

RELATÓRIO VI - PRINCÍPIO DA INCERTEZA

PETRUS KIRSTEN 10785652

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em 1927, o físico alemão WERNER HEISENBERG DISCUTIU QUE, AO DETERMINAR A PRECISÃO DA POSIÇÃO DE UM SISTEMA, MENOS PRECISO SERÁ A DETERMINAÇÃO DE SEU MOMENTO, E VICE-VERSA. ESTE PRINCÍPIO FOI DENOMINADO "PRINCÍPIO DA INCERTEZA", E PODE SER ESCRITO MATEMATICAMENTE COMO SENDO

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

ONDE Δx É A INCERTEZA NA POSIÇÃO E Δp É A INCERTEZA DO MOMENTO. COMO MOSTRA A EQUAÇÃO (1), O PRODUTO $\Delta x \Delta p$ NÃO PODE SER IGUAL OU MENOR QUE $\hbar/2$, ONDE $\hbar = h/2\pi$.

AO CONSIDERAR A INCERTEZA DE UM ELÉTRON DA ENERGIA E DE UM ELÉTRON SE MOVENDO COMO

$$\Delta E = \frac{p_x}{m} \Delta p_x = v_x \Delta p_x$$

SE O INTERVALO DE TEMPO NECESSÁRIO PARA A MEDIDA É Δt , A INCERTEZA NA POSIÇÃO É

$$\Delta x = v_x \Delta t$$

Assim, combinando estas relações com a equação (1), tem-se

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Portanto, o objetivo deste experimento é avaliar o princípio da incerteza utilizando, para isso, ondas mecânicas e eletromagnéticas. Assim, será testado o princípio.

2. METODOLOGIA

2.1 ONDAS MECÂNICAS COM ALTO-FALANTE

A primeira parte do estudo compôs em utilizar um alto-falante em frequência fixa a fim de gerar diferentes comprimentos de pacotes de onda. Para isso, o alto-falante foi acionado por diferentes tempos, de 1 até 50 s, variando de 5 em 5 s.

Com isso, foi montado os gráficos dessas ondas acústicas coletadas através de um microfone. Através da transformada de Fourier destes gráficos, calculamos os valores

DA ~~ALTA~~ LARGURA-A-MEIA-ALTURA DO AJUSTE DE UMA CURVA DE LORENTZ. TAIS VALORES SÃO AS INCERTEZAS DA FREQUÊNCIA ASSOCIADA.

A PRAVÉS DOS VALORES DE INCERTEZA DA FREQUÊNCIA, FORAM CALCULADAS AS ENERGIAS ASSOCIADAS ~~NA~~ PELO EQUAÇÃO

$$E = h\nu$$

ONDE h É A CONSTANTE PLANCK E ν É A FREQUÊNCIA DA ONDA.

DESSE MODO, PODE-SE USAR A RELAÇÃO DA EQUAÇÃO (2) PARA VERIFICAR O PRINCÍPIO DA INCERTEZA.

2.2 ONDAS MECÂNICAS COM DIAPASÃO

O MÉTODO SEGUIDO NESTA SEÇÃO SE ASSEMELHOU AO DESCRITO NA SEÇÃO ANTERIOR. PORÉM, AO INVÉS DE UTILIZARMOS ~~OS~~ ALTO-FALANTES PARA GERAR ONDAS ACÚSTICAS, FORAM UTILIZADOS DIAPASÕES COM DIFERENTES FREQUÊNCIAS ASSOCIADAS.

2.3 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS COM LASER

A ÚLTIMA PARTE DESTE ESTUDO CONSISTIU EM UTILIZAR UM FEIXE DE FÓTONS COM UM LASER. ESTE FEIXE SOFREU DIFRAÇÃO EM UMA FENDA COM LARGURA VARIÁVEL E O PADRÃO FOI VERIFICADO EM UM ANTEPARO.

