



Relatório Parcial

Título do projeto de pesquisa: *Matrizes de Transformação Linear para Análise de Assinaturas Radar Multimodal Micro-Doppler de Estruturas AeroEspaciais*

Bolsista: Ana Luiza Bastos Barbosa Guimarães da Silva,
Física – UNESP

Orientador(a): Márcio Vinicius Perassoli, 1º Ten Eng,
ASD/IAE/DCTA

Período a que se refere o relatório: Janeiro de 2015 a Julho de 2015

Resumo

Este trabalho se insere no projeto da Divisão de Sistemas de Defesa (ASD) o qual visa desenvolver ferramentas matemáticas que auxiliem na determinação das frequências micro-Doppler de pontos devidamente selecionados de uma estrutura vibrante excitada por fontes acústicas ou de Rádio Frequência (RF) ou a partir de carregamentos aerodinâmicos. O modelo matemático é implementado utilizando a plataforma MATLAB®. A principal contribuição deste trabalho é viabilizar a realização das análises pretendidas pelo grupo de trabalho a partir de diferentes sistemas de referência. Nesta fase de desenvolvimento do trabalho foi dado ênfase na análise Doppler de um sistema dinâmico simplificado constituído de um paraquedas submetido a um carregamento aerodinâmico em túnel de vento.

1. Introdução

Assinaturas radar podem ser utilizadas como poderosas ferramentas para detectar e identificar objetos desconhecidos através de paredes de prédio, árvores e outros materiais opacos. Pode-se dizer que se trata de uma técnica de vital importância em missões de resgate em desastres naturais, vigilância (área de defesa) e reconhecimento em ambientes urbanos. Dentre estas assinaturas, destacam-se as assinaturas micro-Doppler. Entre os exemplos de aplicação, destacam-se: num cenário de vigilância, além do mapeamento das posições dos

invasores, é possível avaliar se os mesmos estão carregando armas assim como o estado emocional da pessoa, detectado a partir do batimento cardíaco; em aplicações de resgate, as emissões Doppler produzidas pelos sinais vitais das vítimas podem informar onde as mesmas se encontram e se essas estão vivas; em estudos aeroelásticos de superfícies aeronáuticas.

Muito embora esta tecnologia seja bastante desenvolvida em países como Israel, Inglaterra e Estados Unidos, o desenvolvimento da obtenção da assinatura radar micro-Doppler aplicada nas áreas aeroespacial e defesa é recente no Brasil. Os custos envolvidos na implementação de laboratórios são relativamente caros e muitos dos aspectos teóricos ainda não são dominados. Neste contexto, o grupo de trabalho da Divisão de Sistemas de Defesa vem desenvolvendo ferramentas teóricas que permitem, dentro de certas restrições, o estudo de assinaturas radar micro-doppler a partir de radares (multiestáticos e multimodais) para a classificação automática de alvos estáticos e aéreos. Essencialmente, o objetivo do grupo de trabalho é desenvolver uma ferramenta de engenharia que permita detectar e identificar o movimento de corpos atrás de obstáculos através de assinaturas radar. Tendo em vista a natureza multidisciplinar do projeto (Mecânica, Elétrica e Computacional), a equipe de execução do referido projeto delimitou o escopo de atividades desta primeira fase de desenvolvimento nas seguintes metas:

- I. Desenvolvimento de um modelo matemático que represente as atenuações do sinal radar refletido considerando perdas associadas ao meio de propagação, reflexões e outras impedâncias.
- II. Obtenção experimental de assinaturas radar de corpos localizados atrás de obstáculos.
- III. Desenvolvimento de um código computacional que analise os sinais refletidos e disponibilize as assinaturas radar provenientes de um equipamento de ultra larga banda (Radar UWB). Com estas assinaturas é possível capturar características do objeto em análise que incluem a visualização do movimento de partes do corpo localizado atrás do obstáculo a partir da análise espectral.
- IV. Desenvolvimento de um código computacional que descreva o ambiente situacional (distância entre pessoas e espaço transcorrido pelas mesmas) dentro de uma sala confinada iluminada por radar UWB.

Este projeto de pesquisa PIBIC se insere nos itens I e IV, supramencionados.



1.1 Objetivos

- i. Definição de caso estudo para posterior análise Doppler;
- ii. Implementação numérica do modelo matemático desenvolvido no item *i*;
- iii. Determinação das frequências micro-Doppler de pontos devidamente selecionados da estrutura vibrante excitada por carregamentos aerodinâmicos

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho são utilizadas literaturas técnicas no estudo de mísseis que utilizam radar em seu sistema de guiamento, referências técnicas na área de aeroelasticidade e dinâmica de paraquedas, e referências específicas associadas à tecnologia Micro-Doppler e Radio Frequência (RF). É utilizado o *software* MATLAB® na implementação numérica do modelo matemático desenvolvido e na visualização dos respectivos resultados.

