

RPAS MULTIRROTOR

TEORIA DE VOO



CORPAS

By HÉRLON LIMA
2017

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	CLASSIFICAÇÃO DOS MULTIRROTORES	4
2.1	POR TIPO DE FUSELAGEM	5
2.1.1	ESTRUTURA (<i>FRAME</i>) e COBERTURA (<i>SHELL</i>)	5
2.1.1.1	Configuração Convencional	5
2.1.1.2	Configuração Não Convencional	6
3	CONTROLES NOS EIXOS	6
3.1	CONTROLE VERTICAL	7
3.2	CONTROLE DIRECIONAL	7
3.3	CONTROLE LATERAL	7
3.4	CONTROLE LONGITUDINAL	8
4	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	8
4.1	PRESENÇA DE ROTORES	8
4.2	VOO ESTABILIZADO ELETRONICAMENTE	9
4.3	AUSÊNCIA DE PILOTO A BORDO	10
5	COMANDOS DE VOO	11
6	ASPECTOS AERODINÂMICOS	11
6.1	VOO PAIRADO	12
6.2	ARRASTO DE FUSELAGEM	13
6.3	EFEITO DE CONE	13
6.4	EFEITO DE SOLO	13
6.5	VOO DE TRANSLAÇÃO	14
6.5.1	VOO VERTICAL	15
6.5.2	VOO HORIZONTAL	15
6.6	EFEITO PENDULAR	16
6.7	DISSIMETRIA DE SUSTENTAÇÃO	16
6.8	ANEL DE VÓRTICE (<i>VORTEX RING STATE</i>)	18
6.9	FATOR DE CARGA	18
6.10	ROLAMENTO DINÂMICO	19

1 INTRODUÇÃO

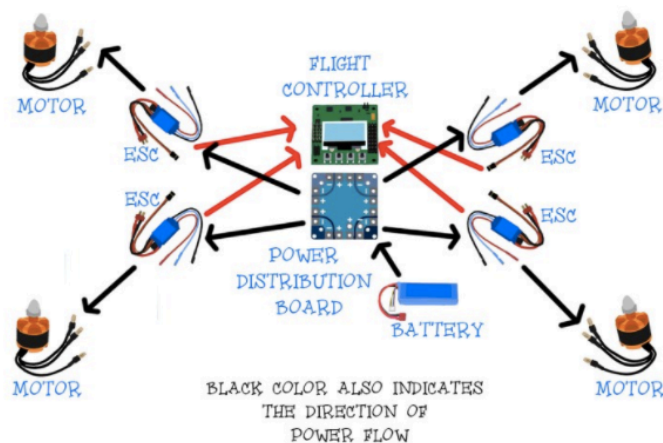
O multicóptero ou multirrotores é um dos tipos mais populares de projeto de aeronaves não tripuladas. Essa configuração usa múltiplos rotores para fornecer sustentação, em vez de usar um único rotor como fonte de sustentação, assim como ocorre em um helicóptero convencional. O multirrotores é capaz de controlar a direção e o sentido do voo, com o ajuste da velocidade de rotação de cada um dos rotores de forma independente, resultando em tração e em torque diferenciais.

Existem vários tipos de multirrotores, sendo classificados de acordo com o número de rotores que empregam e como eles estão dispostos. Existem outras variações do conceito de multirrotores, como as que utilizam pás de passo variável (*variable pitch*) ou mesmo sistemas de propulsão por *ducted fan*.



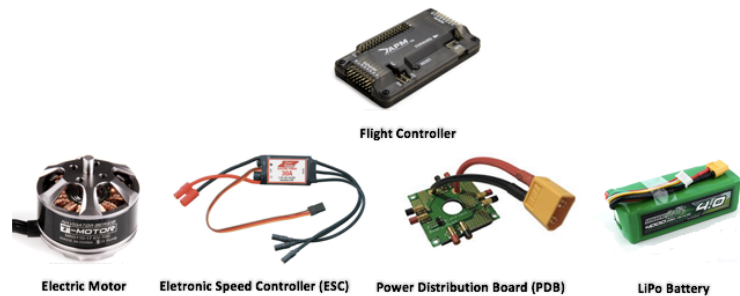
A principal vantagem do multirrotores é que ele mantém a capacidade de decolagem vertical e de voo pairado (estacionário/hover) de um helicóptero, mas com a simplicidade mecânica de um avião. O uso de múltiplos rotores elimina a necessidade de um mecanismo de rotor complexo encontrado em um helicóptero.

BASIC COMPONENTS OF A QUADCOPTER



O projeto básico de um multirrotores é composto por 5 (cinco) elementos. São eles: múltiplos motores (*Motor*), controladores de velocidade (*Electronic Speed Controllers* -

ESC), uma placa distribuidora de energia (*Power Distribution Board – PDB*), uma bateria (*Battery*), normalmente de Li-Po (*Lithium Polymer*), e uma placa controladora de voo (*Flight Controller*). Os avanços na indústria eletrônica tornaram esses componentes cada vez menores e mais baratos, além de tornar o multirrotor uma alternativa viável para o uso de aeronaves em missões eletivas.

