

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CAMPUS SÃO BERNARDO
CURSO DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS- QUÍMICA**

GUILHERME LIMA DOS SANTOS

EFEITO DOPPLER E SUAS APLICAÇÕES

**São Bernardo – MA
2023**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CAMPUS SÃO BERNARDO
CURSO DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS NATURAIS- QUÍMICA

EFEITO DOPPLER E SUAS APLICAÇÕES

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura em Ciências
Naturais/Química da Universidade
Federal do Maranhão como requisito
para conclusão de curso.

Orientador: Prof. Dr. Josberg Silva
Rodrigues

Lima, Guilherme.

EFEITO DOPPLER E SUAS APLICAÇÕES / Guilherme Lima. - 2023.

44 p.

Orientador(a): Josberg Silva.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Naturais - Química, Universidade Federal do Maranhão, UFMA - são Bernardo, 2023.

1. Aplicações do Efeito Doppler. 2. Efeito Doppler.
3. Frequência de Onda. I. Silva, Josberg. II. Título.

GUILHERME LIMA DOS SANTOS

EFEITO DOPPLER E SUAS APLICAÇÕES

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura em Ciências
Naturais/Química da Universidade
Federal do Maranhão como requisito
para conclusão de curso.

Aprovado em: 27/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JOSBERG SILVA RODRIGUES**
Data: 03/01/2024 11:08:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Josberg Silva Rodrigues (orientador)

Doutor em Física Teórica – UFMA

UFMA – Centro São Bernardo

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS LIMA DIAS**
Data: 03/01/2024 10:43:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Lima Dias

Doutor em Física Teórica – UFMA

IFPA – Campus Marabá Rural

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO TARGINO GURGEL**
Data: 03/01/2024 14:24:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Thiago Targino Gurgel

Doutor em Física– UFS

UFMA – Centro São Bernardo

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

(Roberto Shinyashiki)

“Viver é enfrentar um problema atrás do outro. O modo como você o encara é que faz a diferença.”

(Benjamin Franklin)

“Aquele que ousa perder uma hora de seu tempo não sabe o valor da vida.”

(Charles Darwin)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que em sua fidelidade e amor, tem me sustentado dia após dia, me proporcionando chegar até aqui, obrigado senhor por essa jornada pela Universidade.

Em especial agradeço minha mãe Maria dos Milagres Lima dos Santos, que me fez orgulhar-se do que sou, esse trabalho é principalmente para você. Ao meu pai Laurencio Teodosio Dos santos ele me falava que o melhor caminho a se seguir é o estudo e queria ver eu mais a minha irmã formados e trabalhando ao invés de ficar cuidando de roça e com família grande lutando para se sustentar e sempre nos dizendo e apoiando nos estudos, sei que foi difícil se separar de mim e minha irmã quando fomos estudar em Parnaíba mais ele sabia que era necessário pois sabia que lá poderíamos ter um estudo mais avançado, obrigado mãe e pai por nos proporcionar este futuro. A minha irmã pelo apoio e quase uma competição as vezes de quem terminaria primeiro o ensino superior e não me fazendo parar em meio a jornada acadêmica.

Aos meus amigos e amigas Francisco, Bernardo, Marcos Vinicius, Thiago, Ezequias, Armando, Alessandro, pois com vocês a vida acadêmica teve um novo significado, obrigado por tudo as discussões sobre as provas as listas de exercícios que fazíamos e compartilhávamos as resoluções das mesmas obrigado a todos.

A minha namorada e hoje esposa Jeane Correa por estar sempre ao meu lado ajudando, dando apoio e motivação. Esse trabalho também é seu.

Aos meus professores pelos ensinamentos durante minha jornada pela UFMA, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Josberg Silva Rodrigues pela constante ajuda e orientação nesse trabalho.

Por fim, dedico esse trabalho aos meus amigos que disseram que eu não desistiria do curso e que conseguiria se formar sem muitos transtornos.

RESUMO

Este trabalho monográfico investiga o Efeito Doppler, abordando tanto as perspectivas da física clássica quanto da relatividade especial e explorando suas aplicações práticas em diversos campos. O objetivo principal é explorar a influência e a importância do Efeito Doppler em variadas áreas científicas e tecnológicas, proporcionando uma compreensão mais aprofundada deste fenômeno. A metodologia empregada incluiu a definição clara dos objetivos da pesquisa, seleção criteriosa de sites acadêmicos e um extenso levantamento bibliográfico. Este método garantiu uma análise rigorosa e uma base sólida para o estudo, permitindo uma exploração detalhada do tema. Os resultados revelaram a fundamental importância do Efeito Doppler na compreensão de fenômenos físicos. No aspecto clássico, demonstrou-se como a frequência das ondas é percebida diferentemente devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador. Já no contexto relativístico, o estudo abordou as mudanças mais extremas na frequência percebida em altas velocidades, próximas à velocidade da luz, e os efeitos da relatividade especial de Einstein. As considerações finais destacam que o Efeito Doppler não é apenas um fenômeno físico fascinante, mas um princípio com implicações profundas e práticas em diversas áreas da ciência e tecnologia. A compreensão deste efeito é fundamental para o avanço do conhecimento humano, tanto no entendimento do universo quanto no desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Além disso, há um potencial para futuras aplicações na física atômica, particularmente em estudos de movimento e interação de átomos em temperaturas extremamente baixas, abrindo caminhos para novas descobertas sobre a matéria e o universo.

Palavras-chave: Física Clássica; Relatividade Especial; Aplicações Práticas.

ABSTRACT

This monographic work investigates the Doppler Effect, addressing both classical physics and special relativity perspectives, while exploring its practical applications in various fields. The main objective is to explore the influence and importance of the Doppler Effect across diverse scientific and technological areas, providing a deeper understanding of this phenomenon. The methodology included defining research objectives, carefully selecting academic sites, and conducting an extensive bibliographic survey. This approach ensured a thorough analysis and a solid foundation for the study, allowing for a detailed exploration of the topic. The results demonstrated the fundamental importance of the Doppler Effect in understanding physical phenomena. Classically, it showed how the frequency of waves is perceived differently due to the relative motion between the source and the observer. Relativistically, the study covered more extreme frequency changes at high velocities, near the speed of light, and the effects of Einstein's special relativity. The final considerations highlight that the Doppler Effect is not just a fascinating physical phenomenon but a principle with profound and practical implications in various science and technology areas. Understanding this effect is vital for advancing human knowledge, both in comprehending the universe and developing innovative technologies. Furthermore, there is potential for future applications in atomic physics, particularly in studying the motion and interaction of atoms at extremely low temperatures, opening paths to new discoveries about matter and the universe.

Keywords: Doppler Effect; Classical Physics; Special Relativity; Practical Applications.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Fonte e observador.....	5
FIGURA 2 - Fonte em movimento e observador parado.....	6
FIGURA 3 - Fonte em repouso e observador em movimento.....	8
FIGURA 4 – Cone de Mach.....	10
FIGURA 5 - Galáxia espiral Messier 83	15
FIGURA 6 - Galáxia de Andrômeda	17
FIGURA 7 - Ultra Sonografia como doppler colorido abdominal	17
FIGURA 8 - Torre de comunicação.....	19
FIGURA 9 - Satélite de telecomunicação	20
FIGURA 10 - Base de meteorológica.....	22
FIGURA 11 - Radar de velocidade doppler.....	23
FIGURA 12 - Fonte sonora e objeto para o eco.....	25
FIGURA 13 - Eco localização.....	25
FIGURA 14 - Telas de sonar a bordo de um destróier da Royal Navy.....	26
FIGURA 15 - Sonar de Varredura Multifeixe.....	26

