

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-7529-NTC/341**

**MEDIDA DA DISTÂNCIA À TRAJETÓRIA DE UM VEÍCULO EM  
MOVIMENTO ATRAVÉS DO EFEITO DOPPLER DE ONDAS  
SONORAS**

Bruno Paes Leão\*  
Fábio Barros de Carvalho\*  
Rodrigo Pimenta Ferreira Braga\*  
Thiago Francisco Amaral Moreira de Assis\*

\*Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia de Controle e Automação Instituto  
de Ciências Exatas – Belo Horizonte, Minas Gerais.

Trabalho orientado pelo Dr. Paulo Giácomo Milani da Divisão de Mecânica  
Espacial e Controle.

INPE  
São José dos Campos  
2000

# **Medida da Distância à Trajetória de um Veículo em Movimento Através do Efeito Doppler de Ondas Sonoras**

**Bruno Paes Leão**

**Fábio Barros de Carvalho**

**Rodrigo Pimenta Ferreira Braga**

**Thiago Francisco Amaral Moreira de Assis**

*Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia de Controle e Automação e  
Instituto de Ciências Exatas – Belo Horizonte, Minas Gerais.*

*bpleao@dcc.ufmg.br; sbarros@bhnet.com.br; rodrigo\_braga@hotmail.com; legio@gold.com.br*

Trabalho orientado por:

**Paulo Giácomo Milani**

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Mecânica Espacial e Controle  
Av. dos Astronautas 1758, SJCampos, 12227-010 SP, CP 515*

*milani@dem.inpe.br*

## **Resumo**

Este trabalho teve como objetivo mostrar o lado experimental da pesquisa científica e serviu também como uma introdução dos autores à divulgação científica. Apesar de não ser um projeto com rigor absoluto, conseguiu-se um resultado condizente com as expectativas iniciais e o tempo disponível (3 dias). Fizeram-se medidas da frequência das ondas sonoras emitidas por um veículo em movimento cuja velocidade foi estimada e, através da aplicação de uma equação obtida de Brown et al. (1957) ou Peterson (1957) e empregada nos princípios do programa espacial, obteve-se a distância mínima de um ponto (o de observação) à trajetória desse veículo em movimento.

## Sumário

Resumo .....	2
Sumário.....	3
1. INTRODUÇÃO .....	4
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	4
3. MÉTODO UTILIZADO PARA CÁLCULO DA DISTÂNCIA .....	4
4. COLETA DE DADOS .....	5
5. TRATAMENTO DOS DADOS .....	7
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	8
7. PROBLEMAS ENCONTRADOS E SUGESTÕES DE MELHORIAS .....	9
8. CONCLUSÕES .....	10
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	10

## 1. Introdução

Este trabalho teve como objetivo mostrar o lado experimental da pesquisa científica e serviu também como uma introdução dos autores à divulgação científica. Apesar de não ser um projeto com rigor absoluto, conseguiu-se um resultado condizente com as expectativas iniciais e o tempo disponível (3 dias).

Fizeram-se medidas da frequência das ondas sonoras emitidas por um veículo em movimento cuja velocidade foi estimada e, através da aplicação de uma equação obtida de Brown et al. (1957) ou Peterson (1957) e empregada nos princípios do programa espacial, obteve-se a distância mínima de um ponto (o de observação) à trajetória desse veículo em movimento.

## 2. Descrição do problema

Existem diversas formas de estimar a distância de um corpo em movimento em relação a um determinado referencial. Como exemplo, pode-se citar a obtenção da distância de uma estação de rastreio a um satélite em órbita, o que pode ser feito por meios ópticos, por radar ou por medidas de rastreio. No caso aqui tratado, a medida foi realizada de uma forma análoga ao dos satélites e aplicou-se ao caso de veículos automotores. Por uma questão de ordem de grandeza das medidas utilizaram-se as ondas sonoras emitidas pelos veículos em analogia às ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites. Em ambos os casos, a velocidade do veículo é considerada conhecida. Na situação aqui estudada, não se dispunha de instrumentos de laboratório adequados e precisos e procurou-se adaptar os recursos disponíveis (software obtido da Internet, notebook com multimídia) ao necessário para possibilitar a realização das observações..

