

# **Generación de Ondas Gravitacionales Sintéticas usando Redes Generativas Adversarias**

**EDWIN CAMILO LAVERDE VILLARREAL  
LUIS FERNANDO FLÓREZ CÁCERES**

# Contenido

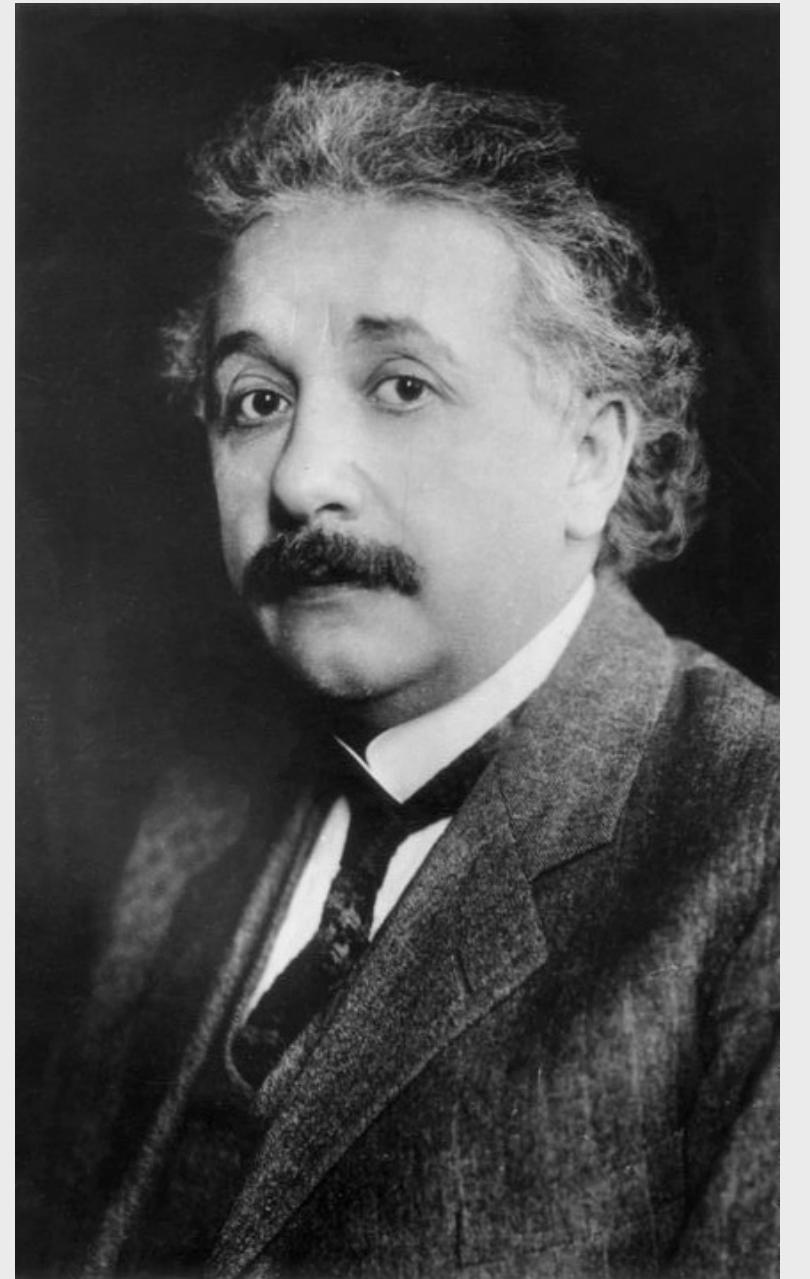
1. Ondas Gravitacionales
2. Detección de Ondas Gravitacionales
3. ¿Cómo trabajar con datos de LIGO?
4. Generación de Ondas Sintéticas
  - 4.1 Obtención de datos
  - 4.2 Redes Generativas Adversarias
  - 4.3 Resultados
5. Discusión

# **1. Ondas gravitacionales**

# Ondas gravitacionales

---

- 1916 - EINSTEIN PUBLICA LA ADMISIÓN SOLUCIONES ONDULATORIAS DE LAS EDC.
- 1918 - ECUACIÓN CUADRUPOLAR
- 1960 - PRIMEROS DISEÑOS DE INTERFERÓMETROS
- 1980 - 1997 - DESARROLLO LIGO\*
- 2015 - PRIMERAS OBSERVACIONES



# Ecuación de Onda

---

**Partiendo de la ecuaciones de campo de Einstein en el vacío, se considera la métrica minkowskiana perturbada.**

$$R_{\mu\nu} = 0$$

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

**Donde  $h_{\mu\nu}$  es un término perturbativo de la métrica.**

# Ecuación de Onda

**Los símbolos de Cristoffel consideran perturbaciones pequeñas,  
dejando para estos la forma**

$$\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha} = \frac{1}{2}\eta^{\alpha\sigma} \left\{ \frac{\partial h_{\gamma\sigma}}{\partial x^{\beta}} + \frac{\partial h_{\beta\sigma}}{\partial x^{\gamma}} - \frac{\partial h_{\beta\gamma}}{\partial x^{\sigma}} \right\}$$

**i.e. en términos del término perturbativo. El tensor de Ricci**

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x^{\alpha}} - \frac{\partial \Gamma_{\alpha\mu}^{\alpha}}{\partial x^{\nu}}$$

# Ecuación de Onda

**El tensor de Ricci**

$$R_{\mu\nu} = \frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^\alpha}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial \Gamma_{\alpha\mu}^\alpha}{\partial x^\nu}$$

**Para la métrica considerada toma la forma**

$$R_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial^2 h}{\partial x^\mu \partial x^\nu} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\nu}}{\partial x_\mu \partial x^\alpha} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\mu}}{\partial x^\alpha \partial x^\nu} + \square h_{\mu\nu} \right\}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^\mu \partial x^\nu} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\nu}}{\partial x_\mu \partial x^\alpha} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\mu}}{\partial x^\alpha \partial x^\nu} + \square h_{\mu\nu} = 0$$

# Ecuación de Onda

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^\mu \partial x^\nu} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\nu}}{\partial x_\mu \partial x^\alpha} - \frac{\partial^2 h_{\alpha\mu}}{\partial x^\alpha \partial x^\nu} + \square h_{\mu\nu} = 0$$

**Dos recalibraciones permiten deshacerse de efectos producto de las coordenadas y simplifican la dependencia de la métrica minkowskiana.**

$$h_{\mu\nu,\nu} = 0 \quad \text{Gauge de Hilbert}$$

$$A^{\mu\nu} k_\nu = 0$$

$$A_\mu^\mu = 0 \quad \text{Gauge TT}$$

$$A_{\mu\nu} u^\nu = 0$$

# Ecuación de Onda

**De este modo se llega a una ecuación de onda para las perturbaciones a la métrica.**

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

**Con soluciones de la forma**

$$h_{\mu\nu} = \text{Re} \{ A_{\mu\nu} \exp(ik_\alpha x^\alpha) \}$$

**Donde los tensores  $A_{\mu\nu}$  y  $k_\nu$  son tensores constantes parte de la solución.**

- **Se consideran pequeñas perturbaciones a la métrica plana.**
- **Ecuaciones de Campo de Einstein en el vacío.**
- **Las perturbaciones se tienen en las direcciones transversales a la dirección de propagación.**
- **Las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz**
- **El efecto es la dilatación/contracción del espacio tiempo y así mismo en la frecuencia.**

# Fuentes de ondas gravitacionales

---

**Ecuación del cuadripolo (Einstein 1918)**

$$h_{ij}(r, t) = \frac{2G}{c^2} \frac{1}{r} \ddot{I}(t_r)$$

**i.e. las ondas  $h_{\mu\nu}$  son producto de variaciones en el tensor momento cuadrupolar.**

$$I_{ij}(t_r) = \int y^i y^j T^{00}(t, \mathbf{y}) d^3y$$

- **Momento cuadrupolar relacionado con asimetrías i.e. fuentes no esféricas.**
- **Momento cuadrupolar << Momento dipolar**  
**ondas gravitacionales << ondas electromagnéticas**
- **Fuentes: objetos acelerados y esféricamente asimétricos.**
- **Fuentes de ondas continuas: objetos rotantes \***

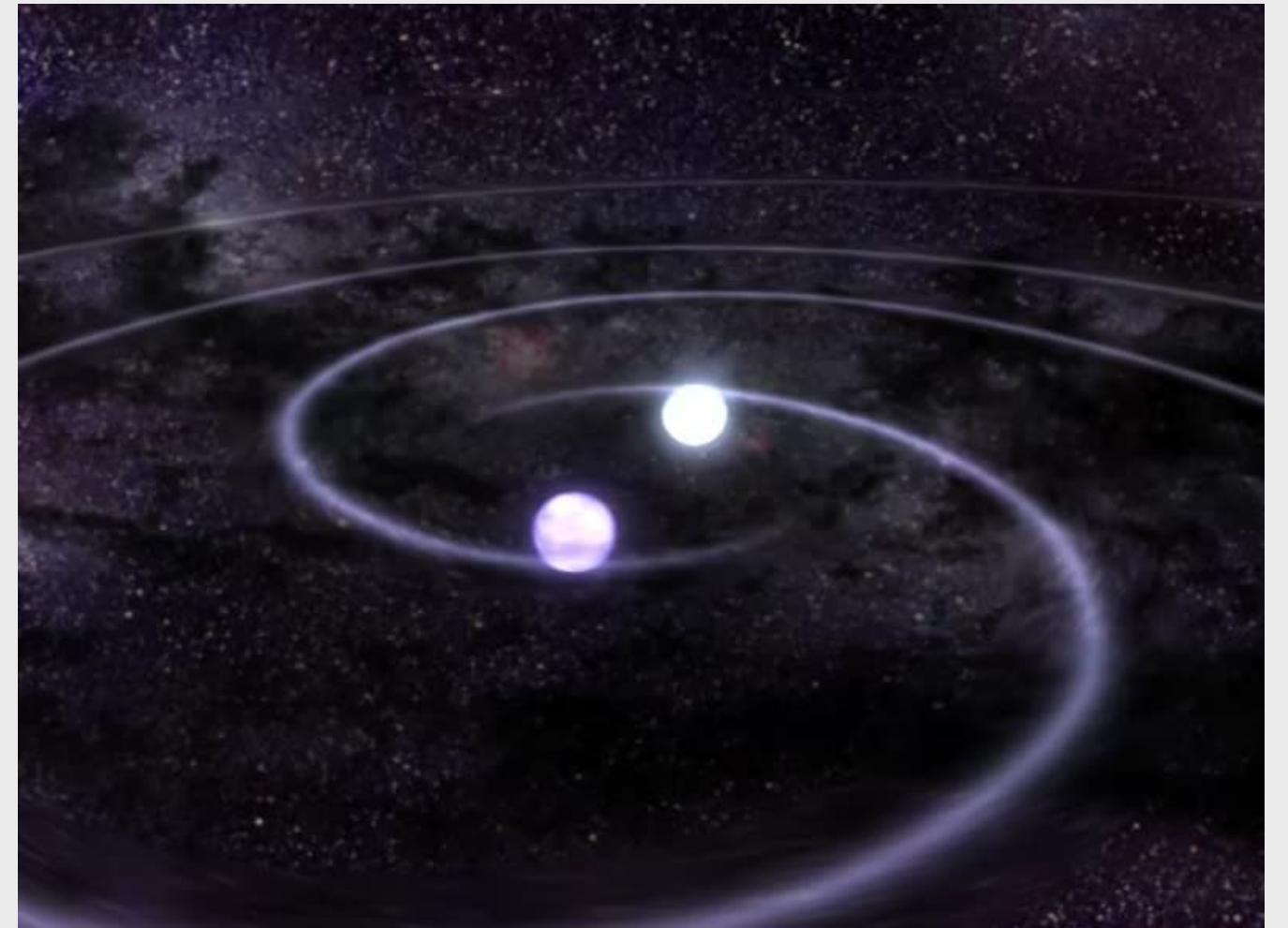
**Eventos en sistemas binarios como mejores fuentes de ondas gravitacionales.**

## **2. Detección de ondas gravitacionales**

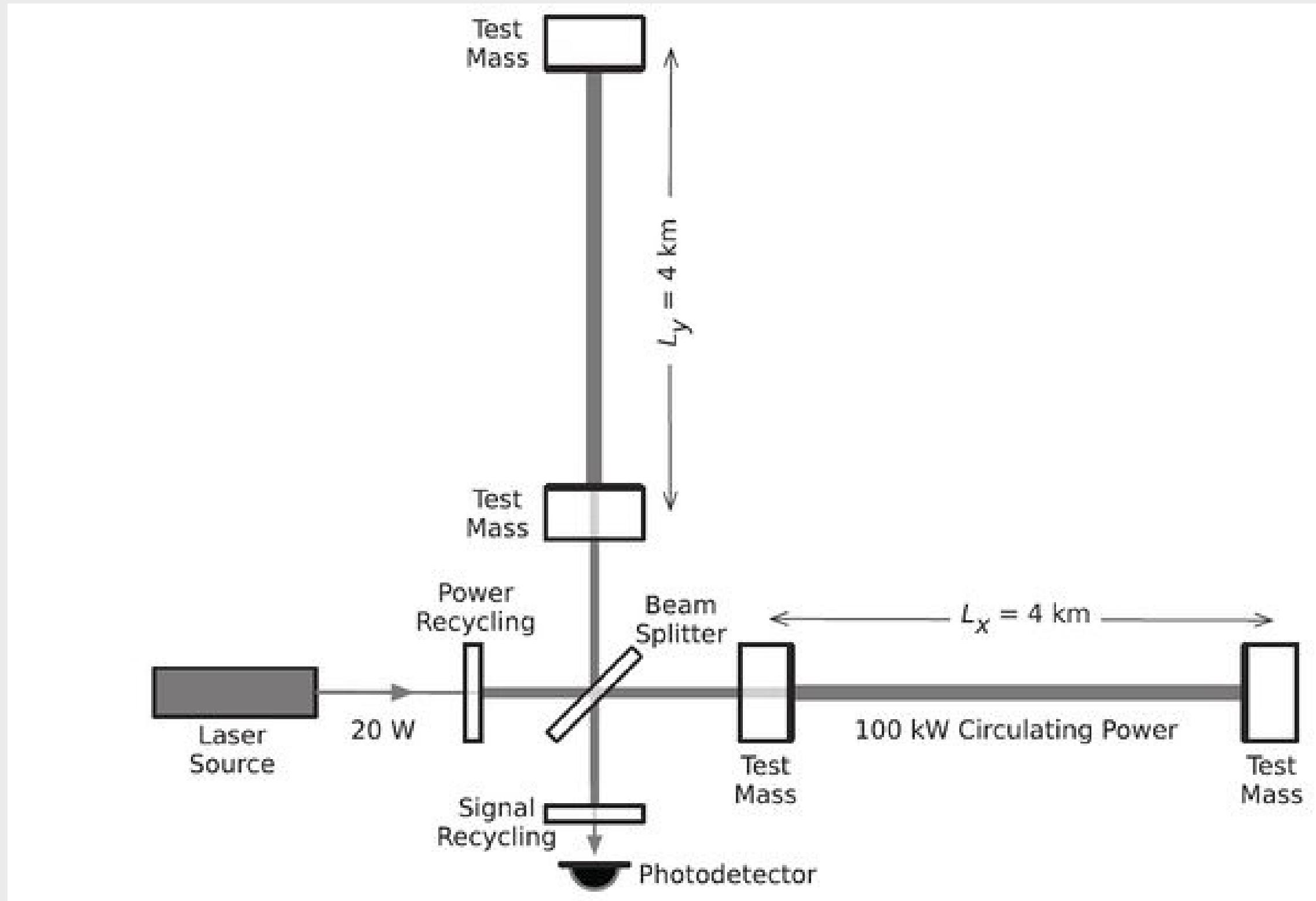
# Detección de ondas gravitacionales

---

- INTERFEROMETRÍA COMO FUNDAMENTO EN LA DETECCIÓN.
- CONTRACCIÓN Y DILATACIÓN EN DIRECCIONES PERPENDICULARES
- DETECCIÓN DE ONDAS PROVENIENTES DE SISTEMAS BINARIOS
- FRECUENCIAS BAJAS ASOCIADAS A LAS ONDAS

