

Caracterización de un sistema rotor coaxial con base en la variación de la distancia entre rotores

Coaxial Rotor System Characterization Based on the Variation of the Distance Between Rotors*

Recibido: 18 de mayo de 2016 - Aceptado: 21 de octubre de 2016

Para citar este artículo: L. Mónico, S. Martínez, A. Ríos «Caracterización de un sistema rotor coaxial con base a la variación de la distancia entre rotores», *Ingenium*, vol. 18. n.º 35, pp. 35-47, febrero de 2017.



Luisa Fernanda Mónico Muñoz**

Auxiliares de investigación, estudiantes:

Santiago Martínez Van Brackel⁺

Arnold Steve Ríos García⁺⁺

Resumen

El presente documento presenta un modelo de prácticas experimentales para un sistema de rotores coaxiales, las cuales son comparadas con los datos obtenidos a partir de un modelo teórico y de simulación de hélice sencilla. Lo anterior, con el fin de conocer la eficiencia, coeficiente de potencia y de empuje de los sistemas de rotor coaxial. Para lograr esto, fue necesario desarrollar unas pruebas, en las que se ajustara la distancia entre rotores y posteriormente comparar la parte experimental con la teórica. Con los resultados se realizó un análisis estático que permitió encontrar la mejor configuración para cada uno de los parámetros analizados.

Palabras clave

Rotor coaxial, eficiencia, hélices, distancia entre rotores, coeficiente de empuje, coeficiente de potencia, hélice tracker, hélice pusher, consumo.

* Artículo de investigación, producto derivado de investigación realizada en el grupo Aerothec de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá.

** Ph. D. en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte, Universidad Politécnica de Valencia, docente de tiempo completo, Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, E-mail: lmonico@usbbog.edu.co

⁺ Ingeniero Aeronáutico; Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá; samartinez@academia.usbbog.edu.co

⁺⁺ Ingeniero Aeronáutico; Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá; samartinez@academia.usbbog.edu.co

Abstract

This document provides a model of experimental test under propellers coaxial configuration, where they are compared with data obtained by means of a simulation model for simple propellers. This, in order to know the efficiency, thrust and power coefficient in coaxial rotors. To achieve this, it was necessary to implement a test, in which they could adjust different distances between rotors, where experimental data are compared with those obtained with the theory. With these results is convenient to do a statistical analysis that allows you to find the best settings developed for each of the parameters analyzed.

Keywords

Coaxial rotors, propellers, efficiency, distance between propellers, power coefficient, thrust coefficient, tracker propeller, pusher propeller.

Tabla de símbolos

Coeficiente de empuje	C_T
Coeficiente de potencia	C_p
Eficiencia	h
Relación de avance	J
Empuje [N]	T
Densidad del fluido [kg/m^3]	ρ
Velocidad de rotación [rpm]	n
Diámetro de la hélice [m]	D
Perímetro [m]	P
Voltaje	V

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y la evolución del sector aéreo en la parte motriz como sistema mecánico generador de empuje, el cual convierte la energía mecánica del combustible y la transforma en energía mecánica [1], ha abordado diferentes campos y teorías a estudiar, experimentar y poner en práctica. Uno de ellos es el que trasmite la energía de los motores por medio de un eje a las hélices, que dado a su movimiento rotatorio y la forma de las palas, generan el empuje dándole el movimiento necesario a la aeronave.

Existen diferentes configuraciones para las hélices, entre las cuales están las sencillas y las múltiples aplicables a rotores coaxiales, que basan su funcionamiento en el movimiento contrarrotatorio.

Los sistemas motrices bajo una configuración coaxial no han sido desarrollados e investigados en su totalidad, hasta la fecha, por ende, es de vital importancia conocer su funcionamiento a diferentes condiciones de vuelo y bajo distintas configuraciones geométricas, realizando pruebas físicas con métodos experimentales.

2. MARCO TEÓRICO

Un sistema coaxial se define como una pareja de hélices en un mismo eje de rotación, los cuales giran en direcciones opuestas. Estas se encuentran conectadas en un mismo mástil, sin importar si la fuente de potencia es independiente para cada hélice o en común [2].