## 3. Método utilizado para cálculo da distância

Utilizou-se como referência os artigos de Brown et al. (1957) e Peterson (1957), que tratam do mesmo problema aplicado ao primeiro satélite russo, o Sputnik. Uma medida precisa da variação da frequência do sinal fornecido por um corpo em movimento permite encontrar a distância mínima do mesmo a um ponto de observação, através da relação:

$$R_0 \approx \frac{v^2}{\lambda (df/dt)_{\max}} \quad (1)$$

onde:

$v$  = velocidade do corpo em movimento

$\lambda$  = comprimento da onda emitida pelo corpo

$(df/dt)_{\max}$  = taxa máxima de variação da frequência medida em relação ao tempo

A relação dada acima considera o observador fixo em um ponto **O** e o veículo se movimentando em uma linha reta a uma distância  $R_0$  do observador. Essa situação pode ser exemplificada na Figura 1a e pode ser imaginada como no caso de um observador próximo a uma linha de trem. Conforme o trem se aproxima do observador a frequência do som observado varia de acordo com a Figura 1b, sendo que no ponto de distância mínima ( $R_0$ ) ao observador acontece a máxima taxa de variação de frequência  $(df/dt)_{max}$ . Pela nossa experiência do dia a dia sabe-se que quanto mais próximo da trajetória do veículo (linha do trem), tanto maior é a taxa de variação de frequência  $(df/dt)_{max}$  e vice versa.

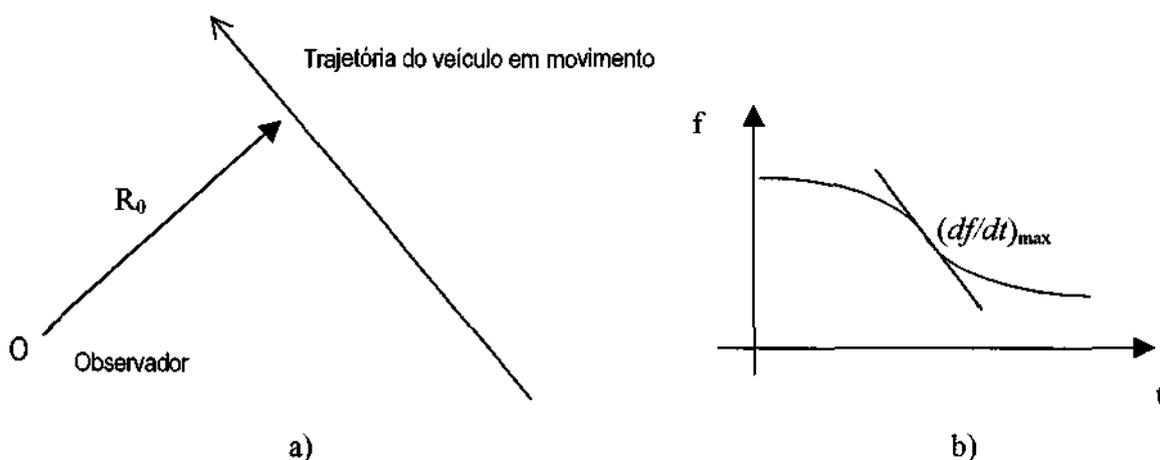


Fig. 1 Descrição das condições de observação do efeito Doppler

Para a obtenção do comprimento de onda, utilizou-se a relação:

$$\lambda = v_{som}/f' \quad (2)$$

onde:

$\lambda$  = comprimento da onda sonora medida

$v_{som}$  = velocidade do som (340 m/s) no ar

$f'$  = frequência medida da onda sonora no instante em que  $df/dt$  é máximo

#### 4. Coleta de dados

Para a coleta dos dados, foi utilizado o software Spectrogram v5.0.8 (Horne, 1999), um software freeware obtido da Internet e que se considerou adequado à realização do experimento. Da Figura 1b note-se que o instrumento adequado para a realização dessas medidas é tal que nos forneça a frequência de um sinal observado em função do tempo, exatamente o caso do software escolhido. Muitos outros softwares semelhantes podem ser encontrados na Internet.

