

# Desafios na busca de sinais de ondas gravitacionais

Tabata Aira Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

## Resumo

Este artigo apresenta os desafios enfrentados na busca por sinais de ondas gravitacionais pelos detectores LIGO, decorrentes da presença de ruídos nos dados. Esses ruídos podem se acoplar aos interferômetros por meio de diferentes mecanismos físicos associados ao ambiente ou à instrumentação. Como consequência, eles podem afetar a estimativa de parâmetros das detecções reais, reduzir a significância estatística dos eventos observados ou, em alguns casos, mimetizar sinais astrofísicos.

## Abstract

This paper presents the challenges faced in the search for gravitational-wave signals by the LIGO detectors, arising from the presence of noise in the data. Such noise can couple to the interferometers through different physical mechanisms associated with the environment or the instrumentation. As a consequence, it can affect the parameter estimation of real detections, reduce the statistical significance of observed events, or, in some cases, mimic astrophysical signals.

**Palavras-chave:** ondas gravitacionais; LIGO; ruído.

**Keywords:** gravitational waves; LIGO; noise.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7n1.51540](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7n1.51540)

## 1 Introdução

Ondas gravitacionais, previstas por Albert Einstein, são perturbações no tecido do espaço-tempo produzidas por eventos altamente energéticos no Universo. Apesar de extensos esforços experimentais ao longo de décadas, a primeira detecção direta de ondas gravitacionais ocorreu apenas em 2015, sendo divulgada em 2016 pela colaboração LIGO-Virgo [1]. O sinal observado foi proveniente da fusão de dois buracos negros de aproximadamente  $30 M_{\odot}$  cada, liberando cerca de  $3 M_{\odot} c^2$  de energia no pulso final de ondas gravitacionais. Esse avanço rendeu à colaboração o Prêmio Nobel de Física em 2017 [2].

Atualmente, a colaboração LVK é composta por dois observatórios LIGO (Estados Unidos) [3], pelo Virgo (Itália) [4] e pelo KAGRA (Japão) [5]. A operação em rede desses detectores permite comparar a chegada do sinal em tempos diferentes e, com isso, melhorar a localização da fonte no céu, além de aumentar a confiabilidade dos eventos observados [6]. Paralelamente, durante as corridas observacionais e, em especial, entre elas, os detectores passam por melhorias

instrumentais contínuas, visando ao aumento da sensibilidade e, conseqüentemente, à observação de um número crescente de eventos astrofísicos.

Durante sua quarta corrida, O4, que ocorreu entre maio de 2023 e novembro de 2025, a colaboração publicou mais de 250 alertas de candidatos significativos a ondas gravitacionais [7]. Em comparação, as três primeiras corridas observacionais (O1, O2 e O3) resultaram na publicação de um total de 90 detecções [8].

Esses detectores terrestres são baseados no interferômetro de Michelson e operam por meio de interferometria a laser. Um feixe de luz é enviado a um divisor de feixes, que o separa em dois feixes propagando-se ao longo de direções perpendiculares entre si. Esses feixes percorrem braços distintos do interferômetro, ao final dos quais espelhos (ou massas testes) refletem a luz de volta em direção ao divisor de feixes, onde os feixes se recombinam.

O interferômetro é ajustado de modo que, na ausência de perturbações, ocorra interferência destrutiva no detector, resultando em ausência de sinal no fotodiodo. Quando uma onda gravi-

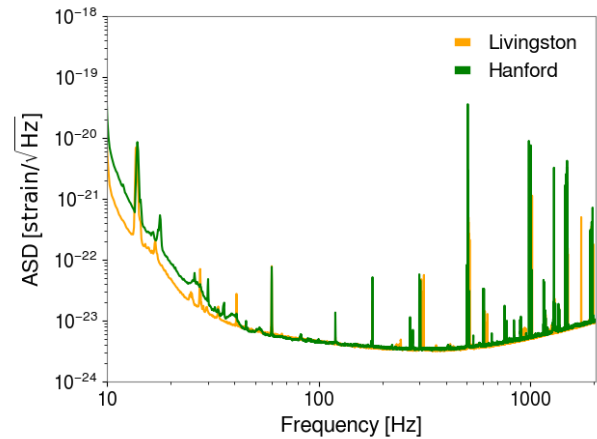
tacional atravessa o interferômetro, ela altera diferencialmente os comprimentos dos braços, quebrando a condição de interferência destrutiva. Como consequência, parte da luz passa a alcançar o fotodiodo, permitindo a detecção do sinal.