3. Desenvolvimento Realizado no Semestre: Jan 2015 - Jul 2015

O desenvolvimento deste trabalho neste semestre foi organizado nos seguintes tópicos:

- i. Levantamento de bibliografia relacionada a paraquedas e tecnologia Doppler;
- ii. Resolução numérica do problema estrutural definido pelo grupo de trabalho, e
- iii. Introdução à Análise Doppler do problema selecionado.

O item (*i*) utilizou como referência principal o livro de Mahafza e Elsherbeni (2000), Nussenzveig (2002) e Perassoli (2013). A partir destas referências foi possível entender os conceitos básicos de Radar e Frequência Doppler. Nesta fase de desenvolvimento do projeto foi dado ênfase ao estudo da linguagem de programação MATLAB® aplicada à resolução de sistemas de equações diferenciais ordinárias (EDO). O estudo do problema estrutural estabelecido pelo grupo de trabalho foi baseado nas referências ESDU 09012 e Silva, 2015.

3.1 Descrição do Problema Estrutural

Os grupos de trabalho da Subdiretoria de Espaço (SESP-PE) e Divisão de Sistemas de Defesa (ASD) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) estão desenvolvendo o projeto Módulo de Recuperação de Cargas Espaciais por Paraquedas (MRCEP). Este projeto será embarcado no veículo VS30-Órion e tem como objetivo recuperar sua carga útil. Entre as principais necessidades de projeto desta linha de pesquisa destacam-se a estimativa das cargas verificadas no processo de abertura dos paraquedas que constituem o MRCEP e as características de estabilidade dos referidos paraquedas. Desde que se trata de um sistema baseado em mais de um evento, esta análise deve ser conduzida sob diferentes condições iniciais de abertura e configurações de paraquedas antes de se emitir um parecer final sobre a geometria dos paraquedas que devem ser utilizados no projeto.

Dentro deste contexto, é proposto o problema da dinâmica de um sistema constituído do velame, umbilical e linhas de suspensão de um PQD (Figura 1) sob influência do escoamento em um túnel de vento subsônico com velocidade do vento representada por V_w como referência base para a implementação da metodologia a ser desenvolvida neste projeto de pesquisa.

O problema estrutural está ilustrado na Figura 2. Neste artigo não são consideradas as características elásticas do sistema em seu eixo longitudinal bem como o momento torsor associado à dinâmica do velame do PQD. Os parâmetros L e l representam o comprimento total do sistema PQD e o ponto de aplicação dos esforços associados à mola (constante elástica k) e amortecedor (coeficiente de amortecimento c), respectivamente. É importante mencionar que os esforços associados às constantes k e c , assim como o seu ponto de aplicação, l , foram inclusos ao modelo matemático de forma artificial. O objetivo é prover meios matemáticos que possam representar esforços mecânicos laterais verificados na dinâmica real destes sistemas. Obviamente, a estimativa efetiva destes valores deverá ser conduzida com auxílio de dados experimentais.

Na Figura 3 estão representados os esforços atuantes sobre o sistema PQD. As forças \vec{D} , \vec{Y} , \vec{W} e \vec{R} representam o arrasto verificado no PQD, a força lateral decorrente do escoamento sobre o PQD, o peso do sistema e os esforços de reação no ponto de fixação no túnel. A variável T representa os esforços de tração e a variável C representa a resultante dos das forças de amortecimento atuantes no sistema.

