

ONDAS GRAVITACIONAIS NA PRÁTICA: UMA INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE DADOS COM PYTHON

J. Bezerra-Sobrinho¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil
(jeremias.bs@gmail.com)

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma abordagem introdutória para a análise de ondas gravitacionais utilizando a linguagem de programação Python e dados públicos disponibilizados pela colaboração LIGO/Virgo/KAGRA. São descritos os procedimentos para obtenção dos dados, leitura dos arquivos e realização de análises básicas, incluindo a visualização do sinal temporal, análise espectral e a curva de sensibilidade dos detectores.

Palavras-chave: Astronomia Multimessageira; Ensino de Física; Física Computacional; Ondas gravitacionais.

INTRODUÇÃO

A compreensão moderna da gravitação teve um marco decisivo com a formulação da Teoria da Relatividade Geral por Albert Einstein (1879 - 1955), publicada em 1915 e consolidada nos anos seguintes. Diferentemente da mecânica newtoniana, na qual a gravidade é interpretada como uma força atuando entre corpos massivos, a Relatividade Geral descreve esse fenômeno como resultado da curvatura do espaço-tempo produzida pela distribuição de matéria e energia (Ohanian e Ruffini, 2013). Além de fornecer essa nova forma de interpretar a gravidade, a Teoria da Relatividade Geral estabelece um conjunto de equações de campo que permitem descrever o Universo:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

A previsão teórica da existência das ondas gravitacionais surgiu logo após o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral. Ao investigar soluções das equações de campo no limite de campos gravitacionais fracos, Einstein demonstrou que pequenas variações na geometria do espaço-tempo podem propagar-se como ondas, deslocando-se à velocidade da luz (Maggiore, 2008). Essas perturbações, denominadas ondas gravitacionais, correspondem à propagação de deformações na própria estrutura do espaço-tempo. Para obter esse resultado, Einstein considerou pequenas perturbações ($h_{\mu\nu}$) da métrica ($g_{\mu\nu}$) em torno do espaço-tempo plano de Minkowski ($\eta_{\mu\nu}$):

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (2)$$

A linearização das equações de campo de Einstein nesse regime resulta em uma equação de onda para as perturbações da métrica $h_{\mu\nu}$, evidenciando

explicitamente o caráter ondulatório do campo gravitacional. No estudo de propagação de ondas gravitacionais e sua interação com partículas teste (detectores) estamos interessados na solução de vácuo, ou seja, em uma região que não temos um termo de fonte:

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0 \Rightarrow \left(-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \vec{\nabla}^2\right)\bar{h}_{\mu\nu} = 0 \quad (3)$$

Assim, temos uma equação de onda para cada componente de $\bar{h}_{\mu\nu}$.

De forma semelhante ao que ocorre no eletromagnetismo, as ondas gravitacionais podem ser interpretadas como perturbações que se propagam pelo campo gravitacional. Entretanto, há uma diferença fundamental entre esses dois contextos. As equações de Maxwell fornecem uma descrição exata da dinâmica do campo eletromagnético em um espaço-tempo fixo (Jackson, 1999). Em contraste, na Relatividade Geral, as ondas gravitacionais são usualmente obtidas por meio de uma abordagem perturbativa das equações de Einstein, considerando pequenas variações em torno de um background previamente estabelecido (Ohanian e Ruffini, 2013).

Durante várias décadas após sua previsão teórica, a existência física das ondas gravitacionais permaneceu como objeto de debate na comunidade científica. Questionava-se se essas soluções das equações de Einstein correspondiam a um fenômeno físico mensurável ou se eram apenas uma consequência matemática da linearização da gravidade (Maggiore, 2008).

Um importante avanço ocorreu na década de 1970, com a descoberta do pulsar binário PSR B1913+16 pelos astrônomos Russell A. Hulse e Joseph H. Taylor (Hulse e Taylor, 1975). O monitoramento



desse sistema revelou uma diminuição gradual de seu período orbital, em concordância com a taxa de perda de energia prevista pela Relatividade Geral devido à emissão de ondas gravitacionais (Weisberg e Taylor, 2003). Esse resultado constituiu a primeira evidência observacional indireta da existência dessas ondas e levou à concessão do Prêmio Nobel de Física de 1993 aos pesquisadores.

A confirmação experimental definitiva ocorreu somente em 2015, quando a colaboração LIGO detectou, de forma direta, o sinal gravitacional denominado GW150914 (The LIGO Scientific Collaboration e The Virgo Collaboration, 2016). O evento foi produzido pela coalescência de dois buracos negros de massa estelar e representou a primeira observação direta da passagem de uma onda gravitacional pela Terra (De Sabbata e Gasperini, 1985). A relevância científica desse marco foi reconhecida em 2017 com a concessão do Prêmio Nobel de Física.

