

# Análise da Frequência Radar na Detecção de um RPA em Função da RCS

Newton A. S. Gomes<sup>1,4</sup>, René L. P. Costa<sup>2</sup>, Igor J. Sleutjes<sup>3</sup>, Renan M. Richter<sup>1</sup> e Maurício R. Baldan<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos/SP - Brasil

<sup>2</sup> Primeiro Esquadrão do Décimo Quinto Grupo de Aviação - 1°/15° GAv, Campo Grande/MS - Brasil

<sup>3</sup> Instituto de Aplicações Operacionais - IAOp, São José dos Campos/SP - Brasil

<sup>4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos/SP - Brasil

**Resumo**— Este artigo apresenta um estudo da predição radar de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) do tipo DJI Phantom. Foram avaliadas as frequências de 1,3 GHz (Banda L), 2,8 GHz (Banda S), 5,3 GHz (Banda C) e 10,0 GHz (Banda X) para a gradação dos respectivos alcances de detecção. Empregou-se o conceito da RCS estática, estimado por simulações eletromagnéticas e posteriormente aplicaram-se os dados na equação radar. Os resultados evidenciam que a frequência de 1,3 GHz gera o maior alcance de detecção do RPA DJI Phantom, sendo 70,5% mais efetiva em relação a frequência de 10,0 GHz que apresentou o menor alcance em relação ao conjunto de frequências avaliadas. Esse trabalho colabora para definir um critério mais técnico para aquisição de radares para detecção de RPA no contexto da segurança de voo e da defesa aérea.

**Palavras-Chave**— RPA, Detecção Radar, RCS.

## I. INTRODUÇÃO

O advento das aeronaves não tripuladas foi revolucionário, tanto em aplicações civis quanto nas militares. No entanto, à medida em que suas demandas aumentam, suas regulamentações e controle ainda carecem de estudos mais técnicos sobre meios e métodos de detecção. Regras para estes sistemas ainda são incipientes e carecem de evolução apropriada com vistas à segurança de voo e defesa aérea.

O presente trabalho traz uma metodologia de geração de critério, no intuito de avaliar a aplicabilidade do uso de frequências de micro-ondas para a detecção radar de um conjunto de RPA (*Remotely Piloted Aircraft* - Aeronave Remotamente Pilotada) baseada no conceito de RCS (*Radar Cross Section* - Seção Reta Radar) [1].

Na seção II é apresentada a fundamentação teórica do conceito de uma aeronave remotamente pilotada, o processo de detecção e a equação radar condicionada a RCS da aeronave. Na seção III é discutida a definição do RPA e a sua modelagem computacional. Na seção IV é apresentado a RCS do RPA em função das frequências e a predição do alcance radar. Ao final, é apresentada a conclusão deste trabalho.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Aeronaves Remotamente Pilotadas - RPA

As primeiras aeronaves não tripuladas foram desenvolvidas pela Alemanha, nos anos 1940 do século XX, conhecidas como bombas voadoras do tipo V-1, para serem empregadas contra a Inglaterra como um armamento aéreo. Nos anos

1970, o engenheiro espacial israelense Abraham (Abe) Karem, construiu o *Albatross* utilizando fibra de vidro e madeira, que posteriormente teve melhorias em suas baterias recebendo financiamento da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), sendo chamado de *Amber*, Fig. 1. Esses estudos deram origem ao que viria a ser a aeronave MQ-1 *Predator* empregada pelas forças militares dos EUA [2].



Fig. 1. Aeronave *Amber* desenvolvida como protótipo do MQ-1 *Predator* [2].

Na sua gênese, o desenvolvimento dessas aeronaves tinha o objetivo de terem aplicações militares, tendo como intuito a execução de atividades em que poderiam haver riscos a vida humana, como monitoramento de áreas específicas gerando uma segurança a toda uma guarnição de uma base aérea, por exemplo. Uma característica importante é que essas aeronaves podem executar o voo, sendo controladas por sistemas de rádio frequência e posteriormente serem recuperadas, retornando para a sua origem de decolagem ou um outro local pré-determinado para seu pouso.

No Brasil, essas aeronaves são utilizadas em vários tipos de aplicações, tanto comerciais, quanto pessoais e militares. Conforme o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que tem por missão planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas ao controle do espaço aéreo, à proteção ao voo, ao serviço de busca e salvamento e às telecomunicações do Comando da Aeronáutica, o uso do termo VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado) é considerado obsoleto pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), sendo o termo RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) o atualmente padronizado internacionalmente e adotado pelo DECEA [3].