Sistemas de vácuo, cavidades ressonantes, sistemas de atuadores e muitos outros elementos compõem a complexidade dos detectores, permitindo ao LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), por exemplo, medir variações nos comprimentos de seus braços da ordem de  $10^{-19}$  metros em determinadas faixas de frequência [9]. A sensibilidade desses instrumentos é limitada por diferentes tipos de ruídos presentes de forma contínua nos dados, geralmente associados a processos físicos intrínsecos ao detector e ao seu ambiente. Entre eles, destacam-se os ruídos quântico, sísmico e térmico [3]. Além desses ruídos, que muitas vezes compõem o que se denomina ruído estacionário, há também os ruídos não estacionários, que podem mascarar ou mimetizar sinais reais, reduzir sua significância estatística e, em alguns casos, até mesmo sobrepor-se a eles.

Um exemplo clássico de superposição entre sinal real e ruído ocorreu na primeira detecção da fusão de duas estrelas de nêutrons, evento denominado GW170817 [10]. Próximo ao fim da coalescência dos objetos compactos, foi observado um ruído transiente de alta amplitude no sinal detectado pelo observatório LIGO de Livingston. Nesse caso, foi possível identificar e subtrair esse ruído dos dados, mas nem sempre tal procedimento é possível.

A prevenção e mitigação desses efeitos indesejáveis constituem uma das principais tarefas dos grupos de caracterização do detector (*Detector Characterization - DetChar*) associados a cada observatório. Outras responsabilidades desses grupos incluem, por exemplo, a validação de eventos de ondas gravitacionais, o suporte à emissão de alertas públicos, a análise de sensores e o monitoramento contínuo da qualidade dos dados [11].

Este artigo apresenta uma revisão dos principais ruídos presentes nos detectores LIGO, suas características, seus impactos na busca por sinais reais de ondas gravitacionais e as principais estratégias utilizadas para investigar suas possíveis origens.



**Figura 1:** Densidade espectral de amplitude (ASD) do ruído medida ao longo de duas horas nos detectores LIGO de Livingston (laranja) e Hanford (azul).

## 2 Ruídos nos detectores LIGO

A Figura 1 apresenta a densidade espectral de amplitude (ASD) do ruído medida ao longo de duas horas em cada um dos detectores LIGO: Livingston, representado em laranja, e Hanford, em azul. Essas curvas, conhecidas como espectros de ruído, descrevem como a intensidade do ruído se distribui em função da frequência; como se trata de ruído, valores mais baixos indicam um detector mais sensível. Uma comparação direta da figura mostra, por exemplo, que o ruído em baixas frequências é mais elevado em Hanford do que em Livingston.

Essa imagem oferece a forma típica do ruído estacionário dos detectores. Embora seja usualmente tratado como estacionário, ele pode apresentar variações ao longo do tempo caso ocorram mudanças instrumentais ou ambientais significativas. A morfologia observada é resultado das diferentes fontes de ruídos quântico, térmico, sísmico, entre outros. As linhas verticais presentes no espectro estão, em geral, associadas a outras fontes; por exemplo, a linha de 60 Hz está relacionada à rede elétrica de corrente alternada utilizada nos Estados Unidos.

Além desses ruídos que limitam a sensibilidade dos detectores, atividades externas ao instrumento também podem introduzir perturbações nos dados. Entre elas, destacam-se atividades humanas nas proximidades dos observatórios, terremotos e variações climáticas significativas, como ventos e chuvas intensas; além de pró-

prias oscilações instrumentais.