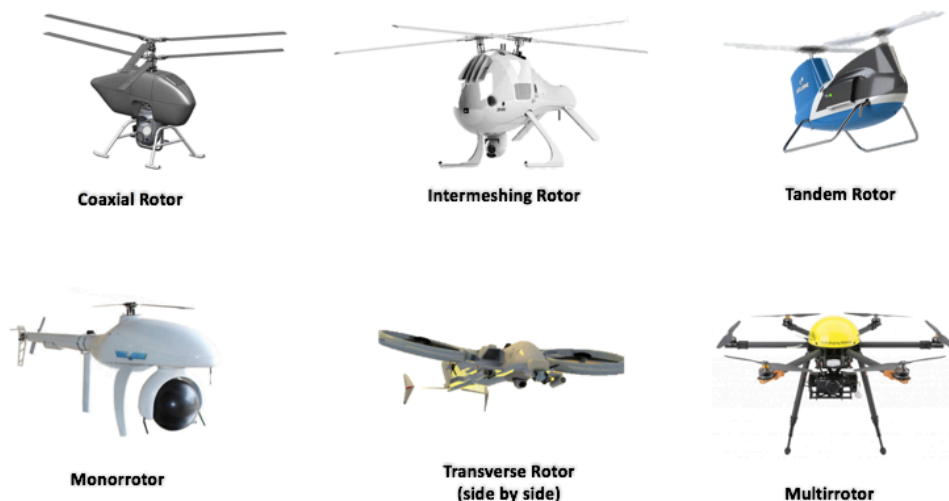


Exemplificando, as missões eletivas seriam aquelas em que o emprego de aeronaves não tripuladas ocorra onde haja risco para tripulações embarcadas, naquelas em que a furtividade seja um elemento crítico para o cumprimento da missão ou mesmo naquelas em que seja possível a substituição de aeronaves tripuladas, em virtude dos baixos custos operacionais das não tripuladas, dentre outros, sem que haja prejuízo da efetividade da missão. Ou seja, não se trata de uma simples substituição de um modelo pelo outro, mas uma decisão que passa por um processo estruturado de construção.

Muito embora haja uma simplicidade no emprego de componentes mecânicos, é destacado o emprego de complexos componentes eletrônicos, uma vez que o multirrotor requer, principalmente, uma placa controladora de voo para estabilizar a aeronave e calcular as velocidades apropriadas do motor de acordo com as entradas de controle.

2 CLASSIFICAÇÃO DOS MULTIRROTORES

A classificação de multirrotores pode se basear no número e na disposição dos rotores, podendo ser múltiplos rotores (multirrotores), monorrotores, rotores coaxiais, rotores lado a lado (*transverse rotor*) e sincronizáveis (*intermeshing*).



2.1 POR TIPO DE FUSELAGEM

O corpo de uma aeronave chama-se fuselagem. Na fuselagem, estão alocados os componentes necessários para operar e controlar a aeronave. Pode-se dizer que a fuselagem é a estrutura básica da aeronave, uma vez que outros componentes estão ligados a ela.

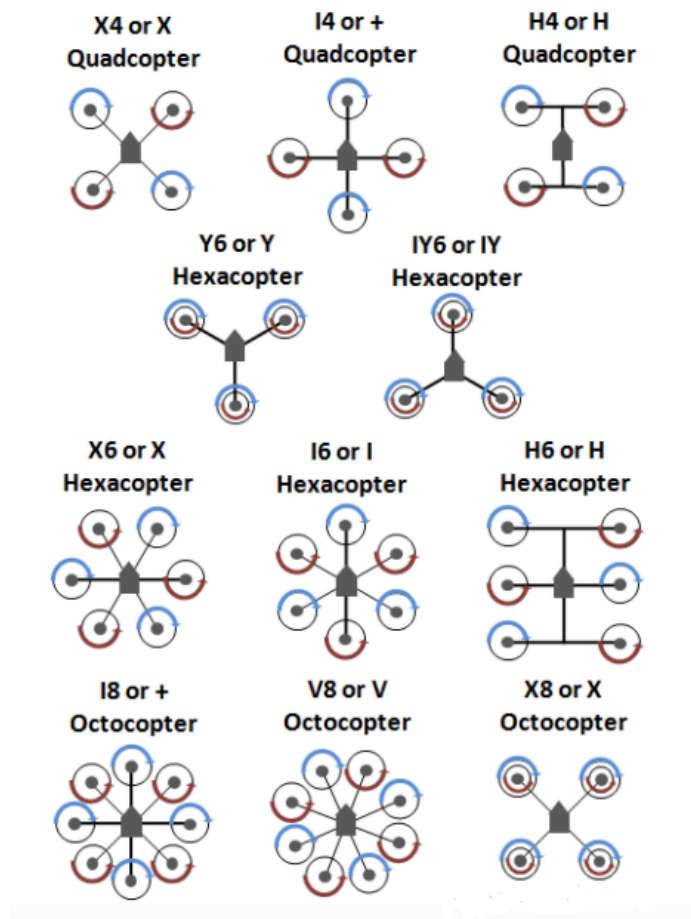
2.1.1 ESTRUTURA (*FRAME*) e COBERTURA (*SHELL*)

A *shell* do multirrotores é uma cobertura, que pode ser estética ou mesmo funcional, usada para melhorar a resistência aos elementos externos, bem como para melhorar o seu desempenho aerodinâmico. Algumas aeronaves possuem, de produção, apenas uma cobertura de plástico que também atua como *frame*, em razão disso, não iremos nos deter a esse tipo de classificação.

O método mais comum de classificação das configurações de fuselagem está atrelado ao tipo de *frame*. Sendo assim, o assunto será abordado sob o ponto de vista da configuração convencional e da não convencional.

2.1.1.1 Configuração Convencional

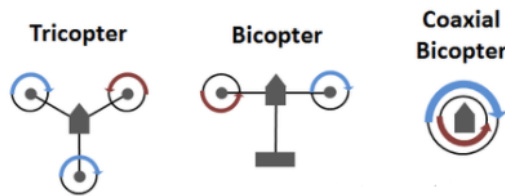
A maioria dos multirrotores usa 4, 6 ou 8 rotores, que podem ser dispostos em várias configurações. O diagrama abaixo mostra as configurações mais utilizadas. Note-se que as configurações coaxiais (onde os rotores contrarrotativos são sobrepostos) podem resultar em aeronaves menores para o mesmo número de rotores.



2.1.1.2 Configuração Não Convencional

Outras configurações de multirrotor ou multirrotor menos comuns são possíveis, como bicóptero, bicóptero coaxial, tricóptero ou quadricóptero de passo variável. O bicóptero usa apenas dois rotores que podem ser inclinados de maneira independente para a frente e para trás para proporcionar controle de arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*).

No entanto, esta configuração tende a ser instável no eixo lateral (*pitch*), pois depende do efeito pendular para a estabilidade. O bicóptero coaxial usa dois rotores alinhados um sobre o outro. Esta configuração requer o uso de partes móveis para fornecer controle.

