

## Relatório II Princípio da Incerteza de Heisenberg

**Resumo** O princípio da incerteza de Heisenberg nos diz que não podemos conhecer o momento exato de uma partícula simultaneamente com sua posição exata ou então conhecer sua energia juntamente ao seu tempo, devido às interações que não ocorrem na física clássica. Dessa forma, neste experimento, o partir de duas práticas (ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas) busca-se confirmar tal princípio.

**Introdução** O princípio da incerteza consiste num enunciado da mecânica quântica formulado em 1927 por Werner Heisenberg. Tal princípio estabelece a existência de um limite na precisão com que certas pares de propriedades de uma dada partícula física podem ser conhecidas (tais como posição e momento).

Este princípio diz que não podemos medir a posição ( $x$ ) e o momento ( $p$ ) de uma partícula com precisão absoluta. Quanto mais sabemos de um, menos sabemos do outro. Multiplicando suas incertezas, o resultado deve ser maior que  $\hbar/2$ , onde  $\hbar$  é a constante de Planck dividido por  $2\pi$ .

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

(11)

Utilizando a relação de de Broglie (2) e Einstein (3), é possível obter a relação para o princípio da incerteza válida para energia  $E$  e tempo  $t$ :

$$p = \hbar k \quad (2)$$

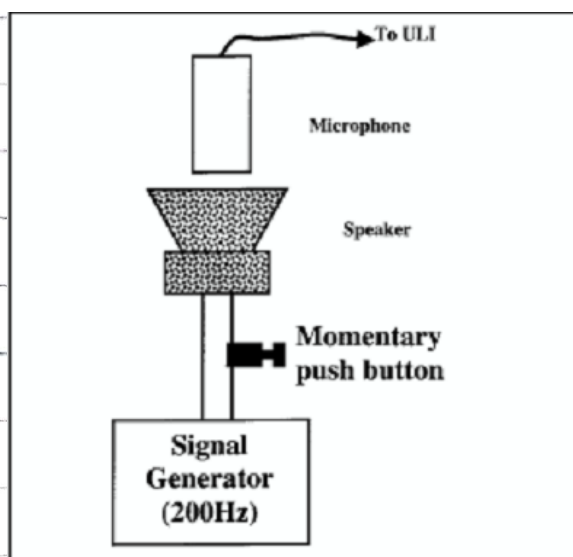
$$E = \hbar \omega \quad (3)$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (4)$$

A presente prática tem como objetivo a verificação do enunciado em questão utilizando ondas mecânicas e eletromagnéticas.

**Materiais e métodos: Parte 1 - Ondas Mecânicas**

A figura abaixo representa o aparato experimental.



Neste, utilizando o gerador de funções a 200 Hz e o microfone, a amplitude de um pacote de ondas foi registrada.

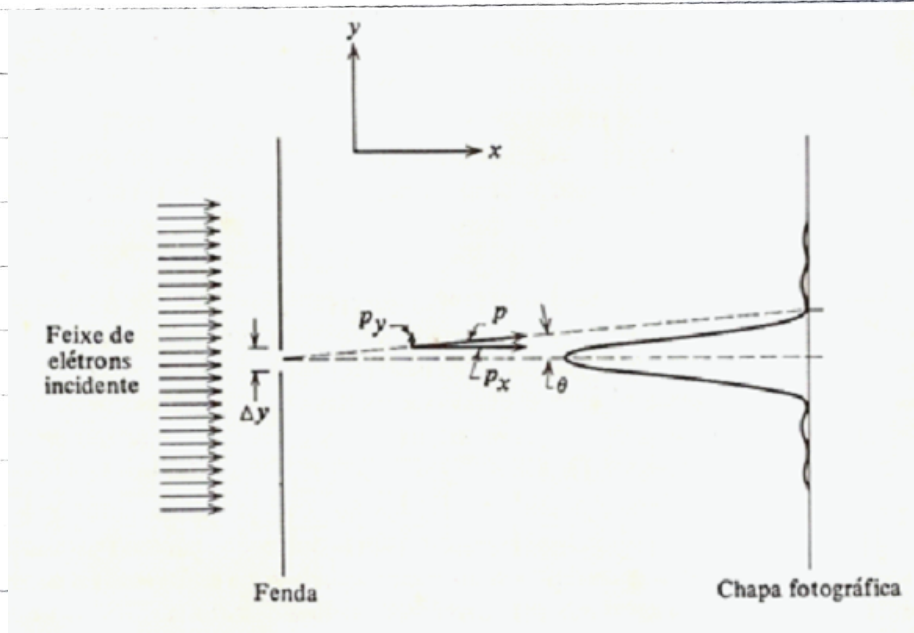
Com os dados coletados foi construído um gráfico de Amplitude X tempo e determinado o comprimento do pacote.

te de ondas. Ainda sobre estes dados, foi aplicada a transformada de Fourier, feito um gráfico para determinar a frequência emissora da fonte e a largura a meio altura.

O processo foi repetido para 10 diferentes valores de tempo para o pacote de ondas e para as diaposições disponíveis.

## Parte 2 - Ondas Eletromagnéticas

Para esta parte do experimento, temos o esquema experimental dado pela figura abaixo.