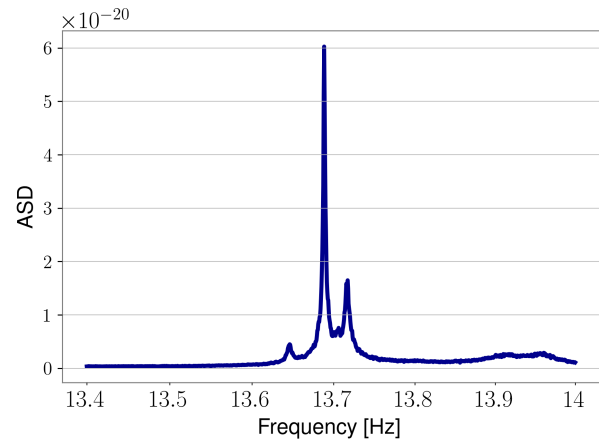
Esses fatores podem se acoplar a diferentes subsistemas do interferômetro, afetando temporariamente a qualidade dos dados. De modo geral, esse tipo de poluição pode ser dividido em dois grupos principais. O primeiro é conhecido como ruídos persistentes ou linhas (*lines*), enquanto o segundo corresponde aos ruídos transientes ou *glitches*.

As linhas são tipicamente estudadas no domínio de frequência, por meio de representações como a ASD. Elas podem ser subdivididas em três categorias principais: linhas finas (*narrow lines*), que apresentam frequências bem definidas; linhas largas (*broadband lines*), que ocupam uma faixa mais ampla de frequências; e *combs*, que consistem em conjuntos de linhas regularmente espaçadas em frequência. Um exemplo conhecido em Livingston é um *comb* de linhas que se repetem a cada 1 Hz [12].

Essas estruturas espectrais podem persistir por diferentes intervalos de tempo, variando de minutos a horas, dias ou até meses. Elas atrapalham principalmente a busca por sinais de ondas gravitacionais contínuos, isto é, sinais fracos e quase periódicos associados a objetos astrofísicos massivos (como estrelas de nêutrons) que apresentam irregularidades na superfície e estão em rotação, produzindo uma emissão persistente com frequência aproximadamente constante ao longo do tempo [13]. A detecção desses sinais requer a acumulação coerente de informação ao longo de longos intervalos temporais.

A Figura 2 apresenta a densidade espectral de amplitude de uma linha em torno de 13.68 Hz associada a modos de rotação (*roll modes*) da suspensão das massas testes do LIGO [14], que correspondem a oscilações angulares do sistema e podem se manifestar como ruídos persistentes no espectro de frequência. Embora a linha apresente um pico bem definido em frequência, observa-se uma estrutura alargada ao seu redor, característica de modos mecânicos da suspensão, cuja excitação e acoplamento podem variar no tempo.

Os *glitches*, por outro lado, são de curta duração e, em sua maioria, duram frações de segundo. Eles produzem desvios significativos e localizados no tempo em relação ao modelo de ruído gaussiano e estacionário usualmente assumido na análise dos dados. Por essa razão, são tipicamente estudados em espectrogramas, representações do

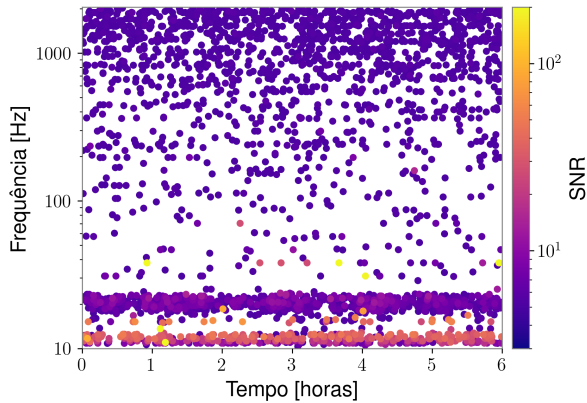


**Figura 2:** ASD de uma linha espectral, associada a modos de rotação do sistema de suspensão dos espelhos do LIGO.

ruído no domínio tempo-frequência. Esses sinais espúrios atrapalham a busca por sinais de ondas gravitacionais do tipo *burst*, isto é, transientes de curta duração e morfologia pouco modelada, como os esperados de colapsos de supernovas [15], e também interferem na busca por coalescências de binárias compactas (*CBC – compact binary coalescences*), podendo inclusive sobrepor-se a esses sinais e influenciar a estimativa de parâmetros da fonte astrofísica. Apenas sinais do tipo CBC foram detectados até o momento, o que ressalta ainda mais a importância de estudar e mitigar esses ruídos transientes.