Sumário

Sumário

1	Introdução	3
2	Referencial Teórico	5
2.1	Efeito Doppler: fonte em movimento e observador em repouso	5
2.2	Casos particulares	7
2.2.1	Quando a fonte se aproxima do observador	7
2.2.2	Quando a fonte se afasta do observador	8
2.3	Fonte em repouso e observador em movimento	8
2.4	Cone de Mach	9
2.5	O Efeito Doppler relativístico	10
2.6	Efeito Doppler Longitudinal	13
2.7	Efeito Doppler Transversal	14
3	Aplicações	14
3.1	Estrelas e galáxias	14
3.1.1	Desvio para o Vermelho	14
3.1.2	Desvio para o azul	16
3.1.3	Ultra sonografia doppler	17
3.2	Uso em telecomunicações	18
3.3	Uso pela meteorologia	20
3.4	Telefonia movel e redes sem fio	21
3.5	Radar Doppler para a previsão de tempestades	21
3.6	Radar de velocidade Doppler	22
3.7	Sonar	24
3.8	Tipos de Sonar	26
4	Metodologia	27
4.1	Levantamento bibliográfico	28

5	Considerações Finais	28
	Referências	30

1 Introdução

A descoberta do Efeito Doppler foi apresentada por Christian Doppler em 1842, no seu trabalho seminal intitulado “*Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*” (Sobre a luz colorida das estrelas binárias e de alguns outros astros do céu). Nesse trabalho, Doppler propôs pela primeira vez a ideia de que a frequência observada de uma onda depende do movimento relativo da fonte e do observador. Esta teoria, foi confirmada experimentalmente por Christophorus Buys Ballot em 1845 de maneira notável. Ele organizou um experimento com trompetistas a bordo de um trem em movimento.

Em 1848, independentemente do trabalho de Doppler, Hippolyte Fizeau, um físico francês, ampliou a teoria do Efeito Doppler para a luz. Propôs que o efeito poderia ser observado nas linhas de emissão das estrelas, não apenas em sua cor. Fizeau apresentou essa ideia em Paris e hoje o fenômeno é conhecido em alguns contextos como efeito Doppler-Fizeau. Sua contribuição foi crucial para entender como a luz das estrelas se altera devido ao seu movimento (HELLEMANS; BUNCH, 1988).

Ainda no contexto do efeito doppler para a luz, na década de 1860, William Huggins começou a usar espectroscopia para estudar a composição química de estrelas e planetas. Em 1868, ele fez uma observação crucial ao identificar o deslocamento Doppler nas linhas espectrais da estrela Sirius, demonstrando que a estrela estava se afastando da Terra. Este foi um dos primeiros usos do Efeito Doppler para medir a velocidade radial de uma estrela, um método que se tornou fundamental na Astrofísica (CARD. FILOS. 1868).

Continuando o trabalho de William Huggins, Hermann Carl Vogel fez uma descoberta notável ao aplicar o Efeito Doppler para analisar o sistema estelar Algol. Ele observou mudanças periódicas nas linhas espectrais de Algol, concluindo que essas mudanças eram devido ao movimento orbital da estrela. Essa observação permitiu a Vogel concluir que Algol era um sistema binário, com duas estrelas orbitando um centro de massa comum (VOGEL,1872).

Enerst Mach publicou trabalhos sobre o Efeito Doppler em seu livro “*Beiträge zur Dopplerschen Theorie*”, Contribuições para a Teoria de Doppler (MACH,1873). Nesse trabalho, ele expandiu a compreensão do efeito tanto em ondas sonoras quanto em ondas luminosas. Mach também investigou as implicações do Efeito Doppler na velocidade do som e realizou experimentos que ajudaram a esclarecer a natureza do fenômeno (MACH, 1878).

Em 1887, Woldemar Voigt fez um avanço significativo na teoria do Efeito Doppler. Em resposta a experimentos de Michelson e Morley, ele derivou o efeito Doppler óptico longitudinal em um meio incompressível. Voigt mostrou que a equação de onda da luz é invariante sob suas transformações, uma prévia da transformação de Lorentz da teoria da relatividade. Sua equação inovadora incluiu um tempo dependente da posição, um conceito revolucionário para a época (VOIGT, 1887).

Anos mais tarde com a chegada da relatividade especial, Albert Einstein, derivou o efeito Doppler transversal, não previsto por Doppler nem por Voigt (EINSTEIN, 1907). Seguindo essa linha de desenvolvimento histórico, Edwin Hubble, motivado pelos trabalhos de seus antecessores, observou que as galáxias distantes se afastam da Terra a velocidades que aumentam com a distância, o que ficou conhecido como a Lei de Hubble (HUBBLE, 1929).

O Efeito Doppler, atualmente tem aplicações amplas e significativas que vão desde a Astrofísica até áreas como medicina, é o caso do ultrassom Doppler para avaliar a saúde cardiovascular. Em meteorologia, com radares Doppler essenciais para prever o tempo e tempestades. Na engenharia, é aplicado em sistemas de navegação como o GPS e no monitoramento de máquinas. Além disso, na tecnologia de sonar, é usado para detectar objetos subaquáticos.

Neste contexto, o objetivo geral desta monografia é investigar o Efeito Doppler e suas aplicações, explorando seu impacto em diversas áreas científicas e tecnológicas, visando contribuir para uma compreensão aprofundada e abrangente desse fenômeno. Os objetivos específicos incluem a análise dos fundamentos teóricos do Efeito Doppler clássico e relativístico, destacando as principais características e equações associadas. Além disso, pretendemos fazer uma revisão bibliográfica para elencar as diferentes aplicações do Efeito Doppler em áreas como Astronomia, Medicina, Radar, Comunicação e detecção de velocidade dentre outras.

A monografia está estruturada da seguinte maneira: iniciamos com o referencial teórico, explorando o Efeito Doppler Clássico e Relativístico, juntamente com algumas de suas aplicações práticas. Em seguida, apresentamos a metodologia utilizada na pesquisa. Por fim, encerramos com nossas considerações finais sobre o estudo.

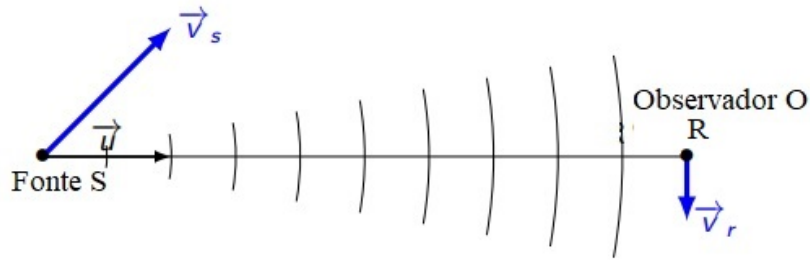
2 Referencial Teórico

O Efeito Doppler ocorre quando há uma mudança percebida na frequência das ondas (como as sonoras) devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador. O efeito Doppler é uma manifestação importante na física ondulatória, presente em diversos fenômenos cotidianos, como o som de um carro de polícia, ambulância, luz de estrelas, presente na Medicina (ultrassom) e diversas outras aplicações.

2.1 Efeito Doppler: fonte em movimento e observador em repouso

Antes de iniciar, vamos esclarecer as seguintes definições: num determinado referencial, uma fonte S emite uma onda com uma frequência ν_o e se move com velocidade $\vec{v}_s$. Paralelamente, um observador (O) no ponto R, ouvinte ou receptor do sinal, se move com velocidade $\vec{v}_r$ e recebe essas ondas com uma frequência ν' .

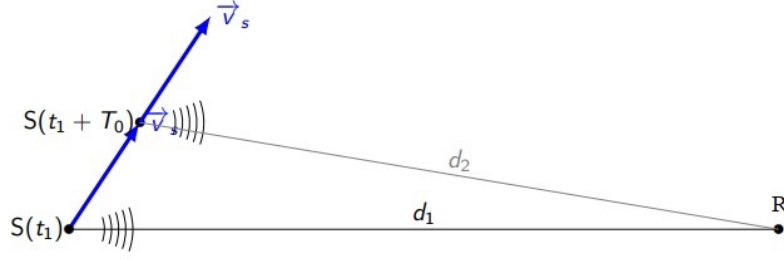
Figura 1: Fonte e observador.