Neste, foi posicionado e alinhado um laser, 2 lâminas para criar uma pequena fenda simples de tamanho variável e um anteparo. Mediu-se então o tamanho da fenda com relação ao tamanho do maior pico formado na difração no anteparo.

Com os dados coletados fez-se um gráfico

da variação da largura do máximo de difração com a largura da fenda. A incerteza do momento do fóton em função da largura da fenda foi medida com o intuito de se confirmar o princípio da incerteza.

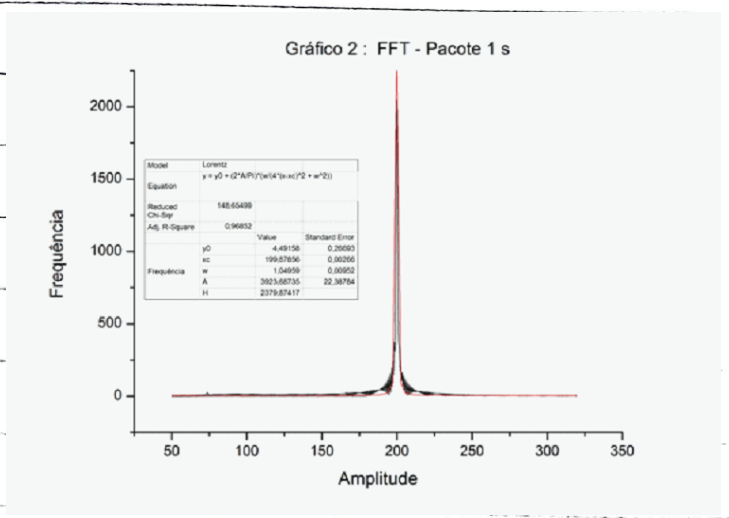
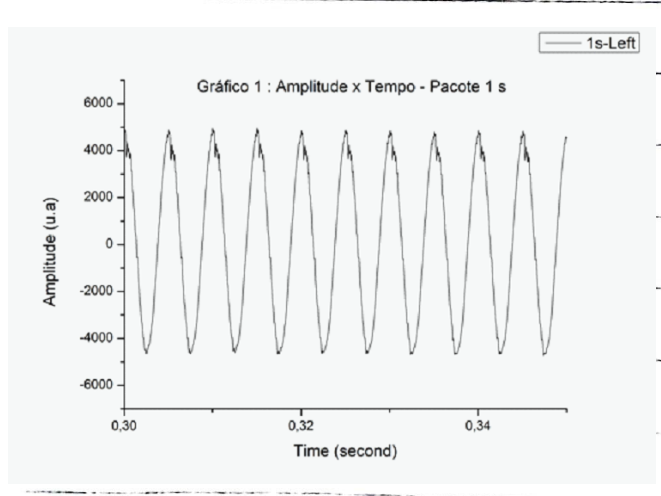
## Resultados e Discussões