Em algumas situações, está sendo empregado o termo SARP (Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada), contudo existe um acrônimo de *Standard and Recommended Procedures* que representa uma padronização internacional para orien-

tações emitidas ao segmento aeronáutico pela OACI levando assim a uma confusão no uso dos termos na fraseologia, desta forma o DECEA adotou a sigla RPA como o termo aeronáutico para esse tipo de aeronave [4].

### B. Processo de Detecção de Ameaças

No contexto de realizar a defesa aérea em contraposição a uma ameaça representada por um ou conjunto de RPAs, baseado na classificação apresentada pela OTAN (Organização do Tratado do Atlântico Norte) [5], Tabela I, e combinando o conjunto de prováveis empregos operacionais baseado nas Ações de Força Aérea, no contexto do Poder Aeroespacial, como preconiza na DCA 1-1/2020 - Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira, é necessário observar, dissuadir, negar, desviar, neutralizar e destruir qualquer ameaça que possa ser eminente no espaço aéreo sob jurisdição da FAB (Força Aérea Brasileira) [6].

TABELA I  
CLASSIFICAÇÃO DE RPA PELA OTAN

Tipo	Categoria	Altitude	Alcance operacional
Classe III	Estratégico	até 65.000 ft	ilimitado
	Operacional	até 45.000 ft	ilimitado
Classe II	Tático	até 10.000 ft	125 NM
Classe I	Pequeno (> 20Kg)	até 5.000 ft	31 NM
	Mini (2Kg à 20Kg)	até 3.000 ft	15 NM
	Micro (< 2Kg)	até 200 ft	3,1 NM

No intuito de executar essas premissas, quando contextualizado para alvos do tipo RPA, é necessário que seja cumprido um ciclo de atividades no intuito de viabilizar essa Ação de Força Aérea, conforme a Fig. 2.



Fig. 2. Ciclo de execução para incapacitar uma ameaça [7].

Nesse contexto, o ciclo inicia com a detecção, seguida pela identificação, posteriormente por sua classificação e por último, a sua neutralização. O processo de detecção e identificação são ações definidas pelo uso de sensores capazes de realizar essas tarefas, setorizado para sistemas de guerra eletrônica. O processo de classificação está correlacionado ao comando e controle bem como a ação de neutralização a um sistemas de armas coordenado aos outros sistemas já descritos [7].

Fica evidenciado que o processo de detecção é vital para que o ciclo possa ocorrer até a obtenção da neutralização da ameaça, que no caso deste trabalho é um RPA.

1) *Sistemas de Detecção*: Os RPAs tem sido empregados em cenários bélicos no século XXI e há uma tendência de aumentar a sua participação em futuros conflitos em vários níveis de emprego. A indústria de Defesa, mundialmente, tem desenvolvido métodos para permitir uma melhor detecção de alvos nas diversas faixas do espectro eletromagnético, podendo utilizar sistemas radar, sistemas passivo de RF, sistemas eletro-ópticos na faixa do visível (EO) e infravermelho (IR) e sistemas acústicos. Cada sistema possui suas vantagens e desvantagens, contudo, esse trabalho objetivou o sistema radar em função de já existirem soluções implantadas nas frequências em estudo [7].

### C. Equação Radar e a Radar Cross Section (RCS)

O conceito do radar está associado à propagação de ondas eletromagnéticas que foram desenvolvidas a partir dos estudos do físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, em 1883, onde aplicou a eletrodinâmica clássica das equações de Maxwell [8].

Um sistema radar básico é composto por um transmissor, um receptor e uma antena, sendo emitido um conjunto de sinais pulsados em micro-ondas, onde a energia eletromagnética transmitida pela antena é definida pelo vetor de *Poynting* ( $\vec{S}$ ) apresentado em (1) [1].

$$\vec{S}(r, \theta, \phi) = \vec{E}(r, \theta, \phi) \times \vec{H}(r, \theta, \phi) \quad (1)$$

O vetor de *Poynting* corresponde a densidade direcional do fluxo de energia transferida por unidade de área,  $W/m^2$ , de um campo eletromagnético em um determinado volume no espaço, em uma determinada frequência [9]. O princípio de funcionamento do radar corresponde a detecção do fluxo de energia espalhado pelo alvo que foi recebido pelo receptor radar, sendo definido uma distância máxima entre esse alvo e o radar por (2).