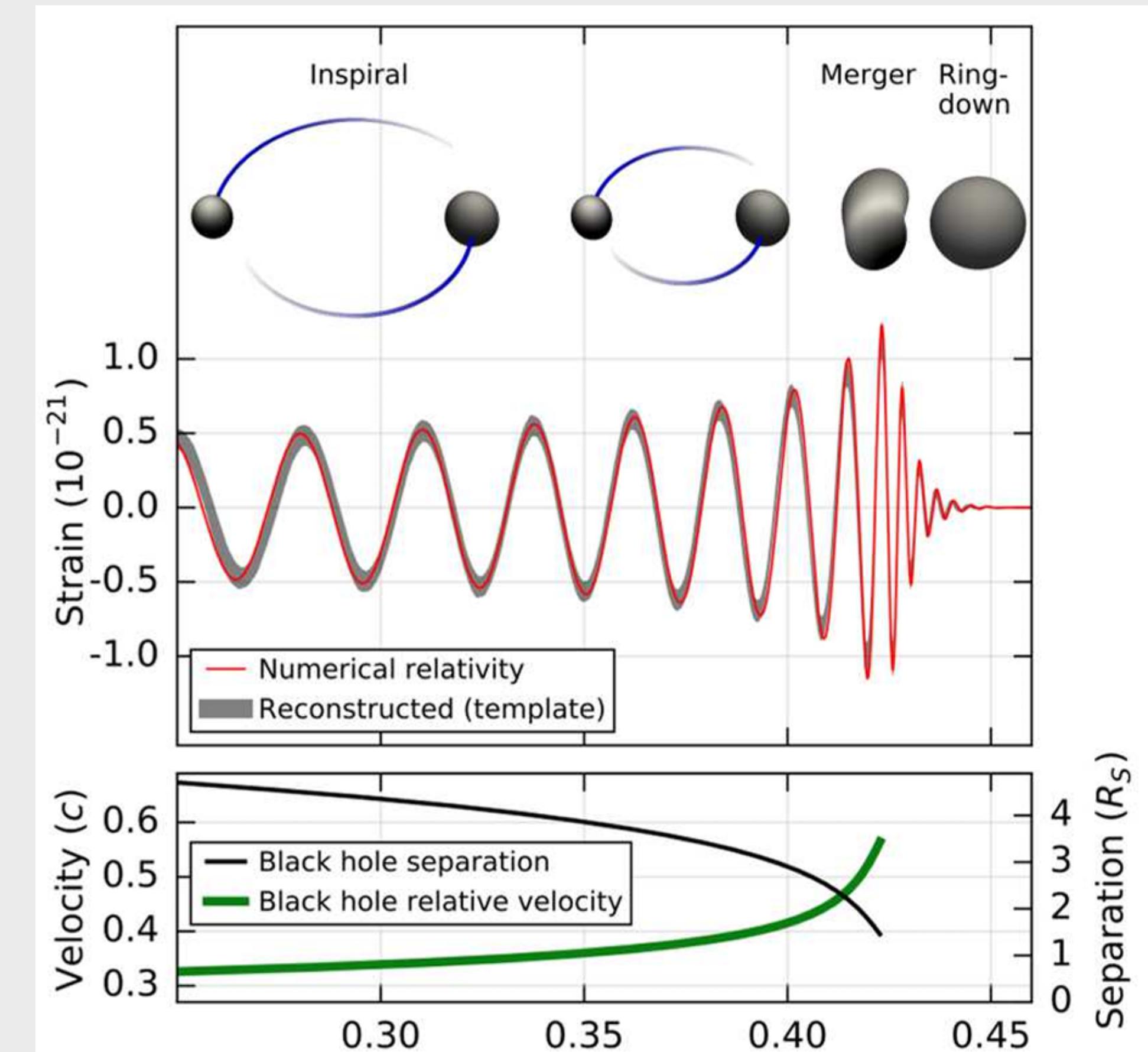
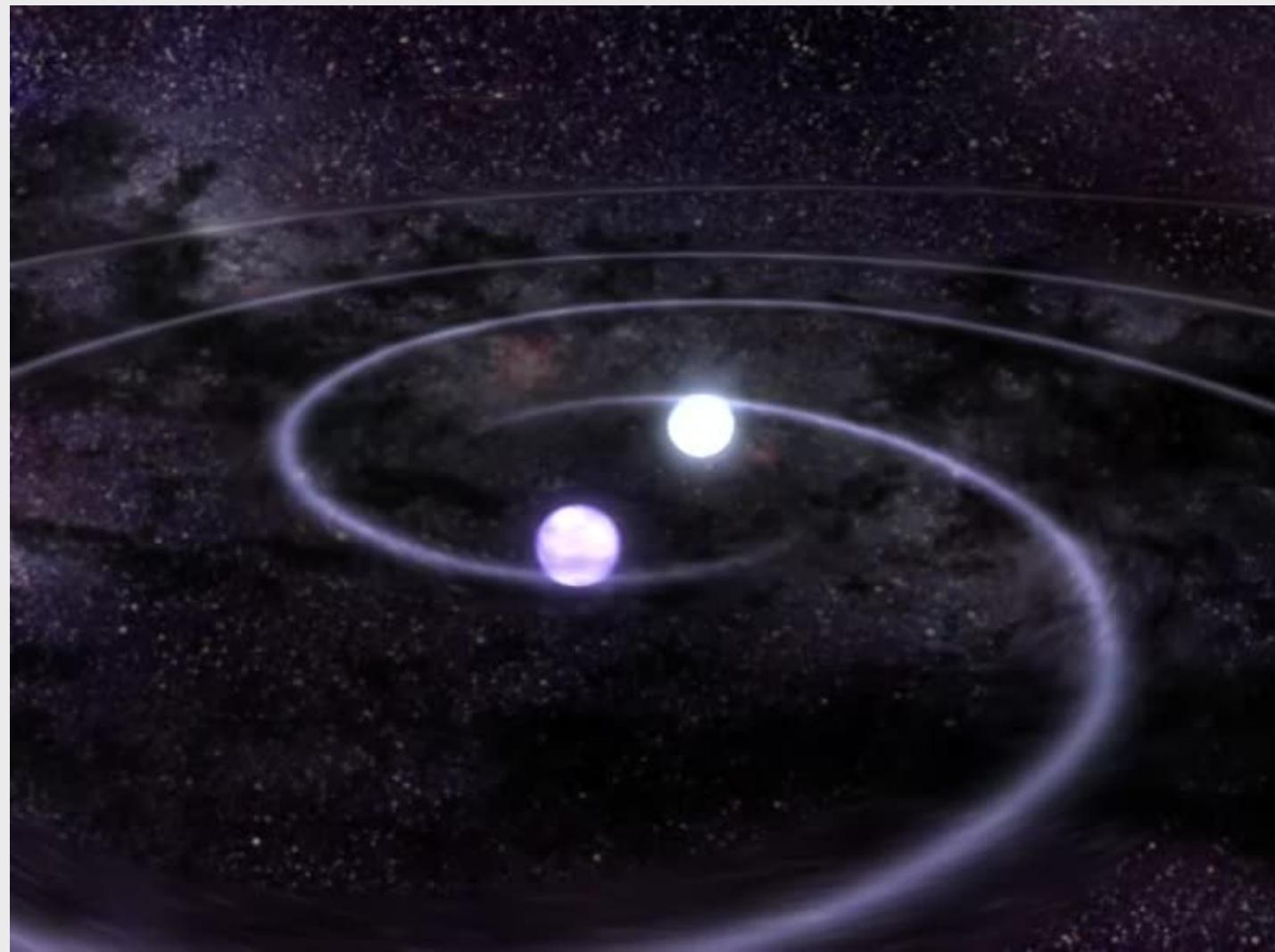


# GW detector (LIGO)



- **Cavidad óptica:** refleja los haces en un recorrido de 4km
- **Espejos de reciclaje:**
  1. **Potencia**
  2. **Señal**
- **Fotodetector**

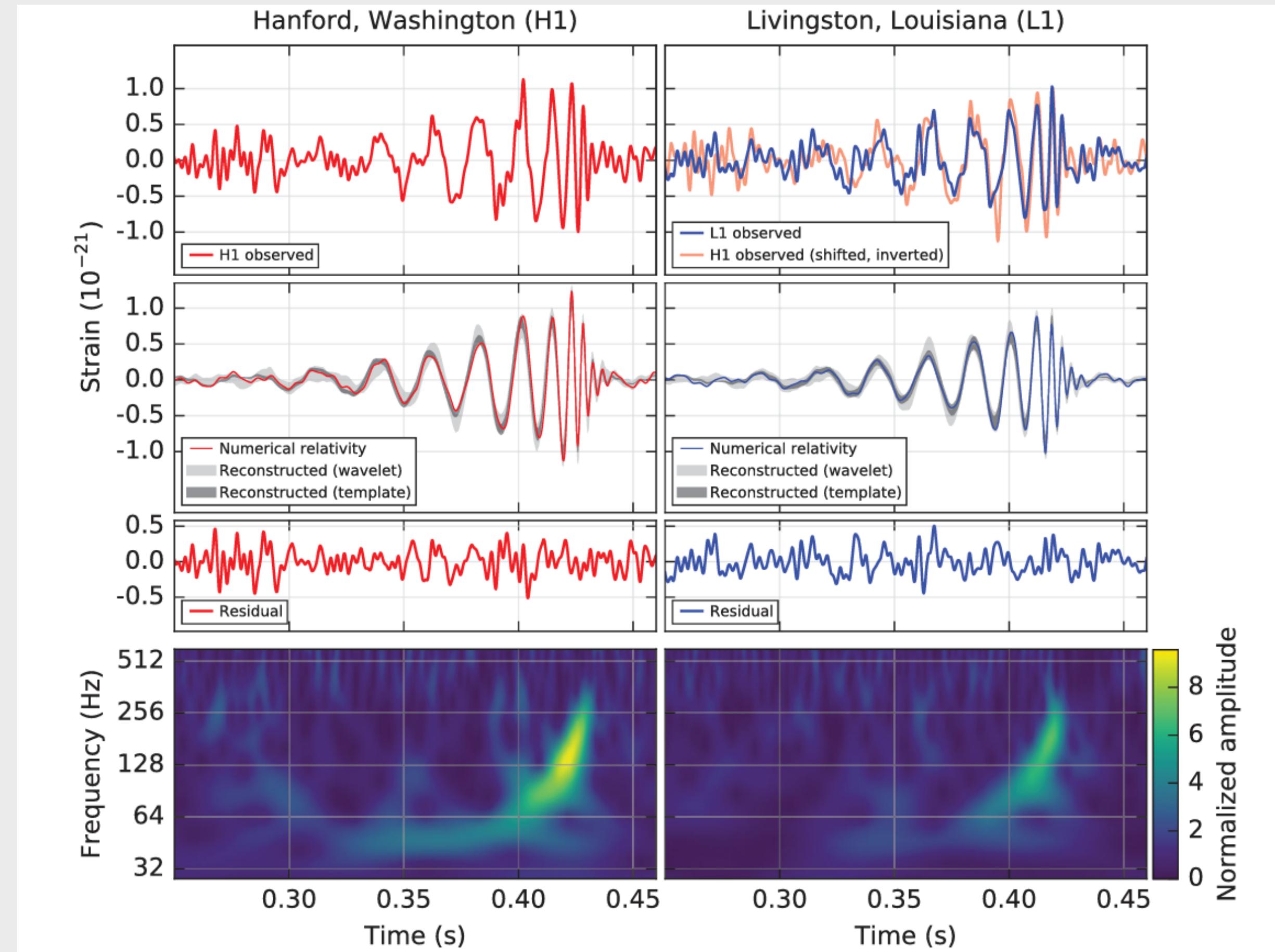
# Señales



# Waveform fitter

<https://data.cardiffgravity.org/waveform-fitter/>

# ¿Cómo se ven estas señales?



# **3. ¿Cómo trabajar con datos de LIGO?**

# Estructura de datos fundamental:



a python package for gravitational-wave astrophysics.

## TIME SERIES

### ATRIBUTOS

- Data
- unit
- t0
- dt

### MÉTODOS

- crop
- whiten
- bandpass
- q\_transform
- fft



# **Gravitational Wave Open Data Workshop**

**May 15 - 17, 2023**



# **4. Generación de Ondas Sintéticas**

# Obtención de datos:

- **Gravitational Wave Transient Catalog**

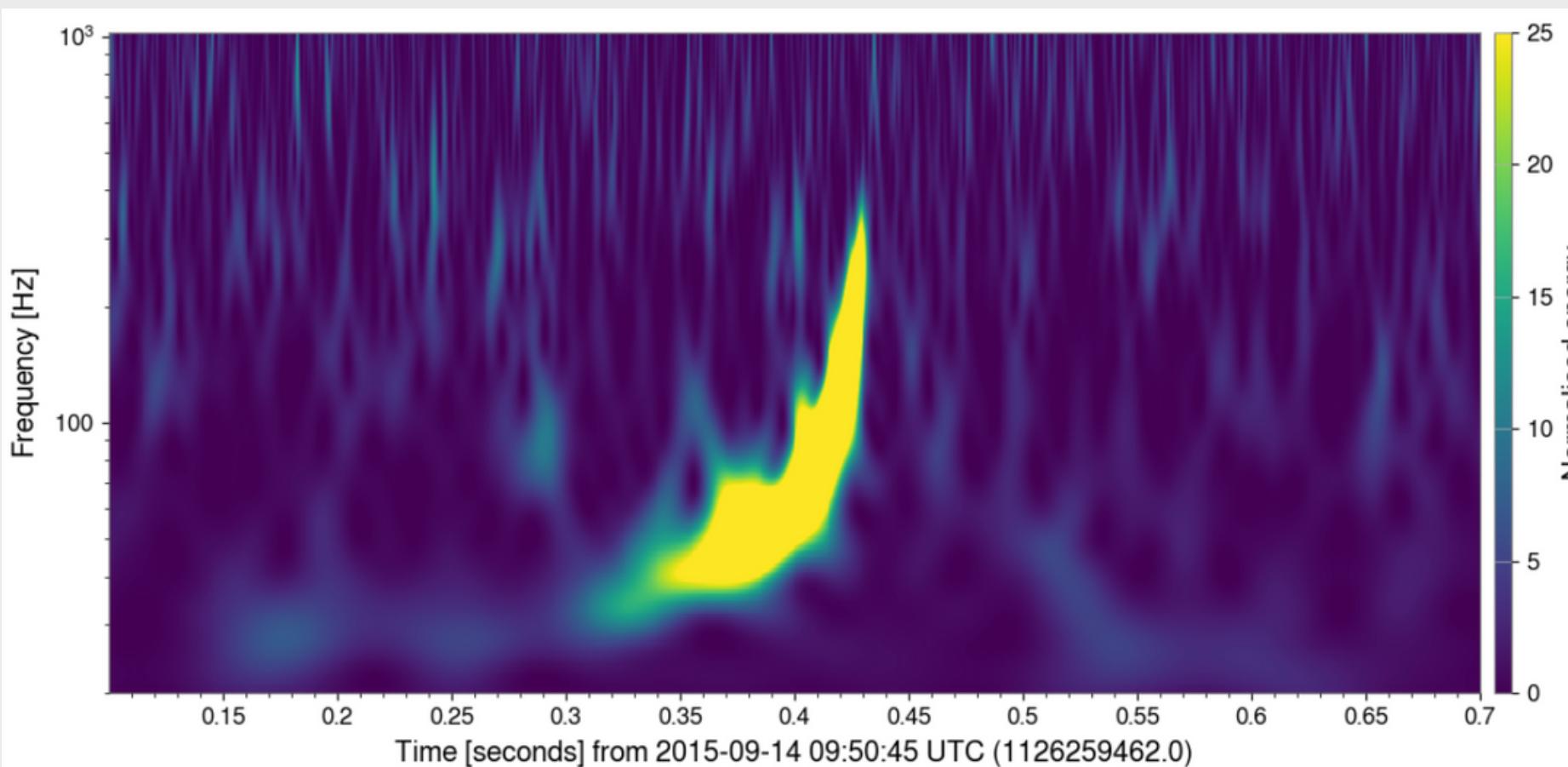
"The online GWTc contains confidently-detected events from multiple data releases."

El catálogo contiene actualmente datos de 93 eventos.

Name	Release	GPS	Mass 1 ( $M_{\odot}$ )	Mass 2 ( $M_{\odot}$ )	Distance (Mpc)	$X_{\text{eff}}$	Total Mass ( $M_{\odot}$ )	Redshift
<a href="#">GW200322_091133</a>	<a href="#">GWTC-3-confident</a>	1268903511.3	$^{+48}_{-34}$ $^{+16.8}_{-14.0}$	$^{+16.8}_{-8.7}$	$^{+7000}_{-3600}$ $^{+2000}_{-2000}$	$^{+0.45}_{-0.24}$ $^{+0.51}_{-0.51}$	$^{+37}_{-55}$ $^{+27}_{-27}$	$^{+0.84}_{-0.60}$ $^{+0.30}_{-0.30}$
<a href="#">GW200316_215756</a>	<a href="#">GWTC-3-confident</a>	1268431094.1	$^{+10.2}_{-13.1}$ $^{+1.9}_{-2.9}$	$^{+1.9}_{-2.9}$ $^{+7.8}_{-7.8}$	$^{+470}_{-1120}$ $^{+440}_{-440}$	$^{+0.27}_{-0.13}$ $^{+0.10}_{-0.10}$	$^{+7.2}_{-21.2}$ $^{+2.0}_{-2.0}$	$^{+0.08}_{-0.22}$ $^{+0.08}_{-0.08}$
<a href="#">GW200311_115853</a>	<a href="#">GWTC-3-confident</a>	1267963151.3	$^{+6.4}_{-34.2}$ $^{+4.1}_{-3.8}$	$^{+4.1}_{-5.9}$ $^{+27.7}_{-27.7}$	$^{+280}_{-1170}$ $^{+400}_{-400}$	$^{+0.16}_{-0.02}$ $^{+0.20}_{-0.20}$	$^{+5.3}_{-61.9}$ $^{+4.2}_{-4.2}$	$^{+0.05}_{-0.23}$ $^{+0.07}_{-0.07}$
<a href="#">GW200308_173609</a>	<a href="#">GWTC-3-confident</a>	1267724187.7	$^{+11.2}_{-36.4}$ $^{+7.2}_{-9.6}$	$^{+7.2}_{-13.8}$ $^{+3.3}_{-3.3}$	$^{+2700}_{-5400}$ $^{+2600}_{-2600}$	$^{+0.17}_{-0.65}$ $^{+0.21}_{-0.21}$	$^{+10.9}_{-50.6}$ $^{+8.5}_{-8.5}$	$^{+0.32}_{-0.83}$ $^{+0.35}_{-0.35}$

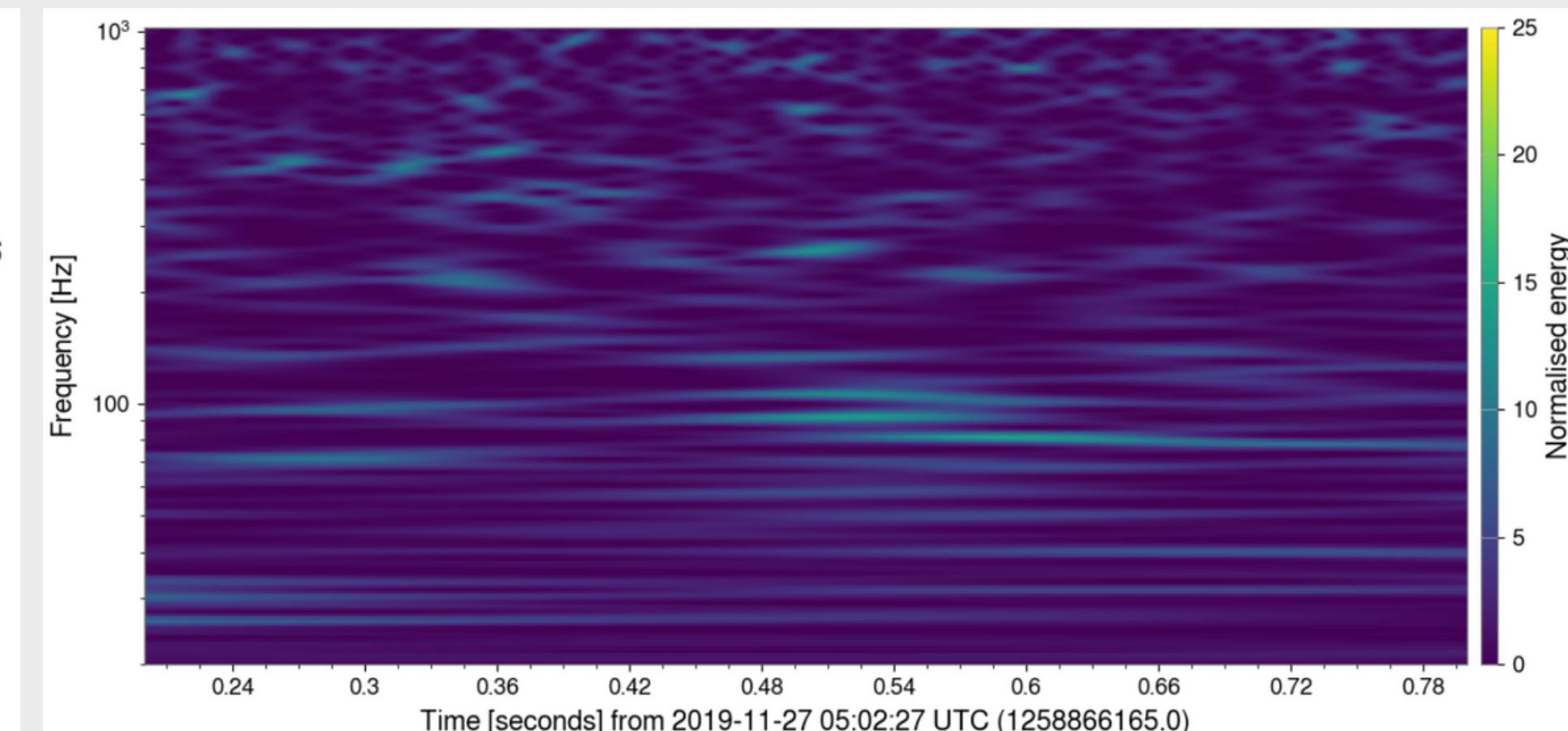
# Calidad de las señales:

**1126259462.4**



**ETIQUETADA COMO 'G'**

**1258866165.5**

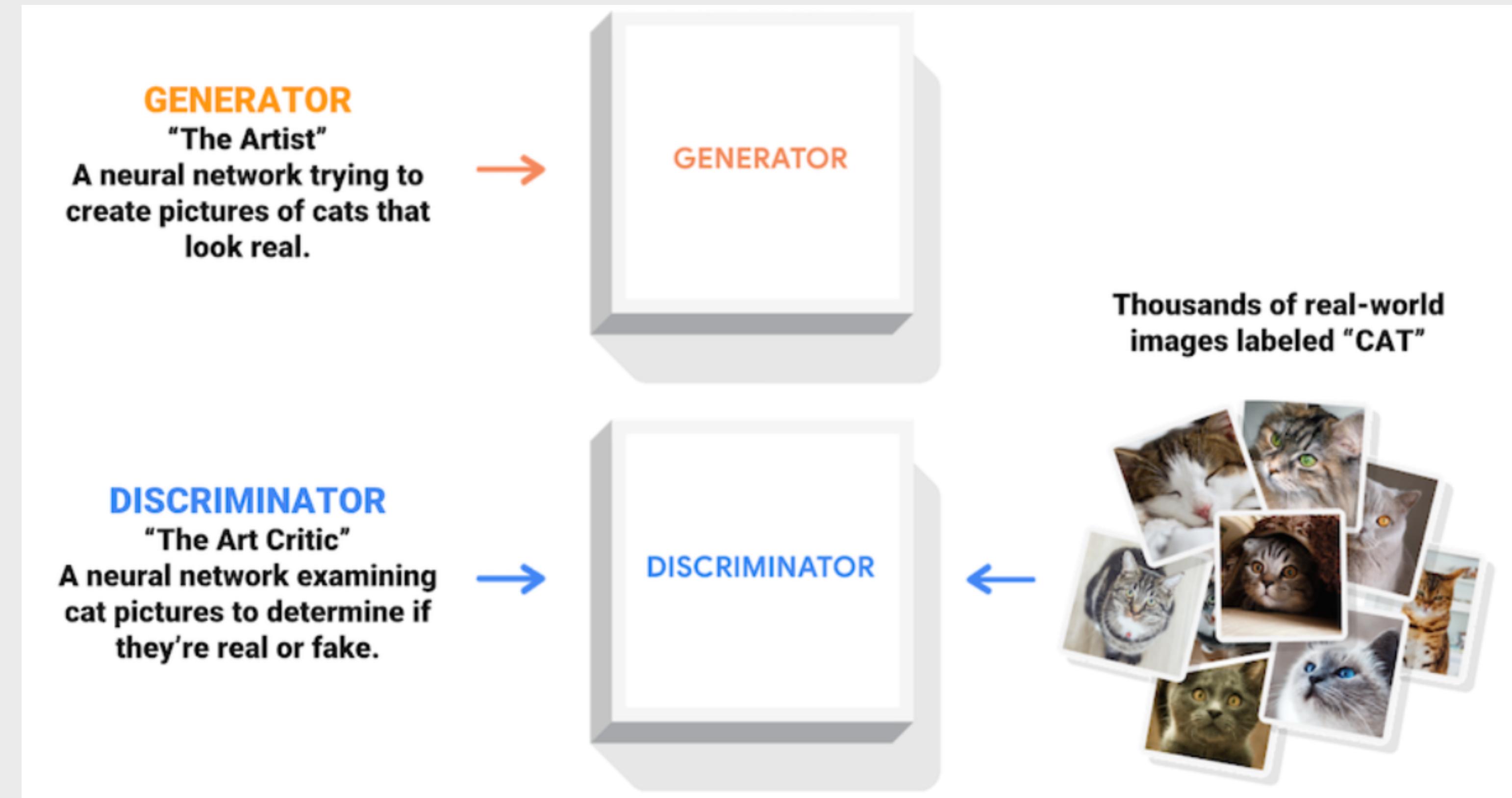


**ETIQUETADA COMO 'B'**

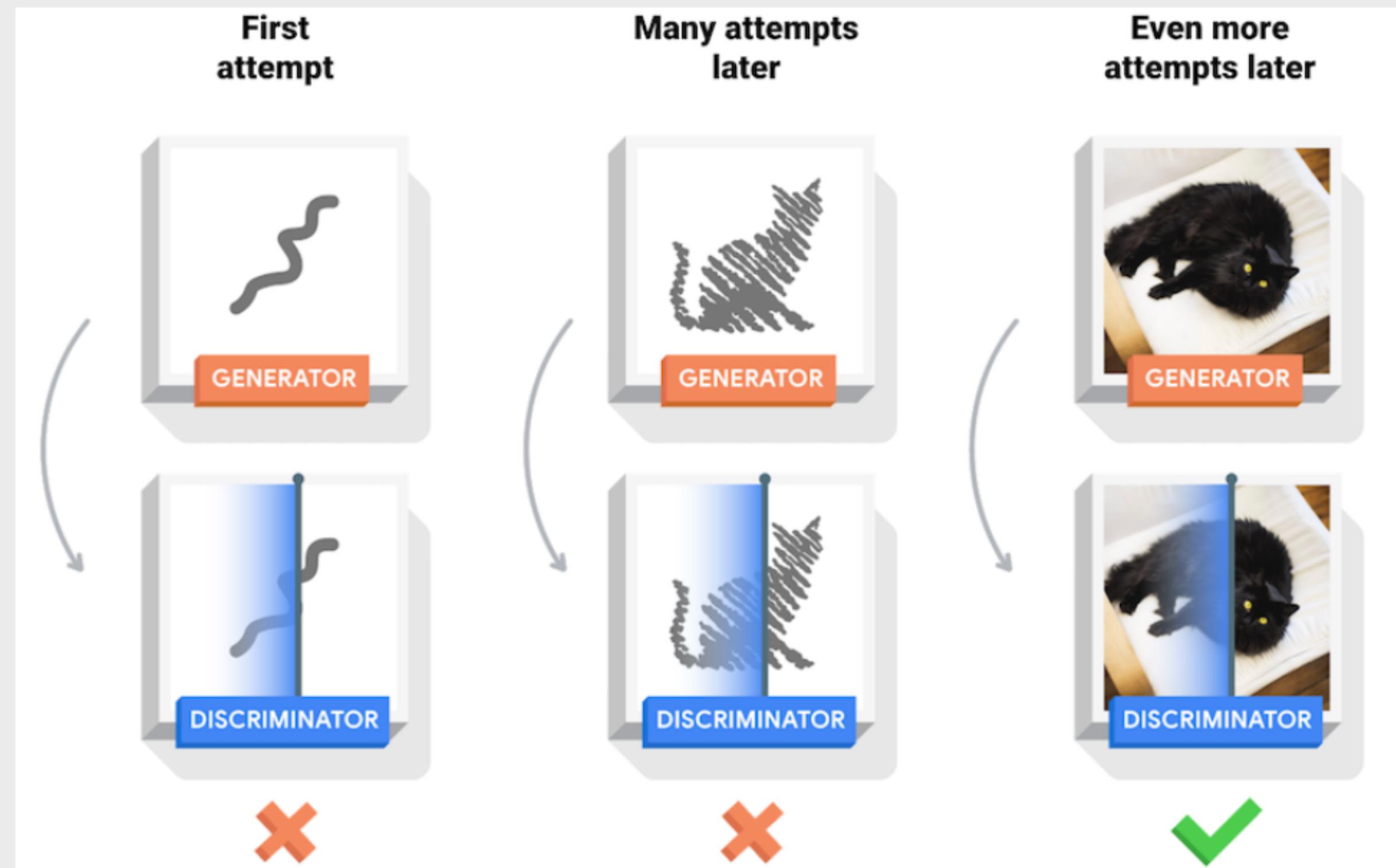
**SE OBTIENEN 237 SEÑALES, DE LAS CUALES 69 ESTÁN ETIQUETADAS COMO 'G'.**

**SE CORTARON LAS SEÑALES PARA OBTENER SEGMENTOS DE 0.6S.**

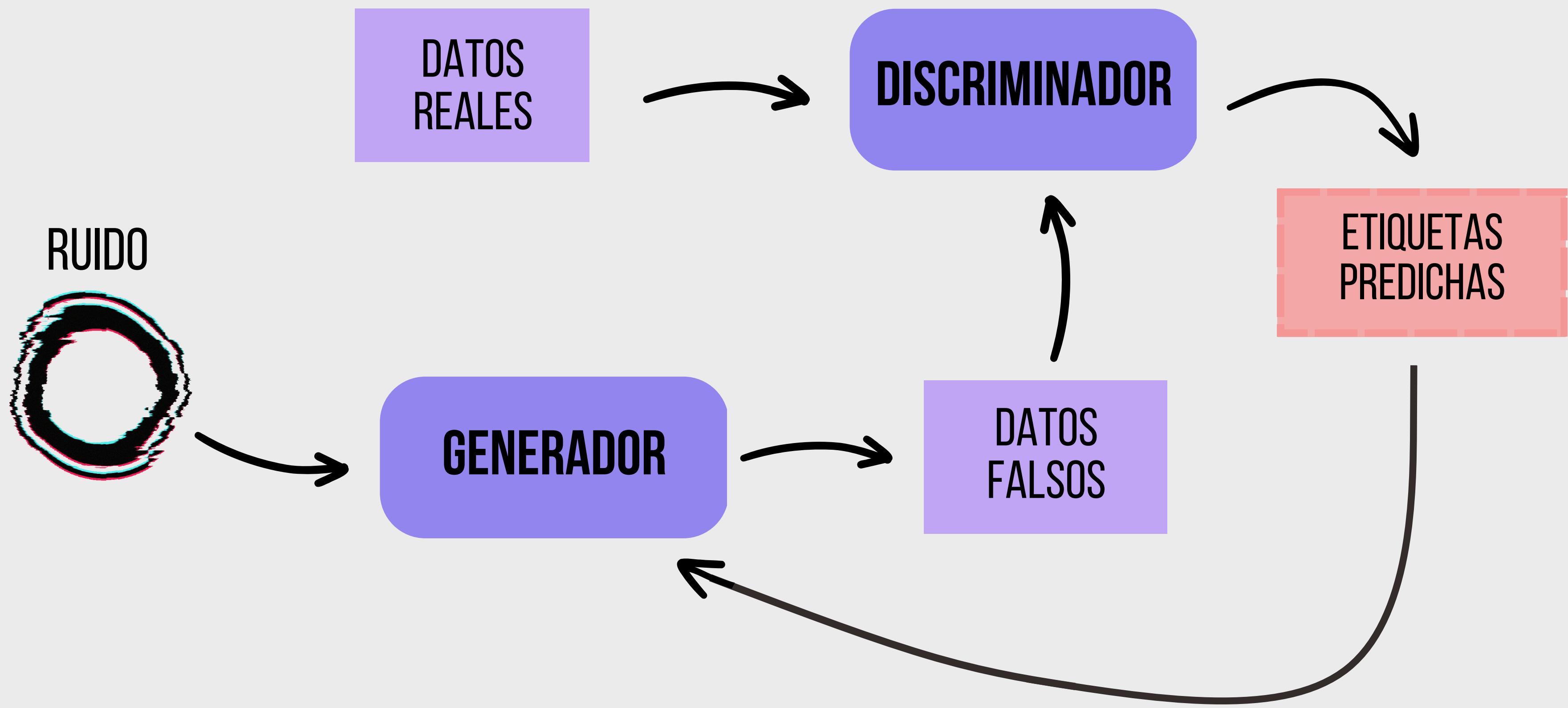
# Redes Generativas Adversarias:



# Redes Generativas Adversarias:

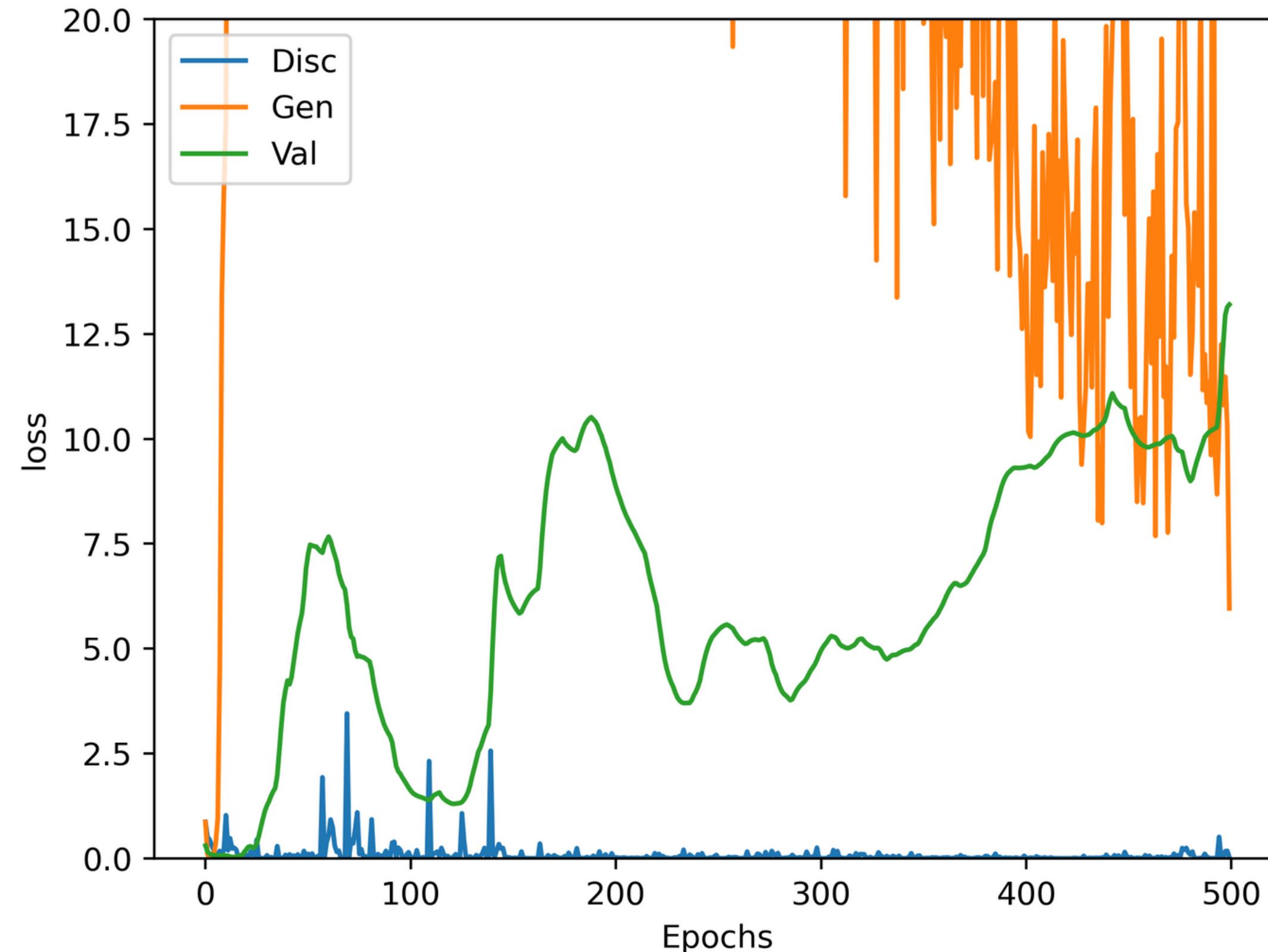


# Estructura y entrenamiento de una GAN:



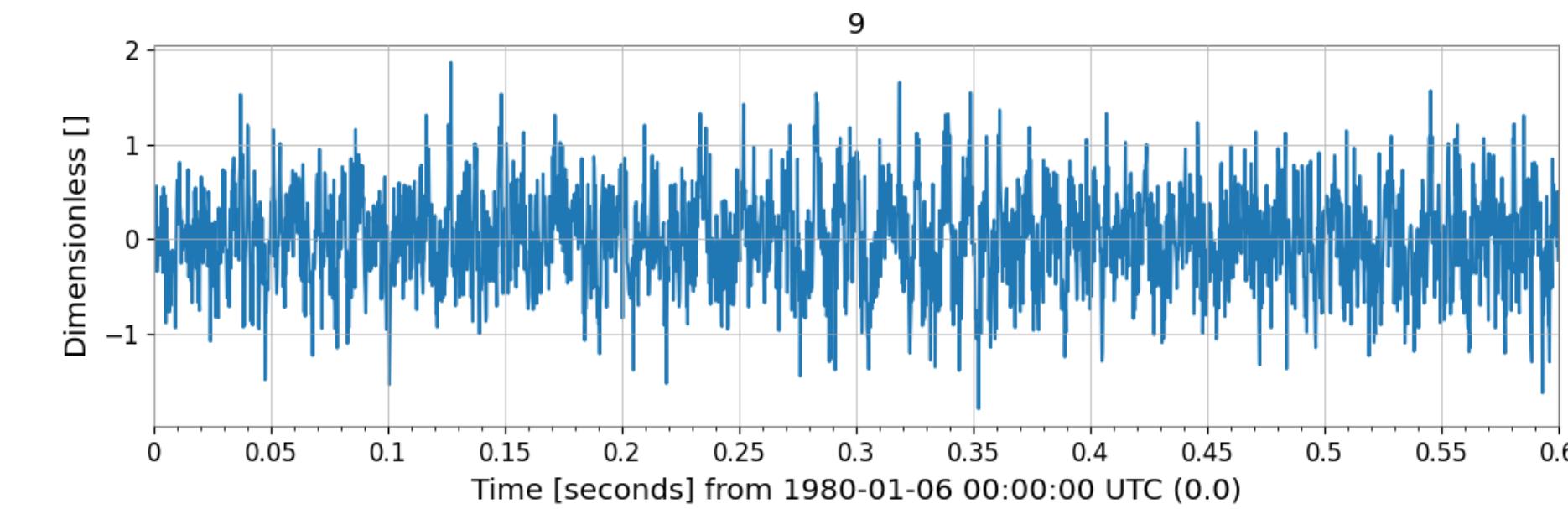
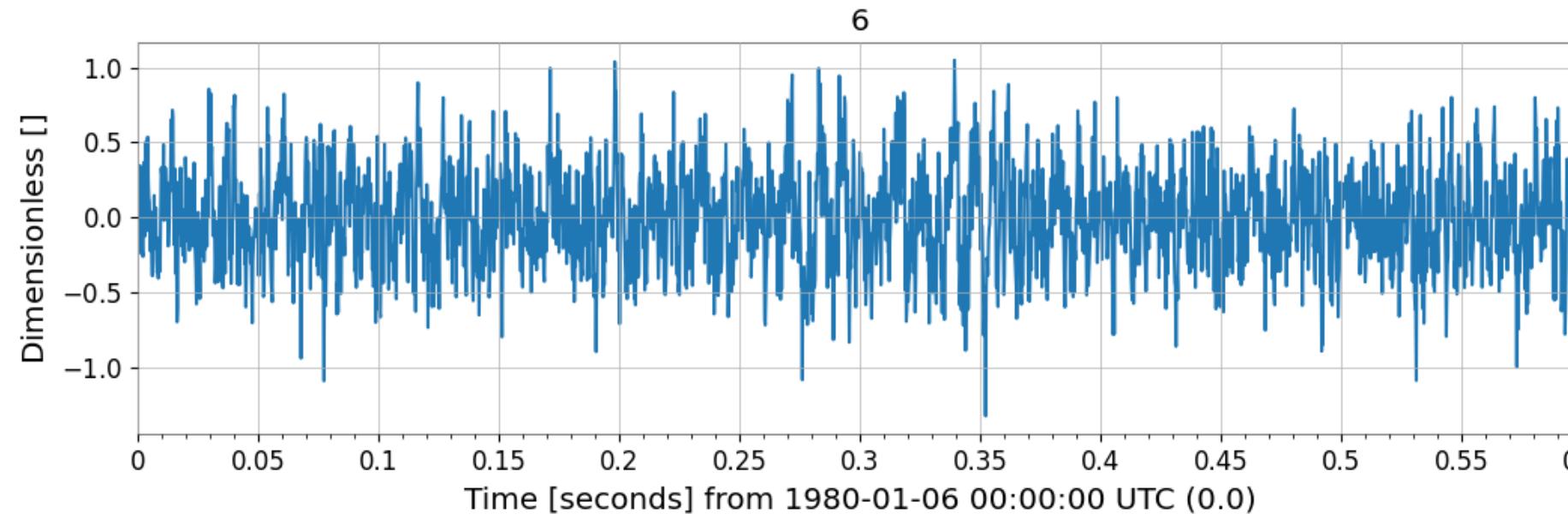
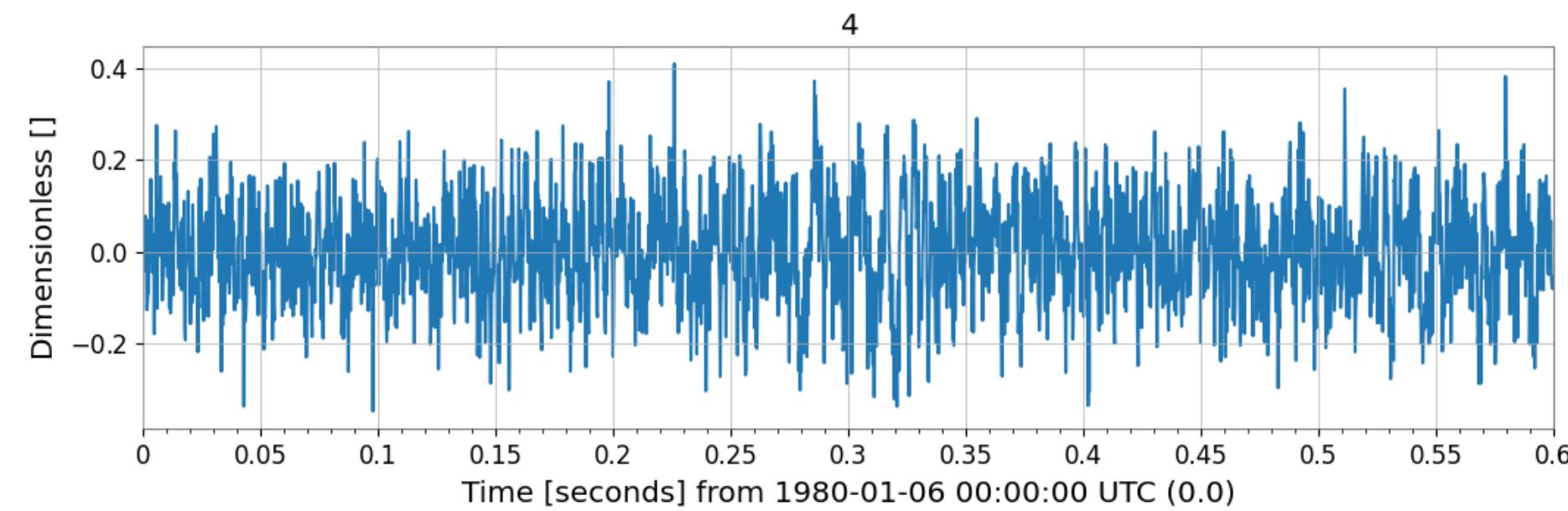