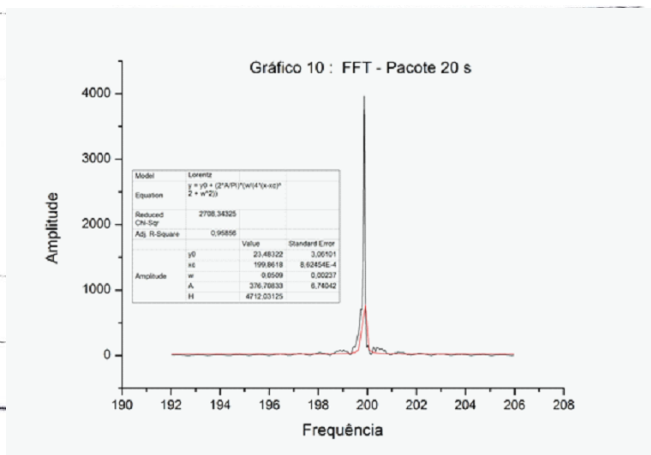
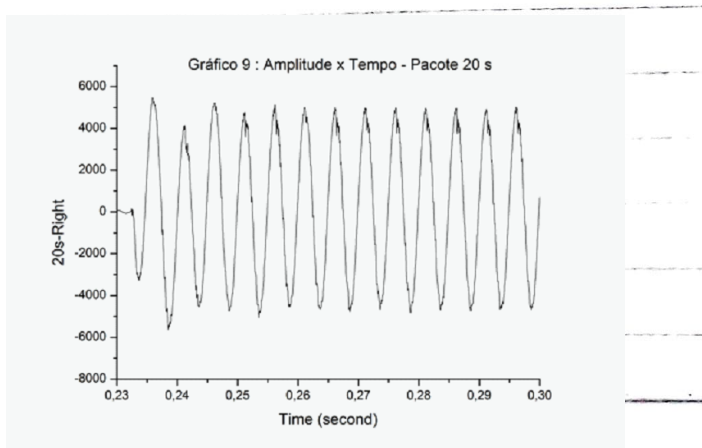
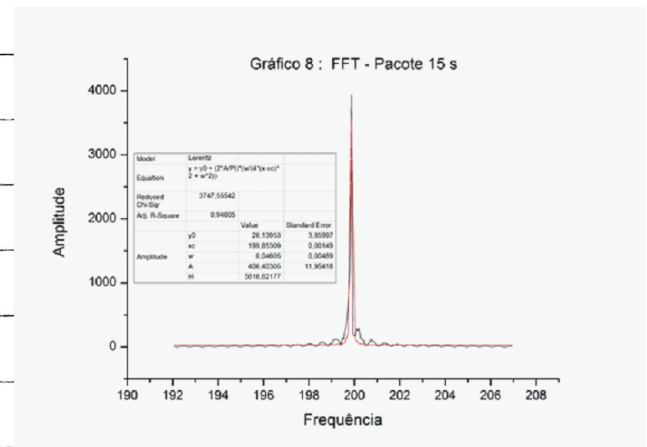
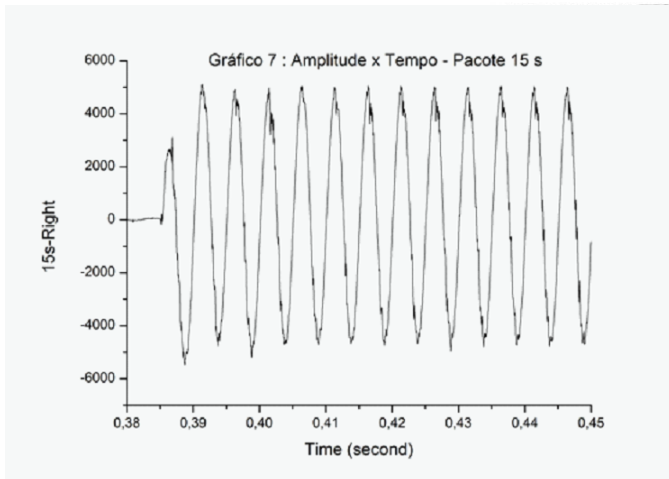
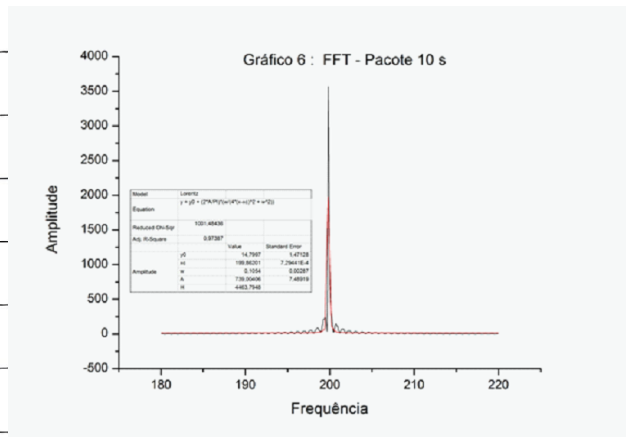
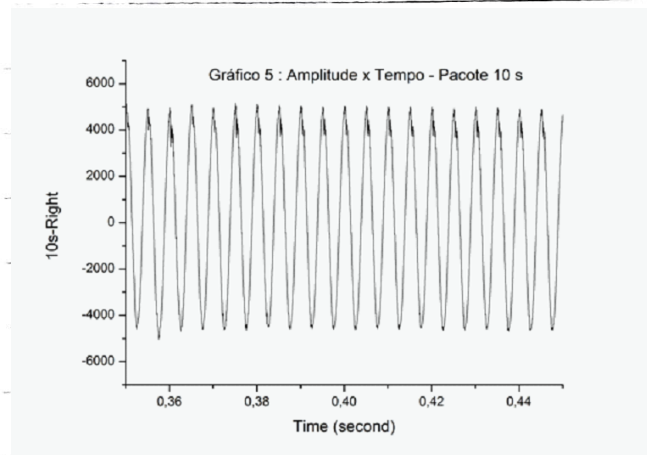
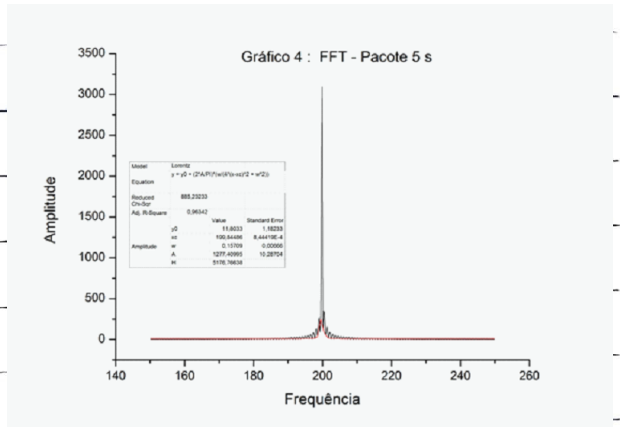
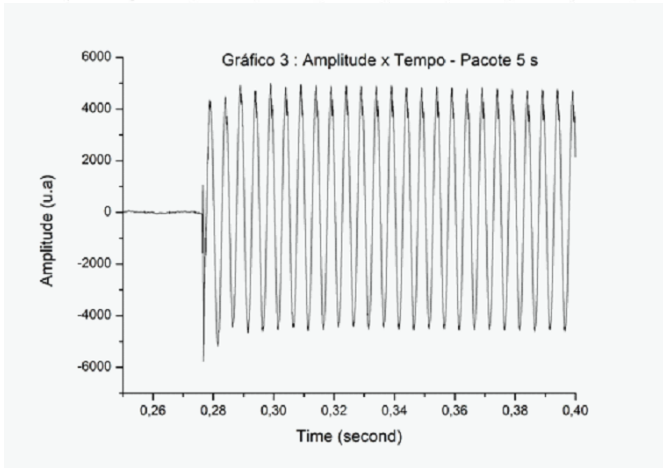
### Parte 1 - Ondas Mecânicas