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_B T_e B W F (SNR_o)_{min}}} \quad (2)$$

Nesta condição, o alcance radar está formatado para parâmetros inerentes às características do radar a ser operado, como amplificador de potência de transmissão ( $P_t$ ), o ganho da antena ( $G$ ), o comprimento de onda eletromagnética emitida ( $\lambda$ ) em função da frequência de operação, a temperatura de operação do sistema ( $T_e$ ), a largura de banda do receptor radar ( $BW$ ), a figura de ruído do receptor ( $F$ ) e a relação sinal-ruído do receptor ( $SNR_o$ ). A única variável que não depende do sistema radar é a RCS do alvo,  $\sigma$  [1].

$$\sigma(\theta, \phi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{\vec{E}_s(r, \theta, \phi)}{\vec{E}_i(r, \theta, \phi)} \right|^2 \quad (3)$$

Conforme em (3), a RCS ( $\sigma$ ) corresponde a relação entre o campo elétrico espalhado pelo alvo ( $\vec{E}_s$ ) e o campo elétrico incidente pelo radar ( $\vec{E}_i$ ) em função dos ângulos azimutais ( $\phi$ ) e de elevação ( $\theta$ ). O valor da RCS em (3) é dado em  $m^2$ , mas se utiliza esse valor também em  $dBsm$ , definido por (4). Os valores da RCS, quando estão abaixo de  $1m^2$ , são normalmente empregados na unidade de  $dBsm$ . Este trabalho utiliza os valores da RCS em  $m^2$  e  $dBsm$  [1].

$$\sigma = 10 \cdot \log_{10}(\sigma [m^2]) [dBsm] \quad (4)$$

## III. MATERIAIS E MÉTODOS

### A. Definição do RPA para a Modelagem

As aeronaves remotamente pilotadas são apresentadas em 2 configurações, uma na forma de asa fixa e outra, na forma de asa rotativa. Tendo como referência a classificação de RPA definido pela OTAN, Tabela I, os RPAs classe III e II possuem características mais semelhantes a uma aeronave tripulada [10] e sua detecção radar deve ter uma maior probabilidade de ocorrer em detrimento dos RPAs da classe I.

Em função desta condição, foi escolhido um RPA classe I na forma de asa rotativa do tipo quadricóptero, por se tratar

de aeronaves mais comuns de serem encontradas no Brasil, podendo ser empregadas para uso civil ou militar.

O RPA avaliado é uma versão do modelo DJI *Phantom* que possui um peso de 1,388 kg, sendo classificado na classe I pela OTAN. O CAD (*Computer Aided Design*) foi modelado geometricamente pelo software *FreeCAD* nas dimensões de 472,57 mm de comprimento na diagonal e 211,95 mm de altura, Fig. 3.

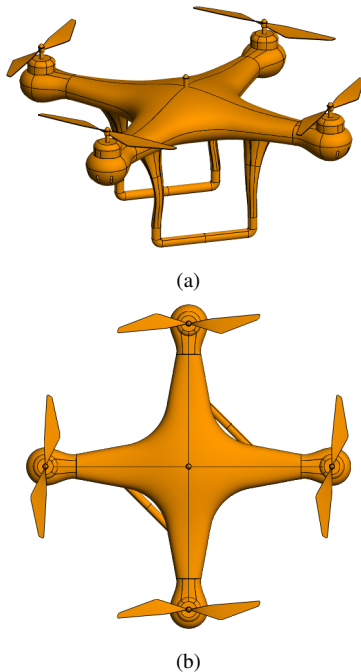


Fig. 3. (a) - Visão em perspectiva do RPA DJI *Phantom*. (b) - Visão de topo do RPA DJI *Phantom*.

### B. Modelagem e Simulação do RPA DJI *Phantom*

O estudo da RCS de alvos complexos, como é o caso de um RPA, é realizado através de medidas eletromagnéticas em uma câmara anecoica ou empregando métodos computacionais numéricos utilizando softwares específicos bem como uma estrutura computacional dedicada para essa finalidade [11].

O software utilizado no estudo é o FEKO da empresa ALTAIR, sendo aplicado o método assintótico *physical optics* com discretizações de  $\lambda/8$  do CAD. Todas as modelagens e simulações utilizaram uma máquina Intel Xeon E-2246 com 12 núcleos e uma memória RAM de 64 GB.

