



VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO: UMA ALTERNATIVA AO TRANSPORTE DE CARGA

Elder Soares Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro

Março de 2018

VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO: UMA ALTERNATIVA AO TRANSPORTE
DE CARGA

Elder Soares Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Prof. Ronaldo Balassiano, Ph.D.

Prof. Rafael Garcia Barbastefano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Rodrigues, Elder Soares

Veículo Aéreo Não Tripulado: Uma Alternativa ao Transporte de Carga/ Elder Soares Rodrigues – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XV, 118 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcio de Almeida D’Agosto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 104-110.

1. Veículo Aéreo Não Tripulado. 2. Drone. 3. Transporte de Carga. I. D’Agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Dedico esse trabalho aos meus queridos pais,
Firmino e Penha, e a minha amada esposa Carolina*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de existir cercado por familiares e amigos queridos. Ele tem me guiado, protegido e abençoado meu caminho.

Aos meus pais por me educarem da melhor forma possível. Eles me deram toda base necessária para que eu me tornasse uma pessoa íntegra, honesta e fiel a Deus. Nunca pouparam esforço na minha educação e crescimento.

A minha amada esposa Carolina pelo carinho, apoio e compreensão para que eu pudesse empreender neste trabalho o tempo necessário.

Ao Professor D`Agosto, por ter aceitado o desafio de me orientar. Seu enorme conhecimento, profissionalismo e solicitude foram marcas da sua orientação, contribuindo não somente com o êxito desse trabalho, mas também com o meu amadurecimento profissional e científico.

À toda equipe do LTC, de forma especial à Dra. Cíntia pelas suas contribuições e aos alunos Pedro e Rafael, que contribuíram com a montagem do VANT e com a execução dos testes de voo.

Ao PET, de forma particular ao corpo docente pela excelência no ensino, a Jane e a Helena pelo suporte administrativo e aos amigos com quem tive o privilégio de conhecer, compartilhar e absorver seus conhecimentos.

Aos Professores Ronaldo Balassiano e Rafael Barbastefano pela pronta disposição em avaliarem e contribuírem com este trabalho.

A todos com quem tive algum contato e infelizmente não estão aqui citados, meus sinceros agradecimentos. Vocês são todos parte dessa vitória.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO: UMA ALTERNATIVA AO TRANSPORTE DE CARGA

Elder Soares Rodrigues

Março/2018

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade (técnica e operacional) de se utilizar um VANT para o transporte de carga de baixo peso e pequeno volume e a sua competitividade (custo/nível de serviço) na logística urbana, particularmente como alternativa as viagens realizadas por motocicletas. O sistema de transporte foi dividido em quatro subsistemas físicos (via, veículo, terminal e controle), onde o maior enfoque foi dado no veículo. Um VANT do tipo quadricóptero pesando 1,4 kg (com bateria e sem carga útil) foi montado e utilizado para se verificar a capacidade de carga útil, consumo energético e autonomia do veículo. Um VANT comercial também do tipo quadricóptero pesando 1,3 kg (com bateria e sem carga útil), similar ao VANT montado, também foi utilizado para se verificar a velocidade desse tipo de veículo. Foram realizados testes em motocicleta com o objetivo de se avaliar a velocidade, consumo energético e a razão entre as distâncias euclidiana e rodoviária. Os resultados analíticos e experimentais apontaram que o VANT é capaz de transportar cargas de baixo peso com autonomia para curtas e médias distâncias na logística urbana e com vantagem em termos de tempo de viagem, consumo de energia, custo financeiro da energia consumida e emissão de gases.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

UNMANNED AERIAL VEHICLE: AN ALTERNATIVE TO THE FREIGHT TRANSPORT

Elder Soares Rodrigues

March/2018

Advisors: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transportation Engineering

The objective of this study is to analyze the feasibility (technical and operational) of using an UAV for last-mile deliveries, particularly in home deliveries of small parcels and its competitiveness (cost/service level) in urban freight transport as an alternative to motorcycles. The transport system was divided into four physical subsystems (road, vehicle, terminal and control), focusing more on the vehicle. A quadcopter UAV weighing 1.4 kg (operational empty weight) was mounted and used to test payload capacity, power consumption and vehicle autonomy. A commercial quadcopter UAV weighing 1.3 kg (operational empty weight), similar to the mounted UAV, was also used in the tests to check the speed of this type of vehicle. Motorcycle tests were also performed with the objective of evaluating speed, energy consumption and a ratio between Euclidean and road distances. The results showed that the UAV is able to transport small parcels with autonomy for short and medium distances in urban freight transport and with advantage in terms of travel time, energy consumption, financial cost of the energy consumed and gas emission.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Caracterização do problema.....	4
1.2	Objetivos Geral e Específicos	5
1.3	Justificativa	5
1.4	Metodologia	6
1.4.1	Classificação	6
1.4.2	População e Amostra	6
1.4.3	Coleta de dados.....	7
1.4.4	Tratamento e análise de dados.....	7
1.5	Organização do trabalho	7
2	TRANSPORTE AÉREO.....	9
2.1	Panorama do transporte aéreo	9
2.2	Via.....	12
2.3	Veículo.....	13
2.4	Terminal.....	15
2.5	Controle	16
3	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO - VANT	18
3.1	Histórico.....	19
3.2	Tipos e aplicações de veículos aéreos não tripulados	20
3.3	Regulação brasileira.....	22
3.3.1	Regras da ANATEL	24
3.3.2	Regras da ANAC	25
3.3.3	Regras do DECEA.....	27
3.4	Voo em espaço aéreo não segregado	32
4	ESTUDO DE CASO – DESEMPENHO OPERACIONAL DO VANT	36
4.1	VANT do LTC.....	36
4.1.1	Descrição e metodologia do teste realizado	38
4.1.2	Resultado do teste.....	43
4.1.3	Análise do Resultado do Teste	50
4.2	Tempo de viagem.....	68
4.2.1	Motocicleta	69
4.2.2	VANT	71

5	COMPARATIVO VANT X MOTOCICLETA.....	79
5.1	Tempo de viagem.....	80
5.2	Consumo energético e custo energético.....	83
6	CONCLUSÃO	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	APÊNDICE A – DADOS DE TESTE DO MOTOR A2212/13T.....	111
	APÊNDICE B – ROTAS TESTE MOTOCICLETA.....	112
	APÊNDICE C – CONSUMO COMBUSTÍVEL MOTOCICLETA.....	115
	APÊNDICE D – FORÇA DE RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DA MOTOCICLETA	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da quantidade de passageiros interestaduais de longa distância transportados pelos modos aéreo e rodoviário de 2007 a 2016 (ANAC, 2017a)	10
Figura 2: Carga paga e correio transportados nas 20 maiores rotas em volume de carga aérea do mercado doméstico brasileiro em 2015 e 2016 (ANAC, 2017a)	11
Figura 3: Forças estáticas atuando na sustentação do aeróstato.	14
Figura 4: Aeródino de asa fixa e aeródino de asa rotativa (COLLINSON, 2011).	14
Figura 5: Rampas para contêineres e paletes disponibilizadas nos terminais agilizam processo de embarque/desembarque de cargas	16
Figura 6: Concepção artística do voo do veículo de Archytas (DALAMAGKIDS et al., 2012).	19
Figura 7: Protótipo do programa de entregas Prime Air da Amazon.	21
Figura 8: VANT Heron utilizado pela Polícia Federal do Brasil (MATSUO, 2011).	22
Figura 9: Predador utilizado pelos EUA na Guerra do Afeganistão (MATSUO, 2011).	22
Figura 10: Selo de identificação de produto homologado pela ANATEL (ANATEL, 2017).	24
Figura 11: Aeronave não tripulada com mais de 250 g deve manter distância horizontal mínima de 30 m de terceiros (ANAC, 2017b).	26
Figura 12: Cilindro imaginário dentro do qual a operação do RPA é de responsabilidade exclusiva do proprietário da edificação e deve ser autorizada pelo mesmo (DECEA, 2016b).	30
Figura 13: VANT do tipo quadricóptero montado pelo LTC.	37
Figura 14: Container para carga acoplado ao VANT.	39
Figura 15: Chumbada de pesca sendo pesada para compor carga em teste do VANT. .	40
Figura 16: Execução de um dos testes de desempenho com VANT do LTC.	40
Figura 17: Teste de empuxo máximo de decolagem.	49
Figura 18: Carga da bateria x tempo de voo.	51
Figura 19: Diferença de potencial fornecida pela bateria x tempo de voo.	53
Figura 20: ddp fornecida pela bateria em função do estado de carga da bateria.	55
Figura 21: Bateria com fem ϵ e resistência interna r fornecendo corrente I	57
Figura 22: Tempo de voo até restar 10 % de carga elétrica na bateria.	59
Figura 23: Potência elétrica total média consumida pelos 4 motores durante os testes.	60

Figura 24: Potência elétrica útil fornecida pela bateria do VANT do LTC em função da corrente elétrica para diferentes níveis de força eletromotriz (ϵ).	61
Figura 25: Eficiência do motor A2212/13T em função da corrente elétrica (RHYDOLABZ, 2013).	62
Figura 26: Curvas de potência total da fonte, potência útil da fonte e potência mecânica produzida pelos motores em função da corrente para diferentes níveis de fem da bateria	63
Figura 27: Relação (Peso total) / (Potência).	64
Figura 28: Relação (peso carga útil)/(potência elétrica útil) x peso da carga útil.	65
Figura 29: Comparativo entre "Empuxo-Potência" obtido nos testes com o VANT do LTC e os dados de "Empuxo-Potência" para o motor A2212/13T segundo Rydolabz (2013).	67
Figura 30: DJI Phantom 3 Standard em voo.	72
Figura 31: Dados de telemetria enviados pelo Phantom 3 podem ser reproduzidos e visualizados em um dispositivo móvel.	73
Figura 32: Tela do dispositivo móvel acoplado ao controle durante teste com o Phantom 3.	74
Figura 33: Decolagem vertical com o Phantom 3 até 100 m.	75
Figura 34: Pouso vertical com o Phantom 3 a partir de uma altura de 100 m.	76
Figura 35: Deslocamento horizontal do Phantom 3 em voo nivelado.	77
Figura 36: Esquema de voo do VANT.	80
Figura 37: Tempo estimado de viagem em função da distância rodoviária.	82
Figura 38: Consumo de energia da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária entre origem e destino para uma viagem com carga útil entre 0 e 500 g.	85
Figura 39: Custo energético da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária entre origem e destino para uma viagem com carga útil entre 0 e 500 g.	87
Figura 40: Configuração para transporte de carga da CG Titan 150 (HONDA, 2014)..	88
Figura 41: Consumo energético específico da motocicleta e do VANT transportando carga cujos pesos correspondem a capacidade máxima desses veículos (20 kg e 0,5 kg, respectivamente).	89
Figura 42: Custo energético específico da motocicleta e do VANT transportando carga cujos pesos correspondem a capacidade máxima desses veículos (20 kg e 0,5 kg, respectivamente).	91

Figura 43: Curva de igualdade de consumo energético VANT-motocicleta para cargas inferiores a 20 kg.	94
Figura 44: Curva de igualdade de custo financeiro energético VANT-motocicleta para cargas inferiores a 20 kg.....	95
Figura 45: Avaliação entre VANT e motocicleta para transporte de cargas inferiores a 20 kg e que sejam fracionáveis em “pacotes” de 500 g em viagens do tipo origem-destino-origem com respeito ao consumo de energia, custo financeiro da energia e autonomia.	97
Figura 46: origem, destino e rota percorrida na viagem 1	112
Figura 47: origem, destino e rota percorrida na viagem 2.....	113
Figura 48: origem, destino e rota percorrida na viagem 3.....	113
Figura 49: origem, destino e rota percorrida na viagem 4.....	114
Figura 50: origem, destino e rota percorrida na viagem 5.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modos de transporte e nível de serviço (BALLOU, 2006, p. 158)	2
Tabela 2: Divisão modal brasileira do transporte de cargas (ABCR, 2014)	3
Tabela 3: Resumo das regras da ANAC para aeronave não tripulada (ANAC, 2017b)	27
Tabela 4: Resumo das regras para aeromodelismo (DECEA, 2017).	29
Tabela 5: Resumo das regras para operação de RPA (DECEA, 2016b).	31
Tabela 6: Matriz de probabilidade x severidade de falhas adotada pela autoridade europeia para grandes aeronaves tripuladas (EASA, 2017).	33
Tabela 7: Componentes e custos para montagem do VANT do LTC.	36
Tabela 8: Especificações do motor do VANT do LTC (RHYDOLABZ, 2013).....	38
Tabela 9: Tabela base de parâmetros diretos e indiretos obtidos para cada um dos testes com VANT do LTC.....	42
Tabela 10: Resultado do Teste 1 (sem carga útil).	44
Tabela 11: Resultado do Teste 2 (sem carga útil).	44
Tabela 12: Resultado do Teste 4 (500 g de carga útil).	46
Tabela 13: Resultado do Teste 5 (1.000 g de carga útil).	47
Tabela 14: Resultado do Teste 6 (750 g de carga útil).	48
Tabela 15: Resultado do Teste 7 (empuxo de decolagem em potência máxima).....	49
Tabela 16: Desempenho geral do VANT do LTC com diferentes configurações de carga.....	50
Tabela 17: Testes de velocidade com motocicleta realizados na cidade de Ipatinga-MG	70
Tabela 18: Velocidade média do tráfego na cidade de São Paulo (CET, 2017).....	71
Tabela 19: Comparativo entre os VANT Phantom 3 x Protótipo do LTC (DJI, 2015). ..	71
Tabela 20: Dados técnicos do fabricante do Phantom 3 (DJI, 2015)	72
Tabela 21: Comparativo tempo de deslocamento motocicleta x VANT.....	81
Tabela 22: Consumo de energia por tipo de transporte de carga (D'Agosto, 2015 pg. 67)	83
Tabela 23: Energia e emissão do VANT e motocicleta.....	99
Tabela 24: Desempenho do motor A2212/13T (RHYDOLABZ, 2013).....	111
Tabela 25: Registros de abastecimento da motocicleta Honda CG Titan 150 modelo 2015 pertencente ao autor.....	115

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCR – Associação Brasileira de Concessionária de Rodovias

ABRACICLO – Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares

AIC – Circular de Informações Aeronáuticas (documento produzido pelo DECEA)

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ATS – *Air Traffic Service*

BVLOS – *Beyond Visual Line of Sight*

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego (São Paulo)

CSCMP – *Council of Supply Chain Management Professionals*

ddp – Diferença de potencial

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

EASA – *European Aviation Safety Agency*

ELOS – *Equivalent Level of Safety*

EPA – *Environmental Protection Agency (United States)*

FAB – Força Aérea Brasileira

fem – força eletromotriz

FPV – *First Person View*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFR – *Instrument Flight Rules*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LTC – Laboratório de Transporte de Cargas (vinculado ao Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ)

NOTAM – *Notice to Airmen* (emitido no Brasil pelo DECEA)

OACI – Organização da Aviação Civil Internacional

PIB – Produto Interno Bruto

PMD – Peso Máximo de Decolagem

RBAC – Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (documento produzido pela ANAC)

RPA – *Remotely Piloted Aircraft*

RPAS – *Remotely Piloted Aircraft System*

SARPAS – Sistema de Autorização para Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS (sistema do DECEA)

TUC – Transporte Urbano de Carga

UAS – *Unmanned Aerial System*

UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

VFR – *Visual Flight Rules*

VLOS – *Visual Line of Sight*

1 INTRODUÇÃO

Devido à competitividade e à busca constante pela maximização da rentabilidade das empresas, as mesmas têm buscado constantemente a melhoria no atendimento ao cliente e a redução dos custos nos processos executados, isto é, “entregar mais por menos”. Diretamente alinhado à essa busca, as empresas têm focado sua atenção na logística, de forma a minimizar seus custos e melhorar o seu nível de serviço. Fleury *et al.* (2000, p. 35) aponta que “a logística deve atender aos níveis de serviço ao cliente, estabelecidos pela estratégia de marketing, ao menor custo total de seus componentes, ou seja, a somatória dos custos de transporte, armazenagem, processamento de pedidos, estoques e vendas”

O âmbito da logística empresarial é definida por Ballou (1993, p. 24) como

(...) todas atividades de movimentação e armazenagem, que facilitam o fluxo de produtos desde o ponto de aquisição da matéria prima até o ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento, com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a um custo razoável.

No contexto definido por Ballou (1993), as atividades principais da logística são: transporte, manutenção de estoques e processamento de pedidos. Essas atividades devem ser combinadas de forma a prover um nível mínimo aceitável de serviço pelo menor custo possível.

A atividade de transporte é definida por D’Agosto (2015, p. 2) como “o deslocamento de uma massa, constituída por pessoas ou cargas (produtos, bens, resíduos, etc.), de um lugar a outro no espaço”. Aqui é importante destacar que o transporte, sob o enfoque da massa que está sendo deslocada, não é uma atividade-fim, mas sim uma atividade-meio. Portanto não é uma atividade que gera riqueza. Assim, sob o ponto de vista econômico, é considerado como uma despesa necessária para a viabilidade do processo produtivo e de consumo e das relações sociais. Ballou (2006) ressalta que, de forma em geral, o transporte responde pela maior parcela dos custos logísticos das empresas, correspondendo de um a dois terços dos custos logísticos totais.

O transporte de carga pode ser realizado por cinco modos: rodoviário, ferroviário, aquático, dutoviário e aéreo (D’AGOSTO, 2015). A escolha entre esses modos ou mesmo uma combinação entre elas leva em conta o custo, capacidade,

disponibilidade/acessibilidade e os seguintes fatores relacionados ao nível de serviço (GLEISSNER e FEMERLING, 2013):

- Capacidade de carga: capacidade máxima suportada em termos de volume, dimensões e peso da carga;
- Velocidade: rapidez com que o modo se desloca, isto é, quão rápido a carga é transportada;
- Previsibilidade: medida da confiabilidade (variabilidade) do tempo de transporte;
- Flexibilidade do itinerário: frequência dos serviços de transporte e capacidade de se adaptar a mudança de itinerário;
- Segurança: medida da frequência de roubos e acidentes e quantidade perdida e/ou danificada;
- Impacto ambiental: medida do uso de energia, emissão de poluentes e ruído.

Na Tabela 1, Ballou (2006) classifica cada um dos modos em termos de custo e características de desempenho (nível de serviço), considerando que todos estejam disponíveis.

Tabela 1: Modos de transporte e nível de serviço (BALLOU, 2006, p. 158)

Modo de transporte	Características de desempenho				
	Custo ^a 1 = maior	Tempo médio de entrega ^b 1 = mais rápido	Variabilidade do tempo de entrega		Perdas e danos 1 = menor
			Absoluta 1 = menor	Percentual ^c 1 = menor	
Ferroviário	3	3	4	3	5
Rodoviário	2	2	3	2	4
Aquaviário	5	5	5	4	2
Dutoviário	4	4	2	1	1
Aéreo	1	1	1	5	3

^a Custo por tonelada-quilômetro.

^b Velocidade porta-a-porta.

^c Taxa de variação absoluta do tempo de entrega em relação ao tempo médio de entrega.

Pela Tabela 1 pode-se concluir que o modo aéreo apresenta, de forma em geral, o melhor nível de serviço, mas em contrapartida, é o mais caro também. D'Agosto (2015) aponta que o modo rodoviário é o modo de menor investimento, especialmente para

pequenos e médios fluxos de carga (até 50 t por veículo) e distâncias curtas e médias (até 1.000 km) e possui ainda tecnologia de construção de via bastante simples, o que explica sua liderança em países de menor grau de desenvolvimento. Esse é o caso do Brasil, onde observa-se na Tabela 2 o modo rodoviário na liderança absoluta da divisão modal de transporte de carga.

Tabela 2: Divisão modal brasileira do transporte de cargas (ABCR, 2014)

Modo	Milhões (Tku)	Participação %
Rodoviário	485.625	61,10
Ferrovário	164.809	20,70
Aquaviário	108.000	13,60
Dutoviário	33.300	4,20
Aéreo	3.169	0,40
Total	794.903	100,00

Além da questão de custo, outras vantagens explicam a liderança do modo rodoviário: serviço porta a porta, sem a necessidade de carregamento ou descarga entre origem e destino, frequência e disponibilidade dos serviços, velocidade e conveniência (BALLOU, 1993).

D'Agosto (2015) divide o transporte de carga em basicamente três tipos de operações: coleta ($n - 1$), transferência ($1 - 1$) e distribuição ($1 - n$). Enquanto a transferência se dá usualmente em longas distâncias e em veículos de maior capacidade, as operações de coleta e distribuição se dão geralmente em regime urbano, distâncias curtas e veículos de pequeno e médio porte, geralmente pelo modo rodoviário. Dentro da operação de coleta e distribuição, Macharis e Melo (2011) chamam a atenção para dois segmentos da logística urbana que vem apresentando crescimento nos últimos anos: o mercado de alimentação e o comércio eletrônico, tendo como principal característica a entrega porta-a-porta e o baixo peso e volume das cargas transportadas. Corroborando com esta afirmação Bamburly (2015) cita por exemplo que 86% dos pedidos da *Amazon* (empresa americana de comércio eletrônico) são considerados leves, pesando menos de 2,5 kg. García et al. (2014) menciona que devido à combinação de velocidade e baixo custo operacional, a preferência tem sido dada pela utilização de motocicletas para entregas de pequenos volumes que, quando comparadas aos carros, oferecem maior velocidade e menor custo.

O sistema de transporte pode ser dividido em quatro subsistemas físicos (D'AGOSTO, 2015): via, veículo, terminal e controle. Quando se olha um sistema de transporte pela ótica desses subsistemas, a utilização de outro modo que não o rodoviário na logística urbana, particularmente nas operações de coleta e distribuição porta a porta de pequenos volumes, parece em primeira análise inviável, seja pelo aspecto técnico; seja pelo aspecto econômico. Contudo, esse estudo se propõe a avaliar condições que propiciem a possibilidade de quebra deste paradigma.

1.1 Caracterização do problema

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), informalmente conhecidos como “drone”, embora existam há algumas décadas, tem sua utilização civil nas operações logísticas de transporte de cargas como um fato novo. Notícias são atualmente veiculadas sobre algumas empresas tais como Amazon (multinacional norte-americana de comércio eletrônico) e DHL (empresa alemã com foco em serviços postais e logística) realizando testes de entrega de encomendas com VANT. De forma a viabilizar tal tipo de operação de transporte de carga será preciso analisar ou desenvolver um VANT com as características técnicas e operacionais necessárias, desenvolver processos de monitoramento capazes de prever situações de riscos de forma a haver o controle de tráfego aéreo e evitar acidentes com os VANT e ainda que o serviço seja competitivo com outros modos, tendo em vista o custo e o nível de serviço ofertado. A demanda por tais serviços pode se originar no comércio eletrônico mas pode também ser importante no transporte de cargas urgentes e em segundo momento na entrega/coleta de cargas em geral.

Nesse trabalho será abordado o modo aéreo e rodoviário, em particular sobre utilização do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) como substituto à motocicleta na logística urbana. A vantagem competitiva do VANT (custo/nível de serviço) será estudada no enfoque de cargas de baixos peso e volume comparadas ao transporte realizado por motocicletas. O trabalho abordará os aspectos regulatórios, capacidade de carga, autonomia, velocidade e uso de energia. As viagens serão consideradas do tipo “1 - 1”, não sendo considerados, portanto, eventuais ganhos de eficiência com roteirização. Será estudado o transporte de carga de pequenos volumes (coleta e distribuição) e como o VANT poderia se inserir nessa cadeia, analisando as vantagens e desvantagens e algumas das lacunas existentes para sua inserção.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

Pretende-se ao final deste trabalho responder a seguinte pergunta: há alguma condição em que seja viável, do ponto de vista operacional, financeiro e regulatório utilizar um Veículo Aéreo Não Tripulado para o transporte de carga?

Nesse contexto, portanto, o objetivo geral do trabalho é analisar o VANT como uma alternativa ao transporte de carga. Para alcançar este objetivo, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Conhecer o histórico de desenvolvimento do VANT e investigar, dentre as aplicações presentes, os aspectos comuns com a operação de transporte de carga e aqueles aspectos que devem ser aprimorados para o transporte de carga;
- Analisar os aspectos regulatórios, isto é, as legislações e autorizações necessárias para se utilizar um VANT;
- Investigar os riscos operacionais e de segurança associados a operação do VANT;
- Conduzir um estudo de caso no qual VANT e motocicleta sejam testados, avaliados e comparados com respeito à capacidade de carga, autonomia, velocidade e consumo de energia.

1.3 Justificativa

O custo logístico corresponde a uma parcela significativa do custo das empresas. Nos Estados Unidos o custo logístico correspondeu no ano de 2016 a 7,5 % do PIB, sendo que somente a função transporte consumiu 4,8 % do PIB estadunidense (CSCMP, 2017). No Brasil esse custo representa 12,2 % do PIB e 7,6 % do custo líquido das empresas. Somente a função transporte representa 3,8% do custo líquido das empresas brasileiras, ou seja, 50% do custo logístico destas empresas (ILOS, 2017). Engarrafamentos de tráfego ocasionados pelo aumento do número de veículos são cada vez mais constantes. Clientes são cada vez mais exigentes com os prazos de entrega. Esse contexto é propício ao estudo de meios alternativos ao transporte de carga, uma vez que altos custos são despendidos atualmente com transporte.

O Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) é ainda uma tecnologia relativamente recente e sua utilização como meio para transporte de carga é ainda embrionária. Os

primeiros testes de transporte de carga vêm sendo realizados, mas ainda sem utilização comercial. Aspectos Técnicos e Regulatórios são o primeiro entrave para utilização do VANT para transporte de carga. Transposto tais obstáculos, a viabilidade operacional e econômica se soma os requisitos para a utilização comercial. Neste contexto é relevante compreender os desafios para que esse veículo seja utilizado no transporte de carga. Também é relevante compreender os riscos associados a esta operação e como isso pode se refletir na regulação

1.4 Metodologia

1.4.1 Classificação

A pesquisa em questão terá a seguinte classificação:

Ponto de vista da natureza: Pesquisa aplicada, uma vez que a pesquisa em questão se relaciona a um problema prático de escolha do modo para transporte de carga.

Ponto de vista da forma de abordagem: Pesquisa quantitativa, uma vez que a pesquisa busca calcular o desempenho e custo de um VANT necessário para um dado tipo de operação, a comparação com custo de outros modos de transporte levando-se em conta diferentes níveis de serviço.

Ponto de vista dos objetivos: Pesquisa exploratória, na medida em que o tema é recente e há pouco conhecimento acumulado disponível para estudo, razão pela qual a finalidade é proporcionar mais informações sobre o assunto.

Ponto de vista dos procedimentos técnicos: Pesquisa bibliográfica e estudo de caso, sendo bibliográfica porque terá sua fundamentação teórica baseada nos normativos da ANATEL, ANAC e DECEA e em publicações (artigos, livros, dissertações etc.) que permitam compreender o panorama do transporte aéreo e as regras as quais os VANT estão sujeitos. O estudo de caso será realizado por meio da avaliação dos dados proveniente dos testes de desempenho com VANT e motocicleta realizados pelo autor.

1.4.2 População e Amostra

O cenário atual apresenta boas perspectivas na utilização do VANT para o transporte de carga. O universo dos VANT compreende milhares de aeronaves, dos mais diversos fabricantes, motorização, tipos, tamanhos, peso e capacidade de carga.

Dalamagkids *et al.* (2012, p.238-299) elenca mais de mil diferentes modelos. Entre os diversos tipos de VANT existentes, o estudo de caso ocorrerá utilizando-se dois pequenos VANT elétricos do tipo quadricóptero (um comercial e o outro um protótipo, com pesos operacionais sem carga útil de 1,3 kg e 1,4 kg, respectivamente). Também será utilizada uma motocicleta com cilindrada igual à 150 cm³, tipicamente utilizada na logística urbana.

1.4.3 Coleta de dados

Os dados históricos serão obtidos por meio de pesquisa bibliográfica. A parte regulatória será obtida na revisão dos normativos dos órgãos governamentais responsáveis pelo transporte aéreo. As características técnicas e operacionais do VANT e da motocicleta serão obtidas tanto por revisão bibliográfica quanto nos testes de desempenho realizados com estes veículos.

1.4.4 Tratamento e análise de dados

A partir dos dados técnicos e operacionais, será possível avaliar a capacidade de carga, autonomia, velocidade, consumo energético e custo financeiro da energia de cada um dos modos (representado pelo VANT e pela motocicleta) e como essas características se relacionam entre si (por exemplo a redução de autonomia provocada pelo aumento de carga) de forma que seja possível não somente avaliar a viabilidade do VANT no transporte de carga, mas também em quais condições ele poderia apresentar vantagens em relação à motocicleta.

1.5 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. No [Capítulo 1](#) foi feita uma contextualização do tema, que aborda o panorama geral do estudo, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos e o procedimento metodológico proposto para o estudo. No [Capítulo 2](#) são feitas considerações sobre o transporte aéreo sob o enfoque de quatro subsistemas: via, veículo, terminal e controle.

O [Capítulo 3](#) apresenta um breve histórico sobre os VANT, suas principais aplicações e as regras por parte da ANATEL, ANAC e DECEA a que estão sujeitos.

O [Capítulo 4](#) é um estudo de caso no qual são expostos os dados de desempenho dos testes com VANT e motocicleta conduzidos pelo autor.

Um comparativo direto entre o VANT e a motocicleta com enfoque na capacidade de carga, tempo de viagem e energia é apresentado no [Capítulo 5](#).

Por fim, o [Capítulo 6](#) dedica-se a expor as conclusões sobre os resultados da pesquisa, além das limitações observadas durante o seu desenvolvimento e as recomendações para desdobramentos futuros relacionados à eventual utilização do VANT no transporte de carga.

2 TRANSPORTE AÉREO

Este capítulo possui como objetivo apresentar os conceitos relacionados ao transporte aéreo. Na linha proposta por D'Agosto (2015), em estudar o sistema de transporte dividindo-o em quatro subsistemas físicos (via, veículo, terminal e controle), será abordado adiante cada um desses subsistemas aplicados ao modo aéreo. Assim o capítulo será dividido em cinco seções: 1 – panorama do transporte aéreo, 2 – via, 3 – veículo, 4 – terminal e 5 – controle.

2.1 Panorama do transporte aéreo

A expressão “transporte aéreo” traz a ideia intuitiva e imediata de transporte de passageiros, especialmente para longas distâncias. Essa ideia pode estar ligada à expansão e popularização do transporte aéreo de passageiros no mundo nos últimos anos. De fato, o volume total de passageiros transportados pelo modo aéreo no mundo, somando-se os mercados doméstico e internacional, saltou de 2,462 bilhões em 2007 para 3,796 bilhões em 2016, um aumento de 54,1 % no período (ICAO, 2017). No Brasil, seguindo a tendência mundial, enquanto o modo aéreo tem experimentado um crescimento no número de passageiros em viagens interestaduais nos últimos anos, efeito contrário tem ocorrido com o modo rodoviário (ANAC, 2017a). A Figura 1 mostra a evolução do número de passageiros transportados no Brasil em viagens interestaduais pelo modo aéreo e rodoviário nos últimos 10 anos, evidenciando um marco histórico no ano de 2009: pela primeira vez o número de passageiros transportados em viagens interestaduais pelo modo aéreo superou o número de passageiros transportados pelo modo rodoviário.

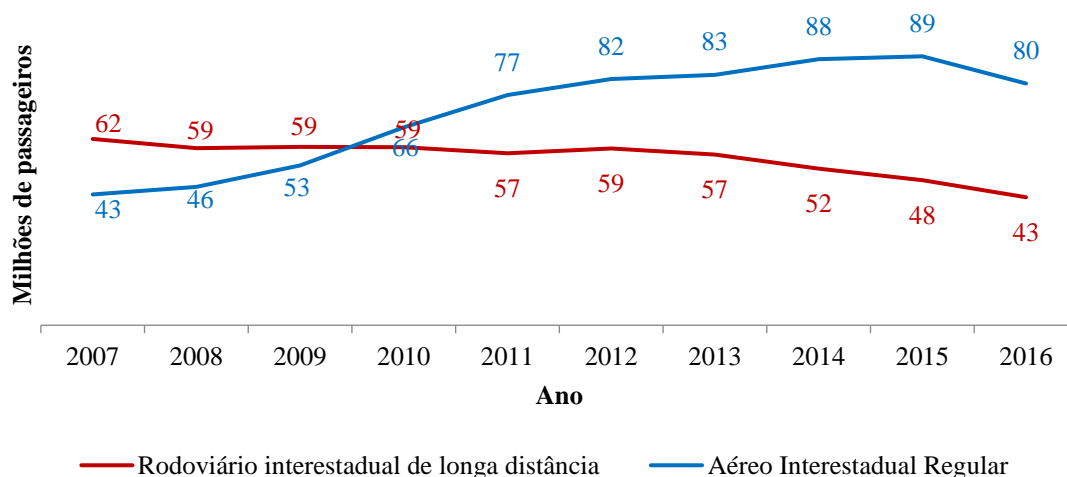


Figura 1: Evolução da quantidade de passageiros interestaduais de longa distância transportados pelos modos aéreo e rodoviário de 2007 a 2016 (ANAC, 2017a)

Enquanto o modo aéreo lidera no Brasil o volume de passageiros em viagens interestaduais, o mesmo não ocorre quando se trata do transporte de carga. De acordo com a Associação Brasileira de Concessionária de Rodovias (ABCR, 2014) o modo rodoviário é responsável por mais de 60 % do volume de carga transportado no Brasil (em tku), enquanto o modo aéreo ocupa a última posição entre os cinco modos, com apenas 0,4 % do volume de carga transportada (vide Tabela 2). Novaes (2007) explica que o transporte aéreo se destaca pela velocidade bastante superior em relação aos demais modos e o baixo nível de avarias e extravios. Contudo o bom nível de serviço proporcionado pelo modo aéreo tem seu preço: é o modo mais caro (BALLOU, 2006, p. 158) e também o que consome maior quantidade de energia (D'AGOSTO, 2015, p. 67) por tonelada.km de carga útil transportada. Dessa forma torna-se um modo sempre considerado para o transporte de produtos de alto valor agregado (eletrônicos e aparelhos de precisão por exemplo) e para produtos sensíveis ao tempo, tais como alimentos perecíveis, flores e alguns tipos de encomendas e correspondências (NOVAES, 2007). Nesta linha as rotas Guarulhos – Manaus e Manaus – Guarulhos são líderes em volume de carga (em toneladas) no mercado aéreo doméstico brasileiro (ANAC, 2017a) conforme mostra a Figura 2. Manaus abriga a Zona Franca de Manaus, importante polo brasileiro de indústrias de alta tecnologia, principalmente nos segmentos de eletroeletrônicos, veículos de duas rodas e químico. Entre os produtos fabricados destacam-se: aparelhos celulares e de áudio e vídeo, televisores e motocicletas (SUFRAMA, 2015). Por outro lado, Guarulhos está localizada na maior região metropolitana brasileira, importante

centro industrial, comercial e consumidor brasileiro e abriga o maior complexo logístico aeroportuário da América Latina, tendo processado 244.300 toneladas de carga em 2016 (INVEPAR, 2017).

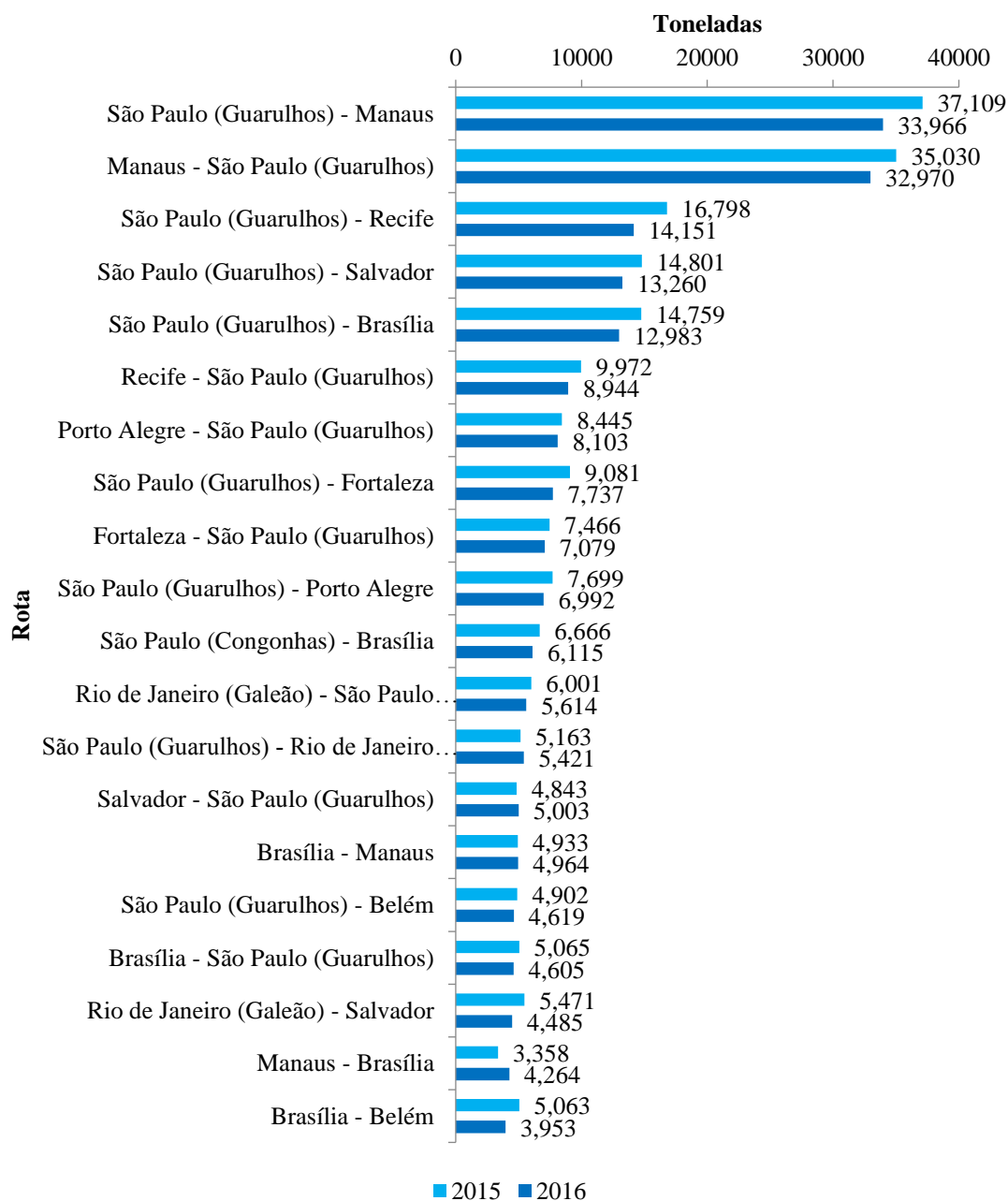


Figura 2: Carga paga e correio transportados nas 20 maiores rotas em volume de carga aérea do mercado doméstico brasileiro em 2015 e 2016 (ANAC, 2017a)

De acordo com Novaes (2007) a importância do transporte aéreo na logística ganhou ainda mais destaque com a globalização, onde as cadeias produtivas e de consumo possuem ramificações por todo mundo.

