

Los sonidos voceados son producidos por la modulación de un flujo de aire por vibración de las cuerdas vocales.

Modelos de vocalización suelen asumir la presencia de dos modos espaciales predominantes, cuya dinámica es rígida por un oscilador de relajación [1,2].

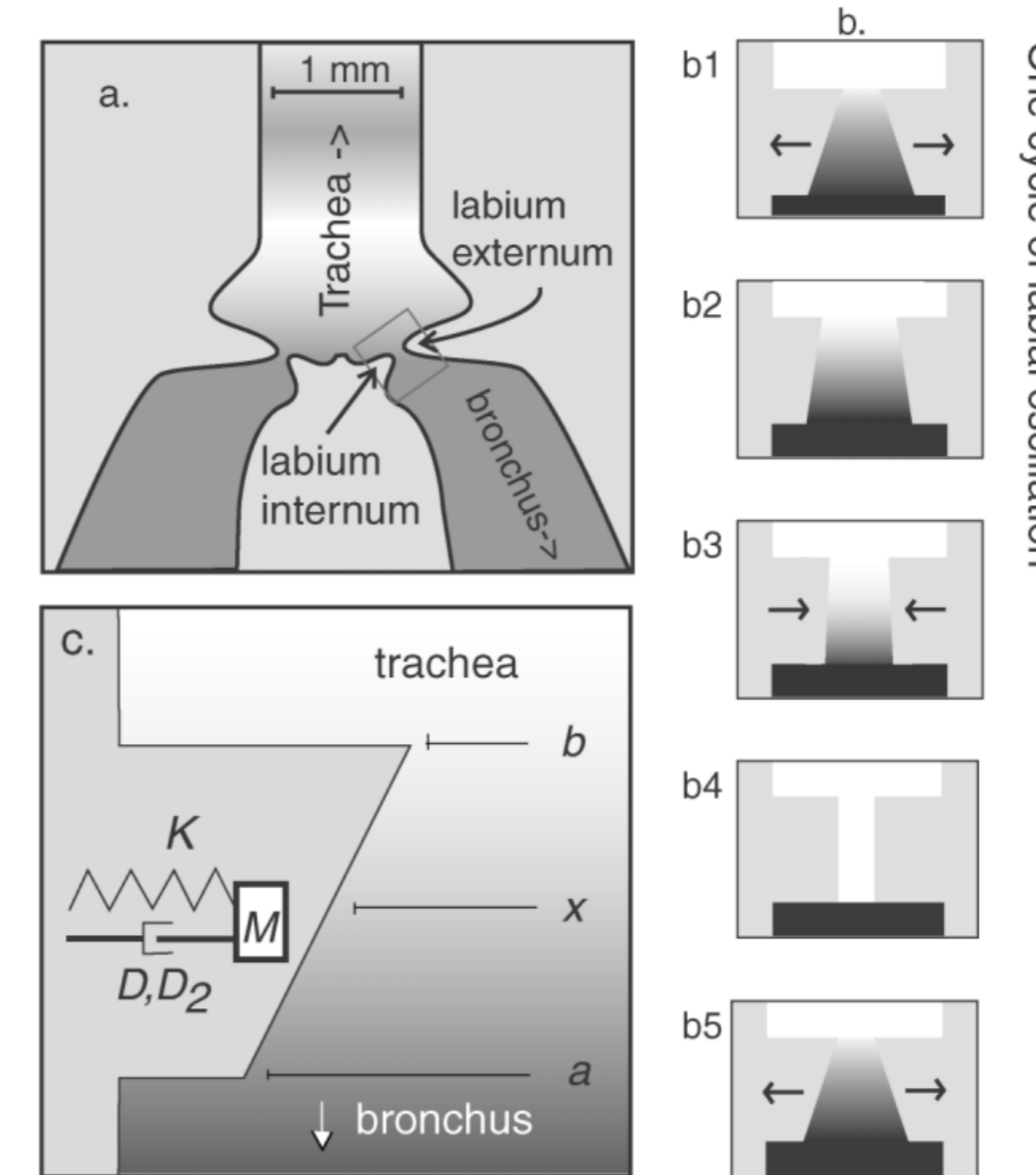
En este trabajo formulamos un modelo continuo de la dinámica de una membrana ante un flujo de aire. Buscamos poner a prueba la hipótesis de que surgen dos modos predominantes con perfiles que permiten la transferencia de energía del flujo hacia la membrana.