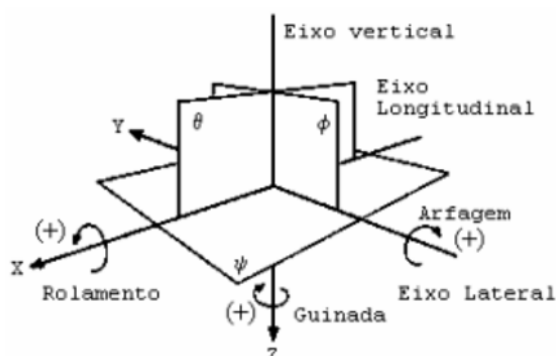


O tricóptero usa apenas três rotores. Uma vez que tem um número desigual de rotores que giram no sentido horário e no sentido anti-horário, seus torques não podem ser equalizados e o rotor traseiro deve ser inclinado para um dos lados para equalizar a tração. Este rotor é inclinado usando um servo atuador para fornecer controle de guinada (*yaw*).

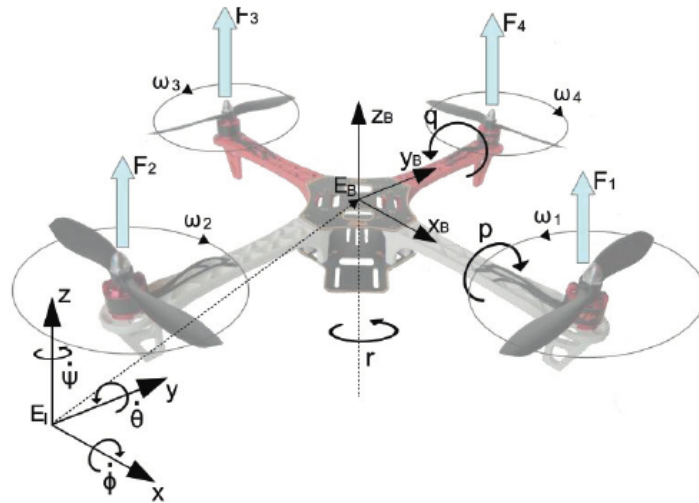
O quadricóptero de passo variável usa quatro rotores com pás de passo variável que geralmente são movimentadas usando um único motor, com um sistema de transmissão por correia. O passo das pás dos rotores é variado para fornecer o controle da aeronave, toda vez que for variar as suas velocidades. Esta configuração é mais útil para acrobacias e aplicações de corridas aéreas.

3 CONTROLES NOS EIXOS

O controle completo da posição e da atitude de um corpo no espaço requer o controle das forças e momentos em torno de todos os três eixos, ou seja, envolve seis controles independentes. Então, se o corpo se desloca para um lado, uma força deve ser exercida para retorná-lo à posição original e, da mesma maneira, se ele rola para um lado, um momento deve ser exercido para corrigir sua posição.



Seria extremamente complicado, todavia, para o ser humano coordenar os comandos de qualquer máquina com seis controles independentes. Felizmente, é possível reduzir este número pelo acoplamento desses controles, de modo que, quatro controles independentes são adequados para um multirrotor. São eles: vertical, direcional, lateral e longitudinal.



3.1 CONTROLE VERTICAL

O controle vertical é necessário para fixar a posição do multirrotor na direção vertical. É obtido aumentando ou diminuindo a rotação de todos os motores por meio da variação da potência (comando de *throttle*) e, conseqüentemente, a tração em todas as configurações de multirrotor.

3.2 CONTROLE DIRECIONAL

O controle direcional estabelece a atitude do multirrotor em torno do eixo vertical, permitindo ao piloto remoto posicioná-lo em qualquer direção horizontal. Os métodos para a obtenção desse controle variam de acordo com a configuração do multirrotor.

O controle do multirrotor sobre o eixo de vertical (*yaw*) é conseguido aplicando-se velocidades diferentes de rotação nos conjuntos de rotores que giram em sentido horário (CW) e anti-horário (CCW). O resultado é um torque diferencial no sentido horário ou anti-horário (dependendo do seu sentido de giro), resultando na movimentação do multirrotor no seu eixo de guinada. A tração resultante permanecerá a mesma, uma vez que a diminuição da tração em um conjunto de rotores (CW ou CCW) ocorrerá com consecutivo aumento da tração no outro conjunto.

3.3 CONTROLE LATERAL

O controle lateral resulta tanto em uma inclinação como em um movimento lateral do multirrotor. De fato, quando o piloto remoto aplica o comando lateral, um momento de

rolamento é produzido em torno do Centro de Gravidade (CG) da aeronave que a faz inclinar e, como consequência, uma componente da tração do rotor age nessa direção.

O controle do multirrotor sobre o eixo longitudinal (*roll*) é conseguido pelo aumento da velocidade de rotação do rotor em um lado e a diminuição da velocidade de rotação do rotor no outro lado. Dessa forma, produz-se o efeito de aumentar a tração em um lado e de diminuir no outro, criando um torque diferencial que gira a aeronave em torno do eixo longitudinal (rolamento).

Além disso, uma vez que os rotores, de cada lado (direito e esquerdo) da aeronave, giram em sentido horário (CW) e em sentido anti-horário (CCW) a mesma velocidade de rotação está sendo imposta aos mesmos, portanto os conjuntos de rotores (direito ou esquerdo) se equalizam no campo direcional. O efeito resultante é um movimento de rolamento lateral aplicado na aeronave.

3.4 CONTROLE LONGITUDINAL

O controle longitudinal, por natureza, é idêntico ao controle lateral. De fato, os momentos de arfagem são acoplados às forças longitudinais. Os rotores dianteiros giram a uma velocidade diferente dos rotores traseiros, criando uma tração diferencial que gira a aeronave em torno de seu eixo lateral (*pitch*).

