYPASS RATIO). Un BYPASS RATIO de 7 significa que por cada kilogramo de aire que ingresa a la cámara

de combustión, siete kilogramos circulan alrededor de ella.

El ventilador está solidario con el eje de la turbina, lo que implica que cuanto más gire la turbina, mayor será la velocidad de giro del ventilador. Este tipo de motor es altamente eficiente para velocidades y altitudes elevadas, ya que están diseñados para realizar trayectos de más de 2000 km.

4.8. Turboprop

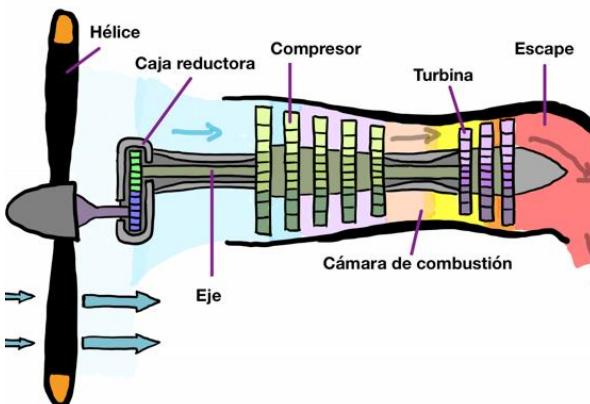


Figura 10. Turboprop
Fuente: Adaptado de [4]

Tiene una hélice, como se muestra en la figura 10, y también cuenta con un sistema de propulsión de gases que se utiliza principalmente para su propio funcionamiento. En comparación con los gases de escape, la hélice contribuye en mayor medida a la propulsión del avión, a diferencia de lo que ocurre con un turbofán. La hélice está conectada a un reductor con una relación de 20-1, que a su vez está vinculado a un eje solidario con la turbina. Por lo tanto, el movimiento de la hélice depende de la rotación de la turbina.

En comparación con los turbofán, las aeronaves con hélice son aproximadamente un 30% más eficientes, pero esta eficiencia solo se manifiesta a bajas velocidades y altitudes. La pérdida de eficiencia a medida que aumenta la velocidad se debe principalmente a la resistencia generada por las hélices. A medida que la velocidad aumenta, la eficiencia propulsiva disminuye debido a la mayor resistencia generada. Este tipo de aviones también presenta un problema estructural cuando se viaja a velocidades más altas, ya que las puntas de las hélices pueden alcanzar velocidades supersónicas, lo que puede causar daños estructurales. Por tanto, las aeronaves con hélice se utilizan principalmente para velocidades más bajas, priorizando tanto la eficiencia como la protección estructural.

Cuando una hélice alcanza velocidades supersónicas, pierde eficiencia debido a la falta de adherencia del aire a las palas, lo que resulta en una falta de generación de la diferencia de presión necesaria para generar empuje.

4.9. Perfil aerodinámico

En la figura 11 se presenta un perfil aerodinámico que puede tener determinado ángulo de ataque con el cual un avión alcanza sustentación. La razón de la sustentación es debido a que el fluido cuando pasa por el perfil se genera una diferencia de presiones, $P_2 > P_1$ por tanto se genera una fuerza hacia la zona de presión más baja, esta diferencia de presión es generada por la deflexión del aire.

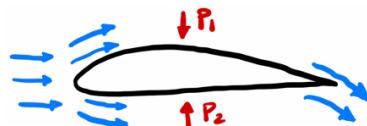


Figura 11. Perfil aerodinámico
Fuente: Adaptado de [7]

La figura 12 presenta una vista aumentada de algunos alabes del rotor de turbina en un motor a reacción. Es posible observar que estos presentan la forma de perfil aerodinámico, dependiendo la configuración que esté presente se sabe la dirección en la que gira el rotor.