2.2 Via

D'Agosto (2015, p. 4) define a via como “o espaço designado para o deslocamento de pessoas e cargas, podendo ser uma instalação materializada bem determinada e de passagem obrigatória, como as ferrovias, rodovias e dutos, ou se constituir apenas de uma trajetória virtual indicativa, calculada para o deslocamento”, sendo a última o caso do transporte aquático e aéreo.

As regras de operação das aeronaves são definidas em nível mundial pela Organização da Aviação Civil Internacional - OACI, uma agência das Nações Unidas (D'AGOSTO, 2015). A OACI, criada em 1947, foi precedida por alguns eventos, merecendo, contudo, destaque a Convenção de Chicago, uma Conferência ocorrida na cidade de Chicago – EUA em 1944 com representantes de 54 nações (incluindo o Brasil) com o objetivo de estabelecer padrões e procedimentos para harmonia da navegação aérea global. A Convenção de Chicago foi no seu ato assinada por 52 dos 54 países representados e, posteriormente, ratificada por diversos outros países, possuindo atualmente 192 signatários (ICAO, [2017?]). No Brasil a Convenção de Chicago foi promulgada em 1946 (BRASIL, 1946). No texto da Convenção de Chicago, o Artigo 12 trata especificamente das Regras de Tráfego Aéreo, incumbindo a cada um dos países a responsabilidade pelas regras de tráfego aéreo sobre o seu território:

ARTIGO 12

Regras de tráfego

Cada um dos Estados contratantes se comprometer a tomar as medidas necessárias para assegurar que todas aeronaves que voem sobre seu território, ou manobrem dentro dele e todas as aeronaves que levem o distintivo de sua nacionalidade, onde quer que se encontrem, observem as regras e regulamentos que regem voos e manobras de aeronaves. Cada um dos Estados contratantes se comprometem a manter seus próprios regulamentos tanto quanto possível, semelhantes aos que venham a ser estabelecidos em virtude desta Convenção. Cada um dos Estados contratantes se compromete a processar todos os infratores dos regulamentos em vigor. (BRASIL, 1946)

Abeyratne (2012) pontua que o Anexo 2 da Convenção de Chicago exige que toda aeronave voe sob as regras de voo visual – VFR ou sob as regras de voo por instrumento – IFR. Nas regras de voo visual o piloto deve respeitar distâncias de separação mínima das nuvens de forma que possa navegar através de referências em solo, observando visualmente inclusive o relevo e outras aeronaves em seu percurso. Nas regras de voo por

instrumentos o piloto e a aeronave devem ser capazes de navegar sem o auxílio de referências externas, seguindo protocolos específicos.

No Brasil o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, órgão vinculado ao Comando da Aeronáutica, é o responsável pelos serviços de navegação aérea (DECEA, 2016a). O portal AISWEB (<https://www.aisweb.aer.mil.br>) é a fonte oficial de informações aeronáuticas produzidas pelo DECEA e disponibiliza, dentre outros materiais, as cartas para navegação IFR e também as cartas de corredores visuais, esta última utilizada em centros de maior tráfego, onde são definidas proas, altitudes e pontos de referência no solo de forma a organizar o tráfego visual. Na prática, portanto, as navegações IFR devem seguir as cartas de navegação IFR, também chamadas de aerovias. Os voos visuais por sua vez, com exceção das regiões com corredores visuais, podem seguir o trajeto que preferirem. A maior parte dos voos das linhas aéreas regulares navegam sob regras IFR (ABEYRATNE, 2012) e, portanto, a navegação ocorre dentro das aerovias.

2.3 Veículo

Segundo D’Agosto (2015) “veículo é o equipamento que propicia o deslocamento às pessoas (motorista e passageiros) e as cargas”. No caso do modo aéreo este veículo é denominado aeronave, cuja definição de acordo com Crane (2012) é “qualquer objeto de transporte de massa projetado para ser sustentado pelo ar”.

Quanto a forma de sustentação pelo ar, as aeronaves são classificadas em aeróstatos e aeródinos. Os aeróstatos são considerados veículos mais leves que o ar e a sustentação decorre principalmente das forças estáticas, baseando-se assim no princípio de Arquimedes, conforme esquema de forças na Figura 3. Os principais exemplos de aeróstatos são os balões e dirigíveis (VERMILLION *et al.*, 2013).



Figura 3: Forças estáticas atuando na sustentação do aeróstato.

Os aeródinos por sua vez possuem sua sustentação baseada principalmente em reações aerodinâmicas na qual uma força é gerada quando um fluxo de ar passa por uma superfície especial denominada aerofólio. Os aeródinos podem ser do tipo asa-fixa ou asa-rotativa (CRANE, 2012). A Figura 4 ilustra um aeródino de asa fixa e outro de asa rotativa. Aviões, helicópteros, planadores e girocópteros são exemplos de veículos sustentados por forças aerodinâmicas e, portanto, classificados como aeródinos.

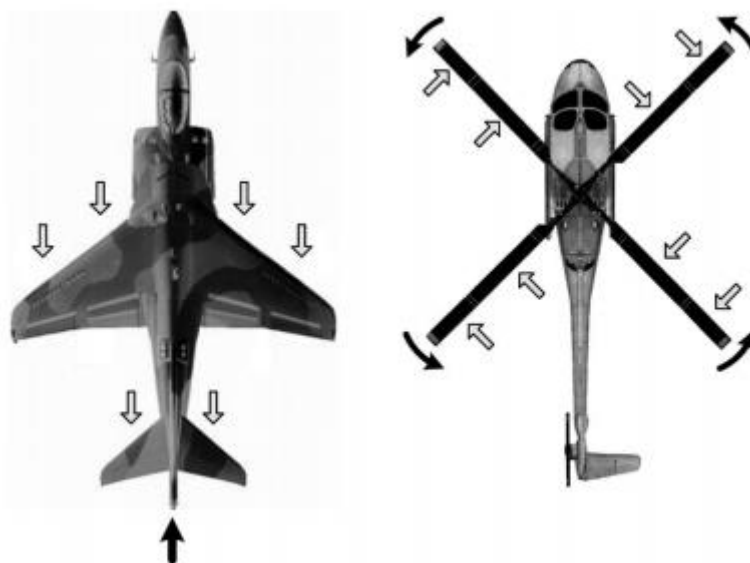


Figura 4: Aeródino de asa fixa e aeródino de asa rotativa (COLLINSON, 2011).

2.4 Terminal

Os terminais são segundo D'Agosto (2015) “locais apropriados para o intercâmbio entre o sistema de transporte e o meio ambiente ao seu redor, de passageiros e cargas em operações de embarque/desembarque ou carga/descarga dos veículos”. São assim pontos de origem, baldeação, transbordo e/ou destino para o deslocamento de pessoas ou cargas.

A Agência Nacional de Aviação Civil possui as seguintes definições para os termos “aeródromo” e “aeroporto” (ANAC, 2011):

Aeródromo significa uma área delimitada em terra ou na água destinada, no todo ou em parte, para pouso, decolagem e movimentação em superfície de aeronaves; inclui quaisquer edificações, instalações e equipamentos de apoio e de controle das operações aéreas, se existirem. Quando destinado exclusivamente a helicópteros, recebe denominação de heliponto.

Aeroporto significa um aeródromo público dotado de edificações, instalações e equipamentos para apoio às operações de aeronaves e de processamento de pessoas e/ou cargas. Quando destinado exclusivamente a helicópteros, recebe denominação de “heliponto”.

Ao se analisar a definição da ANAC (2011) acima para “aeroporto” percebe-se que ela está alinhada ao conceito de terminal proposto por D'Agosto (2015) e, portanto, conclui-se que os aeroportos exercem a função de terminal no modo aéreo.

A demanda de um aeroporto origina-se da necessidade do deslocamento de passageiros e cargas. O raio de influência do aeroporto é um dos principais fatores no cálculo da sua demanda. Por se tratar geralmente de um ponto de conexão intermodal, o raio de influência está vinculado a acessibilidade do aeroporto, que pode ser medida pela distância ou tempo por exemplo. Dentro desse raio são contabilizados fatores como população, tipo e nível de atividade econômica, produtiva e de consumo (JANIC, 2011). Novaes (2007) cita também que a presença de um aeroporto acaba criando demanda ao atrair empresas para suas proximidades. São fabricantes de produtos de grande valor agregado, em geral eletrônicos, que se localizam junto a grandes aeroportos e que atuam de forma ágil, tanto na ponta de marketing como na ponta dos fornecedores. A sua receita é proveniente do aluguel de espaços, taxas de pouso por peso das aeronaves e taxas por passageiros, combinação na qual é possível maximizar o lucro (MATHISEN *et al.*, 2017).

A sua capacidade é determinada por uma série de fatores, incluindo controle de tráfego, número e dimensão das pistas, rigidez do pavimento, combate a incêndio, tamanho do pátio, terminal de passageiros e de carga. Esses fatores devem ser

adequadamente balanceados identificando-se os gargalos (JANIC, 2011). Na parte operacional, a capacidade depende também da implantação de processos práticos para agilizar o embarque/desembarque de passageiros e a movimentação da carga nos terminais. No caso de passageiros, as pontes de embarque/desembarque conectadas ao terminal de passageiros ou mesmo a segmentação dos assentos da aeronave para ordenação de embarque dos passageiros são procedimentos que influem na capacidade. No transporte de carga, a utilização de aviões de fuselagem larga (*wide-body*) agilizam o processo de carga e descarga e aumentam o volume interno útil. Para que esta agilização de fato ocorra são necessárias rampas de acesso para veículos, contêineres e paletes (NOVAES, 2007), conforme mostrado na Figura 5.



(Imagem: Boeing 747-8F. Disponível em <<http://www.boeing.com/commercial/freighters>>. Acesso em 02 dez. 2017)

Figura 5: Rampas para contêineres e paletes disponibilizadas nos terminais agilizam processo de embarque/desembarque de cargas

2.5 Controle

O controle, segundo D’Agosto (2015) pode ser conceituado como um “conjunto de equipamento de detecção, comunicação e sinalização, que tem como função integrar os demais componentes físicos do sistema de transporte e regular sua operação, com o propósito principal de promover segurança, eficiência e uso racional”. No caso do tráfego

aéreo o controle é realizado pela interação de diversos meios: equipamentos de rádio navegação, antenas e satélites (com seus complementos instalados nas aeronaves), controladores de tráfego aéreo e regras de tráfego aéreo (JANIC, 2011).

No caso dos voos realizados sob regras de instrumento (IFR) que, conforme mencionado na [Seção 2.2](#) desta Dissertação, compreendem quase a totalidade dos voos das linhas aéreas, os voos ocorrem dentro das aerovias. Antes de decolar é atribuída uma rota à aeronave até o seu destino compreendendo aerovias específicas. Durante o voo essa rota pode ser alterada devido às condições climáticas ou de intensidade de tráfego por exemplo. O controle de tráfego aéreo é responsável por coordenar a separação das aeronaves através da velocidade, altitude e, quando necessário, alteração da rota (FINKE *et al.*, 2013).

Janic (2011) pontua que novos procedimentos de controle têm sido desenvolvidos de forma a tornar as rotas das aeronaves mais diretas, gerando menor consumo de combustível e menor emissão de poluentes, e também no sentido de diminuir os intervalos de pouso e decolagem de forma a maximizar o número de movimentos em um dado período de tempo, tendo potencial inclusive de maximizar a capacidade de um aeroporto, caso o número de movimentos seja um gargalo.

Como é possível observar neste capítulo, há uma grande estrutura por trás do transporte aéreo tradicional: aeronaves, aeroportos e controle. São estruturas sujeitas a níveis restritivos de requisitos e que devem trabalhar de forma harmônica entre si, buscando-se assim maximizar as operações dentro de padrões mínimos de segurança. No caso do transporte de carga, as dimensões físicas e financeiras que envolvem o transporte aéreo restringem esse modo ao transporte de produtos de alto valor agregado por longas distâncias. Pretende-se assim no capítulo seguinte explorar a estrutura necessária para a operação dos VANT de forma a verificar se tais veículos demandam estrutura semelhante ao transporte aéreo tradicional ou se possuem uma estrutura menos exigente, elevando o potencial para transporte de cargas de menor valor agregado e/ou por curtas e médias distâncias, como é o caso da logística urbana por exemplo.

3 VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO - VANT

A utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) vem se difundindo muito nos últimos anos. Seja por questão de custo, qualidade ou mesmo de segurança, há um enorme potencial de aplicabilidade de tais veículos. No campo militar é onde se dá atualmente a maior parte das aplicações: espionagem, monitoramento de fronteiras, reconhecimento de território, apoio de tropa em solo e veículo de combate são algumas das aplicações (LONGHITANO, 2010). No campo civil Neris (2001) cita algumas aplicações dentre outras possíveis: monitoramento de tráfego, de ocupação urbana, inspeção em dutos e linhas de transmissão, monitoramento topográfico, monitoramento de cultura (agrícola) entre outras atividades de aerolevante. Em grande maioria tais atividades são atualmente realizadas por imagens de satélite e dispositivos instalados em balões ou em aeronaves tripuladas. Contudo as imagens de satélite para aplicações civis possuem restrição de resolução; os balões apresentam problema de dirigibilidade e as aeronaves tripuladas alto custo de operação. O VANT apresenta-se assim como alternativa para tais atividades, uma vez que consegue contornar em parte os inconvenientes anteriormente citados.

No Brasil, a operação de qualquer aeronave civil está sujeita as regras estabelecidas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). A primeira é responsável por regular e fiscalizar tripulantes (treinamento), aeronaves (aeronavegabilidade) e a infraestrutura aeroportuária. O segundo é responsável por regular e operar todo o sistema de tráfego aéreo. Observa-se assim que as funções exercidas pela ANAC e DECEA são complementares.

Muitas das diversas possíveis aplicações civis citadas para VANT estão de certa forma limitadas em muitos países, uma vez que na maior parte dos casos a operação se dá de forma experimental (não comercial) e em espaço aéreo segregado, isto é, separado das demais aeronaves tripuladas. No caso do Brasil foi instituída no ano de 2017 norma permitindo o uso comercial dos VANT, mantendo-se, contudo, a limitação de operação em espaço aéreo segregado.

Neste capítulo será apresentado um breve histórico sobre o VANT, os principais tipos de veículos e as regulamentações em que estão sujeitos.

3.1 Histórico

O histórico e desenvolvimento dos veículos aéreos tripulados e não tripulados tem origem comum (a arte de voar) e se cruzam em diversos pontos tendo em vista a similaridade da dinâmica do voo. Portanto não era importante nos primórdios uma distinção entre tripulado ou não tripulado uma vez que os obstáculos eram os mesmos.

O primeiro voo que se tem registro de um precursor de um VANT data de 425 a.C. Tratava-se de um veículo construído de madeira. A construção desse veículo é creditada ao italiano Archytas e o veículo foi chamado de “Pombo” (tradução para o português). O veículo voava por cerca de 200 metros até acabar sua energia e cair (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012). A Figura 6 mostra uma concepção artística do voo do “Pombo”.



Figura 6: Concepção artística do voo do veículo de Archytas (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012).

Em 1483, Leonardo da Vinci desenvolveu uma aeronave capaz de planar. Tratava-se de um eixo rotacionando, promovendo o giro das pás que por sua vez geravam força de sustentação. Tal aeronave é considerada como o ancestral dos helicópteros pela sua dinâmica de voo (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012). O primeiro uso militar registrado de uma aeronave não tripulada ocorreu em 1849 com o ataque de austríacos a cidade de Veneza (MATSUO, 2011). Tratava-se da utilização de balões não tripulados carregados de explosivo. No conceito moderno um balão não tripulado não é considerado um VANT

(conforme será visto adiante o conceito é utilizado para aeródino e não para aeróstato), mas de toda forma utiliza-se de conceito similar aos VANT: utilizar uma aeronave não tripulada para transportar uma carga com objetivo não recreativo.

Foi no século XX que a aviação tripulada decolou e, junto a ela, impulsionou-se também o desenvolvimento dos primeiros VANT, aproveitando-se também do controle remoto por rádio demonstrado por Tesla em 1898 (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012). Na década de 1930 iniciou-se o desenvolvimento das aeronaves rádio controladas (MATSUO, 2011), sistema utilizado até hoje nos aeromodelos.

Foram os militares os primeiros a perceber os benefícios da utilização de uma aeronave sem tripulação (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012). Após a II Guerra Mundial houve intenso desenvolvimento e larga utilização do VANT para fins militares, especialmente nas missões de reconhecimento.

No Brasil o desenvolvimento de VANT iniciou-se na década de 80 no então Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em São José dos Campos - SP, no projeto Acauã (MEDEIROS *et al.*, 2008). Tratava-se de um projeto pioneiro de desenvolvimento de um VANT brasileiro.

3.2 Tipos e aplicações de veículos aéreos não tripulados

Os VANT experimentaram grande desenvolvimento nas últimas décadas, aprimorando características tais como autonomia, velocidade, peso/potência, características essas que permitem seu emprego nas mais diversas atividades. De acordo com Dalamagkids *et al.* (2012) atualmente há mais de 1.000 diferentes tipos de VANT produzidos pelos mais diversos fabricantes ao redor do mundo e com diferentes propósitos (uso militar, comercial, pesquisa etc.). No entanto, assim como as aeronaves tripuladas, se dividem em dois tipos quanto a dinâmica de voo: asa fixa e asa rotativa. Em relação ao número de motores podem ser monomotor ou multimotor. Em relação ao peso, variam entre algumas gramas até toneladas. A autonomia varia de alguns minutos até alguns dias. A motorização pode ser elétrica ou combustão interna.

No campo civil, os VANT podem ser empregados por exemplo em atividades de aerolevanteamento, inspeção de dutos e linhas de transmissão, lavouras, controle e monitoramento de tráfego e multidões, tomadas aéreas, inspeção de áreas perigosas (e.g. acidente com carga perigosa) e transporte de carga (LONGHITANO, 2010).

Na linha de transporte de carga, a *Amazon* (multinacional norte-americana especializada no comércio eletrônico) tem desenvolvido seu programa chamado *Prime Air*, cujo objetivo é desenvolver um sistema de entregas utilizando VANT no qual encomendas sejam entregues em no máximo 30 minutos. A Figura 7 ilustra um modelo de veículo do programa. A primeira entrega teste foi realizada em 07 de dezembro de 2016 em um voo com duração de 13 minutos. O *Prime Air* por enquanto está em fase de testes e ainda não está disponível aos clientes devido a restrições regulatórias (AMAZON, 2017).



(*Prime Air*. Disponível em <<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>>. Acesso em 09 dez. 2017)

Figura 7: Protótipo do programa de entregas *Prime Air* da *Amazon*.

No Brasil as aeronaves utilizadas pelas forças policiais e de segurança pública são consideradas aeronaves também civis. Para as atividades de segurança pública, o VANT pode ser empregado para vigilância urbana e de fronteira. A Figura 8 mostra o VANT israelense *Heron*, utilizado pela Polícia Federal do Brasil.



Figura 8: VANT *Heron* utilizado pela Polícia Federal do Brasil (MATSUO, 2011).

No campo militar é onde o VANT tem seu uso mais consolidado e explorado. Somente no ano de 2012 estima-se que 40 % das missões das aeronaves militares tenham sido executadas por VANT (DALAMAGKIDS *et al.*, 2012). As principais missões são de reconhecimento, apoio de tropa, espionagem e combate. A *Figura 9* mostra o VANT *Predator*, sendo o primeiro VANT americano com lançamento de míssil empregado em combate real durante a Guerra do Afeganistão no ano de 2002 (MATSUO, 2011).



Figura 9: *Predator* utilizado pelos EUA na Guerra do Afeganistão (MATSUO, 2011).

3.3 Regulação brasileira

Inicialmente FAB (2015) esclarece que o termo *drone* é apenas um termo genérico e informal na literatura técnica com origem nos EUA para designar qualquer objeto

voador não tripulado independente do seu propósito (profissional, recreativo, militar, comercial etc.), origem ou característica. Abeyratne (2012) aponta que o termo *drone* tem cunho mais militar, utilizado para se referir aos Veículos Aéreos não Tripulados em missão de reconhecimento ou ataque. Longhitano (2010, p.8) cita que “no Brasil, o termo VANT é certamente o mais difundido e comum”. Segundo FAB (2015) tem-se apenas dois termos para designar oficialmente no Brasil os *drones*: “Veículo Aéreo Não Tripulado” (VANT) e Aeromodelo. A diferença entre um VANT e um Aeromodelo, no entanto é muito sutil: ao contrário de que o público leigo possa pensar, não é o tipo, tamanho ou peso da aeronave por exemplo que distingue o VANT de um aeromodelo. Na verdade, a única coisa que distingue é o propósito de uso: se a operação tiver caráter não recreativo e possuir carga útil embarcada, trata-se de VANT. Se a operação tiver caráter recreativo, esporte ou lazer, trata-se de aeromodelo. Em ambos os casos, há normativos e regras específicas que serão abordadas adiante.

Como já citado anteriormente, o que diferencia um VANT de um Aeromodelo é tão somente o seu propósito de uso. De acordo com DECEA (2010, p. 4), VANT é

um veículo aéreo projetado para operar sem piloto a bordo, que possua uma carga útil embarcada e que não seja utilizado para fins meramente recreativos. Nesta definição incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e aeromodelos.

FAB (2015) classifica os VANT em dois grupos: “Aeronave Remotamente Pilotada” (*Remotely Piloted Aircraft - RPA*, na sigla em inglês) e “Aeronave Autônoma”, sendo que o segundo grupo tem uso proibido no Brasil. No primeiro grupo, embora o piloto não esteja a bordo, ele está no controle da aeronave por meio de uma interface (computador, simulador, controle remoto etc.) sendo admitida a possibilidade de voo autônomo somente em casos de falha do enlace de comando de controle. No segundo grupo, a aeronave é programada e não permite intervenção externa durante o voo. Como o grupo de VANT do tipo “Aeronave Autônoma” tem uso proibido no Brasil, será abordado apenas o RPA, onde VANT e RPA terão, portanto, significados equivalentes.

Os autores, órgãos reguladores e a comunidade aeronáutica em geral utilizam também um termo específico para designar todo o sistema envolvido na operação de um VANT, isto é, aeronave, controle, estação de pilotagem etc. Para tal fim, FAB (2015) utiliza o termo RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Longhitano (2010) e Rainer (2015) utilizam o termo UAS (*Unmanned Aerial System*). Independente do termo

utilizado, todos eles fazem referência ao conjunto que compreende não somente a aeronave (VANT) mas também todos os elementos envolvidos na sua operação (estações, controle, *links*, *software*, *hardware* etc.).

A operação de um VANT ou aeromodelo no Brasil sujeita-se a regras complementares estabelecidas pela Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA e pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL. As regras impostas por cada um desses órgãos serão exploradas na sequência.

3.3.1 Regras da ANATEL

Os VANT, também chamados informalmente de *drones*, possuem módulos transmissores de radiofrequências nos controles remotos e, em alguns casos, no próprio veículo aéreo, para a transmissão de imagens e dados de telemetria. A homologação dos módulos transmissores, por parte da ANATEL, é necessária por força da Lei nº 9.472 (Lei Geral de Telecomunicações - LGT) que estabelece a proibição de utilização de equipamentos emissores de radiofrequência sem certificação expedida ou aceita pela Agência (ANATEL, 2016).

No caso dos produtos emissores de radiofrequência oficialmente comercializados no Brasil, a norma brasileira exige que eles sejam previamente certificados junto a ANATEL pelo fabricante ou pelo importador antes da sua comercialização no país. Tais produtos devem obrigatoriamente conter o selo da Figura 10. A regulamentação da Agência estabelece ainda que produtos de fabricação artesanal ou importados para uso do próprio importador, sem direito à comercialização e à prestação de serviço de telecomunicações, devem ter sua homologação solicitada pelo usuário e serão homologados diretamente pela ANATEL (ANATEL, 2017).

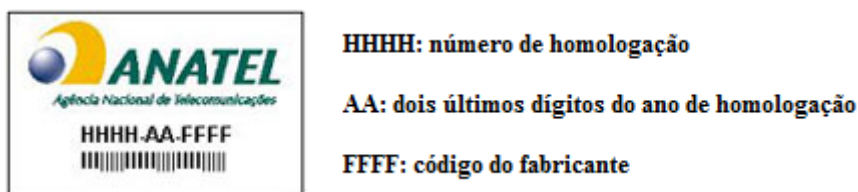


Figura 10: Selo de identificação de produto homologado pela ANATEL (ANATEL, 2017).

No processo de homologação pela ANATEL, são verificadas, dentre outras, as características de transmissão dos equipamentos, em face da regulamentação expedida

pela Agência sobre as condições de utilização do espectro radioelétrico. Essas regras buscam prevenir interferências em serviços de telecomunicações e em diversas aplicações, tais como as comunicações via satélite. Caso o produto apresente conformidade com a regulamentação vigente da Agência, é expedido um Certificado de Homologação. Essa homologação é um requisito para fins de utilização do produto apenas quanto às características de telecomunicações (no caso da utilização do espectro radioelétrico). (ANATEL, 2016).

3.3.2 Regras da ANAC

As regras da ANAC para aeronaves remotamente pilotadas, sejam elas VANT ou aeromodelos, estão contidas no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial nº 94 – RBAC 94, aprovado no ano de 2017, intitulado “Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil”. Esta seção da Dissertação apresentará os principais pontos deste regulamento.

Os veículos não tripulados utilizados exclusivamente para fins recreativos são classificados como Aeromodelos. Já os veículos não tripulados para uso comercial, corporativo ou experimental são classificados como RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) e se dividem em 3 classes, com exigências crescentes em termos de requisitos das aeronaves, de acordo com seu Peso Máximo de Decolagem (PMD).

- Classe 1 (PMD > 150 kg): A regulamentação prevê que equipamentos desse porte sejam submetidos a processo de certificação similar ao existente para as aeronaves tripuladas, promovendo ajustes dos requisitos de certificação ao caso concreto. Esses veículos devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. As manutenções devem ser realizadas por oficinas e/ou mecânicos certificados pela ANAC sendo obrigatória a Inspeção Anual de Manutenção pela ANAC.
- Classe 2 (25 kg < PMD ≤ 150 kg): O regulamento estabelece os requisitos técnicos que devem ser observados pelos fabricantes e determina que a aprovação de projeto ocorrerá apenas uma vez. Além disso, esses veículos também devem ser registrados no Registro Aeronáutico Brasileiro e identificados com suas marcas de nacionalidade e matrícula. A manutenção pode ser realizada por pessoa qualificada pelo fabricante.

- Classe 3 (PMD \leq 25 kg): A norma determina que as RPA Classe 3 que operem além da linha de visada visual (BVLOS) ou acima de 400 pés (120m) deverão ter seu projeto autorizado pela ANAC e precisam ser registradas e identificadas com suas marcas de nacionalidade e matrícula. Além disso devem realizar manutenção com pessoa qualificada. Por sua vez aeronaves dessa classe que operarem em até 400 pés (120m) acima da linha do solo e em linha de visada visual (operação VLOS) não precisarão ser de projeto autorizado, mas deverão ser cadastradas na ANAC, apresentando informações sobre o operador e sobre o equipamento. As aeronaves com até 250 g não precisam ser cadastradas ou registradas, independentemente de sua finalidade (uso recreativo ou não).

Independentemente de ser Aeromodelo ou RPA, todas as aeronaves não tripuladas com PMD maior que 250 g devem manter durante sua operação distância horizontal mínima de 30 m de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação conforme esquematizado na Figura 11. Considera-se pessoa anuente aquele que não esteja diretamente envolvida na operação, mas dê seu consentimento expresso, por sua vontade, conta e risco para que uma aeronave não-tripulada opere perto de sua própria pessoa ou dos seus tutelados. O limite de 30 metros não precisa ser observado caso haja uma barreira mecânica suficientemente forte para isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes na eventualidade de um acidente.

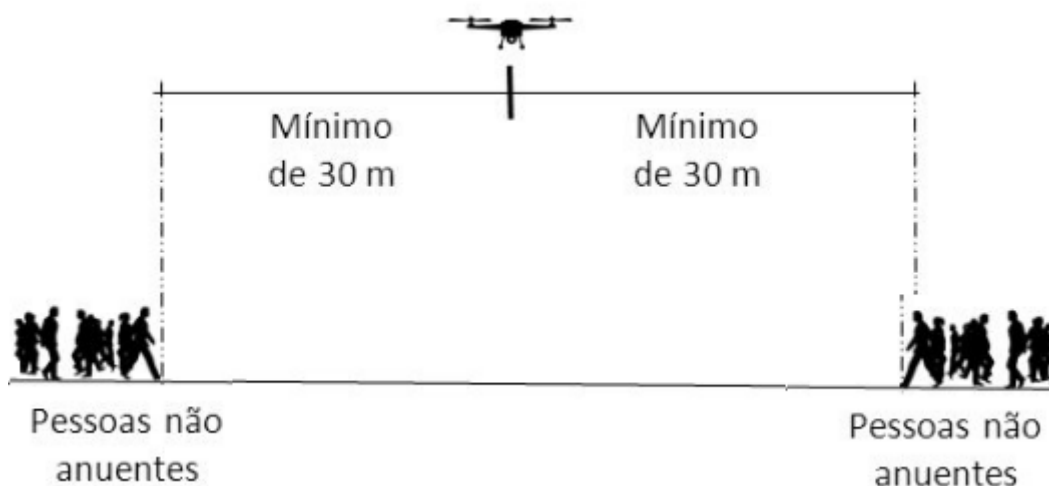


Figura 11: Aeronave não tripulada com mais de 250 g deve manter distância horizontal mínima de 30 m de terceiros (ANAC, 2017b).

Além das questões relacionadas ao veículo e a operação, há exigência de licença e certificado médico para aquelas pessoas que pretendam pilotar um RPA Classe 1 ou 2 ou ainda um RPA Classe 3 operando acima de 400 pés (cerca de 120 m) ou além do campo de visada do piloto (chamada de BVLO - *Beyond Visual Line of Sight*). As regras da ANAC dispostas no RBAC 94 são sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Resumo das regras da ANAC para aeronave não tripulada (ANAC, 2017b)

Requisito	RPA Classe 1 (Acima de 150 kg)	RPA Classe 2 (Acima de 25 kg até 150 kg)	RPA Classe 3 (Até 25 kg)	Aeromodelos (São restritos a até 400 pés)
Registro da aeronave	Sim	Sim	Sim (acima de 250 g)	Sim (acima de 250 g)
Aprovação ou autorização do projeto	Sim	Sim	Apenas BVLO ou acima de 400 pés	Não
Seguro contra danos a terceiros	Sim	Sim	Sim (acima de 250 g)	Não
Idade para operação (18 anos)	Sim	Sim	Sim	Não
Certificado médico	Sim	Sim	Não	Não
Licença e habilitação	Sim	Sim	Apenas para operações acima de 400 pés	Não
Local de operação	A distância da aeronave não tripulada não poderá ser inferior a 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação. O limite de 30 metros não precisa ser observado caso haja uma barreira mecânica suficientemente forte para isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes. Esse limite não é aplicável para operações por órgão de segurança pública, de polícia, de fiscalização tributária e aduaneira, de combate a vetores de transmissão de doenças, de defesa civil e/ou do corpo de bombeiros, ou operador a serviço de um destes.			

3.3.3 Regras do DECEA

Uma vez que a aeronave, piloto e controle estejam devidamente regularizados junto à ANAC e à ANATEL, isso ainda não é suficiente para que a mesma possa levantar voo. Antes é necessária autorização dos órgãos de tráfego aéreo. FAB (2015) esclarece que

qualquer objeto que se desprenda do chão e seja capaz de se sustentar na atmosfera – com propósito diferente de diversão – estará sujeito às regras de acesso ao espaço aéreo brasileiro. Desse modo, todo o voo de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) precisa de autorização do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), exatamente como no caso das

aeronaves tripuladas. Ou seja, a regra geral, seja aeronave tripulada ou não, é a mesma, já que é imprescindível a autorização para o voo. A exceção para os dois casos, também, é a mesma: os voos que tenham por fim lazer, esporte, hobby ou competição, que têm regras próprias.

Como é possível observar na citação acima de FAB (2015), qualquer aeronave, seja ela tripulada ou não, com objetivo diverso de recreação ou competição, está sujeita as regras de tráfego aéreo e autorização para acessar o espaço aéreo. Portanto RPA e Aeromodelo são tratados de forma diferente pelo DECEA. Embora um mesmo modelo de aeronave possa ser tanto RPA quanto Aeromodelo, o tipo de operação da aeronave (se é recreativa ou não) determinará o seu tratamento perante o DECEA.

Aeromodelo

Um aeromodelo nada mais é que uma aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e utilizada para *hobby*, esporte ou lazer, independente da sua forma peso ou tamanho (FAB, 2015). Muitos leigos acreditam não haver norma específica para operação de aeromodelos no Brasil, o que não é verdade. As normas atuais para operação de aeromodelos estão descritas na Circular de Informações Aeronáuticas – AIC nº 17/17, documento publicado pelo DECEA com vigência a partir de 10 de julho de 2017, intitulado “Aeronaves Remotamente Pilotadas para Uso Recreativo - Aeromodelos”. Esta seção da Dissertação apresentará os principais pontos desta Circular.

A AIC 17/17 tem por finalidade “regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro por aeronaves remotamente pilotadas com uso exclusivamente voltado à recreação, os chamados Aeromodelos” (DECEA, 2017). A AIC 17/17 contém, portanto, as normas específicas que devem ser observadas por um aeromodelista.

A operação de aeromodelos deve ser realizada em locais suficientemente distantes de áreas densamente povoadas. Deve ser evitada a operação de aeromodelos motorizados nas proximidades de áreas ou instalações sensíveis ao ruído, como hospitais, templos religiosos, escolas e asilos. Não deve também sobrevoar áreas de segurança, tais como penitenciárias por exemplo. Importante também que o piloto observe o direito à privacidade previsto na Constituição brasileira.

De forma a evitar conflito com a operação das demais aeronaves, os aeromodelos não poderão ser operados nas zonas de aproximação e de decolagem de aeródromos (45° para cada lado do eixo da pista) até a distância de 9 km. Fora destas zonas, deverão estar

distantes, no mínimo, 2 km em se tratando de área urbana ou 3 km em se tratando de área rural de aeródromos ou heliportos cadastrados, rotas conhecidas de aeronaves e helicópteros tripulados, circuito de tráfego, corredores visuais e atividades da aviação agrícola.

Além das regras acima citadas o piloto deve observar limites de altura, velocidade e distância de pessoas não anuentes com a operação. A pilotagem com uso de FPV (*First Person View*), onde o piloto não observa diretamente a aeronave, mas sim as imagens transmitidas por uma câmera instalada na aeronave, são permitidas somente em zonas rurais ou em aéreas próprias destinadas a prática de aeromodelismo. Nas áreas urbanas a pilotagem do aeromodelo com uso de FPV é proibido, com exceção dos voos utilizando o que é conhecido no meio aeronáutico por “princípio da sombra” (áreas protegidas por obstáculos naturais ou artificiais que impedem a operação de uma aeronave tripulada). A *Tabela 4* sintetiza as principais regras previstas na AIC 17/17 que devem ser observadas pelo praticante de aeromodelismo.