Fonte: Figura adaptada do Livro KNIGHT.

Denotaremos a velocidade da onda em relação ao meio por c e representaremos por $\vec{u}$ o vetor unitário orientado da fonte ao observador. Na aproximação clássica, assumimos $v_r \ll 3.10^8$ m/s e $v_s \ll 3.10^8$ m/s. Ademais, é importante considerar que a fonte emite pulsos de acordo com a figura abaixo. Vamos inicialmente analisar o caso em que a fonte está em movimento e observador parado.

Figura 2: Fonte em movimento e observador parado.



Fonte: Figura adaptada do Livro KNIGHT.

A tabela abaixo fornece os instantes de transmissão e recebimento de dois sinais. O tempo de captação é definido como a distância percorrida, d_i , dividida pela velocidade de propagação da onda no meio, v_{som} . T_0 representa o intervalo de tempo entre a transmissão dos dois sinais pela fonte S.

Tabela 1: Tempo dos sinais

Sinais	Transmissão	Captação (ouvinde)
1º bip	instante t_1	$t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{v_{som}}$
2º bip	$t_2 = t_1 + T_0$	$t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{v_{som}}$

Assim, a diferença de tempo entre os sinais recebidos é:

$$\begin{aligned}
 T' &= t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 + \frac{d_2}{v_{som}} - \frac{d_1}{v_{som}} \\
 &= T_0 + \frac{d_2 - d_1}{v_{som}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

representa a diferença de tempo observada pelo ouvinte para os dois sinais.

Observando a figura 2, podemos ver que as distâncias d_1 e d_2 serão:

$$d_1 = SR(t_1), \tag{2}$$

$$d_2 = SR(t_2) \simeq SR(t_1) + (t_2 - t_1) \frac{dSR}{dt}. \tag{3}$$

$SR(t_1)$ e $SR(t_2)$ representam as distâncias, segmentos de retas orientadas da fonte ao observador em dois instantes distintos.

Temos que a velocidade da fonte é dada pela taxa de variação da distância entre a fonte e o observador

$$\vec{v}_s = \frac{d\vec{RS}}{dt} = -\frac{d\vec{SR}}{dt}, \quad (4)$$

$$\Rightarrow \vec{v}_s \cdot \vec{u} = -\frac{d(\vec{SR})}{dt} \cdot \vec{u} = -\frac{dSR}{dt}. \quad (5)$$

substituindo (5) em (3), temos

$$\begin{aligned} T' &= T_0 + \frac{d_2 - d_1}{v_{som}} = T_0 + \frac{(t_2 - t_1) \frac{dSR}{dt}}{v_{som}} = \\ &= T_0 - T_0 \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{u}}{v_{som}} = T_0 \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

implicando a relação entre a frequência percebida e a frequência real:

$$\frac{1}{\nu'} = \frac{1}{\nu_0} \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right) \quad (7)$$

$$\nu' = \frac{\nu_0}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right)}. \quad (8)$$

em que ν' é a frequência percebida e ν_0 é a frequência real devida ao efeito Doppler.

2.2 Casos particulares

2.2.1 Quando a fonte se aproxima do observador

Quando a fonte de som se move em direção ao observador, a equação para a frequência se torna:

$$\nu' = \frac{\nu_0}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right)} \quad (9)$$

$$\vec{v}_s \cdot \vec{u} = v_s \Rightarrow \nu' = \frac{\nu_0}{1 - \frac{v_s}{v_{som}}}. \quad (10)$$

nesse caso, a frequência ν' aumenta. Isso ocorre porque as ondas sonoras se comprimem à medida que a fonte se aproxima do observador, resultando em ondas com frequências mais altas.

2.2.2 Quando a fonte se afasta do observador

Quando a fonte de som se move para longe do observador, a equação é:

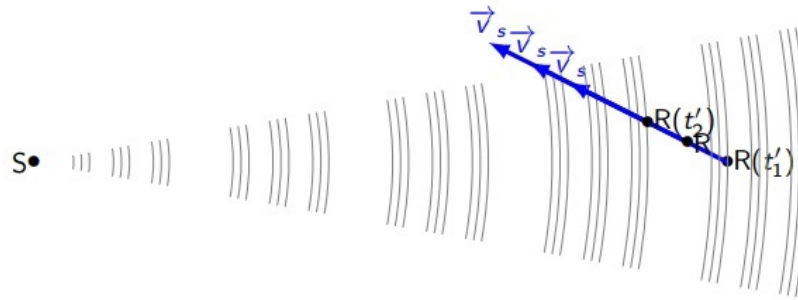
$$\vec{v}_s \cdot \vec{u} = -v_s \Rightarrow \nu' = \frac{\nu_0}{1 + \frac{v_s}{v_{som}}}. \quad (11)$$

A frequência observada ν' diminui, pois as ondas sonoras se espalham à medida que a fonte se afasta do observador, levando à frequências mais baixas.

2.3 Fonte em repouso e observador em movimento

Analisamos agora o Efeito Doppler no cenário em que a fonte de ondas sonoras está em repouso e o observador está em movimento. Discutiremos como a frequência e o período dos sinais recebidos são afetados por este movimento.

Figura 3: Fonte em repouso e observador em movimento.



Fonte: Figura adaptada do Livro KNIGHT.

Considere uma fonte em repouso emitindo sinais (ou bips) e um observador em movimento. Os instantes de emissão e recepção dos sinais são descritos a seguir:

Tabela 2

Sinais	Transmissão	Observador (ouvinte)
1º bip	instante t_1	$t'_1 = t_1 + \frac{SR(t'_1)}{v_{som}}$
2º bip	$t_2 = t_1 + T_0$	$t'_2 = t_2 + \frac{SR(t'_2)}{v_{som}}$

- O primeiro bip é emitido no instante t_1 e recebido pelo observador em movimento em t'_1 .

- O segundo bip é emitido em t_2 e recebido em t'_2 .

O período dos sinais recebidos, T' , é calculado pela diferença entre os tempos de recepção dos dois bips. A expressão para T' é dada por:

$$T' = t'_2 - t'_1 = T_0 + \frac{SR(t'_2) - SR(t'_1)}{v_{som}} = T_0 + \frac{(t'_2 - t'_1) \frac{dSR}{dt}}{v_{som}}. \quad (12)$$

Considerando que a taxa de variação da distância $\frac{dSR}{dt}$ é igual a $\vec{v}_r \cdot \vec{u}$, assim temos:

$$\frac{dSR}{dt} = \frac{d\vec{SR}}{dt} \cdot \vec{u} = \vec{v}_r \cdot \vec{u}. \quad (13)$$

Substituindo esta expressão na equação do período, obtemos:

$$\begin{aligned} T' &= T_0 + \frac{T' \frac{dSR}{dt}}{v_{som}} \implies T' - \frac{T' \frac{dSR}{dt}}{v_{som}} = T_0 \\ T' \left(1 - \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right) &= T_0 \\ T' &= \frac{T_0}{\left(1 - \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right)}. \end{aligned} \quad (14)$$

A frequência dos bips recebidos, ν' , é inversamente proporcional ao período T' . Portanto, a expressão para a frequência é:

$$\nu' = \nu_0 \left(1 + \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{u}}{v_{som}} \right) \quad (15)$$

mostrando que a frequência dos bips recebidos aumenta se o observador se move em direção à fonte e diminui se o observador se afasta da fonte.

2.4 Cone de Mach

O Cone de Mach é um fenômeno associado a uma fonte que se move mais rápido que a velocidade do som no meio. Este efeito é comumente associado a aeronaves supersônicas.

Quando uma fonte se move a uma velocidade maior que a do som, ela passa pelas ondas sonoras que emite. Isso cria um cone de ondas de choque, conhecido como Cone de Mach, cujo vértice é a fonte (HALLIDAY, 2009).