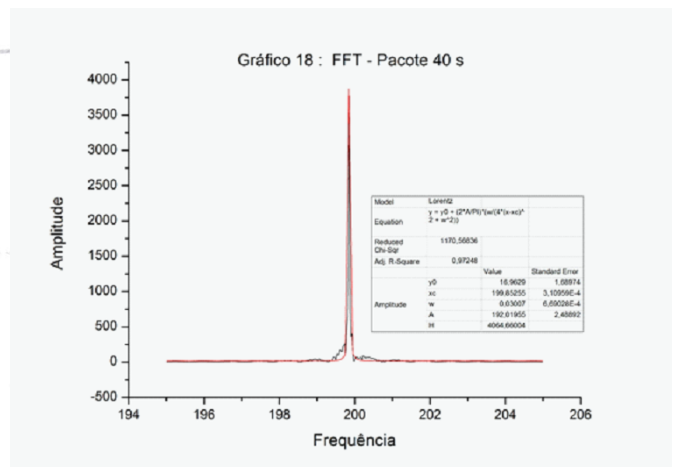
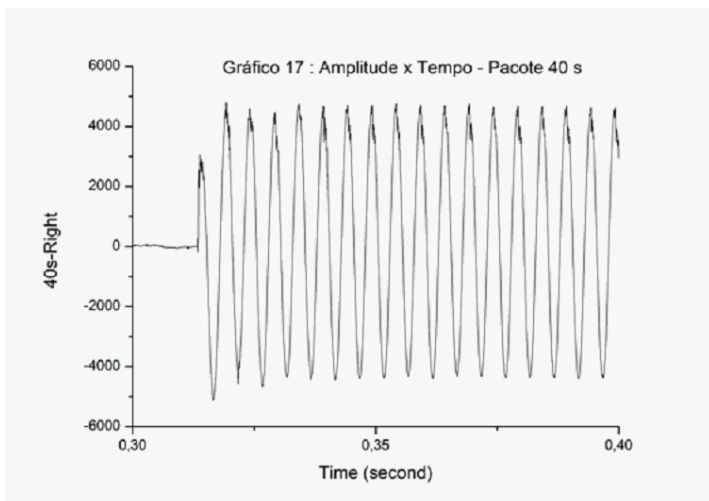
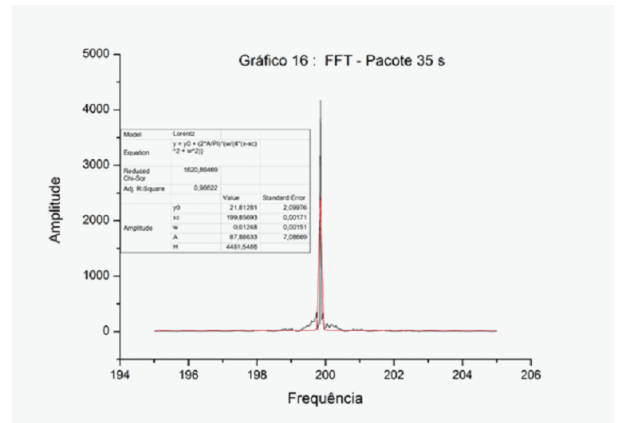
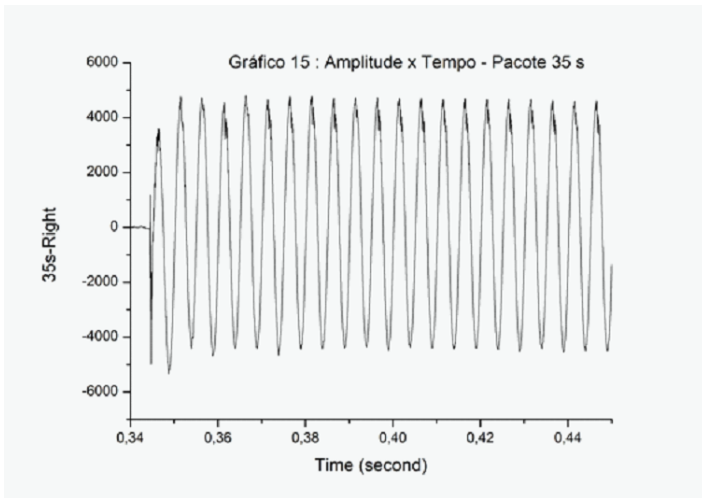
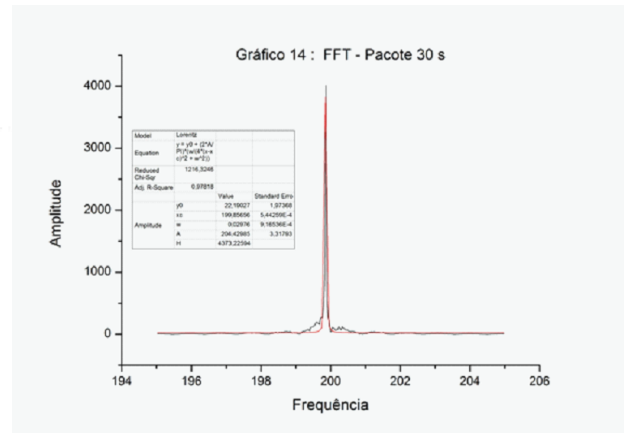
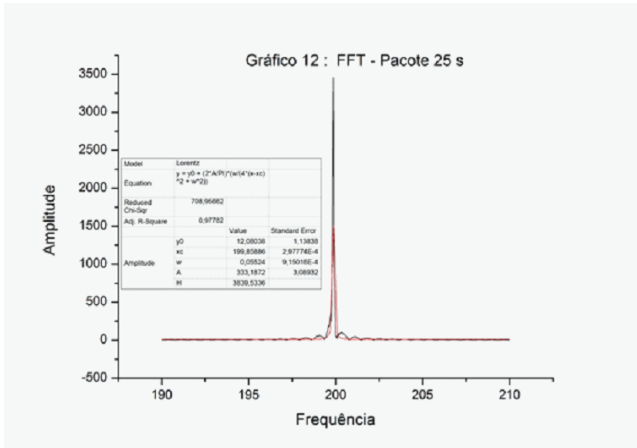
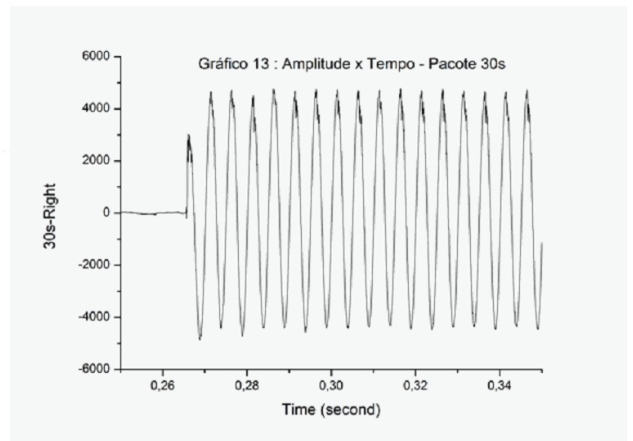
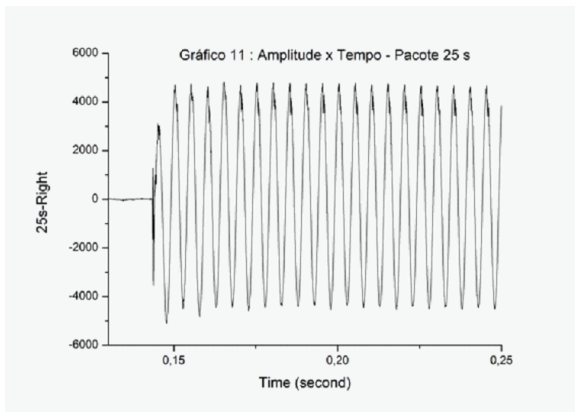
Ao importar os dados com o software Origin, não era possível ver com clareza as ondas. Logo, os gráficos foram ampliados para melhor visualização.