PELA RELAÇÃO DOU TRIGONOMETRIA, SABE-SE QUE O ÂNGULO θ FORMADO PELA DIFRAÇÃO EM UM ANTEPARO A UMA DISTÂNCIA D DA FENDA COM UMA LARGURA y DO MÁXIMO DE DIFRAÇÃO É:

$$\tan \theta = \frac{y}{D}$$

$$\Rightarrow \tan \theta \approx \sin \theta \approx \frac{y}{D}$$

ASSIM, PARA HAVER UM MÍNIMO DE DIFRAÇÃO:

$$\Delta y \sin \theta = \lambda$$

$$\Rightarrow y \approx \frac{\lambda D}{\Delta y} \quad (3)$$

ONDE Δy É A LARGURA DA FENDA.

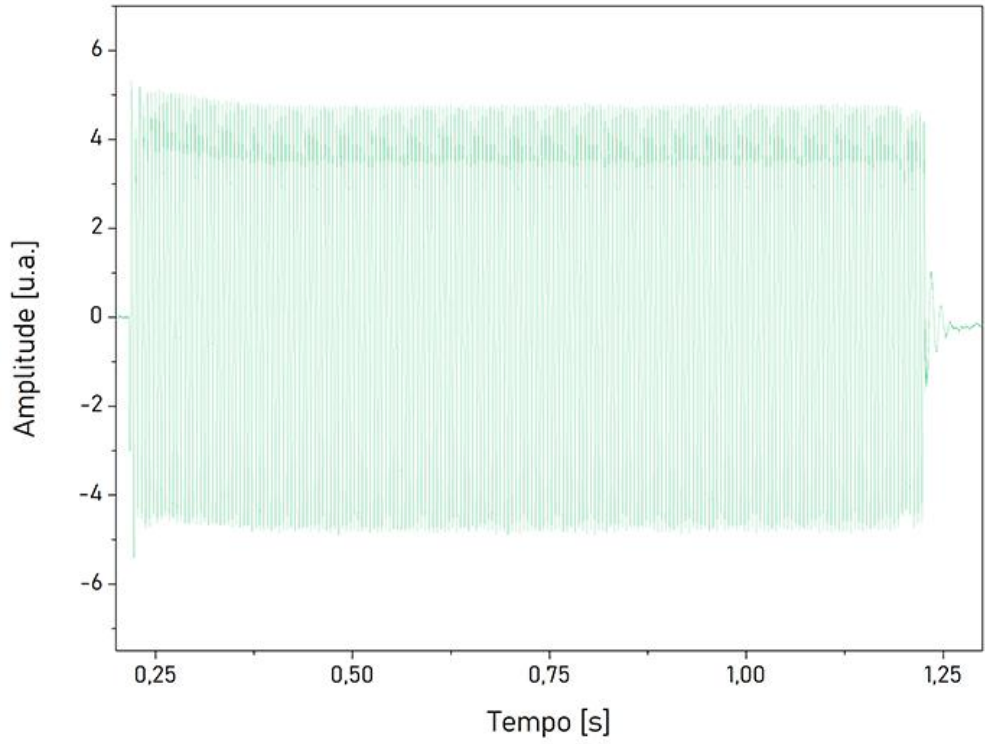
DESTE MODO, O EXPERIMENTO CONSISTIU EM USAR UMA MICRÔMETRO COMO FENDA E MEDIR O MÁXIMO DE DIFRAÇÃO NO ANTEPARO. ASSIM, PÔDE-SE RELACIONAR A INCERTEZA DO MOMENTO COM A INCERTEZA DA POSIÇÃO (Δy) DA SEGUINTE FORMA:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\Delta y} \quad (4)$$