En la figura 1, se puede observar un ejemplo de hélices en configuración coaxial el cual cuenta con un sistema de engranajes que logran darle el movimiento en sentido contrario a la hélice posterior.

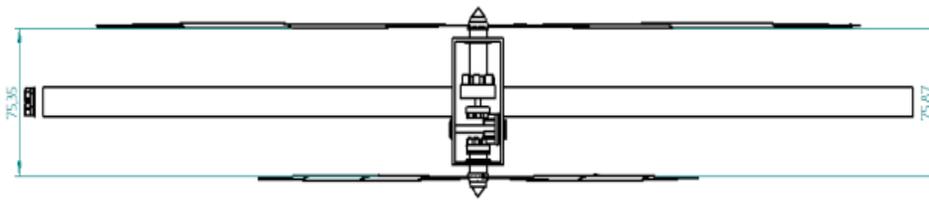


Figura 1. Sistema de rotor coaxial [2]

Este tipo de rotores presenta una ventaja considerable frente a los rotores sencillos, los cuales necesitan de un rotor de cola para contrarrestar el momento angular que se genera sobre el cuerpo de la aeronave. Debido a que el cuerpo que sostiene la hélice, tiende a moverse en sentido contrario al del giro de la hélice, en los rotores coaxiales el giro de la hélice es contrarrestado con la otra, la cual gira en sentido contrario. Con esto, se puede suprimir el timón de cola, cuyo elemento es implementado en los helicópteros.

Cuando se está desarrollando un análisis en un sistema de rotor coaxial se deben tener en cuenta parámetros significativos, como lo es el tipo de hélice que se va a utilizar; esto debido a que, se debe contar con una hélice adicional a la que presenta un sistema rotor convencional. Esta hélice debe ser de tipo Pusher, o también llamada hélice de tracción, donde el diseño del perfil y los ángulos de la hélice están invertidos en relación a las hélices convencionales, logrando generar el empuje en la misma dirección, sin importar que el sentido de giro este invertido. Un ejemplo de este tipo de hélices se puede ver en la figura 2.



Figura 2. Hélice Tipo Pusher [3]

Otro factor considerado es el diámetro de la hélice. Entre mayor sea el diámetro en una hélice mayor será la cantidad de aire que atrapa la hélice, logrando con esto un mayor empuje. Vale la pena aclarar que existe un límite del diámetro que puede tener la hélice, ya que si este es muy grande, requerirá de velocidades muy altas en el tip de la pala, lo cual generaría un fenómeno de resonancia sobre estas y ocasionaría una posible fractura en la hélice.

Al enfocarse en el rendimiento de una hélice, se parte en un principio del «Blade Element Theory» la cual describe la hélice en un número independiente de secciones de pala, donde solo se tiene en cuenta la velocidad axial y angular; haciendo un balance de fuerzas en cada una de las secciones. Esto permite observar el comportamiento de parámetros que describen la operación de un rotor, en función de factores independientes como lo son la velocidad de giro y la configuración geométrica. Los parámetros que describen el comportamiento de una hélice y su respectiva formula son:

$$\text{Coeficiente de empuje:} \quad C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (1)$$

$$\text{Coeficiente de potencia:} \quad C_p = \frac{P}{\rho n^2 D^5} = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$\text{Eficiencia:} \quad \eta = J * \frac{C_p}{C_t} \quad (3)$$

$$\text{Relación de avance:} \quad J = \frac{V}{nD} \quad (4)$$

Todos estos análisis permiten tener un punto de referencia para hacer pruebas experimentales que permitan conocer o buscar una configuración que presente las mejores condiciones en función de los parámetros analizados.

Para esto, se ha diseñado un banco de pruebas, en donde, se probarán tres diferentes tipos de hélices pusher con diferente paso, variando las distancias entre los rotores para cada ensayo experimental con cada juego de hélices, lo cual permitirá que sean comparados con los resultados teóricos, conocer las condiciones de rendimiento y características que mejor se acoplen a este tipo de sistemas de propulsión.