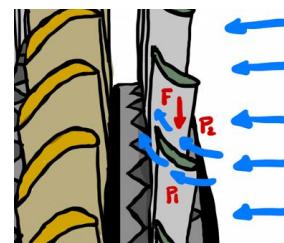


Figura 12. Principio del perfil alar
Fuente: Propia

En la figura 13 es posible observar la gráfica del comportamiento de la energía en una turbina de gas, en estas se observa que en todas las etapas la presión y temperatura van disminuyendo y por conservación de energía la velocidad aumenta. La velocidad en cada etapa de estator aumenta gracias a la forma de tobera que tienen los alabes.

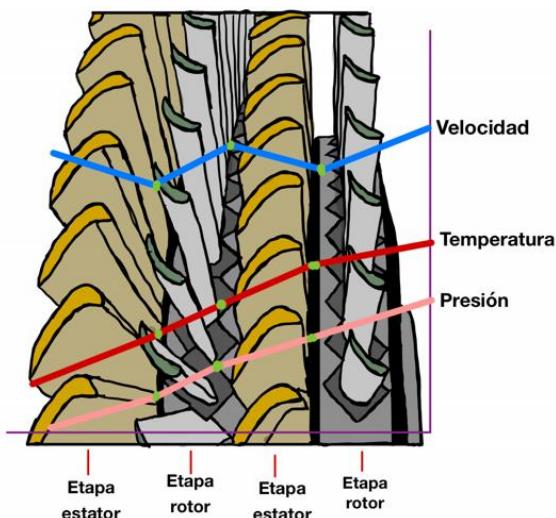


Figura 13. Comportamiento de la energía en la turbina

Fuente: Propia

5. Métodos

La sesión de "Métodos" de este artículo se centra en la metodología utilizada para comparar el rendimiento de aviones equipados con motores turboprop y turbofán en términos de consumo de combustible, generación de CO₂ por persona en dos trayectos diferentes: Bogotá-Medellín y Bogotá-San Andrés y de acuerdo con esto se saca el parámetro (pax-km) /L que es la eficiencia que se está trabajando en el presente artículo. Los aviones seleccionados para este análisis son el ATR72, A320-200 y A321. Aunque los aviones con motores turbofán no operan en la ruta Bogotá-Medellín y solo lo hacen en la ruta Bogotá-San Andrés, se realizaron cálculos considerando que siguen el mismo trayecto para facilitar la comparación.

Se obtuvieron los datos sobre la cantidad de pasajeros, distancias de las rutas y otros detalles relevantes del trayecto y la aeronave de la Aerocivil Colombiana [3]. Para obtener datos precisos sobre el consumo de combustible general y por persona en el trayecto de cada avión, se utilizó la página SimBrief [9] como referencia. Además, se llevaron a cabo entrevistas presenciales con expertos en el tema, visitando el aeropuerto Olaya Herrera [12],[13] y la empresa privada Helistar [14], [15]. Estas entrevistas proporcionaron información valiosa sobre las preferencias de motorización en la región y las razones detrás de estas preferencias.

La estimación de la generación de CO₂ se basó en la referencia [11], que establece que un litro de JET A1 produce 3,1 kg de CO₂ durante la combustión. Esto

permitió calcular y comparar la cantidad de CO₂ emitida por pasajero en cada avión durante el trayecto analizado.

La eficiencia determinante que se va a tomar en cuenta es: La unidad de medida "pax-km/L" que en la aviación se refiere a la eficiencia en el consumo de combustible de una aeronave para transportar pasajeros a una cierta distancia.

Pax: Es una abreviatura de "pasajeros" y representa la cantidad de personas transportadas en una aeronave.

km: Es una abreviatura de "kilómetros" y representa la distancia recorrida en el vuelo.

L: Es una abreviatura de "litros" y se refiere a la cantidad de combustible utilizado para realizar ese vuelo.

Significado:

"Pax-km/L" es una medida de la eficiencia en el consumo de combustible por pasajero y por unidad de distancia (en este caso, kilómetro).

Según [16] cuanto mayor sea el valor de "Pax-km/L", más eficiente será la aeronave en términos de consumo de combustible para transportar a los pasajeros a una distancia determinada.