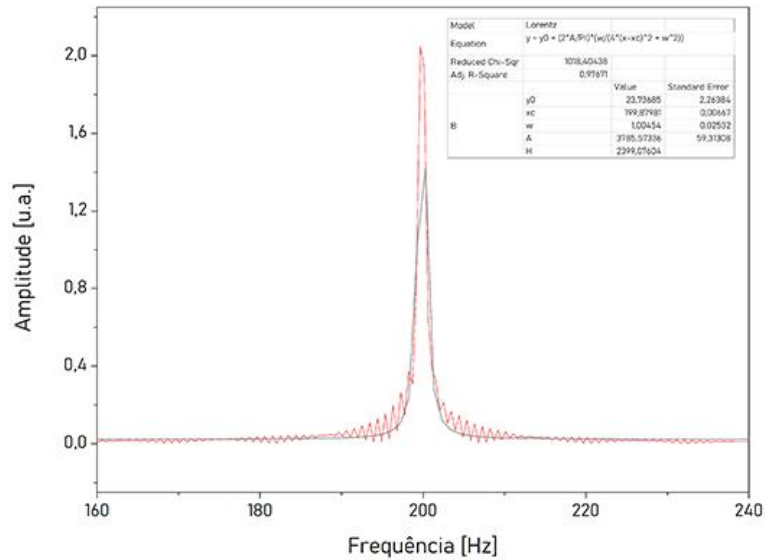
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A FIGURA (1) DEMONSTRA UM EXEMPLO DE UM DOS PACOTES DE ONDA GERADOS. COM ESTE GRÁFICO, OBTIVE-SE O GRÁFICO DA FIGURA (2) PARA ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER PARA OBTER $\Delta \vec{v}$ E $\Delta \vec{p}$.

NA TABELA (1) ESTÃO APRESENTADOS OS DADOS COMPILADOS PARA TODOS OS PACOTES DE ONDA GERADOS COM O ALTO-FALANTE. AO VISUALIZAR A COMPARAÇÃO DO PRODUTO $\Delta \vec{p} \Delta \vec{x}$ É OBTIDO COM O VALOR DE $\hbar/2$, PERCEBE-SE QUE TODOS OS VALORES FORAM SIGNIFICANTEMENTE MAIORES QUE $\hbar/2$. ASSIM, COMPROVA-SE O ~~PRINCÍPIO~~ PRINCÍPIO DA INCERTEZA NESTE CASO.



⇒ FIGURA 1: DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE AMPLITUDE EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA UM PACOTE DE ONDA DE 1 S.



⇒ FIGURA 2: ESPECTRO DE FREQUÊNCIA PARA UM PACOTE DE ONDA DE 1 S ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER.

Tabela 1 Comparação do princípio da incerteza com os dados de energia e tempo coletados para uma onda mecânica de um alto-falante

Tempo do pacote de onda [s]	Incerteza da frequência estimada do pacote de onda [Hz]		Incerteza da energia calculada para o pacote de onda [10^{-34} J]		$\Delta E \cdot \Delta t$ [10^{-34} J·s]	$\frac{h}{2}$ [10^{-34} J·s]	Comparação entre o valor calculado e $h/2$	
		\pm		\pm				\pm
1	1,005	\pm 0,025	6,66	\pm 0,17	6,66 \pm 0,17	0,53	1256%	\pm 32%
5	0,157	\pm 0,007	1,04	\pm 0,04	5,21 \pm 0,22	0,53	982%	\pm 41%
10	0,107	\pm 0,002	0,71	\pm 0,01	7,09 \pm 0,12	0,53	1337%	\pm 23%
15	0,047	\pm 0,004	0,31	\pm 0,03	4,68 \pm 0,40	0,53	883%	\pm 75%
20	0,052	\pm 0,002	0,34	\pm 0,01	6,88 \pm 0,21	0,53	1297%	\pm 40%
25	0,055	\pm 0,001	0,37	\pm 0,01	9,16 \pm 0,15	0,53	1728%	\pm 28%
30	0,029	\pm 0,001	0,19	\pm 0,01	5,79 \pm 0,24	0,53	1093%	\pm 45%
35	0,013	\pm 0,001	0,08	\pm 0,01	2,91 \pm 0,34	0,53	549%	\pm 64%
40	0,029	\pm 0,001	0,19	\pm 0,01	7,78 \pm 0,27	0,53	1468%	\pm 51%
45	0,024	\pm 0,001	0,16	\pm 0,01	7,14 \pm 0,35	0,53	1347%	\pm 66%
50	0,006	\pm 0,005	0,04	\pm 0,03	2,15 \pm 1,58	0,53	406%	\pm 299%

