

FUNDAMENTOS DE VANTS: PROJETO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO

EBOOK

Experimente o céu como nunca antes.



Visite nosso Website
<https://scl.ifsp.edu.br>





Sumário

- Conceitos fundamentais (VANT/UAV/RPAS), histórico e aplicações;
- Plataformas e aerodinâmica básica (multirrotor, asa fixa, híbridos/VTOL);
- Propulsão e desempenho (hélices/rotores, L/D, curvas de potência; IGE/OGE);
- Energia e baterias (LiPo/Li-ion, BMS, C-rate, segurança, autonomia);
- Enlaces e telemetria (RSSI, SNR, FSPL, Fresnel; CRSF/ELRS, MAVLink);
- Cargas úteis e aplicações (RGB, multiespectral, termal; NDVI/NDRE);
- Fotogrametria básica (GSD, overlap/sidelap, SfM/MVS, GCP, RTK/PPK, ASPRS);
- Planejamento de missão e segurança operacional (envelopes, IGE/OGE; GO/NO-GO);
- QA/QC e relato de precisão (RMSE, classes);
- Fórmulas úteis e regras práticas.



Conceitos Fundamentais

Terminologia

- VANT — Veículo Aéreo Não Tripulado (termo amplo).
- UAV — Unmanned Aerial Vehicle (a aeronave em si).
- RPAS — Remotely Piloted Aircraft System (aeronave + estação de solo + enlaces).
- GCS — Ground Control Station (rádio, antenas, software).
- Payload/Carga útil — sensores (câmeras RGB, multiespectral, termal), atuadores etc.





Conceitos Fundamentais Histórico e aplicações

- Militares → civis: barateamento de sensores, motores elétricos e controle embarcado.
- Aplicações: inspeção de telhados/linhas, mapeamento e agro, busca e salvamento, monitoramento ambiental, cinematografia, topografia, obras e logística experimental.



Conceitos Fundamentais

Escolha da plataforma: ideia-guia



MULTIRROTOR

- Decola/pousa vertical
- Hover preciso
- Operação simples
- Menor autonomia
- Usos: inspeções, audiovisual, mapeamentos menores



ASA FIXA

- Sustentação aerodinâmica
- Maior autonomia/alcance
- Exige lançamento/recuperação
- Usos: mapeamentos extensos, patrulhas, trajetos longos