3. METODOLOGÍA

Los parámetros que se van a analizar son tomados como variables dependientes (empuje, consumo, potencia y velocidad de flujo) y aquellos que se pueden variar a los niveles necesarios para cada prueba son tomados como independientes (distancia entre rotores, velocidad relativa, rpm y tipo de hélice).

Inicialmente, se realiza un análisis teórico preliminar del comportamiento de las hélices bajo diferentes configuraciones, tanto geométricas como de operación para comprender el rendimiento que estas tengan. Luego, se realizan los mismos análisis del comportamiento de estas hélices pero bajo condiciones dinámicas.

Posteriormente, se realizan pruebas experimentales por medio de un banco de pruebas que permita conocer los parámetros mencionados anteriormente.

Estas pruebas se realizan bajo una configuración de hélice sencilla, lo que permite comprobar la similitud entre los resultados experimentales y los teóricos. Con estos resultados se tiene un punto de comparación para caracterizar las mismas hélices en configuración coaxial. Para esto, se toman las mismas pruebas de hélices sencilla, pero ahora teniendo en cuenta la configuración con otra hélice de forma coaxial.

Para la realización de las pruebas se toman cuatro diferentes tipos de hélice, donde se varía el diámetro y el paso analizando cada una de forma independiente. Adicionalmente, se toma cada hélice y se analiza a 4 niveles de rpm contemplando la velocidad máxima de giro para cada una. Ya con las hélices funcionando, se toman simultáneamente todos los datos necesarios para los factores que se plantearon en el análisis.

Dado que también se realizan pruebas dinámicas, este proceso se repite nuevamente pero esta vez modificando otro factor que sería la velocidad del flujo. Para las pruebas coaxiales se agrega otra hélice en la parte posterior, girando en sentido contrario a la primera. En esta parte, se entra a analizar otro factor importante que es la distancia entre hélices.

MODELO DE TAGUCHI

Con el método de arreglos ortogonales de Taguchi [4] se pueden examinar diferentes factores omitiendo los que se relacionan entre sí, disminuyendo considerablemente el número de pruebas a realizar, lo cual implica experimentos menos costosos y una disminución en el tiempo en la ejecución de estos.

Por medio de este método se formula el análisis estadístico con el cual se determinan los mejores parámetros de operación por medio de los datos obtenidos durante las pruebas.

En este trabajo se analizaron 4 factores, a los cuales se le buscan los valores más altos o más bajos en función de la necesidad que se tenga. Vale la pena recordar que cuando se esté hablando del nivel de rpm, se toman como niveles el 25, 50, 75 y 100 % de la potencia máxima disponible por el motor para cada hélice; cuando se habla del tipo de hélice, se debe tener en cuenta las hélices que se están analizando y, cuando se habla de distancia entre rotores, se manejan los niveles como 0, 6.6, 13.2 y 19.8 cm, respectivamente. En la tabla 7 se muestran los niveles para cada uno de los factores que se están analizando.

Nivel	Nivel de rpm [%]	Tipo de hélice	Distancia entre rotores [cm]	Velocidad del flujo [m/s]
1	25	14x7"	0	4
2	50	13x8"	6.6	8
3	75	9x7"	13.2	12
4	100	10x7"	19.8	16

Tabla 1. Niveles indicados para cada factor

4. BANCO DE PRUEBAS

El banco diseñado permite cambiar y ajustar la distancia entre los rotores, manteniéndose estable frente a vibraciones producidas por los motores y a las posibles cargas que puedan efectuarse por fuerzas aerodinámicas provenientes de las hélices cuando estén en operación.

Para contrarrestar la fricción de la parte móvil con la estructura base, se utilizaron rodamientos, que soportan la bancada del motor móvil, permitiendo una medición de la fuerza generada por los motores de manera más limpia y precisa. En la figura 3 se muestra la estructura del banco y en la tabla 1 los equipos de medición con los que cuenta.



Figura 3. Montaje final banco de pruebas.