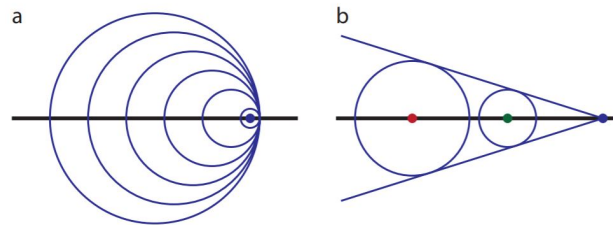
O ângulo α do cone é dado pela relação:

$$\sin \alpha = \frac{v_{som}}{v} \quad (16)$$

onde v_{som} é a velocidade do som e v é a velocidade da fonte.

Uma característica notável do Cone de Mach é o estrondo sônico, um som alto e abrupto ouvido quando a onda de choque passa por um observador. Este som é similar a uma explosão e ocorre devido à súbita variação de pressão.

Figura 4: Cone de Mach



Fonte: Figura adaptada de Nussenzveig, 2014

A fonte emite frentes de onda com um intervalo de tempo fixo Δt . Na figura 4(a) a fonte se move na mesma velocidade que a onda emitida, todas as frentes de onda colidirão, criando uma onda de choque. Na figura 4(b) para uma fonte que se move mais rápido que a velocidade das ondas, todas as ondas viajam atrás da fonte, criando uma frente de onda cônica (de choque). O ponto azul indica a posição atual da fonte, o ponto verde indica um período atrás, o ponto vermelho indica dois períodos atrás.

2.5 O Efeito Doppler relativístico

O Efeito Doppler relativístico descreve a mudança na frequência observada de ondas eletromagnéticas devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador. Este fenômeno é particularmente importante em contextos onde as velocidades envolvidas são próximas à velocidade da luz, e as correções da teoria da relatividade de Einstein se tornam significativas (NUSSENZVEIG, 2014).

O fator de propagação de uma onda eletromagnética plana monocromática no vácuo é dado por:

$$\exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)] = \exp[-i\omega(t - \frac{\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}}{c})] = \exp(-2\pi i F), \quad (17)$$

em que $\mathbf{k}$ é o vetor de onda, $\mathbf{x}$ é a posição, ω é a frequência angular e t é o tempo. Essa expressão representa uma onda plana viajando no espaço. O termo $\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}/c$ representa o atraso no tempo devido à posição relativa da fonte e do observador, em que $\hat{\mathbf{u}}$ é a direção da propagação da onda e c é a velocidade da luz.

Definindo,

$$F \equiv \nu \left(t - \frac{\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}}{c} \right), \quad (18)$$

F é uma função que relaciona a frequência ν da onda com o tempo t e a posição $\mathbf{x}$. O termo $\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}/c$ define a frequência baseada na posição relativa, o que é crucial para entender o efeito Doppler. Definição de t_0

$$t_0 = (\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}) / c, \quad (19)$$

esta equação define t_0 , que representa o tempo de viagem da luz do ponto de emissão até o observador, considerando a distância $\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{x}$ (componente da posição na direção da propagação) e a velocidade da luz c . Assim, podemos expressar F como

$$F \equiv \nu (t - t_0), \quad (20)$$

permitindo ver a dependência da frequência observada ν no tempo medido pelo observador t , e o tempo de viagem t_0 .

No referencial S'

$$F' \equiv \nu' \left(t' - \frac{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{x}'}{c} \right) = \nu' (t' - t'_0), \quad (21)$$

F' é uma função similar a F , mas para um sistema de referência em movimento, onde ν' , t' , $\mathbf{u}'$ e $\mathbf{x}'$ são, respectivamente, a frequência, o tempo, a direção da propagação e a posição no novo sistema de referência, onde temos

$$F = F', \quad (22)$$

apesar das mudanças no sistema de referência, a função que relaciona a frequência, o tempo e a posição permanece a mesma, um princípio fundamental da relatividade.

Seja,

$$F' \equiv \nu' \left(t' - \frac{x'}{c} \cos \theta' - \frac{y'}{c} \sin \theta' \right), \quad (23)$$

expressão esta que decompõe a posição $\mathbf{x}'$ em componentes x' e y' , relacionando-as com ângulos θ' para descrever a direção de propagação da onda em relação ao observador.

Seja,

$$F \equiv \nu \left(t - \frac{x}{c} \cos \theta - \frac{y}{c} \sin \theta \right), \quad (24)$$

descreve a função F no sistema de referência original. Similar à expressão para F' , ela relaciona a frequência ν com as coordenadas espaciais x e y , e o tempo t , considerando a direção de propagação da onda definida pelos ângulos θ .

Aplicamos a transformação de Lorentz inversa¹ para relacionar as variáveis no sistema de referência em movimento com aquelas no sistema de referência original,

$$= \nu \left[\gamma \left(t' + \frac{V}{c^2} x' \right) - \frac{\gamma}{c} \cos \theta (x' + V t') - \frac{y'}{c} \sin \theta \right], \quad (25)$$

γ é o fator de Lorentz, que depende da velocidade relativa V entre a fonte da onda e o observador e c é a velocidade da luz. Esta transformação é fundamental na teoria da relatividade para descrever como as medidas de tempo e espaço são alteradas devido à velocidade relativa entre os observadores.

Colocando em evidência t' e x' , temos:

$$F = \gamma \nu \left(1 - \frac{V}{c} \cos \theta \right) t' \frac{\gamma \nu}{c} \left(\cos \theta - \frac{V}{c} \right) x' - \frac{\nu}{c} \sin \theta y' \quad (26)$$

Comparando com os coeficientes da posição e do tempo com os da equação (22), temos:

$$\beta = V/c \quad (27)$$

e

$$\nu' = \gamma \nu (1 - \beta \cos \theta) \quad (28)$$

¹As transformações de Lorentz inversas, expressando t e x em função de t' e x' , são dadas por:

$$t = \gamma \left(t' + \frac{V x'}{c^2} \right),$$

$$x = \gamma (x' + V t').$$

esta última é equação relativística para o efeito Doppler. Estabelece a relação entre a frequência observada ν' no sistema de referência em movimento e a frequência ν no sistema de referência original. O termo β é a razão entre a velocidade V e a velocidade da luz c , e θ é o ângulo entre a direção de movimento e a direção de observação.

2.6 Efeito Doppler longitudinal

O Efeito Doppler relativístico longitudinal é observado quando a fonte de luz e o observador estão em movimento relativo ao longo de uma mesma linha.

- **Quando a fonte se aproxima do observador ($\theta = 0$ graus):** Com $\theta = 0$ graus, temos $\cos \theta = 1$. Portanto, a equação se torna:

$$\nu' = \nu_0 \gamma (1 - \beta), \quad (29)$$

como o fator de Lorentz é dado por $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$, temos

$$\nu' = \frac{\nu_0 (1 - \beta)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (30)$$

Podemos ver, por exemplo, que se a fonte se move em direção ao observador com uma velocidade suficientemente alta, β se aproxima de 1, fazendo $1 - \beta$ se aproximar de zero. No entanto, o termo $\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ no denominador se aproxima de zero mais rapidamente devido ao quadrado de V , fazendo o valor de γ (e, conseqüentemente, ν') aumentar significativamente. Assim, a frequência observada aumenta à medida que a fonte se aproxima do observador.

- **Quando a fonte se afasta do observador ($\theta = 180$ graus):** Com $\theta = 180$ graus, $\cos \theta = -1$. A equação, portanto, se modifica para:

$$\nu' = \nu_0 \gamma (1 + \beta), \quad (31)$$

substituindo , temos

$$\nu' = \frac{\nu_0 (1 + \beta)}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}. \quad (32)$$

Neste caso, a frequência observada diminui à medida que a fonte se afasta do observador.

