

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Propulsión

El diseño de las aspas y hélices de un helicóptero es algo muy complejo ya que se tienen que tomar en consideración muchas variables. Esto va de la mano con el diseño del vehículo aéreo en sí ya que primero se debe de tener un bosquejo de qué es lo que se va a hacer para luego ver la manera de obtener esa fuerza de elevación. Lo importante a notar es que existe el tamaño de las hélices es directamente proporcional al área del vehículo que se desea levantar. También es directamente proporcional el peso del vehículo con las revoluciones por minuto a las que deben girar las hélices. El diseño de las hélices depende mucho del uso que se les va a dar, ya que existen distintos tipos de propulsión. No sería lo mismo diseñar una hélice para un helicóptero que para un avión o para un barco. Para esto se deben de conocer diferentes factores que influyen en el diseño del perfil de las aspas, lo cual proporciona la fuerza de propulsión deseada.

La fuerza de elevación (*lift force*) es la componente de la fuerza aerodinámica perpendicular a la dirección del flujo, contraria a la fuerza de arrastre (*drag force*) cuya componente es paralela a la dirección del flujo. Aunque por lo general se asocia esta fuerza a las alas de un avión, la elevación también se genera en otros vehículos, desde autos de carreras y veleros, hasta turbinas de viento y helicópteros. Aunque las ecuaciones matemáticas para la fuerza de elevación han sido descubiertas desde los experimentos de

los hermanos Wright, aun no existe una explicación práctica que no sea controversial. Existen varias maneras diferentes de determinar la fuerza de elevación ya que se combinan fórmulas matemáticas y físicas y se deben de tomar en consideración muchos aspectos y variables. Una de las fórmulas más utilizadas en la actualidad es la de John Smeaton, conocida como la ecuación de 1900 donde se tiene que:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{ref} C_L$$

Donde:

L = Fuerza de Elevación. [N]

- Es la variable que se desea calcular.

P = Densidad del Aire. [kg/m³]

- La densidad del aire cambia en función de la altura, así que el valor de este componente depende de la altura que se desea alcanzar.

V = Velocidad de Giro. [m/s]

- Esta es la velocidad a la que gira la hélice.

S_{ref} = Área de Referencia. [m²]

- Para un helicóptero, el área de referencia es aquella formada cuando giran las aspas del rotor, creando un círculo con un radio de la longitud de un aspa.

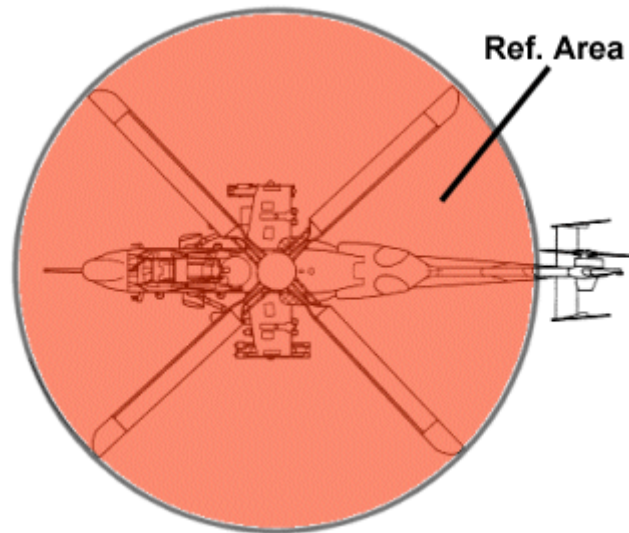


Figura 2.1: Área de Referencia.

CL = Coeficiente de elevación.

- Esta variable no tiene dimensiones y cambia mientras cambia la velocidad y el ángulo de ataque dependiendo de cada aeronave.

Uno de los factores más importantes a considerar en el diseño de una aeronave de propulsión por rotor como la que se tiene en este proyecto es la compensación del torque generado por el motor. Cuando gira la hélice de un motor, el torque que genera hace que el cuerpo tienda a moverse en dirección contraria a la de las aspas. Es por ello que en los helicópteros se utiliza una hélice en posición vertical, para compensar el torque. Sin embargo, existen otras maneras de configurar los rotores para poder compensar el torque.