O software foi instalado em um Notebook Compaq Pentium 200 MHz com

microfone embutido. A equipe, composta de quatro membros, dirigiu-se para as proximidades de locais em que havia médio tráfego de automóveis. O notebook foi posicionado de forma que o microfone ficasse direcionado para a pista. Um membro ficava responsável pelo acionamento do programa, enquanto os outros localizavam-se em lugares estratégicos, de modo a avisar, com antecedência, a aproximação de algum veículo que suprisse os requisitos para se obter uma boa gravação: sua velocidade deveria ser constante e a intensidade do som deveria ser suficiente para sensibilizar os microfones. É importante salientar que as condições do ambiente também deveriam ser adequadas, de modo a não haver muitos ruídos que atrapalhassem as medidas.

Foram feitas várias tentativas, mas muitas mostraram-se inadequadas. Somente três delas puderam ser aproveitadas:

Fonte 1: essa medição foi feita da calçada, muito próxima aos veículos. Gravou-se neste caso o som de um carro buzinando.

Fonte 2: nessa medição, o veículo observado foi uma moto. Desta vez, o notebook foi posicionado a uma distância maior que a do caso anterior.

Fonte 3: nesse caso, a distância foi superior às duas anteriores. Gravou-se novamente um carro buzinando.

O software utilizado possui uma grande gama de possíveis configurações, algumas não testadas pelos membros da equipe. A configuração que se mostrou mais adequada para a coleta de dados foi:

Sample Characteristics:

Sample rate (Hz): 44K

Resolution: 16 bit

Type: Mono

Display Characteristics:

Display Type: Scroll

Scale (dB): 60

Palette: CB

Time Scale (msec): 10

Cursor Offset: 0

Frequency Analysis:

Freq Scale: Log

FFT Size(points): 4096

Freq Resolution (Hz): 10.8

Band (Hz): 10 - 22050

Spectrum Average: 1

Recording Enable: On

O gráfico da frequência em função do tempo nos referidos experimentos têm a forma apresentada na Fig. 3. A parte em azul da figura corresponde às diversas frequências que compõem o sinal observado. A parte em amarelo na parte de cima

(pequena faixa) corresponde à amplitude do sinal observado ao longo do tempo. Para efeito do presente experimento analisou-se apenas uma faixa de frequências melhor definida dentre aquele conjunto captado. Essa faixa corresponde a apenas uma das camadas dentre todas as registradas pelo software. Essa escolha foi arbitrária e baseou-se na facilidade de obtenção dos dados para calcular a relação da Equação 1. Uma observação importante: o cursor do mouse quando posicionado sobre uma dada parte do gráfico (Figs. 3 ou 4) fornece exatamente a abscissa (tempo) e a ordenada (frequência) do ponto considerado.