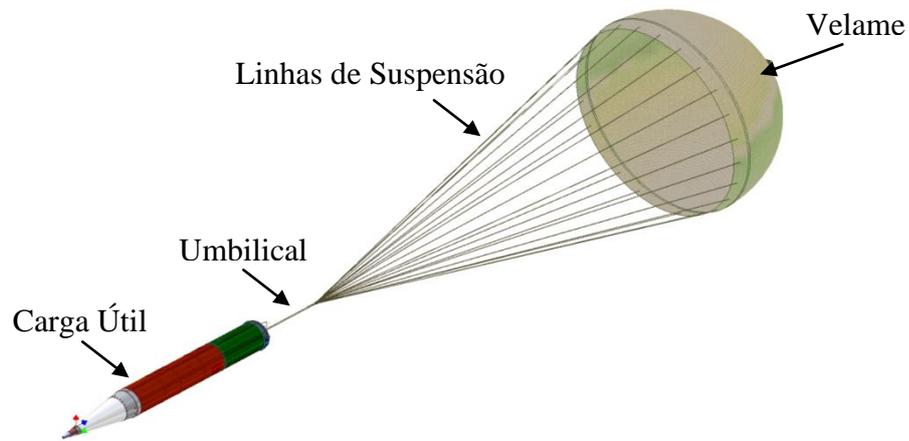


Figura 2 – Sistema PQD

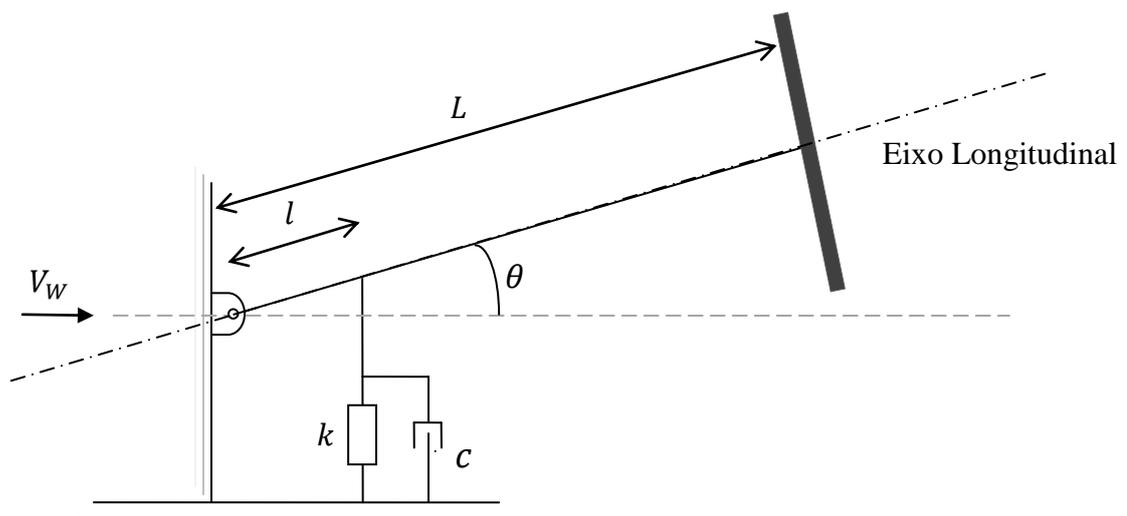


Figura 2 – Sistema estrutural em estudo

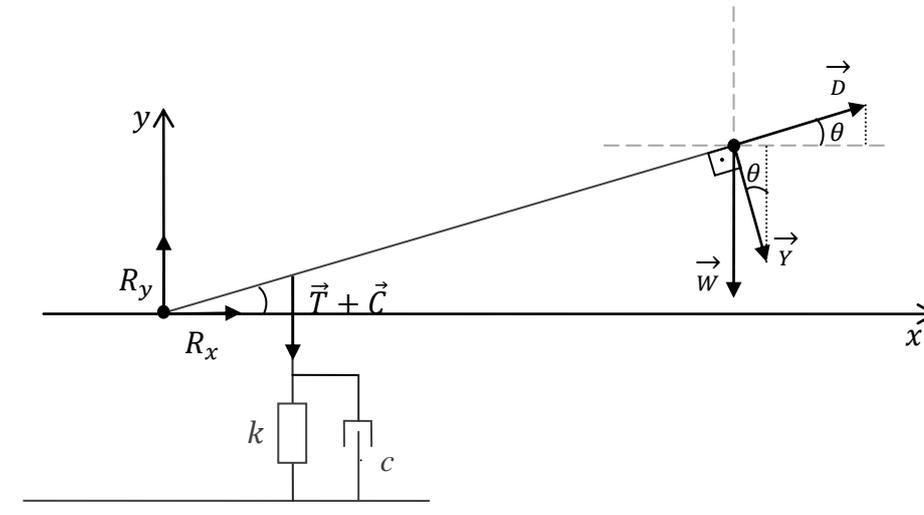


Figura 3 – Diagrama de esforços atuantes

3.2 Formulação Matemática do Problema Estrutural

3.2.1 Hipóteses

- i. Modelo matemático é bidimensional (2D). Ou seja, este não leva em consideração os efeitos tridimensionais (3D) gerados pelo campo de escoamento sobre a estrutura;
- ii. O sistema PQD (Velame + Umbilical + Linhas de Suspensão) é considerado como um corpo rígido (no presente caso, é considerado uma viga no cômputo do momento de inércia I_θ do sistema);
- iii. Não é considerada a influência da massa aparente (associada ao ar presente no PQD) no modelo dinâmico;
- iv. A massa específica e a velocidade do ar são consideradas constantes.