Equipo	Medición
Tacómetro	Velocidad angular
Dinamómetro	Empuje
Vatímetro	Potencia y consumo
Anemómetro	Velocidad del flujo

Tabla 2. Equipos utilizados en pruebas

Otro factor considerado para las pruebas es el tipo de hélices a usar, teniendo en cuenta las características de potencia y rpm de los motores. Para el caso de este trabajo se usan las hélices de la marca Masterairscrew® que se muestran en la tabla 2.

Hélice	Referencia	Diámetro [in]	Paso [in]	N.º palas	Nombre comercial
1	14x7"	14	7	3	CCW MA 1470T/P
2	13x8"	13	8	3	MA 1360T / P
3	9x7"	9	7	3	MA 0970T / P
4	10x7"	10	7	3	CCW MA1070T/ P
5	10x6"	10	6	2	CCW MA1060T/ P

Tabla 3. Hélices seleccionadas para las pruebas

Las hélices deben ser operadas bajo los lineamientos de operación de las aeronaves, siendo estos: carreteo, crucero, ascenso y despegue; cuyas condiciones se adecuan a los niveles de potencia máxima del motor para cada hélice, asumiendo el 25, 50, 75 y 100 %, respectivamente a cada valor, como se muestra en la tabla 3.

Nombre	rpm seleccionadas			
	25 %	50 %	75 %	100 %
Hélice 1	2643	3457	4262	6085
Hélice 2	3044	4170	5631	7769
Hélice 3	4020	5177	6539	8900
Hélice 4	3228	4417	5724	8212
Hélice 5	4450	5622	6864	8930

Tabla 4. Régimen de giro de operación para cada hélice.

5. RESULTADOS

En esta sección, se muestran los datos obtenidos experimentalmente en un comparativo con su modelo teórico, el cual describe el rendimiento de las hélices seleccionadas; tanto en condición estática como dinámica. Para una mejor comprensión de los resultados mostrados en las figuras, los triángulos representan los resultados teóricos y los círculos los resultados de las pruebas experimentales.

En primera instancia se analizan las pruebas estáticas que se muestran en la figura 4. En este punto se debe considerar que la potencia requerida para mover las palas, es directamente proporcional al empuje generado por la hélice. Esto quiere decir que para una tasa de empuje requerida, será necesaria una mayor potencia por parte de los motores, lo cual afecta directamente el consumo, bajando así la eficiencia de la hélice.

En la figura 4 se muestra la misma tendencia negativa para el caso de η y en las hélices 10x7 y 10x6 debido a la cantidad de energía que se requiere al intentar girar las hélices, siendo mayor la potencia requerida en relación al empuje entregado por las hélices.