La configuración *Tandem* es aquella en la que se ponen dos rotores uno detrás del otro, girando en dirección opuesta. La configuración *Coaxial* es aquella en la que se coloca un rotor encima del otro sobre el mismo eje. Finalmente en la configuración *entrelazada*, se colocan dos rotores suficientemente cerca el uno del otro como para que se entrelacen al girar.

2.2 Motores de DC

El uso de motores de corriente directa en este tipo de prototipos es más que evidente debido a sus características de peso, tamaño y principalmente, su fuente de alimentación, ya que llevan una batería de corriente directa también. Existen varios tipos de motores de DC convencionales, y el primer paso para el diseño y construcción del prototipo es elegir qué motor es el indicado a usar.

- Tipos de Motores de CD:
 - ❖ En Serie.
 - ❖ En Derivación
 - ❖ Compuesto.
 - ❖ De Imán Permanente.
- Clasificación de Motores:
 - ❖ Inducción.
 - ❖ Con cepillas.
 - ❖ Sin cepillas.
 - ❖ A pasos.
 - ❖ Lineal.
 - ❖ Unipolar.
 - ❖ Reluctancia.

Aunque más adelante se proporcionara una justificación al respecto, se consideraron solo dos posibles tipos de motores de DC aptos para el vehículo aéreo: con

escobillas y sin escobillas. Los motores de DC sin escobillas son motores eléctricos síncronos alimentados por corriente directa que tienen un sistema de conmutación controlado electrónicamente, en lugar del control de conmutación mecánica que tienen los motores con escobillas. En esos motores, la corriente, el torque, voltaje y revoluciones por minuto están linealmente relacionados. En los motores con escobillas convencionales, las escobillas hacen un contacto físico con una serie de contactos eléctricos en el rotor, formando un circuito eléctrico entre la fuente de corriente directa y los embobinados de la armadura. Mientras rota la armadura en el eje del motor, las cepillas van haciendo contacto con diferentes secciones del conmutador que va rotando. En un motor sin escobillas, los electroimanes no se mueven, permanecen estáticos en la armadura mientras que los imanes permanentes se mueven. Se reemplaza el sistema de cepillado-conmutador por un controlador electrónico. El controlador hace la misma distribución de potencia que un motor con escobillas pero con un circuito de estado sólido, en lugar de un sistema conmutado.

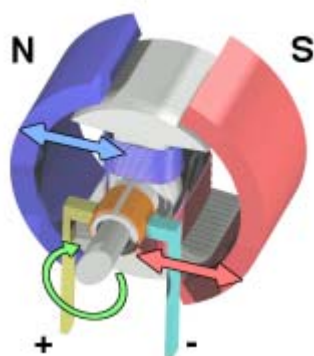


Figura 2.2: Esquema de motor con escobillas de 2 polos.

Los motores sin escobillas ofrecen varias ventajas contra un motor con escobillas, incluyendo más eficiencia, reducción de ruido, son más confiables, tienen un mayor tiempo

de vida y tienen una menor interferencia electromagnética en general. Al no tener embobinados en el rotor, no están sujetos a fuerzas centrífugas y debido a que los electroimanes están localizados alrededor del perímetro, los electroimanes se enfrían mediante conducción con el casco del motor, sin la necesidad de una corriente de aire dentro del motor. Por tal motivo, el motor sin escobillas está libre y protegido de la tierra y el polvo que maltratan los imanes. Sin embargo, los motores sin escobillas tienen una gran desventaja: costo alto. Esto se debe a que necesitan controladores electrónicos de velocidad y a que aún no son muy comerciales, aunque a la larga el costo se compensa con el tiempo de vida que tienen los motores. En general, los motores sin escobillas son más eficientes en convertir la electricidad en potencia mecánica. Esto se debe principalmente a que no hay pérdidas eléctricas ni por fricción causadas por las escobillas.



Figura 2.3: Motor sin escobillas.