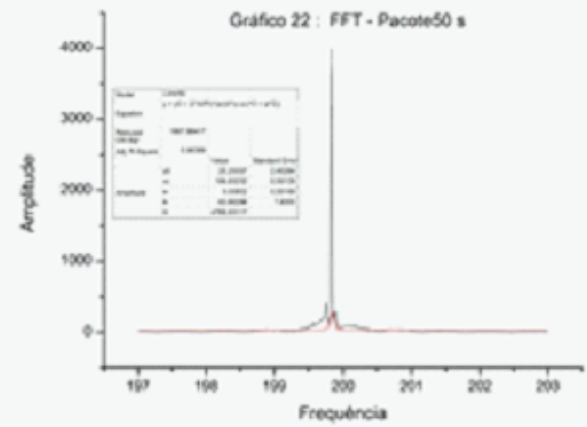
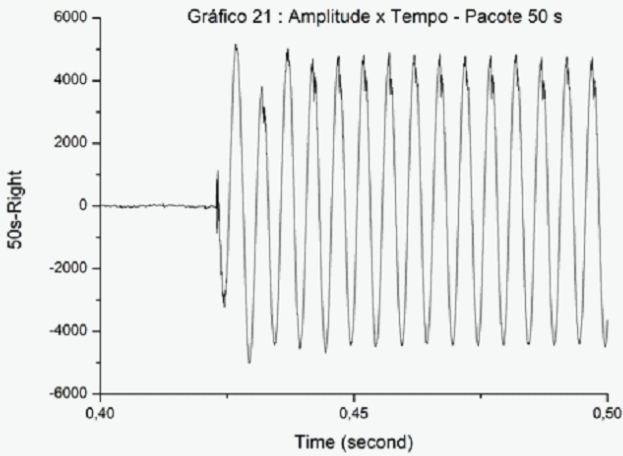
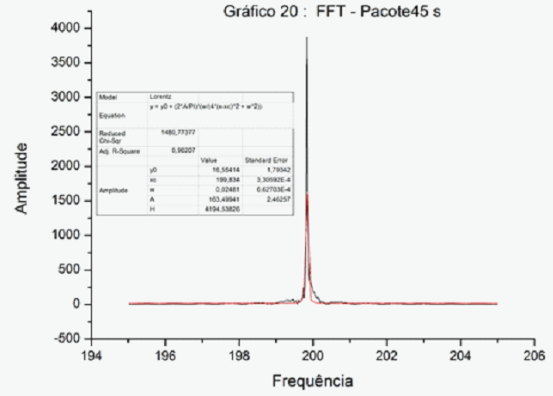
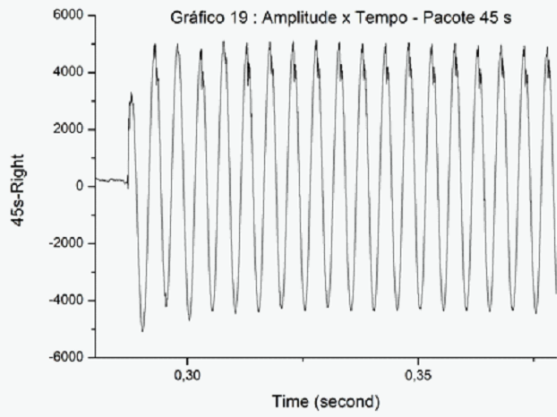
Os gráficos das transformadas tiveram o mesmo problema, entretanto, eles foram cortados dentro do intervalo de melhor visualização para que a curva lorentziana fosse melhor ajustada.