Por el contrario, un valor menor de "Pax-km/L" indica que la aeronave consume más combustible para realizar la misma distancia con la misma cantidad de pasajeros.

Un alto valor de "Pax-km/L" es deseable desde una perspectiva de eficiencia energética y ambiental, ya que significa que la aeronave está siendo más eficiente en el uso de combustible.

Las aerolíneas y la industria de la aviación buscan mejorar constantemente esta eficiencia para reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental. El valor de "Pax-km/L" también puede utilizarse para comparar la eficiencia entre diferentes aeronaves y rutas de vuelo.

En resumen, "Pax-km/L" es una medida importante en la aviación que indica cuántos pasajeros puede transportar una aeronave por unidad de distancia recorrida con una determinada cantidad de combustible. Una mayor eficiencia en el consumo de combustible es un objetivo clave para la industria aérea en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

La ecuación que se implementa para el cálculo de la eficiencia es:

$$\text{Eficiencia} \frac{pax - km}{L} = \frac{\#P * D}{L} \quad (4)$$

En (4)

#P= Número de pasajeros en un vuelo en promedio
D= Distancia entre los aeropuertos analizados
L= Cantidad de combustible gastado en el trayecto por avión.

Todos esos datos fueron recopilados y filtrados directamente de la base de datos de la Aerocivil colombiana.

En resumen, esta sesión de "Métodos" describe la metodología utilizada para recopilar y analizar los datos necesarios en este estudio comparativo.

6. Resultados

6.1. Visita al Olaya Herrera

Se realizó una visita a la zona de Hangares del Olaya Herrera en la cual se realizó un recorrido con el Técnico Aeronáutico Andrés Hincapié Castaño [12] y el piloto de avión y helicóptero Luis Guillermo Ángel Restrepo [13] quien actualmente es el gerente responsable de la empresa visitada.

Fue posible visualizar el motor Turboprop TPE 331, es un motor que cuenta con dos compresores centrífugos lo cual le permite al motor comprimir más el aire y que este llegue más comprimido a la cámara de combustión. Que el aire llegue más comprimido a la cámara de combustión reduce el consumo de combustible para la reacción debido a que cuesta menos calentar un fluido que ya tiene mucha energía que uno que no la tiene.



Figura 14. Motor turboprop
Fuente: Propia

El motor encontrado en la visita tenía dos compresores centrífugos. Estos compresores aumentan más la presión del fluido en comparación con los otros compresores y la razón de ello es porque en la salida del fluido hacen que este tenga un cambio repentino en la dirección de 90 grados y se sabe que un fluido que tenga estos cambios tan repentinamente aumenta su presión.

Se llevaron a cabo entrevistas con los participantes con el fin de obtener una comprensión de la perspectiva de los expertos sobre el tema y acercarnos cualitativamente a las respuestas a las preguntas planteadas inicialmente.

Menciona Luis Guillermo: “La mayoría de los trayectos en Colombia son regionales, en la mayoría de los casos no son distancia de más de 600 km. En estas condiciones avión equipado con Turboprop puede llevar hasta 70 personas mientras que un Fan puede con 180 personas. Un Fan es más eficiente cuando él va cargado, el consumo por pasajero kilómetro es menor que el Turboprop, pero en trayectos regionales es muy difícil llenar un avión con Fan”

Menciona Luis Guillermo: “Los aviones con Turbofán requieren pistas más sofisticadas lo que se traduce en más inversión de dinero, un Turbofán requiere más pista para despegar. Costos que un municipio pequeño no está dispuesto a pagar”

Menciona Andrés Hincapié: “Por ejemplo en el Olaya Herrera no se permite la entrada a Turbofán debido a que las pistas no son las adecuadas y el ruido exterior que estos generan es muy grande y genera molestias a la comunidad”

6.2. Visita a Helistar

Se llevó a cabo una visita a la empresa privada Helistar, en la cual tuvimos la oportunidad de realizar un recorrido en compañía del Ingeniero Aeronáutico Sergio Giovanni Velásquez [14] y el experimentado técnico, ingeniero y piloto Carlos Fonseca [15], quien actualmente ocupa el cargo de jefe de flota de aviones.