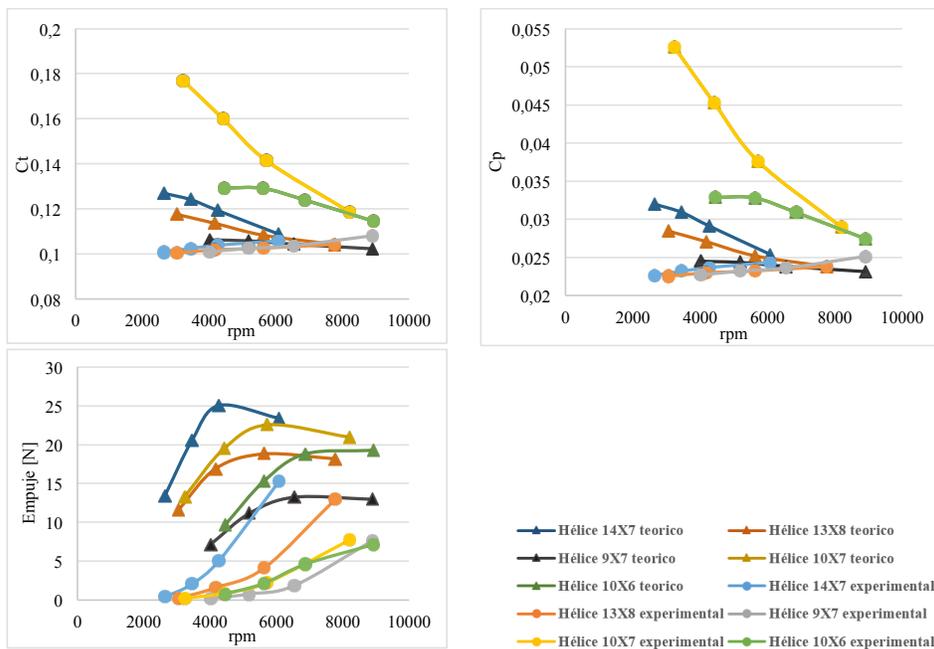


Figura 4. Comparativo estático de η , C_p y Empuje de las hélices probadas

Habiendo analizado el componente teórico en las hélices, el siguiente aspecto a analizar es la componente dinámica a la cual se le agrega el flujo del aire como otra variable de análisis; en la figura 5 se muestran algunos de los resultados dados por las hélices analizadas. Contemplando que el comportamiento de las tendencias graficadas entre hélices se conserva, a manera de ejemplo se muestra el análisis de la hélice que presentó el mejor rendimiento en cuanto a empuje se refiere, que para este caso es la hélice 14X7”.

Como se puede observar en la figura 5, la eficiencia más destacada para esta hélice se da a 4262 rpm, siendo esta condición el parámetro de mejor comportamiento para el coeficiente de empuje y potencia generando los valores más altos, corroborando que dicha fase de operación aprovecha mejor la energía del motor en las condiciones atmosféricas presentes en el entorno. Al aumentar las rpm hasta la capacidad máxima del motor, la relación de estas con el empuje generado no se mantiene, provocando que la hélice pierda parte de su eficiencia y por ende el coeficiente de empuje disminuya.

El empuje más alto registrado se da con un flujo de entrada de 4m/s, lo cual respalda la teoría y tendencias del comportamiento en cuanto a la pérdida de empuje a una mayor velocidad de avance.

La potencia expresa un comportamiento similar al debido a que el arrastre inducido de la hélice disminuye proporcionalmente al cambio en el ángulo de ataque percibido por la pala.

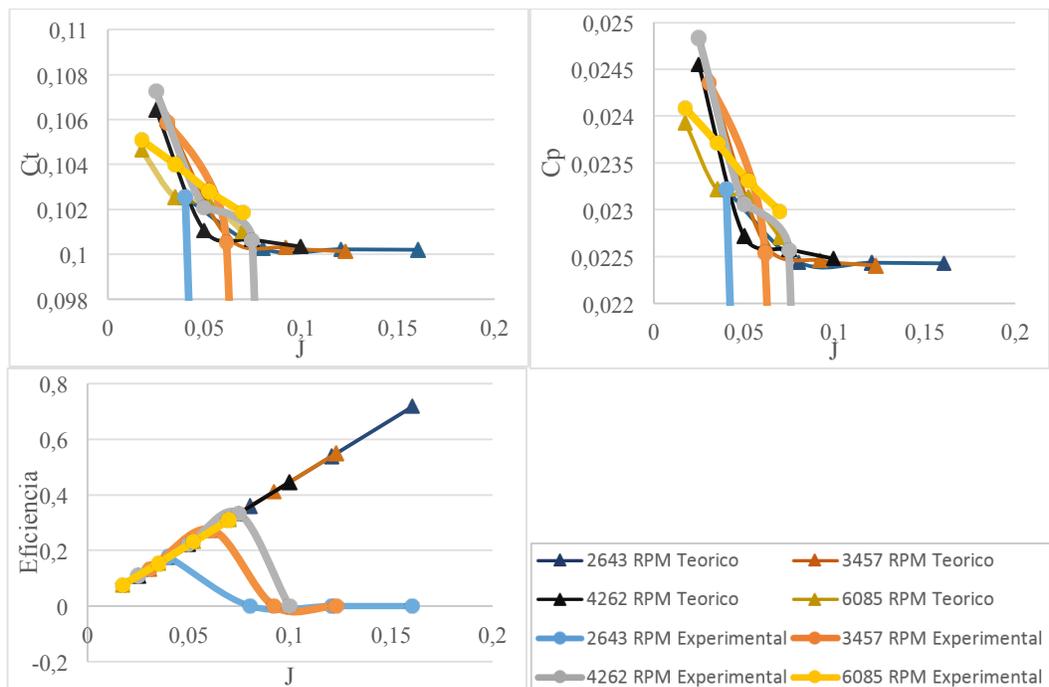


Figura 5. Comparativo teórico/experimental de las pruebas para la hélice 1 en condiciones dinámicas, y Eficiencia.