3.2.2 Modelo Matemático

Aplicando a 2ª lei de Newton no modelo apresentado na Figura 3, obtém-se a equação representativa do movimento angular (θ) do sistema (Silva, 2015):

$$\ddot{\theta} = a_1 \cos \theta + a_2 \cos^2 \theta + a_3 \sin \theta |\sin \theta| + a_4 \cos \theta \dot{\theta}, \quad (1)$$

sendo $a_1 = -\frac{m_s g}{I_{yy}}$, $a_2 = -\frac{kLl}{I_{yy}}$, $a_4 = -\frac{cl}{I_{yy}}$ e $a_3 = -\frac{0,5\rho LV_w^2 S_{ref}}{I_{yy}}$. Os parâmetros m_s , I_{yy} e g representam a massa do sistema PQD, o momento principal de inércia na direção Y e a aceleração da gravidade. Desde que o comprimento L não é alterado durante o movimento do sistema PQD, as equações que regem o movimento linear são desacopladas do movimento angular. Estas equações são escritas conforme segue:

$$\begin{cases} x = L \cos \theta \\ y = L \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

O parâmetro m_s representa a massa total do sistema. O modelo mais realístico deste parâmetro deve incluir a massa estrutural do PQD e a massa aparente decorrente da presença do ar no interior do PQD. Neste artigo não foi considerada a inclusão da massa aparente. Finalmente, o modelo linear associado ao movimento angular do sistema PQD pode ser obtido pela expansão em série de Taylor dos termos referentes às funções trigonométricas.

3.3 Formulação Matemática do Problema Doppler

De acordo com Mahafza e Elsherbeni (2000, Eq. 1.25), a equação representativa do sinal recebido pelo radar (x_r) decorrente do movimento de um ponto de uma estrutura vibrante (x) é dado por:

$$x_r(t) = x(t - \psi(t)), \quad (3)$$

sendo $\psi(t) = \frac{2}{c_s}(R_0 - vt)$, R_0 é a posição inicial do ponto da estrutura em análise, v é a velocidade da estrutura no tempo t e a variável c_s é a velocidade da luz (3.108 m/s).

A frequência Doppler é calculada em função da velocidade com que a estrutura vibra (v), da frequência da onda incidente (f_0 : portadora do radar) e da velocidade da luz, ou seja:

$$f_D = \frac{-2v}{c_s} f_0. \quad (4)$$

É importante ressaltar que o sinal recebido pelo radar é aquele decorrente do movimento da estrutura vibrante que se propaga na direção da linha de visada do radar. Ou seja, a velocidade v da estrutura, percebida pelo radar, é a componente da velocidade total do ponto em análise da estrutura projetada na direção da linha de visada do radar. Neste contexto, para cada posição em que o radar é posicionado, serão obtidos diferentes espectros de frequências Doppler. Este trabalho contribui de forma a viabilizar o estudo da influência da posição do radar na determinação do espectro de frequências Doppler de forma automática. São geradas matrizes de vetores unitários associados à linha de visada do radar e, a partir destas, são calculadas as frequências Doppler nas simulações numéricas.

3.4 Implementação Numérica

O algoritmo numérico adotado na resolução do caso estudo segue o diagrama de blocos ilustrado na Figura 3. Todos os detalhes associados à análise Doppler podem ser encontrados na referência devido à Perassoli (2013).

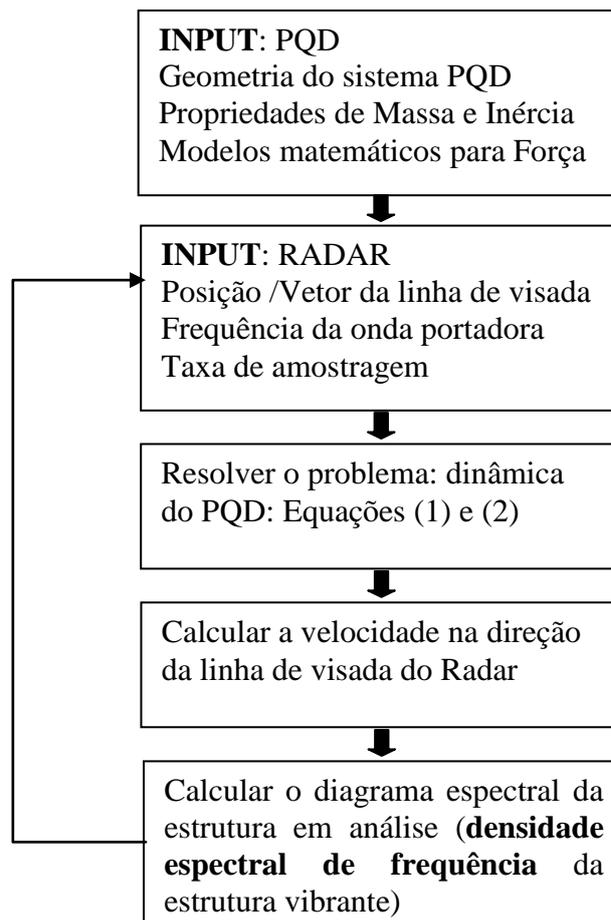


Figura 3 – Algoritmo resumido para análise numérica

3.5 Resultados

Neste tópico são apresentados alguns dos resultados obtidos a partir da simulação numérica mencionada. A Tabela 1 indica os casos que são apresentados e a estratégia de análise. A Figura 4 exibe o posicionamento do radar para os casos em que a linha de visada faz 90, 45 e 0 graus em relação à horizontal. Os resultados da simulação numérica da dinâmica do PQD estão ilustrados nas Figuras 5 e 6.