O Omicron [16] é o principal algoritmo utilizado para identificar a presença de *glitches* nos dados. A partir das séries temporais, o algoritmo projeta os dados em uma representação tempo-frequência baseada na transformada Q [17], na qual busca excessos de potência. Ao detectá-los, ocorre a caracterização desses transientes, com a atribuição de parâmetros como razão sinal-ruído (SNR), duração, frequência característica, entre outros.

A Figura 3 apresenta um *glitchograma* de LIGO Livingston, mostrando a distribuição de *glitches* ao longo das primeiras seis horas de um dia aleatório no início da O4. Cada ponto corresponde a um *glitch* identificado pelo Omicron. O eixo vertical indica a frequência característica do ruído, o eixo horizontal mostra o tempo em horas, e a cor dos pontos representa a razão sinal-ruído de cada evento. Observa-se, portanto, que nesse período



**Figura 3:** *Glitchograma* do detector LIGO Livingston mostrando a distribuição de *glitches* ao longo de seis horas de um dia aleatório no início da corrida observacional O4. Os eventos foram identificados pelo algoritmo Omicron, e cada ponto representa um *glitch*.

os *glitches* mais intensos ocorreram predominantemente em baixas frequências (abaixo de 15 Hz).

Durante a primeira parte da corrida observacional O4, a taxa de ocorrência de *glitches* no detector de Livingston ultrapassou 50 por hora ao se considerar sinais com razão sinal-ruído maior que 6.5 [11]. Esse valor é extremamente elevado quando comparado à taxa de detecção de ondas gravitacionais, que foi, em média, da ordem de três eventos por semana. O problema se agrava pelo fato de que, além de poluírem os dados, alguns *glitches* podem apresentar características muito semelhantes às de sinais astrofísicos. Nesses casos, o grupo de DetChar precisa atuar com atenção redobrada para evitar conclusões equivocadas.

## 2.1 Investigando suas origens

Os detectores LIGO possuem braços de quatro quilômetros de extensão e são extremamente complexos. Identificar em que parte do interferômetro existe sensibilidade suficiente para permitir o acoplamento de ruídos, ou onde pode haver algum defeito instrumental, é uma tarefa desafiadora. Para auxiliar nessa investigação, o LIGO conta com milhares de canais auxiliares que registram informações de diferentes sensores (como magnetômetros, fotodiodos, microfones, voltímetros) distribuídos por toda a infraestrutura dos interferômetros e em seu entorno.

Idealmente, o objetivo é encontrar a fonte do

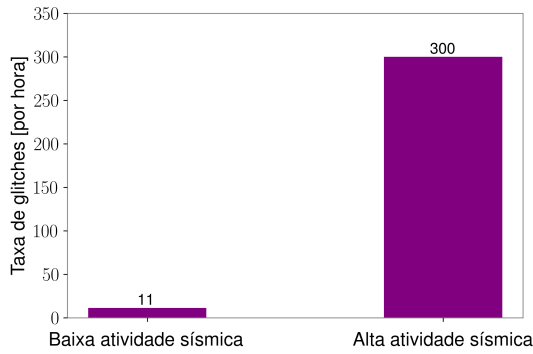
ruído e eliminá-lo por meio de alguma adaptação instrumental; no entanto, isso nem sempre é possível. Nesses casos, mitigar seus efeitos é suficiente para melhorar a qualidade dos dados. Um exemplo de mitigação de *glitches* ocorreu durante a terceira corrida observacional. Atrás do espelho final do interferômetro existe um atuador eletrostático, responsável por auxiliar o detector a permanecer no estado conhecido como *lock*. Para tanto, são necessários sistemas de controle ativo, que ajustam continuamente a posição e o alinhamento dos espelhos.

Durante a O3, a força aplicada pelo atuador eletrostático gerava um movimento relativo entre o atuador e o espelho. Esse movimento fazia com que uma pequena fração da luz do laser, transmitida pelo espelho, fosse espalhada por essas superfícies e retornasse ao feixe principal com uma diferença de fase, introduzindo ruído nos dados. Esse efeito se tornava mais intenso durante períodos com alto ruído sísmico. O problema foi mitigado com a implementação do *RC tracking*, que reduziu esse movimento relativo [18].