RESULTADOS COAXIALES COMPARATIVOS

Teniendo ya los resultados del comportamiento del banco bajo condiciones de rendimiento estáticas y dinámicas con una hélice sencilla se hace una comparación con los datos obtenidos bajo la configuración coaxial.

Al comparar todas las condiciones de operación de los rotores coaxiales, se notó que los cambios más relevantes se dan a distancias entre rotores más bajas. Esto es causado porque al no estar tan alejadas las hélices, el efecto rotacional en el aire a la salida generado por la primera hélice no alcanza a afectar la segunda, donde se podría suponer que el flujo se mantiene homogéneo, incluso mejorando el rendimiento por la relación del ángulo de entrada de la hélice posterior; esto tendría una gran relevancia al hablar de la eficiencia en esta segunda hélice aumentándola y así, logrando que genere un mayor empuje adicional al que ya generó la primera hélice de forma sencilla.

Este fenómeno se va disminuyendo a medida que se aumenta la distancia ya que al estar muy separadas el flujo que llega a la segunda hélice estaría ya muy disperso lo cual disminuiría la eficiencia en la hélice y por ende el empuje que esta pueda lograr. Lo anteriormente descrito, se muestra en la tabla 5, al comparar el de un sistema sencillo con el de un sistema coaxial.

Sistema sencillo		Sistema coaxial	
rpm	C_t	C_t	Distancia entre rotores [cm]
Hélice 14x7"			
2643	0.1008	0.1076	0
3457	0.1024	0.1131	6.6
4262	0.1038	0.1155	13.2
6085	0.1057	0.1092	19.8
Hélice 3 9x7»			
4020	0.100986	0.1116	13.2
5177	0.10244	0.1092	19.8
6539	0.10365	0.1229	0
8900	0.10810	0.1126	6.6

Tabla 5. Comparativo de C_t entre hélice sencilla y coaxial

Al analizar el consumo, se observa un incremento de energía consumida por parte de la configuración coaxial por más del doble en comparación al rotor sencillo, esto debido al incremento de la perturbación del flujo en el medio de operación y la resistencia de las palas bajo esta configuración es mayor a bajos niveles de dial, pero a niveles superiores del 75 % se ve un ahorro de energía por parte de la configuración coaxial, por lo que se puede decir que es más eficiente energéticamente a mayores velocidad angular o exigencia por parte del dial. En la tabla 5 se muestran los resultados de consumo para la hélice 14x7" y la hélice 9x7".

rpm	Sistema sencillo	Sistema coaxial	Distancia entre rotores [cm]
	Consumo [A]	Consumo [A]	
Hélice 1 14x7»			
2643	1.4	3.6	0
3457	4.1	12.45	6.6
4262	10.27	26.37	13.2
6085	42.87	40.37	19.8
Hélice 9x7»			
4020	1.4	2.97	13.2
5177	3	3.91	19.8
6539	5.63	16.81	0
8900	20.83	17.15	6.6

Tabla 6. Comparativo de consumo entre hélice sencilla y coaxial

Hablando en términos de coeficiente de potencia, se expresa que es menor en la configuración coaxial para las hélices más grandes. Hablando propiamente de la potencia como unidad de Watts, en configuración coaxial la relación de potencia es mucho más alta en los rangos del 25 y el 75 % de las rpm. Cuando se analiza al 100 % del rango de rpm, la potencia de la hélice sencilla es mayor que la requerida por la configuración coaxial.

