

PIBIT

◦

Analise Comparativa de Motores e Hélices de uso em
Aeronaves agrícolas de Asa Fixa

Vinicio Andrade Trento

19 de dezembro de 2025

Sumário

1 Contextualização e Definição dos Requisitos de Engenharia	3
1.1 O Envelope Operacional Agrícola	3
2 Análise Aprofundada de Motores de Combustão Interna (ICE)	3
2.1 Motores de Ciclo Otto de 2 Tempos (2T)	4
2.1.1 Arquitetura Mecânica e Dinâmica	4
2.1.2 Gerenciamento Térmico e Lubrificação	4
2.2 Motores de Ciclo Otto de 4 Tempos (4T)	4
2.2.1 Eficiência Volumétrica e Consumo	4
2.3 Injeção Eletrônica (EFI) vs. Carburação	5
3 Pesquisa de Sistemas de Propulsão Elétrica de Alta Performance	5
3.1 Benefícios dos Motores Elétricos x Combustão	5
3.2 Tecnologias de Motor Elétrico	5
4 Hélices: Aerodinâmica e Materiais para Carga Pesada	6
4.1 Seleção de Material e Construção	6
5 Sensoriamento e Telemetria Avançada	6
5.1 Monitoramento de Fluidos e Temperatura	6
5.2 Monitoramento de Vibração	7

1 Contextualização e Definição dos Requisitos de Engenharia

O presente relatório constitui a execução da fase de pesquisa fundamental delineada no Plano de Trabalho PIBIT, com foco específico no desenvolvimento de soluções para o projeto NAPI - Aeronaves de Pequeno Porte.

A missão central consiste em subsidiar a engenharia de sistemas para o AGRO-VANT, uma plataforma de asa fixa destinada a operações agrícolas que exigem robustez para cargas úteis elevadas (categorias *Heavy* e *Super Heavy*) e autonomia estendida.

A transição de aeronaves leves para plataformas pesadas ($MTOW > 25\text{ kg}$) e superpesadas ($MTOW > 150\text{ kg}$) impõe uma mudança paradigmática na seleção de componentes. Diferente dos drones de pequeno porte, onde a simplicidade e o baixo custo dominam, a classe pesada exige certificação de confiabilidade, redundância crítica e eficiência termodinâmica otimizada.

1.1 O Envelope Operacional Agrícola

O ambiente agrícola apresenta desafios singulares que definem os requisitos de propulsão:

- **Ciclos de Carga:** Ao contrário de voos de cruzeiro estáveis, a aplicação agrícola envolve “tiros” de pulverização, curvas de reversão apertadas e variações constantes de altitude (seguimento de terreno), exigindo resposta rápida do acelerador (*throttle response*).
- **Atmosfera Hostil:** A presença de material particulado, umidade elevada e vapores químicos corrosivos exige que motores e aviônica possuam blindagem (IP ratings elevados) e filtragem de ar superior.
- **Densidade de Altitude:** Operações no interior do Brasil frequentemente ocorrem em dias quentes e altitudes consideráveis, reduzindo a densidade do ar (ρ). Isso afeta diretamente a mistura ar-combustível em motores aspirados e a eficiência de empuxo das hélices, exigindo margens de potência (*power reserve*) superiores a 30%.

2 Análise Aprofundada de Motores de Combustão Interna (ICE)

Para aeronaves de asa fixa de grande porte destinadas a longas durações de voo ($endurance > 2\text{ horas}$), a densidade energética dos hidrocarbonetos permanece insuperável pela tecnologia de baterias atual. A gasolina aeronáutica (Avgas) ou automotiva premium

oferece cerca de 12 000 Wh/kg, enquanto as melhores baterias de Lítio atingem 250 Wh/kg a 300 Wh/kg.

2.1 Motores de Ciclo Otto de 2 Tempos (2T)

Os motores de dois tempos representam o padrão industrial para drones na faixa de 25 kg a 120 kg devido à sua simplicidade mecânica e alta relação potência-peso (*Power-to-Weight Ratio*).

2.1.1 Arquitetura Mecânica e Dinâmica

A ausência de válvulas de admissão e escape (substituídas por janelas no cilindro) e a ignição a cada revolução do virabrequim conferem aos motores 2T uma capacidade de entrega de torque imediata.

- **Configuração Boxer (Flat-Twin):** Para a aplicação no AGRO-VANT, a configuração de cilindros opostos (Boxer) é a recomendação técnica primária. O movimento simultâneo dos pistões para fora e para dentro cancela as forças de inércia de primeira ordem, reduzindo drasticamente a vibração transferida para a fuselagem.
- **Sistemas de Admissão:** Motores de alta performance utilizam válvulas de palhetas (*reed valves*) no cárter. Elas otimizam o fluxo de mistura em baixas rotações e impedem o refluxo, melhorando o torque em regimes parciais – essencial para manter a velocidade de pulverização constante.

