

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

METODO PARA CARACTERIZAR MOTORES BRUSHLESS ORIENTADO AL DISEÑO DE UAV

Yuranny López Borja

Alix Andrés Giraldo Gallego

Ingeniería Electrónica

Juan Sebastián Botero Valencia

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2015

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

RESUMEN

En los últimos años los vehículos aéreos no tripulados, UAV por siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicle), han demostrado gran versatilidad y potencial en distintas aplicaciones como: vigilancia, monitoreo, reconocimiento militar y hasta labores de rescate, disminuyendo costos y previniendo el riesgo de pérdidas humanas en acciones militares y civiles. Estos vehículos son capaces de mantener un nivel de vuelo controlado, sostenido, y propulsado gracias a los motores eléctricos típicamente brushless. La falta de información detallada sobre estos motores los cuales son ideales para UAV's no permite seguir patrones tradicionales de diseño, además tampoco se encuentran caracterizaciones reunidas que orienten al diseñador que se enfrente con un proyecto de este tipo. Con este trabajo se pretende recopilar, organizar y dejar consignada información acerca de las características y funcionalidad sobre estos motores de una manera minuciosa a partir de fuentes documentales con el fin que puedan ser utilizados para un excelente diseño de UAV's.

Palabras clave: Motores brushless, par, velocidad, propellers.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

RECONOCIMIENTOS

En primer lugar agradecer a Dios quien nos ha dado la salud y la sabiduría necesaria para llevar a cabo este trabajo de grado y culminar con éxito nuestros estudios; agradecer a nuestras familias las cuales han sido un gran apoyo emocional y de motivación para no perder la fe en nuestras capacidades.

Este trabajo no había podido ser posible sin la ayuda del docente Juan Sebastián Botero, el cual con su amabilidad y disposición nos brindó la asesoría pertinente para este trabajo, su amplio conocimiento y experiencia nos permitió sacar adelante este proyecto.

Por último no siendo el menos importante agradecer a nuestra universidad el Instituto Tecnológico Metropolitano, institución que nos acogió ampliamente y nos proporcionó todo el conocimiento y sabiduría de la que hoy podemos gozar, gracias al ITM hoy podemos decir que somos mejores personas y que somos unos profesionales preparados para enfrentar el mundo laboral y siempre dispuestos al servicio de la humanidad. Muchas gracias a todas las personas que de una u otra forma nos aportaron grandes cosas en nuestro camino hacia la profesionalización que hoy podemos palpar.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

ACRÓNIMOS

UAV Vehículo Aéreo no Tripulado

DC Corriente Directa

FAA Administración Federal de Aviación

UAS Sistema de aeronave no tripulada

Kv kilovoltio en el sistema internacional de unidades

BLDC Motores de corriente continua brushless

PMDC Motores de imanes permanentes

AC Motor de corriente alterna

RPM Revoluciones por minuto

APC Model Airplane Propellers

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Generalidades.....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Organización de la tesis.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Motores eléctricos.....	11
2.2. Motores brushless	11
2.3. Componentes del motor brushless:	12
2.4. Funcionamiento del motor brushless:	13
2.5 motor brushless y el aeromodelismo:.....	14
2.6 UAV o (Vehículo aéreo no tripulado):	14
3. METODOLOGÍA PROPUESTA	16
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	18
4.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA BRUSHLESS (BLDC).....	18
4.2. CONFIGURACION BASICA DE LOS MOTORES BRUSHLESS.....	21
4.2.1. MOTOR DE ROTOR EXTERNO	22
4.2.2. MOTOR DE ROTOR INTERNO.....	23
4.3. PERFILES DE VELOCIDAD	24
4.3.1. Aceleración-Motor Sometido a una tensión de paso	25
4.3.2. Aceleración-Motor sometido a una tensión en rampa.....	27
4.3.3. Desaceleración conduce en circuito abierto o en cortocircuito	27
4.4. Regulación de velocidad.....	28
4.4.1. Regulación de velocidad en los motores brushless DC.....	29
4.5 HÉLICES, TIPOS Y USOS.....	29
4.6. ARQUITECTURA DE MOTORES BRUSHLESS	32
4.6.1. OUTRUNNER:.....	32
MOTOR EMAX CF2805 - 2840kV.	32
MOTOR EMAX GT2203 - 1550kV.....	34
MOTOR EMAX GT2215/09 - 1180KV	35

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

4.6.2. INRUNNER	36
MOTOR EMAX B2445/6 - 3650KV	36
MOTOR EMAX B2846/10 -3200KV	37
MOTOR EMAX B2856/8 - 3400KV	38
4.7. CALCULO DE UNA HÉLICE	39
4.8. CALCULO DEL EMPUJE.....	40
Forma expandida.....	43
Forma simplificada	43
5. CONCLUSIONES,RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	45
REFERENCIAS.....	47
APENDICE.....	48
Funcionamiento de la macro en Excel.....	48
Código fuente de la macro en Excel.....	50

FIGURAS

Fig.1. Motor Brushless DC [6].....	12
Fig.2. Componentes motor brushless [7]	13
Fig.3. Ejemplo UAV [10].....	15
Fig.4. Motor BLDC. [1]	19
Fig.5. Conjunto de rotor BLDC. [1]	19
Fig.6. Rotor que muestra las transiciones de polos magnéticos BLDC. [1].....	20
Fig.7. conjunto de estator BLDC. [1].....	20
Fig.8. conjunto de rotor con imanes de segmentos de núcleo BLDC. [1]	21
Fig.9. Despiece de motor Brushless DC. [2]	21
Fig.10. Rotor del motor BLDC y montaje del estator. [1].....	22
Fig.11. Diagrama estator BLDC. Rotor- Externo. [1].....	23
Fig.12. Motor monofásico de rotor interno. [1].....	24
Fig.13. Curva de velocidad del motor de par mostrando excesiva tercera cúspide armónica. [1]	25
Fig.14. Hélice [4]	30
Fig.15. Hélice de paso variable [4].....	31

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Fig.16. Diagrama de dimensiones [5]	32
Fig.17. Diagrama de dimensiones [5]	34
Fig18. Diagrama de dimensiones [5]	35
Fig.19. Diagrama de dimensiones [11]	36
Fig.20. Diagrama de dimensiones. [11]	37
Fig.21. Diagrama de dimensiones. [11]	38
Fig.22. Dirección y sentido de empuje. [3].....	42
Fig.23. Calculo de empuje dinámico.....	49
Fig.24.Resultados Calculo de empuje dinámico.....	49

TABLAS

Tabla.1. Aplicaciones rotor interno Vs rotor externo. [1]	24
Tabla.2. Especificaciones del motor CF2805-2840KV. [5]	33
Tabla.3. Especificaciones del motor GT2203-1550KV. [5]	35
Tabla.4. Especificaciones del motor GT2215/09-1180KV. [5].....	36
Tabla.5. Especificaciones del motor B2846/10-3650KV. [11]	37
Tabla.6. Especificaciones del motor B2846/10-3200KV. [11]	38
Tabla.7. Especificaciones del motor B2856/8-3400KV. [11]	39

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la actualidad varias empresas civiles trabajan para transformar este artilugio militar en una herramienta útil para la sociedad civil. A lo largo de los años muchos han visto en esta nueva tecnología una herramienta fundamental para una sociedad civil lejos de los campos de batalla. Las aplicaciones de estos UAV's civiles o drones son cada vez mayores. Desde la prevención de los incendios forestales que devastan los bosques de medio mundo, la vigilancia de fronteras, el control de grandes infraestructuras industriales como los oleoductos o labores de vigilancia y control en aquellas zonas catastróficas en las que un avión convencional pondría en riesgo las vidas de sus tripulantes (desastres químicos o nucleares). A esta versatilidad se une un coste económico mucho menor por operación del que en la actualidad tienen los sistemas más tradicionales (aviones y helicópteros convencionales).

Teniendo en cuenta lo anterior si quisiéramos elaborar dicha aeronave tendríamos que consultar en los diferentes archivos existentes donde no se encuentra la información de una manera detallada sobre los componentes eléctricos ideales para cada parte del modelo al momento de su fabricación ya que en la actualidad en un solo documento no es posible encontrar toda la información, volviendo más tediosa su elaboración.

Se encuentra la necesidad de contribuir al diseño de uav's mediante la unificación y consolidación en un solo documento de las características y funcionalidades de los motores brushless, componente principal de estas aeronaves permitiendo que al momento de su creación sea más fácil la escogencia de los motores a utilizar de acuerdo a la necesidad que se requiera en la aeronave no tripulada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Este estudio se realiza debido a la necesidad de obtener información acerca de estos componentes eléctricos agrupada en un solo trabajo de tal manera que pueda ser analizada y aplicada a una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características en el diseño de los UAV.

Con la información meticulosa de los motores brushless componente principal de estos vehículos da pie para que se fortalezca la elaboración de la aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo y se realicen autoevaluaciones que conlleven al mejoramiento continuo del prototipo, de igual forma se permite evaluar los procesos de diseño a través de grupos de investigación, instituciones e investigadores. Si se tiene claro lo consignado en este trabajo con respecto al diseño y escogencia de los motores ideales se podrá tomar acciones que logren el incremento y calidad del vehículo aéreo no tripulado permitiendo de esta manera un crecimiento en su implementación y contribución al desarrollo del país. Un prototipo bien diseñado es más atractivo y funcional.

1.2 Objetivos

General

Crear una base de datos detallada sobre la caracterización y funcionalidad de los motores brushless que permita determinar con más facilidad cual elegir al momento de diseñar UAV's.