Se llevaron a cabo entrevistas con los participantes con el fin de obtener una comprensión de la perspectiva de los expertos sobre el tema y acercarnos cualitativamente a las respuestas a las preguntas planteadas inicialmente.

Menciona Carlos Fonseca: “Aunque los motores turbofan se consideran más eficientes en términos de velocidad de crucero y consumo de combustible en vuelos de larga distancia, existen varias razones por las que los aviones turbopropulsores son ampliamente utilizados en trayectos regionales en Colombia.”

En primer lugar, los trayectos regionales suelen ser de corta distancia y con menor demanda de pasajeros en comparación con los vuelos de larga distancia. Los aviones turbopropulsores son capaces de operar eficientemente en vuelos más cortos y ofrecen ventajas significativas en términos de velocidad de despegue y aterrizaje, lo que les permite utilizar pistas más cortas y no pavimentadas que son comunes en áreas regionales.

Además, los aviones turbopropulsores son más versátiles en términos de capacidad de aterrizaje y despegue en aeropuertos más pequeños y remotos, lo que facilita la conectividad en regiones donde los aeropuertos pueden tener infraestructura limitada.

En cuanto a la distribución de aviones turbopropulsores en trayectos regionales y aviones turbofan en trayectos más grandes, es importante considerar la demanda de pasajeros y las características operativas específicas de cada región y aerolínea. Esta distribución se basa en factores como la densidad de población, el volumen de pasajeros, la infraestructura aeroportuaria y las necesidades de conectividad regional.”

6.3. Resultados estimaciones cualitativas

ATR72: Avión dotado de motor turboprop

A320: Avión dotado de motor turbofan

A321: Avión dotado de motor turbofan

Se realiza un cálculo de la variación del consumo de combustible por pasajero y la generación de CO₂ por pasajero para cada equipo, con el objetivo de determinar

si al operar con su capacidad máxima se logran mayores eficiencias y una menor generación de CO₂ por persona.

A continuación, se presentan los cálculos correspondientes al equipo ATR72, A320 y A321 para el trayecto Bogotá-Medellín, considerando un solo vuelo. Se muestran figuras con los datos de la cantidad de combustible por persona, variando la ocupación de cada aeronave.

Es importante destacar que en todas las figuras y tablas se utiliza la letra "L" para hacer referencia al combustible JET-A1. Los datos presentados se basan en el trayecto mencionado y permiten analizar el consumo de combustible por pasajero en diferentes escenarios de ocupación. Los cálculos se presentan exclusivamente para la ruta Bogotá-Medellín con el propósito de demostrar de manera concluyente que los aviones son considerablemente más eficientes cuando operan a su capacidad máxima.

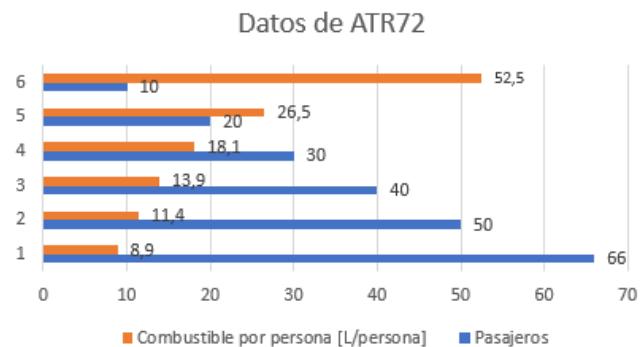


Figura 16. Variación de ocupación ATR72 junto con el consumo de combustible por persona.