HÍBRIDOS/VTOL

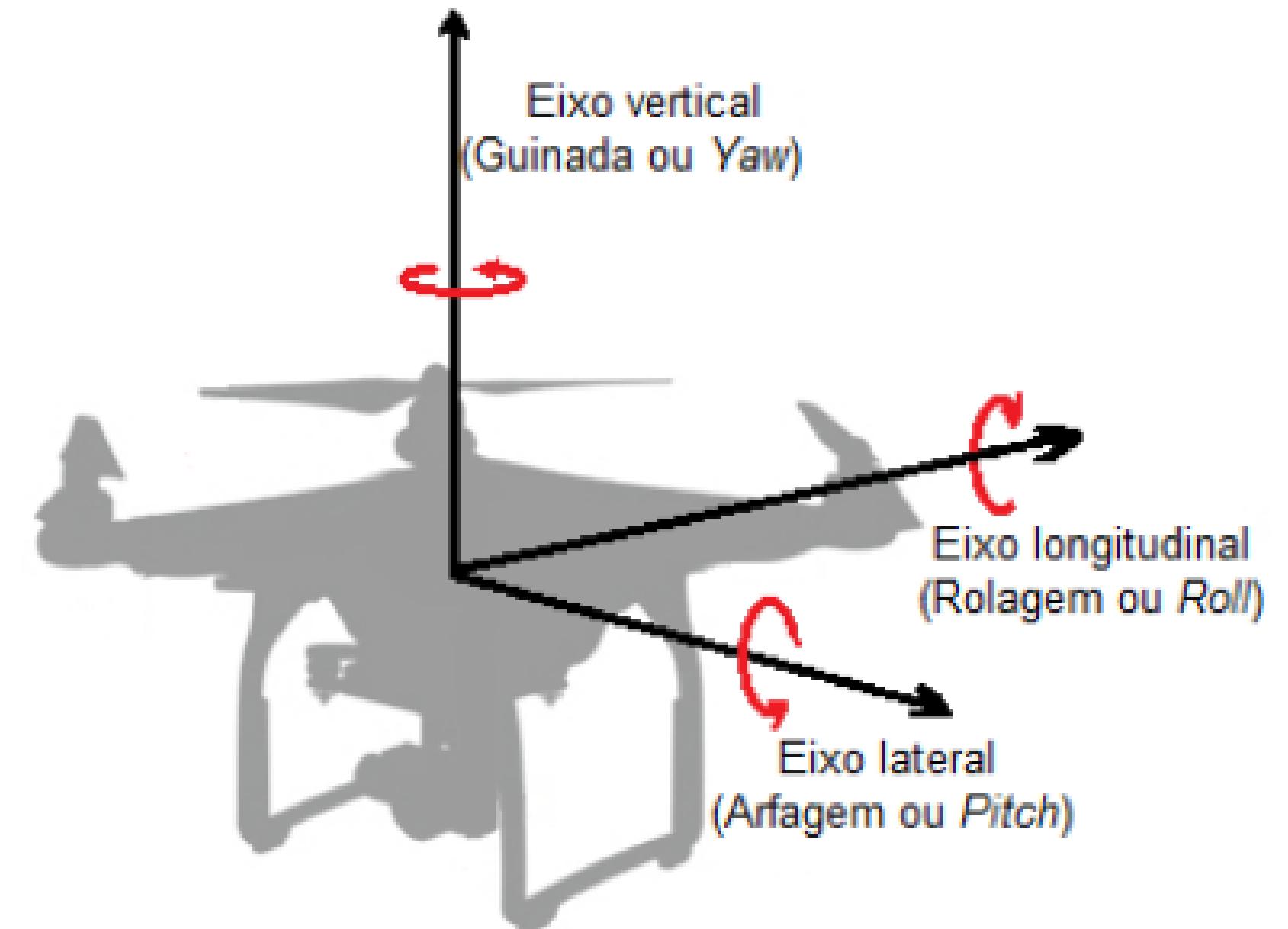
- Decolagem vertical + cruzeiro eficiente
- Versatilidade
- Maior complexidade/custo
- Usos: locais sem pista com necessidade de alcance

Plataformas Aerodinâmica Básica



MULTIRROTOR

- 4–8 rotores contrarrotativos (CW/CCW) cancelam torque
- Controle por variação de rotação (throttle por motor)
- Eixos: roll/pitch/yaw via diferencial de empuxo
- Mecânica simples; controle depende de eletrônica/firmware