Específicos

- Generar un modelo de selección de motores brushless que permita satisfacer los requerimientos de carga de un UAV.
- Documentar las especificaciones técnicas de los diferentes motores utilizados en la fabricación de los UAV's.
- Recolectar en una base de datos información confiable y de calidad sobre los motores eléctricos sin escobillas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

1.3 Organización de la tesis

Esta tesis se desarrolla de la siguiente manera:

En el Marco Teórico se relacionan conceptos importantes tratados en el proyecto, con el propósito de que el lector se familiarice con el tema, permitiendo una mayor comprensión de la terminología técnica implementada en este trabajo de investigación. En la metodología se indica cada una de las actividades que se llevaron a cabo para dar cumplimiento a los objetivos planteados desde un inicio. En la parte de resultados y discusión se disponen toda la información requerida para la caracterización de motores brushless orientado al diseño de uav dando como origen a la base de datos que es nuestro objetivo principal, todo ello en conjunto con la macro en excel que permite calcular de manera automática el empuje, dan fe del trabajo que se ha hecho permitiendo identificar si se ha logrado lo propuesto. En las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro se presenta en síntesis que se ha logrado con la elaboración de este trabajo de grado, indicando cuales fueron las fortalezas, dificultades y tropiezos que se tuvieron, dando paso a otros estudios a partir del presente. En las referencias se incluyen las páginas web, los libros y artículos que sirvieron de guía y que son soporte de toda la información que en este documento reposa. Finalmente en el apéndice se pueden encontrar los anexos o en este caso funcionamiento de la macro la cual permite ampliar y/o aclarar temas que fuesen inconclusos en su momento.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Motores eléctricos

Los motores eléctricos como sistema de propulsión de aeromodelos, se vienen utilizando desde hace muchos años, si bien no ha sido hasta finales del siglo pasado cuando, gracias a los avances realizados en las baterías, la verdadera la verdadera viabilidad de estos motores ha alcanzado o incluso superado a los motores de combustión.

2.2. Motores brushless

Un motor brushless o motor sin escobillas es un motor eléctrico que no dispone de escobillas para realizar la excitación en el rotor necesitando un control electrónico externo para ese fin, los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos.

Esta propiedad de los motores sin escobillas elimina los problemas que traía tener un colector de delgas o un par de anillos rasantes. Estos mecanismos de excitación al rotor disminuye el rendimiento de los motores debido a varias razones, tales como: producen fricción desprenden calor y partículas de carbón que se pueden impregnar en el motor pudiendo ser conductor, emanan ruido y necesitan mucho mantenimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14



Fig.1. Motor Brushless DC [6]

Los motores brushless tienen muchas ventajas frente a los motores DC con escobillas y frente a los motores de inducción.

Algunas de estas ventajas son:

- Mejor relación velocidad-par motor
- Mayor respuesta dinámica
- Mayor eficiencia
- Mayor vida útil
- Menor ruido
- Mayor rango de velocidad

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se puedan emplear en aplicaciones donde se trabaje con espacios reducidos. [6]

2.3. Componentes del motor brushless:

Los motores brushless están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes, y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. La imagen refleja

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

una sección de uno de estos motores en donde puede verse la disposición de los bobinados y los imanes permanentes (que en este caso son de neodimio).

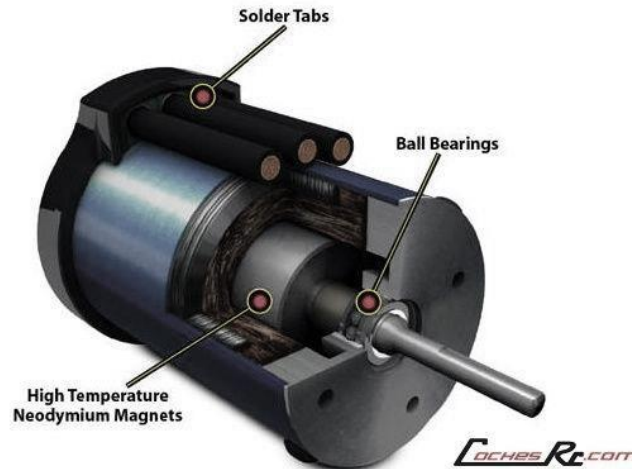


Fig.2. Componentes motor brushless [7]

2.4. Funcionamiento del motor brushless:

Como su propio nombre indica, brushless quiere decir "sin escobillas". En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator o carcasa, por lo tanto aquí no son necesarios ni las escobillas ni el colector que se utilizan en los brushed. Esta corriente eléctrica genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor.

No tenemos ni escobillas, ni colector y tampoco tenemos delgas; por lo que ahora el elemento que controlará que el rotor gire sea cual sea su posición será el variador electrónico; que lo que hace básicamente es ver en qué posición se encuentra el rotor en cada momento, para hacer que la corriente que le llegue sea la adecuada para provocar el movimiento de rotación que le corresponde. El variador es capaz de hacer esto, gracias a unos sensores en el motor, o también mediante la respuesta obtenida o mejor dicho,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

observación de cómo se comporta la corriente del motor. Por este motivo, los variadores empleados en este tipo de motores son algo más complicados que los utilizados en brushed, ya que deben analizar la respuesta y los datos de funcionamiento del motor según están teniendo lugar, es decir, en tiempo real. [7]

2.5 motor brushless y el aeromodelismo:

De especial relevancia para el aeromodelismo son los nuevos motores trifásicos o brushless de gran rendimiento y bajo consumo.

Estos motores se construyen de dos maneras:

Inrunner o de rotor interno: fueron los primeros en aplicarse al aeromodelismo, en ellos el bobinado está en la carcasa exterior, mientras que el rotor se encuentra en el interior, son los que tienen menor diámetro y menor par pero mayor velocidad de giro, su uso principal, actualmente está en las turbinas y la propulsión por hélice con reductoras de engranaje, especialmente los planetarios

Outrunner o de carcasa giratoria: Toman como modelo los motores utilizados en informática, en los que los imanes permanentes están dispuestos en un anillo alrededor de un grupo de bobinas dispuestas de forma radial, estos motores son de mayor diámetro, el par es muy superior, y, trabajan a unos regímenes que permiten la utilización directa de las hélices, incluso con diámetros bastante grandes en relación al peso del conjunto para aplicarlos a cualquier especialidad del aeromodelismo. [8]

2.6 UAV o (Vehículo aéreo no tripulado):

El UAV es un acrónimo de vehículo aéreo no tripulado, que es un avión sin piloto a bordo. UAVs pueden ser aviones de control remoto (por ejemplo, piloteado por un piloto en una estación de control de tierra) o pueden volar de forma autónoma basada en pre-programado planes de vuelo o sistemas de automatización dinámica más compleja. UAVs se utilizan actualmente para una serie de misiones, incluidas las funciones de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

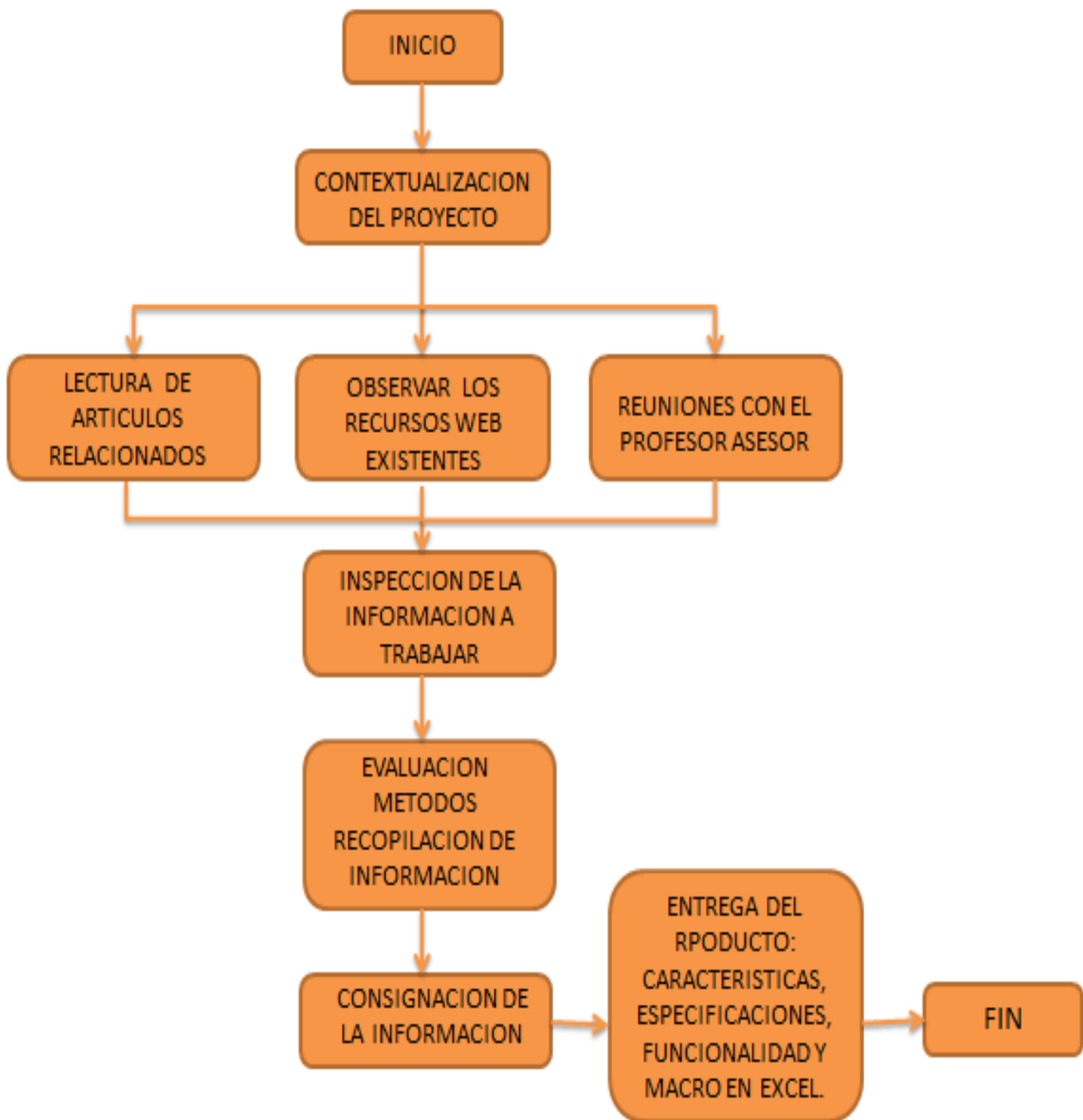
reconocimiento y ataque. El UAV sigla se ha ampliado en algunos casos a UAVS (Unmanned Aircraft System Vehicle). La FAA ha adoptado los UAS acrónimo (sistema aéreo no tripulado) para reflejar el hecho de que estos sistemas complejos incluyen estaciones de tierra y otros elementos, además de los vehículos aéreos reales.