O LIGO de Livingston iniciou a O4 com alta taxa de *glitches*, também relacionada a movimentos sísmicos de grande amplitude [19], embora provenientes de fontes diferentes daquelas observadas na O3. Como os espelhos do interferômetro não são perfeitos, uma pequena fração da luz pode ser espalhada e atingir outras superfícies em movimento (efeito intensificado durante períodos com alta atividade sísmica), sendo posteriormente refletida de volta ao feixe principal e introduzindo ruídos nos dados. O grande desafio é encontrar essa superfície.

A Figura 4 apresenta uma comparação das taxas de *glitches* ao longo de duas horas contínuas de dados, considerando períodos de baixa (à esquerda) e de alta (à direita) amplitude de movimento sísmico. Os dados utilizados como referência foram obtidos de sismômetros localizados próximos ao divisor de feixes. As velocidades do solo medidas por esses sensores foram, em média, de 180 nm/s e 1100 nm/s, respectivamente. As velocidades foram adquiridas considerando vibrações no solo na faixa de 0.1 a 0.3 Hz.

De fato, é possível verificar que fatores sísmicos afetam a taxa de *glitches*, fornecendo indícios de uma possível correlação entre a atividade sísmica e os ruídos observados no detector. Em geral, di-



**Figura 4:** Comparação da taxa de *glitches* por hora no detector LIGO de Livingston durante períodos de baixa (à esquerda) e alta (à direita) atividade sísmica. A velocidade do solo foi analisada considerando sua componente ao longo da direção do feixe de entrada do laser.

ferentes canais auxiliares são utilizados na busca por essas correlações, não apenas para a investigação da origem dos *glitches*, mas também para o estudo de linhas espectrais persistentes.

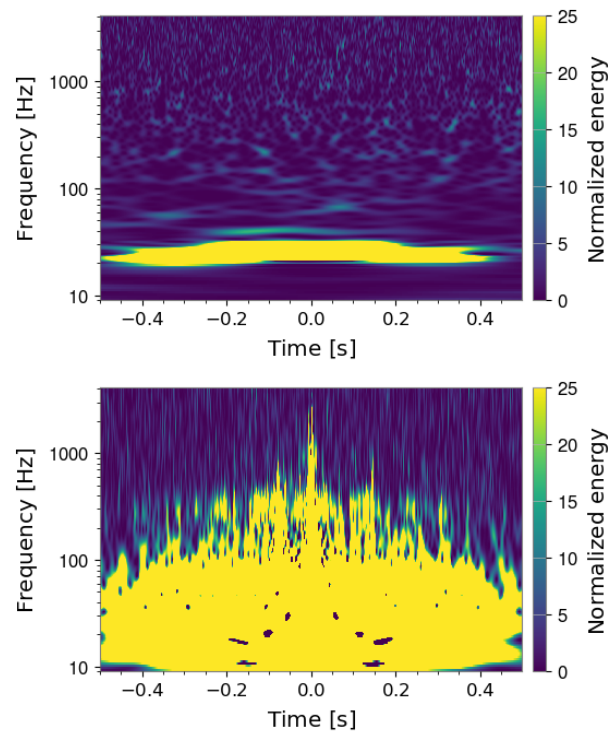
## 2.2 Classes de *glitches*

Os *glitches* são tipicamente estudados a partir de sua morfologia, observada nos espectrogramas. Nesse contexto, existe um projeto chamado *Gravity Spy* [20, 21], que combina o conhecimento de especialistas em DetChar, a participação de voluntários e técnicas de aprendizado de máquina para classificar *glitches* de acordo com sua morfologia no espectrograma. A partir dessa classificação, diferentes nomes de classes são atribuídos.

Por exemplo, os ruídos associados ao espalhamento do laser, mencionados anteriormente, costumam apresentar uma estrutura em forma de arco em seus espectrogramas e são classificados como *Scattered Light*. Uma vez definida essa classe, todos os *glitches* que apresentam morfologia semelhante passam a ser classificados dessa forma. Entre as diversas classes existentes, podemos citar as conhecidas como *Blip*, *Koi Fish*, *Tomte*, *Low Frequency Lines*, entre outras. A Figura 5 mostra espectrogramas de dois *glitches* classificados pelo *Gravity Spy* como *Scattered Light* e *Extremely Loud*, respectivamente.