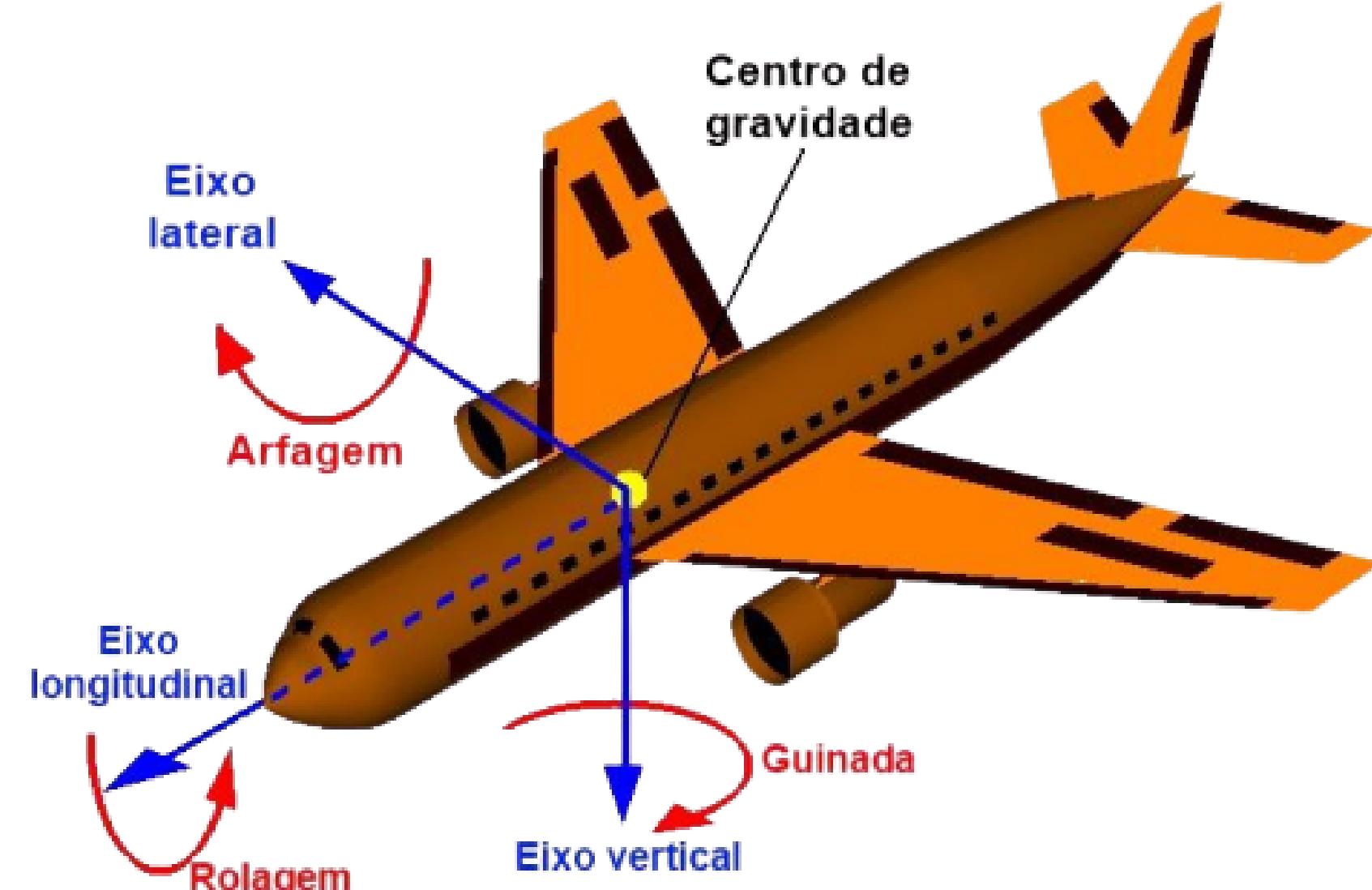


Plataformas Aerodinâmica Básica



ASA FIXA

- Asa, fuselagem, empenagem; AR (aspect ratio) importa
- L/D (lift-to-drag) e eficiência aerodinâmica
- Sustentação pela asa (não pelo motor) → planeio possível