4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

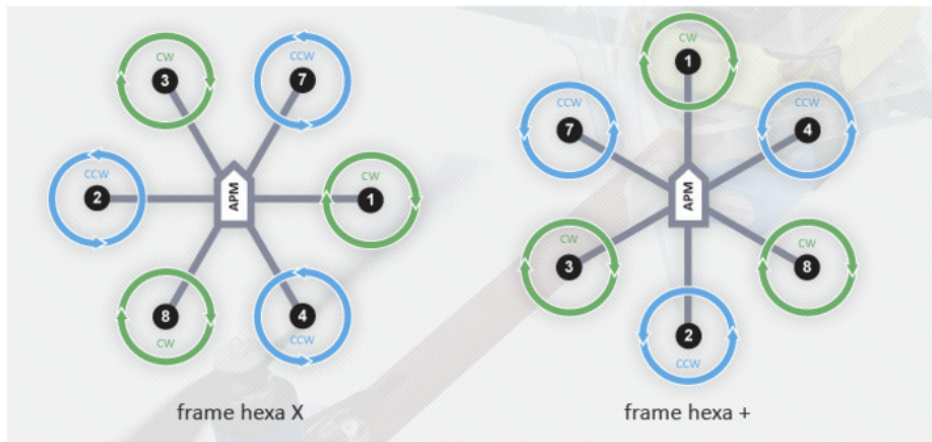
Vamos abordar algumas características principais atreladas aos multirrotores, para podermos melhor estudar o assunto

4.1 PRESENÇA DE ROTORES

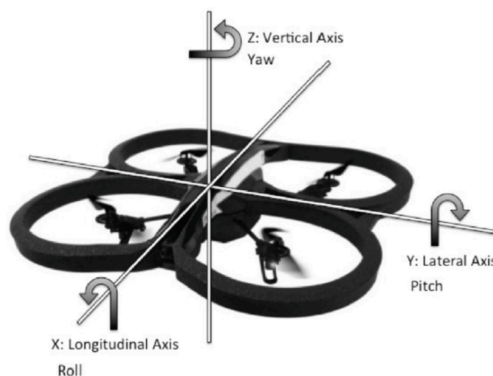
Diferentemente da aeronave não tripulada de asa fixa, no multirrotor, ocorre uma integração de funções no rotor. Oportunamente, esclarecemos que são as hélices que transformam a força de rotação do motor em tração, sendo a tração a força propulsiva da aeronave. Nas aeronaves de asa fixa, a tração atua ao longo do seu eixo longitudinal e, na maioria das aeronaves de asas rotativas, incluindo os multirrotores, a tração é orientada de acordo com a operação que se deseja.

Todavia, o rotor é um dispositivo utilizado, principalmente, em aeronaves de asas rotativas, como helicópteros, sendo responsável não apenas pela sustentação, mas também pelo controle longitudinal, lateral e vertical. Sendo assim, aqui nesta abordagem, daremos preferência ao termo rotor em substituição ao termo hélice, referindo-se à superfície aerodinâmica responsável por prover a sustentação dos multirrotores.

Com os rotores em movimento há a necessidade de equilíbrio do torque remanescente, pois, uma vez que a transmissão é mecânica, o rotor girando num determinado sentido impõe um torque remanescente à fuselagem, que tende a girar a aeronave no sentido contrário. Para equilibrar essa força, em um multirrotores com configuração convencional, a metade dos rotores gira em sentido horário (*Clockwise – CW*) e a outra metade dos rotores gira em sentido anti-horário (*Counterclockwise – CCW*).



Como dito, o rotor é impulsionado pelo motor, sendo responsável não apenas pela sustentação, mas também pelo controle longitudinal (*pitch*), lateral (*roll*) e vertical. Todavia, salienta-se que para exercer o controle direcional (*yaw*), é aplicada uma variação de velocidade de rotação de parte dos rotores, a fim de que se consiga mudar a direção de voo do multirrotores.



4.2 VOO ESTABILIZADO ELETRONICAMENTE

Quem opera com a grande maioria dos multirrotores disponíveis é responsável por parte dos efeitos da aplicação dos comandos de voo, pois a controladora de voo (*Flight Controller*) processa informações advindas dos sensores instalados e faz compensações para que o voo seja o mais estável possível.

A controladora de voo é o principal componente do RPAS, pois tem a função de processar os sinais de entrada e gerar saídas adequadas, porém, em alguns momentos, pode servir apenas de extensão entre as interfaces I/O sem realização de processamento.

A função básica desempenhada pela controladora e necessária ao voo é o monitoramento dos canais da Estação de Pilotagem Remota (*Remote Pilot Station - RPS*) para mudança de velocidade, direção e altitude. Com isso, agirá nos controles correspondentes: *yaw* (eixo vertical), *roll* (eixo longitudinal) e *pitch* (eixo lateral). Assim, a controladora, primariamente, mapeia os movimentos da estação de pilotagem remota (controle/rádio) comandando rotações que são definidas dinamicamente para cada um dos motores, por meio do sinal enviado pelo *Electronic Speed Controller (ESC)*, controlador eletrônico de velocidade.

A maioria das placas controladoras tem a capacidade de processar comandos primários de voo, mas também dados obtidos de sensores auxiliares incorporados em seu próprio circuito ou no ambiente externo, como os sinais de *Global Navigation Satellite Systems (GNSS)*, ou sistemas globais de navegação por satélite, incluindo o GPS (USA), o Glonass (Rússia), o Galileu (EU) e o Compass (China).

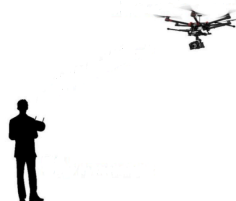
Dessa forma, não somente os comandos oriundos da estação de pilotagem remota (controle/rádio) ditarão a velocidade dos rotores, pois a controladora vai conseguir estabilizar a aeronave baseando-se no cruzamento dos dados provenientes dos sensores disponíveis e vai conseguir interferir em cada motor separadamente.

Dessa maneira, o voo será estabilizado e a pilotagem se tornará muito mais fácil, motivo pelo qual é possível, por exemplo, um iniciante voar com um multirrotores empregando pouco esforço ou tendo pouco conhecimento ou prática de pilotagem. Outra peculiaridade dos multirrotores, que interfere nos voos, é que o rotor se fixa diretamente nos motores, em um sistema conhecido como *direct mount*.