3.2 ONDAS MECÂNICAS COM DIAPASÃO

DO MESMO MODO COMO FEITO ANTERIORMENTE, OS DADOS NA TABELA 2 DEMONSTRAM A COMPARAÇÃO DOS VALORES CALCULADOS E O PRINCÍPIO DA INDETERMINAÇÃO DE HEISENBERG PARA QUATRO DIFERENTES DIAPASÕES.

Tabela 2 Comparação do princípio da incerteza com os dados de energia e tempo coletados para uma onda mecânica de um diapásão

Diapasão	Tempo do pacote de onda [s]	Incerteza da frequência estimada do pacote de onda [Hz]		Incerteza da energia calculada para o pacote de onda [10^{-34} J]		$\Delta E \cdot \Delta t$ [10^{-34} J·s]	$\frac{\hbar}{2}$ [10^{-34} J·s]	Comparação entre o valor calculado e $\hbar/2$	
A	0,05	4,067	± 0,231	26,95	± 1,53	1,35 ± 0,08	0,53	254%	± 14%
B	2,50	0,234	± 0,006	1,55	± 0,04	3,87 ± 0,10	0,53	731%	± 20%
C	0,10	2,954	± 0,102	19,57	± 0,67	1,96 ± 0,07	0,53	369%	± 13%
D	1,50	0,165	± 0,013	1,09	± 0,09	1,64 ± 0,13	0,53	309%	± 25%

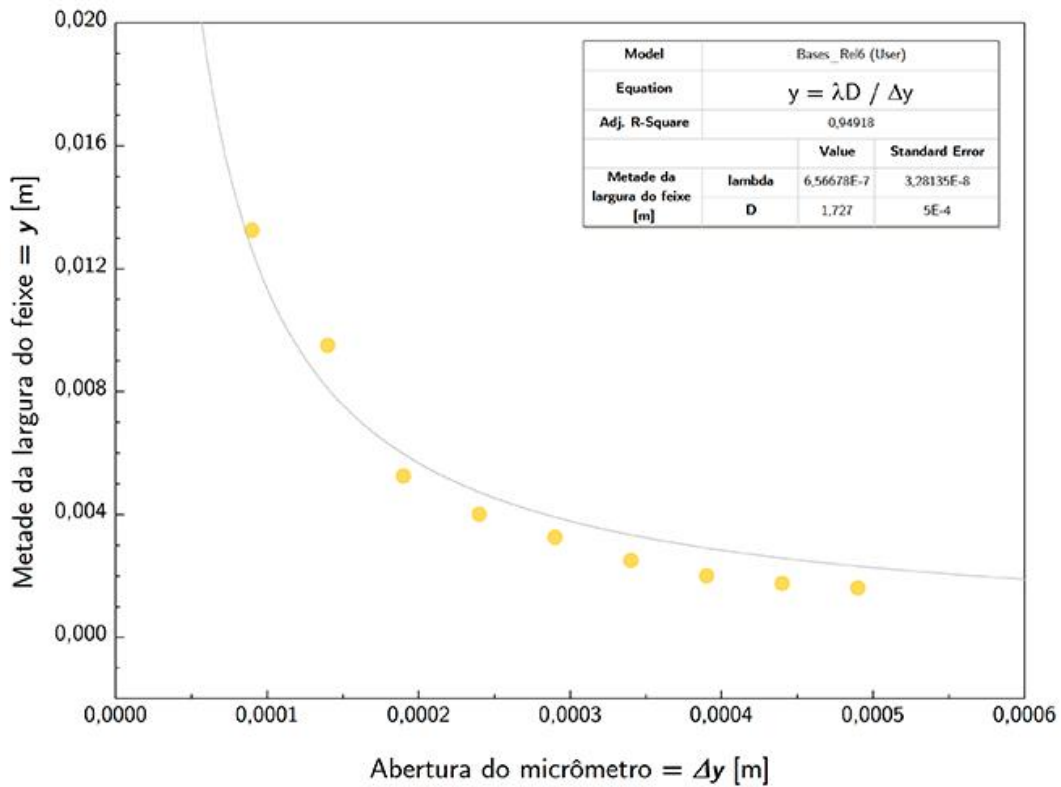
DE ACORDO COM A TABELA 2, PÔDE-SE COMPROVAR O ESPERADO PELO PRINCÍPIO DA INCERTEZA. EM RELAÇÃO AOS PACOTES DE ONDA GERADOS PELOS ALTO-FALANTES, OS VALORES DE INCERTEZA COM O DIAPASÃO FORAM MENORES.