Desde a primeira detecção direta de ondas gravitacionais, a área tem experimentado um rápido crescimento, impulsionado por investimentos contínuos no desenvolvimento de detectores cada vez mais sensíveis e por iniciativas internacionais voltadas à exploração da astronomia gravitacional. Atualmente, a rede global de observatórios é composta principalmente pelos interferômetros LIGO (The LIGO Scientific Collaboration, 2014), Virgo (The VIRGO Collaboration, 2014), e KAGRA (The KAGRA Collaboration, 2019), que atuam de forma coordenada para aumentar a sensibilidade das observações e aprimorar a localização das fontes no céu. Paralelamente, projetos de próxima geração, como o Einstein Telescope (Punturo et al., 2010) e o Cosmic Explorer (Reitze et al., 2019), encontram-se em desenvolvimento e prometem ampliar significativamente o alcance das observações, possibilitando a detecção de sinais mais fracos e provenientes de regiões cada vez mais distantes do Universo.

Como consequência desse esforço conjunto, o número de eventos detectados cresceu de maneira expressiva nos últimos anos, ampliando o catálogo de fontes de ondas gravitacionais (Abac et al., 2025). Além da observação de sistemas binários compostos por buracos negros, também foram registradas fusões de estrelas de nêutrons e de sistemas mistos formados por um buraco negro e uma estrela de nêutrons. Essas descobertas consolidaram a astronomia de ondas gravitacionais como uma nova ferramenta para a investigação do Universo, permitindo o estudo de novos fenômenos astrofísicos e complementando as observações realizadas por meio da radiação eletromagnética, característica da chamada astronomia multimensageira.

Além dos avanços experimentais, outro fator que impulsionou o desenvolvimento da astronomia de ondas gravitacionais foi a política de dados abertos adotada pela colaboração LIGO–Virgo–KAGRA (LVK) (Middleton et al., 2024). Após cada campanha observacional, denominada *Observing Run* (O1, O2, O3 e, mais recentemente, O4), os dados científicos passam por um período de embargo e, posteriormente, são disponibilizados publicamente por meio do *Gravitational Wave Open Science Center* (GWOSC) (Abac et al., 2025). Essa iniciativa permite que pesquisadores, professores e estudantes tenham acesso aos mesmos dados utilizados nas análises conduzidas pela colaboração, promovendo a transparência científica e o desenvolvimento de novas pesquisas.

A disponibilidade desses dados, aliada ao crescente número de ferramentas computacionais de código aberto, tornou a astronomia de ondas gravitacionais significativamente mais acessível. Em particular, a linguagem de programação Python consolidou-se como uma das principais plataformas para análise de dados científicos, oferecendo um amplo conjunto de bibliotecas, voltadas ao processamento numérico, visualização gráfica e tratamento de sinais. Além de ferramentas de uso geral, a própria colaboração LVK disponibiliza pacotes específicos para manipulação e análise de dados de ondas gravitacionais, permitindo que usuários externos reproduzam diversas etapas empregadas nas análises científicas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma introdução à análise de dados de ondas gravitacionais utilizando Python e dados públicos disponibilizados pela colaboração LVK. São apresentados os procedimentos básicos para obtenção dos dados observacionais, leitura dos arquivos, manipulação das séries temporais e visualização dos sinais associados a eventos reais.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho possui caráter descritivo e demonstrativo, tendo como objetivo apresentar uma metodologia introdutória para a análise de dados de ondas gravitacionais utilizando ferramentas computacionais de código aberto. Para isso, foram empregados dados públicos disponibilizados pela colaboração LVK por meio do GWOSC, plataforma responsável por disponibilizar os dados científicos provenientes das campanhas observacionais (*Observing Runs*), além de documentação técnica e materiais de apoio para a comunidade científica.

As análises foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação Python, escolhida por sua ampla adoção na computação científica e pela disponibilidade de bibliotecas especializadas para manipulação, processamento e visualização de dados. Entre as principais ferramentas empregadas



destacam-se a biblioteca GWPy (Macleod et al., 2021), desenvolvida especificamente para análise de dados de ondas gravitacionais, além das bibliotecas NumPy (Harris et al., 2020) para computação numérica, SciPy (Virtanen et al., 2020) para processamento científico e Matplotlib (Hunter, 2007) para geração de gráficos e visualização dos resultados.

A biblioteca GWPy foi utilizada como interface principal para acesso e manipulação dos dados disponibilizados pelo GWOSC, permitindo a leitura das séries temporais, cálculo de espectrogramas, análise no domínio da frequência e visualização dos sinais associados aos eventos de ondas gravitacionais.