O RPA sob estudo neste trabalho, bem como muitos outros RPAs comerciais, são construídos por materiais plásticos do tipo ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* - Acrilonitrila Butadieno Estireno) com poucos componentes metálicos em sua estrutura [12], contudo, pelo fato de não se ter amostras do material para avaliar as suas permissividades elétricas ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e devido ao fato de se desejar compreender o efeito das geometrias do RPA em estudo, foi definido que as estruturas físicas são modeladas com materiais condutores metálicos, conhecidos na literatura como PEC (*Perfect Electric Conductor*). Esta condição permitirá que seja analisado a condição de melhor caso para a detecção por parte do radar em todas as frequências a serem adotadas nas simulações.

Avaliando os tipos de radares primários utilizados mundialmente para uso no controle de tráfego aéreo, defesa aérea e

possíveis soluções comerciais para detecção de RPA empregando a faixa de micro-ondas, foram definidas as frequências para as simulações eletromagnéticas, conforme a Tabela II.

TABELA II  
FREQUÊNCIAS UTILIZADAS NOS PROCESSOS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Radar	Frequência [GHz]
Banda L	1,3
Banda S	2,8
Banda C	5,3
Banda X	10,0

Os radares monoestáticos alocados no solo, podem ter uma rotação mecânica em torno do seu eixo. Outra condição são suas antenas fixas mecanicamente, tendo uma varredura eletrônica, no caso, um radar *phased-array* [13] ou uma combinação de uma rotação mecânica em seu próprio eixo e uma varredura eletrônica.

No FEKO, a modelagem do engajamento radar é realizado na forma como é definido os ângulos  $\phi$  e  $\theta$  em uma calota esférica. Os radares de solo, normalmente, possuem uma abertura de feixe vertical no valor de  $30^\circ$ , o que defini uma alocação de  $90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  para o ângulo de elevação e de  $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$  para os ângulos azimutais. Na Fig. 5 é apresentado a representação de engajamento dos vetores de *Poynting*  $\vec{S}$  e do campo elétrico  $\vec{E}$ , que no caso será na polarização horizontal, do tipo HH, que corresponde em emitir a onda eletromagnética na polarização horizontal e detectar a onda espalhada originada do alvo na polarização horizontal. Essa condição é a mais empregada em radares com aplicação para tráfego aéreo e defesa aérea.

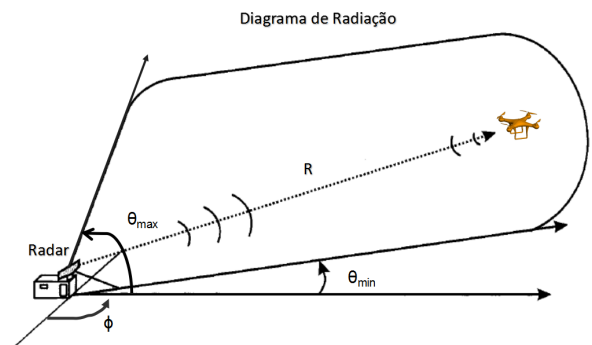


Fig. 4. Metodologia de engajamento do radar a um RPA, em coordenada esférica nos ângulos phi ( $\phi$ ) azimutais e theta ( $\theta$ ) de elevação do diagrama de radiação da antena, definindo o alcance radar R entre o radar e o alvo [14].

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### A. RCS do RPA DJI *Phantom*

Conforme a Fig. 5, o RPA está na linha de visada do radar, sendo inicialmente avaliado a RCS com um feixe radar no ângulo de  $\theta = 90^\circ$  e um  $\phi$  qualquer entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . Esses resultados, na forma polar, são apresentados nas Fig. 6 (banda L), 7 (banda S), 8 (banda C) e 9 (banda X).

Essas condições são repetidas para os ângulos de elevação  $90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$  com passos de 1 grau. Foi realizado o cálculo da RCS média ( $\bar{\sigma}$ ) na condição de  $0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$  para os

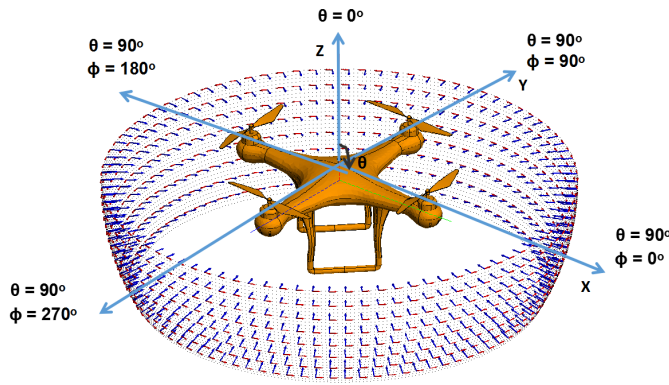


Fig. 5. Visão em perspectiva do RPA definindo o engajamento radar modelado no FEKO.