El problema

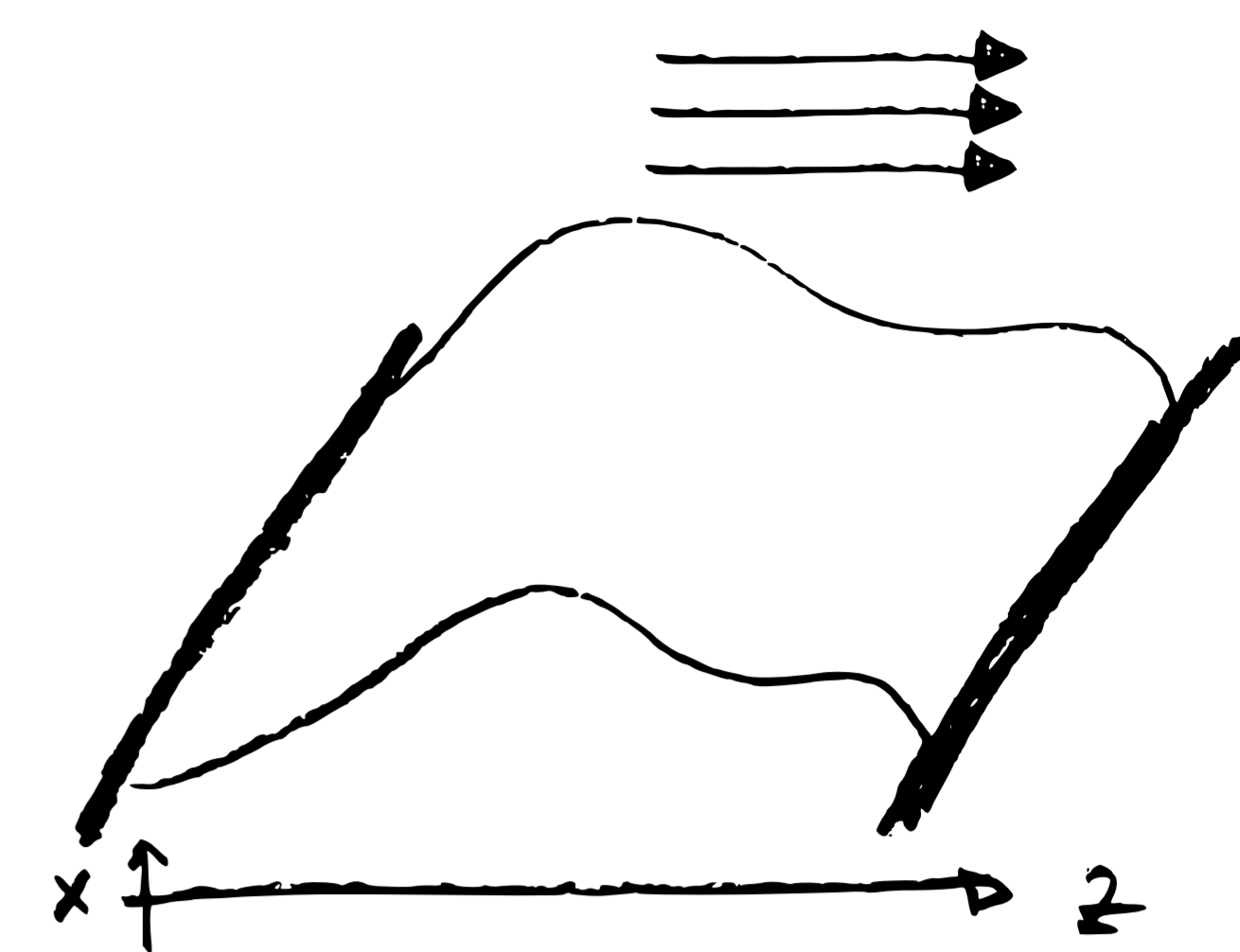
Uno de los modelos más sencillos para dar cuenta de la transferencia de energía cinética del flujo a la membrana fue construido por Titze [1]. Se basa en la observación de que las cuerdas vocales tienen una oscilación lateral en conjunto con una onda superficial que se propaga hacia la traquea.