Tabela 4: Resumo das regras para aeromodelismo (DECEA, 2017).

Áreas / Parâmetros	Altura	Limite de Velocidade	Distância de pessoas não anuentes	Autorizado o uso de FPV
Zonas Urbanas	40 m ⁽¹⁾	40 km/h	30 m	Não ⁽²⁾
Zonas Rurais	50 m	100 km/h	90 m	Sim
Áreas próprias para aeromodelismo	120 m	Não aplicável	Não aplicável	Sim

(1) A altura pode ser excedida em voos próximos a obstáculos (conhecido por princípio da sombra)

(2) FPV não é permitido com exceção de operação próxima à obstáculos (princípio da sombra)

Remotely Piloted Aircraft - RPA

Um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também denominado *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) nada mais é que uma aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e utilizada em caráter não recreativo (FAB, 2015). As normas atuais para operação e acesso ao espaço aéreo por RPA estão descritas na Instrução do Comando da Aeronáutica nº 100-40/2016 (ICA 100-40), documento publicado pelo DECEA com vigência a partir de 10 de março de 2017, intitulado “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. Esta seção da Dissertação apresentará as principais regras impostas pelo referido normativo.

A ICA 100-40 tem por finalidade “regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro por

Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA)” (DECEA, 2016b). A ICA 100-40 contém, portanto, as normas específicas que os pilotos de RPA devem observar antes e durante o acesso ao espaço aéreo. Sendo o RPA uma aeronave, seu acesso ao espaço aéreo está condicionado ao cumprimento das regulamentações e autorização por parte do DECEA (FAB, 2015).

A operação de RPA dentro de construções fechadas a fora delas (no limite de sua altura) até uma distância horizontal de 30 m não são considerados “espaços aéreos” e não dependem de autorização do DECEA, sendo a mesma de total responsabilidade do proprietário da edificação. O mesmo ocorre para construções sem cobertura (estádios por exemplo) caso a operação se dê dentro do limite vertical da sua estrutura lateral. A operação do RPA dentro da estrutura ou distante dela até 30 m (no limite da sua altura) devem ter autorização do proprietário, conforme esquematizado na *Figura 12*.

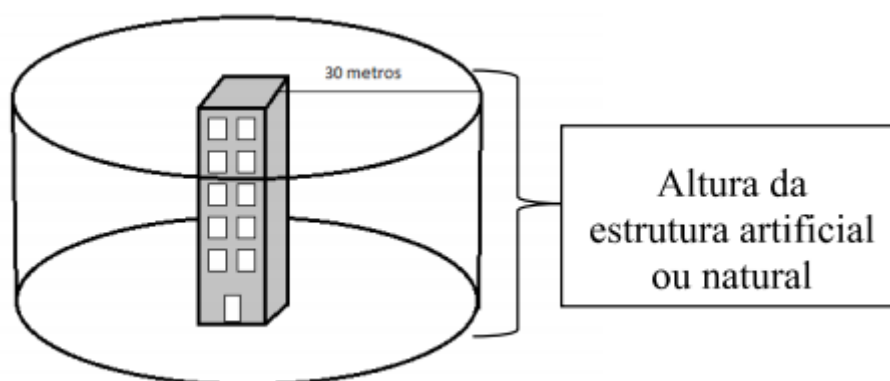


Figura 12: Cilindro imaginário dentro do qual a operação do RPA é de responsabilidade exclusiva do proprietário da edificação e deve ser autorizada pelo mesmo (DECEA, 2016b).

A operação em período noturno é condicionada à aeronave satisfazer os requisitos de luzes a serem exibidas pela aeronave previsto na ICA 100-12. A solicitação de autorização para voo de um RPA é feita pelo interessado por meio do Sistema de Autorização para Acesso ao Espaço Aéreo por RPAS (SARPAS), um sistema online administrado pelo DECEA e disponibilizado no sítio eletrônico <http://www.decea.gov.br/drone/>. O interessado deverá aguardar pela autorização antes da realização do voo.

A depender do peso e da altura em que se pretenda operar o RPA, a ICA 100-40 impõe requisitos distintos. A *Tabela 5* sintetiza os principais requisitos na referida regulamentação. A inobservância das normas sujeita o piloto e/ou operador da aeronave as responsabilidades administrativas, civil e/ou penal cabíveis.

Tabela 5: Resumo das regras para operação de RPA (DECEA, 2016b).

Regras para acesso ao espaço aéreo	PMD ≤ 25 kg						PMD > 25 kg	
	Voo até 100 pés (30 m)			Voo entre 100 e 400 pés (30 e 120 m)			Voo acima de 400 pés (120 m)	Qualquer altura
Tipo de Operação	VLOS	VLOS	BVLOS	VLOS	VLOS	BVLOS	VLOS/BVLOS	VLOS/BVLOS
Espaço aéreo	500 m horizontal	500 m horizontal	Segregado	500 m horizontal	Condicionado	Segregado	Segregado	Segregado
Uso de <i>transponder</i>	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim ⁽¹⁾	Sim ⁽¹⁾
Apresentação de Plano de voo	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	a critério ⁽²⁾	Obrigatório
Velocidade máxima (solo)	55 km/h	55 km/h	55 km/h	110 km/h	110 km/h	110 km/h	-	-
Distância de aeródromos	≥ 5 km	< 5 km	-	≥ 9 km	< 9 km	-	-	-
Afastamento de pessoas não anuentes	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	-
Afastamento de patrimônios	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	≥ 30 m	-	-
Afastamento de rotas de aeronaves tripuladas	≥ 5 km	< 5 km	-	≥ 9 km	< 9 km	-	-	-
Comunicação bilateral com órgão ATS	Não	a critério ⁽²⁾	Sim	Não	a critério ⁽²⁾	Sim	Sim	Sim
Emissão de NOTAM	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Antecedência mínima do pedido de Autorização	45 min	2 dias	18 dias	2 dias	18 dias	18 dias	18 dias	18 dias

(1): conforme as mesmas regras específicas de uso de *transponder* por aeronaves tripuladas (2): a critério do controle regional responsável pelo espaço aéreo sobrevoado

3.4 Voo em espaço aéreo não segregado

Embora a operação comercial de VANT seja permitida em alguns países e em outros não, o que se nota em comum é que em todos os casos a operação se dá em espaço aéreo segregado, isto é, não compartilhado com as demais aeronaves. Gimenes *et al.* (2014) pontua que o principal motivo pelo qual os VANT são proibidos de operar fora do espaço aéreo segregado (no qual dividiriam espaço com as aeronaves tripuladas) se deve à falta de pesquisa científica que assegure que o VANT possa ter um nível de segurança equivalente aos das aeronaves tripuladas. Os riscos que o VANT pode trazer são categorizados por Clothier *et al.* (2015) em duas vertentes: a primeira seria a colisão com outras aeronaves (tripuladas ou não) e a segunda seria do VANT colidir com pessoas em solo. No primeiro caso haveria risco de lesão ou morte para tripulantes e passageiros da aeronave enquanto no segundo riscos semelhantes para pessoas em solo.

Para trazer a níveis socialmente aceitáveis os riscos que a operação dos VANT em espaço aéreo não segregado poderiam representar, Guglieri *et al.* (2011) aponta duas maneiras: a primeira seria adotar requisitos de certificação para a aeronave e pilotos semelhantes aos das aeronaves tripuladas. Isso, contudo, encareceria significativamente os custos com materiais, processos e testes para produção dessas aeronaves. Além disso há diferenças significativas com as premissas que foram assumidas para a certificação de aeronaves tripuladas. Por exemplo, os aviões voam a maior parte do tempo em áreas desabitadas, o que pode não ser o caso dos VANT; há diferença no peso das aeronaves tripuladas e não tripuladas, o que influencia na severidade de eventual impacto; pilotos podem “sentir” as reações de uma aeronave tripulada o que não seria possível em uma aeronave não tripulada. Essas diferenças, portanto, não garantem que se os VANT passassem pelo mesmo processo de certificação que as aeronaves tripuladas, o mesmo nível de segurança seria atingido. Ao se adotar os mesmos requisitos poderia estar sendo excessivamente restritivo, gerando custos desnecessários, ou excessivamente permissivo, comprometendo demasiadamente a segurança.

A segunda maneira proposta por Guglieri *et al.* (2011) seria adotar para os VANT o que a literatura e as autoridades aeronáuticas de diversos países chamam de *Equivalent Level of Safety* (ELOS). O ELOS nada mais é que demonstrar que a exposição ao risco gerada para uma dada operação de um VANT seria igual ou menor que uma aeronave tripulada. Nessa linha é necessário primeiro se verificar a qual nível de risco uma aeronave tripulada está sujeita. Por exemplo, a autoridade de aviação europeia utiliza a

Tabela 6 como parâmetro de probabilidade de falhas para grandes aeronaves. A probabilidade de falha é dada pela frequência com que pode ocorrer em termos de horas de voo e a severidade vai desde falhas que não comprometem a segurança de voo (desprezível) até falhas que, se ocorrerem, implicarão em sérios ferimentos e/ou mortes de pessoas (catastrófica).

Tabela 6: Matriz de probabilidade x severidade de falhas adotada pela autoridade europeia para grandes aeronaves tripuladas (EASA, 2017).

Frequente	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
Provável ($< 10^{-3}$ h)	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
Remota ($< 10^{-5}$ h)	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável
Extremamente remota ($< 10^{-7}$ h)	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Inaceitável
Extremamente improvável ($< 10^{-9}$ h)	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
Probabilidade/Severidade	Desprezível	Pequena	Grande	Perigosa	Catastrófica

Guglieri *et al.* (2011) menciona que uma matriz análoga a da Tabela 6 pode ser construída para um VANT, levando-se em conta a probabilidade de falhas dos componentes do VANT e também sua energia cinética (que implicará na severidade de eventual falha) tanto com respeito a colisão contra o solo quanto a colisão contra outras aeronaves. Dalamagkids *et al.* (2012) pontua, no entanto, que uma série de variáveis também devem ser consideradas na montagem dessa matriz. No caso de colisão contra o solo, deve-se considerar as características do local da operação, tais como a densidade populacional em solo e se as pessoas estão ou não protegidas por construções. No caso de colisão contra outras aeronaves (tripuladas ou não), deve-se levar em conta por exemplo a classe do espaço aéreo, densidade do tráfego, capacidade das aeronaves se desviarem uma da outra etc. Como se percebe, embora o ELOS apresente a vantagem de não ter que certificar a aeronave cumprindo todos os requisitos regulamentares, ela é limitada a operações específicas, que devem ser analisadas caso a caso, já que qualquer mudança das características do local de operação por exemplo implica na mudança das premissas e alteração na relação de probabilidade-severidade de falhas.

Além dos riscos para pessoas em solo e para outras aeronaves, a operação dos VANT em espaço compartilhado com as aeronaves tripuladas adicionaria ainda mais trabalho ao já sobrecarregado controle de tráfego aéreo. Abeyratne (2012, p. 120) cita que um dos desafios relacionados a VANT

é mais abrangente e diz respeito à possibilidade do VANT invadir as funções de controle de tráfego aéreo (ATC) em espaço aéreo não segregados. Ao fazê-lo, os VANT não devem colocar um fardo adicional e exigências no gerenciamento do espaço aéreo e o fluxo de tráfego aéreo geral dentro da estrutura em rotas, que não deve ser prejudicada pela presença de VANT. Neste contexto, a prioridade estaria na prevenção de colisões, principalmente através de uma separação efetiva entre aeronaves pela qual aeronaves poderiam ser mantidas separadas através da aplicação de adequados mínimos de separação. Os dois principais atores neste processo seriam o piloto da aeronave tripulada envolvida e o prestador de serviços de navegação aérea, que seria em conjunto ou isoladamente responsável se os mínimos de separação fossem comprometidos. (tradução do autor)

No caso do Brasil, FAB (2015) cita que “o DECEA, em consonância com outros órgãos, vem trabalhando a fim de possibilitar a inserção no espaço aéreo de forma segura e controlada, do mesmo modo que vem fazendo com as aeronaves tripuladas desde que as mesmas começaram a voar no País”. Fato é que a possibilidade de introdução do VANT em espaço aéreo não segregado ampliaria as oportunidades de exploração comercial, trazendo consequentemente mais pesquisa e desenvolvimento dos mesmos em um ciclo virtuoso.

Como se pode observar nas Seções 3.3.2 e 3.3.3, tanto as regras da ANAC quanto do DECEA são mais restritivas para VANT com PMD > 25 kg, operação acima de 400 pés (120 m) de altura e/ou BVLOS. Nestes casos, além da aeronave ter que cumprir com uma série de requisitos de certificação e de manutenção, as autorizações de voo devem ser solicitadas com no mínimo 18 dias de antecedência. Tais restrições podem por vezes inviabilizar a eventual utilização do VANT como veículo para transporte de carga.

Mesmo utilizando-se aeronaves com PMD < 25 kg e voando-se abaixo de 400 pés de altitude, há ainda limitações operacionais que dificultam a utilização do VANT na logística urbana. A primeira é que se a operação for BVLOS, ocorre a restrição vista no parágrafo anterior. A operação VLOS por sua vez reduz significativamente o raio de alcance do aparelho, já que o mesmo deve ficar ao alcance visual a olho nu do piloto. A segunda limitação por sua vez é que a operação deve ocorrer a mais de 30 metros (projeção horizontal em solo) de pessoas e edificações não anuentes, o que pode limitar ou mesmo inviabilizar a utilização do VANT na logística urbana.

Admitindo-se que não haja restrições de acesso ao espaço aéreo, será abordado no capítulo seguinte um estudo de caso da análise de desempenho do voo de um VANT com

PMD inferior a 25 kg de forma a avaliar o desempenho desse tipo de veículo para o transporte de carga.

4 ESTUDO DE CASO – DESEMPENHO OPERACIONAL DO VANT

Este Capítulo possui como objetivo apresentar os resultados e a análises de desempenho para transporte de carga realizado por um VANT do tipo quadricóptero montado por pesquisadores do Laboratório de Transporte de Cargas (LTC) vinculado ao Programa de Engenharia de Transportes (PET) da COPPE/UFRJ e ainda comparar o desempenho do VANT com uma motocicleta para o transporte urbano de carga (TUC) levando-se em consideração as capacidades de carga de cada veículo, o nível de serviço (tempo de entrega) e o custo energético.

4.1 VANT do LTC

O Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) pertencente ao Laboratório de Transporte de Cargas (LTC) do Programa de Engenharia de Transportes (PET) da COPPE/UFRJ foi montado pela equipe do próprio LTC no 2º semestre do ano de 2015 a partir de peças compradas por meio da *internet* em fornecedores chineses. A Tabela 7 lista as peças necessárias para a montagem, os custos dessas peças apurados no mercado brasileiro bem como o valor efetivamente despendido com as peças compradas no mercado chinês (incluindo taxa de importação).

Tabela 7: Componentes e custos para montagem do VANT do LTC.

Componente	Quantidade	Custo no mercado nacional	Valor efetivamente gasto com importação (incluindo taxas de importação)
<i>Frame</i>	1	R\$ 99.00	R\$ 50.10
Motores	4	R\$ 210.00	R\$ 170.34
ESCS	4	R\$ 237.56	R\$ 138.40
Placa controladora	1	R\$ 749.00	R\$ 504.14
Bateria 5000 mA.h	1	R\$ 239.00	R\$ 109.52
Hélices	4	R\$ 59.99	R\$ 26.74
Rádio Transmissor	1	R\$ 389.90	R\$ 221.32
Conectores Bullet	24	R\$ 20.97	R\$ 22.47
Conector XT60	1	R\$ 20.00	R\$ 29.93

Cabo Servo Lead	6	R\$	59.90	R\$	8.48
Carregador LiPo	1	R\$	179.99	R\$	115.10
Câmera	1	R\$	358.99	R\$	377.69
	Total	R\$	2,624.30	R\$	1,774.23

De posse das peças, que demoraram entre 20 a 77 dias a partir da data de compra para estarem liberadas nos Correios, a equipe do LTC, sob a coordenação do Prof. Dr. Márcio de Almeida D'Agosto, fez a montagem do VANT¹, cujo resultado final é mostrado na Figura 13.



Figura 13: VANT do tipo quadricóptero montado pelo LTC.

Dentre as principais características do VANT do LTC (Figura 13), convém destacar as seguintes:

- Peso vazio (com bateria e container para transporte de carga): 1.404 g
- Bateria: tipo LiPo de 5.000 mA.h com 3 células (11,1 V em série)
- Hélice: 10 x 4,5 (diâmetro x passo em polegadas)
- Motor: A2212/13T 1000 KV

A Tabela 8 contém as principais especificações do motor do VANT do LTC segundo o fabricante.

¹ O VANT em questão é fruto de uma pesquisa de iniciação científica do LTC que teve início em 2015 e continua em desenvolvimento até o presente momento (Março/2018)

Tabela 8: Especificações do motor do VANT do LTC (RHYDOLABZ, 2013)

CARACTERÍSTICA	DESCRIÇÃO
Bateria compatível	Lipo de 2 ou 3 células
KV	1000 RPM/Volt
Eficiência máxima	80%
Corrente de eficiência máxima	4 a 10 A (> 75%)
Corrente sem carga	0,5 A a 10 V
Resistência interna	90 mΩ
Corrente máxima	13 A por 60 s
Potência máxima	150 W
Peso	52,7 g

4.1.1 Descrição e metodologia do teste realizado

O teste realizado com o VANT do LTC tinha como objetivo avaliar a capacidade de carga (capacidade de carga útil) e também como o desempenho do veículo (dirigibilidade e autonomia) era afetado por diferentes quantidades de cargas (peso) transportadas. Neste teste, toda a carga embarcada era transportada dentro de um container acoplado ao *frame* do veículo, conforme demonstrado na Figura 14.



Figura 14: Container para carga acoplado ao VANT.

A primeira questão suscitada previamente ao início de realização dos testes foi qual o tipo de carga seria utilizada durante a realização dos voos. Como um dos objetivos era determinar a capacidade máxima de carga (em termos de peso), devido à restrição de capacidade volumétrica do contêiner, poderia ocorrer a situação em que se esgotasse a capacidade volumétrica útil do container e ainda assim não seria atingido a situação limite de carga útil máxima. Assim, para evitar problemas de restrição de espaço, optou-se por utilizar chumbada para pesca como carga, conforme Figura 15. A chumbada é fabricada do chumbo fundido cuja densidade é $11,3 \text{ g/cm}^3$, superior por exemplo ao aço, cuja densidade é $7,86 \text{ g/cm}^3$ (SAKHAROV e BORISENKO, 2014). A escolha da chumbada de pesca, portanto, foi pertinente, uma vez que buscava-se um material pesado e que ocupasse pouco volume, isto é, com alta densidade.



Figura 15: Chumbada de pesca sendo pesada para compor carga em teste do VANT.

Foram realizados um total de 7 voos de testes embarcando-se diferentes quantidades (peso) de carga, previamente pesadas conforme ilustrado na Figura 15. A Figura 16 ilustra a realização de um desses testes.



Figura 16: Execução de um dos testes de desempenho com VANT do LTC.

Além da observação geral sobre o comportamento em voo do VANT, em cada um dos testes eram registrados os seguintes parâmetros:

- Número do teste
- Data
- Horário de início do voo
- Peso da carga útil embarcada
- Decaimento da carga da bateria com o tempo de voo
- Decaimento da diferença de potencial (*ddp*) da bateria com o tempo de voo

A lista a seguir descreve a metodologia de obtenção dos parâmetros acima bem como de outros dados decorrentes diretamente desses parâmetros. Os resultados e observações de cada um dos testes serão apresentados na seção seguinte ([4.1.2 Resultado do Teste](#)) e estão sintetizados na Tabela 10 até a Tabela 15, cujas colunas são a seguir detalhadas:

- Instante (s): Tempo medido no cronômetro a partir do acionamento dos motores.
- Carga Bateria (%): Informação disponibilizada por sensores instalados no veículo e transmitidas em tempo real para um computador.
- Carga Bateria (mA.h): calculada multiplicando-se a “Carga Bateria (%)” pela capacidade de carga nominal da bateria, isto é 5.000 mA.h.
- Corrente média (A): de acordo com Saslow (2002), a corrente elétrica *I* é definida como “a taxa na qual uma quantidade de carga elétrica *Q* atravessa uma dada secção por unidade de tempo *t*”. A definição leva a equação 1:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

A partir da equação 1, a corrente elétrica média (*I_m*) drenada da bateria entre dois instantes *t₁* e *t₂* pode ser calculada como:

$$I_m = \frac{Q_1 - Q_2}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

onde *Q₁* e *Q₂* representam a carga da bateria nos instantes *t₁* e *t₂*, respectivamente.

- Corrente média por motor (A): obtida dividindo-se a corrente média drenada pela bateria pelo número de motores, isto é quatro.
- *ddp* bateria (V): informação disponibilizada no computador pelo sistema de telemetria.

- Potência média (W): de acordo com Saslow (2002), a potência elétrica P fornecida por uma fonte com uma diferença de potencial V e corrente I é dada pela equação 3.

$$P = V.I \quad (3)$$

A partir da equação 3, a potência média P_m fornecida pela bateria no instante t_2 pode ser calculada pela equação 4.

$$P_{m2} = V_2 \cdot I_{m12} \quad (4)$$

onde V_2 representa a ddp da bateria no instante t_2 e I_{m12} representa a corrente média I_m entre os instantes t_1 e t_2 .

- Potência média por motor (W): obtida dividindo-se a potência média fornecida pela bateria pelo número de motores

Tendo por base a metodologia de obtenção de cada um dos parâmetros mencionados acima, a *Tabela 9* apresenta os parâmetros diretos e forma de cálculo dos parâmetros indiretos utilizada para cada um dos 7 testes com o VANT do LTC.

Tabela 9: Tabela base de parâmetros diretos e indiretos obtidos para cada um dos testes com VANT do LTC

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	ddp bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	B1	$C1 = 5000.B1/100$			F1		
A2	B2	$C2 = 5000.B2/100$	$D2 = 3,6.(C1 - C2)/(A2 - A1)$	$E2 = D2/4$	F2	$G2 = F2.D2$	$H2 = G2/4$
A3	B3	$C3 = 5000.B3/100$	$D3 = 3,6.(C2 - C3)/(A3 - A2)$	$E3 = D3/4$	F3	$G3 = F3.D3$	$H3 = G3/4$
...
A _n	B _n	$C_n = 5000.B_n/100$	$D_n = 3,6.(C_{n-1} - C_n)/(A_n - A_{n-1})$	$E_n = D_n/4$	F _n	$G_n = F_n.D_n$	$H_n = G_n/4$

A partir da *Tabela 9* é possível calcular a potência elétrica média P consumida ao longo de todo teste, que será a razão entre a soma da energia consumida entre cada instante do teste e o tempo total de teste, isto é:

$$P = \frac{G_2 \cdot A_2 + G_3 \cdot (A_3 - A_2) + \dots + G_n \cdot (A_n - A_{n-1})}{A_n}$$

$$P = \frac{1}{A_n} \cdot \sum_{x=2}^n G_x \cdot (A_x - A_{x-1}) \quad (5)$$

4.1.2 Resultado do teste

Conforme já mencionado, foram realizados um total de 7 testes de voo. O objetivo inicial era medir os parâmetros de voo até a bateria atingir uma carga crítica de 10 %, devendo o teste ser finalizado de forma a evitar a queda e eventuais danos ao veículo por falta de energia. Contudo somente em parte dos testes foi possível voar até que a bateria atingisse tal nível. Isto se deve às falhas ou danos ao veículo que ocorreram em alguns dos testes, sendo o mesmo interrompido antes que a carga da bateria atingisse o nível crítico. Entretanto, mesmo nesses voos que foram encerrados não por restrição de bateria, foi possível analisar os resultados a partir dos dados coletados antes que o mesmo fosse interrompido. Na sequência serão apresentados uma descrição e os resultados em cada um dos 7 testes:

Teste 1: Veículo sem carga útil – falha no teste

O Teste 1 foi realizado com o VANT sem carga útil tendo sido interrompido em 06:07 (mm:ss) com a queda do veículo, provavelmente por interferência de outro VANT que estava sendo testado nas proximidades, ocorrendo ainda dano permanente a um dos motores na queda, sendo necessária a substituição do mesmo para a realização dos testes subsequentes. Os parâmetros do Teste 1 são os seguintes:

- Data de realização: 06/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 14:11
- Duração (mm:ss): 06:07
- Temperatura: 31,5 °C
- Velocidade do Vento: 1,5 m/s
- Peso da carga útil: 0
- Peso total: 1.404 g

A Tabela 10 apresenta os dados de desempenho coletados no Teste 1. As medidas foram tomadas imediatamente antes do início dos testes (Instante 0) e com 5 minutos de

voo (Instante 300 s). Uma nova leitura estava prevista quando o veículo alcançasse 10 minutos de voo, que foi inviabilizada pela queda do veículo com 06:07 (mm:ss) de voo.

Tabela 10: Resultado do Teste 1 (sem carga útil).

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	<i>ddp</i> bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	99	4950			12.02		
300	74	3700	15.0	3.8	11.13	167.0	41.7

Teste 2: Veículo sem carga útil

O Teste 2 foi uma repetição da configuração do Teste 1, que havia sido interrompido com a queda do veículo. Esse teste foi realizado, portanto, novamente sem carga útil embarcada. Os parâmetros do Teste 2 são os seguintes:

- Data de realização: 08/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 14:05
- Duração (mm:ss): 16:11
- Temperatura: 27,1 °C
- Velocidade do Vento: 1,8 m/s
- Peso da carga útil: 0
- Peso total: 1.404 g
- Peso total por motor: 351 g

A Tabela 11 apresenta os dados de desempenho coletados no Teste 2. O voo durou 16:11 (mm:ss), instante no qual a bateria atingiu a carga de 10 %, sendo então realizado o pouso controlado do veículo. Durante esse teste sem carga o VANT apresentou boa dirigibilidade, com ótima resposta aos comandos direcionais e de potência.

Tabela 11: Resultado do Teste 2 (sem carga útil).

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	<i>ddp</i> bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	99	4950			12.02		
300	74	3700	15.0	3.8	10.39	155.9	39.0
600	45	2250	17.4	4.4	9.95	173.1	43.3
900	17	850	16.8	4.2	9.58	160.9	40.2
971	10	500	17.7	4.4	8.67	153.9	38.5

A partir da equação 5 obtém-se uma potência elétrica média de 162,6 W, isto é, 40,7 W por motor.

Teste 3: Veículo com 500 g de carga útil – falha no teste

O Teste 3 foi realizado com 500 g de carga útil, tendo sido interrompido em 01:31 (mm:ss) com a queda do veículo. Neste teste a queda ocorreu devido ao descolamento da resina que prendia uma das hélices ao eixo do motor, a qual supõem-se que sob o forte calor produzido pelo motor e propagado pelo eixo até a resina, esta teve seu desempenho adesivo comprometido, inviabilizado que eixo e hélice girassem solidários. Sem a sustentação gerada por uma das hélices, o veículo ficou desbalanceado e caiu sem controle, danificando uma das hélices do aparelho. Os parâmetros do Teste 3 são os seguintes:

- Data de realização: 08/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 14:32
- Duração (mm:ss): 01:31
- Temperatura: 32 °C
- Velocidade do Vento: 1,5 m/s
- Peso da carga útil: 500 g
- Peso total: 1.904 g
- Peso total por motor: 476 g

A queda do veículo ocorreu em 01:31 (mm:ss), isto é, antes do instante 05:00 (mm:ss), que foi o instante escolhido para a 1ª tomada de parâmetros do voo, o que não foi, portanto, possível fazer. Mesmo o Teste 3 não tendo sucesso, ele traz questionamentos relevantes sobre confiabilidade, que podem apontar por sua vez para, por exemplo, certificação de veículos, peças, montagem, oficinas e a qualificação dos pilotos para operação segura dentro do envelope de voo da aeronave e ainda para atuar em procedimentos em caso de emergência.

Teste 4: Veículo com 500 g de carga útil

O Teste 4 foi uma repetição da configuração do Teste 3, que havia sido interrompido com a queda do veículo devido ao descolamento de uma das hélices ao eixo do motor. Esse teste foi realizado, portanto novamente com 500 g de carga útil. Os parâmetros do Teste 4 são os seguintes:

- Data de realização: 09/09/2016

- Horário de início (hh:mm): 10:34
- Duração (mm:ss): 10:26
- Temperatura: 27,0 °C
- Velocidade do Vento: 1,1 m/s
- Peso da carga útil: 500 g
- Peso total: 1.904 g
- Peso total por motor: 476 g

A Tabela 12 apresenta os dados de desempenho coletados no Teste 4. O voo durou 10:26 (mm:ss), instante no qual a bateria atingiu a carga de 7 %, sendo então realizado o pouso controlado do veículo. Durante esse teste com 500 g de carga útil embarcada, o VANT apresentou boa dirigibilidade, com resposta moderada, mas satisfatória aos comandos direcionais e de inércia

Tabela 12: Resultado do Teste 4 (500 g de carga útil).

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	<i>ddp</i> bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	99	4950			12.05		
300	57	2850	25.2	6.3	9.66	243.4	60.9
600	11	550	27.6	6.9	8.73	240.9	60.2
626	7	350	27.7	6.9	8.51	235.7	58.9

A partir dos dados da Tabela 12 e utilizando a equação 5 obtém-se uma potência elétrica média de 241,9 W, isto é, 60,5 W por motor.

Teste 5: Veículo com 1.000 g de carga útil

O Teste 5 foi realizado embarcando-se uma carga útil de 1.000 g. Os parâmetros do Teste 5 são os seguintes:

- Data de realização: 09/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 10:57
- Duração (mm:ss): 05:19
- Temperatura: 27,1 °C
- Velocidade do Vento: 1,6 m/s
- Peso da carga útil: 1.000 g
- Peso total: 2.404 g

- Peso total por motor: 601 g

A Tabela 13 apresenta os dados de desempenho coletados no Teste 5. O voo durou 05:19 (mm:ss), instante no qual a bateria atingiu a carga de 38 %, sendo então realizado o pouso controlado do veículo. Com 1.000 g de carga útil embarcada, o VANT até foi capaz de decolar e pairar em alguns instantes, mas apresentou baixa dirigibilidade e potência insuficiente para vencer a inércia. Foi necessário manter a potência máxima dos motores durante praticamente todo o teste, o que não deixava folga para as manobras. Mesmo com a potência máxima, o VANT subia, descia, rebatia no solo e voltava a subir, não havendo, portanto, controle efetivo sobre o veículo e demonstrando subdimensionamento do sistema propulsor. Devido a péssima dirigibilidade, decidiu-se pelo pouso antecipado do VANT (antes que a carga da bateria atingisse 10 %), tendo em vista o risco de acidente eminente do veículo.

Tabela 13: Resultado do Teste 5 (1.000 g de carga útil).

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	<i>ddp</i> bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	99	4950			12.05		
144	71	3550	35.0	8.8	9.25	323.8	80.9
242	53	2650	33.1	8.3	9.05	299.2	74.8
279	46	2300	34.1	8.5	8.95	304.8	76.2
300	42	2100	34.3	8.6	8.9	305.1	76.3
319	38	1900	37.9	9.5	8.85	335.4	83.8

A partir dos dados da Tabela 13 e utilizando a equação 5 obtém-se uma potência elétrica média de 313,5 W, isto é, 78,4 W por motor.

Teste 6: Veículo com 750 g de carga útil

O Teste 6 foi realizado embarcando-se uma carga útil de 750 g. Os parâmetros do Teste 6 são os seguintes:

- Data de realização: 12/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 15:35
- Duração (mm:ss): 05:49
- Temperatura: 29,6 °C
- Velocidade do Vento: 1,2 m/s
- Peso da carga útil: 750 g

- Peso total: 2.154 g
- Peso total por motor: 538,5 g

A Tabela 14 apresenta os dados de desempenho coletados no Teste 6. O voo durou 05:49 (mm:ss), instante no qual ocorreu a queda do veículo com a quebra de uma das hélices. Neste instante a carga da bateria era de 38 %. O desempenho do veículo com 750 g de carga foi um pouco melhor que com 1.000 g de carga, mas ainda assim insatisfatório, sendo capaz de decolar mas apresentando baixa dirigibilidade e potência insuficiente para acelerações e desacelerações. O veículo no início do teste foi capaz de se sustentar no ar, com pequena folga para acelerações e desacelerações. Com o decorrer do teste e a queda de tensão da bateria, foi necessário também manter a potência do controle no máximo onde o veículo subia, descia, rebatia no solo e voltava a subir, não havendo, portanto, controle efetivo do veículo e demonstrando subdimensionamento do sistema propulsor. Com a baixa dirigibilidade, uma das hélices tocou o solo e se partiu, finalizando o teste nesta configuração de carga.

Tabela 14: Resultado do Teste 6 (750 g de carga útil).

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente média (A)	Corrente média por motor (A)	ddp bateria (V)	Potência média (W)	Potência média por motor (W)
0	99	4950			12.07		
120	79	3950	30.0	7.5	9.69	290.7	72.7
240	58	2900	31.5	7.9	9.21	290.1	72.5
349	38	1900	33.0	8.3	8.95	295.6	73.9

A partir dos dados da Tabela 14 e utilizando a equação 5 obtém-se uma potência elétrica média de 292,0 W, isto é, 73,0 W por motor.

Teste 7: Empuxo de decolagem em potência máxima

O Teste 7 foi realizado com o objetivo de verificar o empuxo máximo de decolagem do VANT na configuração de potência máxima. O teste foi realizado inteiramente sobre a balança com o veículo no solo, embarcando-se uma carga de 3.266 g, o que pelas experiências anteriores entendeu-se ser o suficiente para que o veículo não fosse capaz de ascender. A Figura 17 reproduz a realização do Teste 7 imediatamente antes do acionamento dos motores.



Figura 17: Teste de empuxo máximo de decolagem.

Como se pode observar no *display* da balança da Figura 17, momento no qual os motores estavam desligados, o peso total (veículo + carga) é 4.671 g. Os parâmetros do Teste 7 são os seguintes:

- Data de realização: 12/09/2016
- Horário de início (hh:mm): 16:32
- Duração (mm:ss): 03:05
- Temperatura: 29,5 °C
- Peso total: 4.670 g

Os motores foram então acionados em potência máxima. O teste durou 03:05 (mm:ss), instante no qual houve a queima de um dos motores. Foi observado sobreaquecimento e derretimento da resina que fixava a hélice ao eixo do motor, que por sua vez acabou escoando para dentro do motor, danificando-o permanentemente. O empuxo máximo dos motores pode ser calculado pela diferença entre a massa do conjunto medida com os motores desligados (4.671 g) e a massa medida durante os testes. A Tabela 15 apresenta os dados de desempenho do Teste 7.

Tabela 15: Resultado do Teste 7 (empuxo de decolagem em potência máxima)

Instante (s)	Carga bateria (%)	Carga bateria (mA.h)	Corrente (A)	ddp bateria (V)	Potência (W)	Potência por motor (W)	Peso balança (g)	Empuxo (g)	Empuxo por motor (g)	Força carga útil (g)
0	99	4950		12.05			1640	3030	757.5	1626
120	79	3950	30.0	9.79	293.7	73.4	2390	2280	570	876
185	68	3400	30.5	9.41	286.6	71.7	2420	2250	562.5	846

A partir dos dados da Tabela 15 e utilizando a equação 5 obtém-se uma potência elétrica média de 291,2 W, isto é, 72,8 W por motor.

4.1.3 Análise do Resultado do Teste

A partir dos testes realizados com o VANT do LTC, cujos resultados são apresentados na seção anterior, pretende-se, nesta seção, analisar o comportamento e desempenho do VANT do LTC em função dos diferentes pesos das cargas transportadas.

A Tabela 16 sintetiza as observações gerais sobre o desempenho do VANT com diferentes pesos de carga.

Tabela 16: Desempenho geral do VANT do LTC com diferentes configurações de carga.

Carga útil (g)	Nº do Teste	Peso total (g)	Dirigibilidade	Autonomia de voo (mm:ss)*
0	2	1404	Ótima resposta aos comandos direcionais e de potência	16:11
500	4	1904	Resposta moderada aos comandos direcionais e de potência (inércia)	10:06
750	6	2154	Moderada no início do teste, tornando-se ruim ao longo do teste (à medida que havia descarga da bateria)	8:21**
1000	5	2404	Péssima dirigibilidade e potência insuficiente. Veículo incapaz de manter planeio	7:38**

* Tempo de voo para a bateria completamente carregada atingir 10 % da carga

** Tempo estimado por interpolação linear, uma vez que o teste foi interrompido antes que a carga da bateria atingisse 10%

A partir das observações realizadas nos testes com o VANT do LTC, devidamente sintetizadas na Tabela 16, conclui-se que a carga útil máxima que o VANT do LTC é capaz de transportar é de 500 g. Com uma carga entre 500 g e 1.000 g há uma degradação gradativa na capacidade de voo e de controle do veículo, tornando seu uso impraticável para decolagem, planeio, voo nivelado e pouso. Acima de 1.000 g de carga útil o VANT do LTC sequer é capaz de decolar. Com uma carga útil de 500 g, a autonomia de voo é de aproximadamente 10 minutos o que, considerando uma velocidade média de 40 km/h

(vide [Seção 4.2.2](#)), resulta em um raio de alcance (com respeito a autonomia) de aproximadamente 7 km, ou 3,5 km se for considerada ida e volta.