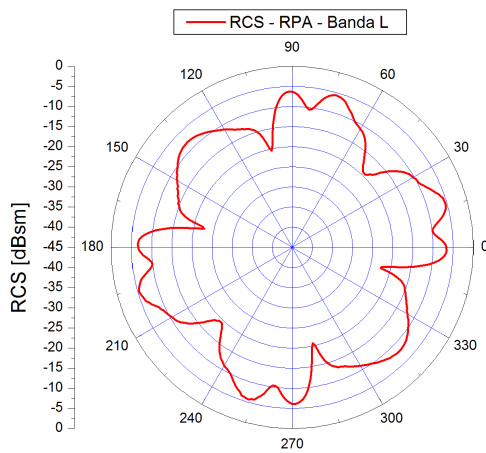


Fig. 6. RCS do RPA, em dBsm, em 1,3 GHz na forma polar com  $\theta = 90^\circ$ .

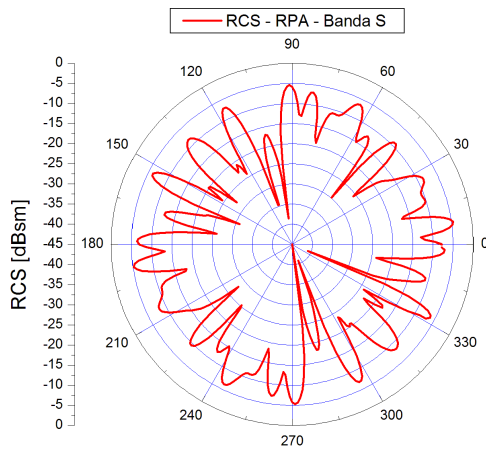


Fig. 7. RCS do RPA, em dBsm, em 2,8 GHz na forma polar com  $\theta = 90^\circ$ .

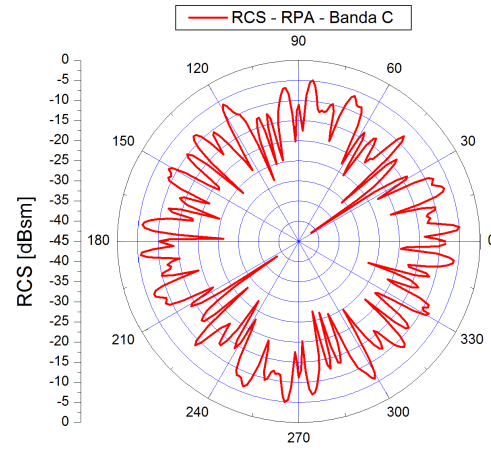


Fig. 8. RCS do RPA, em dBsm, em 5,3 GHz na forma polar com  $\theta = 90^\circ$ .

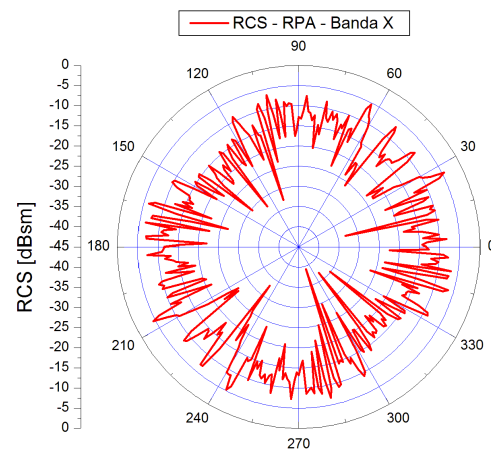


Fig. 9. RCS do RPA, em dBsm, em 10 GHz na forma polar com  $\theta = 90^\circ$ .

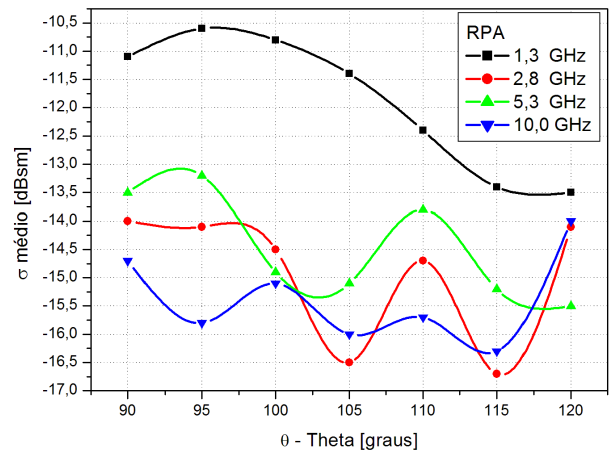


Fig. 10. RCS média do RPA, em dBsm, nos ângulos  $\theta$  nos valores de  $90^\circ$  a  $120^\circ$ , nas bandas L (1,3 GHz), S (2,8 GHz), C (5,3 GHz) e X (10,0 GHz).