Todos os procedimentos realizados nesse trabalho utilizam exclusivamente softwares livres e dados públicos, permitindo que as análises apresentadas possam ser reproduzidas por estudantes, professores e pesquisadores interessados em introduzir-se na área de astronomia de ondas gravitacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados da colaboração LVK são disponibilizados ao público por meio do Gravitational-Wave Open Science Center (GWOSC). Antes de começarmos a utilizar os dados, devemos instalar a biblioteca GWPy para poder manusear esses dados:

```
// Instalação:
pip install gwpy
```

Uma vez instalada a biblioteca GWPy, o primeiro passo consiste em selecionar um evento de ondas gravitacionais disponível no catálogo público da colaboração LVK. Cada evento possui um identificador único, como, por exemplo, GW150914, GW170817 ou GW190412. A partir desse identificador é possível obter automaticamente o instante em que o sinal foi detectado pelos interferômetros:

```
// Selecionando um exemplo:
from gwosc.datasets import event_gps
gps = event_gps("GW190412")
```

A função **event_gps()** consulta o catálogo público do (GWOS) e retorna o instante da detecção em tempo GPS.

O tempo GPS (Global Positioning System Time) é a escala temporal utilizada pela colaboração LVK para registrar todos os eventos de ondas gravitacionais. Diferentemente do calendário convencional (dia, mês e ano), o tempo GPS é expresso como o número de segundos transcorridos desde 00:00:00 UTC de 6 de janeiro de 1980. Essa representação facilita o

armazenamento e o sincronismo entre os diferentes detectores distribuídos ao redor do mundo.

Após obter o instante GPS do evento, define-se uma janela temporal ao redor da detecção. No exemplo a seguir é considerada uma janela de cinco segundos antes e cinco segundos depois do evento:

```
// Criação da janela:
segment = (int(gps)-5, int(gps)+5)
```

Nesse comando, a função **int()** converte o valor retornado por **event_gps()** para um número inteiro, uma vez que o instante da detecção possui casas decimais correspondentes a frações de segundo. Em seguida, é criada uma tupla denominada **segment**, contendo o instante inicial e o instante final da janela de análise. Assim, serão analisados 10 segundos de dados centrados no evento de ondas gravitacionais.

Os sinais de ondas gravitacionais podem ser registrados simultaneamente por diferentes interferômetros da rede LVK. Atualmente, os principais detectores em operação são os dois interferômetros do observatório LIGO, Hanford (H1) e Livingston (L1), além do detector Virgo (V1) e do KAGRA (K1). A utilização de múltiplos detectores aumenta a confiabilidade da detecção e permite determinar com maior precisão a posição da fonte no céu:

```
// Selecionando o detector:
from gwpy.timeseries import TimeSeries

H1 = TimeSeries.fetch_open_data("H1",
    *segment, cache=True)
L1 = TimeSeries.fetch_open_data("L1",
    *segment, cache=True)
```

Fetch_open_data() realiza automaticamente o download dos dados públicos disponibilizados pelo GWOSC. Seu primeiro argumento identifica o detector de interesse. O segundo é responsável por definir o tempo que iremos analisar. Já o terceiro instrui a biblioteca GWPy a armazenar os arquivos baixados localmente. Dessa forma, caso o mesmo intervalo de tempo seja solicitado novamente, os dados serão carregados diretamente do computador, evitando um novo download e reduzindo significativamente o tempo de execução do código.

Ao término dessa etapa, as variáveis H1 e L1 passam a armazenar objetos do tipo TimeSeries, que contêm toda a série temporal do *strain* medida por cada detector durante o intervalo selecionado. Esses objetos disponibilizam diversos métodos para manipulação dos dados, como filtragem, transformadas para o domínio da frequência, cálculo de espectrogramas e geração de gráficos, que serão explorados mais adiante.