4.3 AUSÊNCIA DE PILOTO A BORDO

As aeronaves não tripuladas se constituem em um desafio, pois o piloto não estando a bordo para a aplicação de comandos de voo e, também, para desenvolver as ações do processo de gerenciamento do risco e de tomada de decisão, que ocorrerá de forma remota, requer a mudança nos modelos de pilotagem até aqui definidos e consagrados na aviação.

A aplicação de comandos realizada a distância torna diferenciada a condição do piloto remoto, requerendo garantias dos sistemas que envolvam a telemetria, importante elo de contato do piloto com a aeronave a ser voada. A qualidade da telemetria é um fator crítico que influencia a consciência situacional do piloto remoto.



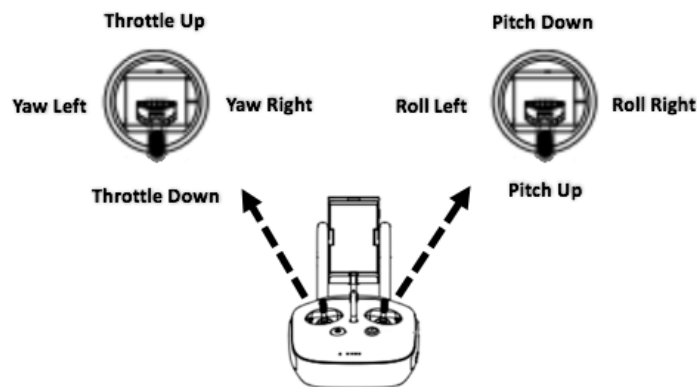
A telemetria é a tecnologia voltada ao monitoramento, medição e/ou rastreamento de objetos por meio de dados enviados via comunicação sem fio ou cabeada a uma central

de controle. Nas aeronaves não tripuladas, a telemetria é responsável pela troca de dados vitais para a navegação, como intensidade do sinal de radiofrequência, quantidade de satélites captados pelo receptor GNSS, carga da bateria (autonomia), atitude/altura de voo, velocidade, direção, dentre outros.

5 COMANDOS DE VOO

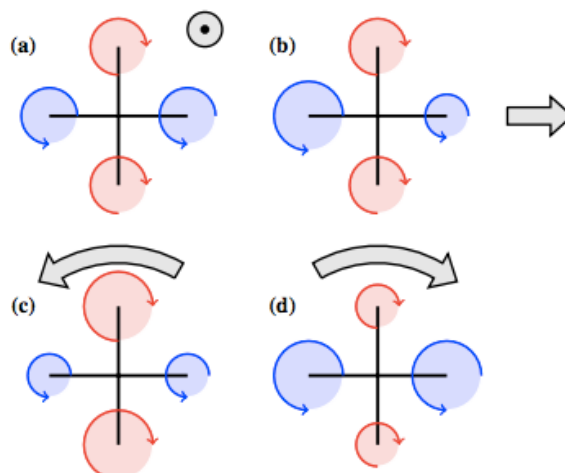
Com o objetivo de gerar as forças e os momentos necessários para o controle do multirrotor, o piloto remoto atua em determinados comandos com o uso da mão direita e da com mão esquerda. Os comandos de voo estão situados na estação de pilotagem remota.

Os multirrotores, com configuração convencional, estarão equipados com dois comandos principais de voo, um localizado à esquerda do controle e o outro localizado à direita. A aplicação desses comandos pelo piloto remoto, isoladamente ou em conjunto, resultarão nas mudanças de *pitch*, *roll*, *yaw* e de deslocamento vertical da aeronave.

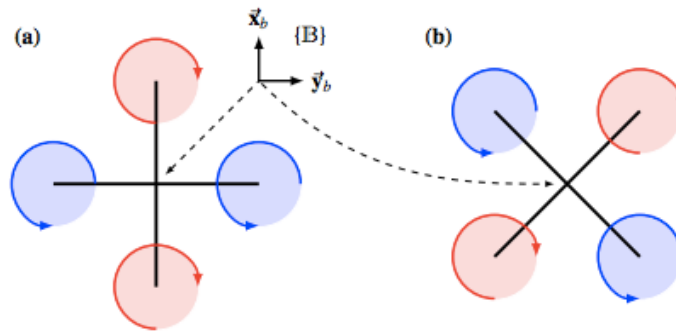


6 ASPECTOS AERODINÂMICOS

Quando se fala em aspectos aerodinâmicos de um multirrotor, busca-se essencialmente conhecer as condições aerodinâmicas gerais de voo que afetam essas aeronaves.



Ao contrário de helicópteros, a maioria dos multirrotores não possuem unidades misturadoras (*swashplates*), como dito, todos os movimentos são gerados através de mudanças coordenadas nas velocidades de rotação dos rotores.



A partir da diferença de rotação dos rotores, uma série de resultados podem ser observados com resultado no voo dos multirrotores.

6.1 VOO PAIRADO

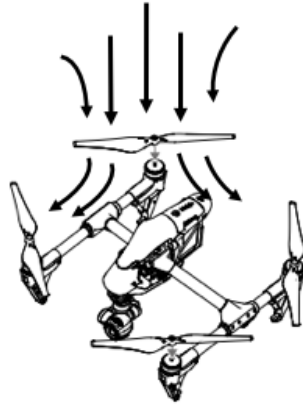
Tipo de voo no qual o multirrotor se encontra imóvel em relação a um ponto. Também, diz-se que o multirrotor em voo pairado está hoverando. O voo pairado é aquele em que a aeronave está em repouso em relação à massa de ar, ou seja, a velocidade do vento em relação ao multirrotor é nula.

No pairado, existem três grandes forças verticais que, na realidade, resumem-se a duas, que são iguais, porém em sentido contrário. São elas: Sustentação (L) e Peso (W), que é acrescido da terceira força que é o Arrasto de Fuselagem.