ângulos  $\theta$  nos valores de  $90^\circ$ ,  $95^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $115^\circ$  e  $120^\circ$ , Fig. 10.

Conforme a Fig. 10, um radar operando na banda L, na frequência de 1,3 GHz, a RCS média dos ângulos azimutais são maiores que as RCS médias nas frequências na banda S, C e X.

As frequências de banda S, C e X possuem RCS médias muito próximas, sendo as de banda S e X se alternando nos ângulos  $\theta$  tendo os menores valores. Os valores das RCS

se aproximam da banda L quando o ângulo  $\theta$  se aproxima de  $120^\circ$ , que representa o RPA voando em aproximação ao radar e com elevada altitude. Na Tabela III é apresentado uma síntese das RCS em função da frequência aplicada sobre o

RPA DJI *Phantom*.

TABELA III  
VALORES DA RCS MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DO RPA DJI *Phantom*

Frequência [GHz]	$\bar{\sigma} \pm \Delta\sigma$ [dBsm]
1,3	-11,9 $\pm$ 3,3
2,8	-14,9 $\pm$ 6,0
5,3	-14,5 $\pm$ 5,6
10,0	-15,4 $\pm$ 5,5

Esse conjunto de simulações tiveram um custo computacional na sua execução, sendo apenas mensuradas o tempo de cálculo numérico e não contabilizado os tempos de preparo do CAD, desenvolvimento da modelagem e síntese dos resultados. A mensuração temporal despendido é apresentado na Tabela IV, tendo um total de 7d 15h 23min.

TABELA IV  
TEMPO DE CÁLCULO NUMÉRICO PARA O RPA NA FREQUÊNCIA RADAR EM ESTUDO

Frequência [GHz]	Tempo
1,3	2d 19h 51min
2,8	6h 25min
5,3	17h 27min
10,0	3d 19h 40min
Total	7d 15h 23min

### B. Predição do Alcance Radar

Na subseção IV-A foi obtido um conjunto de resultados das RCS do RPA em várias condições de ângulos de azimute  $\phi$  e elevação  $\theta$ , em função das frequências escolhidas para as modelagens e simulações. Esses resultados representam a RCS estática pois não é tratado a condição dinâmica de voo dos RPA. Caso tivesse sido tratada uma trajetória de voo em função de uma posição e velocidades, as RCS teriam um comportamento que se chama de RCS dinâmica [15].

A definição da melhor frequência para detectar o RPA é empregada a determinação do alcance máximo médio  $R_{max}$ , aplicando as RCS médias por frequência para o RPA. Conforme em (2), o alcance do alvo pode ser reescrito por (5).

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2}{(4\pi)^3 k_B T_e B W F (SNR_o)_{min}}} \cdot \sqrt[4]{\lambda^2 \sigma} \quad (5)$$

Em (5), o termo que depende do tipo do radar empregado pode ser sintetizado por uma constante  $k$ , definido em (6).

$$k = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2}{(4\pi)^3 k_B T_e B W F (SNR_o)_{min}}} \quad (6)$$

Nessa condição, (5) é sintetizado em (7).

$$R_{max} = k \cdot \sqrt[4]{\lambda^2 \cdot \sigma} \quad (7)$$

Esse estudo visa avaliar qual ou quais frequências permitem definir um maior alcance ( $R_{max}$ ) de detecção. Nessa condição, mesmo havendo vários tipos de radares em função das frequências, é empregado um radar hipotético em todas as frequências, para teste, no sentido de obter os valores de  $R_{max}$  médio para o RPA, variando os valores de  $\theta$  e as frequências de operação.

Na Tabela V são expressos os valores nominais das variáveis de um radar que será substituído em (6). Realizadas as conversões de unidades e o cálculo numérico em (6), é obtido um  $k = 34.513, 21$ . Essa constante representa a síntese deste radar hipotético para ser aplicado no RPA.