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

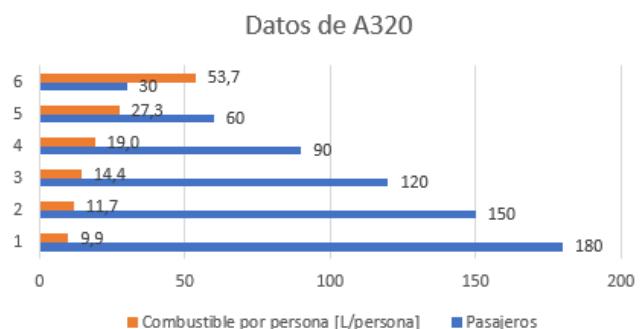


Figura 17. Variación de ocupación A320 junto con el consumo de combustible por persona.

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

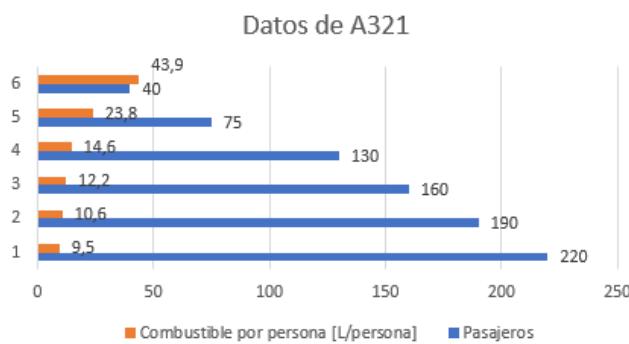


Figura 18. Variación de ocupación A321 junto con el consumo de combustible por persona.
Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

En esta sección se presentan los cálculos correspondientes a la generación de CO₂ por persona, considerando la variación en la ocupación de cada aeronave. Se lleva a cabo un análisis detallado de la cantidad de CO₂ emitida por pasajero en distintos escenarios de ocupación.

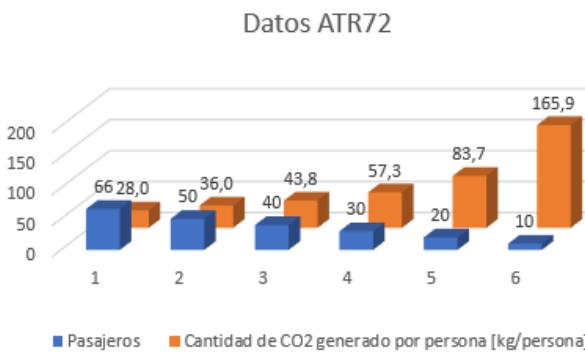


Figura 19. Variación de ocupación ATR72 junto con la generación de CO₂ por persona.
Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

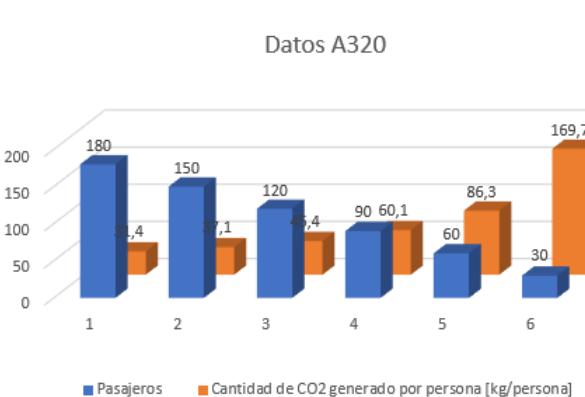


Figura 20. Variación de ocupación A320 junto con la generación de CO₂ por persona.
Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

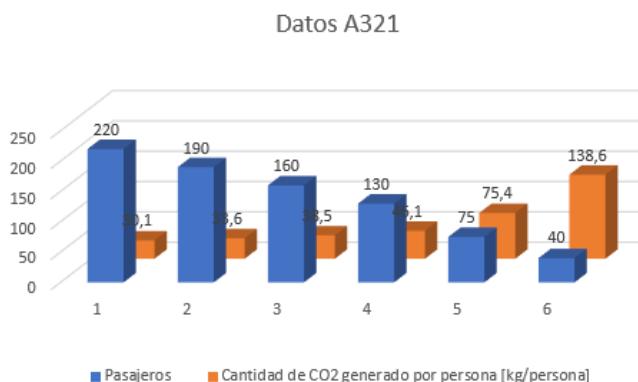


Figura 21. Variación de ocupación A321 junto con la generación de CO₂ por persona.
Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