Tabela 1 – Casos Estudo

Caso Estudo	Direção do Vetor Unitário da Linha de Visada do Radar	Avaliação Esperada do Espectro de Frequências
I	90 graus	Captura as menores variações estruturais. Segundo a análise teórica, foram obtidas as menores velocidades relativas
II	45 graus	Espectro de frequências deve estar entre os resultados obtidos para I e II
III	0 grau	Captura as maiores variações estruturais

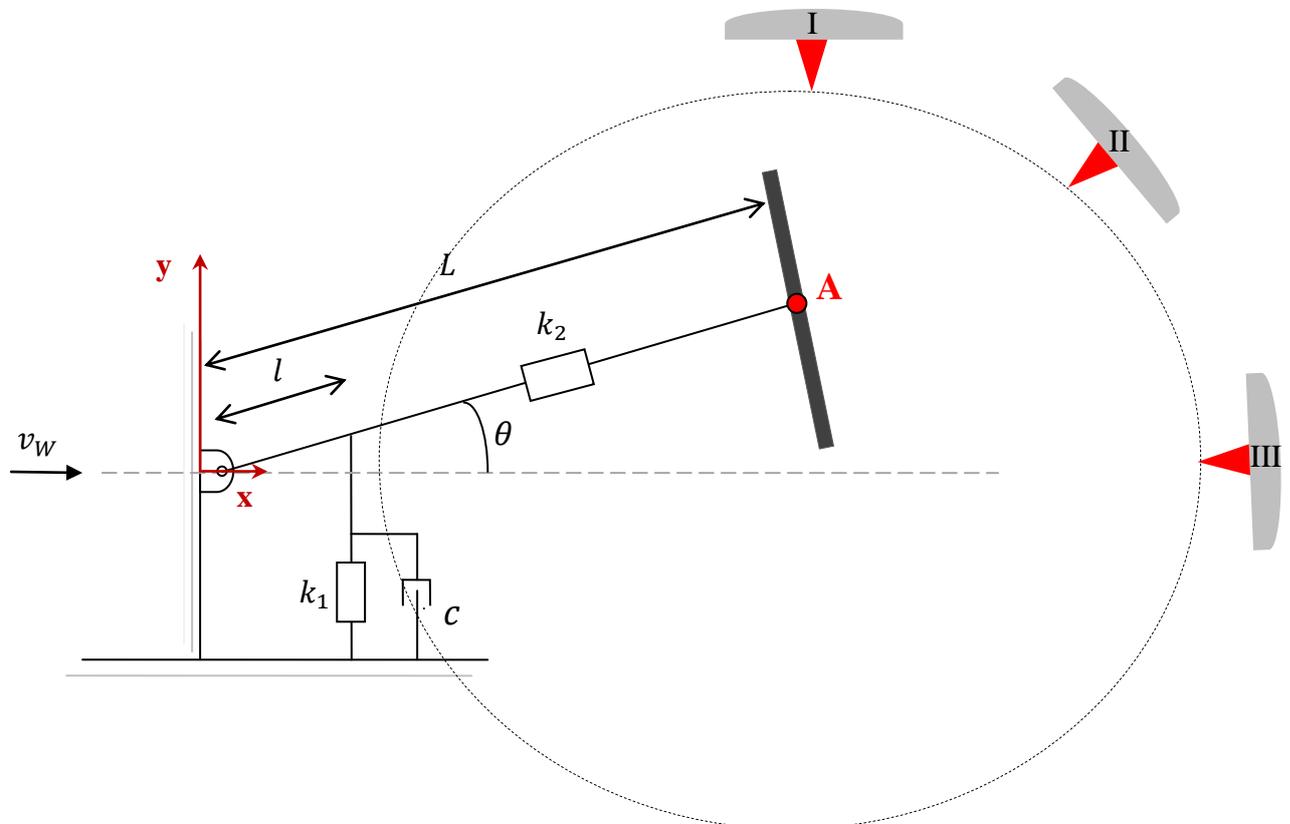


Figura 4 – Ângulo de visada do radar para os casos I, II e III
 (Circunferência: $C(L,0)$, Raio: L)

É possível verificar na Figura 5 que os resultados obtidos pelas formulações linear e não linear estão consistentes com as condições em que foram realizadas as simulações (baixos valores de θ). O maior valor obtido para o erro comparativo entre as formulações é da ordem de 10%. Outro aspecto importante a ser ressaltado é que as densidades espectrais são diretamente relacionadas ao valor da velocidade do ponto sobre as estrutura projetada na linha de visada do radar. Nesta figura está ilustrada a ordem de grandeza obtida para esta velocidade quando o PQD é exposto a um escoamento de 100 m/s.