6.2 ARRASTO DE FUSELAGEM

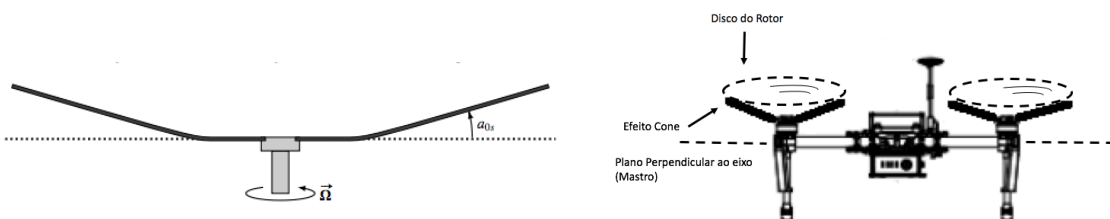
É o arrasto provocado pelo ar jogado para baixo pelos rotores, que vai de encontro à fuselagem. É uma força perpendicular ao vento relativo, portanto uma força vertical e em sentido contrário à sustentação. É um dos fatores que limitam o teto máximo no voo pairado, sendo uma característica deste tipo de voo.



6.3 EFEITO DE CONE

A formação do efeito de cone é fruto da força de sustentação no rotor, combinada com a força inercial centrífuga. A primeira faz com que as pás se desloquem para cima. Já a segunda exerce uma força que faz com que as pás tendam a se alinhar com o plano do disco. Nesse efeito, as pás do rotor fletem mesmo em voo estacionário. Esta flexão decorre de um fenômeno conhecido como conicidade ou efeito de cone.

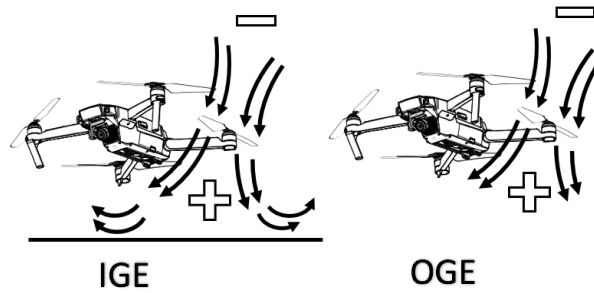
Esse efeito é agravado em curvas ou manobras bruscas, peso excessivo, fatores que aumentam consideravelmente o fator de carga. A diminuição da velocidade de rotação dos rotores acentua o efeito de cone.



6.4 EFEITO DE SOLO

A partir do momento em que o voo pairado é realizado próximo ao solo, a esteira abaixo do rotor deixa de ser livre e ocorrem fenômenos que alteram a potência necessária para esse tipo de voo. O Efeito de Solo é o ganho extra de sustentação que a aeronave adquire, sendo máximo quando se encontra no voo pairado até uma altura máxima de metade do diâmetro do rotor.

É uma consequência do ar comprimido (alta pressão) pelo rotor contra o solo, formando um colchão de ar abaixo da área de cone, com base na aplicação da Terceira Lei de Newton.

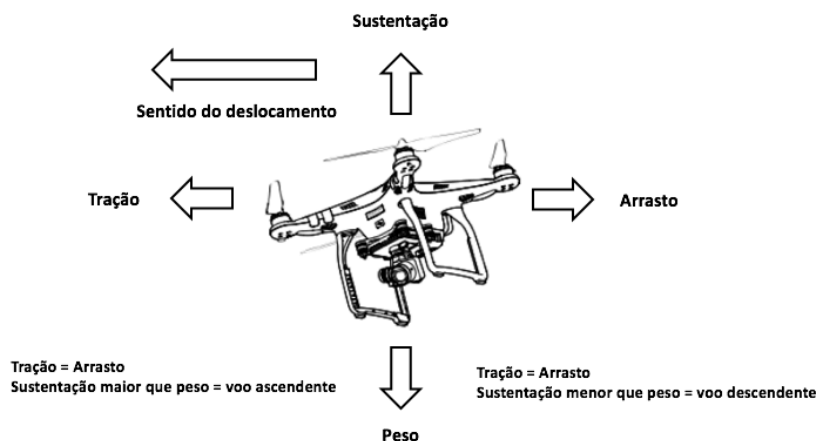


O tipo de terreno também é de grande importância, pois quanto mais consistente e plano for o terreno, maior a quantidade de ar defletida (para cima e para fora) aumentando a sua eficiência, perdendo-a em grama, capim alto e água. Ao sair dos parâmetros do efeito de solo, a pressão positiva (alta), abaixo de área do cone, dissipa-se rapidamente. Dentro do Efeito de Solo é conhecido internacionalmente pela sigla IGE (*In Ground Effect*) e Fora do Efeito de Solo pela sigla OGE (*Out Ground Effect*).

6.5 VOO DE TRANSLAÇÃO

Em voo de translação, o rotor funciona, ao mesmo tempo, como uma hélice e como uma asa. Funcionando como hélice, ele acelera a massa de ar que o atravessa (fluxo de ar perpendicular ao disco do rotor). Funcionando como asa, ele provoca a deflexão do fluxo de ar. As características do voo do multirrotor mudam totalmente durante o voo a frente ou translação.

Com o aumento da velocidade a frente, a eficiência do sistema de sustentação é incrementada por causa do aumento da velocidade horizontal do ar provocada pelo aumento da velocidade do vento relativo ou da aeronave.



Quando o fluxo de ar do rotor aumenta a sua velocidade, as turbulências e vórtices característicos do voo pairado começam a diminuir, sendo lançados para trás e o fluxo

de ar, até agora vertical, começa a ser cada vez mais horizontal. Todas essas alterações melhoram a eficiência do rotor e o desempenho geral do multirrotor.

Devido à maneira com a qual emprega as asas, o multirrotor pode fazer três tipos de voo, que são: o pairado (sem movimento em relação ao solo), o vertical (sustentação maior que o peso) e o horizontal (tração maior que o arrasto).