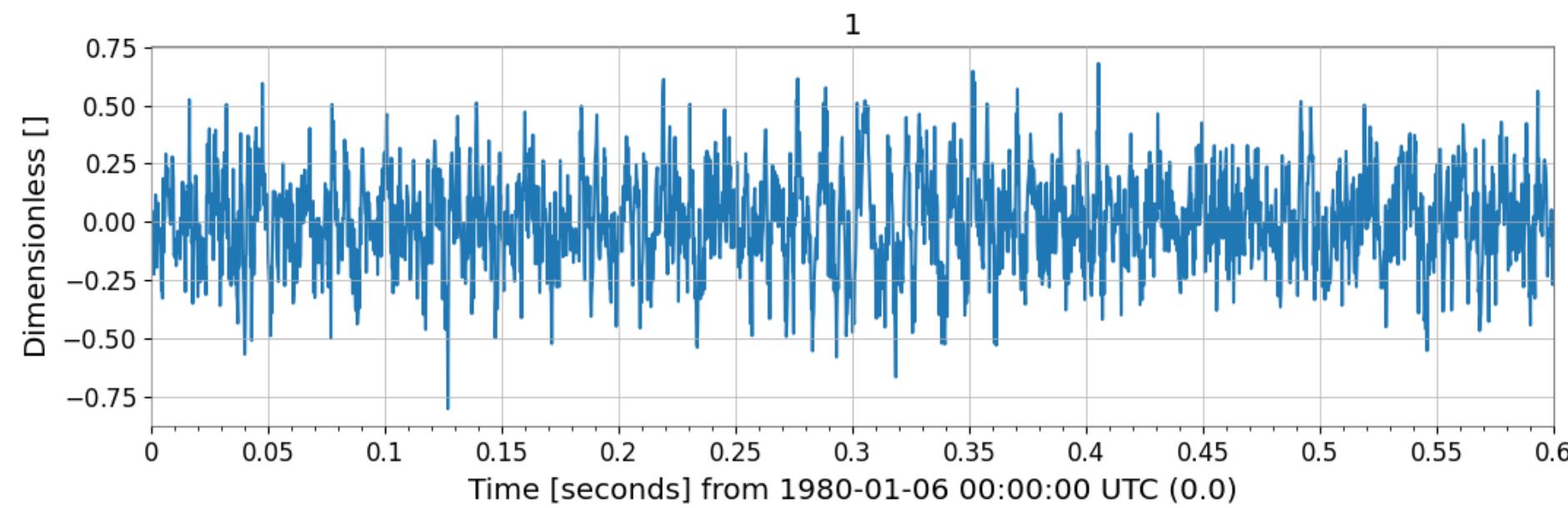
# Resultados

## G-DENSE



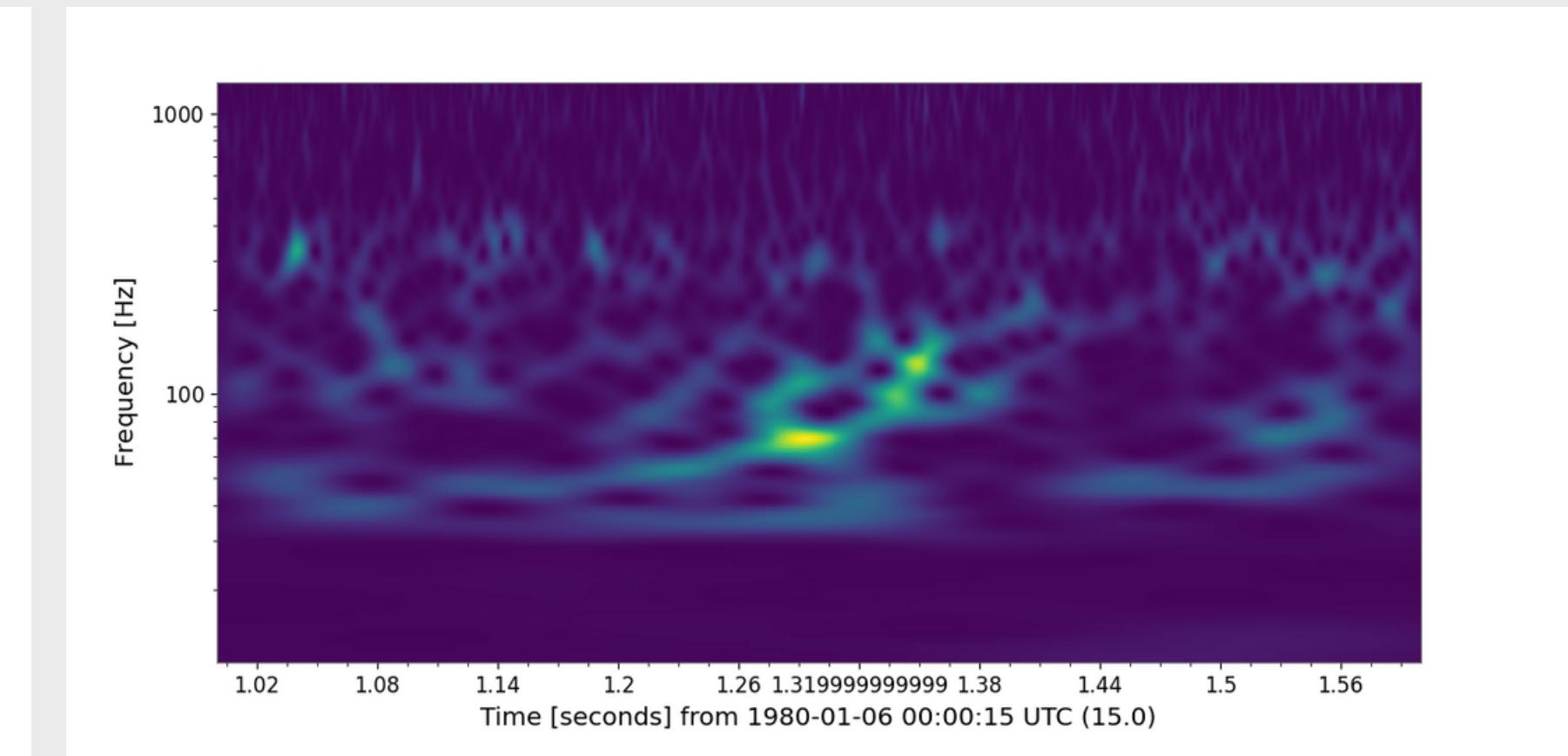
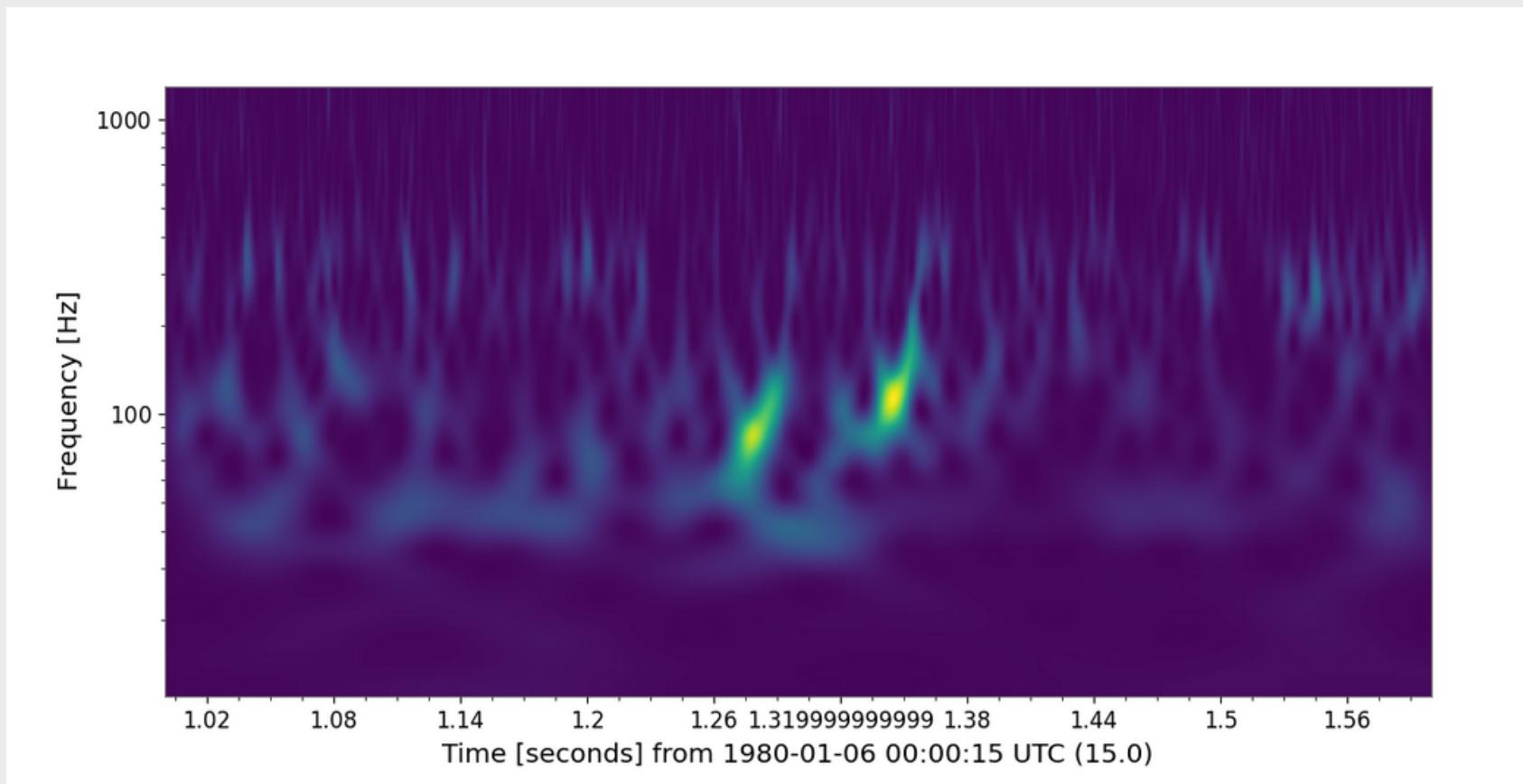
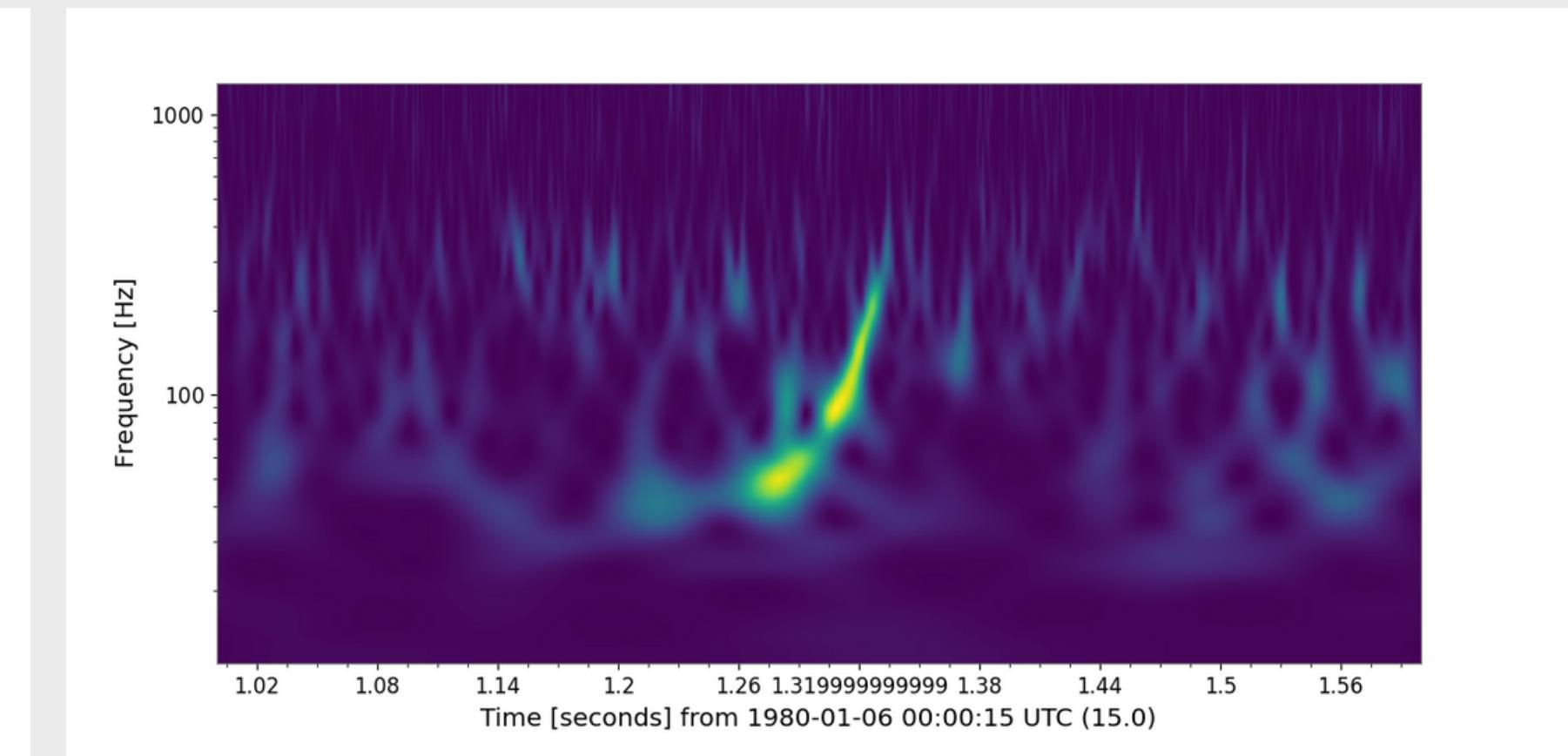
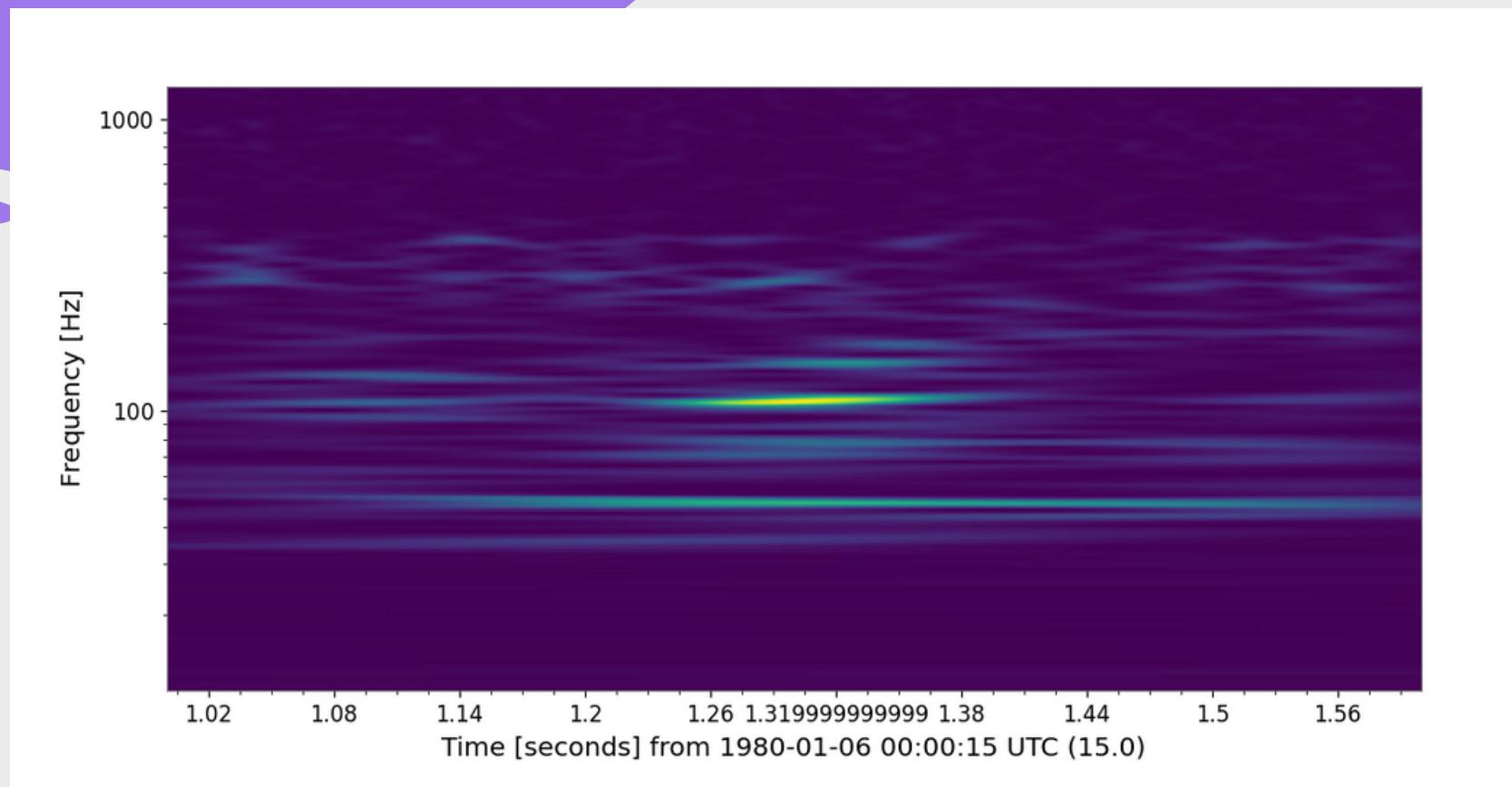
# Resultados