2.1.2 Gerenciamento Térmico e Lubrificação

2.2 Motores de Ciclo Otto de 4 Tempos (4T)

Para a categoria “Super Heavy” (>150 kg) ou quando a eficiência de combustível é prioritária sobre a potência bruta, os motores 4T ganham relevância.

2.2.1 Eficiência Volumétrica e Consumo

Os motores 4T possuem um ciclo de admissão e escape dedicado, permitindo uma queima muito mais completa do combustível.

- **Fuel Consumption** Um motor 2T típico consome 450 g/kWh a 600 g/kWh. Um motor 4T moderno com injeção pode atingir 280 g/kWh a 350 g/kWh.
- **Confiabilidade:** A lubrificação por cárter úmido ou seco garante uma película de óleo constante, resultando em TBO (*Time Between Overhaul*) de 1000 a 2000 horas.

2.3 Injeção Eletrônica (EFI) vs. Carburação

A pesquisa aponta uma tendência irreversível para sistemas EFI em drones pesados.

- **Carburadores:** Incapazes de compensar variações de densidade do ar em tempo real.
- **EFI:** A ECU ajusta o tempo de injeção em microssegundos, mais eficaz e garante economia maior de combustível.

3 Pesquisa de Sistemas de Propulsão Elétrica de Alta Performance

Embora limitados em autonomia total, os sistemas elétricos oferecem confiabilidade mecânica superior e controle de torque instantâneo.

3.1 Benefícios dos Motores Elétricos x Combustão

- **Eficiência Energética:** Motores elétricos atingem eficiência de 90% a 95%, enquanto motores de combustão típicos operam entre 25% e 35%.
- **Controle Instantâneo de Torque:** O motor elétrico entrega torque máximo imediatamente, ideal para aceleração rápida e manobras.
- **Manutenção Reduzida:** Sem válvulas, sem carburador, sem sistemas complexos de lubrificação.
- **Silêncio Operacional:** Menor ruído em operação, reduzindo impacto sonoro no ambiente agrícola.

3.2 Tecnologias de Motor Elétrico

- **Motores Brushless DC (BLDC):** Preferidos pela alta relação potência-peso e eficiência. Requerem controladores eletrônicos (ESC) avançados.
- **Controle por FOC (Field-Oriented Control):** Permite controle preciso de torque e velocidade, otimizando a eficiência em toda a faixa operacional.

4 Hélices: Aerodinâmica e Materiais para Carga Pesada

4.1 Seleção de Material e Construção

A escolha do material impacta a assinatura de vibração do sistema propulsivo.

Tabela 1: Comparativo de Materiais de Hélices para Drones Pesados

Material	Rigidez	Peso	Vibração	Resistência	Aplicação
Madeira Laminada	Média	Médio	Alta Ab- sorção	Baixa (Quebra segura)	Motores a combustão (amacia- mento)
Fibra de Carbono (CFRP)	Altíssima	Baixo	Baixa (Trans- mite)	Alta (Pode danificar eixo)	Elétricos e 2T balan- ceados
Nylon/Carbono	Baixa	Médio	Média	Média	Drones menores (inade- quado $>25\text{kg}$)

5 Sensoriamento e Telemetria Avançada

Para garantir a segurança operacional e o monitoramento detalhado da aeronave, a seguinte suíte de sensores deve ser integrada:

5.1 Monitoramento de Fluidos e Temperatura

- **Sensor de Fluxo de Combustível (Flowmeter):** Em vez de medir o nível do tanque (que oscila durante o voo), este sensor mede o consumo real instantâneo. Isso permite que o sistema calcule a autonomia restante com alta precisão.
- **Termopares (Sensores de Temperatura):** Devem ser instalados dois tipos de sensores térmicos para proteção do motor:
 - *Sensor de Cabeçote (CHT)*: Monitora se o motor está superaquecendo fisicamente, prevenindo travamento do pistão.
 - *Sensor de Exaustão (EGT)*: Monitora a temperatura dos gases de escape. Uma mudança brusca aqui alerta sobre falhas na queima (mistura pobre ou falha na

vela) antes que o motor pare.

5.2 Monitoramento de Vibração

- **Acelerômetro:** Utiliza-se o acelerômetro para “escutar” a saúde mecânica.
- **Diagnóstico Automático:** O sistema identifica padrões de vibração que indicam se uma hélice está desbalanceada ou se os rolamentos internos do motor estão desgastados, alertando para manutenção preventiva.

Referências

- [1] Tiruvenkadam, N., et al. (2024). *Investigation of Structural and Thermal Analysis of Drone Propeller Materials*. Journal of Physics: Conference Series, 2925, 012002. IOP Publishing. Disponível em: doi:10.1088/1742-6596/2925/1/012002[cite: 1962, 1963, 1982, 1984]
- [2] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill Education.