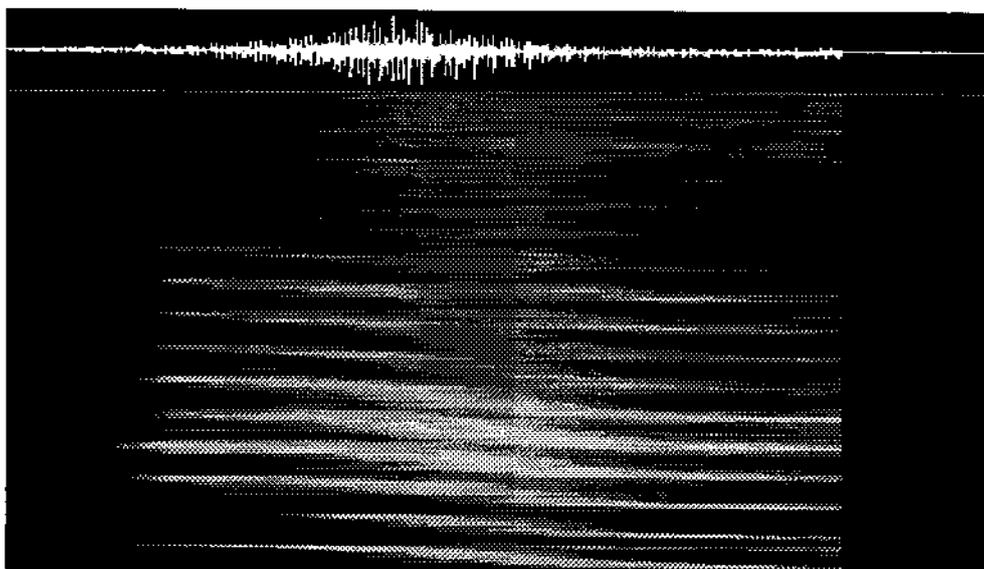


Fig. 3 Dados típicos observados com o software Spectrogram.

Nele pode-se ver que há um ponto de inflexão, que indica o momento no qual o corpo em movimento está à menor distância do referencial. A derivada do gráfico nesse ponto é a taxa máxima de variação da frequência em relação ao tempo que foi utilizada na Equação 1.

## 5. Tratamento dos Dados

O tratamento dos dados foi realizado através do programa já citado da seguinte forma: de posse dos dados, o programa esboçava o gráfico de frequência em função do tempo. Esse gráfico possibilitou uma análise quantitativa do efeito Doppler observado. Ele apresentava uma curva decrescente em forma de "S" (vide Fig. 1b) que era devida ao efeito Doppler. Para que a derivada do ponto de inflexão pudesse ser achada, selecionou-se os pontos extremos da curva e, assim, considerando a reta que liga esses pontos como um aproximação razoável da curva.

As configurações utilizadas para o tratamento dos dados foram:

Display Characteristics:

Scale (dB): 30

Palette: CB

Time Scale (msec): 10

Cursor Offset (Hz): 0

Frequency Analysis:

Freq Scale: Linear

FFT Size (points): 16384

Freq Resolution (Hz): 2,7

Band (Hz): 250 - 3006

Spectrum Average: 64



Fig. 4. Uma segunda amostra dos dados coletados.

## 6. Resultados Obtidos

Com os dados obtidos conforme apresentado anteriormente obteve-se a seguinte tabela de resultados:

TABELA 1: DADOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO

	$\lambda$ (m)	$f1$ (Hz)	$f2$ (Hz)	$T1$ (s)	$T2$ (s)	$\Delta f$ (Hz)	$\Delta t$ (s)	$\Delta f/\Delta t$	$V$ (m/s)
Fonte 1	0,17	2022	1998	4,26	3,75	24	0,51	48	3
Fonte 2	0,75	472	431	2,22	1,32	41	0,9	45,5	12,5
Fonte 3	0,52	657	641	8,52	3,67	16	4,85	3,3	5

## 8. Conclusões

A realização deste trabalho trouxe resultados positivos que serviram para aumentar o conhecimento sobre as utilizações, implicações e finalidades da Mecânica Ondulatória e, mais especificamente, do "Efeito Doppler". Como exemplo disso podemos citar a utilização de tal fenômeno na determinação de órbitas de satélites artificiais e corpos celestes diversos.

Além disso, este trabalho serviu como um primeiro contato dos autores com o processo de publicação científica.

## 9. Referências Bibliográficas

Brown, R. R.; Green Jr., P. E.; Howland, B.; Lerner, R. M.; Manasse, R.; Pettengill, G. Radio observations of the russian earth satellite. **Proceedings of the IRE**, p.1552-1553, Nov. 1957.

Horne, R.S. **Spectrogram 5.1**: software para análise spectral de sinais de áudio [online]. <<http://www.monumental.com/rshorne/gramdl.html>> Aug. 1999.

Peterson, A. M. Radio and radar tracking of the russian earth satellite. **Proceedings of the IRE**, p.1553-1555, Nov. 1957.