Oficialmente, el término "vehículo aéreo no tripulado" fue cambiado a "Sistemas Aéreos no Tripulados" para reflejar el hecho de que estos sistemas complejos incluyen estaciones de tierra y otros elementos, además de los vehículos aéreos reales. El término UAS, sin embargo, no es ampliamente utilizado como el término UAV se ha convertido en parte del léxico moderno. [9]



Fig.3. Ejemplo UAV [10]

3. METODOLOGÍA



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Inicialmente se hará una contextualización general del tema a través de lecturas de artículos relacionados con el proyecto que proporcionen una mayor claridad de los conceptos a tratar, se procederá a examinar en las páginas web contenido relacionado que será de gran ayuda al momento de generar el producto. Obtener orientación a través de las reuniones realizadas con el profesor asesor quién aclarará las dudas generadas.

Se continuara con la inspección de la información con la cual se trabajará y la manera en la que está dispuesta con el fin de darle un mejor manejo garantizando que sea más comprensiva y útil para el diseñador.

Teniendo claro el objetivo a alcanzar se procederá a analizar y estudiar el método que permitan mayor facilidad y efectividad en la concentración de la información relacionada con los motores bushelles para el diseño de los uav's.

Posteriormente a la evaluación de los métodos propuestos para la recopilación de la información, se procederá con la selección del instrumento que se considere más apropiada para este fin, se empezará con la definición de los motores brushless, seguidamente consignar la descripción y su adecuada utilización de estos dentro de la fabricación de la aeronave no tripulada.

El proyecto permitirá reunir las características de los diferentes motores eléctricos sin escobillas, sus especificaciones como: modelo, Kv (rpm/v), corriente, peso, fuerza, diámetro entre otras determinaciones que son necesarias al momento de su diseño y creación; así como su adecuada función dentro del modelo. De la manera en que se conceptualice la información se garantiza la confiabilidad y calidad de los diseños futuros.

Teniendo claro el objetivo a alcanzar se procedió a desarrollar la automatización del cálculo de empuje dinámico mediante una macro en Excel, la cual permite calcular su valor en cinco diferentes unidades, proporcionando de una manera más ágil la adecuada elección del conjunto motor- hélice.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Luego de haber terminado el desarrollo del aplicativo y evaluado la manera en que queda consignada la información, se obtuvo un documento bien detallado y descriptivo que ayudara a al mejoramiento y al diseño con calidad de estas versátiles aeronaves.

Finalmente se procede a entregar el producto con el fin de ser estudiado y evaluado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA BRUSHLESS (BLDC)

Los Motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) se llaman así porque tienen una línea de velocidad-par largamente lineal igual que sus homólogos de conmutación mecánica, de corriente continua (PMDC) motores de imanes permanentes. En los motores PMDC, los imanes son estacionarios y las bobinas portadoras de corriente giran. La dirección de la corriente es cambiada a través del proceso de conmutación mecánica.

En los motores BLDC (Fig.1), los imanes giran y las bobinas portadoras de corriente son estacionarias. La dirección de la corriente es conmutada por los transistores. La sincronización de la secuencia de conmutación es establecida por algún tipo de sensor de rotor-posición. Un conjunto de rotor típico para una configuración de rotor- interior con sensores y el imán de conmutación se muestra en la Fig.2. Se colocan el imán al lado de la rueda de mayor diámetro, lo que provoca que el interruptor cambie entre alto y bajo a medida que la rueda gira de norte a sur. La posición angular de los dispositivos Hall se ajusta para proporcionar el ángulo de disparo óptimo para la aplicación. La Figura.3. muestra a través de la película de visión de campo magnético la posición relativa de la zona de transición imán motor con respecto al dispositivo de Hall. El conjunto de estator para esto se muestra en la Fig.4. Este motor tiene un imán de anillo plástico sólido de baja energía con polos magnéticos superpuestos en él.

Otro tipo de motor tiene un rotor con imán de arcos sólidos, como se muestra en la Fig.5.

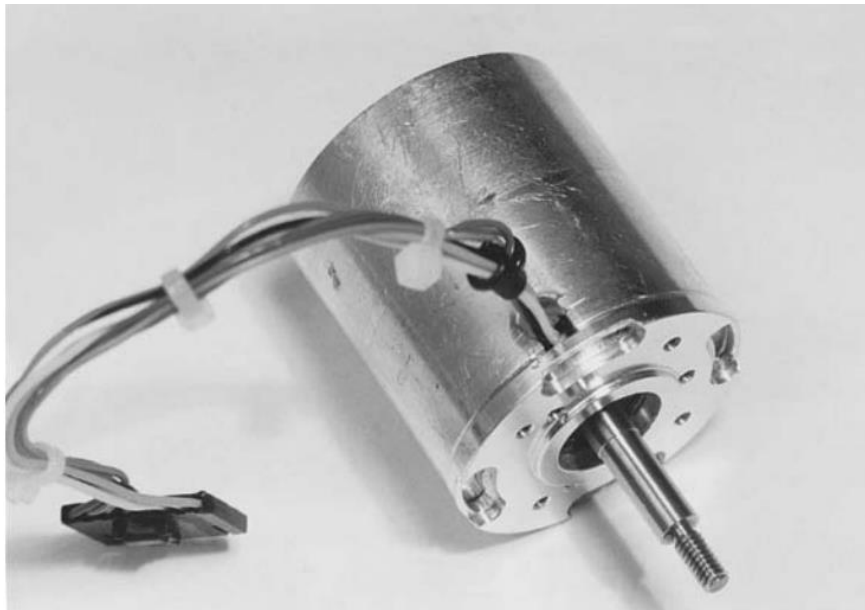


Fig.4. Motor BLDC. [1]

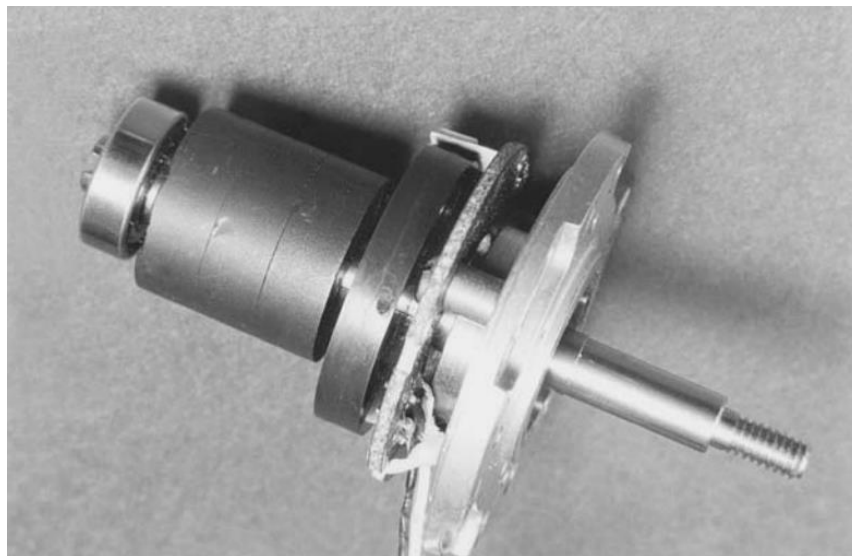


Fig.5. Conjunto de rotor BLDC. [1]



Fig.6. Rotor que muestra las transiciones de polos magnéticos BLDC. [1]

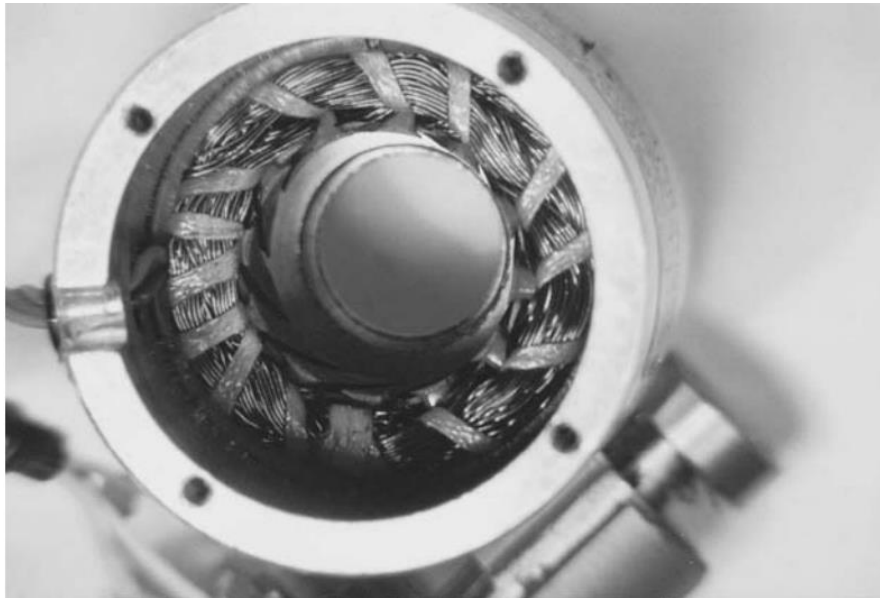


Fig.7. conjunto de estator BLDC. [1]

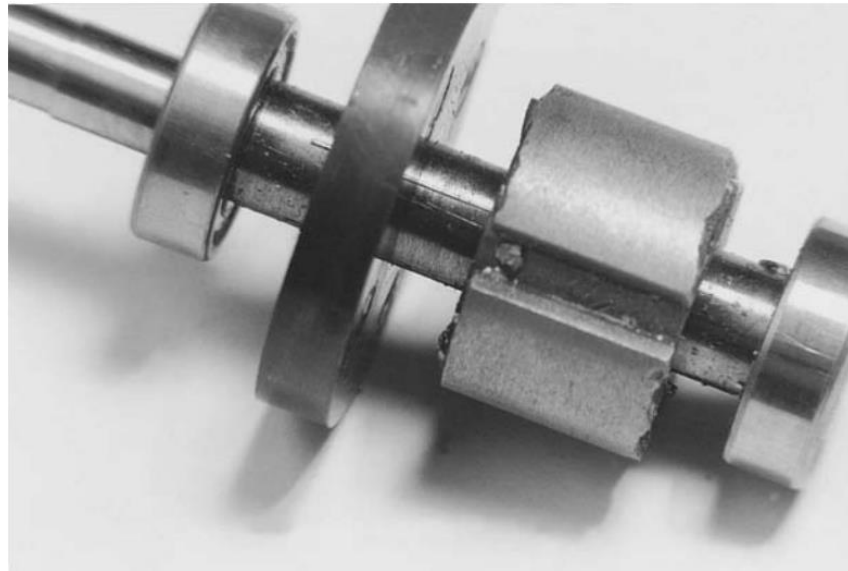


Fig.8. conjunto de rotor con imanes de segmentos de núcleo BLDC. [1]

4.2. CONFIGURACION BASICA DE LOS MOTORES BRUSHLESS

La construcción de motores DC sin escobillas modernos es muy similar a la de los motores AC.