2.7 Efeito Doppler transversal

No contexto da relatividade especial, o efeito Doppler transversal ocorre quando uma fonte de luz se move perpendicularmente em relação à linha de visão do observador, ou seja, com um ângulo de $\theta = \frac{\pi}{2}$ radianos (90 graus) em relação a essa linha. A frequência observada é afetada mesmo sem um componente de velocidade direcionado ao observador. A equação fica:

$$\nu = \gamma \nu_0 > \nu_0. \quad (33)$$

Este efeito não tem equivalente clássico e é difícil de ser observado na prática, devido às mínimas variações na frequência e à necessidade de altas velocidades relativas.

3 Aplicações

3.1 Estrelas e galáxias

Devido as alterações nas frequências da luz, os astrofísicos conseguem medir a velocidade com que estrelas e galáxias se movem no vasto universo, oferecendo uma compreensão mais profunda da dinâmica cósmica.

O efeito Doppler-Fizeau é utilizado para determinar quando uma estrela ou galáxia estiver se aproximando, ou seja, se desloca para o azul (blueshift) e se afastando, ou seja se desloca para o vermelho (redshift). A história desses conceitos não só é fundamental para entender a dinâmica do universo, mas também joga luz sobre conceitos como a expansão do universo e a teoria do Big Bang (FRIEDMAN, 1922).

3.1.1 Desvio para o vermelho

Na década de 1920. Hubble observou que as galáxias estavam se afastando umas das outras em todas as direções. Ele percebeu que a luz emitida por essas galáxias exibia um desvio para o vermelho, indicando que as galáxias estavam se afastando. Isso é uma consequência direta da expansão do Universo, onde o espaço entre as galáxias está se expandindo ao longo do tempo.

O fenômeno desvio para o vermelho é causado pelo comprimento de onda da luz dilatado à medida que o espaço se expande. Quanto maior a distância entre a fonte de luz (como uma

galáxia) e o observador, maior é o desvio para o vermelho. Esse fenômeno permitiu a Hubble propor a Lei de Hubble, que estabelece uma relação linear entre a velocidade de afastamento de uma galáxia e sua distância (HUBBLE,1929).

A velocidade de estrelas pelo deslocamento Doppler é:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c} \quad (34)$$

em que v_r é a velocidade radial de afastamento, ou seja, a velocidade da fonte projetada na linha de visão. Quanto mais as estrelas se afastam, mais o espectro estelar se desloca para o vermelho (redshift).

Hubble encontrou uma relação linear entre velocidade e a distância:

$$v = H_0 d \quad \text{com} \quad H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc} \quad (35)$$

Na época, a constante de Hubble H_0 foi mal estimada, pois as estrelas observadas eram muito próximas. Atualmente, estima-se que a constante de Hubble seja:

$$H_0 = 72 \pm 8, \text{ km/s/Mpc} \quad (36)$$

com $1 \text{ Mpc} = 1 \text{ Megaparsec} = 3,26 \times 10^6 \text{ anos-luz}$.

A lei de Hubble expressa que o universo está em expansão, o que sugere que ele teve uma origem, chamada de Big-Bang.

Figura 5: Galáxia espiral Messier 83



Fonte: CTIO/NOIRLab/DOE/NSF/AURA

A nova imagem foi obtida com a Dark Energy Camera (DECam) acoplada ao telescópio Víctor M. Blanco do Observatório Interamericano (CTIO) Cerro Tololo, no norte do Chile.

Messier 83 está a 15 milhões de anos-luz de distância, o que na verdade é bastante próximo no que diz respeito às galáxias vizinhas.

3.1.2 Desvio para o azul

O fenômeno desvio para o azul está relacionado a objetos que se movem em direção ao observador. Quando uma fonte de luz se aproxima, ocorre um desvio para o azul, indicando que as ondas de luz estão sendo encurtadas. Esse fenômeno é conhecido como desvio para o azul por efeito Doppler.

O efeito Doppler neste caso é dado por:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{emissor}}} \quad (37)$$

relativisticamente temos

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \quad (38)$$

no qual, $\Delta\lambda = \lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emissor}}$ é a diferença entre o comprimento de onda observado e o comprimento de onda emitido. O parâmetro z no contexto do desvio para o azul é uma quantidade adimensional, ou seja, não tem dimensões. Ele é definido como a razão entre a mudança do comprimento de onda e o comprimento de onda original (emissor).

- v é a velocidade do objeto em relação ao observador (com sinal negativo para aproximação),
- z é o desvio para o azul (se z for negativo, o que ocorre quando v é negativo, indicando movimento em direção ao observador) ou desvio para o vermelho (se z for positivo).

Figura 6: Galáxia de Andrômeda



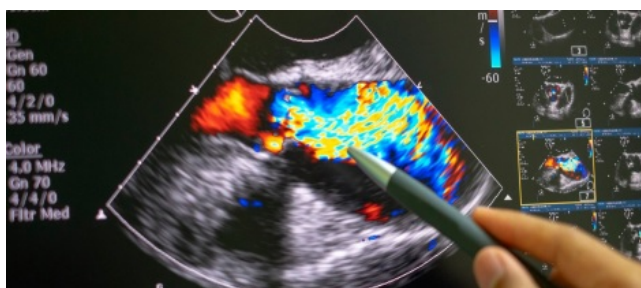
Fonte:Adam Evans/Wikimedia Commons

A peculiaridade desta galáxia é que ela sofre um desvio para o azul no espectro à medida que se move em nossa direção a 266 km/s. Mas como está a 2.500.000 anos-luz de distância de nós, serão provavelmente necessários mais 4 a 10 bilhões de anos antes que a Galáxia de Andrômeda possa colidir com a nossa Via Láctea.

3.1.3 Ultra sonografia doppler

A ultrassonografia é um método não invasivo e seguro para obtenção de imagens, que se fundamenta na utilização de pulsos ultrassônicos, detecção dos ecos resultantes, processamento desses ecos e exibição na tela do aparelho(NAQVI et al. 2013).

Figura 7: Ultra Sonografia como doppler colorido abdominal.



Fonte: Brasil diagnóstico por imagem.

Na prática, os vasos sanguíneos contêm numerosas células sanguíneas que refletem os ultrassons, e essas células movem-se em diferentes velocidades e ângulos. Consequentemente, os ecos recebidos abrangem uma ampla gama de frequências e diversas amplitudes que precisam ser analisadas. As frequências dos desvios Doppler são extraídas a partir do sinal detectado e são avaliadas pelos analisadores de frequência, dispositivos eletrônicos capazes de separar as várias frequências presentes na amostra de volume e apresentá-las de maneira discernível (McDICKEN HOSKINS, 2014).

A ultrassonografia Doppler pode ser aplicada em várias partes do corpo, incluindo vasos sanguíneos do cérebro, pescoço, abdômen, membros inferiores e superiores, coração e até mesmo no feto durante a gestação.

Esse exame é especialmente útil na detecção de problemas circulatórios, como trombose venosa, estenose arterial, obstrução dos vasos, aneurismas e varizes. Além disso, a ultrassonografia Doppler também auxilia na monitorização do fluxo sanguíneo durante procedimentos cirúrgicos, como angioplastia e transplantes.

3.2 Uso em telecomunicações

A necessidade de comunicação em longas distâncias tem sido uma constante na sociedade, permitindo a troca eficiente de informações e, como resultado, contribuindo para o aprimoramento de vários processos. Esse fenômeno tem um impacto direto no desenvolvimento de novas tecnologias. Segundo FRENZEL JR (2016) a transmissão do sinal inteligente é uma mensagem, dado ou algum tipo de informação, que em forma de um sinal elétrico é enviado ao transmissor para amplificá-lo e compatibilizá-lo com o meio para ser enviado, o canal de propagação, onde posteriormente será recebida e retransmitida ao receptor, realizando procedimento inverso.

No contexto das telecomunicações, o efeito Doppler é utilizado principalmente em duas situações: em tecnologias de comunicação móvel, como o 4G e o 5G, e em sistemas de posicionamento global, como o GPS.