TABELA V  
VALORES DE UM RADAR HIPOTÉTICO PARA O ESTUDO DO ALCANCE RADAR

$P_t$ [W]	$G$ [dB]	$T$ [K]	$BW$ [Hz]	$F$ [dB]	$(SNR_o)_{min}$
$500 \times 10^3$	33	323	$1 \times 10^6$	3	16

Na Fig. 10, é apresentada a RCS média do RPA, em função das frequências. Ao aplicar esse valores em (7), são obtidos os alcances médios máximos para o RPA, Fig. 11.

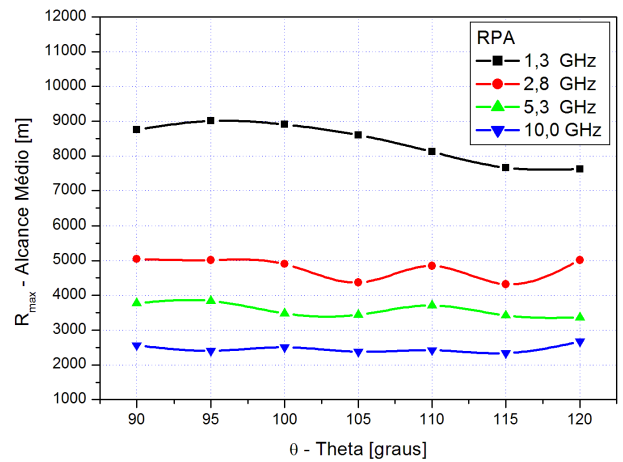


Fig. 11. Alcance médio do RPA, em metros, nos ângulos  $\theta$  nos valores de  $90^\circ$  a  $120^\circ$ , nas bandas L (1,3 GHz), S (2,8 GHz), C (5,3 GHz) e X (10,0 GHz).

Esses resultados são sintetizados com as médias dos alcances em função dos ângulos  $\theta$  na Tabela VI.

TABELA VI  
VALORES DO ALCANCE MÉDIO DE DETECÇÃO EMPREGANDO O MODELO DO RADAR HIPOTÉTICO

Frequência [GHz]	$\bar{R} \pm \Delta R$ [m]	$\bar{R} \pm \Delta R$ [NM]
1,3	8.381,7 $\pm$ 578,2	4,5 $\pm$ 0,3
2,8	4.788,6 $\pm$ 311,6	2,6 $\pm$ 0,2
5,3	3.577,0 $\pm$ 192,5	1,9 $\pm$ 0,1
10,0	2.469,8 $\pm$ 116,9	1,3 $\pm$ 0,1

Considerando os dados obtidos para o alcance radar médio do RPA da Tabela VI, a banda L apresenta o maior alcance médio estimado dentre todas as bandas avaliadas, no valor de 8.381,7 m (4,5 NM). Definindo esse valor como referência, e tendo as outras bandas emitindo simultaneamente ao RPA, o alcance em banda S em relação a banda L é reduzido no valor de 42,8%, empregando a banda C a redução é de 57,3% e na banda X essa redução chega ao valor de 70,5%.

Essa condição permitiu inferir que a banda L, em 1,3 GHz, representa a frequência mais adequada para obter a aquisição do RPA em detrimento das outras frequências estudadas.

Esse estudo não avalia as perdas de propagação, nem a variação da largura de pulso (LP), a frequência de repetição de

pulso (FRP), bem como os diagramas de radiação das antenas para a definição das células de resolução. Contudo, todos esses termos estão implícitos e tendo valores constantes quando é definido o radar hipotético, desta forma, o tipo do radar se torna isento da análise, sendo avaliado as condições do alvo sob o critério da sua RCS em uma determinada frequência de operação.

Fica evidenciado, através das simulações, que nas condições estudadas, as RCS do RPA possuem valores abaixo de 0 dBsm ( $1 \text{ m}^2$ ). Esses resultados são observados em todas as variações de frequência, banda L, S, C e X, nos ângulos de azimute  $\phi$  e ângulos de elevação  $\theta$ . Comparado a valores da RCS de uma aeronave militar que foi medido em apenas um ângulo de elevação [16], há uma correlação entre esses resultados com os valores publicados na literatura por outros grupos de pesquisa, onde apresenta um valor médio de -20 dBsm ( $0,01 \text{ m}^2$ ). A RCS média do RPA é apresentado, em todas frequências do estudo, com uma variação de -10,6 dBsm ( $0,09 \text{ m}^2$ ) à -16,7 dBsm ( $0,02 \text{ m}^2$ ).

Ao avaliar esses dados, os resultados obtidos nas simulações realizadas nesse trabalho, quando comparados com Schroder *et al.* [12] e Tasai *et al.* [17], permitem afirmar que o método é confiável e que esses valores das RCS estão correlacionados com medidas experimentais, validando os dados obtidos nessa pesquisa.