O projeto conta ainda com a plataforma do Zooniverse, que permite a participação de qualquer cidadão interessado em auxiliar na classificação de *glitches* [22].

As classificações auxiliam na identificação das



**Figura 5:** Espectrogramas de um *glitch* classificado como *Scattered Light*, pelo Gravity Spy (superior), e outro classificado como *Extremely Loud* (inferior).

possíveis fontes dos *glitches*, uma vez que, ao selecionar uma classe, torna-se possível estudar parâmetros como a duração do sinal, a frequência característica e sua evolução no tempo. Além disso, é possível buscar indícios de correlação com canais auxiliares, restringindo a análise de conjuntos de eventos com características semelhantes, em vez de tratar todos os *glitches* de forma generalizada. Existem diferentes metodologias e adaptações para o estudo de *glitches* e para a investigação de suas causas físicas, que variam de acordo com o tipo de ruído e com o objetivo da análise [23–27].

## 3 Discussões finais

Desde a primeira detecção de ondas gravitacionais, diversos aprendizados e avanços foram alcançados. Atualmente, existem *pipelines* dedicados exclusivamente à busca por sinais astrofísicos, que em geral se baseiam em métodos como o *matched filtering*, nos quais sinais observados são comparados a um banco de *templates* teóricos para identificar a presença de ondas gravita-

cionais.

Entretanto, diferentes fatores instrumentais e ambientais podem introduzir ruídos nos detectores, fazendo com que sinais reais sejam mascarados ou tenham significância estatística reduzida. Para lidar com esse desafio, a colaboração LIGO conta com o grupo de Caracterização do Detector (DetChar), cujos objetivos incluem compreender a origem desses ruídos, monitorar a qualidade dos dados e desenvolver, em colaboração com as equipes nos observatórios, estratégias para sua mitigação.

Este artigo apresentou uma visão geral dos principais tipos de ruído observados nos interferômetros LIGO, bem como exemplos de como esses ruídos podem ser investigados e mitigados. A compreensão e controle de tais desafios são fundamentais para o aumento da sensibilidade dos detectores e para garantir a confiabilidade das detecções, contribuindo diretamente para novas descobertas na astronomia de ondas gravitacionais.

#### 4 Sessão agradecimentos

A autora agradece a Odylio Aguiar pela recomendação da revista. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil (Processo nº 2025/08599-6). Este material é baseado em trabalhos apoiados pelo LIGO *Laboratory da National Science Foundation* (NSF), uma grande instalação financiada integralmente pela NSF. Além disso, este trabalho utiliza os *clusters* computacionais do LIGO e dados dos detectores *Advanced LIGO*; a autora agradece os recursos computacionais fornecidos pelo LIGO *Laboratory*, apoiados pelas concessões da *National Science Foundation* PHY-0757058 e PHY-0823459.

---

#### Sobre o autor

Tábata Aira Ferreira ([tabata.aira@impe.br](mailto:tabata.aira@impe.br)) é bacharela em Física pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), mestra e doutora em Astrofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Atualmente, realiza pós-doutorado no INPE, com apoio da FAPESP.

Atuou por dois anos em pós-doutorado na Louisiana State University (LSU), com participação ativa no observatório LIGO de Livingston. Integra o grupo de Caracterização do Detector (DetChar) da colaboração científica LIGO e possui experiência em análise de dados, aprendizado de máquina e na investigação de fontes de ruído em detectores de ondas gravitacionais. Além disso, possui interesse em detectores espaciais.