6.5.1 VOO VERTICAL

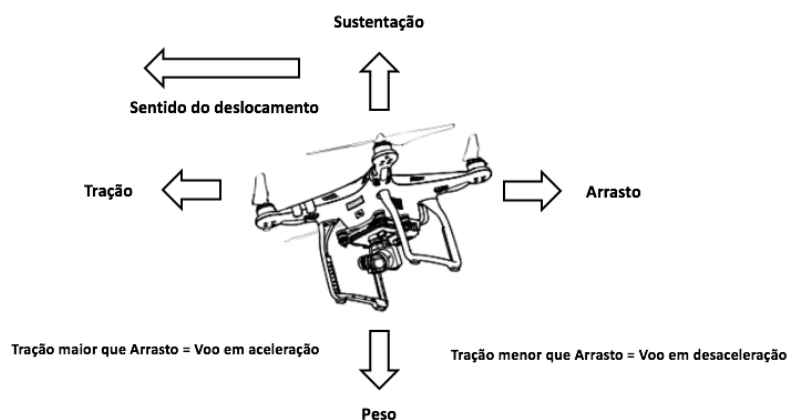
Com o multirrotor no pairado, posiciona-se o comando de *Throttle* para a posição *Up*, alterando a velocidade de rotação de todos os rotores de um multirrotor convencional, tendo-se uma maior ou menor sustentação, com o *Throttle* em *Up* a sustentação fica maior que o peso fazendo a aeronave subir.

6.5.2 VOO HORIZONTAL

Nas aeronaves de asa fixa, a força de tração é obtida da força provocada pela hélice, puxando o ar para trás. Nas aeronaves de asas rotativas, a tração é obtida pela inclinação do vetor sustentação que decompõe com o peso, fato muito mais complexo e que gera várias outras forças.

Com a decomposição da sustentação em duas forças, uma vertical e outra inclinada na direção da metade mais baixa do plano de rotação, sendo que é desta combinação de forças (peso e sustentação) que surgirá a força de tração. Que é uma força na horizontal, portanto mesma direção e sentido contrário ao vento relativo.

Ao aparecer a tração, tem-se o aparecimento do efeito pendular, pois a fuselagem do multirrotor tem a tendência de inclinar-se no mesmo sentido do plano de rotação.



O aumento da velocidade horizontal do multirrotor faz com que surja o efeito de batimento das pás. Este efeito também pode ocorrer devido a correntes de vento, já que estas também gerariam uma mudança na velocidade relativa do ar vista pelos rotores.

6.6 EFEITO PENDULAR

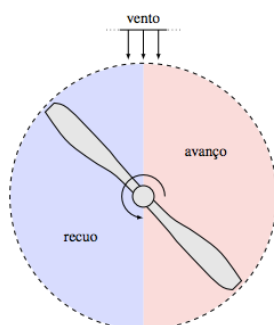
Nas aeronaves de asas rotativas o CP (Centro de Pressão) fica muito acima do CG (Centro de Gravidade). Quando um desses centros é deslocado, cria uma tendência para que o CG se alinhe com a força de sustentação, iniciando um movimento pendular. É o movimento lateral ou longitudinal característico das aeronaves de asas rotativas.

Surge por causa da inércia da fuselagem em acompanhar o movimento de inclinação do plano de rotação e pelo efeito da rigidez giroscópica que tende a manter um corpo em seu momento de equilíbrio, fazendo com que o mastro tenha a tendência de alinhar-se perpendicularmente ao plano de rotação. A partir da inclinação do eixo de rotação, haverá um esforço no mastro no sentido de acompanhar o eixo de rotação. A essa tendência do eixo do mastro chamamos efeito de pêndulo.



6.7 DISSIMETRIA DE SUSTENTAÇÃO

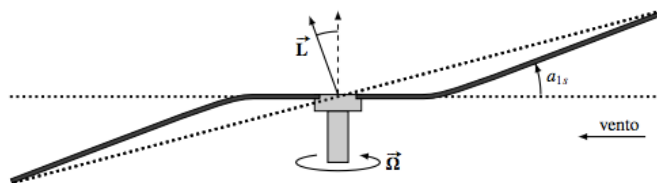
A dissimetria de sustentação ocorre quando o rotor desloca-se em relação à massa de ar. No voo pairado (estacionário), o rotor não se desloca em relação à massa de ar. Portanto, todas as pás dos rotores estão sujeitas à mesma velocidade. No voo pairado, todas as pás dos rotores fornecem a mesma força de sustentação, em qualquer posição dos discos dos rotores.



Com o rotor deslocando-se, em relação à massa de ar, a pá que avança tem a sua velocidade aumentada. A pá que recua, por sua vez, tem a sua velocidade diminuída. Com o deslocamento do multirrotor, a pá que avança fornece mais

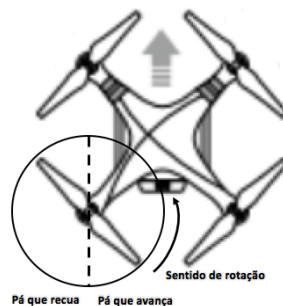
sustentação do que a pá que recua. Essa dissimetria de sustentação causa um momento de rolamento aplicado sobre cada rotor do multirrotor, de valor crescente com a velocidade de deslocamento a frente, que tende a fazê-lo cabrar, tornando-o ingovernável.

A dissimetria de sustentação gerada pelas pás do rotor faz com que surja um torque. Esse torque gera também um deslocamento no plano do rotor. No entanto, este desbalanceamento faz com que as pás do rotor dobrem, inclinando o plano de rotação, ocorrendo o que é chamado de batimento das pás. De fato, as pás do rotor oscilam para cima e para baixo uma vez por rotação.



A dissimetria de sustentação foi o fato que mais problemas trouxe para o desenvolvimento das aeronaves de asas rotativas, sendo somente resolvida por Juan de La Cierva, na década de 20. Dissimetria de Sustentação ou Efeito Translacional é a desigualdade de sustentação entre a metade direita do plano de rotação (pá que avança) e a metade esquerda (pá que recua). Essa desigualdade deve-se à velocidade do ar que passa sobre as pás (velocidade aerodinâmica).