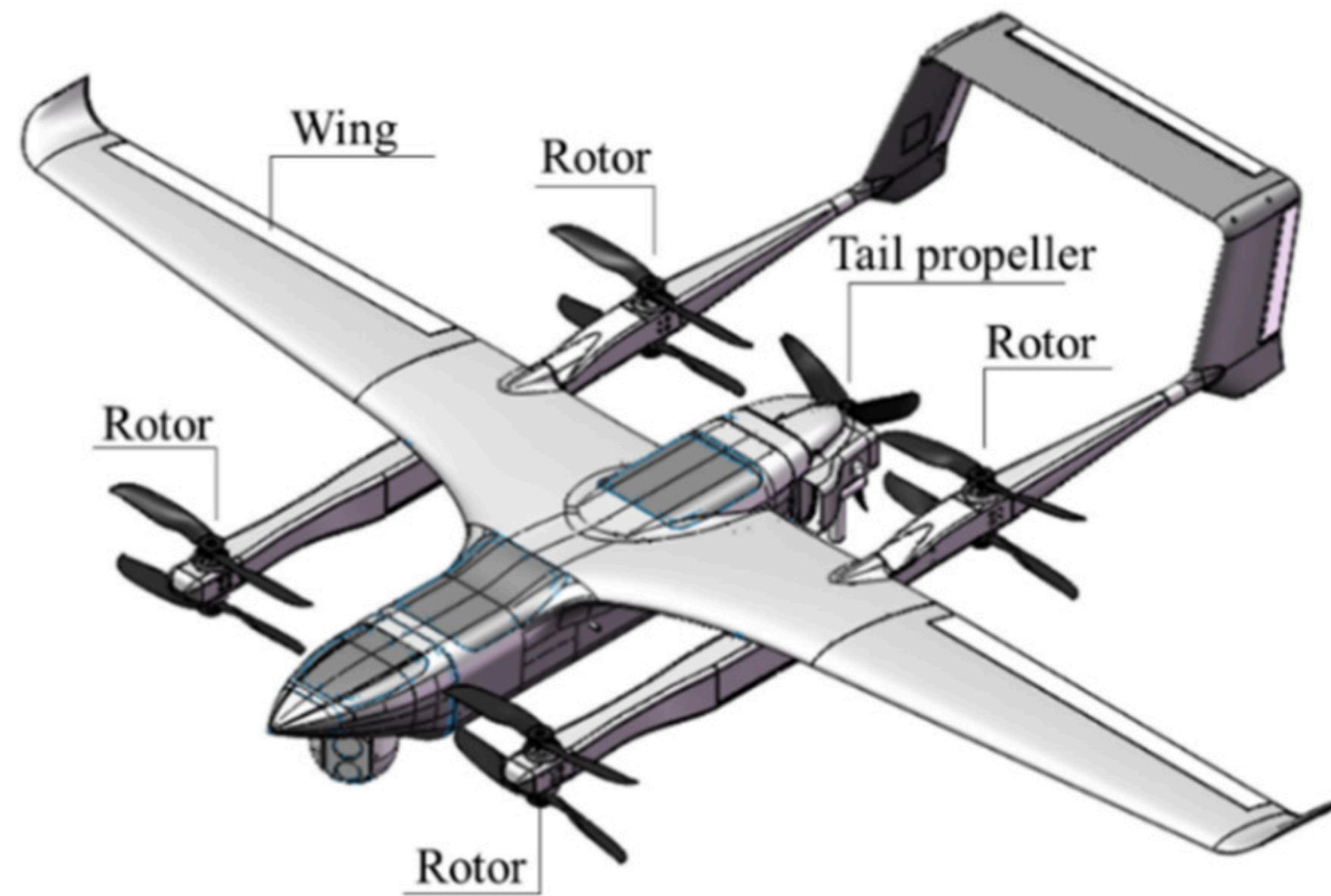


Plataformas Aerodinâmica Básica



HÍBRIDOS/VTOL

- VTOL que decola/pousa vertical e cruza como asa fixa
- Arquiteturas: tiltrotor, tiltwing, tailsitter, “lift+cruise”
- Transição é o ponto crítico (controle/energia)



Plataformas e aerodinâmica básica

Parâmetros-chave

- AR (aspect ratio): $\text{envergadura}^2/\text{área}$ – afeta arrasto induzido
- W/S (wing loading): peso/área alar – influência em velocidade de estol e pouso/decolagem
- DL (disk loading): peso/área dos discos – potência no hover

Propulsão e desempenho Hélices/rotores (intuição física)

- Empuxo \approx vazão mássica $\times \Delta V$. Mais massa de ar com ΔV menor costuma ser mais eficiente \rightarrow hélices maiores e RPM menor (dentro dos limites).
- Eficiência propulsiva (cruzeiro)

Propulsão e desempenho

Asa fixa: curvas de potência

- Arrasto total = induzido (baixas V) + parasita (altas V).
- Existe a velocidade de menor potência requerida (melhor endurance).
- Alcance máximo ocorre pouco acima do ponto de menor potência.

Propulsão e desempenho

Multirrotor: hover e efeito solo

- Hover exige potência contínua.
- IGE (In-Ground Effect): perto do solo, menos potência. E OGE (Out-of-Ground Effect): longe do solo, mais potência.
- Planeje margens para OGE (não dependa de IGE).

Energia e baterias

LiPo × Li-ion

- “LiPo” geralmente se refere à embalagem pouch (gel/polímero), com catodo/ânodo de famílias Li-ion (NMC/NCA/LFP).
- Li-ion cilíndrica (ex.: 21700) tende a maior Wh/kg; LiPo (pouch) facilita formatos e picos de corrente.

Energia e baterias

C-rate, DoD, SoC e vida útil

- C-rate: $1C \approx$ descarga em $\sim 1h$; C alto \rightarrow mais calor e menos capacidade efetiva.
- DoD (profundidade de descarga) menor \rightarrow mais ciclos.
- Evite permanecer muito tempo a 100% SoC fora da missão.