Dado que se consume menos combustible y se genera menos CO₂ por persona cuando la aeronave opera con ocupación máxima, los cálculos para la comparación se realizan considerando una ocupación máxima en todos los escenarios. De esta manera, se obtienen resultados que permiten evaluar y comparar de manera equitativa el consumo de combustible y la generación de CO₂ en general y por persona entre las diferentes aeronaves analizadas.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para la ruta Bogotá-Medellín.

Tabla 1. Tipo de aeronave utilizado, pasajeros y consumo total de combustible en el trayecto.

Aeronave	Pasajeros	Cantidad de combustible gastado [L]
ATR72	66	585.8
A320-200	180	1787.3
A321	220	2094.5

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

Tabla 2. Tipo de aeronave utilizado, combustible consumido, generación de CO₂ por persona en el trayecto y la eficiencia.

AERONAVE	ATR72	A320-200	A321
Combustible por persona [L/persona]	8.88	9.93	9.52
Cantidad de CO2 generado por persona [kg/persona]	28.05	31.38	30.09
Eficiencia (pax-km)/L	26.19	23.41	24.42

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

Se presentan los cálculos realizados para la ruta Bogotá-San Andrés.

Tabla 3. Tipo de aeronave utilizado, pasajeros y consumo total de combustible en el trayecto.

Aeronave	Pasajeros	Cantidad de combustible gastado [L]
ATR72	66	2057.20
A320-200	180	5264.90
A321	220	5987.60

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

Tabla 4. Tipo de aeronave utilizado, combustible consumido, generación de CO2 por persona en el trayecto y la eficiencia.

AERONAVE	ATR72	A320-200	A321
Combustible por persona [L/persona]	31.17	29.25	27.22
Cantidad de CO2 generado por persona [kg/persona]	98.50	92.43	86.00

Eficiencia (pax-km)/L	38.76	41.30	44.39
-----------------------	-------	-------	-------

Fuente: Realizada con datos de [3],[9]

7. Conclusiones

- Es evidente que el consumo de combustible por persona en un avión se incrementa significativamente cuando la cantidad de pasajeros a bordo es inferior a la óptima. Es importante destacar que tanto los aviones turboprop como los turbofán logran su máximo nivel de eficiencia cuando operan con su capacidad máxima de pasajeros, la cual varía según el tipo de aeronave. Con esto en mente, resulta crucial promover estrategias y políticas que fomenten la ocupación óptima de los aviones, buscando así reducir el consumo de combustible y minimizar el impacto ambiental de la industria aérea.

- En trayectos de corta distancia, las aeronaves turboprop muestran una mayor eficiencia, como se refleja en la Tabla 2. Sin embargo, para distancias más largas, las aeronaves con motores turbofán superan en eficiencia, como se ilustra en la Tabla 4.

- La planificación de las trayectorias en la aviación se lleva a cabo de manera eficiente, teniendo en cuenta las características de los aviones y las distancias a recorrer. En vuelos regionales de distancias menores a 700 km, la Autoridad Aeronáutica Civil (Aerocivil) utiliza aviones turboprop debido a su mayor eficiencia como se evidencia en la tabla 2 en comparación con los turbofan. Los turbopropulsores son ideales en este escenario, ya que alcanzan su velocidad de crucero en el rango de 400 a 600 km/h, y tienen un techo de vuelo relativamente bajo.

Por otro lado, los turbofan son empleados en trayectos de más de 700 km, donde se requiere una mayor velocidad de vuelo, entre 700 y 900 km/h, y un techo de vuelo de 11000 a 12000 m para alcanzar la velocidad de crucero en estos trayectos los aviones equipados con estos motores tienen las mejores eficiencias como se evidencia en la tabla 4. Aunque en algunos casos se utilizan motores turbofan en distancias más cortas, esto generalmente se hace por cuestiones de tiempo.