G-DENSE



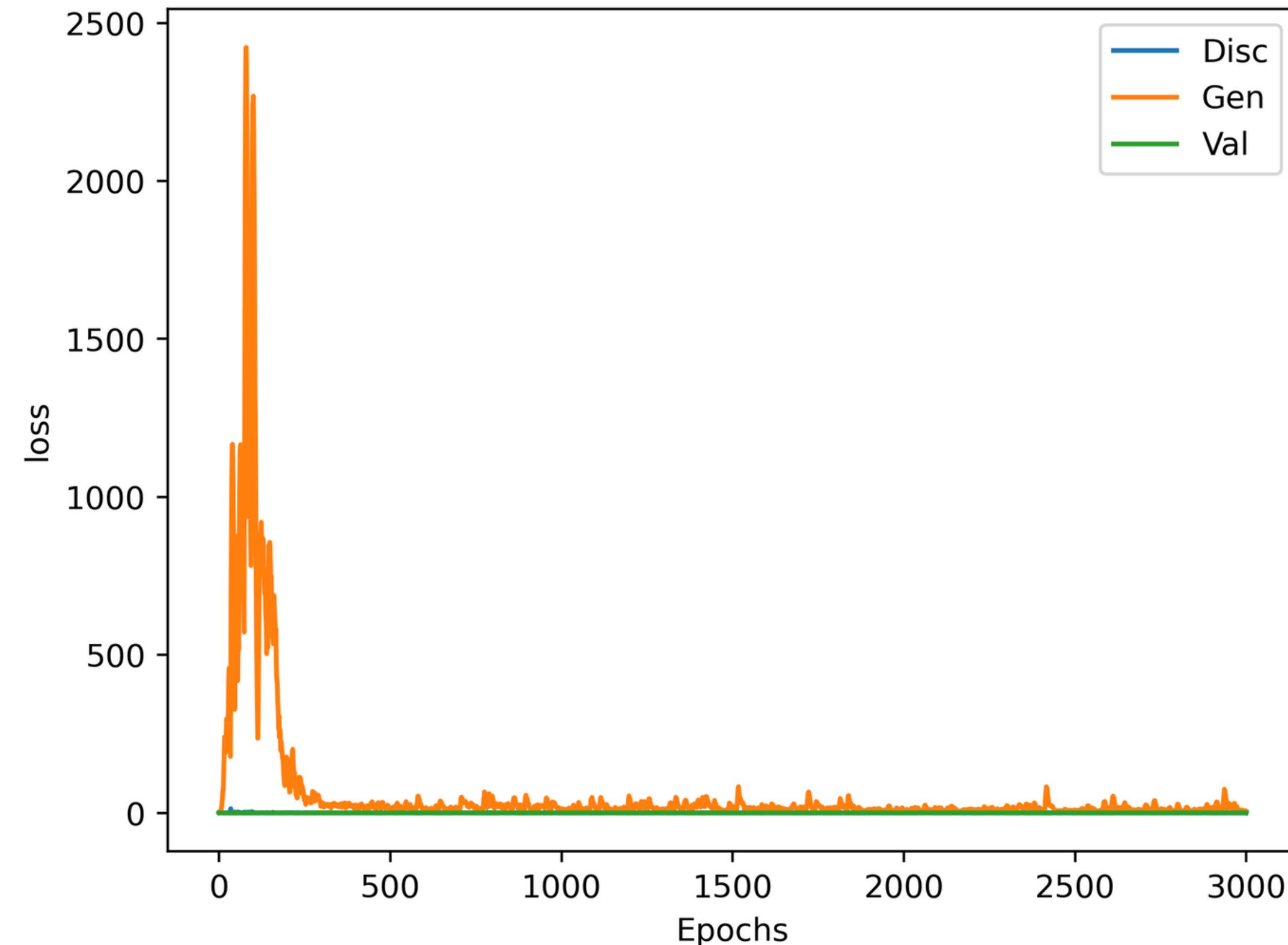
# Resultados

## G-DENSE



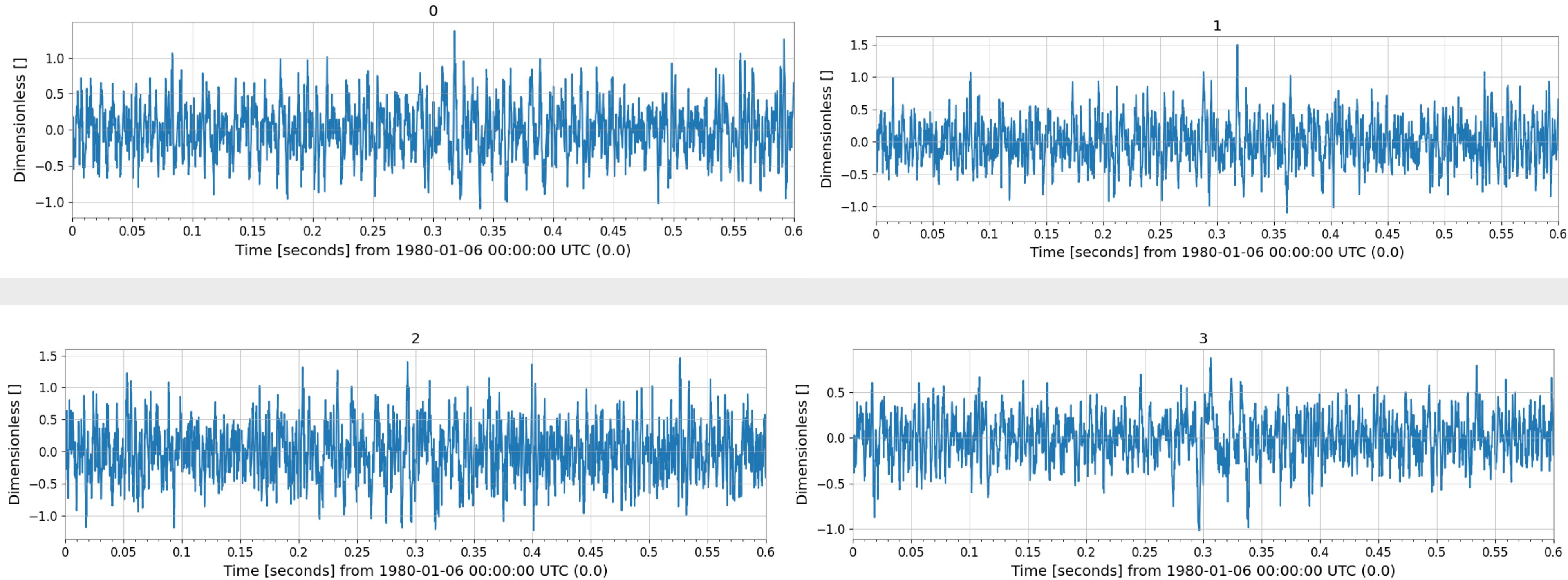
# Resultados

ALL-DENSE



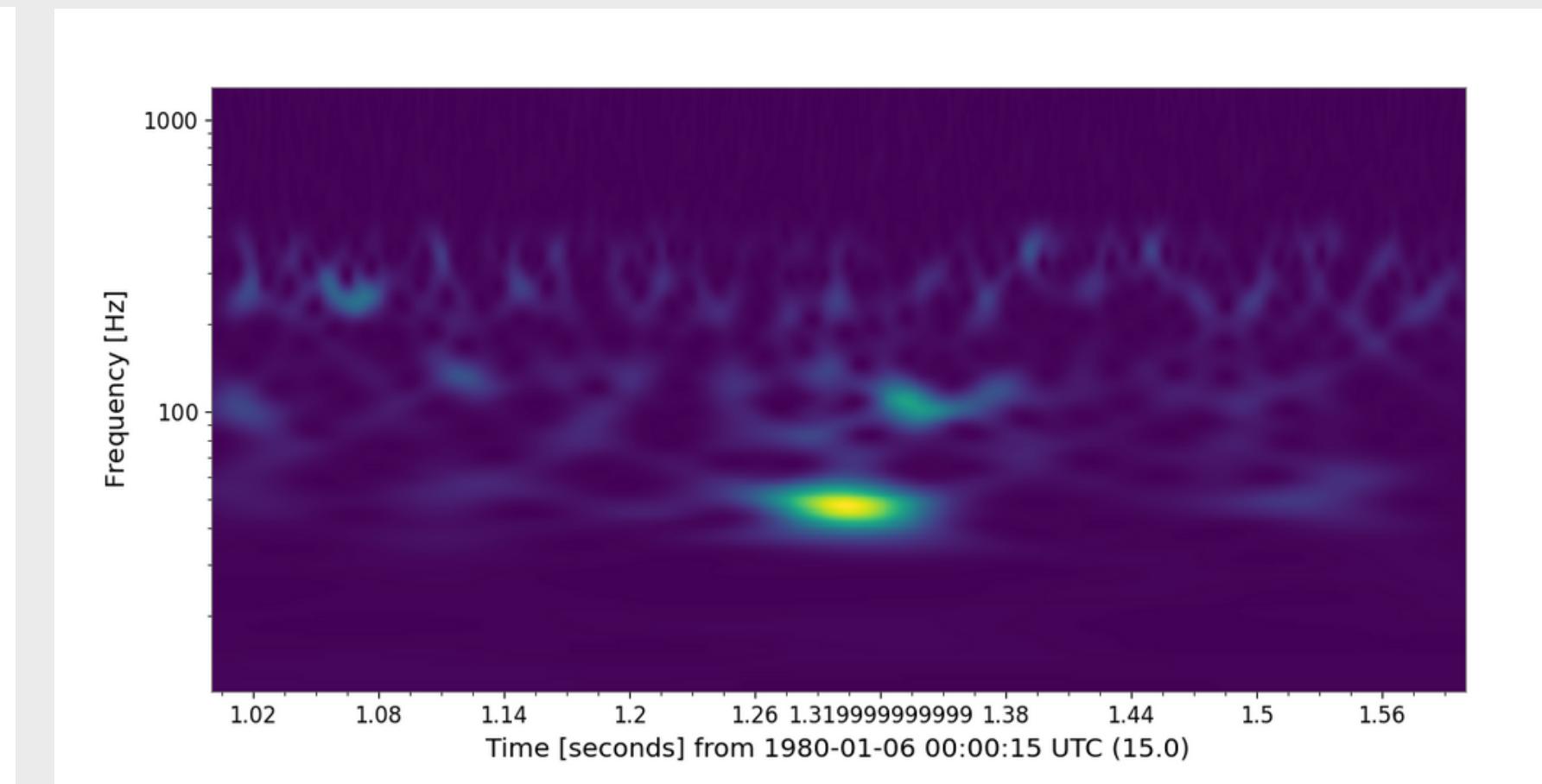
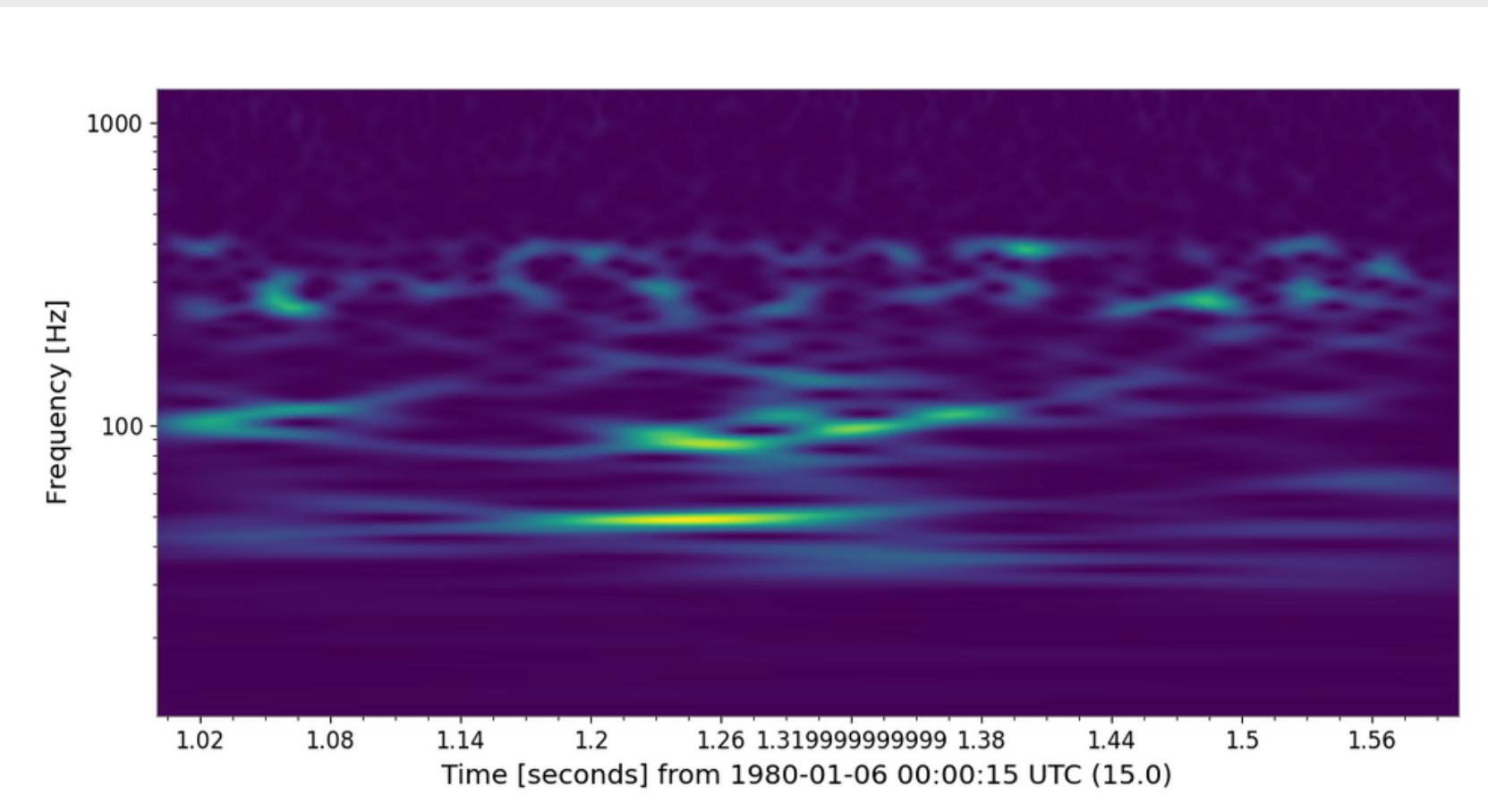
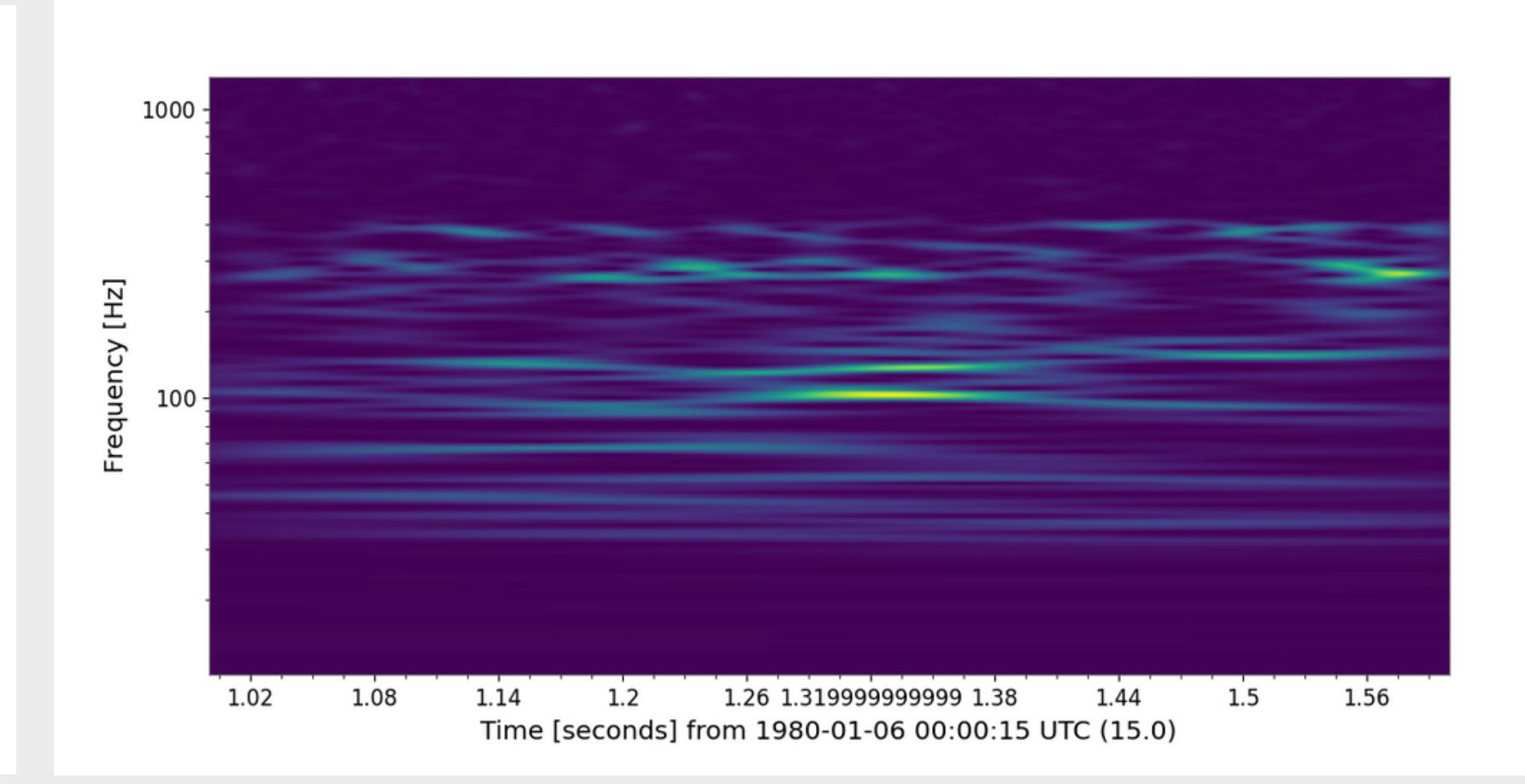
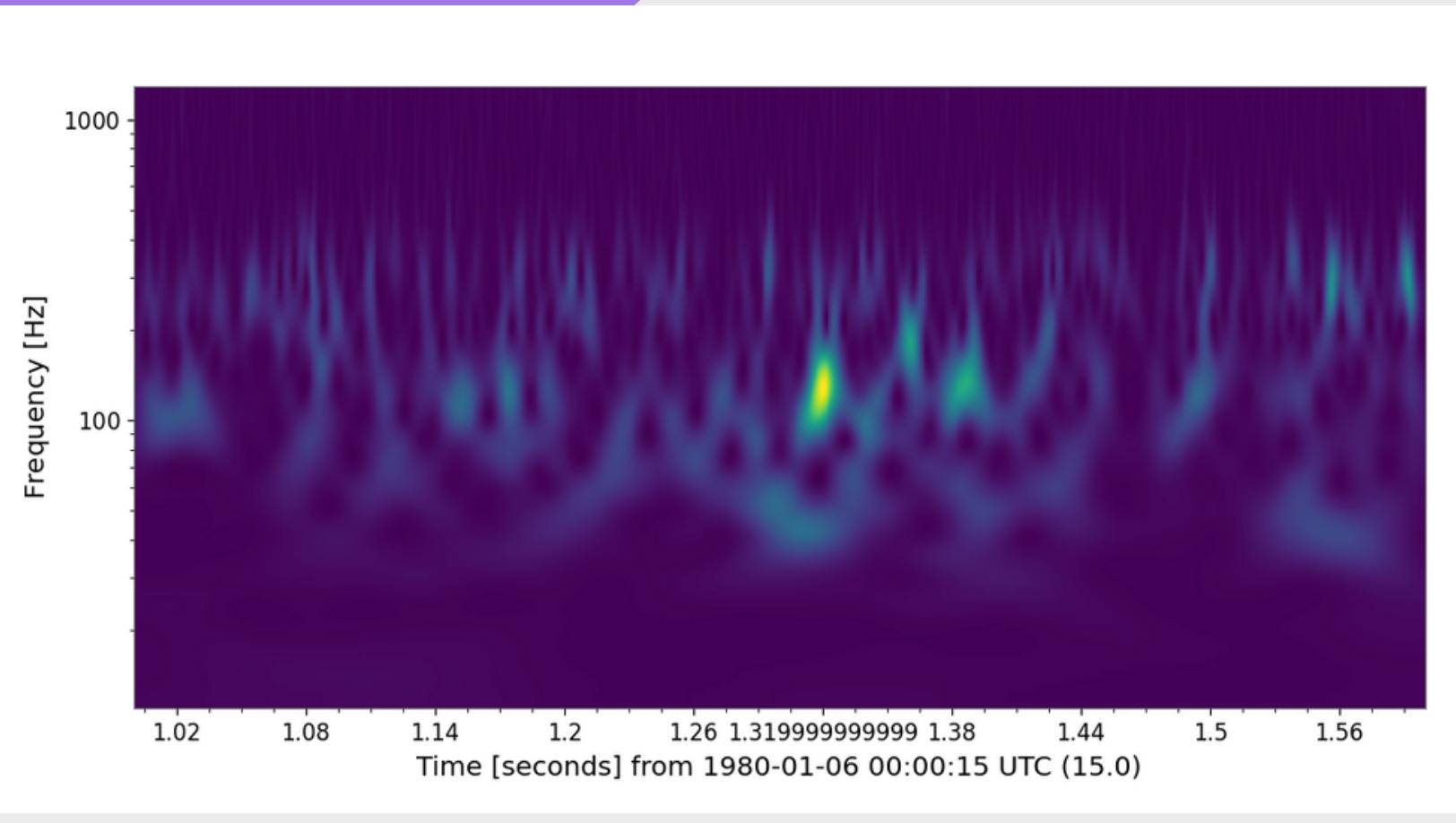
# Resultados