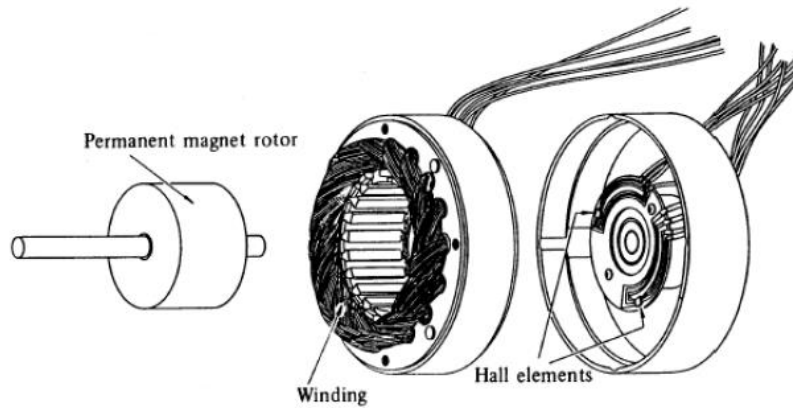


Fig.9. Despiece de motor Brushless DC. [2]

El rotor es un elemento magnético permanente y el estator está formado por embobinados al igual que un motor AC de varias fases. La gran diferencia de estos dos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

tipos de motores es la forma de detectar la posición del rotor, para poder saber cómo se encuentran los polos magnéticos y así generar la señal de control mediante switches electrónicos.

Este censado de la ubicación de los polos magnéticos en los motores DC sin escobillas normalmente se hace con sensores de efecto Hall, aunque existen modelos que utilizan sensores ópticos, que funcionan de manera similar a los encoders.

Los motores sin escobillas de corriente continua se pueden clasificar en dos categorías básicas de acuerdo a su estructura:

- Los motores de rotor externo.
- Los motores de rotor interno.

4.2.1. MOTOR DE ROTOR EXTERNO. Estos motores se utilizan generalmente donde hay relativamente alta inercia del rotor, es beneficioso para el rendimiento del sistema. Las aplicaciones más comunes son las unidades de disco de ordenador y ventiladores de refrigeración

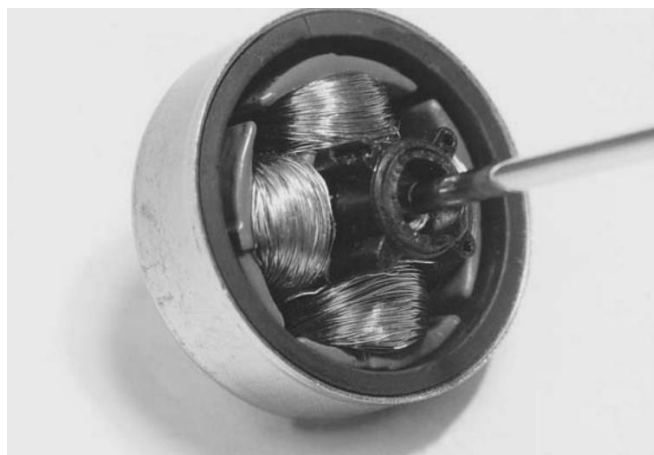


Fig.10. Rotor del motor BLDC y montaje del estator. [1]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

4.2.2. MOTOR DE ROTOR INTERNO. Si uno simplemente invierte el motor de rotor exterior diagramado en la figura. 7, el dispositivo que se muestra en la Fig. 8 es el que se genera. Este es también un dispositivo de una sola fase, y operaría de la misma manera que el motor de rotor exterior. Hay que hacer algunas observaciones sobre estos motores. El motor de rotor exterior tiene material mucho más magnético que el dispositivo de rotor interno, que significa que es capaz de dar más flujo cuando se utilizan materiales idénticos.

Sería necesario utilizar un imán de alta energía para obtener el mismo rendimiento de un motor de rotor interior. La inercia del motor-rotor interior es menor, debido a su diámetro de rotor más pequeño, Por lo tanto, se acelera más rápidamente que el motor de rotor exterior.

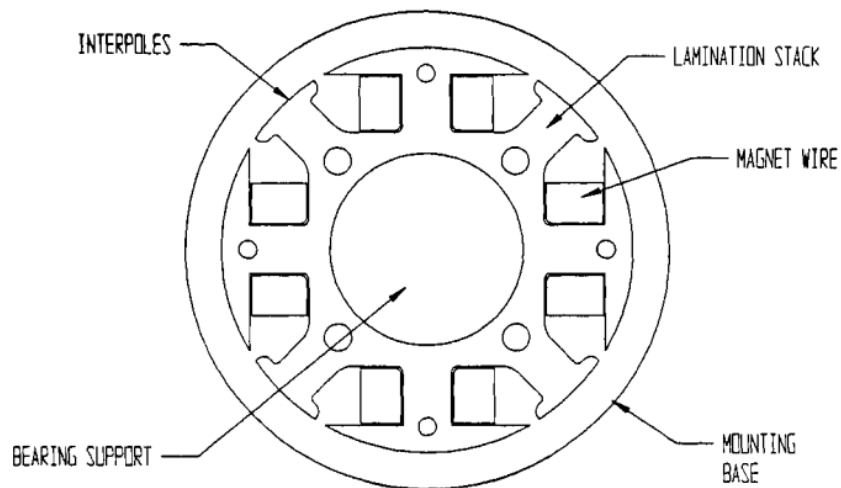


Fig.11. Diagrama estator BLDC. Rotor- Externo. [1]

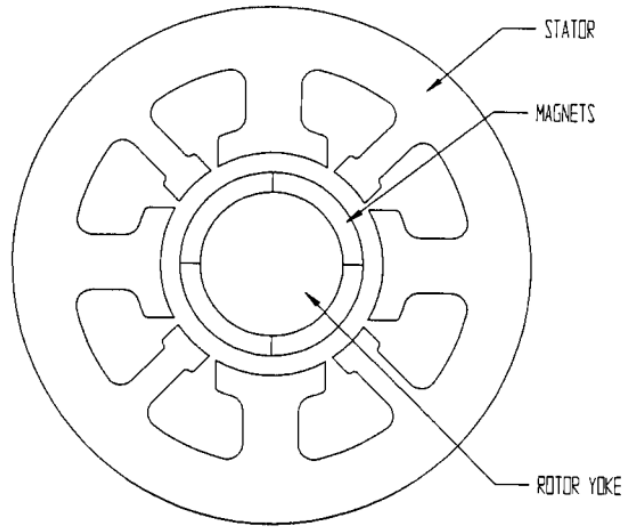


Fig.12. Motor monofásico de rotor interno. [1]

Tabla.1. Aplicaciones rotor interno Vs rotor externo. [1]

REQUISITO	ROTOR -INTERNO	ROTOR-EXTERNO
Aceleración rápida	Muy buena	Malo
Disipación de calor	Muy buena	Malo
Bajo cogging	Bueno	Bueno
Aplicación de la bomba	Bueno	Bueno
Aplicación disco duro	Malo	Muy bueno
Aplicación ventilador	Malo	Muy bueno
Carga lateral alta	Bueno	Malo
Utilización de reductores de velocidad	Bueno	Malo a Bueno
Reversible	Muy bueno	Malo

4.3. PERFILES DE VELOCIDAD

Muchos dispositivos requieren que el motor se adapte a una carga cambiante, cambiar la velocidad dentro de cierto tiempo o detenerse y cambiar de dirección. Durante la aceleración y desaceleración, se requiere par de torsión adicional en exceso del par

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

normal de marcha para superar la inercia del motor y el sistema. Los pares y corrientes necesarias para llevar a cabo estos movimientos o cambios pueden generalmente determinarse de la siguiente manera para los motores de corriente continua con velocidad lineal, el par, y las características actuales.

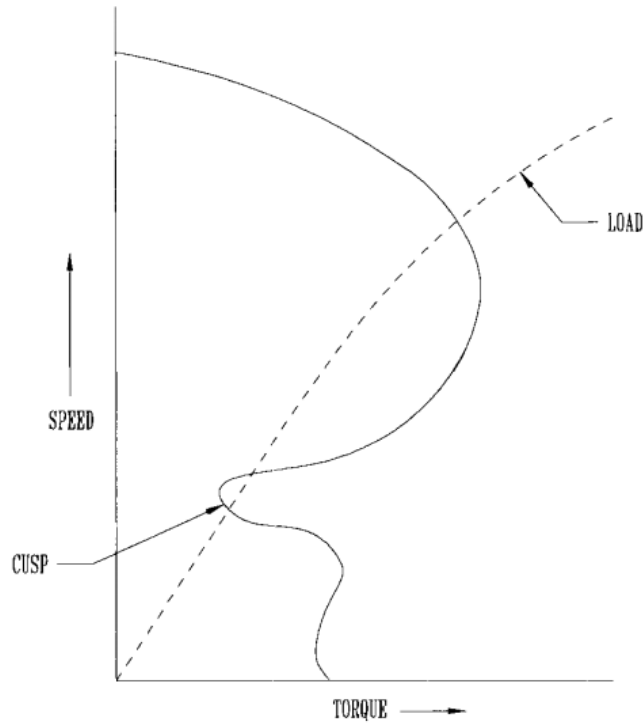


Fig.13. Curva de velocidad del motor de par mostrando excesiva tercera cúspide armónica. [1]

4.3.1. Aceleración-Motor Sometido a una tensión de paso

Para encontrar la velocidad S en un tiempo conocido t :

$$S = S_{nl} \left(1 - \frac{T_L}{T_{st}} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right) \right]$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Dónde:

S_{nl} = sin carga de velocidad

T_L = par de carga, oz · en

T_{st} = par de bloqueo del motor, oz · en

T_m = motor constante de tiempo mecánica

t = tiempo, s

Método alternativo:

$$s = \frac{1}{0.1047K_d} \left[(E_t - V_{br}) \frac{K_t}{R_t} - T_L \right] \left[1 - \exp\left(\frac{K_d}{J_t}\right) \right]$$

Dónde:

E_t = tensión en los bornes

V_{br} = caída de tensión cepillo

K_d = cero impedancia de la fuente coeficiente de amortiguamiento (lleva en corto), g · en s

J_t = rotor más inercia de la carga, oz · · en s

J_t = constante de par, (oz · in) / A

(V_{br} Se resta sólo en el caso de un motor de corriente continua de tipo brush)

Para encontrar la tasa de cambio en la velocidad en un tiempo conocido t:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{S_{nl}}{T_m} \left(1 - \frac{T_L}{T_{st}} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right)$$

Para encontrar el número de revoluciones Rv en un tiempo conocido t:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

$$R_v = \frac{S_{nl}}{60} \left(1 - \frac{T_L}{T_{st}}\right) \left\{ t - T_m \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right) \right] \right\}$$

4.3.2. Aceleración-Motor sometida a una tensión en rampa

Para encontrar la velocidad en un tiempo conocido t:

$$S = \frac{E_s}{0.001K_b} \left\{ t - T_m \left[1 - \exp\left(\frac{t}{T_m}\right) \right] \right\}$$

Donde:

K_b = constante de back-fem, V / krpm

E_s = pendiente de la rampa de tensión, V / s

Para encontrar la tasa de cambio en la velocidad en un tiempo conocido t:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{E_s}{0.001K_b} \left[1 - \exp\left(\frac{t}{T_m}\right) \right]$$

Para encontrar el número de revoluciones Rv en un tiempo conocido t:

$$R_v = \frac{E_s}{(0.001)(60)K_b} \left(\frac{t^2}{2} - T_m \left\{ t - T_m \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right) \right] \right\} \right)$$

4.3.3. Desaceleración conduce en circuito abierto o en cortocircuito

Para encontrar la velocidad en un tiempo conocido t:

$$S = \frac{(T_{ft} + 0.1047 K_x S_o) \exp\left(\frac{K_x}{J_t} t\right) - T_{ft}}{0.1047 K_x}$$

T_{ft} = fricción del motor además de la fricción de la carga, en onzas ·

$K_x = K_f$ (conduce en circuito abierto)

$K_x = K_d + K_f$ (lleva en cortocircuito)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

K_f = impedancia fuente infinita (conduce en circuito abierto) coeficiente de amortiguación, oz · en s

S_o = velocidad, rpm, en el tiempo $t = 0$

Para encontrar la tasa de cambio en la velocidad en un tiempo conocido t :

$$\frac{ds}{dt} = - \left[\frac{T_{ft} + (0.1047 K_x S_o)}{0.1047 J_t} \right] \exp \left(- \frac{K_x}{J_t} t \right)$$

Es hora de dejar t_s , s:

$$t_s = \frac{J_t}{K_x} \ln \left(1 + \frac{0.1047 K_x S_o}{T_{ft}} \right)$$

Para encontrar el número de revoluciones R_v en un momento t conocido a un tiempo máximo para detener a t_s :

$$R_v = \frac{J_t}{60 K_x} - \left(\frac{T_{ft}}{0.1047 K_x} + S_o \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{K_x}{J_t} t_s \right) \right] \frac{T_{ft} t_s}{(60)(0.1047) K_x}$$

4.4. Regulación de velocidad

La velocidad (n_m) del motor de corriente continua se regula fácilmente variando la tensión de alimentación (U). Esto es aplicable a motores con o sin escobillas (brushless). Estos últimos necesitan una electrónica de control de la conmutación. La constante de velocidad (K_n), propia de cada bobinado, determina la velocidad de giro del motor en función del voltaje de alimentación.

$$n_m = K_n * U$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

4.4.1. Regulación de velocidad en los motores brushless DC.

El bobinado del motor de continua brushless, se basa en la agrupación de tres bobinas, colocadas eléctrica- mente a 120° para generar el campo magnético giratorio del motor. La etapa de con- trol y potencia difiere totalmente de un motor de escobillas. El motor necesita, obligatoriamente, esta electrónica de control para su funcionamiento.

La conmutación secuencial de estas bobinas se basa en las señales de la posición del rotor, generadas por los sensores Hall. Si la conmutación de estas bobinas se realiza por una electrónica de conmutación en bloque, se pueden alcanzar pares más elevados en el arranque, y si la conmutación es senoidal, el funcionamiento del motor es más suave y el par en funcionamiento en continuo es mayor.

4.5 HÉLICES, TIPOS Y USOS

La hélice es un dispositivo mecánico formado por un conjunto de elementos denominados palas o álabes, montados de forma concéntrica y solidarias de un eje que, al girar, las palas trazan un movimiento rotativo en un plano. Las palas no son placas planas, sino que tienen una forma curva, sobresaliendo del plano en el que giran, y obteniendo así en cada lado una diferencia de distancias entre el principio y el fin de la pala. Provocando una diferencia de velocidades entre el fluido de una cara y de la otra. Según el principio de Bernoulli esta diferencia de velocidades conlleva una diferencia de presiones, y por lo tanto aparece una fuerza perpendicular al plano de rotación de las palas hacia la zona de menos presión. Esta fuerza es la que se conoce como fuerza propulsora de una aeronave.

La hélice es el elemento físico que se conecta o instala en el eje de motor. El motor se encargara de hacer girar la hélice entre 2500 revoluciones por minuto hasta 22.000 revoluciones por minuto para ejercer la fuerza de atracción del aire, Las revoluciones dependerán del modelo y capacidad del motor. Cada motor dependiendo de la capacidad y fuerza, tendrá una hélice ideal y específica para el motor, no se podrán instalar hélices al azar. Si se instala una hélice muy pequeña el motor se sobre revolucionara causando

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

efectos negativos y por el contrario, si se le coloca una hélice muy grande entonces el motor le faltara fuerza.



Fig.14. Hélice [4]

La nomenclatura establecida para las hélices es importante reconocerlas. Básicamente en la parte central se encuentran dos números multiplicados por ejemplo: (12 X 8). El primer número (12) significa la longitud total de la hélice, diámetro de la hélice, el segundo número significa la curvatura o ángulo que tiene la hélice y es denominada paso.

El Paso de las hélices, es la curvatura o el ángulo que tiene la hélice. En la imagen siguiente se tienen dos ejemplos. Las líneas de color rojo, representan el flujo de aire que es interceptado por la hélice, la imagen de la izquierda tan solo intercepta tres líneas de flujo de aire y la imagen de la derecha intercepta 5 líneas de flujo de aire. Entonces se puede concluir que a mayor "PASO" mayor cantidad de líneas de flujo de aire intercepta la hélice, en consecuencia mayor será la cantidad de aire que se ponga en movimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14



Fig.15. Hélice de paso variable [4]

Desde el punto de vista del motor, la longitud y el paso de las hélices afectan el funcionamiento del motor; es decir, a mayor "PASO", mayor será la cantidad de aire interceptado por la superficie de la hélice (Resistencia)y en consecuencia el motor perderá algunas R.P.M; para el caso contrario, el motor ganara R.P.M.

Ahora si se analiza el parámetro de longitud, tenemos que a mayor longitud el motor perderá RPM y a menor longitud el motor ganara algunas RPM. Por ejemplo si tenemos dos motores con exactamente las mismas características en fuerza, cilindrada, marca, etc. pero en el motor número uno se tiene una hélice de 12 X 7 y en el motor número 2 se tiene una hélice de 12 X 9, se observa claramente que ambos motores tienen la hélice con la misma longitud (diámetro = 12 Pulgadas); pero ambos motores tienen las hélices con diferente paso. El motor número uno que tiene la hélice con paso "7" tendrá mayor revoluciones pero menos agarre o atracción del aire que el motor numero dos que tiene una hélice de paso 9. De otro punto de vista, el motor numero dos que tiene una hélice de paso "9", tendrá menos revoluciones y más absorción de aire que el motor número uno.

También las hélices son fabricadas en dos variantes: Las hélices de alta eficiencia como las que fabrican la empresa reconocida APC; las hélices de uso general como las fabricadas por la empresa Master Airscrew.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Existen tan solo dos parámetros diámetro y paso que pueden variar en una gran cantidad de combinaciones y que puede fácilmente confundir y hacer cometer un error en seleccionar la hélice adecuada para un modelo, aunque esta decisión no es algo crítico siempre y cuando se encuentren dentro de los parámetros aceptables.

Como la hélice es diseñada para absorber la potencia desarrollada por el motor que la mueve, su tamaño y forma dependerá del tipo de motor utilizado. Los aviones de entrenamiento liviano tienen generalmente hélices biplanas, y los aviones de mayores performances, hélices de tres y cuatro palas. Investigaciones recientes para reducir el ruido de los aviones han demostrado las ventajas de utilizar hélices multipalas a velocidades más bajas, pues al reducir la velocidad de la hélice, en mayor grado cuanto mayor es el número de palas, se reduce el ruido y lo que es más importante, la velocidad de las puntas de la hélice.

4.6. ARQUITECTURA DE MOTORES BRUSHLESS

Características, especificaciones funcionalidad.

4.6.1. OUTRUNNER:

MOTOR EMAX CF2805 - 2840kv.

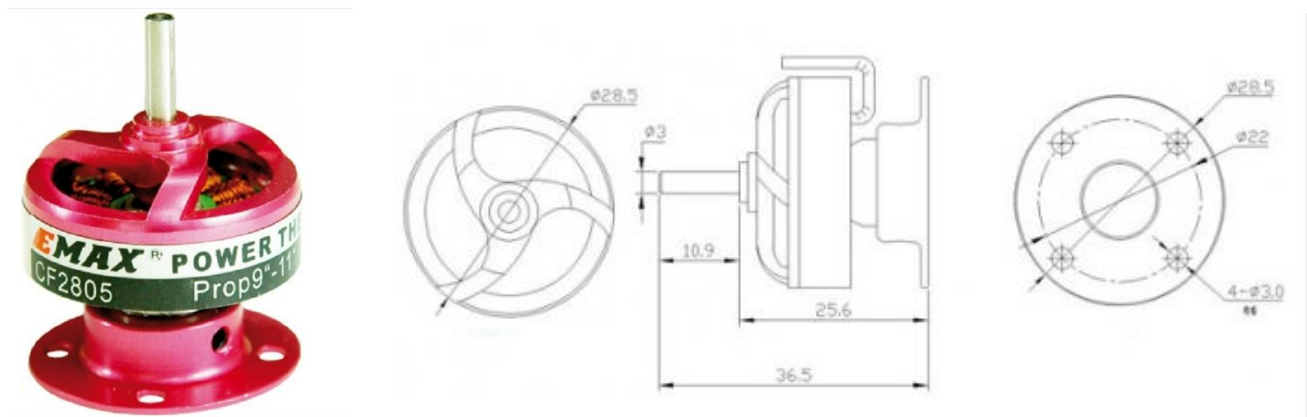


Fig.16. Diagrama de dimensiones [5]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Información

Voltaje: 7.4V.