Seguem os gráficos referentes aos dados coletados com o alto falante.









Utilizando a relação de Einstein apresentada na equação (3), calculou-se o energia associada a cada onda, cujos valores seguem apresentados na tabela abaixo.

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 $h/2$
1	1,005 ± 0,025	6,66 ± 0,17	6,66 ± 0,17	0,53	1256% ± 32%
5	0,157 ± 0,007	1,04 ± 0,04	5,21 ± 0,22	0,53	982% ± 41%
10	0,107 ± 0,002	0,71 ± 0,01	7,09 ± 0,12	0,53	1337% ± 23%
15	0,047 ± 0,004	0,31 ± 0,03	4,68 ± 0,40	0,53	883% ± 75%
20	0,052 ± 0,002	0,34 ± 0,01	6,88 ± 0,21	0,53	1297% ± 40%
25	0,055 ± 0,001	0,37 ± 0,01	9,16 ± 0,15	0,53	1728% ± 28%
30	0,029 ± 0,001	0,19 ± 0,01	5,79 ± 0,24	0,53	1093% ± 45%
35	0,013 ± 0,001	0,08 ± 0,01	2,91 ± 0,34	0,53	549% ± 64%
40	0,029 ± 0,001	0,19 ± 0,01	7,78 ± 0,27	0,53	1468% ± 51%
45	0,024 ± 0,001	0,16 ± 0,01	7,14 ± 0,35	0,53	1347% ± 66%
50	0,006 ± 0,005	0,04 ± 0,03	2,15 ± 1,58	0,53	406% ± 299%

Segue abaixo os gráficos e tabelas obtidos com o diapasão.