Los motores de CD en serie son aquellos cuyos devanados de campo están compuestos de pocas vueltas y están conectados en serie con el circuito del inducido. En este tipo de motores, la corriente del inducido, de campo y de línea son iguales. Por lo tanto, la ley de voltajes de Kirchhoff dice que:

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S)$$

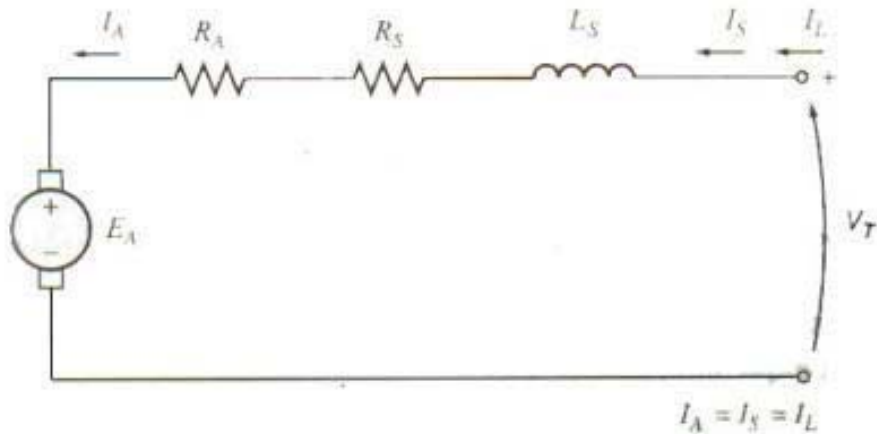


Figura 2.4: Circuito Equivalente de Motor en Serie.

Una de las características más notorias del motor en serie es que el flujo es directamente proporcional a la corriente del inducido (Chapman, 562). A mayor carga en el motor, mayor es el flujo. Para un motor de CD en serie, el torque inducido se calcula:

$$\tau_{ind} = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{P_{conv}}{\omega}$$

Donde:

E = Voltaje de Armadura del motor

I = Corriente de Armadura del motor.

ω = Velocidad en rad/s

2.3 Vehículos Aéreos de 4 Rotores.

Las ventajas de utilizar un vehículos de 4 rotores o QuadRotor en vez de un helicóptero convencional es que tienen la peculiaridad de que sus hélices tienen un paso fijo, es decir, su ángulo de ataque no varía mientras gira la hélice, caso contrario al de los helicópteros. Por lo mismo, el diseño del vehículo se simplifica en gran manera, así como también se reducen costos en tiempo y mantenimiento. Otra ventaja es que se pueden

utilizar hélices de menor tamaño para generar una fuerza equivalente a la de la hélice del helicóptero y poder levantar el vehículo por completo.

En los helicópteros convencionales se usa únicamente un rotor horizontal para generar la fuerza de elevación que requiere la estructura. Por lo mismo, el eje del motor requiere un acoplamiento, mediante una caja de engranes, con la flecha del motor. Al girar, el motor produce un torque perpendicular a la flecha del motor, provocando que todo el helicóptero gire en la misma dirección que gira el motor. Para compensar por este torque, se utiliza otra hélice en posición vertical con el cual mantiene al helicóptero en la posición deseada respecto al eje Y. En los QuadRotors esto cambia, ya que no existe una hélice vertical, el vehículo debe de compensar los torques que generan sus motores de otra manera para evitar que el vehículo gire sin control.

Cada rotor produce una fuerza de empuje y un torque en su eje de rotación, así como también una fuerza de arrastre opuesta a la dirección de vuelo del vehículo. Si todos los rotores giraran en la misma dirección y con la misma velocidad angular, entonces el vehículo giraría en la misma dirección que los motores y alrededor de su propio eje. En cambio, si se ponen a girar 2 motores en un sentido y los otros 2 en el otro, todos con la misma velocidad angular, se podría llegar a compensar el torque y tener estabilizado al vehículo.