No caso do uso de um radar banda X, observou-se que as RCS nessa frequência, Fig. 9, possuem uma cintilação acentuada em todos ângulos azimutais, o que é bem menos evidente na banda L. Essa condição, quando analisada dinamicamente, caracteriza um alvo com uma perda elevada de detecção em função do tempo, dificultando a sua designação por um operador radar.

## V. CONCLUSÃO

Na busca das melhores frequências, a banda L, nas condições de engajamento do RPA do tipo DJI *Phantom*, representa um maior alcance de detecção, sendo a mais indicada para obter um rastreamento desse tipo de alvo a uma maior distância. As outras frequências avaliadas não estão inabilitadas para aquisição desse alvo, contudo, terão um alcance degradado em relação a banda L, principalmente a banda X, sendo obtido um valor de 70,5%.

Baseado nos resultados desse trabalho, desenvolver o uso conjugado de mais de uma banda de frequência é desejável, quando se opta por uma combinação de alcances simultaneamente, contudo, a priorização da escolha das frequência devem estar na de maior alcance para as de menor alcance.

Esse trabalho apresenta um estudo do RPA do tipo DJI *Phantom* sendo determinado a RCS e a frequência que permite haver um maior alcance de detecção na faixa de micro-ondas, contribuindo para estabelecer uma melhor entendimento sobre esse tema, sendo definido um critério mais técnico para aquisição de radares para detecção de RPA no contexto da segurança de voo e da defesa aérea.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do INPE, pelo uso das suas instalações computacionais e a empresa ALTAIR pelo possibilidade de utilização do software FEKO nas modelagens e simulações eletromagnéticas.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tully, *Radar Cross Section*. SciTech Publishing, 2004.
- [2] DARPA, "Uav," Disponível em: <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/amber-predator-global-hawk-predator>. Acesso em: 18 outubro 2021, 2021.
- [3] BRASIL, **ICA 100-40 - Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. Brasília, DF: DECEA, 2020.
- [4] DECEA, "Qual a diferença entre drone, vant e rpas?" Disponível em: <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/qual-a-diferenca-entre-drone-vant-e-rpas/>. Acesso em: 18 outubro 2021, 2021.
- [5] JAPCC, **Strategic Concept of Employment - for Unmanned Aircraft Systems in NATO**. Germany: Joint Air Power Competence Centre, 2010.
- [6] EMAER, **DCA 1-1 - Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira**. Brasília: Comando da Aeronáutica, 2020.
- [7] DHS, **Counter-Unmanned Aircraft Systems - Technology Guide**. U.S.A.: Department of Homeland Security - Science and Technology, 2020.
- [8] D. J. Griffiths, *Eletrodinâmica*, 3rd ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- [9] C. Balanis, *Teoria de Antenas*. Rio de Janeiro: LTC, 2009, vol. 1.
- [10] K. Zikidis, A. Skondras, and C. Tokas, "Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-stealth Technologies," *Journal of Computations & Modelling*, vol. 4, no. 1, pp. 129–165, 2014.
- [11] M. Ezuma, C. K. Anjinappa, M. Funderburk, and I. Guvenc, "Radar Cross Section Based Statistical Recognition of UAVs at Microwave Frequencies," *arXiv preprint arXiv:2102.11954*, 2021.
- [12] A. Schroder, M. Renker, U. Aulenbacher, A. Murk, U. Boniger, R. Oechslein, and P. Wellig, "Numerical and Experimental Radar Cross Section Analysis of the Quadcopter DJI Phantom 2," in *2015 IEEE Radar Conference*. IEEE, 2015, pp. 463–468.
- [13] A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney, and W. E. Courtney, "The Development of Phased-array Radar Technology," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 321–340, 2000.
- [14] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems*. SciTech Publishing, 2006.
- [15] R. Richter and N. A. Gomes, "A-4 Skyhawk Aircraft Stealth Capacity Against L-Band Radar Based on Dynamic Target Detection," in *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [16] P. Touzopoulos, D. Boviatisis, and K. C. Zikidis, "3D Modelling of Potential Targets for the Purpose of Radar Cross Section (RCS) Prediction: Based on 2D Images and Open Source Data," in *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. IEEE, 2017, pp. 636–642.
- [17] C.-C. Tsai, C.-T. Chiang, and W.-J. Liao, "Radar Cross Section Measurement of Unmanned Aerial Vehicles," in *2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*. IEEE, 2016, pp. 1–3.