Carga da Bateria ao longo do tempo

O gráfico da Figura 18 demonstra que quanto maior a carga útil transportada (maior peso total do VANT), maior a taxa de descarga da bateria.

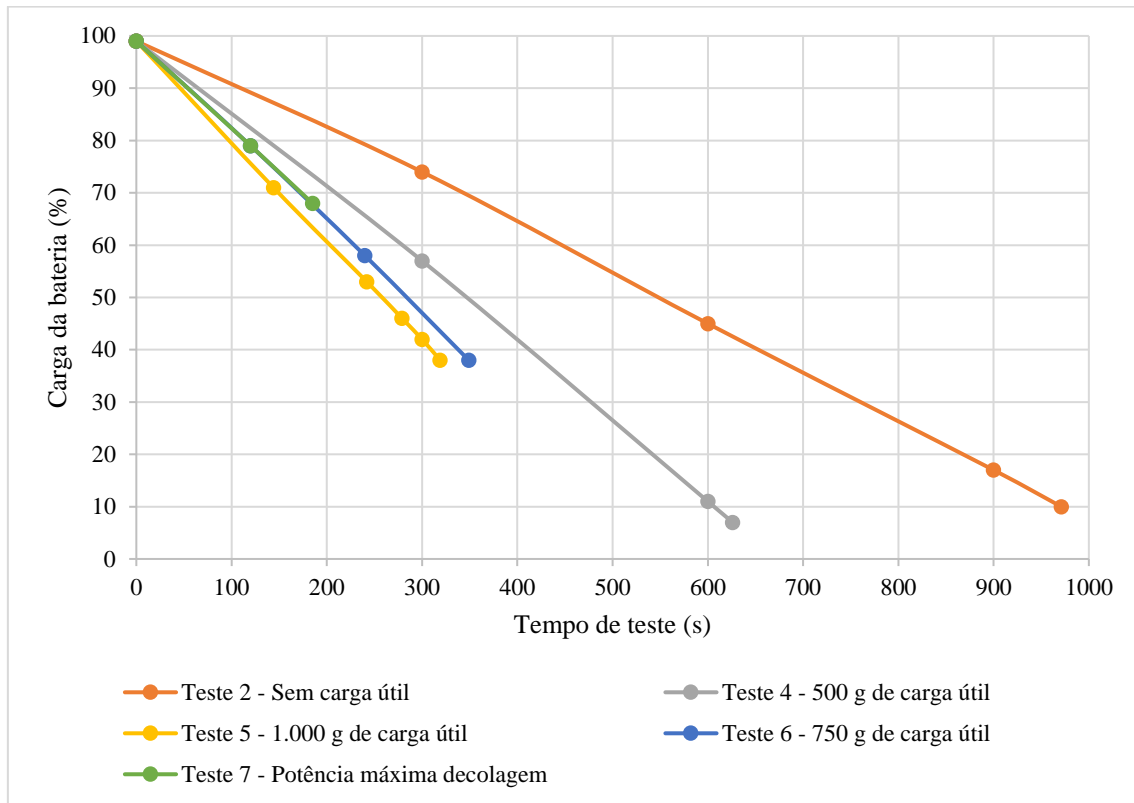


Figura 18: Carga da bateria x tempo de voo.

A maior taxa de descarga da bateria em função do peso da carga transportada era esperada tendo em vista que maior peso demanda mais potência elétrica dos motores (ver Figura 23) que por sua vez demanda maior corrente elétrica. Ressalta-se que somente no Teste 2 (sem carga útil) e no Teste 4 (500 g de carga útil) foi possível atingir a carga mínima da bateria (próxima a 10%), tendo em vista que no Teste 6 (750 g de carga útil) e no Teste 5 (1.000 g de carga útil) o VANT não apresentou potência e dirigibilidade suficientes para se manter em voo até se atingir tal nível de carga da bateria, conforme descrito no respectivo teste contido na [Seção 4.1.2](#).

Embora a primeira vista as linhas do gráfico da Figura 18 se pareçam retas, na verdade não são. A segunda derivada dessas linhas é negativa, isto é, a taxa de queda de

carga em um mesmo teste é cada vez maior devido ao aumento da corrente elétrica. Isso pode ser verificado nas tabelas contidas na [Seção 4.1.2](#) (observar como a corrente elétrica aumenta com o tempo em um mesmo teste) e a explicação para esse fenômeno está da análise da Figura 20.

Diferença de potencial da bateria ao longo do tempo

O gráfico da *Figura 19* demonstra o comportamento da diferença de potencial (*ddp*) fornecida pela bateria ao longo do teste. Duas observações ficam explícitas pelo gráfico: a primeira é que a *ddp* fornecida pela bateria não é constante, mas decai ao longo do voo; a segunda é que quanto maior a carga útil transportada (maior peso total do VANT), mais rapidamente decai a *ddp* fornecida pela bateria. Em linhas gerais observa-se, portanto, que a *ddp* fornecida pela bateria cai à medida em que a sua carga elétrica vai sendo consumida.

Uma dúvida imediata que surge nesse caso é: seria a *ddp* fornecida pela bateria função exclusiva da sua quantidade de carga elétrica remanescente? A resposta a essa pergunta será abordada no próximo tópico, mas antecipa-se que depende sim da carga elétrica remanescente na bateria, mas não exclusivamente desse fator.

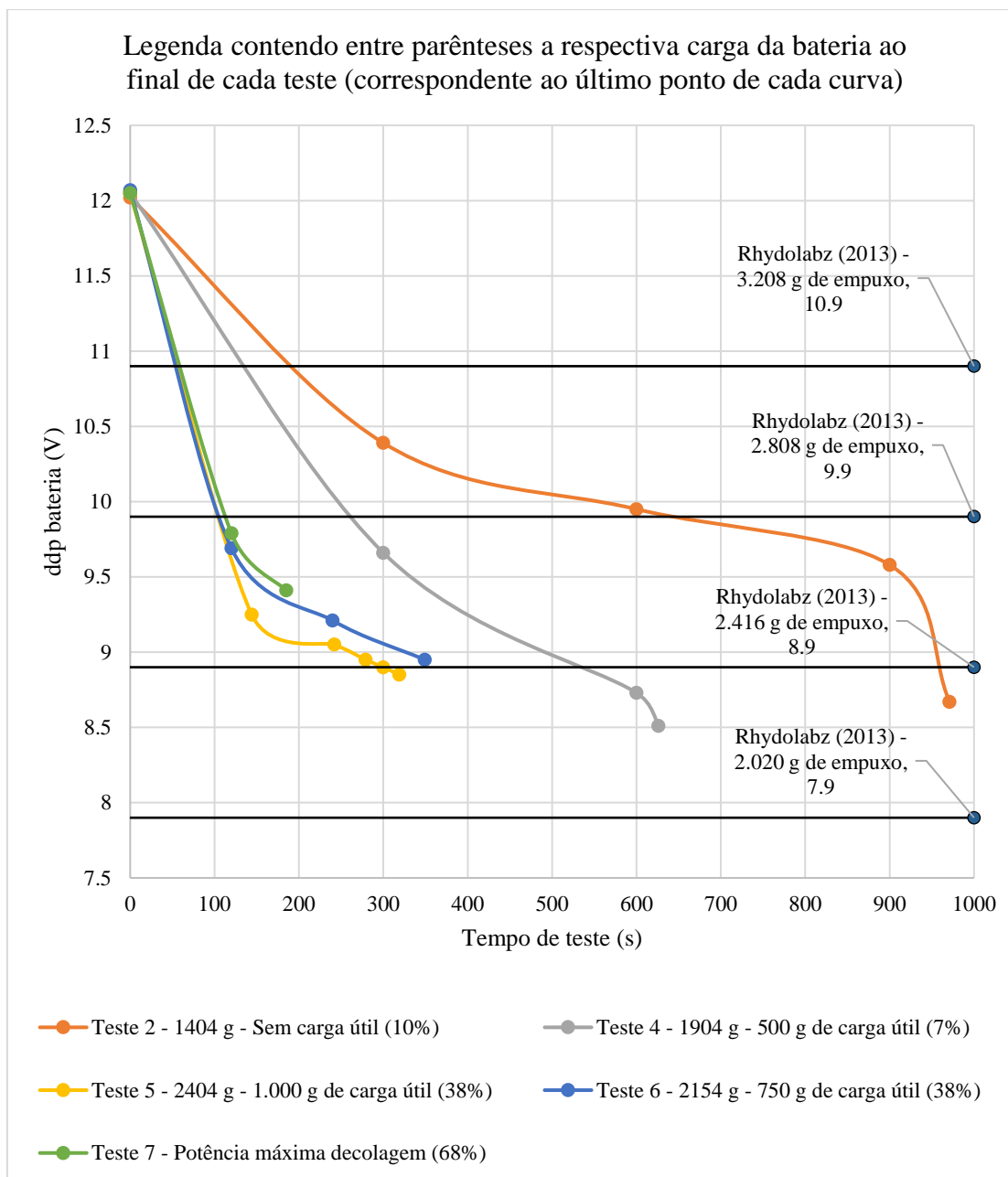


Figura 19: Diferença de potencial fornecida pela bateria x tempo de voo.

Rhydolabz (2013) reúne os resultados de uma série de testes de desempenhos feitos em bancada com o motor A2212/13T 1000 KV, utilizando diferentes hélices e aplicando-se diferentes potencias elétricos ao motor. Os resultados desses testes estão consolidados no Apêndice A (Tabela 24).

Embora Rhydolabz (2013) tenha feito testes com vários tipos de hélices mas não com a 10 x 4,5 (hélice utilizada pelo VANT do LTC), em um dos seus testes é utilizada a hélice 10 x 5, isto é, uma hélice praticamente idêntica à hélice utilizada pelo VANT do LTC. Utilizando-se os dados da Tabela 24, foram traçadas linhas horizontais no gráfico da Figura 19, que correspondem ao empuxo produzido em bancada por 4 motores

A2212/13T 1000 KV utilizando hélice 10 x 5 quando submetidos à diferentes *ddp* (7,9 V, 8,9 V, 9,9 V e 10,9 V).

Segundo os testes de Rhydolabz (2013), para que estes 4 motores produzam um empuxo de 2.416 g (o que seria correspondente a 1.012 g de carga útil), é necessário que a bateria entregue uma *ddp* de 8,9 V. Isso explica porque o Teste 5 (1.000 g de carga útil e 2.404 g total) e o Teste 6 (750 g de carga útil de 2.154 g total) tiveram que ser interrompidos quando a *ddp* fornecida pela bateria atingiu pouco menos de 9 V. Ao atingir essa *ddp* o conjunto motor-hélice não foi mais capaz de gerar força suficiente para suportar tais cargas, o que foi comprovado na prática, onde nesses dois testes o VANT teve desempenho satisfatório no início, mas com a queda de tensão fornecida pela bateria foram perdendo potência e dirigibilidade até não ser mais capaz de sequer levantar voo. Fica claro também o porquê do sucesso do Teste 4 (500 g de carga útil com 1.904 g de peso total). De acordo com Rhydolabz (2013), com apenas 7,9 V é possível obter 2.020 g de empuxo, superior a 1.904 g (500 g de carga útil). Pelo gráfico observa-se que a menor tensão do Teste 2 foi ao final, restando a bateria 10 % de carga e fornecendo 8,5 V (superior a 7,9 V que corresponde a 2.020 g de empuxo).

Diferença de potencial da bateria em função da carga elétrica

O gráfico da Figura 20 demonstra o comportamento da diferença de potencial (*ddp*) fornecida pela bateria à medida que sua carga vai sendo consumida. Duas observações ficam explícitas pelo gráfico: a primeira é que a *ddp* fornecida pela bateria decresce à medida que sua carga vai sendo consumida (as curvas são sempre decrescentes). A segunda observação é que, para um dado estado de carga elétrica da bateria (percentual do nível de carga remanescente na bateria), quanto maior o peso da carga transportada (ou maior peso bruto) menor será a *ddp* fornecida pela bateria. Isso responde ao questionamento levantado no tópico anterior: a *ddp* fornecida pela bateria depende não somente da quantidade de carga elétrica que ela ainda possui, mas também de como vem sendo demandada. A explicação para esses dois fenômenos observados é dada na sequência.

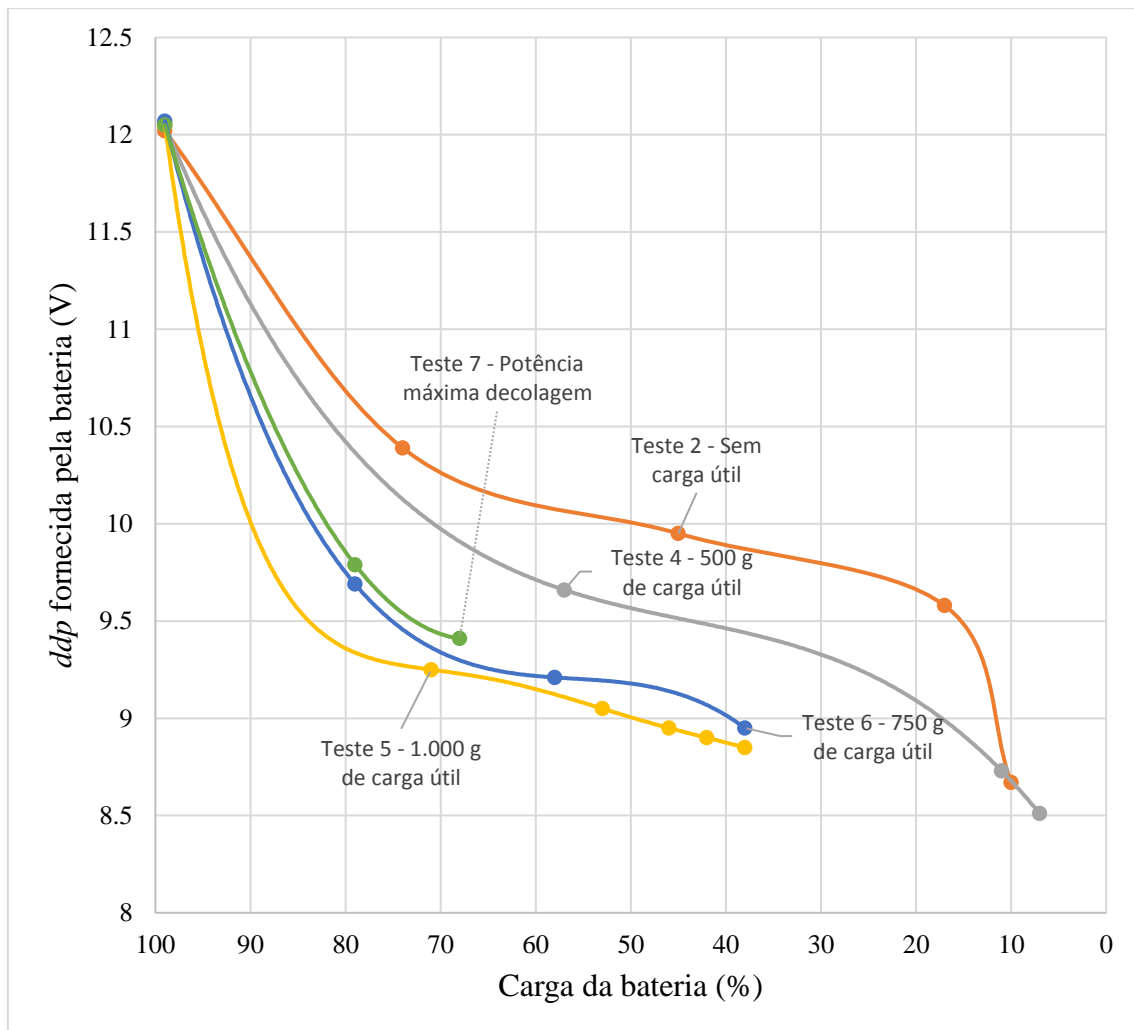


Figura 20: *ddp* fornecida pela bateria em função do estado de carga da bateria.

Com respeito a primeira observação, isto é, a queda da *ddp* fornecida pela bateria a medida em que se descarrega, isso é uma característica típica das baterias de Lítio-Íon. De acordo com Podhradský *et al.* (2014), a voltagem de circuito aberto (*open-circuit voltage*) da bateria do tipo LiPo, isto é, sua força eletromotriz (*fem*), apresenta as seguintes características:

- *fem* decresce com o estado da carga da bateria;
- *fem* cai exponencialmente quando o estado da carga se aproxima de 0 %;
- *fem* aumenta exponencialmente quando o estado da carga se aproxima de 100 %;
- *fem* possui uma relação aproximadamente linear na região entre 20 % e 85 % do estado da carga

O comportamento da bateria nos testes, demonstrado pelo gráfico contido na Figura 20, é bastante condizente com as características apontadas acima por Podhradský *et al.* (2014). Além do estado de carga, a *fem* de uma dada bateria do tipo LiPo varia também com a temperatura (BARONTI *et al.*, 2011) e com o número de ciclos (GALEOTTI *et al.*, 2015). Portanto a Figura 20 se alteraria caso os testes fossem executados em temperaturas muito mais altas ou muito mais baixas ou se a bateria estivesse muito mais nova ou muito mais velha. A redução da *fem* da bateria ao longo do voo provoca o aumento de corrente elétrica (de forma que o motor seja suprido com a mesma potência elétrica, conforme a equação 3, que por sua vez será convertida em potência mecânica) e assim o consumo de carga (corrente elétrica) da bateria durante o voo é a cada instante maior. Isso explica, portanto, o apontamento feito com relação à Figura 18, que a taxa de decaimento de carga da bateria é a cada instante maior durante o voo.

De acordo com a descrição anterior, a *fem* de uma bateria LiPo seria função do seu estado de carga, temperatura e quantidade de ciclos a que já foi submetida. Considerando que entre os testes realizados com o VANT do LTC não houve variação significativa da temperatura ambiente (a menor temperatura foi 27 °C e a maior 31 °C) e considerando ainda que os testes foram realizados em ciclos subsequentes da bateria (a capacidade da bateria reduz 20 % após 300 ciclos (MIKOLAZCZAK *et al.*, 2011)), pode-se considerar não haver mudanças significativas de temperatura e nem no envelhecimento da bateria nos testes feitos consecutivamente. Neste cenário a *fem* torna-se função praticamente exclusiva do estado de carga da bateria. Nesta linha, se a *fem* é função exclusiva do estado de carga da bateria, não deveriam estar todas as curvas apresentadas na Figura 20 sobrepostas? Como podem haver situações em que a *fem* é diferente para um mesmo estado de carga elétrica?

Para entender as diferentes curvas nas Figura 20 será necessário explorar um pouco mais o funcionamento da bateria, particularmente quanto a sua resistência interna. De acordo com Saslow (2002) a resistência interna é um elemento típico presente nas fontes de energia e pode ser matematicamente modelado como uma resistência em série com o circuito. No caso particular das baterias tipo LiPo, sua resistência interna aumenta com o número de ciclos (MIKOLAJCZAK *et al.*, 2011). Galeotti *et al.* (2015) destaca que, embora a resistência interna da bateria tipo LiPo aumente a cada ciclo, ela permanece aproximadamente constante dentro de um mesmo ciclo de descarga.

Considere uma bateria com força eletromotriz (*fem*) ε , com resistência interna r e alimentando um circuito com uma corrente I , conforme ilustrado na Figura 21.

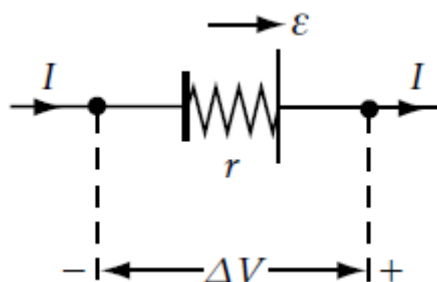


Figura 21: Bateria com *fem* ε e resistência interna r fornecendo corrente I .

De acordo com Saslow (2002), a ddp ΔV nos terminais da bateria, que neste caso em particular é o potencial elétrico efetivo fornecido pela bateria aos motores e é o que foi medido pela telemetria e utilizado para construção do gráfico da Figura 20, é dado por:

$$\Delta V = \varepsilon - r \cdot I \quad (6)$$

Como já abordado, a *fem* ε é função do estado de carga da bateria, isto é, é uma função $\varepsilon(q)$. Considerando que não há variação significativa da resistência interna da bateria nos testes em ciclos subsequentes realizados e que esta permanece constante, para um dado estado de carga da bateria, de acordo com a equação 6, quanto maior a corrente elétrica, menor será a ddp ΔV medida nos terminais da bateria. Como a corrente elétrica aumenta com peso da carga transportada (vide Figura 18), quanto mais pesada for a carga transportada, menor será a ddp ΔV medida nos terminais da bateria para um dado estado de carga na bateria, explicando portanto porque as curvas da Figura 20 não estão sobrepostas.

A partir da equação 6 é possível ainda calcular a resistência interna da bateria usando os dados do teste. A partir dos dados da Tabela 12 para um estado de carga da bateria igual a 57 % e a partir dos dados da Tabela 14 para um estado de carga da bateria igual a 58 % e considerando ainda que não há variação significativa da *fem* da bateria entre esses dois estados de carga, tem-se:

$$\varepsilon (57\%)_{\text{Teste 4}} \cong \varepsilon (58\%)_{\text{Teste 6}}$$

$$\Delta V_4 + r \cdot I_4 \cong \Delta V_6 + r \cdot I_6$$

$$9,66 + r \cdot 25,2 \cong 9,21 + r \cdot 31,5$$

$$6,3 \cdot r \cong 0,45$$

$$r \cong 0,07 \Omega$$

A bateria LiPo utilizada no VANT é do tipo 3S (isto é, 3 células em série), possui capacidade de carga de 5 A.h e taxa de 20C. O “C” na bateria é o chamado “c-rate” e indica a corrente máxima de carga e descarga da bateria em relação a capacidade de carga (GALEOTTI *et al.*, 2015). Tomando-se a bateria do VANT de 5 A.h como exemplo, 1C significaria uma capacidade de corrente de 5 A. 20C significa uma capacidade de corrente de 100 A. De acordo com Chuangfeng *et al.* (2011), a queda de potencial da bateria quando em sua corrente máxima é de aproximadamente 10 % da sua *fem*. No caso da bateria utilizada pelo VANT do LTC, com uma resistência 0,07 Ω e sendo percorrida por uma corrente de 100 A, resultaria em uma queda de potencial de aproximadamente 7 V, isto é, mais de 50 % da *fem* da bateria (12 V). Isso aponta para uma resistência interna excessiva da bateria, indicando seu desgaste. Se estivesse em boas condições sua resistência interna deveria ser de no máximo 0,02 Ω .

Autonomia em função da carga

O gráfico da Figura 22 demonstra o tempo de voo do VANT do LTC até a carga da bateria atingir uma carga crítica de 10 %. Cada ponto desse gráfico é construído a partir do instante de tempo em que as curvas contidas na Figura 18 interceptam a carga de 10 %. No caso dos Testes 5 (1.000 g de carga útil) e 6 (750 g de carga útil), uma vez que tais testes se encerraram com uma carga da bateria de 38 %, é feito um prolongamento das curvas da Figura 18 utilizando-se interpolação linear de forma a se obter o instante de tempo no qual a carga elétrica da bateria atingiria 10 %, caso fosse possível prosseguir com os voos nesses testes.

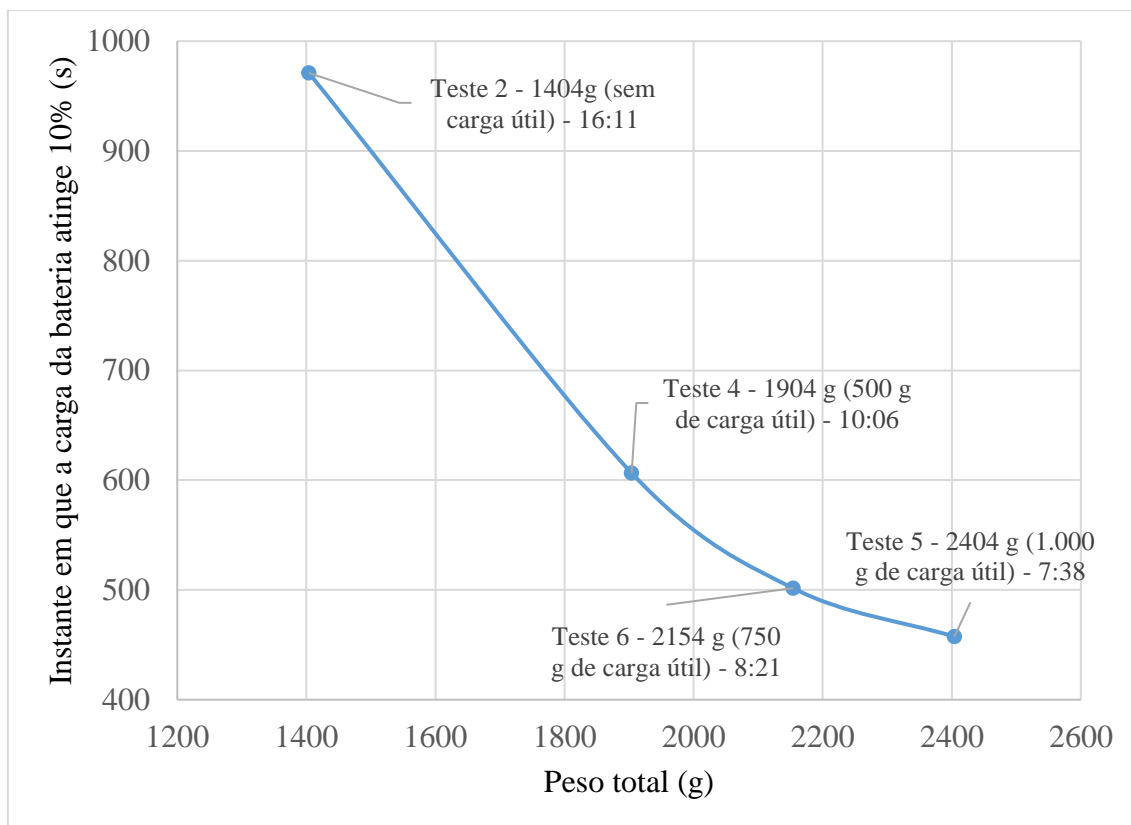


Figura 22: Tempo de voo até restar 10 % de carga elétrica na bateria.

A Figura 22 pode ser analisada em conjunto com a Figura 18, demonstrando que a autonomia de voo (tempo de voo) decai à medida que se embarca maior peso de carga no VANT, aumentando seu peso total. Neste caso há maior demanda de potência pelos motores com o aumento de peso, implicando no aumento da corrente elétrica. Nessa linha a bateria descarrega-se mais rapidamente, implicando em menor autonomia de voo.

Potência elétrica demanda em função do peso da carga

O gráfico da Figura 23 demonstra a potência elétrica total média consumida pelos 4 motores como função do peso total do VANT. Não foi utilizado para confecção desse gráfico o Teste 5 (com 1.000 g de carga útil) tendo em vista que a potência está subdimensionada para este peso, comprovado pelo que se observou no referido teste, onde o VANT por diversas vezes rebateu no solo. Ou seja, para um voo efetivo com 1.000 g de carga útil, seria necessária uma potência superior àquela obtida no Teste 5. A explicação para a falta de potência está detalhada na análise que acompanha a Figura 19.

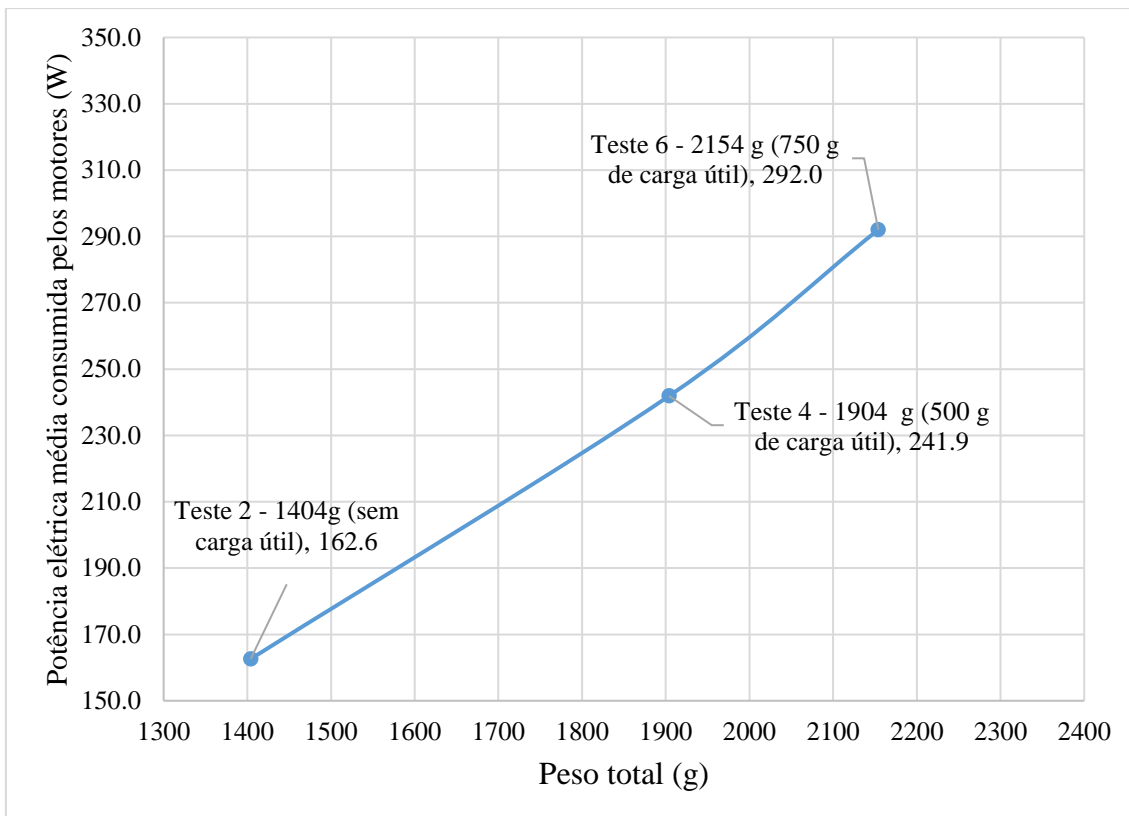


Figura 23: Potência elétrica total media consumida pelos 4 motores durante os testes.

A Figura 23 demonstra o que intuitivamente já era esperado: quanto maior o peso total (VANT + carga), isto é, quanto mais carga se embarcar no VANT, maior a potência elétrica demandada pelos motores. Observa-se, contudo, que esse crescimento é não linear (a potência cresce em razão cada vez maior em relação ao peso total). Por exemplo, de 1.404 g para 1.904 g há um crescimento de peso total de 35,6 % enquanto a potência deve crescer 48,8% (de 162,6 W para 241,9 W).

Para melhor compreender o desempenho do VANT, é necessário entender o desempenho da bateria e o desempenho do motor. Conforme será demonstrado a seguir, ambos estão relacionados com a corrente elétrica e se combinam no desempenho final do veículo.

A partir da resistência interna determinada para a bateria utilizada no VANT do LTC (0,07 Ω), da equação 3 e da equação 6, é possível obter a curva de potência elétrica fornecida aos motores por essa bateria. Da equação 3, tem-se que a potência elétrica útil fornecida pela bateria é dada por:

$$P = \Delta V \cdot I$$

Substituindo ΔV pela equação 6, vem:

$$P = (\varepsilon - r \cdot I) \cdot I$$

$$P = -r \cdot I^2 + \varepsilon \cdot I$$

Substituindo r por $0,07 \Omega$ e lembrando que a *fem* ε é função de estado da carga elétrica da bateria, a equação torna-se:

$$P = -0,07 \cdot I^2 + \varepsilon_{(q)} \cdot I \quad (7)$$

A equação 7 na verdade representa a conservação de energia e pode ser entendida como: a potência útil (P) fornecida pela bateria corresponde a potência da bateria ($\varepsilon \cdot I$) subtraída pela potência dissipada em sua resistência interna ($r \cdot I^2$). A partir da equação 7 é possível traçar a curva de potência elétrica útil (P) fornecida pela bateria em função da corrente elétrica (I) para diferentes valores *fem* da bateria (ε), conforme a Figura 24.

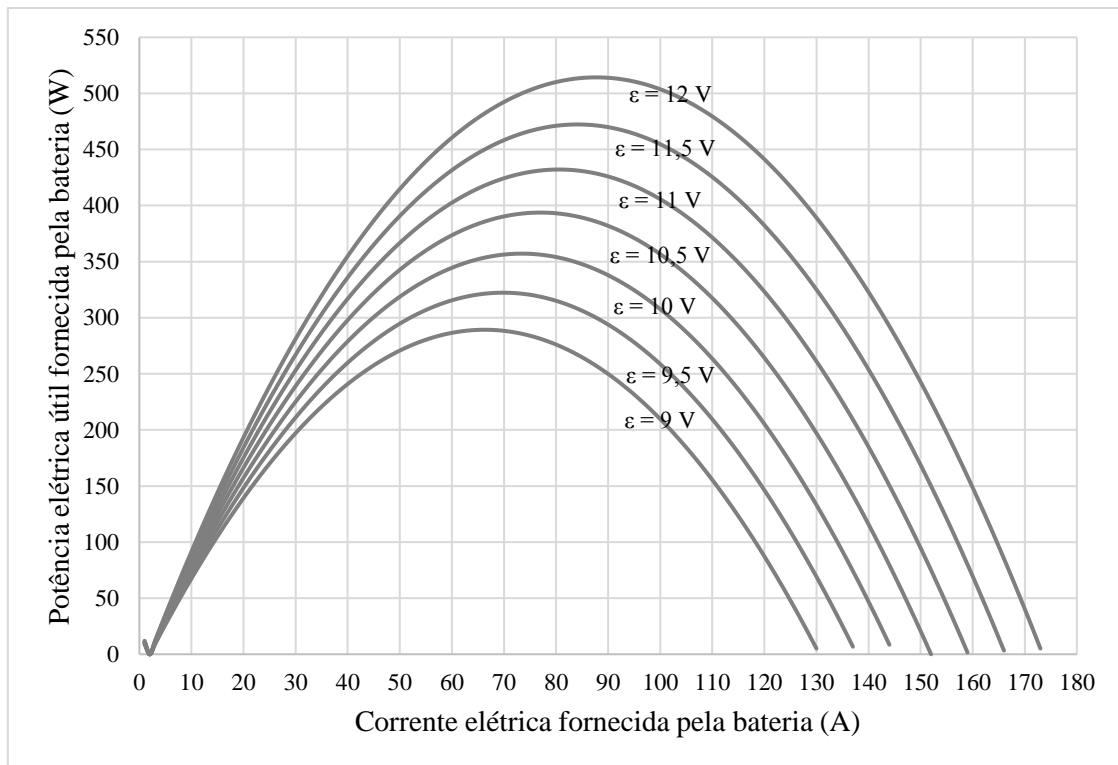


Figura 24: Potência elétrica útil fornecida pela bateria do VANT do LTC em função da corrente elétrica para diferentes níveis de força eletromotriz (ε).

Além da dissipação da energia na própria bateria, ocorre ainda que nem toda potência elétrica útil, que alimenta os motores, é convertida em energia mecânica. Rhydolabz (2013) demonstra a eficiência do motor A2212/13T (razão entre a energia mecânica produzida e a energia elétrica consumida pelo motor) em função da corrente elétrica, conforme sintetizado na Figura 25.

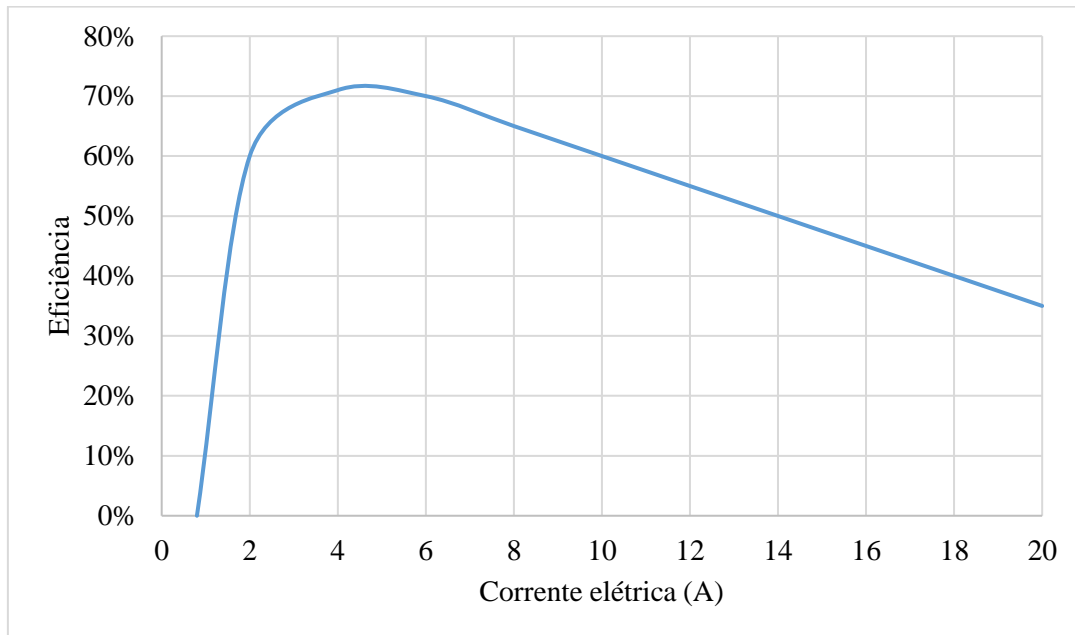


Figura 25: Eficiência do motor A2212/13T em função da corrente elétrica (RHYDOLABZ, 2013).