Potencia: 133 W

RPM/V: 2840 kv.

Dimensiones: 22x10 mm

Diámetro del eje: 3mm.

Peso: 29 g

Peso del avión recomendado: 200-350 g

Protector de hélice para eje de 3mm.

Requiere:

Regulador Brushless 18A o superior

Batería LiPo 2s

Hélices recomendadas: 6x4, 7X4

Tabla.2. Especificaciones del motor. [5]

No. De células	2xLi-poly
Dimensiones del estator	22x5mm
Diámetro del eje	3mm
Peso	29g/1,02 oz
Peso modelo recomendado	200-300g
Prop recomendado sin caja de cambios	APC 7x4 APC 6x4

Modelo	Recuento de células	RPM/V	Prop (APC)	RPM	Corriente Max. (<60S)	Empuje
CF2805	2S	2840	6x4	13000	12 A	413g 0.91lb
			7x4	9900	14.4 A	381g 0.84lb

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

MOTOR EMAX GT2203 - 1550kV

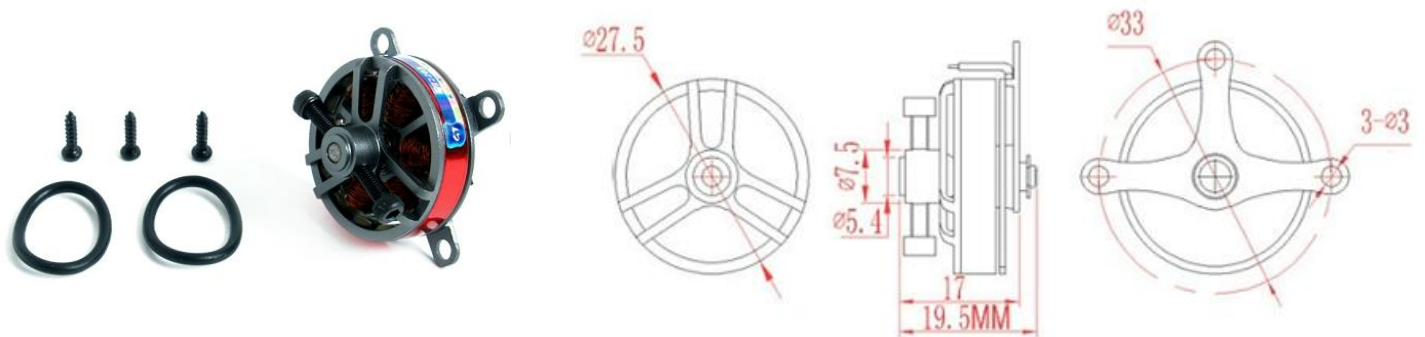


Fig.17. Diagrama de dimensiones [5]

Información:

Longitud: 16mm

Diámetro: 27.5mm

Peso: 15.8g

Prestaciones: 54W (KV: 1550)

Batería: Li-po 2S

Diámetro del Eje: 3mm

Peso del avión recomendado: 100-300g

Contiene tornillería y Aros de goma de sujeción para la hélice.

Requiere:

Regulador Brushless 7A o superior

Batería LiPo 2S

Hélices recomendadas: 8x3.8"

Tabla.3. Especificaciones del motor. [5]

No. De células	2xLi-poly	Modelo	Recuento de células	RPM/V	Prop (GWS)	RPM	Corriente Max. (<60S)	Empuje
Dimensiones del estator	22x3mm	GT2203	2S	1560	8x4.3	6500	6.8 A	310g 0.68lb
Diámetro del eje	3mm							
Peso	25.6g/0,55 oz							
Peso modelo recomendado	100-300g							
Prop recomendado sin caja de cambios	GWS 8x4.3							

MOTOR EMAX GT2215/09 - 1180KV

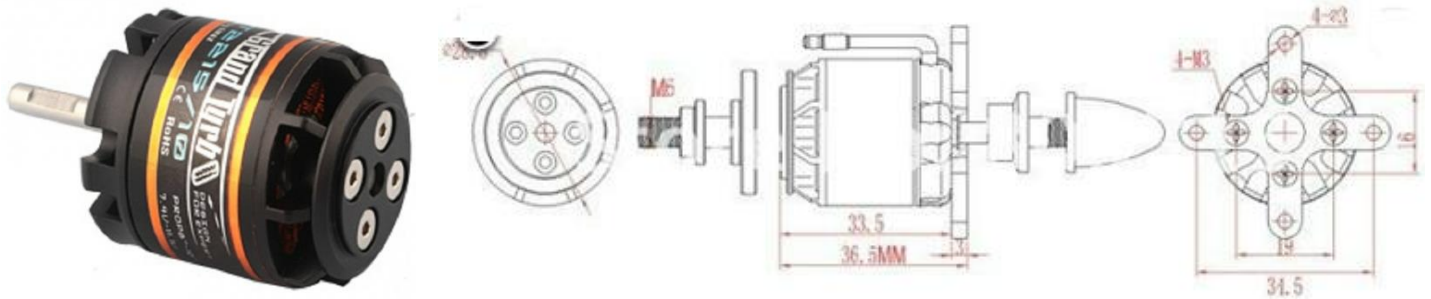


Fig18. Diagrama de dimensiones [5]

Información del producto:

Longitud: 33,5 mm.

Diámetro: 28,5 mm.

Peso: 70 gr.

KV: 1180

Voltaje: 7,4 - 11,1V.

Diámetro del Eje: 4mm

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Peso del avión recomendado: 300-1300g.

Tiene: Conectores banana 3mm. Soldados y hembras para el variador.

Porta hélices para eje de 4mm. y adaptador de hélice para parte trasera del motor.

Tornillería.

Requiere:

Regulador Brushless 30A o superior

Batería LiPo 2-3S

Hélices recomendadas: De 10x4,7" a 11x3.8"

Tabla.4. Especificaciones del motor. [5]

No. De células	2-3xLi-poly
Dimensiones del estator	22x15mm
Diámetro del eje	4mm
Peso	70g/2,46 oz
Peso modelo recomendado	300-1100g
Prop recomendado sin caja de cambios	10x4.7 11x3.8

Modelo	recuento de células	RPM/V	Prop (APC)	RPM	Corriente Max. (<60S)	Empuje
GT2215/12	3S	905	10x4.7	7450	15 A	1000g 2.20lb
	3S	905	11x3.8	7000	18A	1050g 2.31lb
GT2215/09	3S	1180	10x4.7	8300	26A	1250g 2.76lb
	3S	1180	10x6	8850	24A	1140g 2.52lb

4.6.2. INRUNNER

MOTOR EMAX B2445/6 - 3650KV

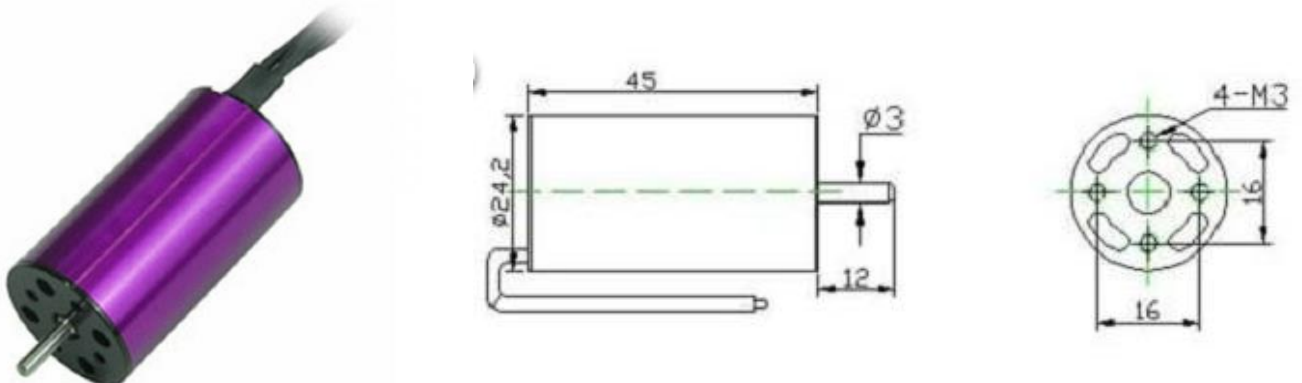


Fig.19. Diagrama de dimensiones [11]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Información:

B2445-6

nº de celdas: 2-4 li-poly

Rpm/v: 3650 rpm/v

Potencia: 326 w

Corriente máxima: 25 a

Dimensiones: 24,2x45 mm

Diámetro de eje: 3x12 mm

Peso: 89 g.