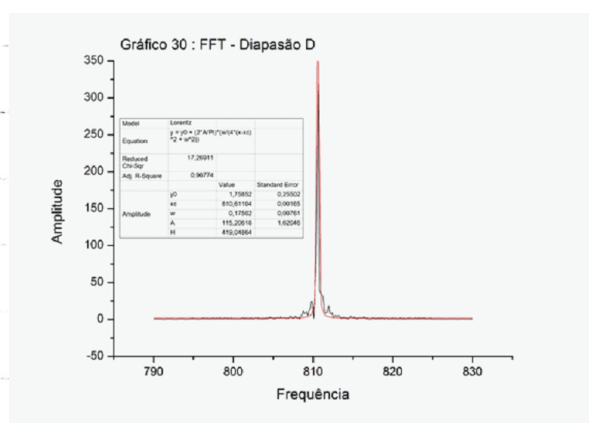
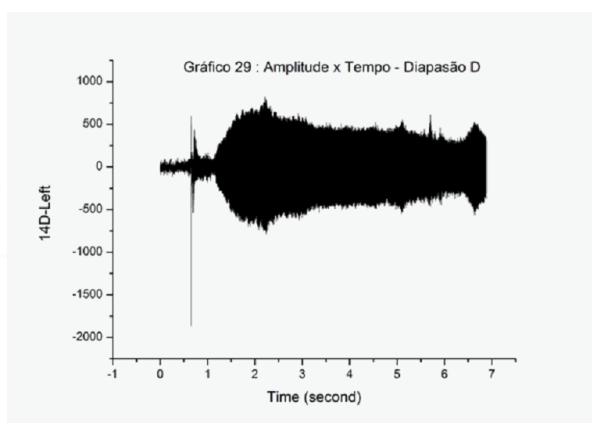
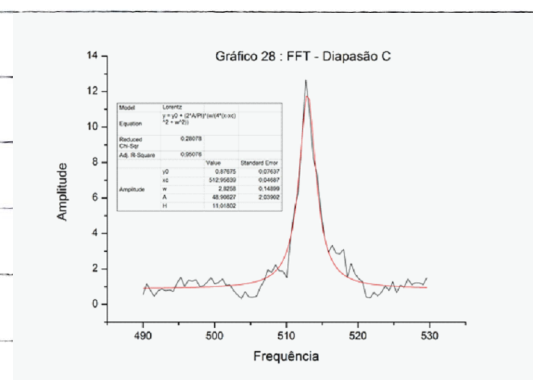
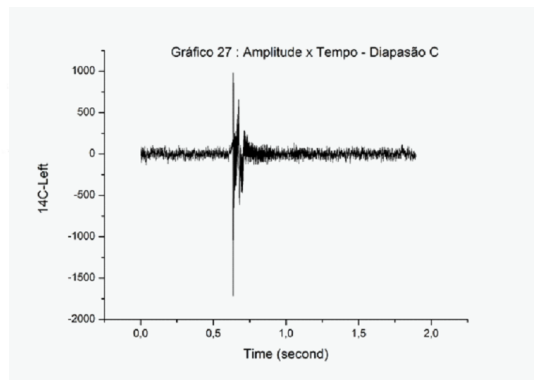
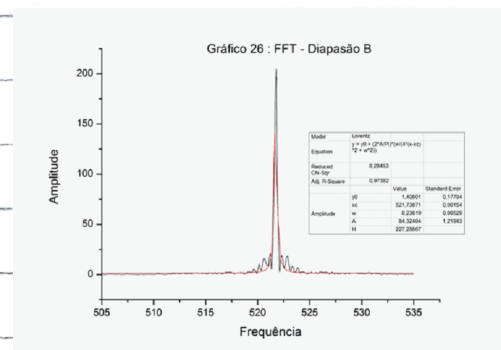
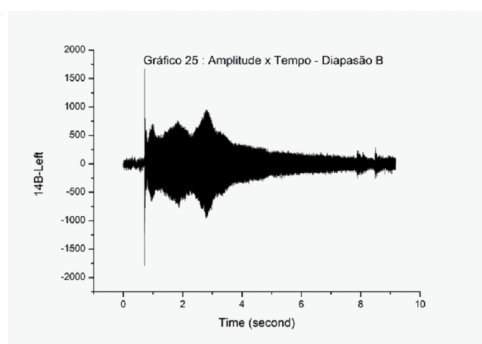
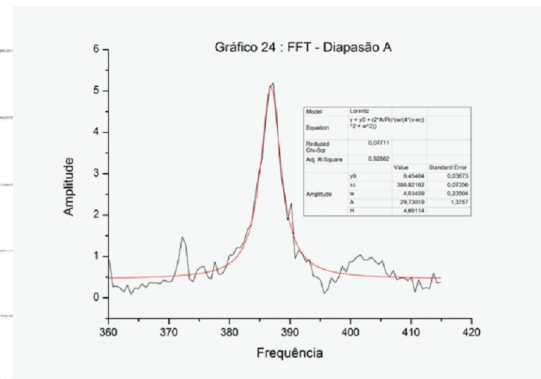
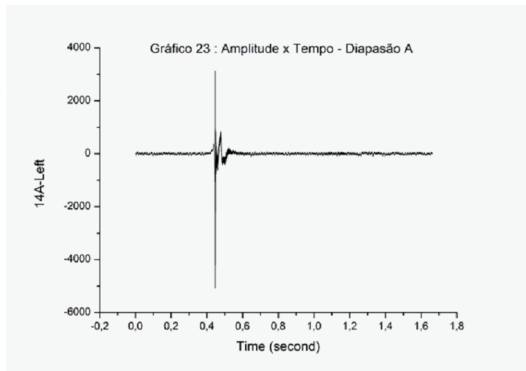




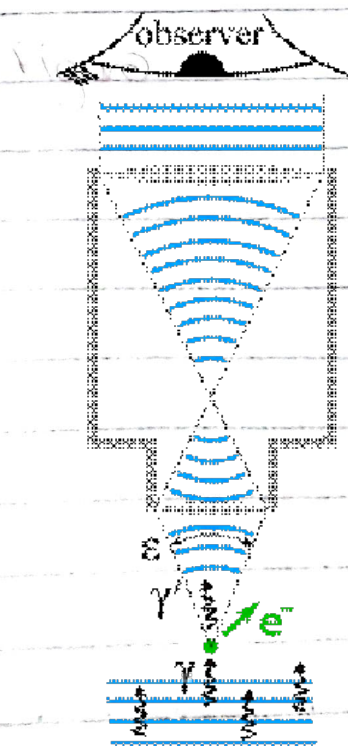
Tabela 2 Comparação do princípio da incerteza com os dados de energia e tempo coletados para uma onda mecânica de um diapásio

Diapásio	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 $h/2$
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%

Verifica-se pelas tabelas e gráficos acima que as frequências de pico são próximas a 200 Hz, para as ondas geradas com o alto falante, satisfazendo a frequência do gerador. Em ambos os casos, alto-falante e diapásios, o produto  $\Delta E \cdot \Delta t$  foi sempre maior que  $h/2$ , comprovando assim, a teoria de Heisenberg.