Combinando-se a Figura 24 com a Figura 25, isto é, multiplicando-se a potência elétrica útil fornecida pela bateria pela eficiência do motor, resulta na potência mecânica do motor em função da corrente elétrica fornecida pela bateria, conforme demonstrado na Figura 26.

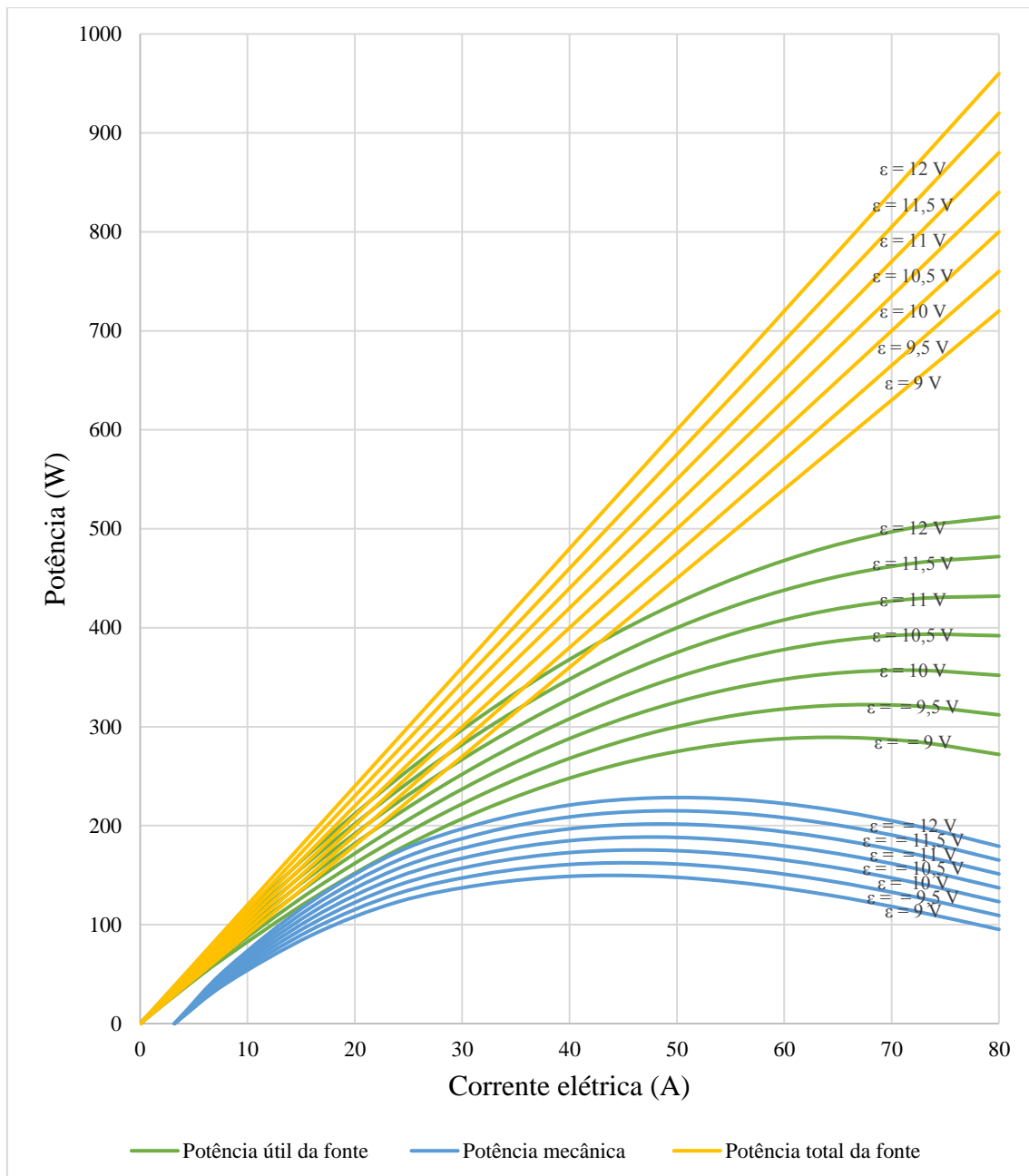


Figura 26: Curvas de potência total da fonte, potência útil da fonte e potência mecânica produzida pelos motores em função da corrente para diferentes níveis de fem da bateria

Observa-se pela *Figura 26* que a potência mecânica máxima dos motores ocorre para uma corrente elétrica da bateria próxima a 40 A. De fato, isto é bastante condizente com as observações realizadas durante o teste com o VANT do LTC. Nos testes com 1.000 g de carga útil (Teste 5) e com 750 g de carga útil (Teste 6), onde foi necessário durante o voo manter o canal de controle de potência praticamente todo aberto, observa-se na *Tabela 13* e na *Tabela 14* que a corrente elétrica durante esses testes ficou entre 30

A e 40 A, o que, conjugado com a curva de potência mecânica da *Figura 26*, corrobora com o entendimento de se tratar da configuração de carga útil limite de veículo.

Relação peso total x potência

O gráfico da *Figura 27* demonstra o comportamento da relação (peso total do VANT)/(potência elétrica útil fornecida pela fonte) em função do peso total.

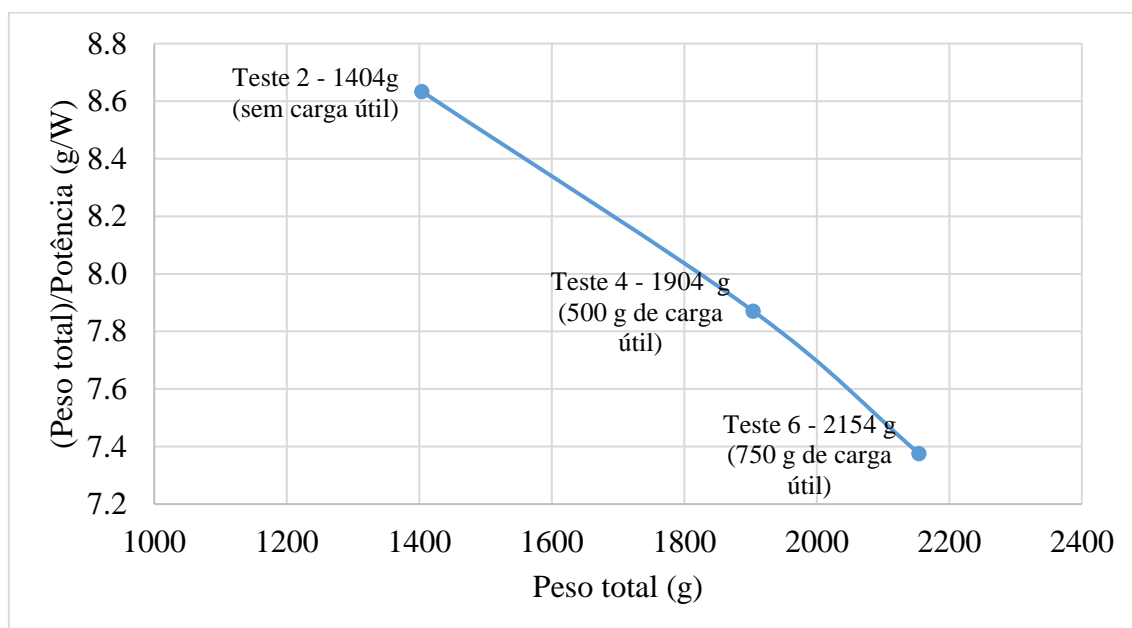


Figura 27: Relação (Peso total) / (Potência).

A *Figura 27* é complementar à *Figura 23* e demonstra que a relação Peso/Potência é decrescente com o aumento do peso, indicando que, quanto menor o peso, mais energeticamente eficiente o VANT é; do contrário, quanto maior o peso, menor eficiência energética (e.g. se o veículo que pesa "x" precisa de uma potência "y", um veículo que pese "2.x" necessitará de uma potência maior que "2.y"). Na prática isso significa por exemplo que uma redução de peso de 10 % no veículo provocaria uma redução de potência maior que 10 %. Tendo em vista que com menor peso a *ddp* fornecida pela bateria é maior (vide *Figura 20*), isso significaria uma redução de corrente elétrica em percentual ainda maior que a redução de potência ($i = P/V$), proporcionando ganho significativamente maior que 10% em autonomia.

Um exemplo concreto da análise anterior é a redução de peso de 1.904 g para 1.404 g (redução de 26,3% no peso). Conforme pode ser visto na *Figura 23* a potência elétrica nesse caso reduziu de 241,9 W para 162,6 W (redução de 32,8% na potência, isto é,

proporcionalmente maior que a redução no peso). A corrente elétrica por sua vez reduziu de 27 A em média para 17 A em média (vide Tabela 11 e Tabela 12) implicando em uma redução de 37 % na corrente elétrica. Como $\Delta t = \Delta q/i$, uma corrente $i' = 0,63.i$ provocou um aumento de autonomia da ordem de 60 % (605 s para 971 s). Em suma, uma redução de 26,3% no peso total aumentou a autonomia em 60 %, o que é bastante significativo. Isso demonstra a necessidade de se buscar materiais mais leves e projetar o VANT o mais enxuto possível, evidentemente dentro de uma ótica de custo-risco-benefício.

Relação peso total x potência

O gráfico da Figura 28 demonstra o comportamento da relação (peso carga útil VANT)/(potência elétrica útil fornecida pela fonte) em função do peso da carga útil.

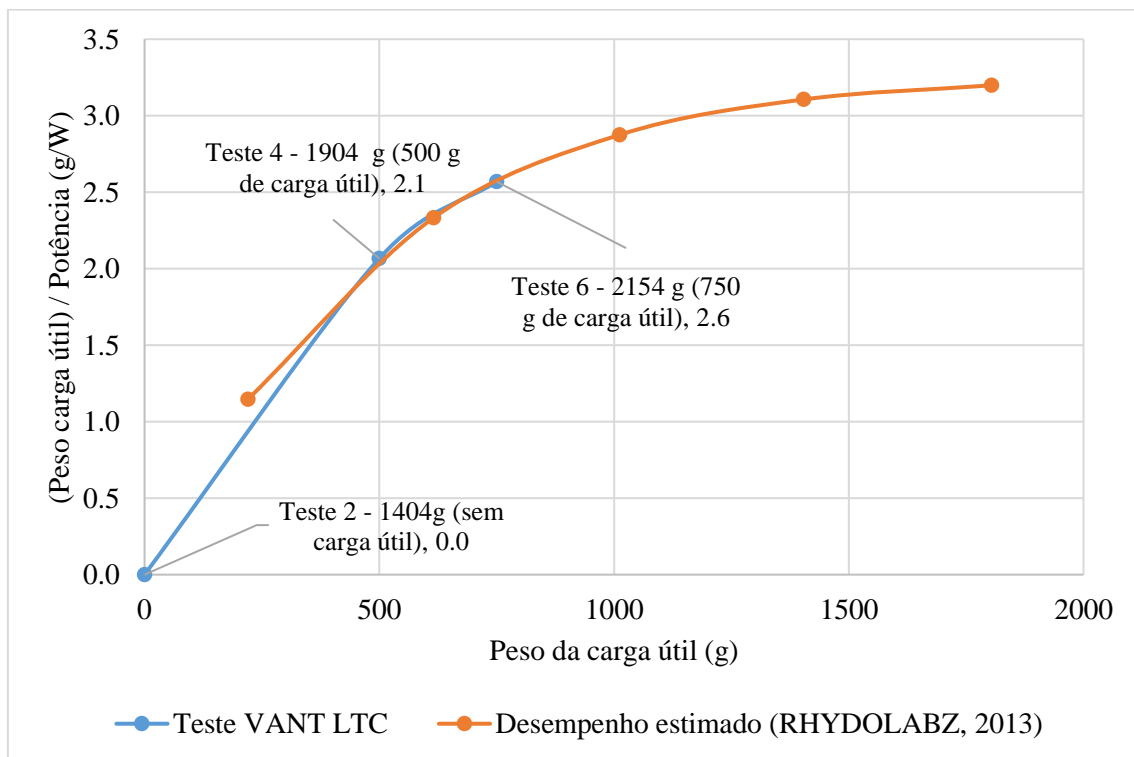


Figura 28: Relação (peso carga útil)/(potência elétrica útil) x peso da carga útil.

A Figura 28 demonstra que, na faixa em que se conseguiu realizar o teste satisfatoriamente (de 0 até 750 g de carga útil), quanto maior o peso, maior a relação (Peso da carga útil) / (Potência elétrica consumida), demonstrando um ganho de eficiência energética com o aumento do peso da carga na faixa testada. Por exemplo, ao se aumentar o peso da carga útil de 500 g para 750 g (50%), há um aumento de apenas 20,7% no

consumo energético (de 241,9 W para 292 W). É importante observar contudo que a segunda derivada dessa curva é negativa, ou seja, embora na faixa em que o teste foi realizado (0 a 1.000 g de carga útil) haja um ganho de eficiência energética com o aumento da carga, haverá uma carga útil em que acima dela haverá perda de eficiência. Essa redução no crescimento da eficiência culminando na própria redução da eficiência é consequência da Figura 27, que demonstra que cada grama adicionado ao veículo exige uma potência proporcionalmente maior.

Utilizando os dados de desempenho de Rhydolabz (2013) do mesmo motor acoplado à uma hélice praticamente idêntica à que foi utilizada (Rhydolabz utiliza 10 x 5 contra 10 x 4,5 do VANT do LTC), conforme Tabela 24 no Apêndice A, foi também estimado na Figura 28 a eficiência energética para cargas úteis superiores a 750 g. Embora ainda se mantenha crescente, fica claro nessa estimativa a redução no crescimento da eficiência energética.

É importante mencionar também que, embora o aumento de carga útil na faixa estudada implique em maior eficiência energética, deve-se conjuntamente observar a Figura 22 de forma a verificar se o VANT tem autonomia para o voo proposto, tendo em vista que, embora a eficiência energética cresça na faixa estudada com o aumento de carga, a autonomia decresce com o aumento de carga.

Relação (empuxo gerado) x (potência elétrica útil consumida) por motor

O gráfico da Figura 29 demonstra a relação entre o empuxo gerado por cada motor e a potência elétrica consumida pelo mesmo para gerar o respectivo empuxo.

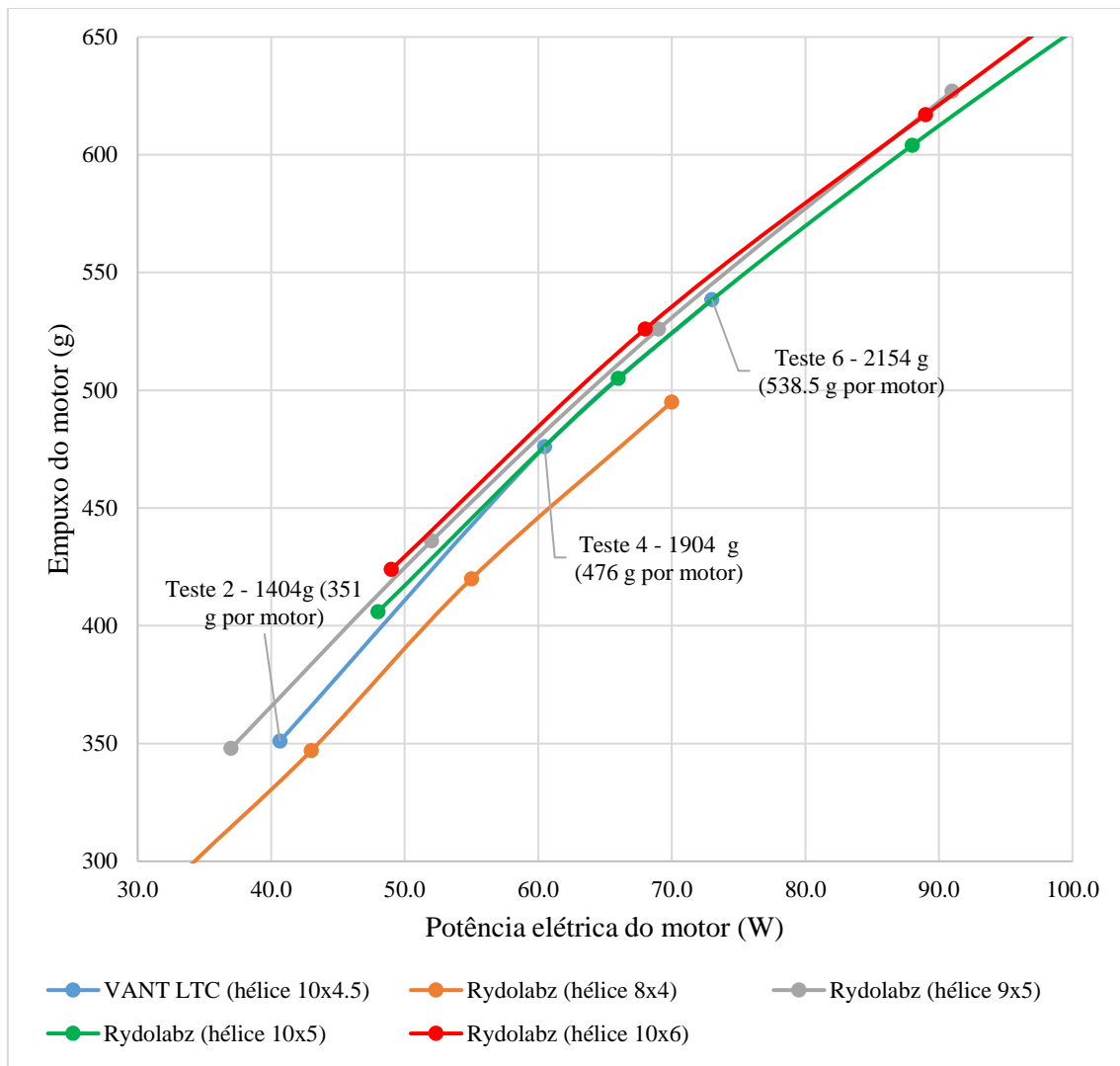


Figura 29: Comparativo entre "Empuxo-Potência" obtido nos testes com o VANT do LTC e os dados de "Empuxo-Potência" para o motor A2212/13T segundo Rydolabz (2013).

O VANT do LTC utiliza o motor *brushless* A2212/13T com hélice 10 x 4,5. Como em voo nivelado o peso deve ser igual ao empuxo, foi inserido no gráfico da Figura 29 os pontos correspondentes aos testes 2 (sem carga útil), 4 (500 g de carga útil) e 6 (750 g de carga útil). As coordenadas desses pontos correspondem a divisão de peso total e potência elétrica média útil registrado durante o teste pelo número de motores, isto é, quatro. Em seguida foi traçada a linha unindo esses pontos, representada na legenda por "VANT LTC (hélice 10x4,5)".

Utilizando os dados do teste de Rydolabz (2013) dispostos no [Apêndice A](#) (Tabela 24), foi inserido também na Figura 29 as coordenadas (empuxo; potência) para diferentes

tipos de hélice e em seguida traçada uma linha unindo os pontos correspondentes à mesma hélice.

É interessante observar que os resultados obtidos na Figura 29 relativos ao desempenho do VANT do LTC foram praticamente idênticos aos dados de desempenho disponibilizados por Rydolabz (2013), corroborando para endossar as medições e análises feitas com o VANT do LTC.

Uma informação importante observada na Figura 29 é que ele sugere que a hélice 10x6 seria mais eficiente na faixa testada que a hélice 10x4,5, isto é, para um dado peso ela demandaria menor potência, com redução de potência entre 2 W e 3 W por motor. Trazendo isso para o VANT quadrimotor do LTC, implicaria na redução de consumo de aproximadamente 10 W. No Teste 4 por exemplo com 500 g de carga útil, onde a potência média foi de 241,9 W, significaria uma economia energética de aproximadamente 4,1%.

4.2 Tempo de viagem

Na seção anterior foi dado enfoque ao desempenho do VANT, particularmente relacionado as características do veículo tais como capacidade de carga útil, consumo energético e autonomia. Outro fator igualmente importante na avaliação de viabilidade de um modo de transporte é o nível de serviço, com especial atenção ao tempo de viagem.

Gudehus e Kotzab (2009) pontuam que um dos parâmetros de desempenho dentro da logística é o *lead time* do pedido, que é definido como o tempo entre a entrada do pedido e o atendimento do mesmo. Assim compreende a soma dos tempos gastos em diversas atividades tais como recebimento e processamento do pedido, preparo/montagem, movimentação etc., conforme aplicável. Portanto, nos serviços cuja entrega faça parte do pedido, o tempo de transporte irá também compor o *lead time* do pedido e assim a redução no tempo de transporte pode significar melhora no desempenho.

Buscou-se nessa seção avaliar os tempos de deslocamento de um VANT e os tempos de deslocamento de uma motocicleta, veículo tipicamente utilizado no Brasil para entrega e coleta de pequenas encomendas dentro da logística urbana (DA SILVA COSTA, 2013). Com a finalidade de se analisar o comportamento desses veículos com respeito a velocidade de deslocamento, foram realizados testes de velocidade com motocicleta e com um VANT.

O objetivo do teste com a motocicleta era medir o tempo de deslocamento da motocicleta em regimes tipicamente urbanos De acordo com Da Silva Costa (2013),

congestionamentos são cada vez mais frequentes nas grandes cidades, o que torna propício o uso de motocicleta na logística urbana devido a sua capacidade de “furar”² os congestionamentos, aumentando a velocidade e minimizando a variabilidade no tempo de deslocamento.

O teste de velocidade com motocicleta foi realizado no perímetro urbano da cidade de Ipatinga-MG, cidade pertencente à região metropolitana do Vale do Aço com população estimada de 261 mil habitantes (IBGE, 2017). Para o teste com VANT foi utilizado o veículo DJI *Phantom 3*, dotado de câmera, GPS e ampla gama de dados de telemetria (altitude, velocidade, distância).

O motivo da utilização de um VANT comercial no teste de velocidade em detrimento da utilização do VANT do LTC, que estava sendo utilizado nos testes até então, se deve à ausência que este tinha de instrumentos capazes de medir posição/velocidade horizontal/vertical, o que inviabilizaria a coleta de dados. Além disso o VANT do LTC não dispõe de pilotagem em primeira pessoa (*first person view*), o que dificultaria o seu controle nos testes de velocidade, já que a medida que o veículo acelera a ganha distância a partir da estação de pilotagem, mais difícil torna sua visualização e controle. Como a instalação de todos esses dispositivos eletrônicos traria custos e uma complicação técnica extra ao projeto (que é de transportes e não de eletrônica), optou-se por um VANT comercial que já dispusesse de tais funcionalidades. Neste contexto, a opção pelo VANT comercial DJI *Phantom 3* se deve à similaridade deste modelo com o VANT do LTC já que ambos são do tipo quadricóptero com motor *brushless* e pesos próximos, sendo 1,4 kg do VANT do LTC contra 1,3 kg do *Phantom 3* (pesos dos veículos sem carga).

4.2.1 Motocicleta

Foi realizado no dia 30 de maio de 2017 no município de Ipatinga-MG um total de 5 viagens de motocicleta, percorrendo vias arterial, coletora e local, nas quais foram registrados os seguintes parâmetros para cada viagem:

² Quando o trânsito encontra-se parado, seja devido a congestionamentos, paradas obrigatórias, semáforos etc., é permitido ao motociclista a passagem entre os veículos que se encontram em filas adjacentes. Tal entendimento encontra respaldo ao se observar as razões do veto presidencial ao Art. 56 do Código de Trânsito Brasileiro. A exposição do veto ao referido artigo encontra-se disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/Mensagem_Veto/anterior_98/Mvpep1056-97.htm>. Acesso em 25 fev. 2018.

- Coordenadas geográficas dos pontos de origem e destino;
- Valor de leitura do hodômetro na origem e destino;
- Tempo de viagem

Cada viagem foi realizada em velocidade o mais próximo possível dos limites legais das vias, que variavam entre 40 km/h e 60 km/h. A postura assumida nas viagens era que todas as leis de trânsito deveriam ser respeitadas.

A Tabela 17 apresenta os dados e resultados de cada uma das 5 viagens. O [Apêndice B](#) apresenta os mapas com as rotas percorridas em cada uma dessas 5 viagens, incluindo a distâncias rodoviárias e aéreas (distância horizontal em linha reta entre origem e destino).

Tabela 17: Testes de velocidade com motocicleta realizados na cidade de Ipatinga-MG

Viagem	Origem	Destino	Hod. org (km)	Hod. Dest (km)	Dist. Rod. (m)	Tempo (s)	Velocidade média (m/s)	Dist. Aérea (m)
1	19°28'20.1"S 42°32'39.9"W	19°27'53.1"S 42°33'55.6"W	83.1	86.1	3000	392	7.7	2330
2	19°27'53.1"S 42°33'55.6"W	19°28'29.5"S 42°32'56.9"W	86.1	88.4	2300	286	8.0	2050
3	19°28'29.5"S 42°32'56.9"W	19°28'44.9"S 42°32'41.4"W	88.4	89.1	700	99	7.1	653
4	19°28'44.9"S 42°32'41.4"W	19°28'27.5"S 42°32'54.7"W	89.1	89.9	800	148	5.4	667
5	19°28'27.5"S 42°32'54.7"W	19°28'20.1"S 42°32'39.9"W	89.9	90.5	650	132	4.9	486
TOTAL					7450	1057	7.0	6187

CET (2017) faz um estudo sobre a velocidade média do trânsito na cidade de São Paulo. De acordo com a metodologia do estudo, pesquisadores percorrem a cidade com automóvel, registrando-se o tempo e suas posições com uso de GPS. São registrados também os tempos de retardamento, constituídos pelos tempos de retardamento semafórico (tempo em que o veículo fica parado aguardando abertura do sinal) e de congestionamento (tempo durante o qual o veículo está parado ou se deslocando com velocidade inferior a 4 km/h). A Tabela 18 sintetiza os dados sobre a velocidade média na cidade de São Paulo.

Tabela 18: Velocidade média do tráfego na cidade de São Paulo (CET, 2017)

Período	Velocidade média	Retardamento Semafórico ⁽²⁾	Retardamento Congestionamento ⁽³⁾	Retardamento Total ⁽¹⁾
Manha	25,5 km/h	17%	8%	25%
Tarde	20 km/h	17%	14%	31%

1 (Tempo com velocidade menor ou igual a 4 km/h)/(Tempo total)

2 (Tempo parado no semáforo vermelho)/(Tempo total)

3 Calculado como (1) – (2)

Se considerar a capacidade da motocicleta de “furar” os congestionamentos, conforme apontado por Da Silva Costa (2013), pode-se estimar a velocidade média do tráfego de motocicletas utilizando as velocidades médias da Tabela 18 e desconsiderando o retardamento devido ao congestionamento, o que resulta em 27,7 km/h no período da manhã e 23,3 km/h no período da tarde. Tais números, portanto, corroboram com a validade da amostra da Tabela 17, onde a velocidade média foi de 7,0 m/s, isto é, 25,2 km/h.

4.2.2 VANT

Com o objetivo de se avaliar o desempenho de um VANT com respeito a velocidade (o que implica no tempo de percurso entre origem e destino), optou-se por utilizar, conforme já mencionado, a aeronave *DJI Phantom 3 Standard* (Figura 30), veículo de fabricação chinesa, amplamente vendido nos varejistas brasileiros e com características similares ao VANT do LTC, conforme demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19: Comparativo entre os VANT *Phantom 3* x Protótipo do LTC (DJI, 2015).

	<i>Phantom 3</i>	Protótipo LTC
Tipo de veículo	Quadricóptero	Quadricóptero
Motor	Brushless	Brushless
Peso Vazio	1.280 g	1.404 g
Hélice (diâmetro x passo)	9,4 x 5 pol	10 x 4,5 pol
Bateria - capacidade energia	245,1 kJ	205,2 kJ



Figura 30: DJI *Phantom 3 Standard* em voo.

A Tabela 20 sintetiza os principais dados técnicos de voo do *Phantom 3* segundo o fabricante.

Tabela 20: Dados técnicos do fabricante do *Phantom 3* (DJI, 2015)

Parâmetro	Valor
Peso total	1.280 g
Vel. max. ascensão	5 m/s
Vel. max. descensão	3 m/s
Velocidade máxima	16 m/s
Autonomia	23 min
Altitude máxima	6.000 m
Distância máxima controle	2.000 m

A vantagem de se utilizar um veículo como o DJI *Phantom 3* é que o mesmo conta com câmera com “gimbal”, sistema de telemetria com posicionamento e velocidade (*GPS*) e altitude (barômetro), com transmissão em tempo real de vídeo e dos dados de telemetria para um dispositivo móvel, permitindo obter com precisão as informações sobre a movimentação da aeronave. A Figura 31 é uma foto realizada durante os testes em voo com o *Phantom 3* e mostram os dados de voo e navegação sendo transmitidos para um dispositivo móvel. O fabricante disponibiliza o aplicativo, disponível para os principais sistemas operacionais.



Figura 31: Dados de telemetria enviados pelo *Phantom 3* podem ser reproduzidos e visualizados em um dispositivo móvel.

Com as imagens e as informações em tempo real, torna-se possível operar o *Phantom 3* a maiores distâncias já que o veículo pode ser pilotado através das imagens geradas por sua câmera (*First Person View*) e com as informações da telemetria, todas transmitidas ao piloto. No caso do VANT do LTC, por não dispor de tais sistemas, sua pilotagem se dava pela observação direta do piloto ao veículo, tornando-se difícil operá-lo a distâncias com ordem de grandeza maiores que 100 m. A Figura 32 é um instantâneo da transmissão feita pelo *Phantom 3* durante os testes diretamente na tela do dispositivo móvel. A tela pode ser alternada entre as imagens da câmera e a navegação do veículo sobre o mapa, bastando tocar o canto inferior esquerdo da tela. Na parte superior e inferior da tela estão as informações de telemetria: carga da bateria, altura, distância horizontal, velocidade vertical e velocidade horizontal.



Figura 32: Tela do dispositivo móvel acoplado ao controle durante teste com o *Phantom 3*.

Os testes com o *Phantom 3* foram realizados no dia 31 de maio 2017 e tinham por objetivo avaliar a velocidade e aceleração máxima do veículo, tanto no deslocamento horizontal (aceleração e desaceleração) quanto no deslocamento vertical (decolagem e pouso). O aplicativo disponibilizado pelo fabricante do *Phantom 3* permite ainda a gravação em vídeo da tela exibida na Figura 31. Inclusive a Figura 32 nada mais é que um *frame* da gravação em vídeo realizada durante os testes. Desta forma, por meio da gravação em vídeo, ficaram registrados todos os parâmetros da telemetria exibidos na Figura 32.

Decolagem – 0 a 100 m

O primeiro teste com o *Phantom 3* foi o de decolagem e ascensão na vertical. O objetivo do teste era avaliar o desempenho do veículo durante a decolagem. O teste consistiu em acionar os motores do veículo e elevá-lo a altura de 100 m em potência máxima. A Figura 33 sintetiza em formato gráfico os dados registrados em vídeo pela telemetria do veículo com respeito à altura e velocidade vertical em função do instante do voo.

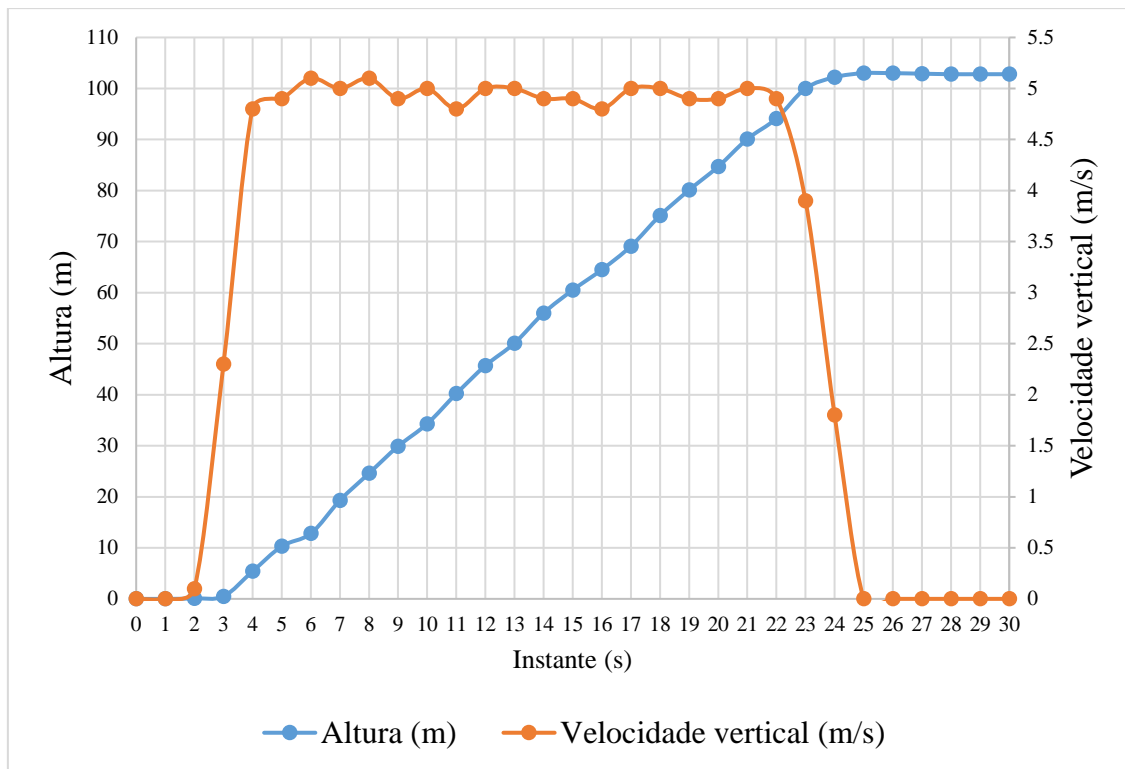


Figura 33: Decolagem vertical com o *Phantom 3* até 100 m.

O instante 0 s na Figura 33 representa o momento em que é dado o comando de acionamento dos motores do veículo. Observa-se que, entre o comando de acionamento dos motores e a decolagem do veículo, leva-se aproximadamente 2 segundos (instante 0 s a 2 s). Além disso observa-se também na Figura 33 que, após decolar, o veículo leva aproximadamente 2 segundos (entre os instantes 2 s e 4s) acelerando até alcançar sua velocidade máxima de ascensão, próxima a 5 m/s. A velocidade em regime permanente na ascensão (entre os instantes 6 s e 21 s) ficou entre 4,8 e 5,1 m/s, valores muito próximos aos 5 m/s declarados pelo fabricante (vide Tabela 20).

Pouso – 100 m a 0

O segundo teste com o *Phantom 3* foi o de descida na vertical finalizando com o pouso. O objetivo do teste era avaliar o desempenho do veículo da direção vertical em sentido descendente. O teste consistiu em descer com o veículo a partir de uma altura de 100 m, finalizando com o pouso. A Figura 34 sintetiza em formato gráfico os dados registrados em vídeo pela telemetria do veículo com respeito à altura e velocidade vertical em função do instante do voo.

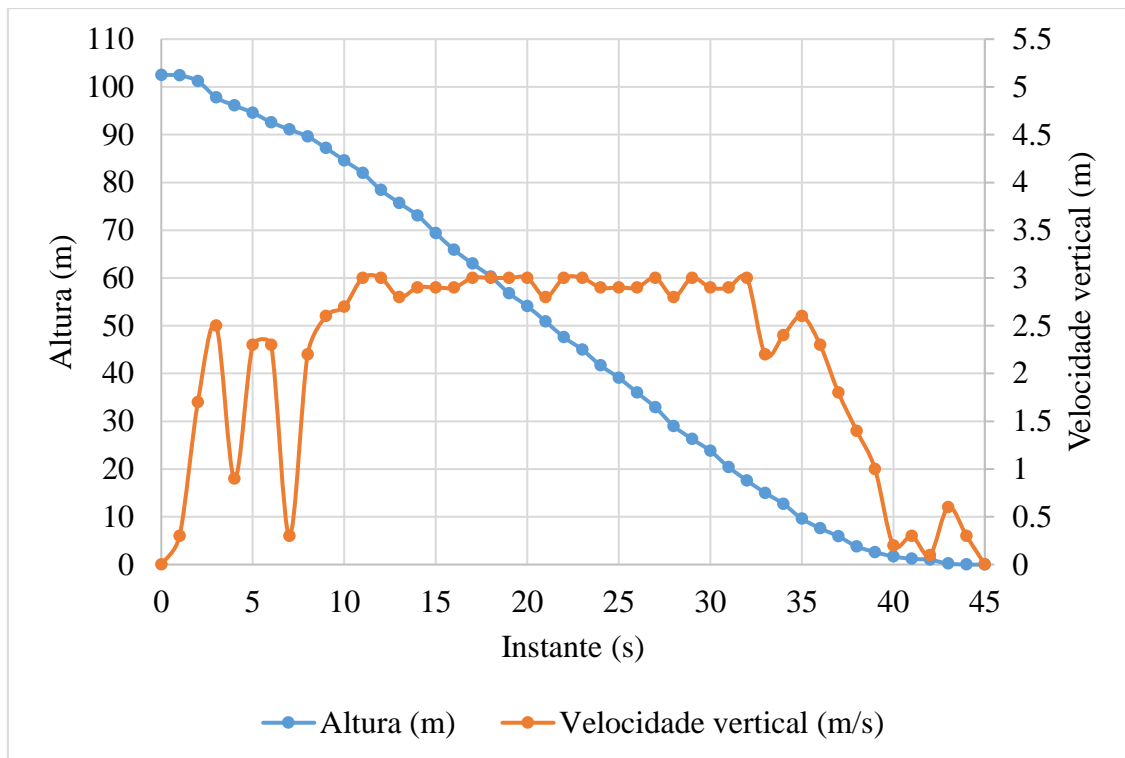


Figura 34: Pouso vertical com o *Phantom 3* a partir de uma altura de 100 m.