Nas tecnologias de comunicação móvel, o efeito Doppler é usado para compensar as variações na frequência dos sinais de rádio causadas pelo movimento dos dispositivos móveis. Quando um dispositivo está em movimento, a frequência do sinal de rádio que ele recebe fica deslocada em relação à frequência do sinal emitida pela torre de transmissão. Isso pode causar distorções

e perda de qualidade na comunicação.

Figura 8: Torre de comunicação.



Fonte:Photo3idea studio.

Para compensar esse efeito, os dispositivos móveis possuem um circuito de correção Doppler que é capaz de ajustar a frequência do sinal recebido de acordo com a velocidade do dispositivo. Dessa forma, é possível manter a qualidade e a estabilidade da comunicação, mesmo em movimento.

Já nos sistemas de posicionamento global, como o GPS ou o Global Positioning System na sigla em inglês, que também já foi conhecido por NAVSTAR-GPS, é o sistema mais conhecido e utilizado atualmente (GNSS 2022). Além de ter sido o primeiro compatível com os Smartphones (Zangenehnejad, 2021). Os satélites GPS emitem sinais de rádio que são recebidos pelo receptor GPS do objeto. A frequência desses sinais é deslocada devido ao movimento do objeto em relação aos satélites.

Figura 9: Satélite de telecomunicação.



Fonte: Felipe Ventura, dezembro 2011.

Analisando o deslocamento da frequência do sinal recebido em relação à frequência emitida pelo satélite, é possível calcular a velocidade e a direção do objeto em movimento. Essas informações são essenciais para o cálculo da posição precisa do objeto no sistema de coordenadas do GPS.

Em resumo, o efeito Doppler é uma ferramenta fundamental nas telecomunicações, sendo utilizado tanto em tecnologias de comunicação móvel quanto em sistemas de posicionamento global. Ele é responsável por compensar as variações na frequência dos sinais de rádio causadas pelo movimento dos dispositivos móveis e também por estimar a velocidade e a direção de um objeto em movimento nos sistemas de GPS.

3.3 Uso pela meteorologia

O efeito Doppler desempenha um papel crucial na meteorologia, especialmente na detecção e previsão de condições climáticas, notadamente na medição da velocidade do vento. Neste contexto meteorológico, a fonte é representada pelo radar meteorológico, que emite ondas eletromagnéticas através da atmosfera.

Ao se depararem com partículas de água ou gelo nas nuvens ou chuvas, essas ondas sofrem um desvio em sua frequência devido ao movimento dessas partículas em relação ao radar. O

radar capta essa mudança na frequência, utilizando-a para calcular a velocidade do vento. A medida é obtida ao comparar o desvio da frequência da onda refletida em relação à frequência originalmente emitida, possibilitando a determinação da velocidade das partículas em movimento, como os presentes na atmosfera.

Além de medir a velocidade do vento, o efeito Doppler é empregado para monitorar e rastrear o deslocamento de nuvens, chuvas e tempestades. Analisando as variações na frequência das ondas refletidas pelo radar, é viável identificar padrões de movimento em sistemas meteorológicos, permitindo a previsão de trajetórias e intensidades.

3.4 Telefonia movel e redes sem fio

Na telefonia móvel, o efeito Doppler é especialmente relevante em comunicações móveis de alta velocidade, como em veículos em movimento rápido ou em trens. O movimento relativo entre as antenas das estações de base e os dispositivos móveis afeta a frequência do sinal, resultando em uma mudança na velocidade e na fase do sinal recebido.

As redes sem fio também são afetadas pelo efeito Doppler. Por exemplo, o efeito Doppler afeta a transmissão de dados em comunicações sem fio, como redes Wi-Fi e 5G. Quando um dispositivo móvel se move em alta velocidade em relação ao ponto de acesso Wi-Fi ou à antena 5G, ocorre uma alteração na frequência dos sinais transmitidos e recebidos (TOWNSEND, 2003; 2004).

Para minimizar os efeitos do efeito Doppler nas comunicações móveis e redes sem fio, técnicas como equalização adaptativa e controle de potência são aplicadas. A equalização adaptativa é usada para compensar as alterações na velocidade e na fase do sinal, enquanto o controle de potência é empregado para ajustar a potência do sinal transmitido para compensar a perda de sinal devido ao movimento relativo.

3.5 Radar Doppler para a previsão de tempestades

O radar Doppler é uma tecnologia utilizada para prever e monitorar tempestades severas. Ele contém uns algoritmos instalados que permitem a identificação de assinaturas presentes em tempestades potencialmente severas. Os parâmetros aplicados à se baseia nas métricas de granizo como a probabilidade de granizo (POH), cuja parametrização é baseada na combinação

de dados de radar e informação da distribuição da temperatura na atmosfera, proposta por Waldvogel et al. (1979).

Esse tipo de radar é particularmente eficiente na detecção de tempestades com potencial de tornados, supercélulas e vendavais. Ele pode identificar áreas de rotação no interior das tempestades, o que indica o potencial de formação de tornados. Além do que a previsão de tempestades utilizando o radar Doppler é baseada na análise das mudanças na velocidade e direção do vento próximo à superfície da Terra. Taia mudanças estão associadas à dinâmica atmosférica, como a convergência de massas de ar e a formação de áreas de baixa pressão.

Figura 10: Base meteorológica



Fonte: Biblioteca de fotos da NOAA.

3.6 Radar de velocidade Doppler

Durante a Segunda Guerra Mundial, o radar Doppler foi desenvolvido e utilizado militarmente para detectar aeronaves inimigas. Após a guerra, essa tecnologia foi adaptada para aplicações civis, como o controle de tráfego e meteorologia.

Um radar Doppler é um sistema de radar que usa a tecnologia Doppler para medir a velocidade de um objeto em movimento.

O radar Doppler é amplamente utilizado em aplicações de controle de tráfego, particularmente para medir a velocidade de veículos. O princípio de um radar Doppler consiste em emitir ondas eletromagnéticas, que são refletidas por objetos em movimento, como veículos. Ao analisar o sinal refletido, é possível calcular a velocidade do objeto.

Figura 11: Radar de velocidade doppler



Fonte: *noimit_pictures*

A equação a seguir representa a diferença de frequência entre a onda refletida e a onda emitida pelo radar (TIPLER, 2010),

$$\Delta\nu = \nu_r' - \nu_f, \quad (39)$$

sendo ν_r' a frequência da onda refletida e ν_f , da onda emitida.

A variação total de frequência é a soma das variações individuais nas duas etapas do processo de reflexão.

$$\Delta\nu = \Delta\nu_1 + \Delta\nu_2. \quad (40)$$

A relação entre a variação de frequência, a velocidade do objeto e as frequências emitida e refletida são dadas por:

$$\Delta\nu = -\frac{u}{c}\nu_1 - \frac{u}{c}\nu_r = -\frac{u}{c}(\nu_1 + \nu_r), \quad (41)$$

podemos também obter a variação relativa de frequência com a velocidade do objeto e a frequência emitida,

$$\frac{\Delta\nu_f}{\nu_f} = -\frac{u}{c} \quad \text{logo} \quad \nu_r = \left(1 - \frac{u}{c}\right) \nu_f, \quad (42)$$

em que u é a velocidade do objeto(veículo).

Assim, a variação de frequência em função da velocidade do objeto e da frequência emitida é,

$$\Delta\nu = -\frac{u}{c} \left(2 - \frac{u}{c}\right) \nu_f. \quad (43)$$

Podemos simplificar para calcular a velocidade do objeto (u) com base na variação de frequência e na frequência emitida.

$$\Delta\nu = -2\frac{u}{c}\nu_f \quad \text{logo} \quad u = -\frac{\Delta\nu}{2\nu_f}c = \frac{|\Delta\nu|}{2\nu_f}c. \quad (44)$$

Os radares Doppler geralmente operam na frequência de $\nu_0 = 24,125$ GHz, que se enquadra na categoria de ondas centimétricas.