Energia e baterias

BMS (Battery Management System)

- Proteções: OV/UV (sobre/baixa tensão), OC/SC (sobre/curto-corrente), OT/UT (sobre/baixa temperatura).
- Estimativas: SoC (estado de carga) e SoH (saúde).
- Balanceamento de células (passivo/ativo) aumenta entrega útil de capacidade.

Energia e baterias

Carga/armazenamento/segurança

- CC-CV (corrente constante → tensão constante).
- Armazenamento: ~40–60% SoC em local fresco/seco. Transporte: seguir diretrizes de segurança; preferir SoC reduzido.
- Inspecionar packs (inchaço, dano), supervisionar carga, usar bolsa/suporte resistente a fogo.

Energia e baterias

Estimando autonomia

- $\text{Tempo} \approx \text{Energia útil (Wh)} / \text{Potência média (W)}$
- Multirrotor: peso/DL $\uparrow \rightarrow$ potência $\uparrow \rightarrow$ tempo \downarrow .
- Asa fixa: voe perto da velocidade de menor potência.

Exemplo – autonomia

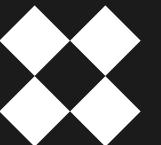
Bateria 6S 10Ah ($\sim 22,2 \text{ V} \times 10 \text{ Ah} = 222 \text{ Wh}$). Potência média 370 W \rightarrow tempo $\approx 222/370 \approx 0,60 \text{ h} \approx 36 \text{ min}$ (antes das margens). Reserve 20% $\rightarrow \approx 29 \text{ min}$.



Enlaces e telemetria

Métricas essenciais

- RSSI (nível), SNR (relação sinal–ruído), LQ (qualidade de enlace).
- FSPL (Free-Space Path Loss): perda mínima por distância/frequência.
- Zona de Fresnel: mantenha a 1^a zona o mais livre possível (especialmente no meio do enlace).





Enlaces e telemetria

Bandas e modos

- 900 MHz (onde permitido): maior penetração; menor taxa.
- 2.4 GHz: equilíbrio; competição com Wi-Fi/Bluetooth.
- 5.8 GHz: mais banda; menor alcance/penetração.
- Modos: FHSS (salto de frequência), DSSS (espalhamento direto), CSS/LoRa (alcance com baixa taxa).





Enlaces e telemetria

Protocolos

- CRSF/ELRS: RC + telemetria de baixa latência via UART (estatísticas de link, LQ).
- MAVLink: protocolo de mensagens (status, missão, parâmetros) que trafega por rádio/Wi-Fi/LTE.





Enlaces e telemetria

Planejamento por link budget (mini-roteiro)

- 1) Escolha banda/modo.
- 2) Calcule FSPL na distância-alvo.
- 3) Some ganhos/perdas (antenas, cabos).
- 4) Exija margem ($\geq 10\text{--}20$ dB).
- 5) Limpe Fresnel: ganhe altura/reoriente antenas.

Exemplo – FSPL

$$\text{FSPL(dB)} \approx 32,44 + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20 \cdot \log_{10}(d_{\text{km}}).$$

$$\text{Para 2,4 GHz a 1 km: } 32,44 + 20 \cdot \log_{10}(2400) + 20 \cdot \log_{10}(1) \approx 100 \text{ dB.}$$

Cargas úteis e aplicações

RGB

- Alta resolução espacial, custo acessível; ideal para ortomosaicos e inspeção visual.

Multiespectral

- Bandas típicas: Blue/Green/Red/RedEdge/NIR.
- $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, $NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$.
- Calibração radiométrica: fotos do painel de reflectância + DLS (luz incidente).

Termal (LWIR 8–14 μm)

- Mede radiação emitida; depende de emissividade e NETD.
- Aplicações: perdas térmicas, umidade, inspeção elétrica, SAR/fauna; planeje horários (menor insolação/vento).



Fotogrametria básica

GSD

- $GSD \approx (\text{altura} \times \text{tamanho do pixel}) / \text{distância focal} \rightarrow \text{"tamanho do pixel no solo"}$.
- Defina GSD pelo menor alvo de interesse.





Fotogrametria básica

Overlap & Sidelap

- RGB típico: 75–80% (frente) e 60–70% (lateral).
- Multiespectral: $\geq 75\%$ nos dois sentidos (ou mais em luz dura).