3.3 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS COM LASER

PRIMEIRAMENTE, FOI NECESSÁRIO DESCOBRIR O VALOR DE λ . PARA ISSO, UTILIZANDO A RELAÇÃO DA EQUAÇÃO (1), FOI AJUSTADA UMA CURVA NA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES E EM FUNÇÃO DE Δy .

DESSE MODO, ESTIMOU-SE UM ~~VALOR~~ $\lambda = 656,3 \pm 0,3$ nm.

ASSIM, PODEMOS CALCULAR O MOMENTO ASSOCIADO EM CADA ABERTURA DO MICRÔMETRO E, LOGO, VERIFICAR O PRINCÍPIO DA INCERTEZA, CONFORME TABELA 3.



→ FIGURA 3 DISTRIBUIÇÃO DAS VALORES COLETADOS DA METADE DA LARGURA DO FEIXE (y) EM FUNÇÃO DA ABERTURA DO MICRÔMETRO (Δy)

Tabela 3 Comparação do princípio da incerteza com os dados de posição e momento coletados para uma onda eletromagnética

Abertura do micrômetro [± 0,001 cm]	Largura do feixe [± 0,01 cm]	Incerteza do momento em y [10 ⁻²⁹ kg·m/s]	Δy·Δp [10 ⁻³³ J·s]	h [10 ⁻³³ J·s]	Comparação entre o valor calculado e h
0,009	2,65	1,5475 ± 0,0059	1,3928 ± 0,1548	0,6626	210% ± 23%
0,014	1,90	1,1096 ± 0,0058	1,5534 ± 0,1110	0,6626	234% ± 17%
0,019	1,05	0,6132 ± 0,0058	1,1650 ± 0,0613	0,6626	176% ± 9%
0,024	0,80	0,4672 ± 0,0058	1,1212 ± 0,0467	0,6626	169% ± 7%
0,029	0,65	0,3796 ± 0,0058	1,1008 ± 0,0380	0,6626	166% ± 6%
0,034	0,50	0,2920 ± 0,0058	0,9928 ± 0,0292	0,6626	150% ± 4%
0,039	0,40	0,2336 ± 0,0058	0,9110 ± 0,0234	0,6626	137% ± 4%
0,044	0,35	0,2044 ± 0,0058	0,8993 ± 0,0204	0,6626	136% ± 3%
0,049	0,32	0,1869 ± 0,0058	0,9157 ± 0,0187	0,6626	138% ± 3%

Os dados comprovaram mais uma vez o princípio da incerteza, demonstrando que o produto das incertezas eram maiores que o valor esperado.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi possível a comprovação do princípio da incerteza de Heisenberg para diferentes tipos de ~~par~~ ondas. Os valores encontrados com o laser foram aqueles que apresentaram menores incertezas associadas. Já os valores com o alto-falante demonstraram a maior incerteza.