#### Referências

- [1] B. P. Abbott et al., *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Physical Review Letters* **116**(6), 061102 (2016).
- [2] Nobel Prize Committee, *The Nobel Prize in Physics 2017* (2017). Disponível em <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>, acesso em jan. 2026.
- [3] J. Aasi et al., *Advanced LIGO*, *Classical and Quantum Gravity* **32**(7), 074001 (2015).
- [4] F. Acernese et al., *Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector*, *Classical and Quantum Gravity* **32**(2), 024001 (2014).
- [5] T. Akutsu et al., *Overview of KAGRA: Detector design and construction history*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2021**(5), 05A101 (2021).
- [6] J. Aasi et al., *Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO and Advanced Virgo*, *Living Reviews in Relativity* **19** (2016).
- [7] Colaboração LIGO-Virgo-KAGRA, *GracedB: Gravitational-Wave Candidate Event Database* (2026). Disponível em <https://gracedb.ligo.org>, acesso em jan. 2026.
- [8] R. Abbott et al., *GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run*, *Physical Review X* **13**(4), 041039 (2023).

- [9] E. Capote et al., *Advanced LIGO detector performance in the fourth observing run*, *Physical Review D* **111**(6), 062002 (2025).
- [10] B. P. Abbott et al., *GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral*, *Physical Review Letters* **119**(16), 161101 (2017).
- [11] S. Soni et al., *LIGO Detector Characterization in the first half of the fourth Observing run*, *Classical and Quantum Gravity* **42**(8), 085016 (2025).
- [12] J. Martins, A. Effler, *No Fscan Evidence of 1 Hz Comb in IM3 Suspension Channels* (2025). Disponível em <https://alog.ligo-la.caltech.edu/aLOG/index.php?callRep=78307>, acesso em jan. 2026.
- [13] Colaboração Científica LIGO, *Gravitational Wave Sources: Continuous Gravitational Waves*. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>, acesso em jan. 2026.
- [14] V. Bossilkov, *QUAD Roll Frequency remeasurements* (2021). Disponível em <https://alog.ligo-la.caltech.edu/aLOG/index.php?callRep=68291>, acesso em jan. 2026.
- [15] J. Abadie et al., *All-sky search for gravitational-wave bursts in the first joint LIGO-GEO-Virgo run*, *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology* **81**(10), 102001 (2010).
- [16] F. Robinet et al., *Omicron: a tool to characterize transient noise in gravitational-wave detectors*, *SoftwareX* **12**, 100620 (2020).
- [17] J. C. Brown, *Calculation of a constant  $Q$  spectral transform*, *The Journal of the Acoustical Society of America* **89**(1), 425 (1991).
- [18] S. Soni et al., *Reducing scattered light in LIGO's third observing run*, *Classical and Quantum Gravity* **38**(2), 025016 (2020).
- [19] T. A. Ferreira, G. González e O. Salas, *An Analysis of LIGO Glitches Using t-SNE During the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run*, *arXiv preprint arXiv:2512.03440* (2025).
- [20] M. Zevin et al., *Gravity Spy: integrating advanced LIGO detector characterization, machine learning, and citizen science*, *Classical and Quantum Gravity* **34**(6), 064003 (2017).
- [21] Y. Wu et al., *Advancing glitch classification in Gravity Spy: Multi-view fusion with attention-based machine learning for advanced LIGO's fourth observing run*, *Classical and Quantum Gravity* **42**(16), 165015 (2025).
- [22] Gravity Spy Project, Zooniverse, *Gravity Spy: Citizen Science Glitch Classification for Gravitational-wave Data*, <https://www.zooniverse.org/projects/zooniverse/gravity-spy>, acessado em 23-01-2026.
- [23] M. Cabero et al., *Blip glitches in Advanced LIGO data*, *Classical and Quantum Gravity* **36**(15), 155010 (2019).
- [24] J. Merritt et al., *Transient glitch mitigation in Advanced LIGO data*, *Physical Review D* **104**(10), 102004 (2021).
- [25] T. A. Ferreira e G. González, *Using t-SNE for characterizing glitches in LIGO detectors*, *Classical and Quantum Gravity* **42**(10), 105010 (2025).
- [26] D. Davis et al., *Subtracting glitches from gravitational-wave detector data during the third LIGO-Virgo observing run*, *Classical and Quantum Gravity* **39**(24), 245013 (2022).
- [27] D. George, H. Shen e E. Huerta, *Classification and unsupervised clustering of LIGO data with Deep Transfer Learning*, *Physical Review D* **97**(10), 101501 (2018). *ArXiv: 1706.07446*.