Para um veículo se movendo a $u \approx 30$ m/s, o deslocamento de frequência $\Delta\nu$ pode ser aproximado por:

$$\Delta\nu \approx \frac{2u}{c}\nu_f \approx 2 \times 10^{-7}, \quad (45)$$

c representa a velocidade da luz no vácuo.

Em uma configuração típica de radar fixo, o ângulo α entre a direção de movimento do veículo e a direção de propagação da onda do radar é um parâmetro crucial. Por exemplo, para $\alpha = 25^\circ$, o deslocamento Doppler é afetado pela orientação do veículo.

Um aspecto fundamental na detecção de velocidade pelo radar Doppler é a medição do deslocamento por efeito de batimento. Isso é realizado misturando a onda emitida com a onda refletida, deslocada em frequência:

$$\cos(2\pi\nu_f t) + \cos(2\pi\nu t) = 2 \cos(2\pi\nu_f t) \cos(\pi\Delta\nu t) \quad (46)$$

A onda resultante, modulada em amplitude, fornece uma frequência de batimento ν_b , que é diretamente proporcional à velocidade do veículo:

$$\nu_b = \Delta\nu = \frac{2u\nu_f \cos \alpha}{c} \quad (47)$$

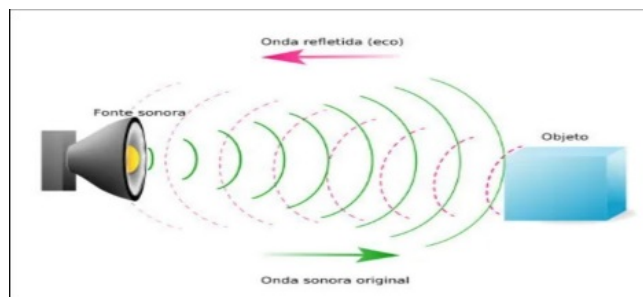
Esta frequência de batimento é tipicamente na ordem de kHz e é usada para calcular a velocidade do veículo.

3.7 Sonar

O sonar, que sua sigla em inglês significa "*Sound Navigation and Ranging*" (Navegação e Localização por Som), é uma tecnologia que utiliza ondas sonoras para detectar, localizar e, em alguns casos, medir a distância de objetos subaquáticos. A história e a sua funcionalidade estão fortemente ligadas ao seu uso em ambientes aquáticos, principalmente para aplicações

militares e de pesquisa submarina e de localização de navios. O pleno êxito de uma missão aquática é função direta do apuramento da predição do alcance sonar e do conhecimento acerca da propagação dos raios sonoros nas águas do mar (CHUNHA 2015).

Figura 12: Fonte sonora e objeto para o eco



Fonte:Mundo educação

A análise dos tempos de retorno dos ecos permite determinar a distância, a direção e, em alguns casos, a forma dos objetos detectados se tornam nítidos através do monitor do equipamento sonar e da análise do operador do equipamento que para cada tipo de sinal refletido tem seu determinado resultado como imagem de peixes, corais além de troncos de árvores que podem estar submersos.

Figura 13: Eco localização



Little Boffin(PeterEdin)

3.8 Tipos de Sonar

Existem diferentes tipos de sonar com funcionalidades específicas:

- Sonar Ativo: opera emitindo pulsos sonoros e analisando os ecos refletidos.

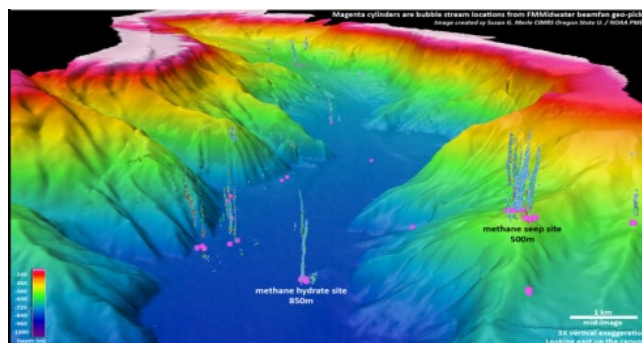
Figura 14: Telas de Sonar a bordo de um destroyer da Royal Navy



Little Boffin(PeterEdin)

- Sonar Passivo: Apenas escuta os sons presentes no ambiente subaquático.
- Sonar Lateral: Utilizado para mapear o fundo do mar e detectar objetos ao longo dos lados da embarcação.
- Sonar de Varredura Multifeixe: Emite múltiplos feixes sonoros simultaneamente, permitindo mapeamento tridimensional detalhado do fundo do mar.

Figura 15: Sonar de Varredura Multifeixe



NOAA Ocean Exploration

Como exemplo podemos apresentar o estudo do uso do sonar na pesca. Fundamental para entender como o sonar detecta peixes e mede variáveis como a profundidade e velocidade.

Para calcular o comprimento de onda (λ) do sinal ultrassônico emitido pelo sonar, usamos a equação:

$$\lambda = \frac{v_{sa}}{\nu} \quad (48)$$

em que λ é o comprimento de onda, v_{sa} é a velocidade do som na água e ν é a frequência do sinal do sonar.

A profundidade do peixe pode ser determinada pelo tempo que o eco leva para retornar ao sonar. A equação usada é:

$$d = \frac{v_{sa} \times \Delta t}{2}$$

sendo d a profundidade do peixe; v_{sa} a velocidade do som na água e Δt é o tempo total de ida e volta do eco.

A velocidade do peixe é medida através do efeito Doppler como:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_E} = \frac{2 \times v_{\text{peixe}} \times \cos(\alpha)}{v_{sa}}$$

$\frac{\Delta \nu}{\nu_E}$ o desvio relativo Doppler; v_{peixe} a velocidade do peixe; α o ângulo entre a direção do movimento do peixe e a linha de emissão do sonar e v_{sa} a velocidade do som na água. o termo ν_E representa a frequência do sinal emitido pelo sonar. O efeito Doppler é observado quando há um deslocamento na frequência percebida do sinal (representado por $\frac{\Delta \nu}{\nu_E}$) devido ao movimento relativo entre a fonte do som (neste caso, o sonar) e o objeto em movimento (o peixe).

4 Metodologia

Para o desenvolvimento do referido trabalho foi realizado pesquisas bibliográficas para a fundamentação teórica do mesmo junto com seus referentes aplicações explorando bases de dados acadêmicas online. Para Gil (2002 pg.44), pesquisa bibliográfica ... "é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos".

A pesquisa bibliográfica oferece uma vantagem significativa, pois possibilita a abrangência de uma variedade mais extensa de fenômenos do que seria viável investigar diretamente. Essa vantagem torna-se especialmente crucial quando o problema de pesquisa envolve a coleta de

dados distribuídos em diferentes localidades geográficas. Para Gil (2017) a pesquisa quantitativa é um método de pesquisa social que utiliza a quantificação nas modalidades de coleta de informações e no seu tratamento, mediante técnicas estatísticas, tal como percentual, média, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, entre outros.

A princípio se estabeleceu como objetivo da pesquisa que seria o efeito doppler e fatores históricos por traz de sua descoberta, após sabendo de sua importância e sua provável utilização foi-se buscar aplicações do tema abordado no nosso cotidiano. As seleções dos sites se deram por sua relevância e reputação de suas fontes para a física clássica e relativística. Abordando sites como PubMed, Google Scholar, Google Acadêmico e o livro de NUSSENZVEIG (2014) onde o seu livro "Curso de física básica" (vol. 2) aborda sobre fluido, oscilação e ondas e o outro livro "Curso de física básica" (vol. 4) discute ótica, relatividade e física quântica.

4.1 Levantamento bibliográfico

Abordando termos-chaves como "Efeito Doppler", "Aplicações do Efeito Doppler", "Doppler em Medicina", "Doppler em Astronomia" etc. A partir destes pontos citados realizou-se levantamentos de artigos e documentos dos sites acadêmicos referidos. Onde Qualquer espécie de pesquisa, em qualquer área, supõe e exige pesquisa bibliográfica prévia, quer a maneira de atividade exploratória, quer para o estabelecimento, quer para justificar os objetivos e contribuições da própria pesquisa (RUIZ, 2009, p. 57). Procurando em diversas bases de dados e buscando aprimorar os seus resultados da pesquisa ou a sua simplificação do processo.