Tabla.5. Especificaciones del motor. [11]

Modelo	Voltaje (V)	KV (RPM/V)	Corriente (A)	Impedancia interna del motor (Ω)
B2445/6	7.4–14.8	3650	1.3	0.041

MOTOR EMAX B2846/10 -3200KV

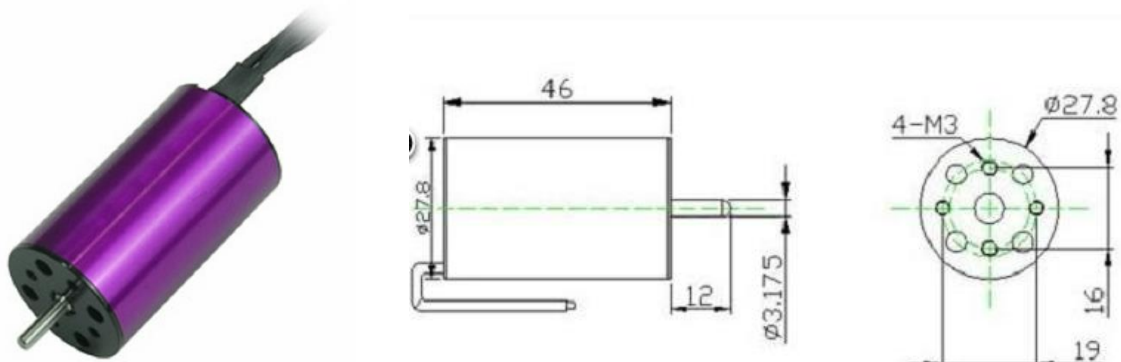


Fig.20. Diagrama de dimensiones. [11]

B2846-10

nº de celdas: 2-4 li-poly

rpm/v: 3200 rpm/v

Potencia: 384,8 w

Corriente máxima: 30 a

Dimensiones: 27,8x56 mm

Diámetro de eje: 3,175x46 mm

Peso: 130 g

Tabla.6. Especificaciones del motor. [11]

Modelo	Voltaje (V)	KV (RPM/V)	Corriente (A)	Impedancia interna del motor (Ω)
B2846-10	7.4—14.8	3200	1.4	0.028

MOTOR EMAX B2856/8 - 3400KV

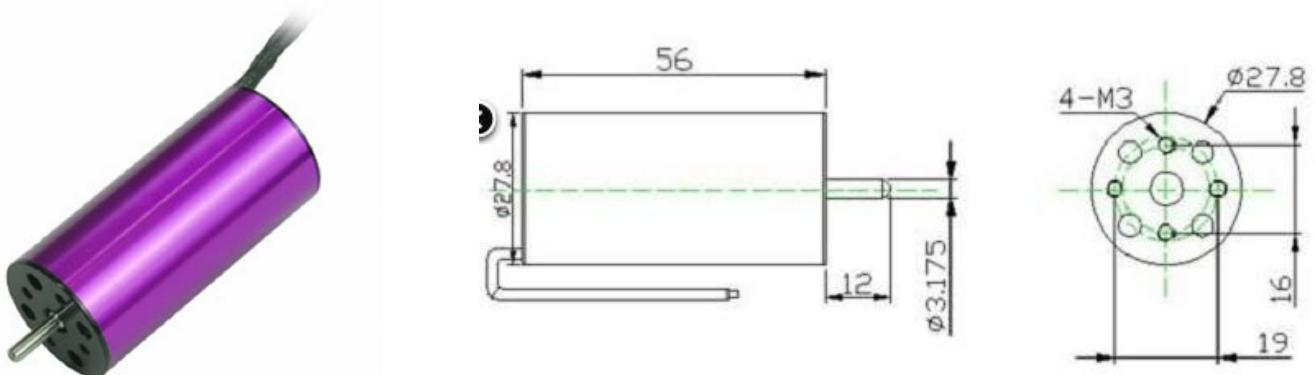


Fig.21. Diagrama de dimensiones. [11]

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

B2856-8

nº de celdas: 2-4 li-poly

rpm/v: 3400 rpm/v

Potencia: 400 w

Corriente máxima: 30 a

Dimensiones: 27,8x56 mm

Diámetro de eje: 3,175x12 mm

Peso: 173 g

Tabla.7. Especificaciones del motor. [11]

Modelo	Voltaje (V)	KV (RPM/V)	Corriente (A)	Impedancia interna del motor (Ω)
B2856-8	7.4 —14.8	3400	3	0.015

4.7. CALCULO DE UNA HÉLICE

Una hélice está referenciada en relación a su diámetro y paso, expresado en pulgadas, esto además de servir para comprar una hélice, sirve para saber cuáles son las revoluciones máximas para esa hélice en concreto, superadas éstas, la hélice no es eficiente. Así se sabe que el motor que monte esta hélice, debe alcanzar a su máxima aceleración estas revoluciones sin esfuerzo.

Ejemplo 11x6

- El diámetro de la hélice en pulgadas se pasa a milímetros $11 * 25,4 = 279,4$
- Los milímetros se pasan a metros y dividen a la constante 3485.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

$$\frac{279,4}{1000} = 0,2794 \quad ; \quad \frac{3485}{0,2794} = 12473,1567 \text{ RPM}$$

Si se quiere calcular el diámetro de la hélice cambiando el paso de la hélice de 8 a 6 para lograr un mejor funcionamiento de acuerdo a lo requerido en la aeronave. Para calcular esa nueva medida se debe apoyar en el factor de carga de la hélice, así que lo primero que hace será calcular cual es:

Ejemplo 15x8

- La fórmula es sencilla, $Factor\ de\ carga = diametro * 2 * paso$, en este caso $15 * 2 + 8 = 38$
- Como lo que queremos saber es el nuevo diámetro, despejamos de la fórmula anterior para obtener: $diámetro = \frac{(factor\ de\ carga - paso)}{2} = 16$, se restan 6 ya que es el nuevo paso que hemos decidido usar. Así la nueva hélice será una 16x6.

De la misma forma se pueden realizar otra serie de cálculos, por ejemplo, se tiene un motor que dice su fabricante funcionará de manera óptima a 12.500 r.p.m., ¿cuál hélice se debe montar? Se procede así:

- $diámetro\ en\ metros = \frac{3485}{RPM} ; \frac{3485}{12500} = 0.2788$
- $diámetro\ en\ pulgadas = \frac{(diámetro\ en\ metros * 1000)}{25,4} ; \frac{(0,2788 * 1000)}{25,4} = 10,9773$. Es evidente que este diámetro no es comercial, así que el que más se le acerca es 11 pulgadas.

4.8. CALCULO DEL EMPUJE

El UAV en función de sus características aerodinámicas y físicas, necesitará un grupo hélice-motor que produzca el empuje necesario para vencer el peso y la resistencia, en despegue, ascensión y vuelo horizontal. Para ello se ayuda del motor que suministra la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

energía (Potencia de salida) y la hélice que transforma la fuerza de torsión del motor en fuerza de Empuje.

La magnitud de esta fuerza no es constante para una hélice dada, sino que depende de la velocidad del aire de entrada y la velocidad de giro de la hélice misma, así como de las diferentes formas de la hoja y tamaños, también pueden ser más o menos flexibles, dependiendo de la marca y tipo, de modo que hélices con el mismo paso y diámetro se comportan de forma diferente.

El diámetro de la hélice es importante tanto para el empuje estático, como en condiciones de vuelo.

A velocidad y nivel de vuelo constante, la fuerza de empuje es igual y opuesta a la resistencia. El empuje estático debe ser al menos aproximadamente 1/3 del peso de los aviones con el fin de obtener subida razonable y capacidades de aceleración

Para vencer la inercia del avión parado, acelerarlo en la carrera de despegue o en vuelo, mantener una tasa de ascenso adecuada, vencer la resistencia al avance, etc... se necesita una fuerza: Empuje o tracción.

Esta fuerza se obtiene acelerando una masa de aire a una velocidad mayor que la del aeroplano. La reacción, de igual intensidad pero de sentido opuesto (3ª ley del movimiento de Newton), mueve el avión hacia adelante. En aviones de hélice, la fuerza de propulsión la genera la rotación de la hélice, movida por el motor convencional o turbina; en reactores, la propulsión se logra por la expulsión violenta de los gases quemados por la turbina.

Esta fuerza se ejerce en la misma dirección a la que apunta el eje del sistema propulsor, que suele ser más o menos paralela al eje longitudinal del avión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14



Fig.22. Dirección y sentido de empuje. [3]

Es obvio que el factor principal que influye en esta fuerza es la potencia del motor, pero hay otros elementos que también influyen como pueden ser la forma y tamaño de la hélice, densidad del aire, etc. Se habla de potencia en C.V. en motores convencionales, y de kilos o libras de empuje en reactores.

Puesto que potencia es equivalente a energía por unidad de tiempo, a mayor potencia mayor capacidad de aceleración. La potencia es el factor más importante a la hora de determinar la tasa de ascenso de un avión. De hecho la tasa máxima de ascenso de un avión no está relacionada con la sustentación sino con la potencia disponible descontada la necesaria para mantener un vuelo nivelado.

Lo primero que se necesita saber antes de pensar en que la aeronave vuele es la fuerza que el motor en conjunto con la hélice va a ejercer sobre él para elevarlo. A esta fuerza se le llama comúnmente empuje y se calcula de una manera simple, con un número mínimo de entradas. Utiliza sólo el paso, el diámetro de la hélice y las RPM en el que la hélice está girando. A continuación se presenta la ecuación utilizada para calcular el empuje. La forma expandida se muestra para ayudar a explicación de dónde resultan los números. La forma simplificada es la ecuación con la cual se realizara el cálculo fácil.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Forma expandida

$$F = 1.225 \frac{\pi(0.0254 * d)^2}{4} \left[\left(RPM_{prop} * 0.0254 * paso * \frac{1min}{60sec} \right)^2 - \left(RPM_{prop} * 0.0254 * paso * \frac{1min}{60sec} \right) V_0 \right] \left(\frac{d}{3.29546 * paso} \right)^{1.5}$$

Forma simplificada

$$F = 4.392399 * 10^{-8} * RPM \frac{(d)^{3.5}}{\sqrt{p}} (4.23333 * 10^{-4} * RPM * paso - V_0)$$

Donde

F: Es estática o dinámica de empuje; se llama empuje estático si $V_0 = 0$, en unidades de Newton (N);

Rpm: Son las rotaciones por minuto

paso: Es el paso de la hélice, en pulgadas

d: Es el diámetro de la hélice, en pulgadas

V_0 : Es la velocidad hacia adelante, la velocidad de corriente libre, o la velocidad de entrada como se quiera llamar, en m / s y/o mph (milla por hora)

Otra ecuación

$$T(\text{Newtons}) = \left((ef_prop * P)^2 * 2 \pi * R^2 * d \right)^{0.3333}$$

Donde

T: Empuje, en unidades de Newton (N);

ef_prop: Eficiencia de la hélice

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

R: Radio de la hélice en pulgadas

P: Paso de la hélice, en pulgadas

d: Diámetro de la hélice, en pulgadas

Si se desea el empuje en otras unidades: convertir newton a gramos, multiplicar newtons por 1,000 / 9,81. Para luego convertir gramos a onzas, multiplicar por 0,035274 gramos. Para convertir onzas a libras, dividir por 16 onzas.