O instante 0 s na Figura 34 representa o momento em que o VANT encontra-se a 102,5 m de altura e é dado o comando de descida em velocidade máxima. Observa-se que entre o comando de descida e o veículo efetivamente começar a perder altura leva-se aproximadamente 2 segundos (instante 0 s a 2 s). Além disso observa-se também na Figura 34 que, após ser comandada a descida, o veículo leva aproximadamente 10 segundos em regime transiente (entre os instantes 0 s e 10 s) para estabilizar sua velocidade vertical de descida, próxima a 3 m/s. A velocidade em regime permanente na descida (entre os instantes 11 s e 32 s) ficou entre 2,8 e 3,1 m/s, valores muito próximos aos 3 m/s declarados pelo fabricante (vide Tabela 20).

Deslocamento horizontal

O terceiro teste com o *Phantom 3* foi o de deslocamento horizontal em voo nivelado. O objetivo do teste era avaliar o desempenho do veículo em voo de cruzeiro. Previamente ao início do teste o veículo foi elevado a uma altura de 50 m. O teste consistiu em deslocar o veículo por 400 m na horizontal, mantendo sua altitude. A Figura 34 sintetiza em formato gráfico os dados registrados em vídeo pela telemetria do veículo com respeito à altura e velocidade vertical em função do instante do voo.

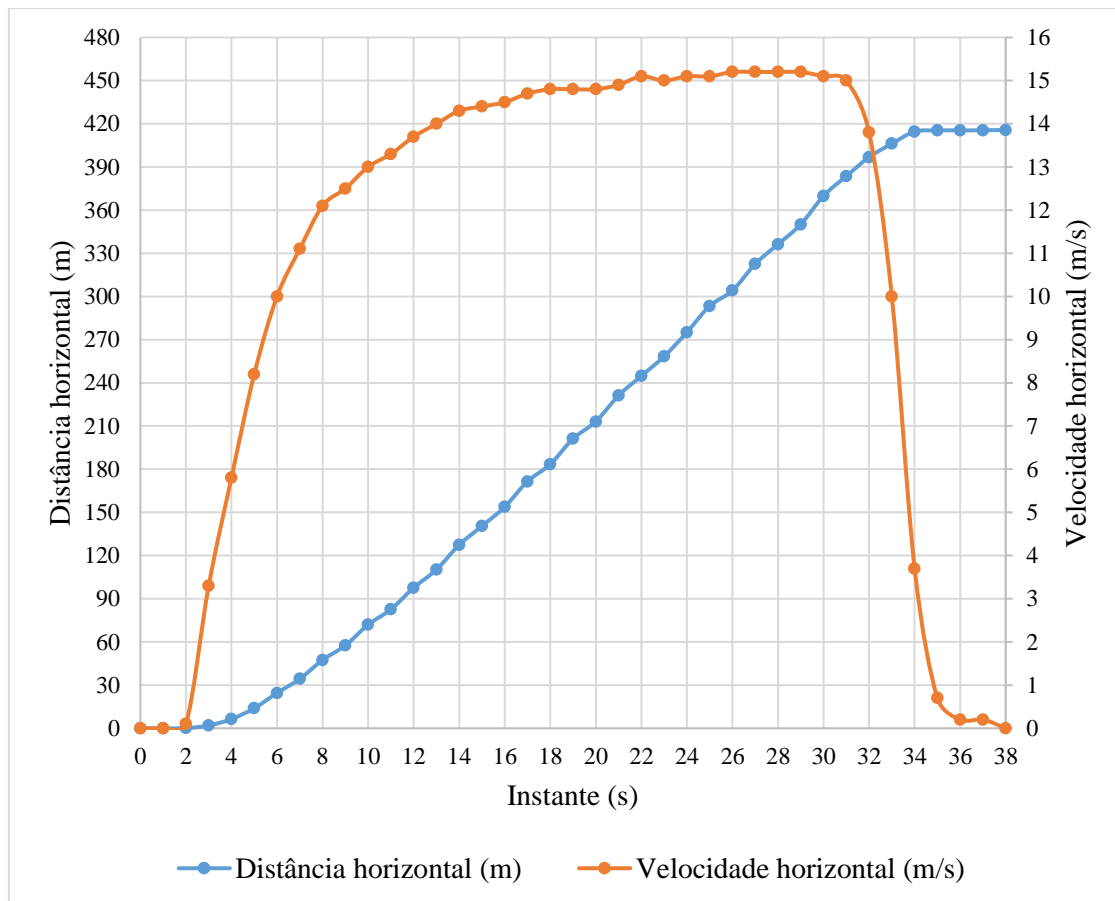


Figura 35: Deslocamento horizontal do *Phantom 3* em voo nivelado.

O instante 0 s na Figura 35 representa o momento em que o VANT encontra-se pairado, nivelado a 50 m de altura em relação a superfície de onde decolou (e encontra-se o piloto) e é dado o comando de deslocamento horizontal em voo nivelado em potência máxima. Aqui cabe observar que o *Phantom 3* dispõem de um sistema de controle onde o piloto configura previamente a altura do voo (em relação ao ponto de decolagem) e o veículo mantém essa altitude durante o deslocamento horizontal.

Nota-se que entre o comando de potência e o veículo efetivamente começar a deslocar horizontalmente leva-se aproximadamente 2 segundos (instante 0 s a 2 s). Além disso observa-se também na Figura 35 que, após ser comandado o deslocamento horizontal, o veículo leva aproximadamente 22 segundos em regime transiente (entre os instantes 0 s e 22 s) para estabilizar sua velocidade horizontal, próxima a 15 m/s. Contudo verifica-se também que o veículo leva apenas 12 s (instante 0 s a 12 s) para alcançar 90 % da sua velocidade máxima. A velocidade em regime permanente na horizontal (entre os instantes 22 s e 30 s) ficou entre 15,0 m/s e 15,2 m/s, valores muito próximos aos 15 m/s declarados pelo fabricante (vide Tabela 20).

Com respeito a frenagem no seu deslocamento horizontal, o *Phantom 3* foi capaz de reduzir sua velocidade horizontal de 15 m/s até a parada em praticamente 5 s (entre os instantes 31 s e 36 s).

Neste capítulo, por meio de um estudo de caso, foi abordado os aspectos dinâmicos (com ênfase em energia) do voo de um VANT e também os aspectos cinemáticos do movimento do VANT e da motocicleta. No capítulo seguinte esses aspectos serão abordados comparativamente entre o VANT e a motocicleta de forma a se observar algumas das vantagens/desvantagens de cada um desses veículos.

5 COMPARATIVO VANT X MOTOCICLETA

A partir dos dados de desempenho dos testes feitos com o *Phantom 3*, esta seção busca analisar o desempenho do VANT caso tivesse que visitar os mesmos pontos do teste realizado com motocicleta (Seção 4.2.1).

Como pode-se observar nos mapas contidos no [Apêndice B](#), o VANT apresenta uma vantagem inicial com respeito ao deslocamento feito por motocicleta: enquanto esta deve seguir as direções e sentido das vias (que nem sempre estão na direção e sentido do destino), aquele pode tomar uma reta na direção e sentido origem-destino (desde que esteja na altitude mínima adequada). Isso é uma das vantagens do transporte aéreo em relação ao transporte rodoviário.

Neste comparativo a premissa é que o VANT realize as mesmas viagens que constam na Tabela 17, visitando os mesmos pontos inclusive na mesma ordem. O VANT fará uma trajetória retilínea entre a origem e o destino mantendo sempre uma altura de 100 m em relação ao ponto de decolagem. Por questões de simplificação, será considerado que origem e destino possuem a mesma altitude e que a altura de 100 m seja suficiente para transpor os obstáculos. Os pousos e decolagens ocorrerão sempre na direção vertical. A respeito da decolagem, voo de cruzeiro e pouso, será considerado que o veículo os executa em velocidade constante e iguais a 70 % do máximo obtidos nos testes constantes nas Figura 33, Figura 35 e Figura 34, que foram: 5, 1 m/s, 15,2 m/s e 3,1 m/s, respectivamente. A Figura 36 ilustra o esquema do voo com as premissas assumidas.

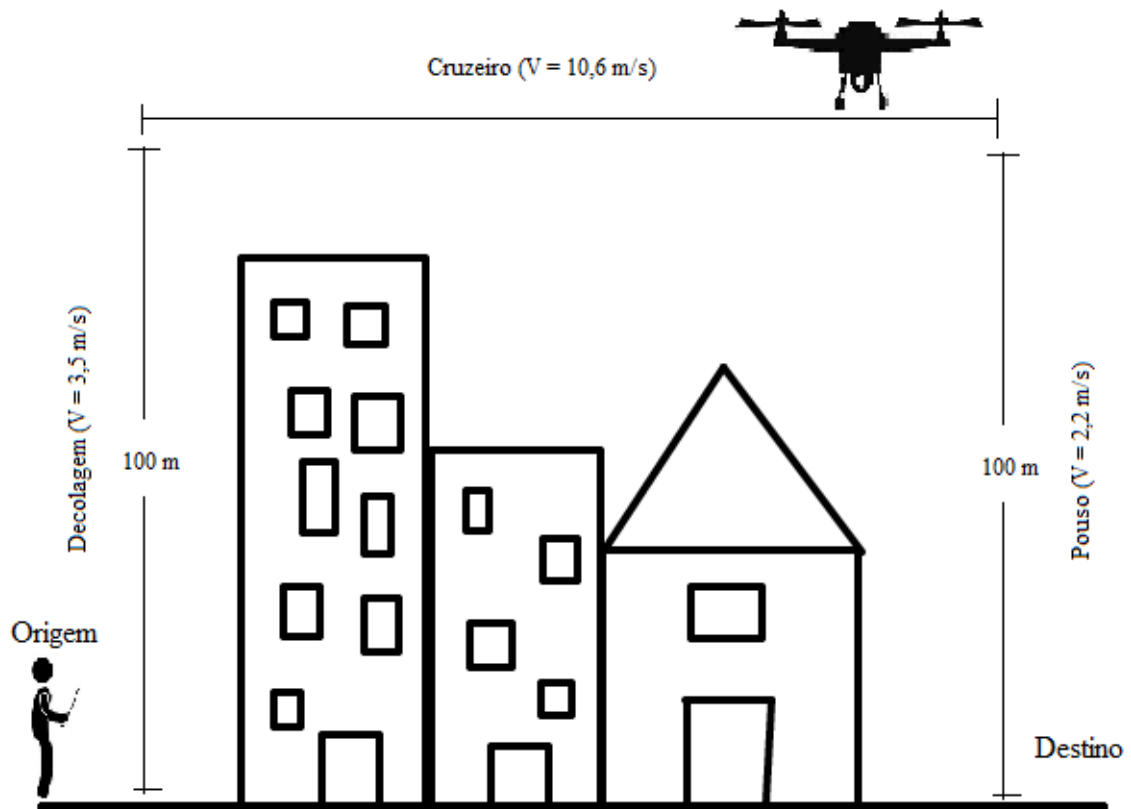


Figura 36: Esquema de voo do VANT.

5.1 Tempo de viagem

Na linha da Figura 36, o VANT levaria $100/3,5 = 28 \text{ s}$ para decolar e atingir seu nível de cruzeiro. O pouso por sua vez demandaria $100/2,2 = 45 \text{ s}$. Portanto neste cenário seriam consumidos $28 + 45 = 73 \text{ s}$ com a operação de pouso e decolagem. A esse tempo deve-se ainda somar o tempo de voo de cruzeiro, que será função da distância horizontal entre origem e destino, resultando no tempo total de voo. Utilizando os dados e as viagens de motocicleta descritas na Tabela 17 e as condições de voo descritas acima, é possível comparar essas viagens utilizando um modo ou outro, conforme sumarizado na Tabela 21.

Tabela 21: Comparativo tempo de deslocamento motocicleta x VANT

Viagem	Motocicleta		VANT			
	Dist. Rod. (m)	Tempo (s)	Dist. Aérea (m)	Tempo voo cruzeiro (s)	Tempo pouso e decolagem (s)	Tempo total de voo (s)
1	3000	392	2330	220	73	293
2	2300	286	2050	193	73	266
3	700	99	653	62	73	135
4	800	148	667	63	73	136
5	650	132	486	46	73	119
TOTAL	7450	1057	6187	584	365	949

Ao se analisar a Tabela 21 juntamente com a Tabela 17, é possível observar alguns pontos interessantes na comparação entre o VANT e a motocicleta.

O primeiro ponto é com respeito a previsibilidade no tempo de deslocamento. No caso da motocicleta observa-se que a velocidade média variou entre 4,9 m/s e 8,0 m/s nas viagens. De fato, há uma série de fatores que influem na velocidade média do tráfego rodoviário: velocidade máxima da via, condições da via (qualidade do pavimento), traçado, sinalizações (semáforos, paradas obrigatórias etc.), volume do tráfego etc. Portanto a velocidade média no deslocamento rodoviário é variável, a depender destes fatores elencados. Por outro lado, a velocidade média do VANT está sujeita a menos fatores, implicando em maior previsibilidade com respeito ao tempo de viagem.

Outro ponto interessante a ser observado é que o tempo de viagem do VANT tornou-se mais atrativo para distâncias maiores. O que ocorre é que, no modelo proposto na Figura 36, o VANT utiliza um tempo fixo de 73 s somente com a operação de pouso e decolagem, onde não há deslocamento horizontal. Assim, quanto maior o deslocamento, menor a proporção do tempo fixo de pouso/decolagem em relação ao tempo de voo de cruzeiro.

Se considerar a velocidade média da motocicleta como 7 m/s (que foi a velocidade global média estabelecida nas viagens da Tabela 17), se considerar que a relação média entre a distância aérea e a distância rodoviária é de 83 % (6.187 m / 7.450 m conforme Tabela 21), e considerando ainda que o voo do VANT ocorra conforme a Figura 36, é possível a partir de uma dada distância rodoviária entre dois pontos calcular o tempo médio gasto pela motocicleta e pelo VANT para se deslocar entre esses dois pontos. Tomando-se uma série de distância rodoviárias é possível inclusive obter um gráfico demonstrando esta relação, conforme a Figura 37.

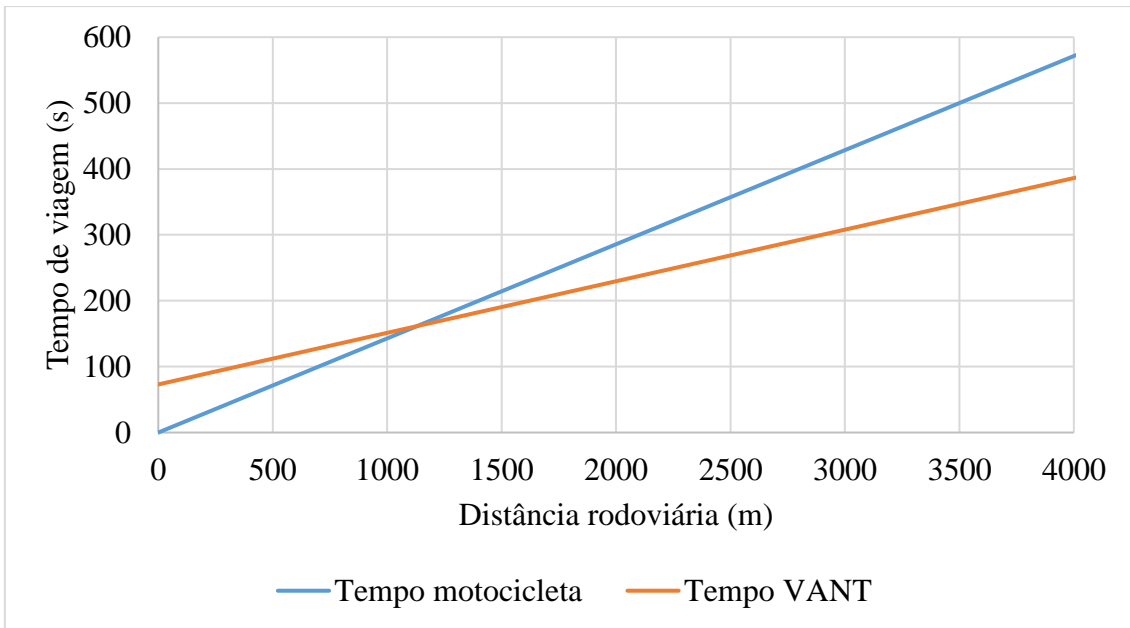


Figura 37: Tempo estimado de viagem em função da distância rodoviária.

Observa-se pela Figura 37 que, embora a duração da viagem do VANT seja maior que a motocicleta para curtas distâncias (devido a operação de pouso e decolagem), o aumento do tempo de viagem do VANT cresce proporcionalmente menor que o da motocicleta à medida que se aumenta a distância. Na Figura 37 os tempos se igualam para uma distância rodoviária de 1.130 m (161 s), distância a partir da qual o VANT gastaria menor tempo para realizar a viagem.

Embora a Figura 37 induza a ideia da vantagem do VANT com respeito ao tempo de viagem para distâncias superiores a 1.130 m, é importante considerar as premissas assumidas para a construção desse gráfico. Alterações nessas premissas implicam na sua alteração. Além disso é importante observar também as limitações de raio de alcance do controle, capacidade de carga e de autonomia do VANT. Por exemplo, no caso do *Phantom 3* o fabricante aponta que o raio de alcance do controle é de 4 km, sem obstáculo (DJI, 2015). Uma alternativa, contudo, é o controle por meio de satélites, uso de antenas repetidoras ou a navegação autônoma do VANT com as coordenadas do ponto de destino. O recurso de coordenadas já é utilizado pelo *Phantom 3* para o caso de perda de sinal do controle, onde o VANT retorna de forma autônoma para o ponto de origem de onde decolou.

No tocante a autonomia, os testes com o VANT do LTC indicaram entre 600 s a 1.000 s de voo, a depender do peso da carga útil (entre 0 g a 500 g de carga útil), conforme Figura 22. Isso permitiria ao VANT realizar viagens cujas distâncias rodoviárias entre

origem e destino variam entre 7 e 12 km. Se considerar que o VANT deve ter autonomia para retornar a origem, o raio de alcance fica entre 3 km a 5,5 km, dependendo da carga.

5.2 Consumo energético e custo energético

D'Agosto (2015) apresenta o consumo específico de energia (em kJ/t.km) para alguns veículos de diferentes modos de transportes, conforme reproduzido na Tabela 22.

Tabela 22: Consumo de energia por tipo de transporte de carga (D'Agosto, 2015 pg. 67)

Tipo de transporte	t/veículo	kJ/t.km
Furgão com MCI a gasolina	1,5	2.712
Caminhão leve com MCI a diesel	3,5	1.825
Caminhão médio com MCI a diesel	7,5	1.612
Caminhão pesado com MCI a diesel	12	1.277
Caminhão trator + semirreboque com MCI a diesel	26	847
Trem de carga a diesel	7.500	246
Comboio hidroviário interior com rebocador a diesel	6.600	370
Navio petroleiro	300.000	66
Avião de carga	20	6.900
Oleoduto		123

De acordo com o apontamento da Tabela 22, o consumo específico de energia do modo aéreo (representado pelo avião de carga) seria consideravelmente superior ao do modo rodoviário (representado pelo furgão e pelos caminhões). A dúvida que surge é se essa relação de consumo energético de modo aéreo *versus* rodoviário também se manteria quando representado pelo VANT quadricóptero testado *versus* a motocicleta.

Como a capacidade de carga do VANT quadricóptero estudado é da ordem de 500 g e a capacidade de carga da motocicleta é de algumas dezenas de quilogramas, a comparação pode ser tratada em duas abordagens distintas. A primeira considerando o gasto energético de ambos para o transporte de carga de até 500 g. A segunda analisando o consumo específico de energia para uma carga de cuja massa seja da ordem de grandeza da capacidade do veículo, a exemplo do que é apresentado na Tabela 22. As duas abordagens serão tratadas na sequência

- Abordagem 1: motocicleta e VANT transportando carga de 0 até 500 g

O autor possui uma motocicleta Honda CG Titan 150 cc. Segundo a ABRACICLO (2017) as motocicletas com capacidade volumétrica do motor entre 51 cm³ a 160 m³ são classificadas como de baixa cilindrada e responderam por 83 % das vendas de motocicletas no Brasil em 2016. Trata-se, portanto, do segmento líder em vendas no Brasil e amplamente utilizada para entregas e coletas urbanas. O autor realizou uma série de registros de abastecimento do seu veículo, os quais encontram-se detalhados no [Apêndice C](#) (Tabela 25). Observa-se na Tabela 25 que o consumo médio de combustível da motocicleta, sempre abastecida com gasolina C, é de 43 km/l. Uma carga entre 0 e 500 g representa um peso praticamente desprezível quando comparado ao peso da motocicleta, cujo peso seco é 118 kg (HONDA, 2014), somado ainda ao peso do combustível, fluidos e condutor, o que resulta em um peso total de aproximadamente 200 kg. Diante de um peso total de 200 kg, ao adicionar uma carga entre 0 e 500 g, pode-se, portanto, considerar irrelevante a variação no consumo de combustível da motocicleta e considerar que o mesmo se manterá como 43 km/l.

De acordo com a ANP (2017a), a densidade da gasolina C é 754,25 kg/m³ e seu poder calorífico é 9.400 kcal/kg. Assim, em termos de volume, o poder calorífico da gasolina C é 7.089,95 kcal/l, isto é, 29.664,35 kJ/l. Considerando que motocicleta percorra 43 km com 1 litro de gasolina C, o consumo energético será de 689,9 kJ/km.

Por outro lado, considerando que a relação entre a distância aérea e a distância rodoviária seja de 0,83, tal como verificado na Tabela 21, que o voo do VANT ocorra tal como esquematizado na Figura 36 e ainda que o consumo energético do VANT ocorra em função do peso da carga útil tal como na Figura 23, é possível relacionar o consumo energético da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária, conforme apresentado na Figura 38. Como há uma diferença significativa de ordem de grandeza entre o consumo energético da motocicleta e do VANT (em kJ/km), optou-se por utilizar uma escala logarítmica no eixo das ordenadas, o qual representa o consumo energético.

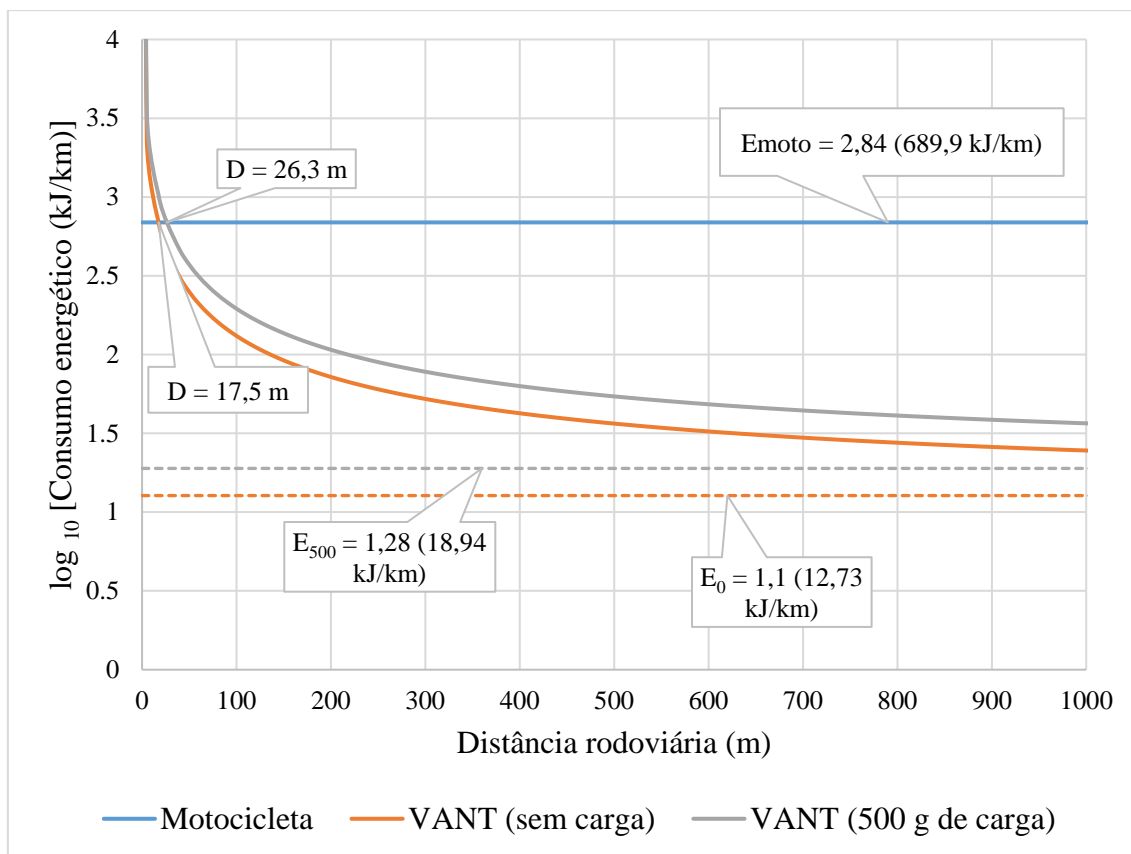


Figura 38: Consumo de energia da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária entre origem e destino para uma viagem com carga útil entre 0 e 500 g.

Observa-se na Figura 38 que o consumo energético da motocicleta para uma carga entre 0 e 500 g é considerado constante e igual a 689,9 kJ/km, conforme hipótese feita pelo autor que não há variação significativa de consumo para esta carga. O consumo específico do VANT por sua vez varia tanto em relação ao peso da carga útil transportada quanto a distância rodoviária entre a origem e destino. Esses dois fatores serão melhor explorados a seguir.

A aumento no consumo específico do VANT em relação ao peso da carga transportada é intuitivo e é uma consequência direta da Figura 23, que mostra que, quanto maior o peso da carga útil, maior a potência demandada pelos motores.

Quanto a variação do consumo específico do VANT com respeito à distância, observa-se na Figura 38 que, para uma dada carga útil, quanto maior a distância, menor o consumo específico. Isso é consequência do modelo de navegação proposto na Figura 36, no qual o VANT decola e pousa na vertical. Nesse sentido há um consumo energético fixo para a operação de pouso e decolagem, sem que o VANT percorra nenhuma distância horizontal. Como consequência, para distâncias horizontais tendendo a 0, o consumo

específico tenderia ao infinito. Por outro lado, quanto maior a distância, mais “diluído” torna-se esse custo energético fixo com as operações de pouso e decolagem, explicando o decréscimo do consumo específico do VANT em função da distância.

Observa-se ainda na Figura 38 que, sem carga útil, o consumo energético do VANT é igual ao da motocicleta (689,9 kJ/km) para uma viagem cuja distância rodoviária entre origem e destino seja de apenas 17,5 m. Com uma carga de 500 g, esse consumo energético se iguala em uma distância de 26,3 m. Para uma viagem cuja distância rodoviária seja de 1.000 m, o consumo energético do VANT sem carga é de 24,6 kJ/km, enquanto que com 500 g de carga útil é de 36,6 kJ/km, isto é, em ambas as situações bastante inferior ao consumo energético da motocicleta (689,9 kJ/km). A medida que se aumenta a distância, o consumo energético do VANT se reduz ainda mais e para uma carga de 0 g tende a 12,73 kJ/km enquanto que para uma carga de 500 g tende a 18,94 kJ/km.

É possível ainda elaborar um gráfico semelhante ao da Figura 38, porém relacionando o custo específico da energia (R\$/km) em função da distância rodoviária. De acordo com a ANP (2017b) o preço médio da gasolina praticado na cidade do Rio de Janeiro na semana de 22/10/2017 a 28/10/2017 foi de R\$ 4,204 por litro. Considerando o consumo da motocicleta de 43 km/l, resulta assim em um custo de combustível de 0,098 R\$/km. O VANT por sua vez utiliza energia elétrica. De acordo com a Light (2017) a tarifa de energia elétrica de baixa tensão praticada na cidade do Rio de Janeiro é 0,66145 R\$/kW.h (incluindo impostos) para um consumo entre 51 a 300 kW.h/mês. Considerando esse valor tarifário, isso representa 0,000184 R\$/kJ. Multiplicando-se esse valor tarifário da energia elétrica pelo consumo energético do VANT representando na Figura 38, obtêm-se o custo energético do VANT ilustrado na Figura 39.

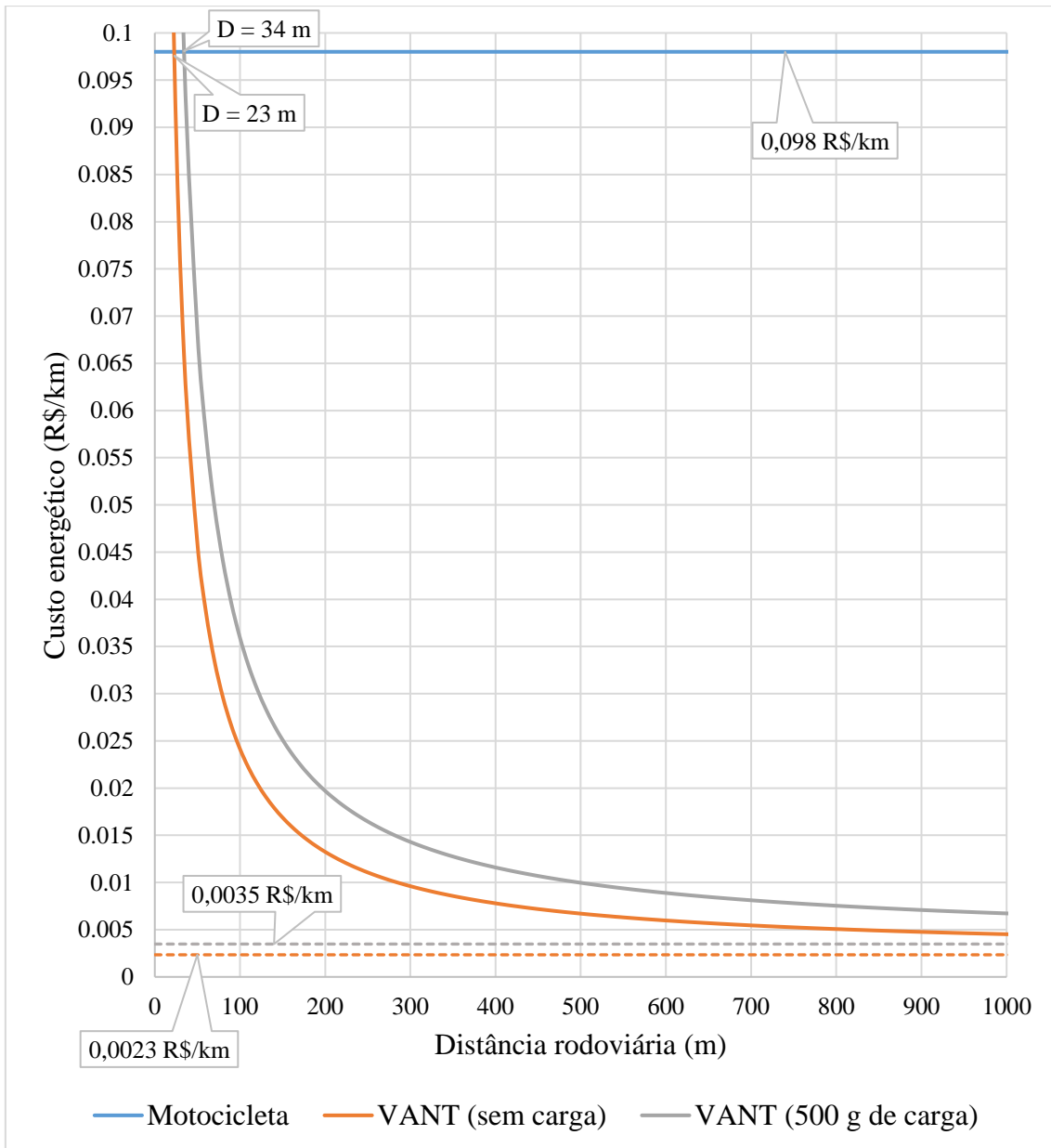


Figura 39: Custo energético da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária entre origem e destino para uma viagem com carga útil entre 0 e 500 g.

Observa-se na Figura 39 que o custo energético da motocicleta para uma carga útil entre 0 e 500 g é considerado constante e igual a aproximadamente R\$ 0,10 por quilômetro. O custo energético do VANT por sua vez é igual ao da motocicleta para uma viagem cuja distância rodoviária entre origem e destino é de apenas 23 m. Embarcando-se uma carga útil de 500 g no VANT, o custo energético se iguala com a motocicleta em uma viagem de 34 m. Para uma viagem de 500 m com 500 g de carga útil embarcada, o custo energético do VANT é aproximadamente 10 vezes menor que o da motocicleta (0,01 R\$/km contra 0,10 R\$/km, respectivamente). Para uma viagem cuja distância

rodoviária seja de 1.000 m, o custo energético do VANT sem carga é de 0,0045 R\$/km, enquanto que com 500 g de carga útil é de 0,0067 R\$/km, isto é, em ambas as situações bastante inferior ao custo energético da motocicleta (0,098 R\$/km). A medida que se aumenta a distância, o custo energético do VANT se reduz ainda mais. Para uma carga de 0 g tende ao limite de 0,0023 R\$/km enquanto que para uma carga de 500 g tende a 0,0035 R\$/km.

- Abordagem 2: motocicleta e VANT transportando carga útil com massa igual a capacidade máxima do veículo.

De acordo com o manual da motocicleta CG Titan 150, sua capacidade máxima de carga é 20 kg, devendo inclusive ser incluído o peso do dispositivo instalado para transporte (HONDA, 2014). A Figura 40 ilustra a configuração para transporte de carga proposto pelo manual da motocicleta.

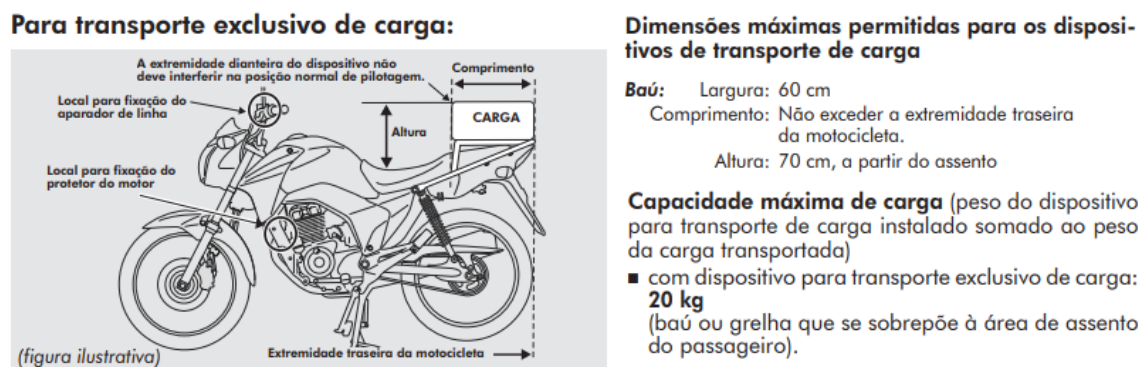


Figura 40: Configuração para transporte de carga da CG Titan 150 (HONDA, 2014).

Conforme demonstrado no [Apêndice D](#), como espera-se que o transporte de uma carga de até 20 kg demande um aumento do consumo energético da motocicleta inferior a 10 %, por questões de simplificação, será considerado que o consumo de combustível não sofre variação significativa nesta configuração de carga. Dessa forma o consumo de energia da motocicleta abastecida com gasolina ao transportar uma carga útil de 20 kg manter-se-ia em 689,9 kJ/km, isto é, 34,5 kJ/kg.km.

Considerando que o VANT seja capaz de transportar uma carga máxima de 500 g, conforme determinado nos testes com o VANT do LTC (vide Tabela 16), que a relação entre a distância aérea e a distância rodoviária seja de 0,83, tal como verificado na Tabela 21, que o voo do VANT ocorra tal como esquematizado na Figura 36 e ainda que o consumo energético do VANT para uma carga útil de 500 g seja de 241,9 W, tal como

apresentado na Figura 23, é possível relacionar o consumo energético específico da motocicleta e do VANT em função da distância rodoviária na condição em que esses veículos transportam uma carga útil cuja massa corresponda ao limite da capacidade desses veículos (20 kg para a motocicleta e 0,5 kg para o VANT), conforme apresentado na Figura 41.