## Discussão - Parte 1: Ondas mecânicas

- Respondendo às questões 6 e 16, temos o esquema abaixo



que representa o microscópio de Bohr. Neste, temos uma partícula clássica se movendo na direção de  $x$ . O tal microscópio faz a resolução óptica com resolução mínima de

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

A precisão mínima do momento na direção de  $x$  pode ser aproximado por

$$\Delta p_x \approx \frac{h \sin \theta}{\lambda}$$

logo

$$\Delta x \Delta p_x \approx \left( \frac{\lambda}{\sin \theta} \right) \left( \frac{h \sin \theta}{\lambda} \right) = h$$

logo, as duas abordagens nas referências citadas são análogas.

- Faria o experimento com as diaposições pois as incertezas foram menores, por mais que o esperado fosse que o resultado com o altofalante fosse melhor.

## Parte 2 - Ondas Eletromagnéticas.

Ao passar pelo sistema mostrado na figura 2, a onda será difratada pela fenda. O ângulo do primeiro mínimo é dado por

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{\Delta y}$$

Entretanto, por conta das propriedades relativísticas do elétron, ele pode ser defletido de um ângulo entre  $\pm \theta$ .

Seu momento <sup>ant</sup> antes de passar pela fenda era  $p_y = 0$ . Entretanto, após passar

pelo fenda, pouco se sabe sobre ele, e, portanto, pode variar entre  $\pm p_y$ . com  $\sin \theta = p_y / \lambda$ . Logo, o seu momento na direção de  $y$  tornou-se impreciso. A incerteza é:

$$\Delta p_y \approx p_y \approx p \sin \theta = \frac{p \lambda}{\Delta y}$$

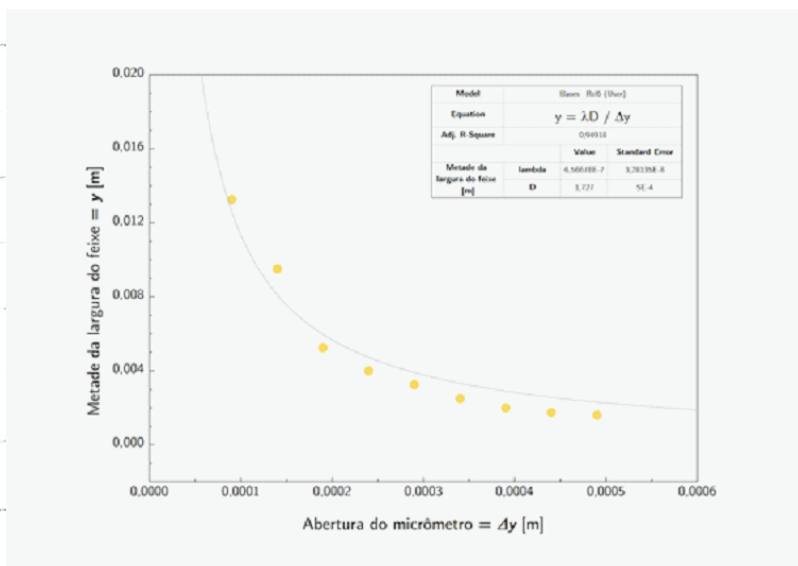
Pela relação de de Broglie ( $\lambda$ )

$$\Delta p_y = \frac{h}{\Delta y}$$

$$\Delta p_y \cdot \Delta y = h$$

Comprovando teoricamente que  $\Delta p_y \Delta y \geq h/2$ .  
 Esta parte do experimento comprova este resultado teoricamente.

Como não foi fornecido, o comprimento de onda, ele foi determinado com o gráfico abaixo.



Utilizando a figura referente a este experimento, temos:

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

onde  $y$  = comprimento até o primeiro valor mínimo

$D$  = distancia do fendo até o anteparo

para se ter o minimo de difracção,

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

$$y \approx \frac{\lambda D}{\Delta y}$$

Utilizando o coeficiente angular do gráfico e  $D = 1,127 \text{ m}$ , temos que  $\lambda = 656,3 \pm 0,3 \text{ nm}$

Segue abaixo a tabela contendo os valores encontrados.

**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]	$\Delta y \cdot \Delta p$ [ $10^{-33}$ 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%

( / / )

- Nesta etapa, o princípio da incerteza também foi validado.

## Discussão - Parte 2: Ondas eletromagnéticas

- Para que ocorra difração, o fenda deve ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda utilizado. No caso do elétron, o comprimento seria de  $1\text{Å}$ . Logo, se apenas substituirmos o laser por um feixe de elétrons, não haveria padrão de difração.

- Utilizando a expressão  $y \approx \frac{\lambda D}{\Delta y}$  com  $\lambda = 657\text{nm}$  e  $D = 1,727\text{m}$ , temos  $\Delta y = 9,6\text{mm}$

## Conclusão

Através deste experimento, foi possível explorar o princípio da incerteza através de ondas mecânicas e eletromagnéticas. Em ambos os casos os produtos das incertezas das variáveis complementares foram maiores que  $h/2$ , comprovando assim a validade da teoria de Heisenberg.

## Referências

- Rodo experimental
- Material Disponível