- Si bien los aviones turboprop son más eficientes en distancias cortas y los turbofan lo son en distancias largas, es importante tener en cuenta el factor tiempo. Si se implementaran aviones turbofan en trayectos regionales con el objetivo de reducir el tiempo de vuelo, se enfrentarían desafíos significativos.

En primer lugar, la incorporación de turbofanes en vuelos regionales implicaría la construcción de pistas costosas para dar cabida a estos aviones de mayor tamaño. Esto sería ineficiente, especialmente en regiones con un flujo poblacional bajo, como Arauca o Amazonas. Utilizar un avión de 180 pasajeros para transportar a solo 30-50 personas resultaría en una operación poco eficiente.

Además, en distancias cortas, la diferencia de tiempo entre un turbofán y un turboprop no es tan relevante. El beneficio de utilizar turbofanes para ahorrar unos minutos en vuelos regionales no justificaría los costos y la ineficiencia asociados con esta implementación.

8. Referencias

- [1] UPME. "Proyección de demanda energía eléctrica, gas natural y combustible líquido, Colombia." Unidad de Planeación Minero Energética, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Informe_proyeccion_demandade_energeticos.pdf
- [2] Asociación Colombiana de Petróleo y Gas. "Evolución 2021 y perspectivas 2022-2030 del mercado del combustible líquido en Colombia." Vicepresidencia de Asuntos Económicos y Regulatorios, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://acp.com.co/web2017/en/publicaciones-e-informes/economicos/842-informe-economico-evolucion-2021-y-perspectivas-2022-2030-del-mercado-de-combustibles-liquidos-en-colombia/file#:~:text=Para%202022%2C%20se%20espera%20un%20aumento%20de%20la%20demanda%20el%2Cdi%C3%A9sel%20y%205%25%20jet>
- [3] Aero Civil Colombiana. "Colombia, 2022." Tomado de: [En línea] <https://www.aerocivil.gov.co/>
- [4] Lozano, Miguel A. "Turbomáquinas térmicas." España, Área de Máquinas y Motores Térmicos, 2021.
- [5] Zheng, Xinyi Sola and Rutherford, Dan, Ph.D. "Ranking de eficiencia energética de aerolíneas." Estados Unidos, 2017-2018.
- [6] Meauzé, Georges. "Turbomachines: calcul des écoulements compressibles." [En línea]. Francia.
- [7] Cengel, Yunus A. "Mecánica de Fluidos", 4^a edición. México, Mac Graw Hill, cap. 9.
- [8] Cengel, Yunus A. "Termodinámica", 4^a edición. México, Mac Graw Hill, cap. 9.
- [9] SimBrief, "SimBrief", en línea. Disponible: <https://dispatch.simbrieff.com/home>.
- [10] "Acuerdo de París sobre el Cambio Climático", en línea. Disponible: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- [11] ICAO, "ICAO's Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)", en línea. Disponible: <https://applications.icao.int/icec>
- [12] Andrés Hincapié Castaño, Técnico Aeronáutico, Entrevista personal, 11 de noviembre de 2022.
- [13] Luis Guillermo Ángel Restrepo, piloto y gerente responsable, Entrevista personal, 11 de noviembre de 2023.
- [14] Sergio Giovanni Velásquez, Ingeniero Aeronáutico, Entrevista personal, 2 de diciembre de 2023.
- [15] Carlos Fonseca, técnico, ingeniero y piloto, Entrevista personal, 2 de diciembre de 2023.
- [16] International Council on Clean Transportation (ICCT), "Ranking de eficiencia energética en América Latina", The International Council on Clean Transportation (ICCT), Diciembre 2019. [En línea]. Disponible en: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Ranking_de_eficiencia_energetica_Latam_20191216.pdf