Este cálculo permite determina los parámetro que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el motor brushless de acuerdo a lo requerido por la aeronave no tripulada; Siempre hay uno adecuado para la necesidades que se tienen, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones de operación, así como por su tamaño o potencia. El buen desempeño del uav se obtiene cuando el motor y hélice trabajan dentro de los límites de operación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se crea una base de datos sobre la caracterización y funcionalidad de los motores brushless, permitiendo determinar con más facilidad cual elegir al momento de diseñar UAV's.
- Se establece el modelo de selección de motores brushless que permita satisfacer los requerimientos de carga de los UAV's, sus especificaciones como: modelo, Kv (rpm/v), corriente, peso, fuerza, tipo de hélice; entre otras determinaciones que son necesarias al momento de su diseño y creación.
- Mediante la recolección de la información en una base de datos se logra tener a la mano de los diseñadores la información detallada y necesaria que garantiza la confiabilidad y calidad en los diseños de estas aeronaves no tripuladas.

Recomendaciones

La información para motores brushless orientados al diseño de UAV que se encuentra en la web es muy poca y se halla especialmente en mandarín, lo cual dificulta su entendimiento.

Se recomienda disponer más información y artículos científicos sobre el tema en el idioma universal inglés o en su defecto español ya que se evidenció la carencia de este tipo de información en estos idiomas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

Trabajo futuro

En este proyecto de investigación cabe la posibilidad de usar otros índices bibliográficos donde se sume la utilización de otras herramientas de software diferentes y más avanzadas al utilizado en este trabajo que permita de forma más precisa y en conjunto la obtención de toda la información necesaria para una caracterización como el que se realizó en este.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

REFERENCIAS

- [1]. Kenjo, T. (1985). Permanent magnet and brushless dc motors. Oxfor.
- [2]. William H. Yeadon, A. W. (2001). Handbook of small electric motors. United States of America The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3]. Fuente: <http://ingaeronautica.wordpress.com/2011/01/14/fuerzas-que-actuan-en-el-vuelo-ultima-parte/>
- [4]. Fuente: http://www.metallube.es/page/_C3VTDDatmVG1Xn0LYMEvhAyhQlcQx0Gq
- [5]. Fuente: <http://www.rctecnic.com/243-motores-brushless-outrunner>
- [6]. Fuente: http://www.e-radiocontrol.com.ar/?Motores_Brushless
- [7]. Fuente: <http://www.cochesrc.com/motor-electrico-brushless-funcionamiento-y-caracteristicas-a3607.html>
- [8]. Fuente: <http://rc-ink.blogspot.com/p/aviones-electricos.html>
- [9]. Fuente: <http://www.theuav.com/>
- [10]. Fuente: <http://www.unmanned.co.uk/>
- [11]. <http://www.rctecnic.com/244-motores-brushless-inrunner>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

APÉNDICE

La macro en Excel, permite obtener el cálculo del empuje de forma automática en las cinco unidades más comúnmente utilizadas F(N), F(g), F(Kg), F(Oz), F(Lb). Este cálculo permite determina los parámetro que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el motor brushless de acuerdo a lo requerido por la aeronave no tripulada; Siempre hay uno adecuado para la necesidades que se tienen, tanto en lo que respecta a su tipo por condiciones de operación, así como por su tamaño o potencia. El buen desempeño del uav se obtiene cuando el motor y hélice trabajan dentro de los límites de operación.

El proceso que realiza la macro se explica mejor a continuación:

Funcionamiento de la macro

Se sitúa el cursor en la celda D11, se procede a dar clic en el primer botón calcular F(N), el cual realiza el cálculo del empuje en estas unidades Newton, los resultados se visualizan en la columna D, seguidamente se da clic en el segundo botón Calcular F(g) gramos y así sucesivamente.

Después de dar clic en el segundo botón se puede dar clic en cualquiera de los otros 4 botones restantes sin guardar el orden, ya que no se puede pasar al tercero ni al cuarto botón sin antes haber hecho el cálculo del segundo debido a que los demás botones por formula dependen de este.

En la segunda hoja llamada Hoja1 se pueden observar ordenadamente en una tabla los cálculos obtenidos de acuerdo a las unidades estipuladas en los botones.

Aquí se ilustra un ejemplo:

El cálculo del empuje con la aplicación en Excel para una hélice con los siguientes parámetros determinados, diámetro igual a 4, paso igual 5 y revoluciones por minuto igual a 2000, como se visualiza en la fig.23.



Fig.23. Calculo de empuje dinámico

Arroja los siguientes resultados de acuerdo a la velocidad y kilometraje estipulado.

	A	B	C	D	E
1	0,021288214	2,170052419	0,002170052	0,076546429	
2	0,019891389	2,027664515	0,002027665	0,071523838	
3	0,018494564	1,885276611	0,001885277	0,066501247	
4	0,017097738	1,742888707	0,001742889	0,061478656	
5	0,015700913	1,600500803	0,001600501	0,056456065	
6	0,014304088	1,458112899	0,001458113	0,051433474	
7	0,012907262	1,315724995	0,001315725	0,046410883	
8	0,011510437	1,173337091	0,001173337	0,041388293	
9	0,010113612	1,030949187	0,001030949	0,036365702	
10	0,008716786	0,888561283	0,000888561	0,031343111	
11	0,007319961	0,746173379	0,000746173	0,02632052	
12	-0,006648293	-0,677705662	-0,000677706	-0,02390539	
13	-0,034584799	-3,525463743	-0,003525464	-0,124357208	
14	-0,062521306	-6,373221824	-0,006373222	-0,224809027	
15	-0,090457813	-9,220979905	-0,00922098	-0,325260845	
16	-0,11839432	-12,06873799	-0,012068738	-0,425712664	
17	-0,397759387	-40,5463188	-0,040546319	-1,430230849	
18	-0,677124455	-69,02389961	-0,0690239	-2,434749035	
19	-0,956489523	-97,50148042	-0,09750148	-3,43926722	
20	-1,375537124	-140,2178516	-0,140217852	-4,946044498	
21	Empuje dinamico, F (N)	Empuje dinamico, F (g)	Empuje dinamico, F (Kg)	Empuje dinamico, F (oz)	
22					

Fig.24. Resultados de empuje dinámico

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

A continuación se presenta el código fuente de la macro en excel el cual permite realizar el caculo del empuje en newton que es la unidad base y en otras 4 unidades más de manera automática.

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Range("D10").FormulaR1C1 = "Empuje dinamico, F (N)"
```

```
ActiveCell.FormulaR1C1 = _
```

```
"=1.225*PI()*(0.0254*R7C3)^2/4*((R7C7*0.0254*R7C5/60)^2-  
(R7C7*0.0254*R7C5/60)*RC[-2])*(R7C3/(R7C5*3.29546))^1.5"
```

```
Selection.AutoFill Destination:=Range("D11:D30"), Type:=xlFillDefault
```

```
Range("D11:D30").Select
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 12
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 11
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 10
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 9
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 8
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 7
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 6
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 5
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 4
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 3
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 2
```

```
ActiveWindow.ScrollRow = 1
```

```
Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
```

```
ActiveSheet.Range("D11").Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Range("D10").FormulaR1C1 = "Empuje dinamico, F (g)"
```

```
Range("D11:D30").Select
```

```
Selection.Cut
```

```
Sheets("Hoja1").Select
```

```
ActiveSheet.Paste
```

```
Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
```

```
Range("D11").Select
```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=Hoja1!R[-10]C[-3]*1000/9.81"
Selection.AutoFill Destination:=Range("D11:D30"), Type:=xlFillDefault
Range("D11:D30").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 12
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 10
ActiveWindow.ScrollRow = 9
ActiveWindow.ScrollRow = 8
ActiveWindow.ScrollRow = 7
ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 2

Selection.Copy
Sheets("Hoja1").Select
ActiveSheet.Range("B1").Select
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False

Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
ActiveSheet.Range("D11").Select

Application.CutCopyMode = False

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
Range("D10").FormulaR1C1 = "Empuje dinamico, F (Kg)"

Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=Hoja1!R[-10]C[-2]/1000"
Selection.AutoFill Destination:=Range("D11:D30"), Type:=xlFillDefault
Range("D11:D30").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 12
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 10
ActiveWindow.ScrollRow = 9
ActiveWindow.ScrollRow = 8
ActiveWindow.ScrollRow = 7

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 2
ActiveWindow.ScrollRow = 1

Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
ActiveSheet.Range("D11").Select

End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()

Range("D10").FormulaR1C1 = "Empuje dinamico, F (oz)"

Range("D11:D30").Select
Selection.Cut
Sheets("Hoja1").Select
ActiveSheet.Range("C1").Select
ActiveSheet.Paste
Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=Hoja1!R[-10]C[-2]*0.035274"
Selection.AutoFill Destination:=Range("D11:D30"), Type:=xlFillDefault
Range("D11:D30").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 12
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 10
ActiveWindow.ScrollRow = 9
ActiveWindow.ScrollRow = 8
ActiveWindow.ScrollRow = 7
ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 2
ActiveWindow.ScrollRow = 1

Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
ActiveSheet.Range("D11").Select

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

End Sub

Private Sub CommandButton5_Click()

```

Range("D10").FormulaR1C1 = "Empuje dinamico, F (lb)"
Range("D11:D30").Select
Selection.Cut
Sheets("Hoja1").Select
ActiveSheet.Range("D1").Select
ActiveSheet.Paste
Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
Range("D11").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=Hoja1!R[-10]C[-2]*0.00220462"
Selection.AutoFill Destination:=Range("D11:D30"), Type:=xlFillDefault
Range("D11:D30").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 13
ActiveWindow.ScrollRow = 12
ActiveWindow.ScrollRow = 11
ActiveWindow.ScrollRow = 10
ActiveWindow.ScrollRow = 9
ActiveWindow.ScrollRow = 8
ActiveWindow.ScrollRow = 7
ActiveWindow.ScrollRow = 6
ActiveWindow.ScrollRow = 5
ActiveWindow.ScrollRow = 4
ActiveWindow.ScrollRow = 3
ActiveWindow.ScrollRow = 2

```

```

Sheets("CALCULO EMPUJE").Select
ActiveSheet.Range("D11").Select

```

End Sub

Private Sub CommandButton6_Click()

```

Range("D11:D30").Select
Selection.ClearContents
ActiveSheet.Range("D11").Select
Sheets("Hoja1").Select
ActiveSheet.Range("A1:D20").Select
Selection.ClearContents
ActiveSheet.Range("A1").Select
Sheets("CALCULO EMPUJE").Select

```

End Sub

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO – FACULTAD DE INGENIERÍAS	Código	FDE 089
		Versión	02
		Fecha	2014-10-14

FIRMA ESTUDIANTES

Yuranny López Borja
Alix Andrés Giraldo Gallego

FIRMA ASESOR JUAN SE

FECHA ENTREGA: 16-02-2015

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____