Após o download dos dados, o passo seguinte consiste em visualizar a série temporal registrada pelos detectores. Como os objetos H1 e L1 pertencem à classe TimeSeries, a biblioteca GWPy disponibiliza métodos próprios para geração de gráficos. Entretanto, neste trabalho será utilizada a biblioteca Matplotlib, por oferecer maior flexibilidade para personalização das figuras:

```
// Selecionando um exemplo:
import matplotlib.pyplot as plt

// Criando uma figura com dois painéis
fig, ax = plt.subplots(2, 1, figsize=(10,6),
sharex=True)

// Criando um tempo relativo por questão
estética:
t_H1 = H1.times.value - gps
t_L1 = L1.times.value - gps

// Fazendo o plot:
ax[0].plot(t_H1, H1.value, color='tab:red')
ax[0].set_title("LIGO Hanford (H1)")
ax[0].set_ylabel("Strain")

ax[1].plot(t_L1.value, L1.value, color='tab:blue')
ax[1].set_title("LIGO Livingston (L1)")
ax[1].set_xlabel("Tempo GPS (s)")
ax[1].set_ylabel("Strain")

//Mais qualquer efeito gráfico extra!!!

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Na Figura 1 são apresentadas as séries temporais do *strain* registradas pelos detectores LIGO Hanford (H1) e LIGO Livingston (L1) durante uma janela de cinco segundos centrada no evento GW190412.

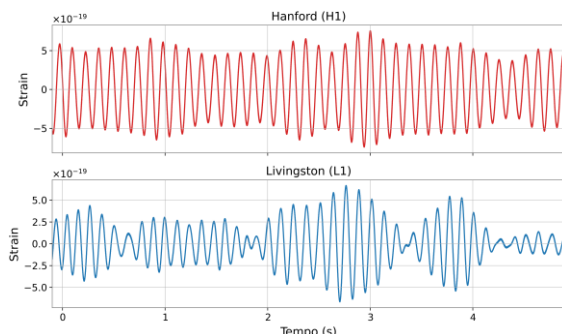


Figura 1. Séries temporais do *strain* registradas pelos detectores LIGO Hanford (H1) e LIGO Livingston (L1) para o evento GW190412.

O *strain* (h) representa a grandeza física medida pelos interferômetros gravitacionais e corresponde à deformação relativa provocada pela passagem de

uma onda gravitacional. Matematicamente, essa quantidade é definida como:

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

em que L é o comprimento original dos braços do interferômetro e ΔL representa a pequena variação produzida pela onda gravitacional. É importante notar, que essa deformação é extremamente pequena, seus valores são tipicamente da ordem de 10^{-21} .

Observa-se na Figura 1 que os sinais registrados pelos detectores H1 e L1 não são idênticos. Embora ambos correspondam ao mesmo evento astrofísico, cada interferômetro encontra-se em uma localização geográfica distinta e possui uma orientação diferente em relação ao outro. Consequentemente, a onda gravitacional atinge cada detector em instantes ligeiramente diferentes, aproximadamente 7 milissegundos (Creswell et al., 2017).

Além da diferença temporal, os interferômetros apresentam orientações distintas em relação à direção de propagação e à polarização da onda gravitacional. Em consequência, o sinal registrado por um detector pode apresentar polaridade oposta ao observado pelo outro. Para facilitar a comparação visual entre as duas medidas, é comum deslocar temporalmente um dos sinais de acordo com o atraso de chegada da onda e inverter sua amplitude, multiplicando o *strain* por -1 . É importante notar que essa transformação possui finalidade exclusivamente ilustrativa e não modifica o conteúdo físico dos dados.

A seguir, faremos o deslocamento temporal de 7 milissegundos e a inversão do sinal:

```
// Deslocamento temporal:
delay = 0.007 # 7 ms

// Inversão do Sinal:
H1_shift = np.interp(t_L1, t_H1 + delay,
-1*H1.value)

// Configuração de Plotagem!
//Mais qualquer efeito gráfico extra!!!

plt.show()
```