Com base nesta velocidade relativa, na posição do radar e no ângulo de visada (para onde o radar aponta sobre a estrutura), pode-se concluir que as densidades espectrais do corpo vibrante (ponto A) obtidas pela análise Doppler foram gradualmente reduzidas quando na análise do espectro dos casos I, II e III, nesta sequência. Estes resultados estão disponibilizados nas Figuras 7, 8 e 9. Esta conclusão foi obtida com base nas cores do espectro calculado. Quando as cores do espectro se aproximam da densidade espectral zero (“cores quentes”), significa que o radar está capturando movimento de corpo rígido. Neste contexto, pode-se concluir que a melhor posição para a localização do radar neste tipo de experimento é de 0(zero) grau.

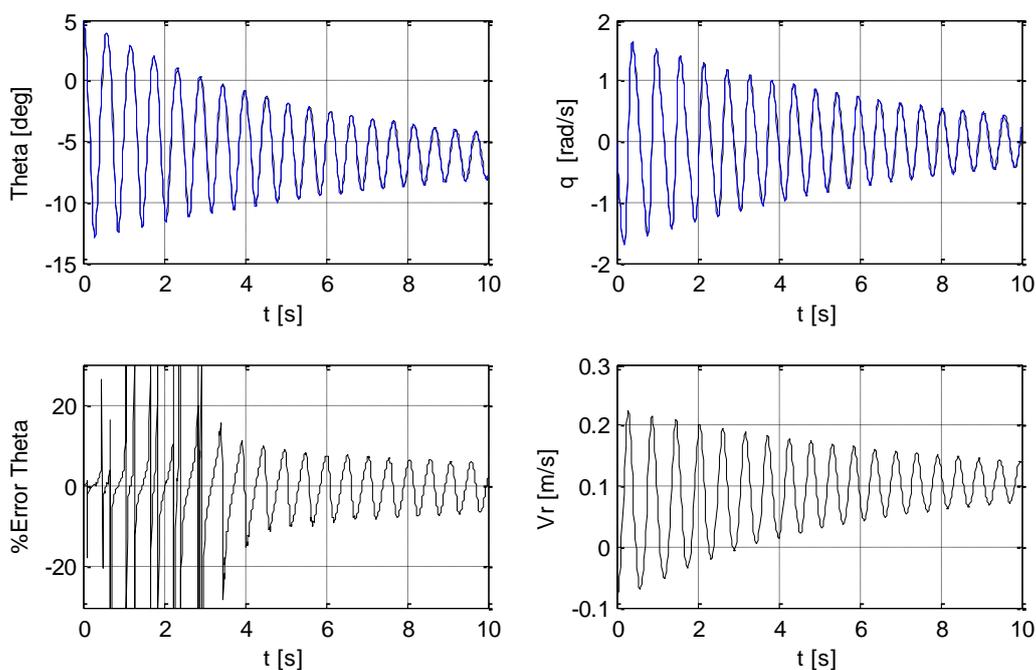


Figura 5 – Comparação entre as soluções numérica e analítica

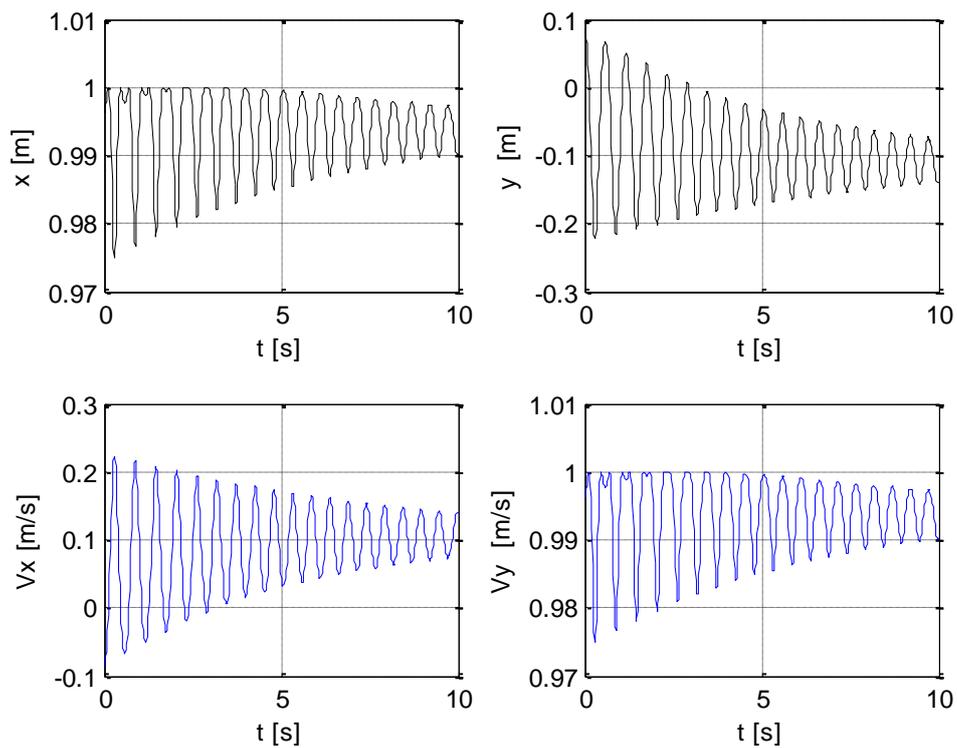


Figura 6 – Velocidades teóricas

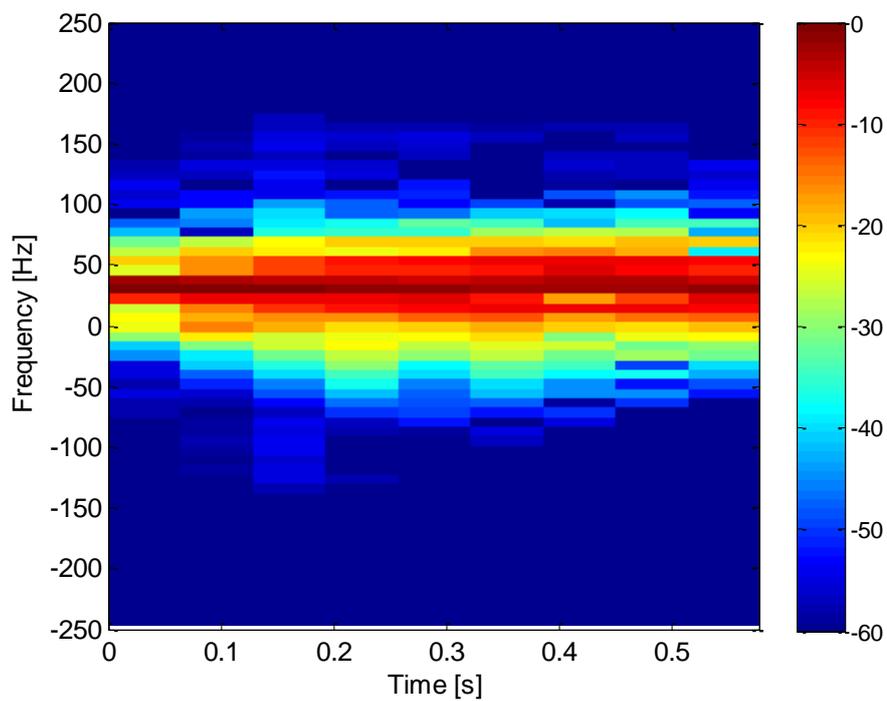


Figura 7 – Frequência Doppler para o caso I (vetor unitário: 90 graus)

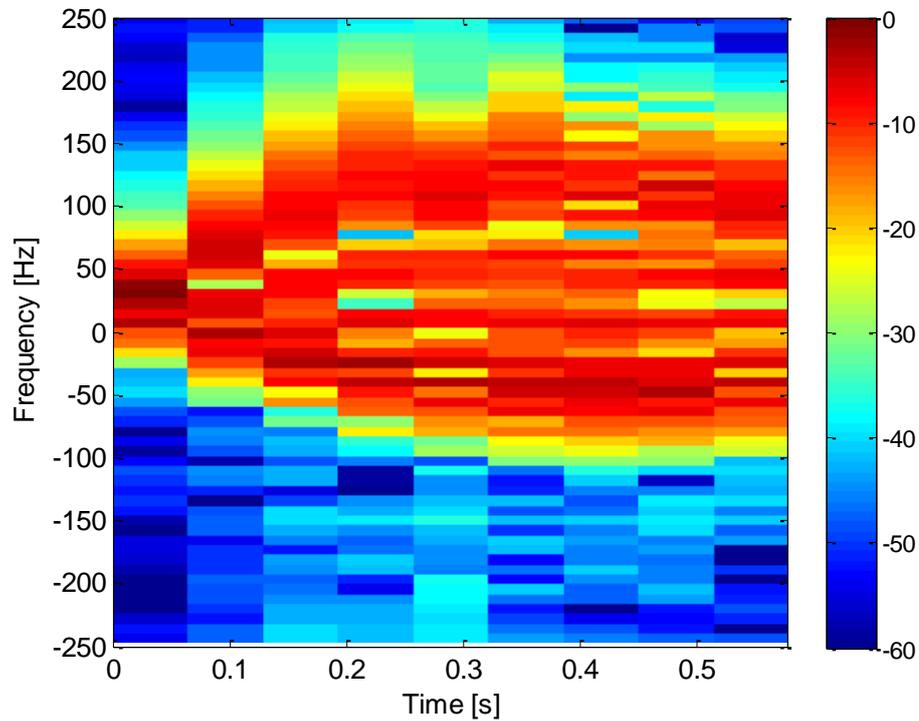


Figura 8 – Frequência Doppler para o caso II (vetor unitário: 45 graus)