Fotogrametria básica

Pipeline SfM/MVS

- SfM: detecção de pontos, auto-calibração, bundle adjustment.
- MVS: nuvem densa → malha/DSM/DTM → ortomosaico.
- Produtos: orto, DSM/DTM/DEM, nuvem de pontos.

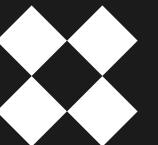




Fotogrametria básica

Georreferenciamento e precisão

- GCPs (pontos com coordenadas precisas) e/ou RTK/PPK.
- Relato segundo ASPRS: RMSEH (horizontal) e RMSEZ (vertical), classes de acurácia.





Planejamento de missão e segurança

Envelopes de segurança

- Operar com margem de potência/controle: peso, vento, temperatura, OGE/IGE.
- Definir GO/NO-GO e zonas de escape.





Planejamento de missão e segurança

Checklists (piso mínimo)

- Pré-voo: meteo/vento, GSD/overlaps, baterias/cartões, antenas, failsafe/RTH, GCPs/RTK, emissividade (termal), painel/DLS (multi).
- Em voo: monitorar LQ/RSSI/SNR, corrente/temperatura, rajadas; reagir cedo (altura/posição).
- Pós-voo: baixar logs, revisar imagens (nitidez/exposição), salvar roteiros.





Planejamento de missão e segurança

Checklists (piso mínimo)

- Pré-voo: meteo/vento, GSD/overlaps, baterias/cartões, antenas, failsafe/RTH, GCPs/RTK, emissividade (termal), painel/DLS (multi).
- Em voo: monitorar LQ/RSSI/SNR, corrente/temperatura, rajadas; reagir cedo (altura/posição).
- Pós-voo: baixar logs, revisar imagens (nitidez/exposição), salvar roteiros.





QA/QC e relato de precisão

QA (garantia da qualidade)

- Preventivo: SOPs, treinamento, calibração, critérios de aceitação, checklists.





QA/QC e relato de precisão **QC (controle da qualidade)**

- Verificativo: nitidez, exposição, blur, rolling shutter; RMSEH/Z; radiometria (painéis/histogramas); integridade de orto/DSM.





QA/QC e relato de precisão

Relatar precisão

- Declarar GSD, classe ASPRS, RMSE e condição de coleta (horários, iluminação, vento) para rastreabilidade.



Fórmulas úteis e regras práticas

Aerodinâmica/Propulsão

- Sustentação:

$$L = C_L \frac{\rho}{2} S V^2$$

- Arrasto:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$$

- Endurance (asa fixa): voe perto da menor potência requerida.
- Alcance (asa fixa): velocidade um pouco acima do ponto de menor potência.
- Hover (multirrotor): $DL \downarrow \rightarrow$ potência \downarrow .

Fórmulas úteis e regras práticas

Energia

- $\text{Tempo} \approx \text{Wh útil} / \text{W}$
- C-rate alto \rightarrow calor e queda de capacidade efetiva.
- Armazenar 40–60% SoC; evitar 100% por longos períodos.

Enlaces

- $\text{FSPL(dB)} \approx 32,44 + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20 \cdot \log_{10}(d_{\text{km}})$
- Limpar Fresnel (principalmente no meio do enlace) melhora SNR.

Fotogrametria

- $\text{GSD} \approx (\text{altura} \times \text{pixel}) / \text{focal}$
- Overlaps: 75–80% / 60–70% (RGB); $\geq 75 / \geq 75$ (multi).
- $\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$; $\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{RedEdge}) / (\text{NIR} + \text{RedEdge})$.

Modelos e planilhas

Modelo de estimativa de autonomia (multirrotor)

1. Medir potência média em missão representativa (telemetria).
2. Calcular energia útil ($Wh = V_{nom} \times Ah \times \text{fator de uso}$, ex.: 0,8).
3. $\text{Tempo} \approx Wh / W$.
4. Abater margens (vento, OGE, temperatura): -10 a -25%.
5. Registrar resultados por payload e condições (criar tabela por aeronave).