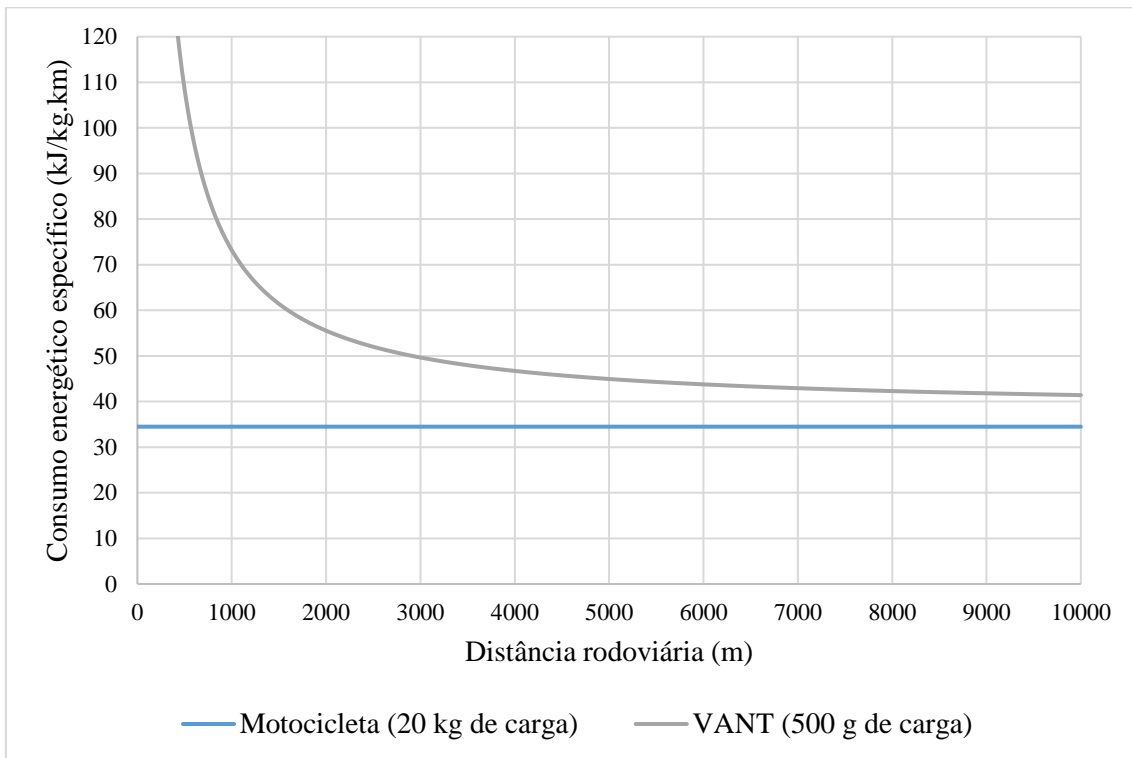


Figura 41: Consumo energético específico da motocicleta e do VANT transportando carga cujos pesos correspondem a capacidade máxima desses veículos (20 kg e 0,5 kg, respectivamente).

Observa-se na Figura 41 que o consumo energético específico da motocicleta ao transportar uma carga útil cuja massa é de 20 kg é considerado constante e igual a 34,5 kJ/kg.km, conforme hipótese feita pelo autor de que não haverá aumento significativo no consumo de combustível da motocicleta ao se transportar uma carga de 20 kg. No caso do VANT, o consumo específico é variável, a depender da distância entre origem e destino. Conforme já analisado anteriormente, o modelo de operação do VANT proposto na Figura 36 exige uma quantidade fixa de energia para as operações de decolagem e pouso, que ocorrem sempre na vertical. Assim a medida que se diminui a distância origem-destino, maior se torna o consumo específico do VANT. Como consequência, para distâncias horizontais tendendo a 0, o consumo específico tenderia ao infinito. Por

outro lado, quanto maior a distância, mais “diluído” torna-se esse gasto energético fixo com as operações de pouso e decolagem, explicando o decréscimo do consumo específico do VANT em função da distância.

Observa-se na Figura 41 que o consumo energético específico do VANT sofre significativa redução na faixa de distância entre 0 e 2 km. Para uma viagem cuja distância rodoviária seja de 3 km, o consumo energético específico do VANT corresponde a 50 kJ/kg.km. A medida que se aumenta a distância, o consumo energético específico do VANT se reduz ainda mais e tenderia, no limite, a 37,9 kJ/kg.km. Embora o consumo energético específico do VANT seja sempre maior que o da motocicleta, independente da distância origem-destino, observa-se que eles possuem a mesma ordem de grandeza e, para uma distância rodoviária de 3 km por exemplo, o consumo específico do VANT seria apenas 45 % maior que o da motocicleta.

Tal como a Figura 39, é possível ainda elaborar um gráfico semelhante ao da Figura 41, porém relacionando o custo específico da energia (R\$/kg.km) em função da distância rodoviária. Considerando o preço médio da gasolina praticado na cidade do Rio de Janeiro na semana de 22/10/2017 a 28/10/2017 de R\$ 4,204 por litro ANP (2017b) e que o consumo de gasolina da motocicleta ao realizar uma viagem com 20 kg de carga útil se mantenha em 43 km/l, resulta assim em um custo específico de energia de 0,0049 R\$/kg.km. Utilizando-se por sua vez a tarifa de energia elétrica de baixa tensão praticada na cidade do Rio de Janeiro de 0,66145 R\$/kW.h (LIGHT, 2017), isto é, 0,000184 R\$/kJ, basta multiplicar esse valor pela curva do VANT da Figura 41 que obtêm-se então a Figura 42, onde é possível comparar o custo energético específico do VANT e da motocicleta no transporte de carga.

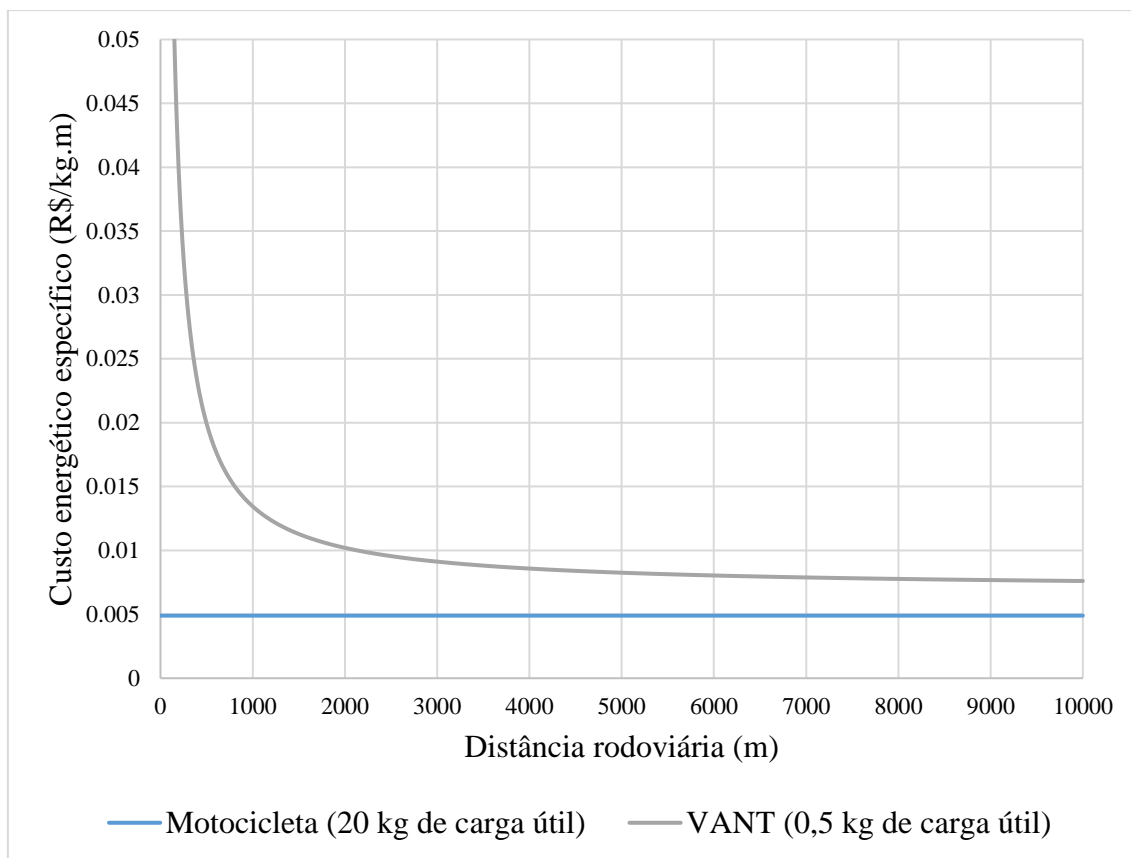


Figura 42: Custo energético específico da motocicleta e do VANT transportando carga cujos pesos correspondem a capacidade máxima desses veículos (20 kg e 0,5 kg, respectivamente).

Observa-se na Figura 42 que o custo energético específico da motocicleta ao transportar uma carga cuja massa é o limite de sua capacidade (20 kg) é considerado constante e igual a 0,0049 R\$/kg.km. O custo energético específico do VANT por sua vez é decrescente e, embora sempre maior que o da motocicleta, possuem a mesma ordem de grandeza. Por exemplo, para uma distância rodoviária entre origem e destino de 2 km, o custo energético específico do VANT ao transportar uma carga de 500 g é de aproximadamente o dobro do custo específico energético da motocicleta realizando a mesma viagem com 20 kg de carga útil (0,01 R\$/kg.km contra 0,0049 R\$/kg.km, respectivamente). A medida que se aumenta a distância, o custo energético do VANT se reduz ainda mais, tendendo, no limite, a um valor final de 0,0069 R\$/kg.km.

As análises feitas nas Figuras 41 e 42 podem levar a interpretação equivocada que a motocicleta seja então sempre mais eficiente que o VANT para o transporte de carga dos pontos de vista da quantidade de energia demandada (Figura 41) e do custo

financeiro desta energia (Figura 42), independente da distância entre a origem e destino. Essa interpretação, contudo, é equivocada e será melhor explorada a seguir.

A Figura 41 e a Figura 42 representam o consumo energético específico (kJ/kg.km) e o custo energético específico (R\$/kg.km), respectivamente, na situação em que a motocicleta e o VANT estejam transportando suas cargas úteis máximas, correspondente a 20 kg e a 0,5 kg, respectivamente. Dessa forma os dados das Figura 41 e a Figura 42 somente valem na situação em que o peso da carga a ser transportada seja um número natural múltiplo do peso máximo da carga útil capaz de ser transportada pelo veículo e ainda que, se o peso da carga a ser transportada for maior que a capacidade máxima de carga do veículo, essa possa ser fracionada. Nesta linha, no caso do VANT, as Figura 41 e Figura 42 valem somente para os casos em que peso da carga a ser transportada seja igual a 0,5 kg, 1 kg, 1,5 kg, 2 kg, etc., e seja possível fracioná-la em “pacotes” de 0,5 kg. No caso da motocicleta, as Figura 41 e Figura 42 valem somente para os casos em que peso da carga a ser transportada seja igual a 20 kg, 40 kg, 60 kg, 80 kg, etc., e seja possível fracioná-la em “pacotes” de 20 kg. Como 20 kg é múltiplo de 0,5 kg, as comparações entre o VANT e a motocicleta estabelecidas nas Figura 41 e Figura 42 somente valeriam para cargas cujo peso seja múltiplo de 20 kg e além disso possam ser fracionadas em “pacotes” de 0,5 kg.

Corroborando com a linha do parágrafo anterior, as Figura 38 e Figura 39 mostram por exemplo que, para cargas com peso até 0,5 kg em viagens a partir de 500 m, a energia gasta com o VANT e o custo financeiro desta energia é da ordem de 10 vezes menor que a energia e o custo financeiro da energia gasto pela motocicleta para a mesma viagem. Com efeito, para transportar por motocicleta uma carga de 0,5 kg por uma distância rodoviária de 1 km, seriam consumidos 23 ml de gasolina C, correspondente a 689,9 kJ, cujo custo do combustível seria R\$ 0,098. Essa mesma viagem realizada com o VANT consumiria apenas 36,6 kJ e custaria R\$ 0,007 em energia elétrica.

A Figura 38 mostra que, ao transportar uma carga de 0,5 kg, por uma distância rodoviária entre origem-destino superior a 26 m, o VANT consumiria menos energia que o consumido por uma motocicleta para realizar esta viagem. Por outro lado, conforme a Figura 41, para uma carga com massa igual a 20 kg (e que seja fracionável em pacotes de 0,5 kg), enquanto a motocicleta poderia fazer o transporte desta carga em uma única viagem, o VANT demandaria 40 viagens. A energia consumida pela motocicleta para transportar essa carga seria sempre menor que a consumida pelo VANT, independente da distância. A Figura 38 e a Figura 41 permitem tirar as seguintes conclusões:

- a) enquanto a razão (gasto energético)/(distância) da motocicleta é aproximadamente constante, do VANT é decrescente;
- b) para uma carga de 0,5 kg, motocicleta e VANT gastariam a mesma energia para uma distância rodoviária de 26 m. Abaixo dessa distância, a motocicleta consumiria menos energia; acima dessa distância, o VANT consumiria menos energia.
- c) para uma carga de 20 kg (e que seja divisível em pacotes de 0,5 kg), a motocicleta gastará sempre menos energia que o VANT. Contudo, quanto maior a distância, menor é a vantagem da motocicleta.

As conclusões anteriores mostram, portanto, que, para uma carga de 0,5 kg, o VANT é energeticamente mais eficiente (para distâncias maiores de 26 m) que a motocicleta. Para uma carga de 20 kg, a motocicleta já é energeticamente mais eficiente que o VANT (independente da distância). Surge, portanto, o questionamento de qual modo seria energeticamente mais eficiente para cargas com massa intermediária, entre 0,5 kg e 20 kg.

Para responder a esta questão, basta lançar mão da Figura 38. Por exemplo, para uma carga de 0,5 kg, o consumo energético entre VANT e motocicleta se iguala para uma viagem de 26 m. Para transportar uma carga de 1 kg, enquanto a motocicleta faria o transporte em uma única viagem, o VANT faria em duas viagens. Nesse caso, portanto, a distância de equilíbrio seria aquela em que o consumo energético do VANT em kJ/km fosse metade do consumo energético da motocicleta. Isso ocorre a uma distância de 54,2 m. Para transportar 1,5 kg, o VANT demandaria 3 viagens. Assim a distância de equilíbrio seria aquela em que o consumo energético do VANT seja 1/3 do consumo energético da motocicleta, o que ocorre para 83,7 m. Portanto, para uma carga de massa igual a “ $n \cdot 0,5$ kg”, sendo n um número natural tal que $1 \leq n < 40$, enquanto a motocicleta fará o transporte em uma única viagem, o VANT fará em n viagens. A distância de equilíbrio energético entre VANT e motocicleta para esta carga corresponde a abscissa do ponto da curva “VANT (500 g de carga)” do gráfico da Figura 38 tal que a ordenada corresponda a “ $689,9/n$ kJ/kg”. Fazendo esse procedimento para n de 1 a 39, obtém-se uma série de pontos (massa, distância de equilíbrio), os quais foram plotadas na Figura 43.

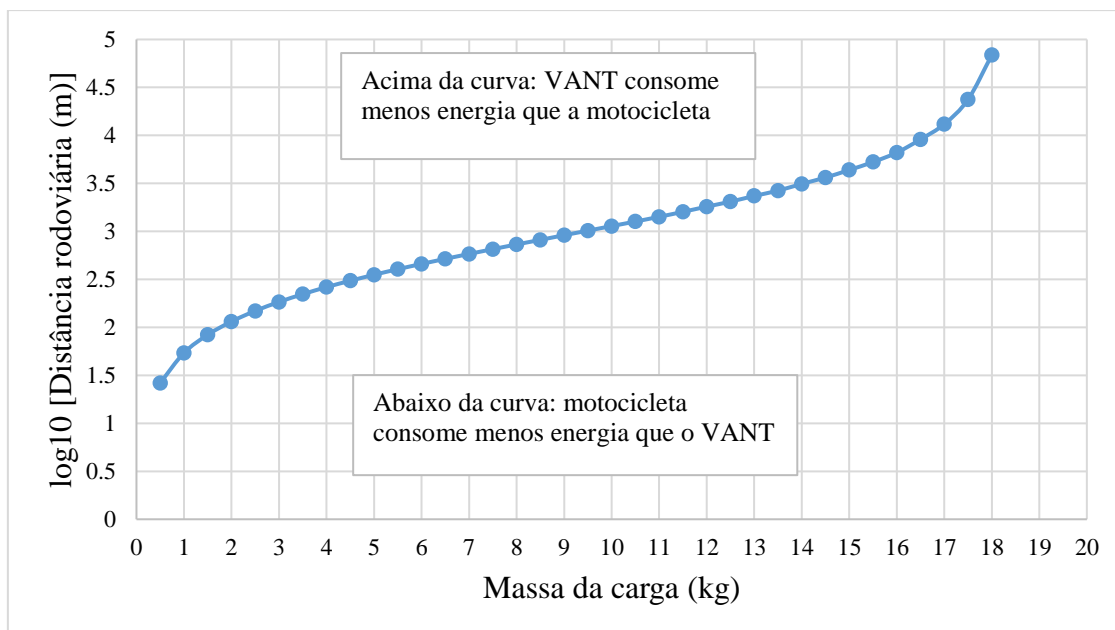


Figura 43: Curva de igualdade de consumo energético VANT-motocicleta para cargas inferiores a 20 kg.

A Figura 43 mostra por exemplo que, para transportar uma carga de 10 kg (e que seja fracionável em pacotes de 0,5 kg), ainda que a motocicleta transporte essa carga em uma única viagem e do lado do VANT sejam necessários 20 veículos viajando com 0,5 kg de carga útil cada, o gasto energético total será o mesmo entre esses dois modos se a distância rodoviária entre origem-destino for 1.135 m ($\log_{10}1.135 = 3,05$). Se a distância for menor que 1.135 m, a motocicleta consumirá menos energia que os VANT; do contrário, se a distância for maior que 1.135 m, os VANT consumirão em conjunto menos energia que a motocicleta. A partir de 18,5 kg de carga a motocicleta apresenta vantagem energética em relação ao VANT independente da distância.

A mesma análise feita na Figura 43 pode ser feita também em termos do custo financeiro da energia consumida por cada tipo de veículo (VANT ou motocicleta). Nesta linha adotando-se a mesma metodologia de construção da Figura 43, utilizando-se, porém, os dados da Figura 39, obtém-se a curva de igualdade de custo energético entre o VANT e a motocicleta, conforme representado na Figura 44.

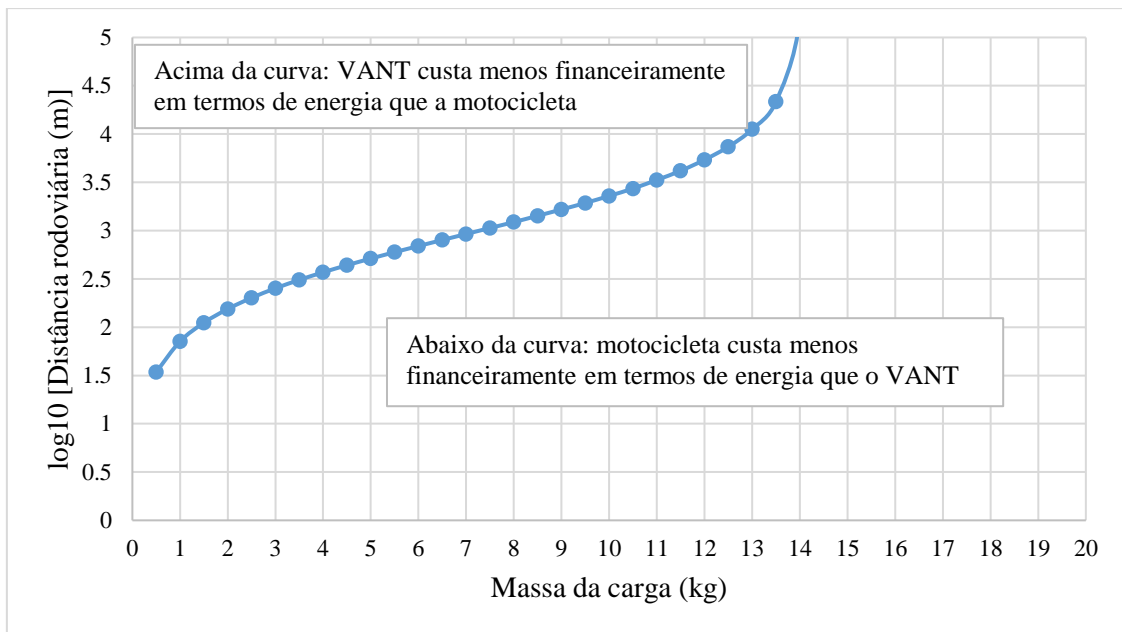


Figura 44: Curva de igualdade de custo financeiro energético VANT-motocicleta para cargas inferiores a 20 kg

A Figura 44 mostra por exemplo que, para transportar uma carga de 10 kg (e que seja fracionável em “pacotes” de 0,5 kg), ainda que a motocicleta transporte essa carga em uma única viagem e do lado do VANT sejam necessárias 20 viagens com 0,5 kg de carga útil embarcada cada, o custo financeiro da energia utilizada por esses dois modos será o mesmo se a distância rodoviária entre origem-destino for 2.285 m ($\log_{10}2.285 = 3,36$). Se a distância for menor que 2.285 m, a motocicleta será financeiramente mais econômica que o VANT em relação ao custo da energia consumida; do contrário, se a distância for maior que 2.285 m, mesmo sendo necessárias 20 viagens pelo VANT, o custo financeiro total da energia utilizada pelo VANT é menor que o da motocicleta. A partir de 14,5 kg de carga útil a ser transporta, a motocicleta apresenta sempre menor custo financeiro energético em relação ao VANT, independente da distância.

Uma das limitações das abordagens da Figura 43 e da Figura 44 é que elas consideram apenas a energia utilizada quando o veículo está efetivamente transportando uma carga útil. Embora no caso da motocicleta a alteração de consumo energético não seja significativa em função do peso da carga útil (entre 0 e 20 kg), o mesmo não se pode dizer para o VANT: a Figura 23 mostra um aumento de consumo energético do VANT de 48 % entre as situações “sem carga útil” e com 500 g de carga útil (162,6 W para 241,9 W). Tal fato deve ser levado, portanto, em consideração especialmente nas situações em que o veículo retorna vazio a origem. Por exemplo, após entregar uma pizza é de se

esperar que o veículo, seja a moto ou o VANT, retorne vazio à pizzaria! Esse caso concreto dado como exemplo exige uma análise não somente com respeito ao consumo de energia (que no caso de VANT será consideravelmente diferente entre as viagens de ida, no qual possui carga útil, e de volta, em que não possui carga útil) como também da autonomia, que deve ser suficiente para fazer a viagem de ida e de volta. Esse caso concreto será explorado a seguir.

Supondo uma rota em que o veículo deva partir da origem, visitar um ponto e retornar a origem, é possível, com o auxílio das Figura 22 e, da mesma forma que foram elaboradas as Figura 43 e Figura 44, avaliar o VANT e a motocicleta para o cumprimento dessa missão, considerando autonomia, gasto energético e o custo financeiro energético para cumprimento da missão.

De acordo com a Figura 22, o VANT do LTC possui autonomia de 16:11 mm:ss (971 s) voando sem carga útil e de 10:06 mm:ss (606 s) com uma carga útil de 500 g embarcada. Portanto, considerando que os trechos de ida (com carga) e volta (sem carga) sejam feitos com a mesma velocidade (e, portanto, com o mesmo tempo), conforme esquematizado na Figura 36, é possível calcular o tempo de autonomia do veículo. No caso do VANT, no limite da sua autonomia, a carga elétrica consumida na viagem de ida (q_{ida}) somada a carga elétrica consumida na viagem de volta (q_{volta}) será igual a carga total (q_{total}) disponível na bateria antes de iniciar a viagem.

$$q_{ida} + q_{volta} = q_{total}$$

$$i_{ida} \cdot t_{ida} + i_{volta} \cdot t_{volta} = q_{total}$$

Considerando que essa viagem seja iniciada com a bateria completamente carregada, assim como foram feitos os testes de autonomia da Figura 22, e que a viagem de ida seja feita com 500 g de carga útil embarcada e a de volta sem carga, vem:

$$\frac{q_{total}}{606} \cdot t_{ida} + \frac{q_{total}}{971} \cdot t_{volta} = q_{total}$$

Considerando que as viagens de ida e volta sejam feitas com a mesma velocidade, conforme a Figura 36, tem-se $t_{ida} = t_{volta}$, onde vem:

$$\frac{t_{ida}}{606} + \frac{t_{ida}}{971} = 1$$

$$t_{ida} = \frac{1}{1/606 + 1/971}$$

$$t_{ida} = 373 \text{ s}$$

Dessa forma, com 373 s para percorrer o trajeto de ida, dos quais 73 s são gastos somente com as operações de decolagem e pouso (e outros 373 s para percorrer o trajeto de volta), nas condições de voo da Figura 36 o VANT teria autonomia para realizar uma viagem de ida (500 g de carga útil) e volta (sem carga útil) cuja distância rodoviária origem-destino fosse de 3.830 m.

As curvas de equilíbrio entre o VANT e a motocicleta de gasto energético e de custo financeiro da energia consumida para esta operação podem ser obtidas utilizando-se metodologia análoga a utilizada para obtenção das Figura 43 e Figura 44. Nesse caso contudo, como o VANT faz a viagem de ida com 500 g de carga útil e a viagem de volta sem carga útil, ambas as viagens gastando-se o mesmo tempo, o consumo de energia e gasto financeiro da energia para uma dada distância rodoviária da entrega será a média aritmética entre as ordenadas dos pontos sobre as curvas “VANT (sem carga)” e “VANT (500 g de carga)” das Figura 38 e Figura 39. Realizando-se esse procedimento, obtém-se a Figura 45

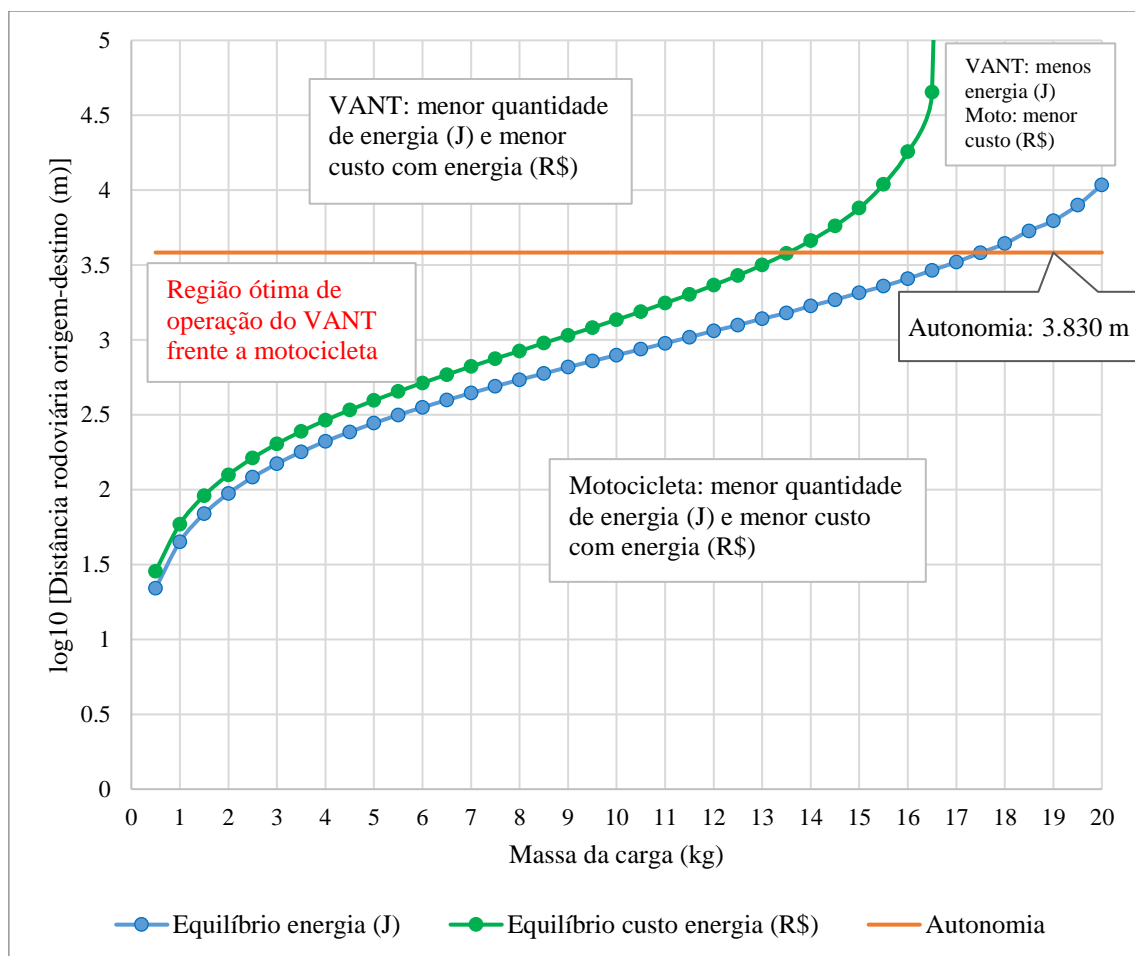


Figura 45: Avaliação entre VANT e motocicleta para transporte de cargas inferiores a 20 kg e que sejam fracionáveis em “pacotes” de 500 g em viagens do tipo origem-destino-origem com respeito ao consumo de energia, custo financeiro da energia e autonomia.

Observa-se na Figura 45 que as curvas de “Equilíbrio energia (J)” e “Equilíbrio custo energia (R\$)” não são coincidentes. Isso ocorre devido a diferença de custo entre essas fontes de energia. No caso da gasolina C, considerando o preço de R\$ 4,204 por litro e seu poder calorífico de 29.664,35 kJ/l, resulta em 0,000142 R\$/kJ. A energia elétrica por sua vez possui um valor tarifário de 0,000184 R\$/kJ. Observa-se assim que uma dada quantidade de energia elétrica possui preço maior que um certo volume de gasolina C com o mesmo poder calorífico. Isso explica a existência de uma região intermediária no gráfico no qual, embora o VANT consuma menos energia que a motocicleta (energia elétrica x energia correspondente ao poder calorífico do combustível), ainda sim é financeiramente mais vantajoso utilizar a motocicleta devido ao custo da energia da gasolina (em termos do seu poder calorífico) ser mais barato que a energia elétrica.

Conforme demonstrado na Figura 45, a região ótima de utilização do VANT frente a motocicleta está limitada superiormente pela curva de “Autonomia” e lateralmente pela curva “Equilíbrio custo energia (R\$)”. Os pontos nesta região significam que o VANT tem autonomia para realizar a viagem de ida com carga e retornar a origem sem carga, utilizando menos energia e com menor custo financeiro, em termos de energia, que o que seria gasto com a motocicleta para cumprir a mesma missão.

Não obstante a vantagem energética do VANT sobre a motocicleta para as combinações de carga-distância apresentadas na Figura 45, não se pode deixar de mencionar o impacto dos motores a combustão interna no meio ambiente, particularmente quanto a emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa. Enquanto a motocicleta utiliza energia proveniente da queima de combustível fóssil (gasolina), o VANT utiliza energia elétrica a qual pode ser gerada por fontes renováveis. A Tabela 23 compara a motocicleta do autor e o protótipo do VANT do LTC quanto ao consumo de energia e emissão dos principais gases de efeito estufa.

Tabela 23: Energia e emissão do VANT e motocicleta.

	Motocicleta 150 cc	VANT LTC
Capacidade de carga	20 kg	0,5 kg
Energia consumida para viagem de 5 km	3450 kJ	108 kJ ⁽¹⁾
Custo da energia consumida para viagem de 5 km	R\$ 0,49 (gasolina C)	R\$ 0,02 (energia elétrica) ⁽¹⁾
Emissão de CO ₂ ⁽²⁾	54 g/km	Não usa combustível fóssil
Emissão de CH ₄ ⁽³⁾	40 mg/km	Não usa combustível fóssil
Emissão de N ₂ O ⁽³⁾	3 mg/km	Não usa combustível fóssil

(1) Considerando 2,5 km com 0,5 kg de carga e 2,5 km sem carga.

(2) Valor da queima estequiométrica da gasolina (EPA, 2014 pg. 2).

(3) Valores médios de emissão para motocicleta dotadas de catalizador funcionando com motor quente (IPCC, 2006 pg. 22).

Como pode-se desprender da *Tabela 23*, cada motocicleta percorrendo uma distância de 100 km por dia é responsável pela emissão direta de aproximadamente 5,4 kg de CO₂ por dia, os quais seriam poupados se o VANT fosse utilizado. Observa-se, portanto, neste capítulo que o VANT não somente pode ser energeticamente mais eficiente que a motocicleta, como também possui vantagens quanto a emissão de poluentes.

6 CONCLUSÃO

O comércio eletrônico e de alimentação têm sido protagonistas de uma profunda mudança na logística urbana. Se antes a cadeia logística era pensada como o processo que reunia os insumos e conduzia o produto do fabricante até as lojas físicas, hoje ele deve ser capaz de incluir o cliente pessoa física como ponto final da cadeia. O setor de alimentação já a alguns anos experimenta tal mudança (afinal, quem nunca pediu uma pizza em casa?). No caso do comércio eletrônico, impulsionado pelo amplo acesso à *Internet*, segmentos tais como eletrônicos, vestuário, eletrodomésticos e livros são apenas alguns exemplos de produtos amplamente disponíveis para compra no varejo por meio de plataformas digitais que proporcionam a comodidade do cliente comprar e receber o produto sem sair de casa. Em muitos casos são poucas unidades (quando não uma) de produtos leves e de pequeno volume que devem ser entregues aos clientes distribuídos pela cidade.

Como não bastasse a extensão da cadeia logística até a porta do cliente, o consumidor não quer apenas receber o produto em casa, mas quer recebe-lo rápido e barato. Em um mercado competitivo e cujas informações estão literalmente na palma da mão do consumidor, as empresas controlam o máximo seus custos. Os custos logísticos, em particular o custo de transporte e nível de serviço são cuidadosamente analisados pelas empresas. Em contraponto ao desejo do cliente de receber seu produto cada vez mais rápido, o transportador se depara com engarrafamentos cada vez maiores, restrições de horários, restrições de estacionamento, falta de vagas etc.

É neste cenário que as motocicletas têm destaque na logística urbana, seja pela atratividade do seu custo (capital imobilizado, depreciação, consumo, manutenção etc.); seja pelo nível de serviço (tempo de entrega) proporcionado por este veículo, que é capaz de “furar” engarrafamentos, não possuem restrição de horário e, com raras exceções, podem estacionar na porta do cliente. As vantagens proporcionadas, portanto, pela motocicleta na logística urbana é capaz de harmonizar os anseios dos consumidores, varejistas e transportadores.

Ao se pensar em transporte aéreo de carga as primeiras imagens que se tem em mente são aviões, helicópteros, aeroportos. Em suma, veículos e terminais grandes, caros e com dinâmica incompatível com a logística urbana. Nesse contexto a utilização do modo aéreo no transporte de carga se limita atualmente as operações de transferência de produtos de alto valor agregado, cargas urgentes, cargas que sofram deterioração pelo

tempo ou ainda em locais não atendidos pelos demais modos. Diante de tais características parece até então impensável que o modo aéreo possa ser utilizado na logística urbana. Contudo ao se estudar os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) percebe-se o potencial de uso destes veículos.

É bastante comum a confusão entre VANT, aeromodelo e “drone”. Nesse sentido é importante que fique claro que “drone” nada mais é que um “apelido” genérico utilizado no mundo e que compreende o VANT e o aeromodelo. A diferença entre os dois últimos (VANT e aeromodelo) não se dá pelo tipo, tamanho ou modelo da aeronave, mas sim exclusivamente pelo propósito da operação, isto é, se o uso é ou não recreativo, enquadrando-se como aeromodelo ou VANT, respectivamente. Assim um mesmo modelo de aeronave pode ser considerado tanto um VANT quanto um aeromodelo, dependendo apenas de como é utilizado.