Por ejemplo, la hélice 14x7", que para las pruebas coaxiales se asume un nivel de rpm del 100 % con una distancia de 19.8 cm, se constata que en comparación con la hélice sencilla se presenta una mayor potencia. Esto da a creer que para esa distancia, la estela del flujo genera que la segunda hélice reciba el flujo uniforme, con un perfil de velocidad más provechoso y con mayor energía cinética, haciendo que esta pueda girar con mayor facilidad apoyado por los fenómenos mencionados, requiriendo niveles más bajos de energía por parte del motor.

La distancia en este caso genera que haya una disminución en la variación entre las dos configuraciones rotoras, de modo que a mayor distancia, la potencia requerida para el motor de la hélice que recibe el flujo de la otra, es más bajo en relación a la distancia mínima entre ellas. Por otro lado, se puede decir que la distancia más crítica para la potencia y directamente para la energía requerida por parte del motor, se encuentra a la distancia de 6,6 cm ya que en esta distancia se dispara la potencia a valores muy altos.

Sistema sencillo		Sistema coaxial	
rpm	C_p	C_p	Distancia entre rotores [cm]
Hélice 14X7"			
2643	0.0226	0.0249	0
3457	0.0231	0.0269	6,6
4262	0.0236	0.0277	13,2
6085	0.0243	0.0255	19,8

Esta tabla continúa en la siguiente página —>

Hélice 9x7»			
4020	0.0525	0.0263	13,2
5177	0.0452	0.0255	19,8
6539	0.0375	0.0304	0
8900	0.0289	0.0267	6,6

Tabla 7. Comparativo de empuje entre hélice sencilla y coaxial.

RESULTADOS MODELO DE TAGUCHI

En primera instancia se considera el empuje; este parámetro depende principalmente de la velocidad, dado que el flujo que recibe el sistema en algunos casos llegaba a ser mayor que la cantidad de empuje generada por las hélices, por lo cual el empuje para estas pruebas fue tomado como 0. Considerando los parámetros analizados se obtuvo la mejor configuración que para el caso del empuje es:

- Nivel de potencia = 100 %
- Tipo de hélice = 14x7"
- Distancia entre rotores = 0 cm

Estos resultados comprueban que entre mayor sea el diámetro de la hélice, mayor será el área de contacto del flujo y por ende, se obtendrá un mayor empuje. De igual manera, que el mayor empuje se da con la distancia mínima entre los rotores, esto da a entender un poco más el fenómeno de la estela generada por la primera hélice, donde al existir poca distancia entre una hélice y otra, el efecto de esta estela sobre la segunda hélice no es tan fuerte y por ende, esta trabajará con una eficiencia considerablemente alta que ayuda a aumentar aún más el empuje generado por la primera, si se comparara con una distancia entre rotores mayor.

Posteriormente, se realizó el mismo proceso para analizar el comportamiento de estos en pruebas dinámicas, es decir, como se comportan las hélices al ser sometidas a un aumento en el viento relativo de entrada. Es por esto que en estas pruebas el viento relativo también se tendrá en cuenta como otro factor de análisis cuyos niveles son 4, 8, 12 y 16, m/s. Teniendo en cuenta lo anterior, el mejor empuje se da con la siguiente configuración:

- Nivel de dial = 100 %
- Tipo de hélice = 14x7
- Distancia entre rotores = 19.8 cm
- Velocidad relativa = 4 m/s

Estos datos dan a entender que dado un flujo de viento relativo algunos parámetros van a cambiar. Por ejemplo se aprecia que, al comparar con los resultados dinámicos, la distancia entre rotores es la más alta, a diferencia de la prueba estática. Este fenómeno

es causado por la caída en la eficiencia de las hélices dados por las pérdidas generadas en los puntos debido al incremento de la magnitud de la velocidad experimentada sobre la hélice. Teniendo en cuenta los niveles estipulados de cada factor, se procede a realizar una prueba en la cual se utilizan estas características y se compruebe la mejoría en cuanto a empuje se refiere. En la tabla 8 se muestran los resultados de estas pruebas.