**ALL-DENSE**



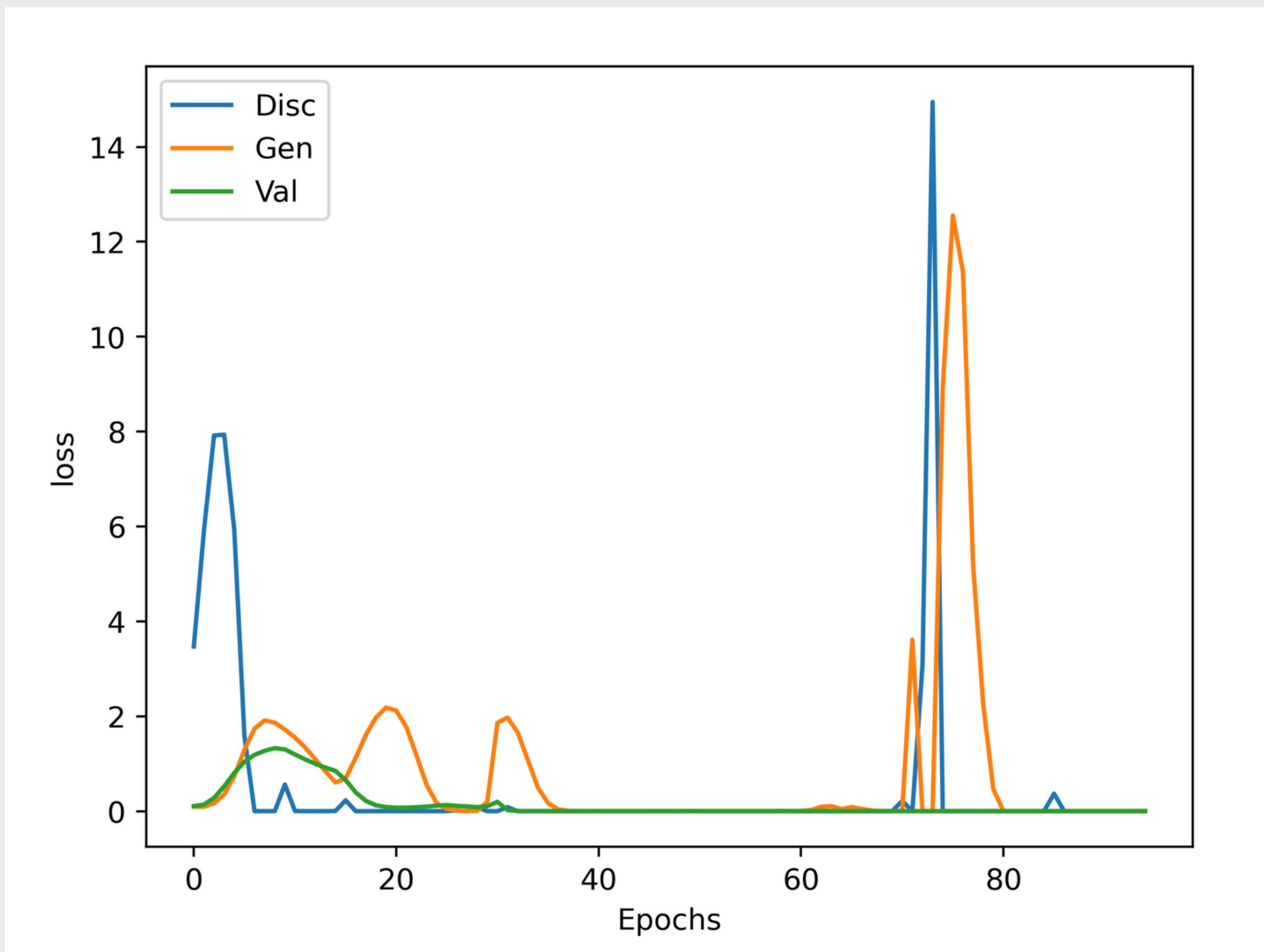
# Resultados

## ALL-DENSE



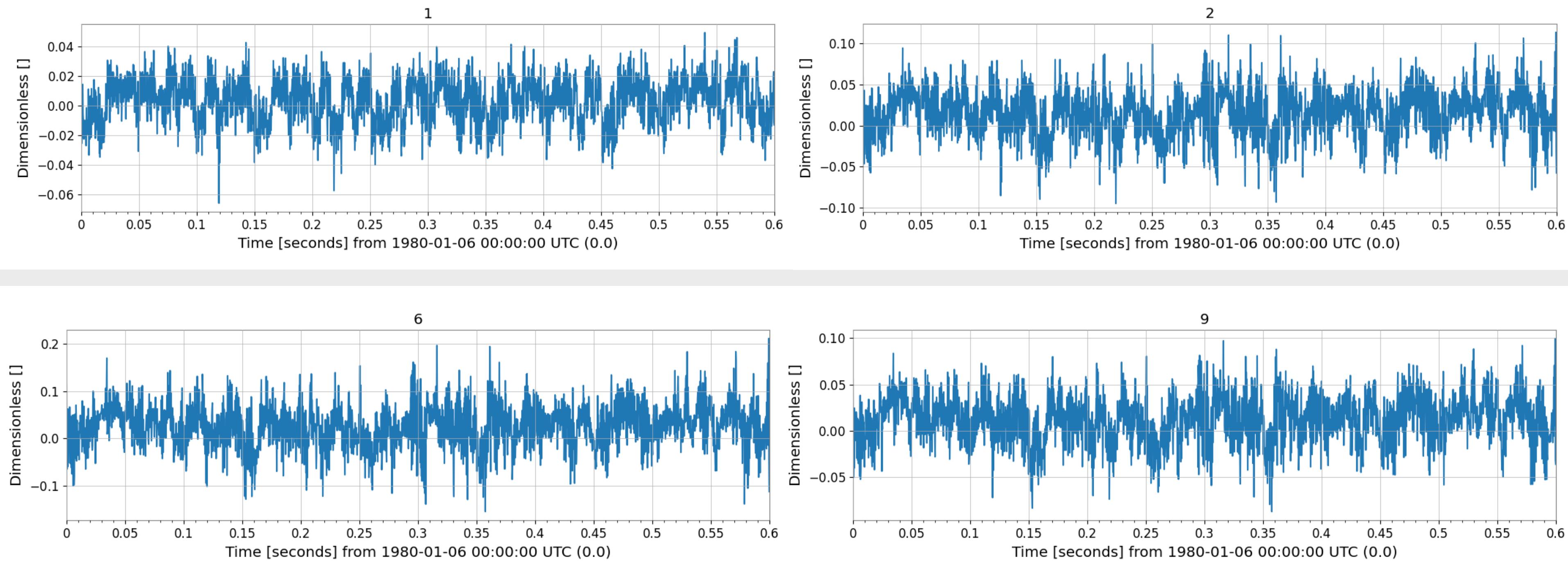
# Resultados

## G-LSTM



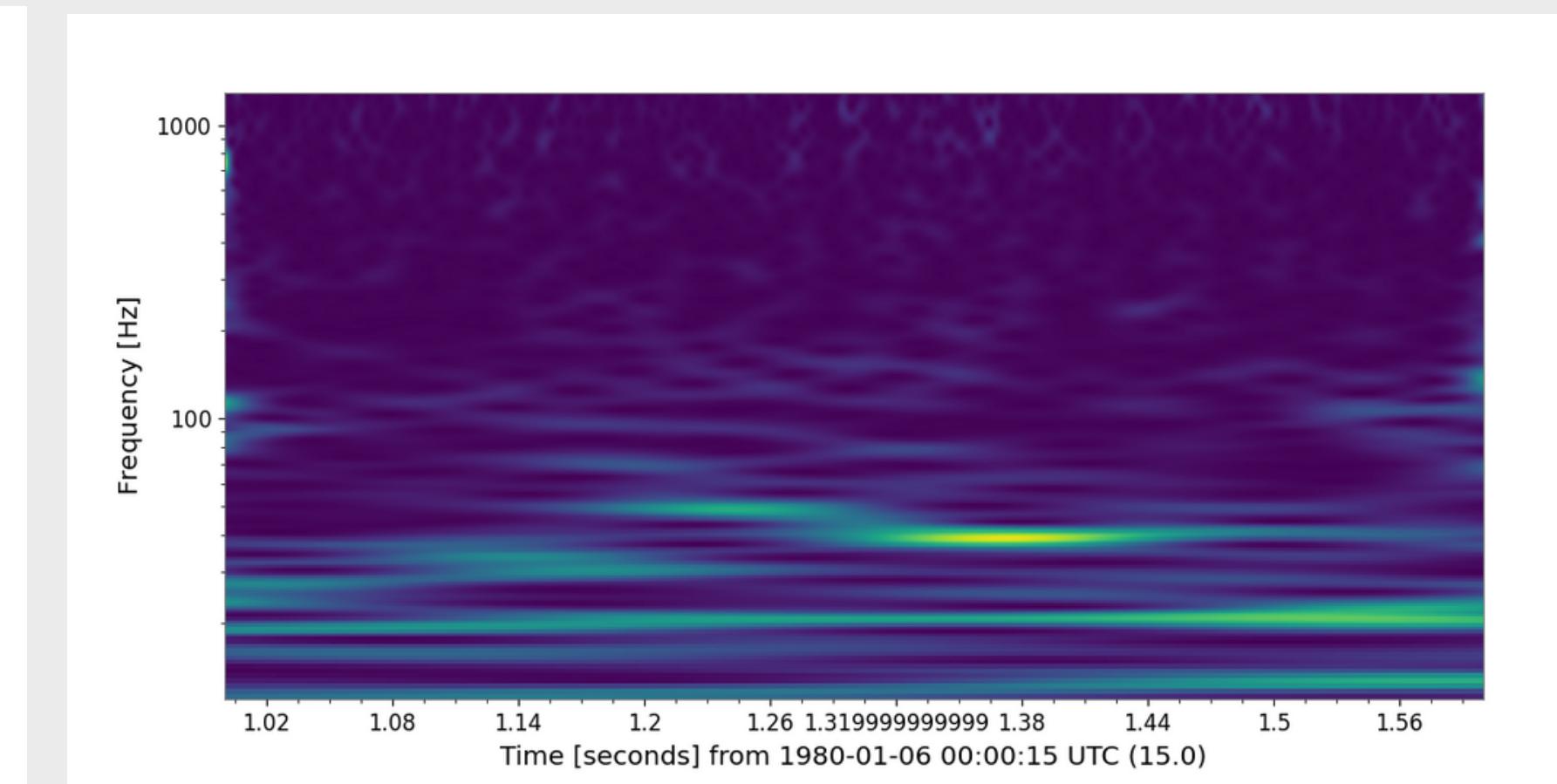
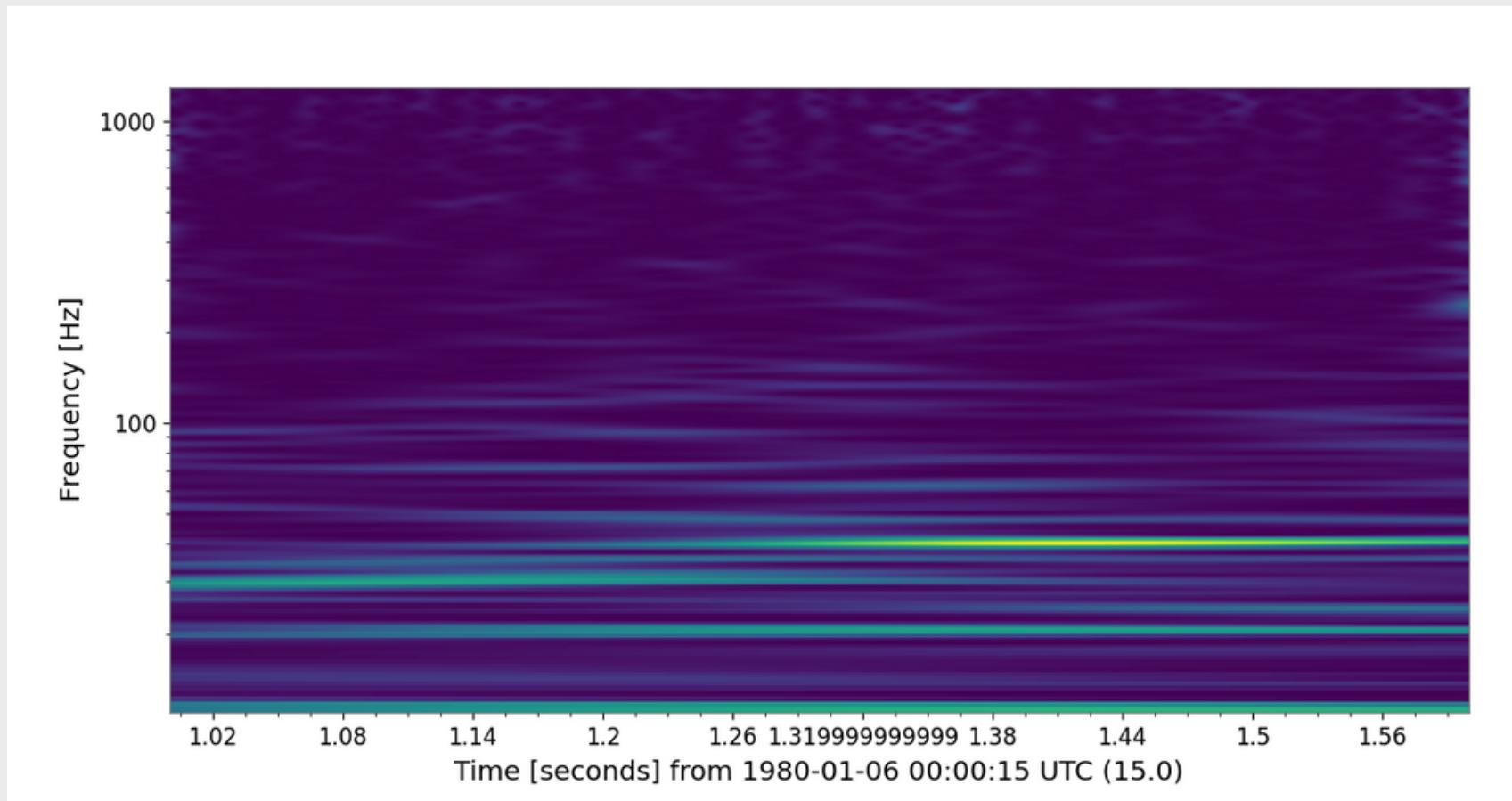
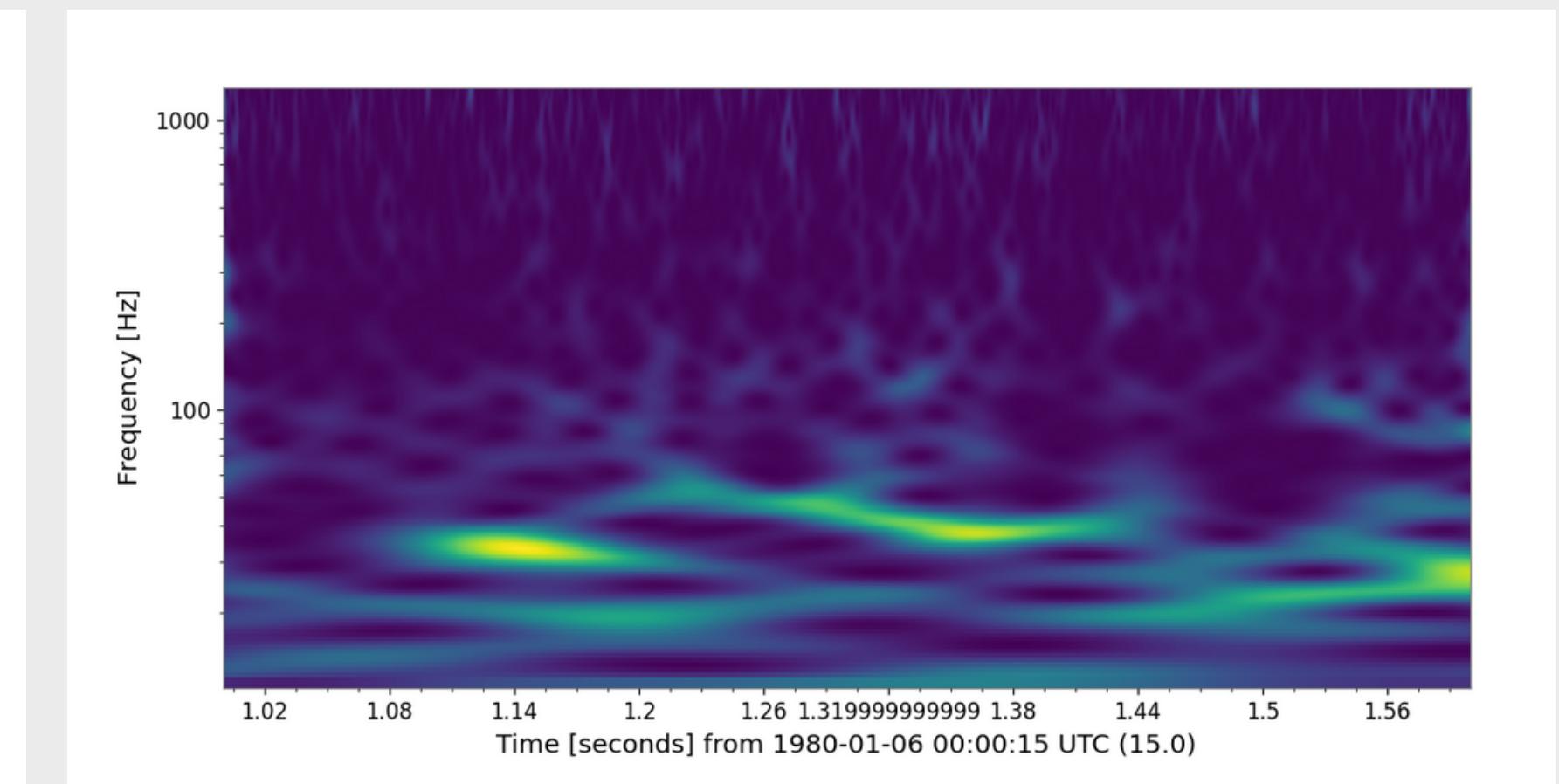
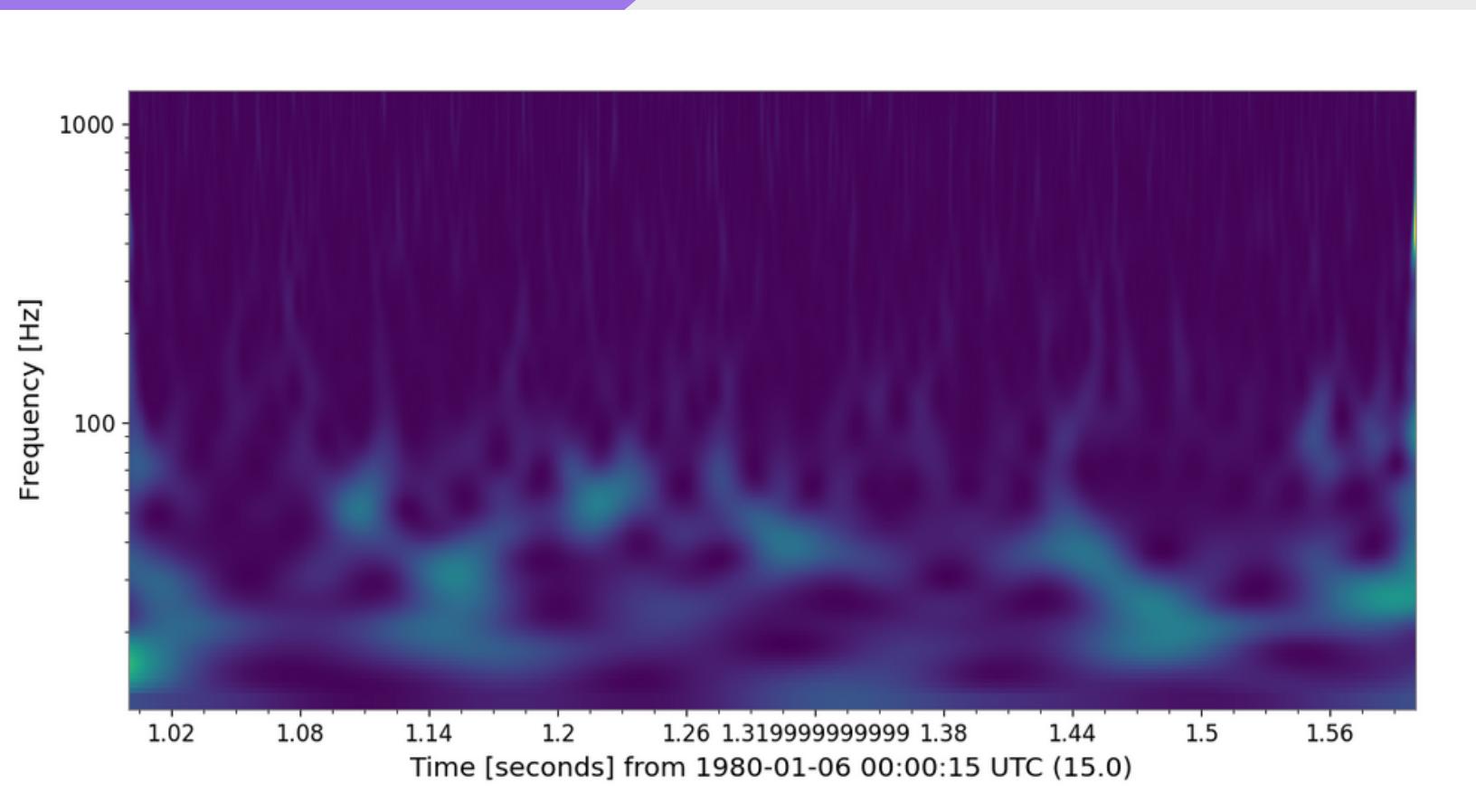
# Resultados