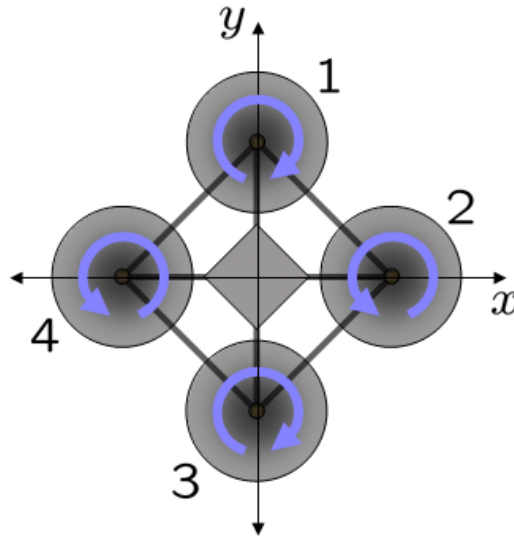


Figura 2.5: Configuración de motores.

En la *figura 2.4* se muestra una configuración de motores en cuanto a su giro para poder compensar el torque que genera cada uno. Si se ponen los motores 1 y 3 a girar en un sentido, mientras que los motores 2 y 4 giran en el sentido opuesto, se obtiene un torque neto igual a cero.

Con este mismo método se puede controlar el balanceo (*yaw*) del vehículo si se juega con las velocidades de cada motor. Se puede modificar la aceleración angular de cada rotor, modificando así el cabeceo (*pitch*) y el alabeo (*roll*) del vehículo. Es decir, se pueden controlar todos los ejes de giro del vehículo sin perder la estabilidad. Por ejemplo, si se quiere trasladar el vehículo, se debe de reducir la velocidad del motor 3 en la misma proporción que se incrementa la velocidad en el motor 1, de este modo, el torque neto sigue estando compensado. A continuación se muestran algunos movimientos del vehículo al modificar proporcionalmente la velocidad de los motores:

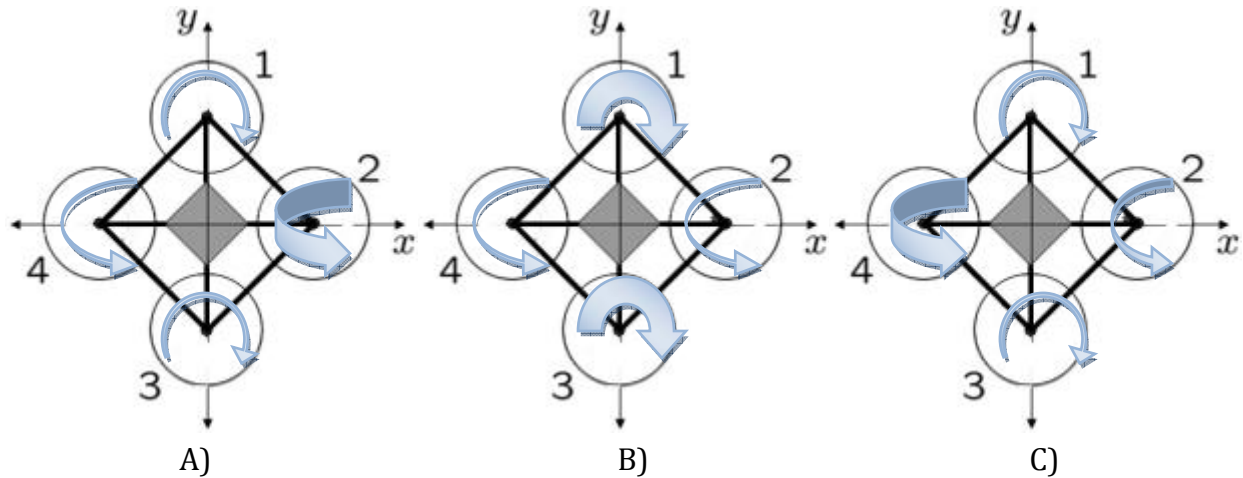


Figura 2.6: Descripción de Movimientos de un QuadRotor

Como se dijo anteriormente, la teoría de vuelo de un QuadRotor se basa en cambiar las velocidades de los motores proporcionalmente si son opuestos. En la figura 2.5-a se puede observar que el motor 2 gira más rápido que los demás. En este caso, el vehículo avanzaría hacia la izquierda ya que el motor 2 estaría empujando más que el motor 4 y por lo tanto sacaría al vehículo de su equilibrio. Por otro lado, en la opción B se observa que los motores 1 y 3 están girando a la misma velocidad y más rápido que los motores 4 y 2. El efecto que esto tendría sobre el vehículo es que de nuevo se descompensarían los torques que afectan al vehículo, haciendo que ahora este gire en el sentido opuesto a la dirección de sus motores, es decir, girará hacia la izquierda. Finalmente, se puede ver que la opción C es un simple espejo de la opción A y por lo tanto, el helicóptero avanzará hacia la derecha.