Na Figura 2, observa-se que, após a aplicação do deslocamento temporal e da inversão da amplitude, os sinais registrados pelos detectores H1 e L1 apresentam uma concordância significativamente maior. As principais oscilações passam a ocorrer aproximadamente nos mesmos instantes, evidenciando que ambos os interferômetros registraram o mesmo evento gravitacional.

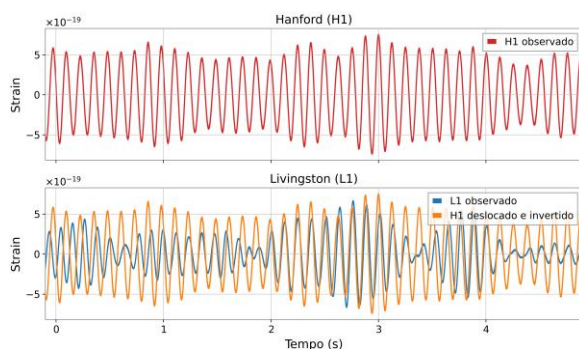


Figura 2. Comparação entre os sinais registrados pelos detectores H1 e L1 para o evento GW190412 contendo um deslocamento temporal e uma inversão de sinal.

Entretanto, nota-se que a sobreposição entre os sinais não é perfeita. Isso ocorre porque o deslocamento temporal e a inversão da amplitude constituem apenas uma aproximação para alinhar visualmente as séries temporais. A resposta de cada detector depende de diversos fatores, como sua função de antena, a posição da fonte no céu e a polarização da onda gravitacional, de modo que não existe, em geral, uma simples transformação capaz de tornar os dois sinais exatamente iguais.

Além disso, os dados utilizados neste trabalho correspondem ao *strain* bruto disponibilizado pelo GWOSC, contendo não apenas o sinal astrofísico, mas também as contribuições do ruído instrumental presente em cada observatório. Como essas fontes de ruído são essencialmente independentes entre Hanford e Livingston, diferenças entre as duas séries temporais permanecem visíveis mesmo após o alinhamento.

Além disso, cada observatório está sujeito a fontes locais de ruído, como vibrações sísmicas, ruído térmico e perturbações ambientais, que também contribuem para pequenas diferenças entre as séries temporais observadas. Dessa forma, apesar da elevada sensibilidade dos interferômetros, os dados registrados não são compostos exclusivamente pelo sinal proveniente da fonte astrofísica. As séries temporais $d(t)$ medidas pelos detectores contêm uma combinação entre o sinal de ondas gravitacionais $h(t)$ e diferentes fontes de ruído $n(t)$:

$$d(t) = h(t) + n(t) \quad (5)$$

Nas análises realizadas pela colaboração LVK, são empregadas técnicas adicionais de processamento, como filtragem em frequência, *whitening* e reconstrução do sinal, que permitem obter uma concordância significativamente maior entre os detectores.

Embora a representação do *strain* em função do tempo seja suficiente para identificar a ocorrência de um evento gravitacional, ela nem sempre permite

visualizar com clareza como a frequência do sinal evolui ao longo do tempo. Uma das ferramentas mais empregadas para essa finalidade é a transformada Q (Vazsonyi e Davis, 2023).

Diferentemente do gráfico de *strain*, que mostra apenas a amplitude da onda ao longo do tempo, a transformada Q gera um espectrograma que permite acompanhar a evolução de suas componentes espectrais, evidenciando como a frequência varia durante o evento.

Nos espectrogramas produzidos pela biblioteca GWPy, a barra de cores representa a chamada energia normalizada, uma grandeza adimensional relacionada à potência do sinal após o processo de normalização empregado na transformada Q. Valores mais elevados indicam regiões onde a energia do sinal se destaca em relação ao nível médio de ruído do detector, tornando mais fácil identificar estruturas transientes compatíveis com uma onda gravitacional. Assim, regiões mais claras correspondem aos instantes e frequências em que há maior concentração de energia, enquanto regiões mais escuras representam predominantemente o ruído instrumental.

Vamos visualizar isso na prática aplicando a transformada Q no sinal GW190412:

```
// Cálculo da transformada Q
QT = TS.q_transform(
    frange=(20, 500),
    qrange=(4, 12),
    outseg=(gps, gps+0.15)
)

// Calcula a raiz quadrada da energia normalizada
QT = QT.abs()*0.5

// Configuração de plotagem
plt.show()
```

Nessa parte de código, o sinal registrado pelo detector é decomposto simultaneamente no domínio do tempo e da frequência, produzindo um espectrograma que mostra como o conteúdo espectral da onda gravitacional evolui ao longo do tempo. O resultado dessa operação é armazenado na variável **QT**.

O parâmetro **frange** define o intervalo de frequências, em hertz (Hz), considerado na análise. Foram selecionadas frequências entre 20 Hz e 500 Hz, pois essa faixa engloba a região de maior sensibilidade dos detectores LIGO e contém a maior parte da energia emitida durante a coalescência do sistema binário analisado. Frequências inferiores a aproximadamente 20 Hz são fortemente afetadas pelo ruído sísmico, enquanto frequências muito superiores

a 500 Hz apresentam menor contribuição para esse evento específico.

O parâmetro **qrange** especifica o intervalo dos valores do fator de qualidade (quality factor), representado pela letra Q. Esse parâmetro controla o compromisso entre a resolução temporal e a resolução em frequência da transformada. Valores menores de Q utilizam janelas temporais mais curtas, permitindo localizar com maior precisão o instante em que o sinal ocorre, porém com menor resolução em frequência. Em contrapartida, valores maiores de Q utilizam janelas mais longas, melhorando a determinação das frequências presentes no sinal, mas reduzindo a precisão temporal.

A função **abs()** calcula o módulo dos coeficientes complexos produzidos pela transformada, eliminando a dependência da fase e preservando apenas a intensidade do sinal em cada ponto do plano tempo-frequência. Em seguida, eleva-se esse resultado à potência 0.5, isto é, calcula-se sua raiz quadrada. Essa operação não altera a informação física contida no espectrograma; seu objetivo é apenas melhorar a visualização da figura, reduzindo o contraste entre regiões de alta e baixa intensidade.

Na Figura 3 são apresentados os espectrogramas obtidos por meio da transformada Q para o evento GW190412, utilizando os dados registrados pelos detectores H1 e L1. Diferentemente dos gráficos de *strain* apresentados anteriormente, essa representação permite acompanhar simultaneamente a evolução temporal e espectral do sinal gravitacional.

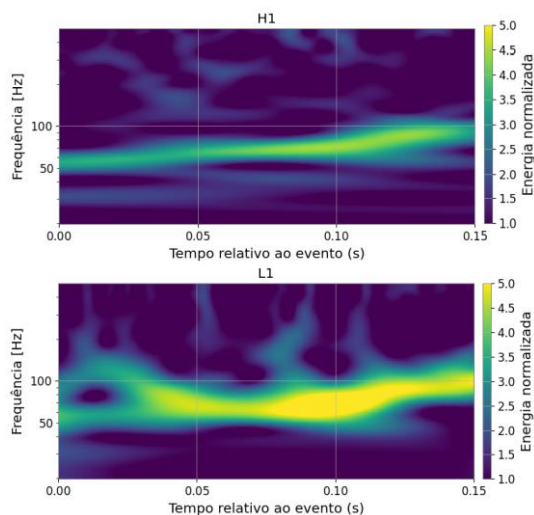


Figura 3. Espectrogramas obtidos por meio da transformada Q para o evento GW190412 utilizando os dados dos detectores H1 e L1.

Observa-se, em ambos os detectores, uma região de maior intensidade representada pelas cores em tons de verde e amarelo. Regiões com valores mais elevados correspondem a uma maior concentração de

energia do sinal em determinada frequência e instante de tempo, destacando os intervalos nos quais a presença da onda gravitacional é mais significativa em relação ao ruído de fundo do detector. Em contraste, as regiões em tons escuros representam intervalos dominados essencialmente pelo ruído instrumental.

Embora os espectrogramas dos detectores H1 e L1 apresentem pequenas diferenças na intensidade e na distribuição da energia, ambos revelam a mesma estrutura física associada ao evento GW190412. Mais uma vez ressaltamos que essas diferenças decorrem principalmente da distinta resposta instrumental de cada interferômetro, bem como das características locais do ruído em cada observatório. Ainda assim, a presença do mesmo padrão nos dois detectores fornece uma forte evidência de que o sinal possui origem astrofísica e não corresponde a uma flutuação instrumental isolada.

Embora os gráficos de *strain* e os espectrogramas permitam visualizar a presença de uma onda gravitacional, uma etapa igualmente importante na análise dos dados consiste na caracterização do ruído dos detectores. Uma das ferramentas mais utilizadas para essa finalidade é a Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*, PSD). A PSD descreve como a potência do ruído está distribuída ao longo das diferentes frequências, indicando em quais regiões do espectro o detector apresenta maior ou menor nível de ruído. Em outras palavras, ela permite identificar as faixas de frequência nas quais o interferômetro é mais sensível à passagem de ondas gravitacionais.

Em muitos trabalhos da colaboração LIGO, utiliza-se a Densidade Espectral de Amplitude (*Amplitude Spectral Density*, ASD), obtida simplesmente pela raiz quadrada da PSD:

$$ASD(f) = \sqrt{PSD(f)} \quad (6)$$

No código desenvolvido neste trabalho, calcula-se inicialmente a PSD por meio do método **psd()** da biblioteca GWPy e, em seguida, obtém-se a ASD tomando sua raiz quadrada:

```
// Calcula a PSD
psd_H1 = H1.psd(fftlength=4, overlap=2)
psd_L1 = L1.psd(fftlength=4, overlap=2)
psd_V1 = V1.psd(fftlength=4, overlap=2)
// Calcula a ASD
asd_H1 = psd_H1**0.5
asd_L1 = psd_L1**0.5
asd_V1 = psd_V1**0.5
```

O parâmetro **fftlength=4** define que cada segmento utilizado na análise terá duração de 4 segundos. Em outras palavras, o tempo total de dados baixados do

detector são divididos em diversas janelas de 4 segundos, e para cada uma delas é calculada uma transformada de Fourier. A escolha desse valor representa um compromisso entre resolução em frequência e estabilidade estatística. Janelas maiores fornecem melhor resolução em frequência, porém reduzem o número de segmentos disponíveis para a média. Por outro lado, janelas muito curtas produzem mais segmentos, mas com menor capacidade de distinguir frequências próximas.

O parâmetro **overlap=2** determina que segmentos consecutivos compartilhem 2 segundos de dados. Assim, embora cada janela tenha duração de 4 segundos, uma nova janela é iniciada a cada 2 segundos. Esse procedimento aumenta o número de estimativas utilizadas na média sem a necessidade de adquirir mais dados, reduzindo as flutuações estatísticas da PSD e produzindo uma curva mais suave e representativa do comportamento do ruído.

A Figura 4 apresenta a Densidade Espectral de Amplitude (ASD) dos detectores H1, L1 e V1. Essa curva descreve o nível médio de ruído de cada interferômetro em função da frequência, permitindo identificar as regiões nas quais cada detector apresenta maior sensibilidade para a observação de ondas gravitacionais.

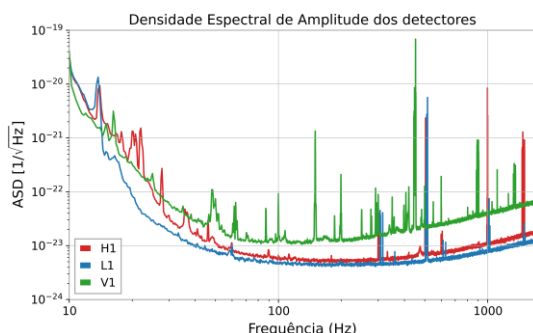


Figura 4. Densidade Espectral de Amplitude para o evento GW190412 utilizando os dados dos detectores H1, L1 e V1.

Observa-se que os três detectores apresentam um comportamento semelhante. Nas baixas frequências (abaixo de aproximadamente 20 Hz), a ASD assume valores elevados devido à predominância do ruído sísmico, originado por vibrações do solo, atividade humana e fenômenos naturais. Esse tipo de ruído constitui um dos principais fatores que limitam a sensibilidade dos interferômetros nessa região do espectro.

À medida que a frequência aumenta, a amplitude do ruído diminui significativamente, atingindo um mínimo aproximadamente entre 50 Hz e 300 Hz. Essa faixa corresponde à região de maior sensibilidade dos detectores, sendo justamente onde ocorre a maior parte das detecções de ondas gravitacionais provenientes da coalescência de

sistemas binários de buracos negros e estrelas de nêutrons.

Para frequências mais elevadas, observa-se um novo aumento da ASD. Nessa região, a sensibilidade passa a ser limitada principalmente pelo ruído quântico associado ao processo de detecção por laser. Esse efeito decorre das flutuações estatísticas no número de fótons que atingem os fotodetectores e estabelece um limite fundamental para a precisão das medidas em altas frequências.

Além da tendência geral da curva, são observados diversos picos estreitos distribuídos ao longo do espectro. Esses picos correspondem às chamadas linhas espectrais, produzidas por fontes instrumentais bem conhecidas, como frequências da rede elétrica, modos de vibração mecânica dos espelhos e outras ressonâncias dos sistemas ópticos e eletrônicos dos interferômetros. Embora apareçam como aumentos localizados do ruído, esses sinais são estáveis e podem ser identificados e tratados durante as etapas de análise dos dados.

A existência de uma rede global de detectores de ondas gravitacionais desempenha um papel fundamental para o desenvolvimento da astronomia gravitacional. Cada detector apresenta uma curva de sensibilidade própria, determinada por fatores como seu projeto óptico, isolamento sísmico, tecnologia empregada e condições operacionais. Dessa forma, um mesmo evento pode ser registrado com diferentes relações sinal-ruído em cada observatório.

Além da diferença de sensibilidade, a operação simultânea de múltiplos detectores oferece diversas vantagens científicas. A detecção coincidente de um mesmo sinal reduz significativamente a probabilidade de falsos alarmes produzidos por ruídos locais, aumenta a confiança estatística da observação e permite determinar, com maior precisão, a posição da fonte no céu por meio das diferenças no tempo de chegada da onda gravitacional entre os observatórios. Adicionalmente, uma rede de detectores possibilita reconstruir de forma mais completa as polarizações da onda gravitacional e estimar com maior precisão os parâmetros físicos da fonte, como massas, spins e distância.

A Figura 5 apresenta as curvas de sensibilidade de alguns dos principais detectores de ondas gravitacionais. Observa-se que os detectores LIGO e Virgo apresentam desempenho semelhante, atingindo sua maior sensibilidade aproximadamente entre algumas dezenas e algumas centenas de hertz, faixa em que ocorre a maioria das detecções atuais de sistemas binários de buracos negros e estrelas de nêutrons. Em baixas frequências, a sensibilidade é limitada principalmente pelo ruído sísmico, enquanto em altas frequências predominam contribuições

associadas ao ruído quântico e aos sistemas ópticos dos interferômetros.

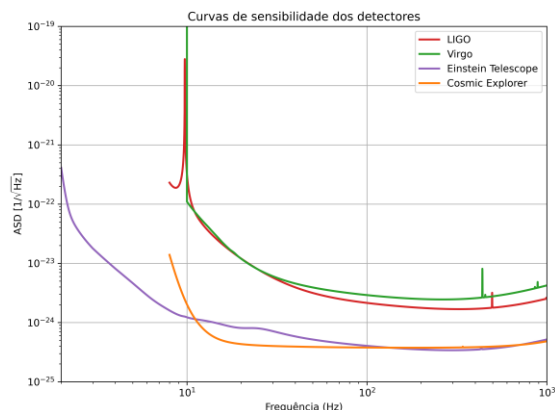


Figura 5. Curvas de sensibilidade dos detectores de ondas gravitacionais.