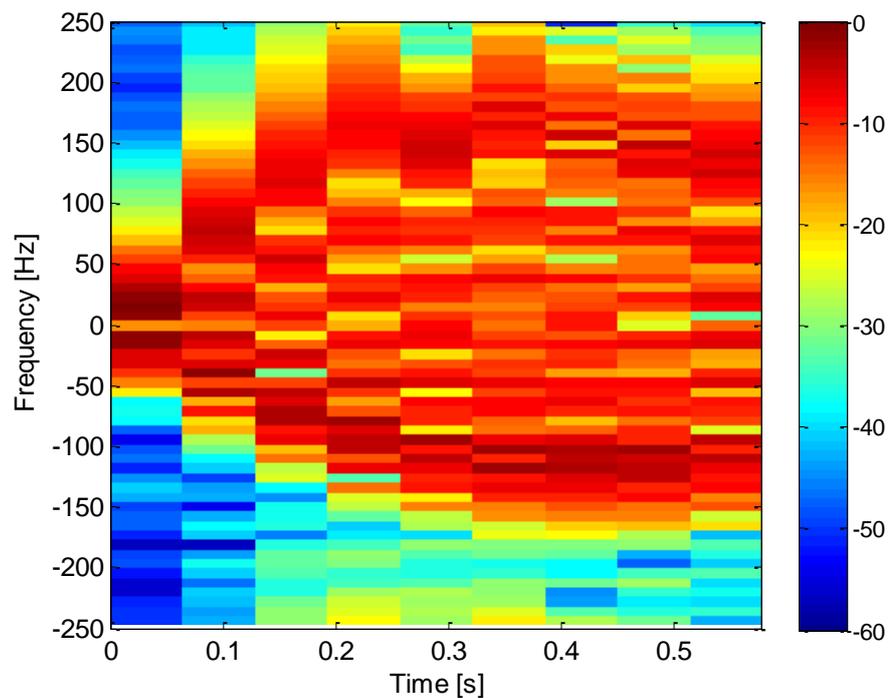


Figura 9 – Frequência Doppler para o caso III (vetor unitário: 0 grau)

4. Comentários Finais e Conclusões

Este trabalho se insere no projeto da Divisão de Sistemas de Defesa (ASD) o qual visa desenvolver ferramentas matemáticas que auxiliem na determinação das frequências micro-Doppler de pontos previamente selecionados de uma estrutura vibrante excitada por partir de fontes acústicas ou de Rádio Frequência ou a partir de carregamentos aerodinâmicos. Nesta fase de desenvolvimento foi definido pelo grupo de trabalho o estudo do caso da dinâmica de voo de um PQD preso no mastro de um túnel de vento. O modelo matemático foi implementado numericamente e as análises de frequência Doppler foram realizadas para diferentes posições de radar. Os principais resultados são as frequências associadas ao movimento da estrutura no decorrer do tempo. Nesta implementação foram utilizadas técnicas de transformação linear que permitiram automatizar a obtenção do espectro de frequências para diferentes condições de linha de visada do radar.

Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios para o grupo de trabalho. Dentre os principais aspectos a serem estudados e implementados em trabalhos futuros, destacam-se:

- i. Implementação dos modelos mais realísticos da dinâmica de PQD já desenvolvidos pela ASD;
- ii. Implementação da análise Doppler para o caso tridimensional (2D) associado ao item (i) e para o caso tridimensional (3D);
- iii. Estudo do tratamento de sinais provenientes de mais de um ponto situado sobre a estrutura em análise;
- iv. Estudo do tratamento de sinais provenientes de mais de um ponto situado sobre a estrutura em análise e recebidos por dois radares.



REFERÊNCIAS CONSULTADAS

CHEN, V., *“The Micro-Doppler Effect in Radar”*. Artech House, Boston, USA, January 2011

MAHAFZA, B.R. e ELSHERBENI, A.Z., *Matlab Simulations for Radar Systems Design*, 2000.

NUSSENZVEIG, H.M., *Curso de Física Básica – Vol. 2*, 1999.

PERASSOLI, M.V., *“Aula de Introdução à Tecnologia Radar”*, ITA, 2013.

PERASSOLI, M.V., *Analysis of Multistatic and Multimodal Micro-Doppler Signatures for Automatic Moving Target Classification*, Defence Academy of the UK, Shrivenham, 2013.

SILVA, M.G., *Aula de Álgebra Linear: Autovalores e Autovetores*, UNESP, 2012.

SILVA, M.G., *Dimensionamento dos Paraquedas para o Módulo de Recuperação de Cargas Espaciais*, ASD, REeng 2015 (submetido para publicação).