No Brasil tanto o VANT quanto o aeromodelismo estão sujeitos às regras da ANATEL, com respeito a homologação dos produtos emissores de radiofrequência, da ANAC, com respeito a fabricação, manutenção e operação das aeronaves, e do DECEA, com respeito ao acesso ao espaço aéreo. Especificamente no caso dos VANT, a ANAC e o DECEA os dividem 2 formas de operação (uma com observação direta e a olho nu da aeronave e outra com auxílio de imagens e dados que não somente a observação direta à aeronave). As regras para operação dentro da linha de visada são menos restritivas. Além da divisão por tipo de operação, os VANT também são divididos pela ANAC e pelo DECEA em 3 categorias de acordo com o peso máximo de decolagem (PMD): até 25 kg, acima de 25 kg até 150 kg e acima de 150 kg. Quanto maior a categoria de PMD, mais restritiva são as regras. Em todos os casos a operação ocorre em espaço aéreo segregado, isto é, separado das demais aeronaves. A integração dos VANT em espaço aéreo comum às demais aeronaves tripuladas carece ainda do desenvolvimento tecnológico e maior profissionalização dos VANT, bem como do estudo de como se gerenciar o tráfego aéreo de tantos veículos com características e desempenho distintos.

Com o intuito de se avaliar a viabilidade da eventual utilização de um VANT na logística urbana, foi montada no Laboratório de Transporte de Carga (LTC) da COPPE/UFRJ uma aeronave do tipo quadricóptero cujo peso sem carga útil é de 1,4 kg. Essa aeronave montada por pesquisadores do LTC, juntamente com um quadricóptero comercial (DJI *Phantom 3 Standard*) com 1,3 kg de peso sem carga útil, passaram por diversos testes de voo para se avaliar parâmetros tais como capacidade de carga,

velocidade, autonomia e consumo energético. Paralelamente foram realizados testes de velocidade e consumo energético com uma motocicleta.

Os testes demonstraram que o VANT foi capaz de transportar uma carga útil de até 500 g sem comprometer a sustentação e dirigibilidade do veículo. Durante os testes atingiu-se velocidades horizontais de até 15 m/s em relação ao solo. Com respeito a autonomia, observou-se que a mesma é variável, conforme peso da carga transportada, variando entre 10 min com 500 g de carga útil a 16 min na situação em que o mesmo opera sem carga útil. Tal autonomia permitiria, por exemplo, que o VANT atendesse destinos situados dentro de um raio de 3 km levando uma carga de 500 g e retornando sem carga à origem.

Os testes com motocicleta por sua vez demonstraram que essa foi capaz de se deslocar no tráfego urbano com uma velocidade média de 7 m/s e um consumo médio de gasolina de 43 km/l. Observou-se também que a distância euclidiana entre origem e destino era em média 17 % inferior a distância rodoviária entre esses pontos. Embora o VANT tenha uma velocidade de cruzeiro superior à velocidade média da motocicleta e se beneficie pelo fato da distância euclidiana ser inferior a distância rodoviária, depende-se tempo com as operações de pouso e decolagem. Verificou-se assim no estudo de caso que a vantagem do VANT (com respeito ao menor tempo de viagem) surge para distâncias a partir de 1 km.

Com respeito à energia, tanto o consumo energético do VANT quanto o custo financeiro da energia consumida foram significativamente inferiores ao da motocicleta para cargas de até 500 g. Mesmo para cargas superiores a 500 g (mas que sejam fracionáveis em “pacotes” de até 500 g), o VANT se mostrou mais vantajoso nesse aspecto que a motocicleta, embora haja uma redução gradual da vantagem em função do peso da carga (para uma carga de 18 kg por exemplo a motocicleta se mostra mais vantajosa que o VANT nesse aspecto).

De forma sucinta, observou-se que o VANT é tecnicamente viável e apresenta vantagens em relação a motocicleta para o transporte de cargas de baixo peso à curtas e médias distâncias.

Como oportunidade de estudos futuros sugere-se a avaliação dos demais custos envolvidos na operação do VANT e da motocicleta que não somente o custo financeiro da fonte de energia tais como custo de oportunidade, depreciação, manutenção, remuneração dos pilotos etc.

Ainda com respeito a energia, é importante observar que a motocicleta utiliza motor a combustão interna enquanto o VANT utiliza motor elétrico. Enquanto aquela se utiliza da queima de combustíveis fósseis rejeitando agentes nocivos à atmosfera, este é capaz de se aproveitar da energia elétrica, que pode ser obtida de fontes renováveis, sem emissão direta de poluentes atmosféricos. Dessa forma há um potencial ecológico ao substituir viagens realizadas por motocicletas por viagens realizadas por VANT. Tal potencial pode ser melhor explorado em um próximo estudo, observando-se não somente a emissão direta de poluentes, mas todo o impacto que tais veículos representam ao meio ambiente (por exemplo, fabricação, transporte de combustível, descarte de óleo, bateria, etc.)

Outro ponto a ser considerado e que pode ser explorado em um próximo estudo é o problema de roteirização. Esse estudo se limitou em comparar o VANT e a motocicleta em viagens do tipo “1 - 1”, onde VANT e motocicleta, partindo da origem, teriam apenas um destino a ser visitado. A depender do número de destinos a serem visitados, da localização desses destinos e da demanda de carga em cada um deles, a solução do problema de roteirização implica em novos pontos de equilíbrio de custo entre o VANT e a motocicleta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCR, 2014, Matriz do Transporte de Carga. *Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias*. Disponível em <<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Secao/43/estatisticas.aspx>> Acesso em 28 mai. 2017.
- ABEYRATNE, R., 2012, *Air Navigation Law*. Berlin, Springer.
- ABRACICLO, 2017, Anuário da Indústria Brasileira de Duas Rodas 2017. *Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares*. São Paulo, 11 jul. 2017. Disponível em <<http://www.abraciclo.com.br/anuario-de-2017>>. Acesso em 18 dez. 2017.
- AMAZON, 2017, *Amazon Prime Air*. Disponível em <<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?node=8037720011>>. Acesso em 09 dez. 2017.
- ANAC, 2011, Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 01. *Agência Nacional de Aviação Civil*. Definições, Regras de Redação e Unidades de medida para uso nos RBAC. Emenda 02, Brasília. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac>>. Acesso em 02 dez. 2017.
- ANAC, 2017a, Anuário do Transporte Aéreo 2016. *Agência Nacional de Aviação Civil*. 1 ed., Brasília. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/anuario/Anuario2016.zip>>. Acesso em 25 nov. 2017.
- ANAC, 2017b, Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 94. *Agência Nacional de Aviação Civil*. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. Emenda 00, Brasília, 03 mai. 2017. Disponível em <<http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac>>. Acesso em 17 dez. 2017.
- ANP, 2017a, Anuário estatístico 2017. *Agência Nacional de Petróleo*. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017#Outras>>. Acesso em 29 out. 2017.
- ANP, 2017b, Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis. *Agência Nacional de Petróleo*. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/precos-e-defesa-da>>

- concorrenca/precos/levantamento-de-precos?view=default>. Acesso em 04 nov. 2017.
- ANATEL, 2016, Governo reduz de 60 para 9 dias prazo para autorização de drones no combate ao Aedes. *Agência Nacional de Telecomunicações*. Brasília, 23 fev. 2016. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/institucional/ultimas-noticiass/983-governo-reduz-de-60-para-9-dias-prazo-para-autorizacao-de-drones-no-combate-ao-aedes>>. Acesso em 10 dez. 2017.
- ANATEL, 2017, Manual do Usuário do Sistema de Certificação e Homologação – Declaração de Conformidade para quadricóptero (drone). *Agência Nacional de Telecomunicações*. Brasília, 02 fev. 2017. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=346061&pub=original&filtro=1&documentoPath=346061.pdf>>. Acesso em 10 dez. 2017.
- BALLOU, R.H., 2006, *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial*. 5 ed. São Paulo, Bookman.
- BALLOU, R.H., 1993, *Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física*. 1 ed. São Paulo, Atlas.
- BAMBURRY, D., 2015, “Drones: Designed for Product Delivery”. *Design Management Review*, v. 26, n. 1, pp. 40-48.
- BARONTI, F., FANTECHI, G., FANUCCI, L., et al., “State-of-charge estimation enhancing of lithium batteries through a temperature-dependent cell model”. *International Conference on Applied Electronics (AE)*, 1803-7232, Pilsen, Czech Republic, 7-8 September 2011.
- BRASIL, 1946, Decreto nº 21.713 de 27 de agosto de 1946. Promulga a Convenção sobre Aviação Civil Internacional, concluída em Chicago a 7 de dezembro de 1944 e firmado pelo Brasil, em Washington, a 29 de maio de 1945. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Rio de Janeiro, 12 set. 1946.
- CET, 2017, Mobilidade no Sistema Viário Principal: Volume e Velocidade – 2016. *Companhia de Engenharia de Tráfego*. São Paulo, Jun. 2017. Disponível em <<http://www.cetsp.com.br/media/574933/2016volumevelocidade.pdf>>. Acesso em 18 dez. 2017
- CHUANGFENG, H., PINGAN, L., XUEYAN, J., 2011, “Measurement and analysis for lithium battery of high-rate discharge performance”, *Procedia Engineering*, v. 15, pp. 2619-2623.

- COLLINSON, R.P.G., 2011, *Introduction to Avionics Systems*. 3 ed. Dordrecht, Springer.
- CLOTHIER, R.A., GREER, D.A., GREER, D.G., et al., 2015, “Risk perception and the public acceptance of drones”, *Risk Analysis*, v. 35, n. 6, pp. 1167-1183.
- CRANE, D., 2012, *Dictionary of aeronautical terms*. 5. ed, Newcastle – WA (EUA), Aviation Supplies & Academics.
- CSCMP, 2017, State of Logistics Report. *Council of Supply Chain Management Professionals*. 28 ed. Washington, D.C., 20 jun. 2017. Disponível em <https://cscmp.org/CSCMP/Products/State_of_Logistics_Report/28th_Annual_State_of_Logistics_Report.aspx?WebsiteKey=0b3f453d-bd90-4121-83cf-172a90b226a9>. Acesso em 26 nov. 2017.
- DA SILVA COSTA, M., 2013, “São Paulo: Distinct Worlds Within a Single Metropolis”. In: Institute for Mobility Research (eds) *Megacity Mobility Culture*, chapter 7, pp. 127-148, Heidelberg, Springer.
- D’AGOSTO, M.A., 2015, *Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória*. 1. ed. Rio de Janeiro, Elsevier.
- DALAMAGKIDS, K., VALAVANIS, K.P., PIEGL, L.A., 2012 *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System: Issues, Challenges, Operational restrictions, Certification, and Recommendations, Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering* (vol. 54). 2 ed. New York: Springer. 305 p.
- DECEA, 2010, AIC 21/10 – Veículos Aéreos Não Tripulados. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo*, Rio de Janeiro, 23 set. 2010. Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=3499>>. Acesso em 30 mar. 2015.
- DECEA, 2016a, O DECEA. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo*. Disponível em <<http://www.decea.gov.br/?i=quem-somos&p=o-decea>>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- DECEA, 2016b, ICA 100-40 – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo*, Rio de Janeiro, 22 dez. 2016. Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/index.cfm?i=publicacao&id=4510>>. Acesso em 10 dez. 2017.
- DECEA, 2017, AIC 17/17 – Aeronaves Remotamente Pilotadas para uso recreativo: Aeromodelos. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo*, Rio de Janeiro, 10 jul.

2017. Disponível em <<https://publicacoes.decea.gov.br/download.cfm?d=4588>>. Acesso em 10 dez. 2017.
- DJI, 2015, *Manual do Usuário Phantom 3*. Disponível em <https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_3/pt/Phantom_3_Professional_User_Manual_pt.pdf>. Acesso em: 12 out. 2017.
- EASA, 2017, CS-25 Large Aeroplanes. *European Aviation Safety Agency*. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. Amendment 20, Cologne, 30 ago. 2017. Disponível em <<https://www.easa.europa.eu/certification-specifications/cs-25-large-aeroplanes>>. Acesso em 17 dez. 2017.
- EPA, 2014, Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. *U.S. Environmental Protection Agency*. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf>. Acesso em 03 mar. 2018.
- FAB, 2015, Saiba mais sobre voo de drones. *Força Aérea Brasileira*, 09 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.fab.mil.br/noticias/mostra/21519/ESPA%C3%87O-A%C3%89REO---Saiba-mais-sobre-voo-de-%60%60drones%C2%B4%C2%B4>> Acesso em 30 mar. 2015.
- FINKE, C., BUTTS, J., MILLS, R., et al., 2013, “Enhancing the security of aircraft surveillance in the next generation air traffic control system”, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, v. 6, n. 1 (Mar.), pp. 3-11.
- FLEURY, P.F., WANKE, P., FIGUEIREDO, K.F., 2000, *Logística Empresarial: a perspectiva brasileira*. 1 ed. São Paulo, Atlas.
- GALEOTTI, G. M., CINÀ, L., GIAMMANCO, C., et al., 2015, “Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy”, *Energy*, v. 89, pp. 678-686.
- GARCÍA, M., SAMPAIO, C.A.C, GONZÁLEZ, A.D., 2014, “Ecosocioeconomics applied to urban freight by bicycle and motorcycle in the city of Curitiba, Brazil”. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability*, pp. 713-722, Siena – Italy, Set. 2014.
- GIMENES, R.A.V., VISMARI, L.F, AVELINO, V.F., et al., 2014, “Guidelines for the Integration of Autonomous UAS into the Global ATM”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 74, n. 1-2, pp. 465-478.
- GLEISSNER, H., FEMERLING, J.C., 2013, *Logistics*. 1 ed. Suíça, Springer.

- GUDEHUS, T, KOTZAB, H., 2009, *Comprehensive Logistics*. 1 ed. Heidelberg, Springer.
- GUGLIERI, G., MARIANO, V., QUAGLIOTTI, F., et al., 2011, “A Survey of Airworthiness and Certification for UAS”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 61, n. 1-4, pp. 399-421.
- HONDA, M., 2014, *Manual do Proprietário CG 150 Titan*. Disponível em <http://www.honda.com.br/pos-venda/motos/sites/customer_service_motos/files/manuais/CG%20150%20Titan%202015.pdf>. Acesso em: 29 out. 2017.
- IBGE, 2017, Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de Julho de 2017. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_do_u_2017.pdf>. Acesso em 18 dez. 2017.
- ICAO, 2017, 2016 Annual Report of the Council. *International Civil Aviation Organization*. Disponível em <https://www.icao.int/annual-report-2016/Documents/ARC_2016_Air%20Transport%20Statistics.pdf>. Acesso em 13 fev. 2018.
- ICAO, [2017?], The History of ICAO and the Chicago Convention. *International Civil Aviation Organization*. Disponível em <<https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/default.aspx>>. Acesso em 26 nov. 2017.
- ILOS, 2017, *Custos Logísticos no Brasil*. In: Panorama ILOS, São Paulo.
- INVEPAR, 2017, *GRU Airport*. Investimentos e Participações em Infraestrutura S/A. Disponível em <<http://www.invepar.com.br/show.aspx?idMateria=AqdSQIYsTM3bcpVoHLXK8Q==>>. Acesso em 25 nov. 2017.
- IPCC, 2006, “Mobile Combustion”. In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, volume 2, chapter 3, Hayama, Japan, Institute for Global Environmental Strategies (IGES) on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf>. Acesso em 03 mar. 2018.
- JANIC, M., 2011, *Greening Airports: Advanced Technology and Operations*. 1 ed. London – UK, Springer-Verlag.

- JAZAR, R.N., 2008, *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Boston, MA, Springer.
- LIGHT, 2014, *Composição da Tarifa*. Disponível em <<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>>. Acesso em: 04 nov. 2017.
- LONGHITANO, G. A., 2010, *VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10012011-105505/>>. Acesso em: 28 mar. 2015.
- MACHARIS, C., MELO, S., 2011, *City Distribution and Urban Freight Transport: Multiple Perspectives*. 1 ed. Cheltenham – UK, Edward Elgar.
- MATHISEN, T.A., JORGENSEN, F., PEDERSEN, P.A., et al., 2017, “Airport Charges – Interaction between Airlines and Airports”. In: Bitzan, J.D., Peoples, J.H. (eds) *The Economics of Airport Operations (Advances in Airline Economics)*, vol. 6, chapter 9, pp. 213-234, Emerald Publishing Limited.
- MATSUO, C. A. S., 2011, *Projeto de um veículo aéreo não tripulado para pulverização aeroagrícola*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=000793883>> Acesso em 25 mar. 2015.
- MEDEIROS, F.A., ALONÇO, A.S., BALESTRA, M.R.G., et al., 2008, “Utilização de um Veículo Aéreo Não-tripulado em Atividades de Imageamento Georreferenciado”, *Ciência Rural*, v. 38, n. 8, p. 2375-2378. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000800046&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 31 mar. 2015.
- MIKOLAJCZAK, C., KAHN, M., WHITE, K., et al., 2011, *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. 1 ed. New York, Springer-Verlag.
- NERIS, L. O., 2001, *Um piloto automático para as aeronaves do projeto ARARA*. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-12092002-130939/>>. Acesso em: 28 mar. 2015.

- NOVAES, A.G., 2007, *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Rio de Janeiro, Elsevier.
- PODHRADSKÝ, M., COOPMANS, C., JENSEN, A., 2014, “Battery State-Of-Charge Based Altitude Controller for Small, Low Cost Multirotor Unmanned Aerial Vehicles”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, v. 74, n. 2, pp. 193-207.
- RAINER, D., 2015, “Rules, Regulations and Codes for Drones, Unmanned Aerial Vehicle, NextGen Air Transportation, Unmanned Air Systems”, *Journal of Chemical Health and Safety*, v. 22, n. 3, pp. 37-39.
- RHYDOLABZ, 2013, *A2212/13T technical data*. Disponível em: http://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf. Acesso em: 11 jun. 2017, 13:58.
- SAKHAROV, V.K., BORISENKO, A.V., 2014, “Photon Dose Accumulation Factor in Concrete, Iron, and Lead for 10–50 MeV Monoenergetic Sources”, *Atomic Energy*, v. 116, n. 3 (Jul), pp. 225-228.
- SASLOW, W.M., 2002, *Electricity, Magnetism, and Light*. 1. Ed. College Station, Academic Press.
- SUFRAMA, 2015, *O que é o Projeto ZFM?*. Superintendência da Zona Franca de Manaus. Disponível em <<http://site.suframa.gov.br/assuntos/modelo-zona-franca-de-manaus/o-que-e-o-projeto-zfm>>. Acesso em 25 nov. 2017.
- VERMILLION, C., GLASS, B., REIN, A., 2013, “Lighter-Than-Air Wind Energy Systems”. In: Ahrens, U., Diehl, M., Roland, S. (eds) *Airbone Wind Energy*, chapter 30, Berlin, Springer.

APÊNDICE A – DADOS DE TESTE DO MOTOR A2212/13T

A Tabela 24 contém os dados de desempenho do motor A2212/13T em testes realizados em bancada no qual são utilizados diferentes tipos de hélices e aplicados diferentes potenciais elétricos ao motor (RHYDOLABZ, 2013).

Tabela 24: Desempenho do motor A2212/13T (RHYDOLABZ, 2013)

Propeller - diam x pit (pol)	Potential Difference (V)	Current (A)	Power (W)	RPM	Speed (mph)	Thrust (g)	RPM as % of Kv*V
8x4	7	3.35	23	6630	25.1	226	88%
8x4	7.9	4.1	32	7410	28.1	287	87%
8x4	8.9	4.85	43	8220	31.1	347	86%
8x4	9.9	5.65	55	8940	33.9	420	84%
8x4	10.9	6.5	70	9660	36.6	495	82%
9x5	6.9	5.5	37	6000	28.4	348	81%
9x5	7.9	6.7	52	6660	31.5	436	78%
9x5	8.9	7.85	69	7290	34.5	526	76%
9x5	9.9	9.25	91	7920	37.5	627	74%
10x5	6.9	7	48	5610	26.6	406	75%
10x5	7.9	8.45	66	6120	29	505	72%
10x5	8.9	9.9	88	6690	31.7	604	70%
10x5	9.9	11.45	113	7170	34	702	67%
10x5	10.9	13	141	7650	36.2	802	65%
10x6	6.9	7.2	49	5610	31.9	424	75%
10x6	7.9	8.7	68	6180	35.1	526	72%
10x6	8.9	10.1	89	6690	38	617	70%
10x6	9.9	11.7	115	7200	40.9	722	67%
10x6	10.9	13.25	144	7680	43.6	817	65%
10x8	10.8	18.2	196	6390	48.4	733	55%

APÊNDICE B – ROTAS TESTE MOTOCICLETA

Os mapas abaixo representam as rotas percorridas em cada uma das 5 viagens elencadas na Tabela 17. Trata-se do teste de velocidade de deslocamento utilizando motocicleta na cidade de Ipatinga-MG.



Figura 46: origem, destino e rota percorrida na viagem 1

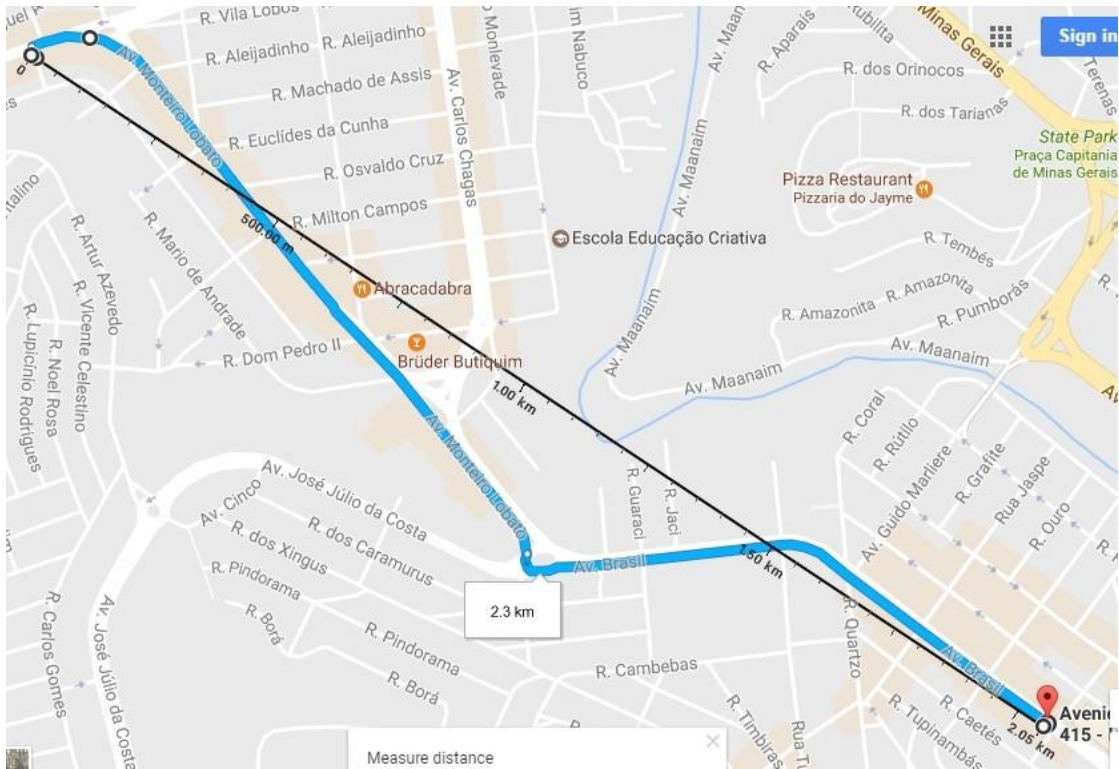


Figura 47: origem, destino e rota percorrida na viagem 2

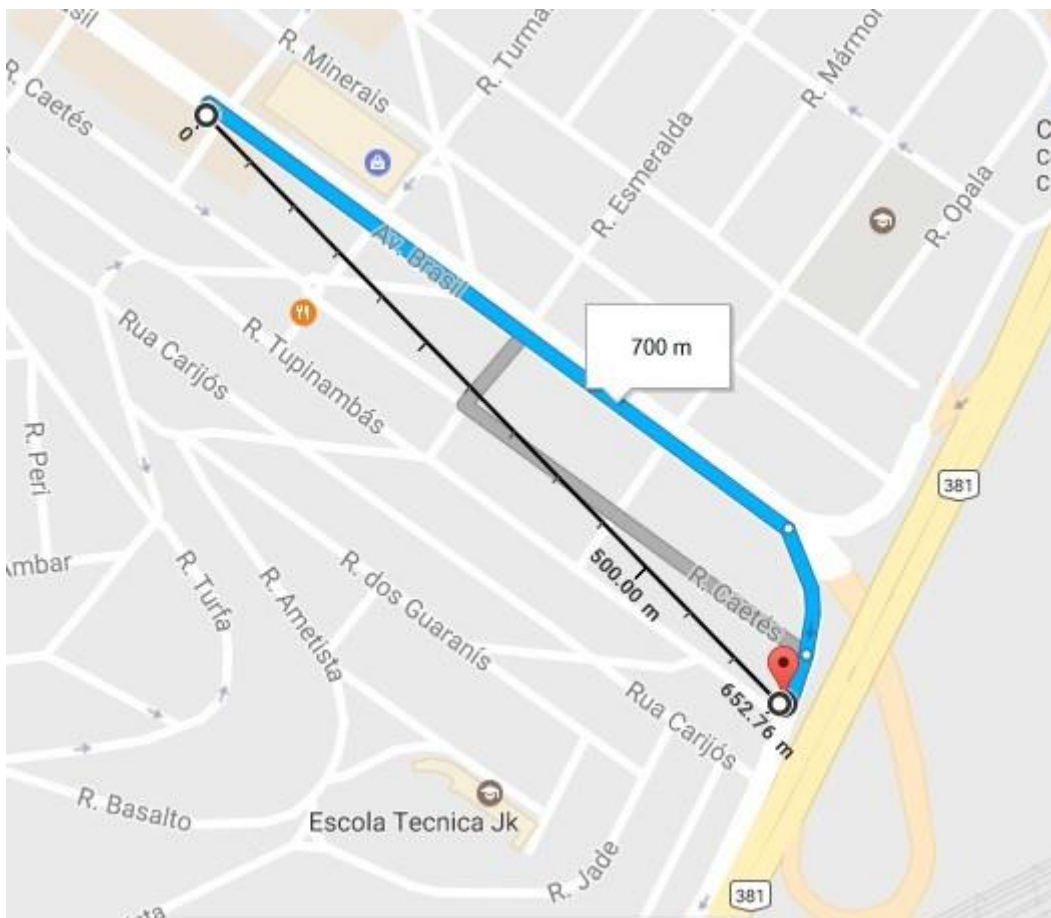


Figura 48: origem, destino e rota percorrida na viagem 3

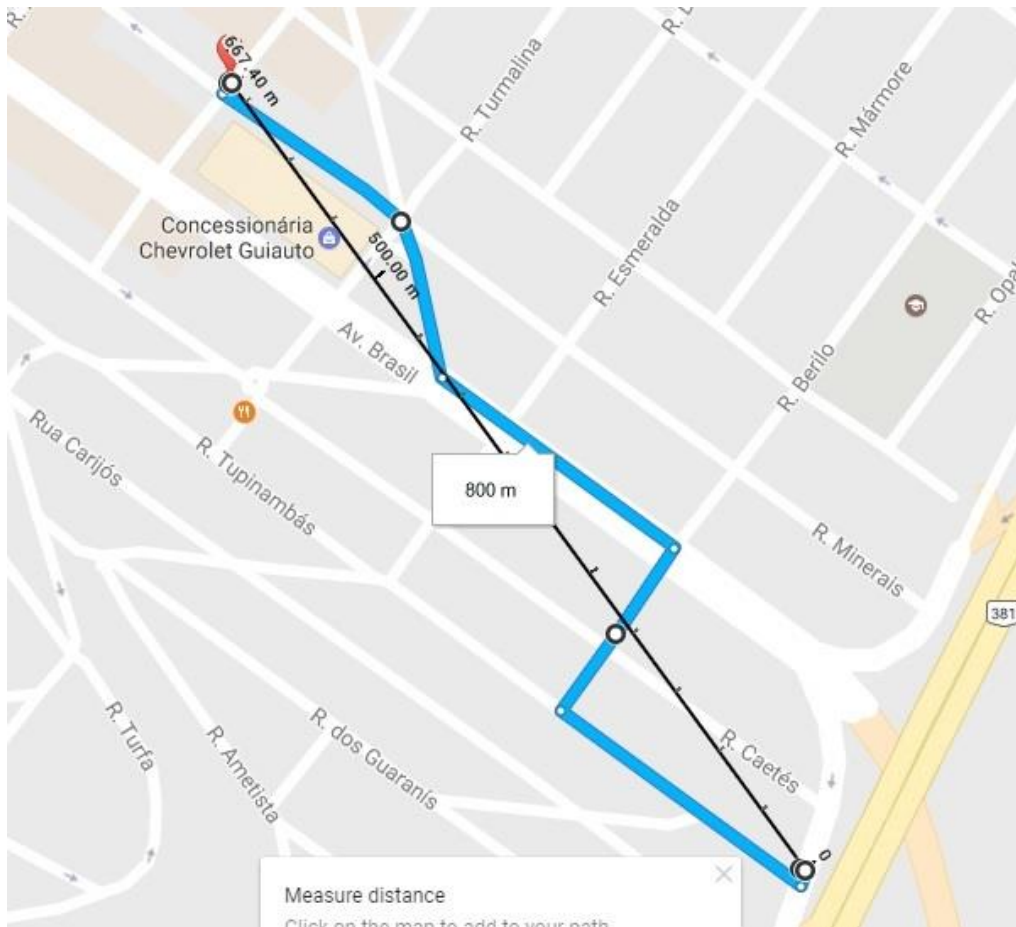


Figura 49: origem, destino e rota percorrida na viagem 4

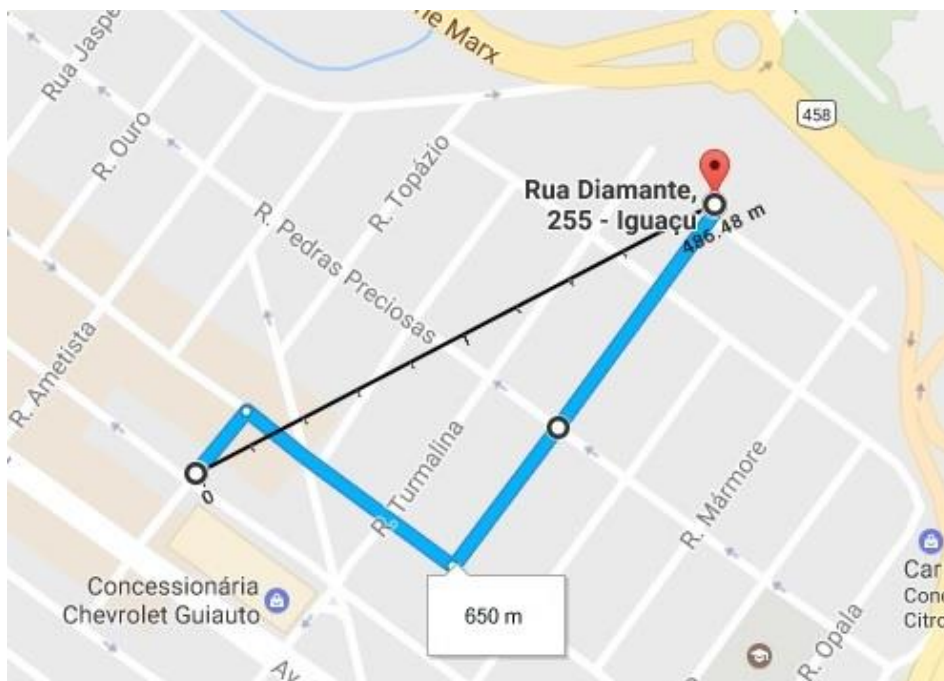


Figura 50: origem, destino e rota percorrida na viagem 5

APÊNDICE C – CONSUMO COMBUSTÍVEL MOTOCICLETA

A Tabela 25 contém os registros de abastecimento e consumo de combustível da motocicleta Honda GC Titan 150 cc ano 2015 de propriedade do autor. Todos os abastecimentos foram devidamente registrados, foram feitos com gasolina C e completando-se o tanque de combustível até o nível máximo recomendado pelo manual do fabricante. Observa-se que a motocicleta consumiu um total de 138 litros de gasolina C para percorrer um total de 5.889 - 3 = 5.886 km, apresentando, portanto, um consumo médio de $5886/138 = 43$ km/l.

Tabela 25: Registros de abastecimento da motocicleta Honda CG Titan 150 modelo 2015 pertencente ao autor

Data abastecimento	Hodômetro (km)	Volume (l)	Consumo (km/l)
13/02/2015	3	14.29	
31/03/2015	441	10.85	40.37
02/06/2015	1054	13.69	44.78
09/07/2015	1631	13.22	43.64
18/08/2015	2127	11.29	43.93
29/09/2015	2630	11.90	42.27
04/11/2015	3200	12.51	45.56
29/02/2016	3736	12.94	41.42
02/09/2016	4261	13.27	39.56
23/05/2017	4791	13.19	40.18
06/08/2017	5318	12.43	42.40
20/09/2017	5889	12.81	44.59
		138	43

APÊNDICE D – FORÇA DE RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DA MOTOCICLETA

Pretende-se demonstrar que o transporte de 20 kg de carga pela motocicleta, conforme Figura 40, implicaria em um aumento de consumo energético menor que 10 %.

Segundo D'Agosto (2015) há basicamente duas forças que se opõem ao movimento de um veículo no plano: a força aerodinâmica e a força de restrição ao rolamento. A força de resistência aerodinâmica (FRA) pode ser calculada como:

$$FRA = \frac{C_a \cdot A \cdot \rho \cdot V^2}{2}$$

onde:

- C_a : coeficiente de resistência aerodinâmica (0,7);
- A : área frontal do conjunto motocicleta-piloto perpendicular ao movimento;
- ρ : massa específica do ar
- V : velocidade do ar paralela ao vetor A .

É interessante observar que a carga, quando transportada na motocicleta, deve ficar atrás do piloto, conforme esquematizado na Figura 40. Dessa forma ao se transportar uma carga não há alteração na área perpendicular ao movimento, de forma que, pela equação apresentada por D'Agosto (2015), não haverá alteração da força aerodinâmica. Considerando que a velocidade do ar V seja a própria velocidade média da moto (7 m/s), a massa específica do ar como 1,2 kg/m³ e a área frontal como 0,75 m² (HONDA, 2014), a força de resistência aerodinâmica para essa configuração é dada por:

$$FRA = \frac{(0,7) \cdot (0,75) \cdot (1,2) \cdot (7)^2}{2}$$
$$FRA = 15,4 \text{ N}$$

A força de resistência ao rolamento (FRR) por sua vez é calculada segundo D'Agosto (2015) por:

$$FRR = \mu_R \cdot P$$

onde:

- μ_R : coeficiente de resistência ao rolamento;
- P: peso total sobre o pavimento.

De acordo com Jazar (2008, p. 123), o coeficiente de resistência ao rolamento para motocicleta pode ser calculado como:

$$\mu_R = \begin{cases} 0,0085 + \frac{1800}{p} + \frac{2,0606}{p} \cdot V^2 & \text{se } V \leq 46 \text{ m/s (165 km/h)} \\ \frac{1800}{p} + \frac{3,7714}{p} \cdot V^2 & \text{se } V > 46 \text{ m/s (165 km/h)} \end{cases}$$

onde:

- p: pressão dos pneus
- V: velocidade da motocicleta

Considerando a velocidade da motocicleta como 7 m/s e a pressão dos pneus como a recomendada pelo fabricante (HONDA, 2014), isto é, 29 *psi* (199.948 N/m²), o coeficiente de resistência ao rolamento será dado por:

$$\mu_R = 0,0085 + \frac{1800}{199948} + \frac{2,0606}{199948} \cdot 7^2$$
$$\mu_R = 0,018$$

Considerando o peso total da motocicleta (motocicleta + piloto + fluidos) como 200 kg sem carga e 220 kg transportando uma carga de 20 kg, de acordo com a equação da força de resistência ao rolamento (FRR), tem-se:

$$FRR_{sem\ carga} = 0,018 \cdot (200) \cdot (9,8)$$

$$FRR_{sem\ carga} = 35,3 \text{ N}$$

$$FRR_{20\ kg\ carga} = 0,018 \cdot (220) \cdot (9,8)$$

$$FRR_{20\ kg\ carga} = 38,8 \text{ N}$$

Assim, a força de resistência ao deslocamento no plano sem carga útil seria 15,4 + 35,3 = 50,8 N e com 20 kg de carga útil seria 15,4 + 38,8 = 54,2 N. Dessa forma, considerando apenas a resistência aerodinâmica e a de rolamento, a energia gasta para um

dado deslocamento ao se transportar 20 kg de carga na motocicleta seria 6,7 % maior em relação a situação sem carga.

Adicionalmente a energia gasta para superar as resistências aerodinâmicas e de rolamento, D'Agosto (2015) menciona que, em um trajeto real, gastar-se-ia também energia para vencer as forças de inércia, centrífuga e gravitacional. Como essas forças são diretamente proporcionais ao peso, um aumento de peso total em 10 % (20 kg), implicaria também em um aumento de gasto energético de 10 % nestas forças.

Portanto, ao transportar uma carga de 20 kg em uma motocicleta cujo peso total inicial era de 200 kg, a parcela de energia gasta para superar as forças de resistência aerodinâmica e de rolamento cresceriam 6,7 % enquanto a energia gasta para vencer as forças de inércia, centrífuga e gravitacional aumentariam 10 %. Ao somar todas as parcelas, implicaria, portanto, em aumento de gasto energético inferior a 10 %.