Mejor configuración HELICE 14x7»		
Parámetro	Condición estática	Condición dinámica
Empuje [N]	28.35	25.8
Consumo Tracker [A]	43.6	43.9
Consumo Pusher [A]	42.3	44.6
Potencia Tracker [W]	431	448
Potencia Pusher [W]	421.3	456.6
Velocidad flujo antes [m/s]	9.9	10.1
Velocidad flujo media [m/s]	25.5	24
Velocidad flujo después [m/s]	31.2	28.3

Tabla 8. Resultados estáticos y dinámicos para mejor configuración de empuje

Vale la pena mencionar que tanto en pruebas estáticas como dinámicas, la hélice de 14x7" al ser la de mayor diámetro, estando al 100 % del nivel de rpm, es la que mayor empuje entrega y por ende, también la de mayor consumo, debido a la cantidad de potencia requerida para permitir y mantener el movimiento de la misma.

Otro parámetro importante que se debe conocer al momento de configurar un sistema rotor coaxial es el consumo. La mejor configuración que para el caso del consumo de la hélice Pusher es:

- Nivel de potencia = 25 %
- Tipo de hélice = 9x7"
- Distancia entre rotores = 0 cm

De igual forma la mejor configuración para el consumo de la hélice Tracker es:

- Nivel de potencia = 25 %
- Tipo de hélice = 9x7"
- Distancia entre rotores = 19.81 cm

De igual forma para las condiciones dinámicas, se adiciona un cuarto factor, que sería la velocidad del flujo de entrada. Considerando los parámetros analizados se puede obtener la mejor configuración que para el caso del consumo de la hélice Pusher es:

- Nivel de potencia = 25 %
- Tipo de hélice = 9x7"

- Distancia entre rotores = 6.6 cm
- Velocidad relativa = 8 m/s

De igual forma la mejor configuración para el consumo de la hélice Tracker es:

- Nivel de potencia = 25 %
- Tipo de hélice = 9x7"
- Distancia entre rotores = 0 cm
- Velocidad relativa = 8 m/s

6. CONCLUSIONES

- En condiciones estáticas, las hélices que con la distancia mínima presentan el mayor empuje, dado que la segunda no recibe un flujo turbulento y por eso aumenta su eficiencia, generando un mejor empuje en conjunto con la primera hélice.
- Para las condiciones dinámicas, el mejor empuje se da con la mayor distancia entre rotores, esto se debe al efecto generado por el flujo que impide que la segunda hélice reciba el aire en una manera eficiente, siendo necesario separar las hélices hasta que estas trabajen de manera independiente.
- Se constató que a pesar de tener 2 rotores, el consumo energético no llega a ser el doble si se compara con una hélice sencilla, lo cual indica que el sistema coaxial la interacción entre las hélices aumenta la eficiencia de estas.
- Para términos de menor consumo tanto en condiciones estáticas como dinámicas, se mostró que las hélices más pequeñas presentan un menor valor, este debido al bajo peso e inercia que estas generan, lo que les permite llegar a condiciones de empuje establecidas sin necesidad de grandes cantidades de energía entregadas por los motores.
- Se comprobó que en el sistema rotor coaxial estático, la distancia intermedia de 6.6 cm entre hélices fue la que generó mayor consumo, exceptuando la hélice de 2 palas. Ya que la diferencia en las demás distancias entre configuración sencilla y coaxial fue menor, debido al cambio en el perfil de velocidades percibido por la segunda hélice para dicha distancia.
- El flujo en un sistema coaxial de manera estática, aumenta un 40 % en comparación a un sistema sencillo en el mismo estado.

REFERENCIAS

- [1] Cerpa, R., Mónico, L., Cortés, D., Mustafá, S., & Bonilla, A. (2016). Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible. *Revista Ingenium*, 33.
- [2] Coleman, Colin P. (1997). *A survey of theoretical and experimental coaxial rotor aerodynamic research*. Moffett field, California, E. U. recuperado de <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970015550.pdf>
- [3] Rc Juampa (2015). *Hélices tipo pusher*. Buenos Aires, Republica de Argentina. Recuperado de www.rcjuampa.com.ar/index.php?manufacturers_id=17
- [4] Department of mathematics York University (2004). *Table of Taguchi Design (Orthogonal arrays)*. Heslington, York, UK. Recuperado de <http://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/l16b.htm>