El vehículo estará sometido a varios efectos físicos durante el vuelo. Se dan fuerzas aerodinámicas a consecuencia del giro de las hélices y de las vibraciones de las aspas. Existen también los torques ya mencionados. Se debe tener en cuenta el centro de masa del vehículo para que siempre esté balanceado. Así mismo, se deben considerar las consecuencias de los efectos giroscópicos sobre el vehículo, como lo serían: pérdidas de orientación del cuerpo rígido, cambios en la orientación de las hélices, etc. Por último, se

debe considerar también que el helicóptero se enfrentará a una fuerza que todas las aeronaves buscan reducir, la fricción.

El QuadRotor es un mecanismo con 6 grados de libertad y solo 4 actuadores. Las fuerzas principales y momentos que actúan sobre el vehículo son producidos por las hélices. Si se considera que el vehículo tendrá un vuelo paralelo al piso y suponiendo que no hay otras fuerzas externas que afecten al vehículo; se puede asumir entonces que el empuje y el arrastre son proporcionales a los cuadrados de las velocidades de giro de las hélices:

$$\mathbf{T} = \mathbf{b} \Omega^2 \quad \rightarrow \text{Empuje}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \Omega^2 \quad \rightarrow \text{Arrastre}$$

En estas dos ecuaciones, b y d son los coeficientes de empuje y de arrastre respectivamente, y dependen de varios factores, como lo son el tamaño de las hélices, la densidad del aire, ángulo de ataque, y paso de las hélices.

2.4 Batería de Litio.

Uno de los componentes más importantes del vehículo es la batería ya que es la fuente de alimentación de los motores. Para elegir la batería adecuada primero hay que saber que motores se van a utilizar ya que la opción a elegir depende directamente del consumo de corriente y el voltaje requerido. Las baterías de Polímero de Litio (LiPo) son la mejor opción como fuente de energía eléctrica en cuanto a vehículos a escala y de radio control, principalmente por su bajo peso y pequeño tamaño pero además por otras excelentes características. Anteriormente se usaban las baterías de Nickel (NiMH y NiCD) pero se puede obtener la misma capacidad, un tamaño más pequeño y un menor peso en las baterías de LiPo. Es por ello que se prefieren para todo tipo de aparatos eléctricos como laptops, reproductores de mp3, juguetes de radiocontrol e incluso autos eléctricos.

Las baterías de LiPo tienen un polímero para separar el cátodo del ánodo. Las baterías se construyen de la siguiente manera:

Cátodo: LiCoO_2

Separador: Polímero de Electrolito Conductor.

Ánodo: Compuesto intercalado de Litio.

Las variables necesarias para elegir una batería son: Voltaje, Capacidad, y el grado "C". El voltaje depende de la cantidad de celdas con las que cuenta la batería, cada celda es de 3.7 v. Por lo tanto, si tuviéramos motores de 12 volts, podríamos usar una batería de 3 celdas ($3 \times 3.7 \text{ v} = 11.1\text{v}$) o bien una que sobrepase el requerimiento; con 4 celdas ($4 \times 3.7 \text{ v} = 14.8\text{v}$). La capacidad es una variable de corriente en mili-Amperes-hora (mAh), es decir, cuanta corriente se requiere por hora. El grado "C" es una razón de qué tan rápido se descarga la batería. Mientras más corriente se requiere más rápido se descargará. Para obtener esta variable simplemente hay que dividir la demanda de corriente entre la capacidad de la batería. Por ejemplo, si se requieren 5 A y la capacidad de la batería es de 1320mAh, entonces tendríamos que $5000 \text{ mA} / 1320 \text{ mAh} = 3.8 \text{ C}$.