Também são apresentadas as curvas previstas para os detectores de terceira geração, representados pelo Einstein Telescope e pelo Cosmic Explorer. Observa-se uma redução significativa do nível de ruído em praticamente toda a banda de frequências, permitindo detectar sinais gravitacionais muito mais fracos e provenientes de distâncias cosmológicas consideravelmente maiores. Espera-se que esses observatórios ampliem de forma substancial o número de eventos detectados, possibilitando investigações mais precisas sobre a formação e evolução de objetos compactos, testes da Relatividade Geral em regimes extremos e estudos cosmológicos utilizando ondas gravitacionais.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem introdutória para a análise de dados de ondas gravitacionais utilizando a linguagem de programação Python e dados públicos disponibilizados pela colaboração LVK por meio do GWOSC. A utilização de bibliotecas como GWPy permitiu acessar diretamente os dados dos detectores e reproduzir etapas fundamentais empregadas nas análises desenvolvidas pela colaboração.

Ao longo do trabalho foram apresentados os procedimentos necessários para a obtenção dos sinais gravitacionais, a visualização do *strain* registrado pelos diferentes interferômetros, a comparação entre os detectores por meio do alinhamento temporal dos sinais, a construção de espectrogramas utilizando a transformada Q e a análise do comportamento do ruído por meio da ASD.

Os resultados obtidos demonstram que ferramentas computacionais de livre acesso, associadas aos dados públicos disponibilizados pela colaboração LVK, possibilitam reproduzir análises semelhantes às empregadas em pesquisas científicas reais,

constituindo um excelente recurso para atividades de ensino, iniciação científica e formação de novos pesquisadores na área de ondas gravitacionais.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva como material introdutório para estudantes e pesquisadores interessados em ingressar na astronomia de ondas gravitacionais, incentivando a utilização de ferramentas computacionais abertas e contribuindo para a disseminação da ciência aberta na comunidade acadêmica. A metodologia apresentada também pode ser expandida para estudos mais avançados, envolvendo filtragem de sinal, estimação de parâmetros, análise estatística de eventos e desenvolvimento de novas técnicas de processamento de sinais aplicadas à astronomia de ondas gravitacionais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da concessão de bolsa de estudo de Doutorado, nº de processo 140975/2025-0.

REFERÊNCIAS

- Abbott, R.; et al. (The Ligo Scientific Collaboration; The Virgo Collaboration). Open data from the first and second observing runs of Advanced LIGO and Advanced Virgo. *SoftwareX*, 13, 100658, 2021.
- Creswell, J.; et al. On the time lags of the LIGO signals. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017, 013, 2017.
- De Sabbata, V.; Gasperini, M. *Introduction to Gravitation*. World Scientific, Singapore, 1985.
- Duplesta, U.; et al. GWFish: A simulation software to evaluate parameter-estimation capabilities of gravitational-wave detector networks. *Astronomy and Computing*, 42, 100671, 2023.
- Harris, Charles R.; et al. Array Programming with NumPy. *Nature* 585, 357 (2020).
- Hulse, R. A.; Taylor, J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. *The Astrophysical Journal*, 195, L51–L53, 1975.
- Hunter, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9, 90–95, 2007.
- Jackson, J. D. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, 1999.
- Macleod, D. M.; et al. GWpy: A Python package for gravitational-wave astrophysics. *SoftwareX*, 13, 100657, 2021.



- Maggiore, M. Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments. Oxford University Press, Oxford, 2008.
- Ohanian, H. C.; Ruffini, R. Gravitation and Spacetime. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- Punturo, M.; et al. The Einstein Telescope: A third-generation gravitational wave observatory. Classical and Quantum Gravity, 27, 194002, 2010.
- Reitze, D.; et al. Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO. Bulletin of the American Astronomical Society, 51, 035, 2019.
- The KAGRA Collaboration. KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector. Nature Astronomy, 3, 35–40, 2019.
- The LIGO Scientific Collaboration. Advanced LIGO. Classical and Quantum Gravity, 32, 074001, 2015.
- The LIGO Scientific Collaboration; The Virgo Collaboration. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Physical Review Letters, 116, 061102, 2016.
- The LIGO Scientific Collaboration; The Virgo Collaboration; The KAGRA Collaboration. GWTC-4.0: An Introduction to Version 4.0 of the Gravitational-Wave Transient Catalog. The Astrophysical Journal Letters, 995, L18, 2025.
- The Virgo Collaboration. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector. Classical and Quantum Gravity, 32, 024001, 2015.
- Vallisneri, M.; et al. The LIGO Open Science Center. Journal of Physics: Conference Series, 610, 012021, 2015.
- Vazsonyi, L.; Davis, D. Identifying glitches near gravitational-wave signals from compact binary coalescences using the Q-transform. Classical and Quantum Gravity, 40, 035008, 2023.
- Virtanen, P.; et al. SciPy 1.0--Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. Nature Methods 17, 261 (2020).
- Weisberg, J. M.; Taylor, J. H. The Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis. Binary Radio Pulsars. Aspen Conference Series, 302, 2003.