Em helicópteros há técnicas para mitigar o efeito da dissimetria de sustentação. Um exemplo é a variação independente do passo das pás do rotor, com o objetivo de controlar o ângulo de ataque individualmente e equilibrar a sustentação. Como a maioria das pás dos rotores dos multirrotoros não são articuladas, não é possível implementar esta estratégia para todas as aeronaves.



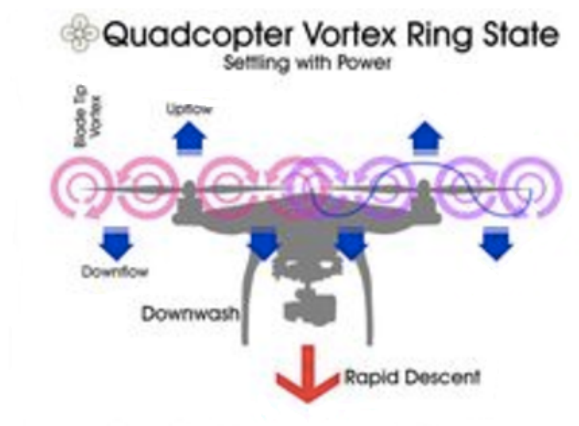
A pá que avança tem uma velocidade aerodinâmica maior que a pá que recua, sendo a sustentação igual à massa de ar que passa por um aerofólio na unidade de tempo. Manifesta-se no início do deslocamento (no voo pairado, sem vento, a velocidade aerodinâmica das pás é igual nas duas metades do plano de rotação).

Porém, quando é iniciado o deslocamento, a pá que avança terá maior sustentação em relação a que recua, embora a velocidade de rotação do rotor seja a mesma, a velocidade aerodinâmica é maior na pá que avança.

6.8 ANEL DE VÓRTICE (*VORTEX RING STATE*)

Caracteriza-se pelo turbilhonamento do ar causado pela passagem no perfil chegando a criar um anel de vórtice em toda a área da pá, quando se perde toda a sustentação, que resultará em um afundamento violento do multirroto.

A partir de velocidades de descida maiores do que um quarto da velocidade induzida no voo pairado, o rotor começa a operar dentro de sua própria esteira de ar turbilhonado. Problemas como perda de controle e perda de sustentação podem vir a ocorrer nesta condição.

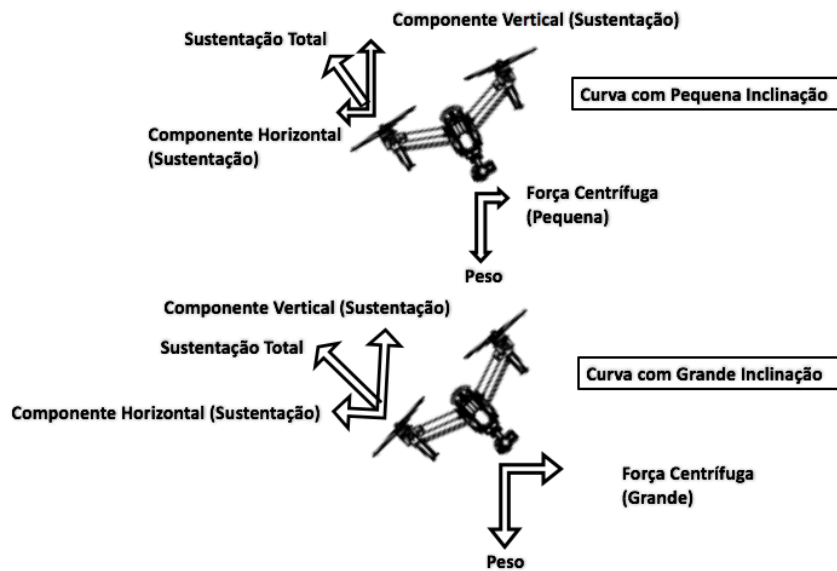


Os valores de rampa de aproximação e de velocidade de descida limites para evitar a região de anéis de vórtice são diferentes para cada tipo de multirroto. Assim, esses valores variam com o peso e a altitude.

Quanto menor o peso e menor a altitude-densidade, maior deve ser o cuidado por parte do piloto remoto, pois esse fenômeno do vórtice acontecerá com velocidade de descida menor. No caso de entrada inadvertida na região de vórtice, recomenda-se, o mais breve possível, o aumento da velocidade a frente, como meio mais efetivo de sair dessa situação perigosa.

6.9 FATOR DE CARGA

Relação entre uma carga específica e o peso total de aeronave. A carga específica é expressa em termos de forças aerodinâmicas, forças de inércia ou reações do solo ou da água. O fator de carga varia na razão direta do cosseno do ângulo da inclinação da curva ou manobra de uma aeronave, de tal forma que no voo retilíneo horizontal o fator de carga será igual a 1 G (uma gravidade).



Esse aumento de peso dá-se pelo aparecimento de mais uma força que vai atuar sobre a fuselagem, puxando-a para fora do movimento curvilíneo, sendo denominada de força centrífuga. O aparecimento desta nova força acarretará uma diminuição na amplitude do disco, diminuindo ainda mais a sustentação.

6.10 ROLAMENTO DINÂMICO

Em voo, grandes inclinações laterais do multirrotoz não são muito preocupantes, porém, no solo, até os ângulos moderados de inclinação lateral podem ser desastrosos e serem suficientes para tombar o multirrotoz.

O rolamento dinâmico ocorre tipicamente quando o ângulo de rolamento crítico é excedido. Este ângulo, conhecido como ângulo de rolamento dinâmico, é definido como a inclinação máxima além da qual a autoridade de comando do piloto remoto não é capaz de segurar a velocidade angular que se desenvolve lateralmente em torno de um ponto de pivô como o trem de pouso.



O voo lateral, próximo ao solo e com a presença de obstáculos, se constitui em condição ideal para o surgimento do rolamento dinâmico e o conseqüente tombamento do multirrotoz. Identificado o perigo, o piloto remoto deve estar alerta e tomar medidas preventivas para assegurar que o multirrotoz não entre nessa condição. Entretanto, ele deve, da mesma forma, saber o que fazer caso se observe, por alguma razão, este fenômeno.