G-LSTM



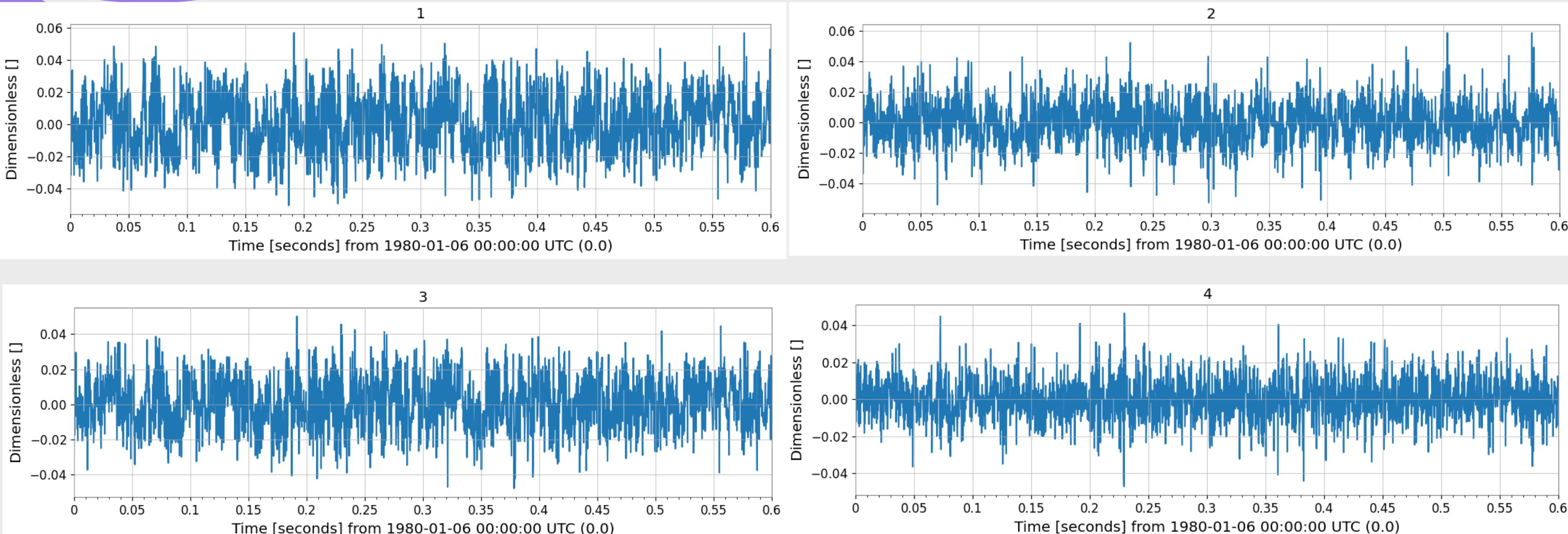
# Resultados

## G-LSTM



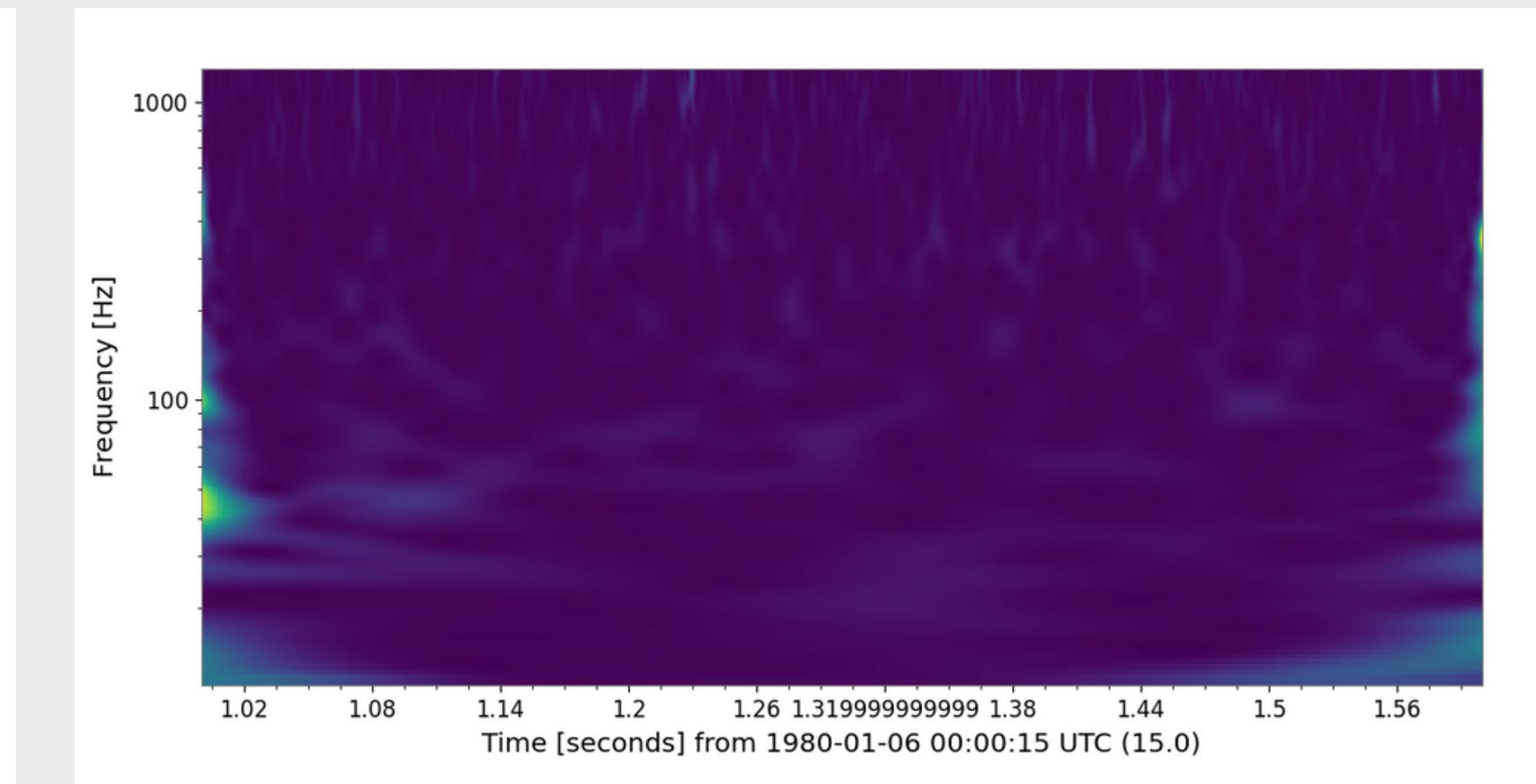
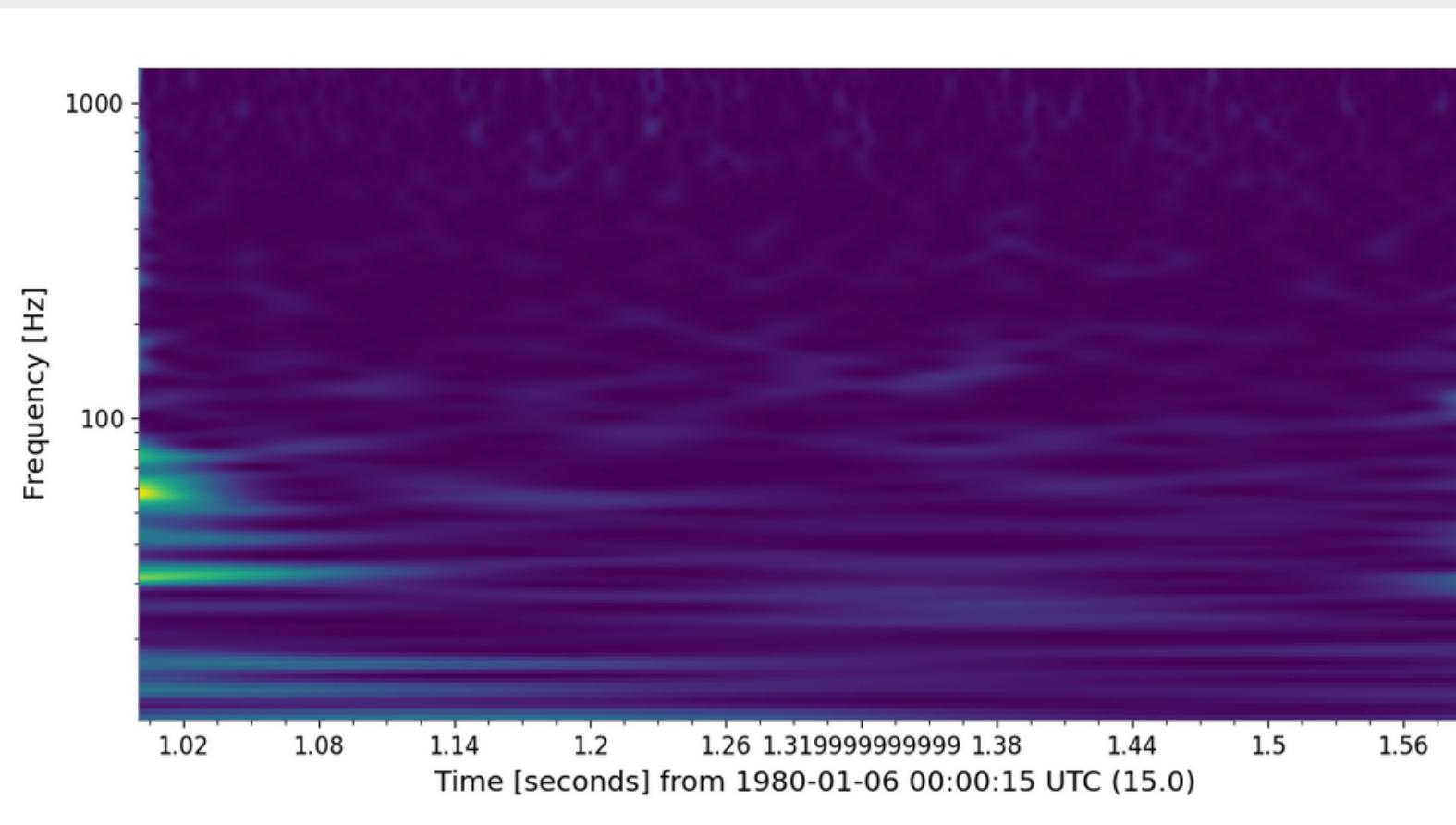
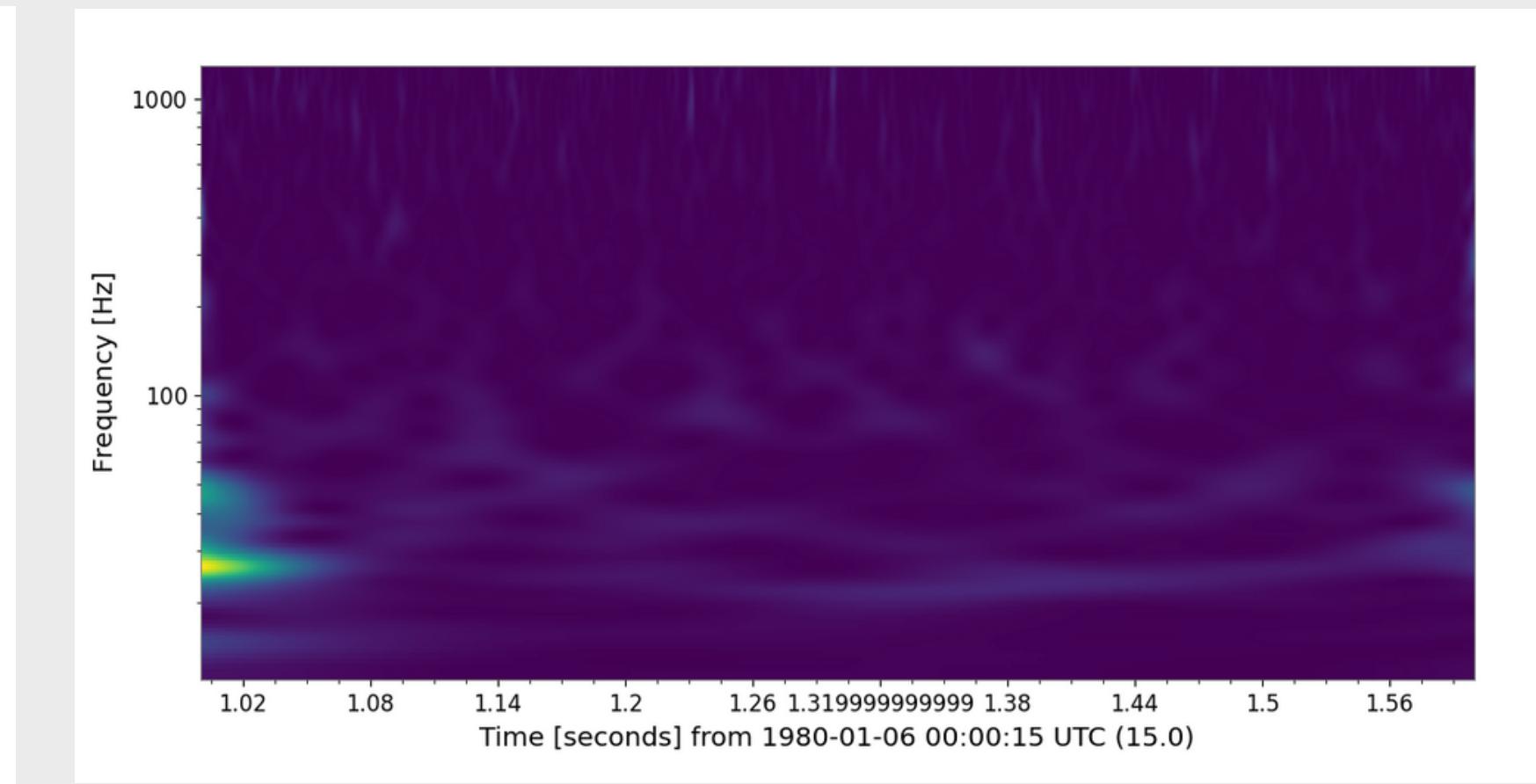
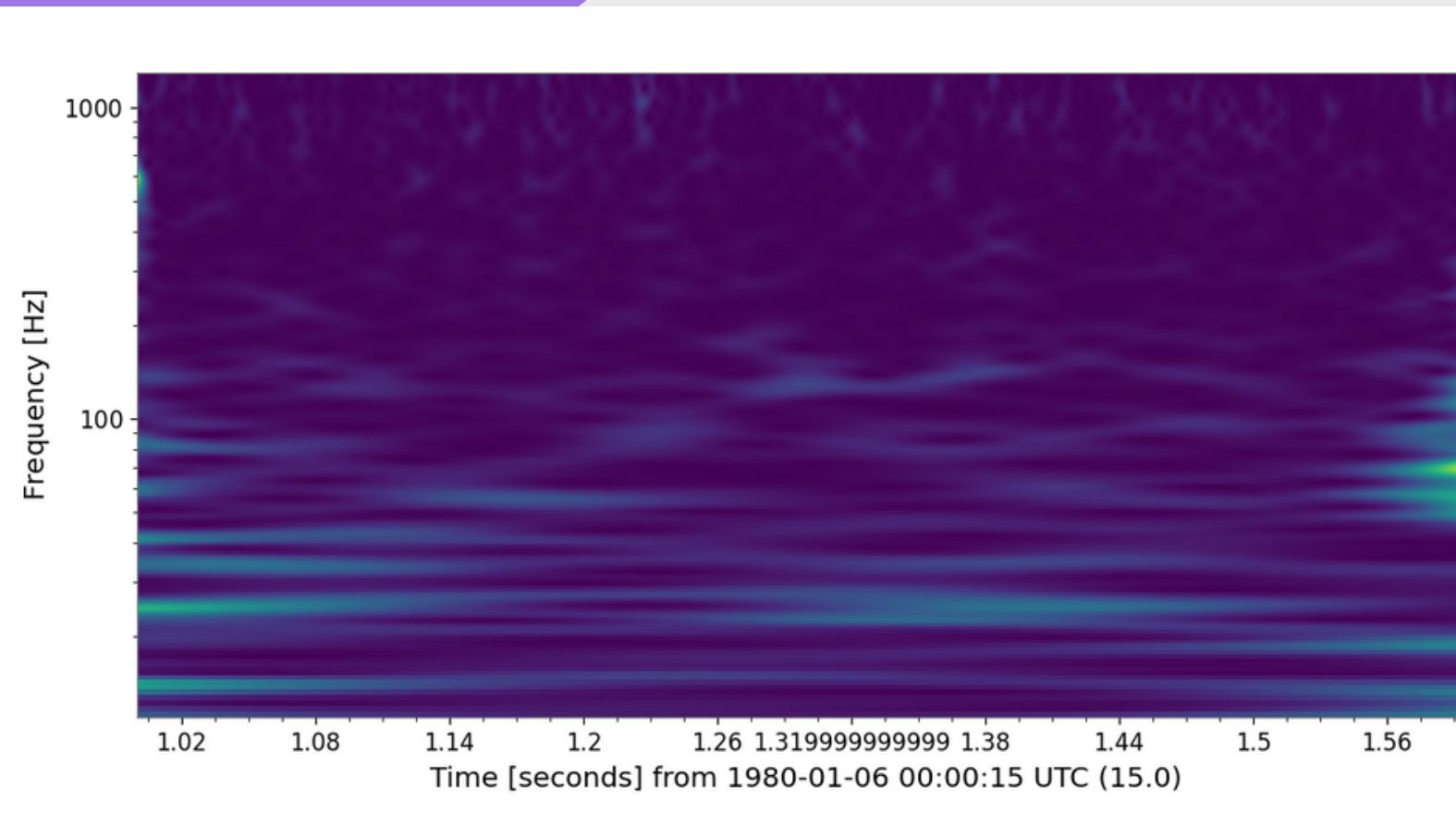
# Resultados

## ALL-LSTM



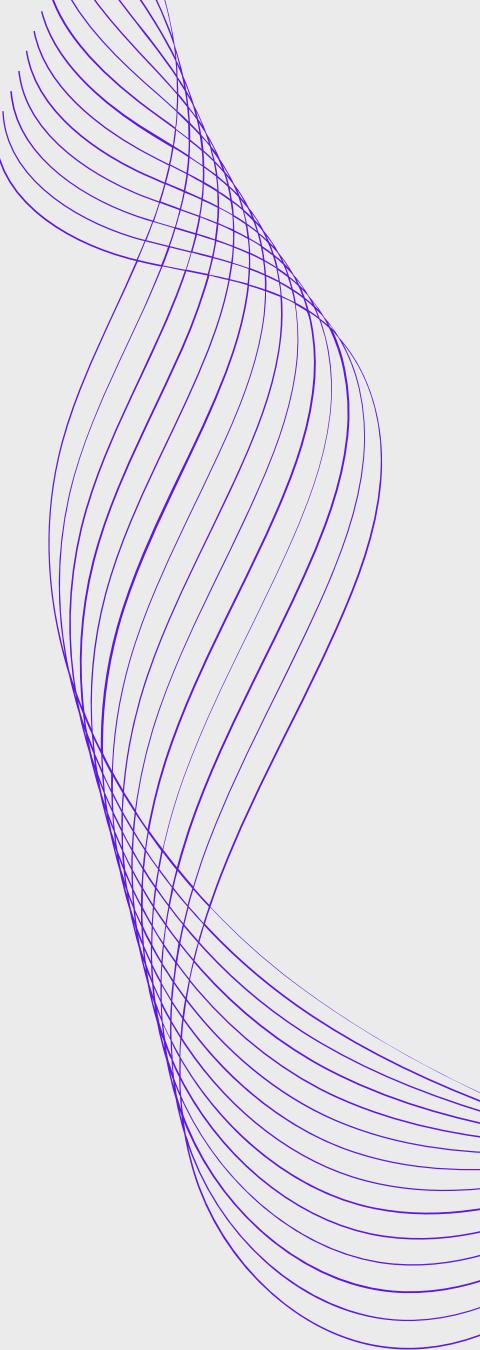
# Resultados

## ALL-LSTM



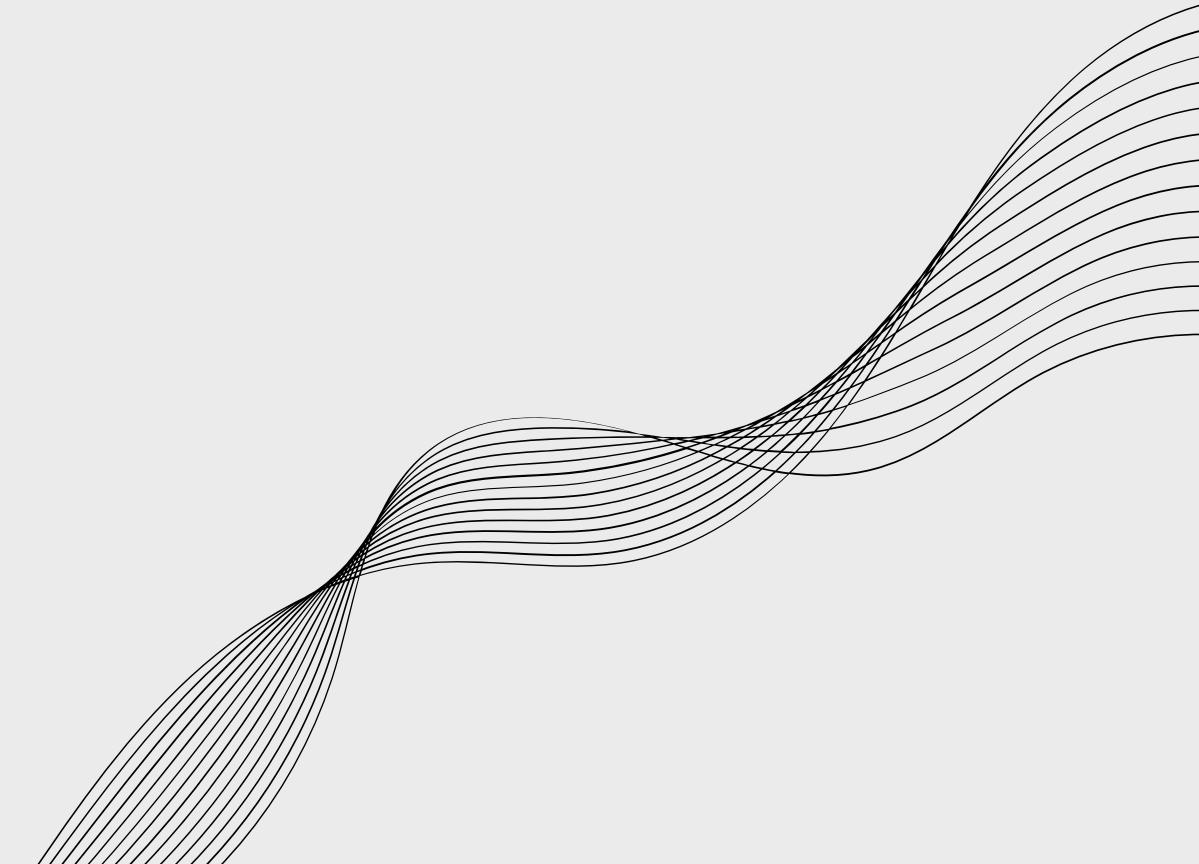
# Discusión:

- Los modelos con capas densas producen resultados mejores
- El modelo G-Dense cuenta con sobreajuste en el discriminador
- La función de pérdida puede haberse escogido mal
- El gran tamaño de los modelos y la poca cantidad de datos hace difícil la convergencia
- La convergencia de las GAN's es momentánea, no estable



# To be continued...

- Se pueden implementar estructuras diferentes, más simples o más complejas, para el Discriminador y el Generador
- Se podrían escalar los datos a un rango de [-1,1]
- Ajustar la forma del entrenamiento
  - Etiquetas ruidosas
  - Datos ruidosos
  - Intercambiar etiquetas



**¡Gracias! :)**