5 Considerações Finais

Neste trabalho monográfico, realizamos uma investigação abrangente do Efeito Doppler, abordando tanto os aspectos da física clássica quanto os da relatividade especial e destacando suas aplicações práticas em vários campos.

A compreensão do Efeito Doppler Clássico foi um passo importante na física, demonstrando como a frequência das ondas (por exemplo, ondas sonoras) é percebida de maneira diferente devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador. Este conceito se estende ao Efeito Doppler Relativístico, que abrange tanto as formas longitudinal quanto transversal.

No Efeito Doppler Clássico, quando a fonte de uma onda se aproxima de um observador, a frequência percebida da onda aumenta (um tom mais agudo); quando a fonte se afasta, a frequência percebida diminui (tom mais grave). Isso é comumente exemplificado com o som da sirene de uma ambulância que se aproxima e depois se afasta.

O Efeito Doppler Relativístico leva em consideração as altas velocidades, próximas à velocidade da luz. Nestas velocidades extremas, as mudanças na frequência percebida não são apenas devido ao movimento relativo, mas também devido aos efeitos da relatividade especial de Einstein. Isso significa que, em altas velocidades, as mudanças na frequência percebida são mais extremas do que o que seria previsto apenas pelo efeito Doppler clássico.

As aplicações práticas do Efeito Doppler são vastas e significativas, abrangendo desde a astrofísica, onde é utilizado para entender a expansão do universo e o movimento de estrelas e galáxias, na medicina, com a ultrassonografia Doppler auxiliando no diagnóstico de condições cardiovasculares. Além disso, o efeito é essencial em sistemas de navegação como GPS, em tecnologias de comunicação, e em ferramentas meteorológicas como o radar Doppler.

A metodologia empregada nesta pesquisa envolveu um levantamento bibliográfico detalhado e a seleção criteriosa de sites acadêmicos, garantindo uma análise rigorosa e uma base sólida para o estudo.

Por fim, investigamos que o Efeito Doppler não é apenas um fenômeno físico fascinante, mas também um princípio com implicações profundas e práticas em várias áreas da ciência e tecnologia. A compreensão deste efeito é fundamental para o avanço do conhecimento humano, tanto no entendimento do universo quanto no desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

Como perspectiva futura podemos aplicar o Efeito Doppler na física atômica para estudar o movimento e a interação dos átomos, especialmente em temperaturas extremamente baixas, abrindo caminhos para novas descobertas sobre a matéria e o Universo.

Referências

- [1] CUNHA, A. L. T. *Predição do alcance sonar Um estudo comparativo entre o Subsistema de Processamento Acústico de Sonoboias (SPAS-32) e o Sistema de Previsão do Ambiente Acústico para Planejamento de Operações Navais (SISPRES 5.0)*. Trabalho de Conclusão de Curso (Lato Sensu) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- [2] DOPPLER, C. Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels. 1842.
- [3] FEIGENBAUM, H. *Instrumentation*. In: Echocardiography. 4th ed. Philadelphia: Lea and Febiger, 1986. Cap.1, p.1-49.
- [4] FOOTE, G.B., KRAUSS, T.W. e MAKITOV, V., 2005. *Hail metrics using conventional radar*. Proceedings, 16th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification, January 2005, AMS, Boston. www.ams.confex.com/ams/pdfpapers/86773.pdf.
- [5] FRENZEL JR., Louis E. *Principles of Electronic Communication Systems*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.
- [6] FRIEDMAN, A. *Über die Krümmung des Raumes*. Z. Phys., 10, 377, 1922.
- [7] GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, SP: Atlas, 2002.
- [8] GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, SP: Atlas, 2017.
- [9] GNSS. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. <endereço\unhbox\voidb@x\setbox\z@\hbox{c}\accent24codaweb>. Acesso em: 20 de jun. de 2022. Citado na página 7.
- [10] HALLIDAY, David; RESNICK, Jearl; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [11] HEIMBERG, F. *Untersuchungen zum operationellen einsatz des differential GPS*. Tese (Doutorado) Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Hannover, 1994.

- [12] HUBBLE, E. *A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 15: 168-173, 1929.
- [13] KNIGHT, Randall D. *Física. Uma abordagem estratégica, volume 2: Termodinâmica, óptica*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- [14] MACH, E. Beiträge zur Dopplerschen Theorie. Ton- und Farbbänderungen durch Bewegung. In: Gesammelte Abhandlungen. Praga, 1873.
- [15] MACH, E. Sitzungsber. K. Akad. Sabe. Viena 77,299(1878).
- [16] MCDICKEN W. N.; HOSKINS P. R. *Physics: Principles, Practise and Artefacts*. In: POZNIAK M. A.; ALLAN P. L. Clinical Doppler Ultrasound. 3rd ed. China: Elsevier; 2014. p. 1-24. ISBN: 9780702050152.
- [17] NAQVI J.; YAP K. H.; AHMAD G.; GHOSH J. *Transcranial Doppler Ultrasound: A Review of the Physical Principles and Major Applications in Critical Care*. International Journal of Vascular Medicine, v. 2013, p. 1-13, 2013. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/629378>.
- [18] NUSSENZVEIG, H. Moysés. *Curso de Física Básica, volume 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. 5ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014.
- [19] NUSSENZVEIG, Moyses. *Curso de Física Básica Vol. 4 Ótica, Relatividade e Física Quântica*. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.
- [20] RUIZ, J. A. *Metodologia Científica: guia para eficiência nos estudos*. São Paulo, SP: Atlas, 2009. Disponível em <http://gestaouniversitaria.com.br/artigos/consideracoes-sobre-estado-da-arte-levantamento-bibliografico-e-pesquisa-bibliogra>. Acesso em 03 de dez. de 2023.
- [21] SAMPAIO, Mario Ferraz. *História do Rádio e da Televisão no Brasil e no Mundo*. Rio de Janeiro: Achiamé, 1984.
- [22] Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D. *Física*. RJ: Livros Técnicos e Científicos, 1984.

- [23] TOWNSEND, A. *Wired / Unwired: The Urban Geography of Digital Networks*. PhD dissertation, MIT, September 2003.
- [24] TOWNSEND, A. *Digitally mediated urban space: new lessons for design*. In: Praxis, 2004. <http://urban.blogs.com/research/townsend.pdf>.
- [25] VISSER, P.J.M., 2001. *The Storm-Structure-Severity method for the identification of convective storm characteristics with conventional weather radar*. Meteorological Applications, 8, 1-10.
- [26] WAITE, A. D. *Sonar for Practising Engineers*. 3rd ed. West Sussex: John Wiley Sons Ltd., 2002.
- [27] WALDVOGEL, A., FEDERER, B. and GRIMM, P., 1979. *Criteria for the Detection of Hail Cells*. Journal of Applied Meteorology, 18, 1521-15250000.
- [28] YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. *Física II: Termodinâmica e Ondas*. 12^a ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.
- [29] F. Zangenehnejad and Y. Gao. *Gnss smartphones positioning: Advances, challenges, opportunities, and future perspectives*. Satellite Navigation, vol. 2, no. 1, pp. 123, 2021. Citado na página 7.
- [30] VOGEL, H. Astron. Nachr. v. 78, p. 241, 1872. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/asna.18710781602>.
- [31] EINSTEIN, A. Ana. Física. v. 328, p. 197, 1907. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/andp.19073280613>
- [32] VOIGT, W. Nachr. Königl. Ges. Wiss. Univ. Göttingen 2, 41 (1887).
- [33] C. Abraços, Filós. Trad. R.Soc. Londres 158, 529 (1868).
- [34] HELLEMANS, A.; BUNCH, B. *The Timetables of Science*. New York City: Simon and Schuster, 1988. 317 p. ISBN 0-671-62130-0.