Aeronave	Bateria (Wh)	Potência (W)	Fator uso	Tempo teórico	Margem	Tempo previsto
MR-A	222	370	0,8	0,48 h	-20%	23 min

Modelos e planilhas

Mini link budget

- Entrada: f (MHz), d (km), ganhos/perdas (dBi/dB), sensibilidade (dBm).
- FSPL \rightarrow potência recebida = $P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - FSPL -$ perdas.
- Margem = $P_{rx} -$ Sensibilidade (dB). Alvo: $\geq 10-20$ dB.
- Ajustes: antena base com ganho moderado, altura para limpar Fresnel, reduzir rates de telemetria.

Modelos e planilhas

Plano de voo (checklist essencial)

- Objetivo do produto (ortho/DSM/índices).
- GSD alvo → altura e lente.
- Overlaps e faixa de voo; rota e tempo total.
- Janela de luz (estável); painel/DLS (multi); emissividade/horário (termal).
- GCP/RTK/PPK: quantos, distribuição, coleta.
- Segurança: peso, vento, OGE, zonas de escape, RTH.

Glossário de siglas

- AR — Aspect Ratio: envergadura²/área; afeta arrasto induzido e L/D.
- ASPRS — American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: padrões de acurácia.
- BVLOS — Beyond Visual Line of Sight: além da linha de visada visual.
- BMS — Battery Management System: proteção (OV/UV/OC/SC/OT), SoC/SoH, balanceamento.
- CC-CV — Constant Current–Constant Voltage: perfil de carga Li-ion.
- CD/CL — coeficientes de arrasto/sustentação.
- CRSF — Crossfire Serial Protocol: RC+telemetria de baixa latência (UART).
- CSS/LoRa — Chirp Spread Spectrum / Long Range: grande alcance, baixa taxa.
- DL — Disk Loading: peso/área total dos discos (hover).
- DLS — Downwelling Light Sensor: mede luz incidente (calibração radiométrica).
- DoD — Depth of Discharge: profundidade de descarga.
- DSM/DTM/DEM — modelos de superfície/terreno/elevação.
- ELRS — ExpressLRS: RC/telemetria de longo alcance/baixa latência.
- EIRP — Effective Isotropic Radiated Power: potência irradiada efetiva.
- Ethernet — rede local IP (TCP/UDP) para payloads/vídeo/telemetria.

Glossário de siglas

- FAA — Federal Aviation Administration.
- FSPL — Free-Space Path Loss: perda em espaço livre.
- GCP — Ground Control Point: ponto de controle em solo.
- GCS — Ground Control Station: estação de controle em solo.
- GNDVI — Green NDVI: variante usando banda Green.
- GSD — Ground Sample Distance: tamanho do pixel no solo.
- IGE/OGE — In/Out of Ground Effect: em/fora do efeito solo.
- KV — constante do motor BLDC (RPM/V sem carga).
- L/D — razão sustentação/arrasto (eficiência).
- LTE — Long-Term Evolution: rede celular (dados).
- LWIR — Long-Wave Infrared (8–14 μm): termografia.
- MAVLink — Micro Air Vehicle Link: protocolo de mensagens UAS.
- MVS — Multi-View Stereo: densificação após SfM.
- NDRE — Normalized Difference Red Edge Index: $(\text{NIR} - \text{RE})/(\text{NIR} + \text{RE})$.
- NDVI — Normalized Difference Vegetation Index: $(\text{NIR} - \text{R})/(\text{NIR} + \text{R})$.
- NETD — Noise-Equivalent Temperature Difference: sensibilidade termal.

Glossário de siglas

- NIR — Near-Infrared: infravermelho próximo.
- OCD — Organismo de Certificação Designado (ANATEL).
- PHAK — Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (FAA).
- PPK/RTK — Post-Processing/Real-Time Kinematic: GNSS de alta precisão.
- PWM — Pulse Width Modulation: comando por largura de pulso (servos/ESCs).
- QA/QC — Quality Assurance/Quality Control: garantia/controle da qualidade.
- RF — Radiofrequência.
- RSSI — Received Signal Strength Indicator: nível de sinal.
- SfM — Structure-from-Motion: reconstrução 3D a partir de imagens.
- SNR — Signal-to-Noise Ratio: relação sinal–ruído.
- UART — Universal Asynchronous Receiver/Transmitter: serial assíncrona.
- VTOL — Vertical Take-Off and Landing: decolagem/pouso vertical.
- W/S — Wing Loading: peso/área alar.