Asumiendo la presencia de estos dos modos, se han escrito ecuaciones diferenciales para la posición media de la membrana.

En este trabajo buscamos escribir un modelo para la membrana completa, no para la posición media. Evaluaremos si convergemos a dos modos y si la dinámica de las posiciones medias es similar a la propuesta por los modelos previos.



Reproducido con permiso de [2]



El problema que consideramos: Una membrana con simetría en un eje. Extremos fijos y el flujo de aire.

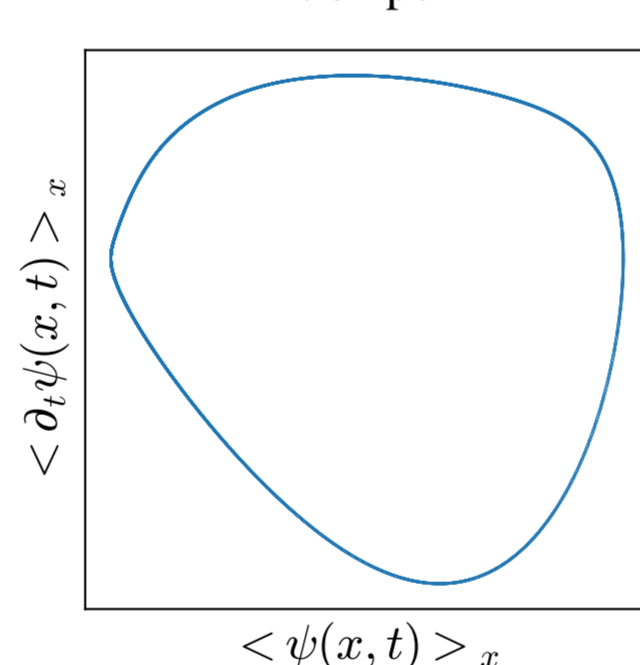
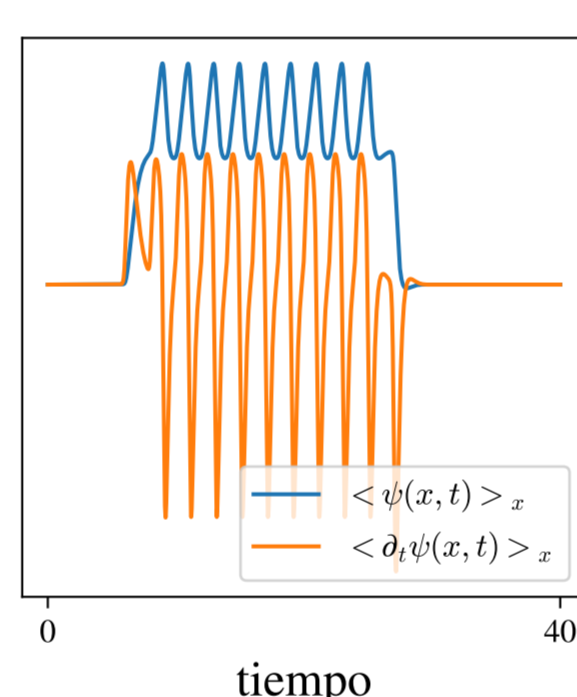
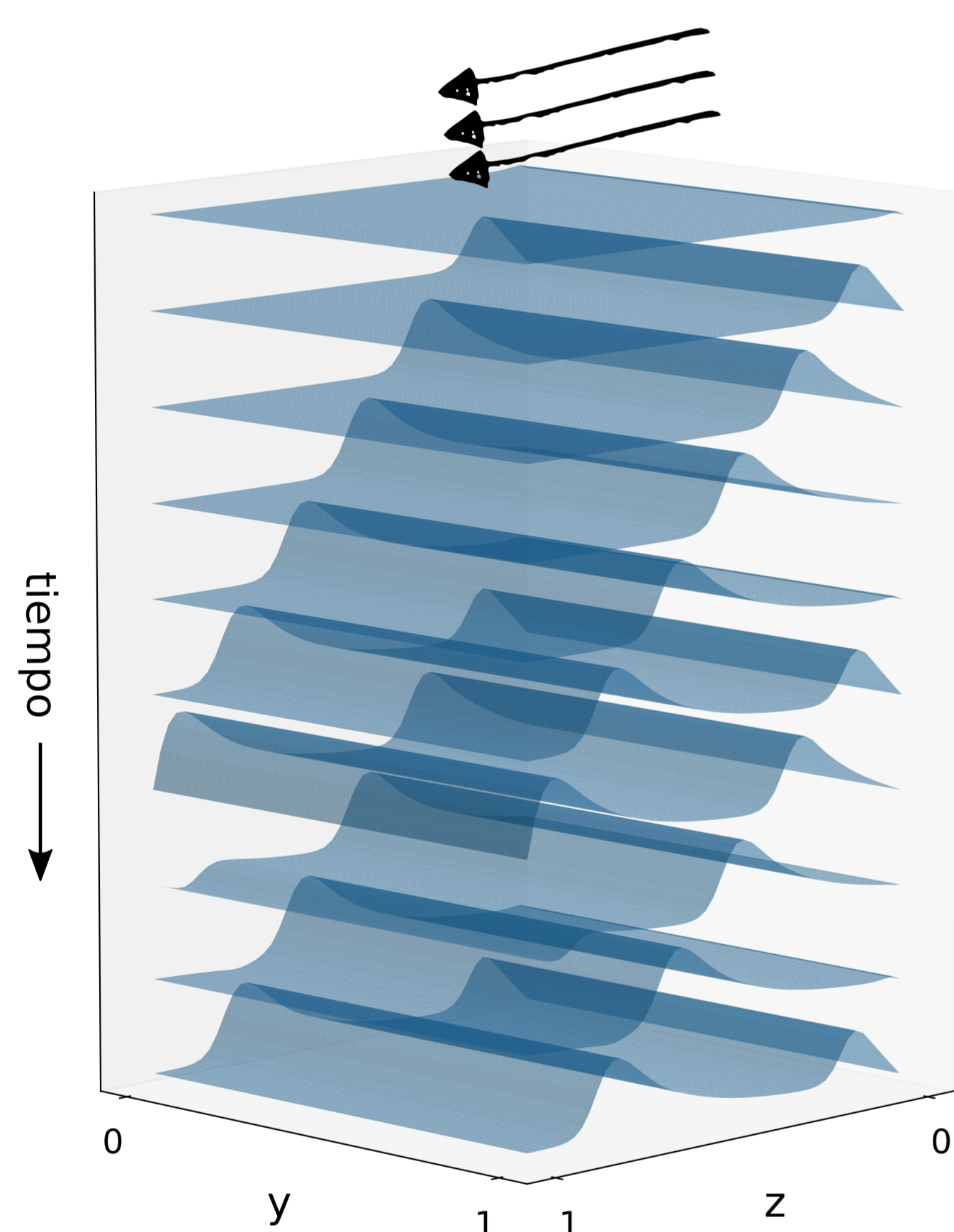
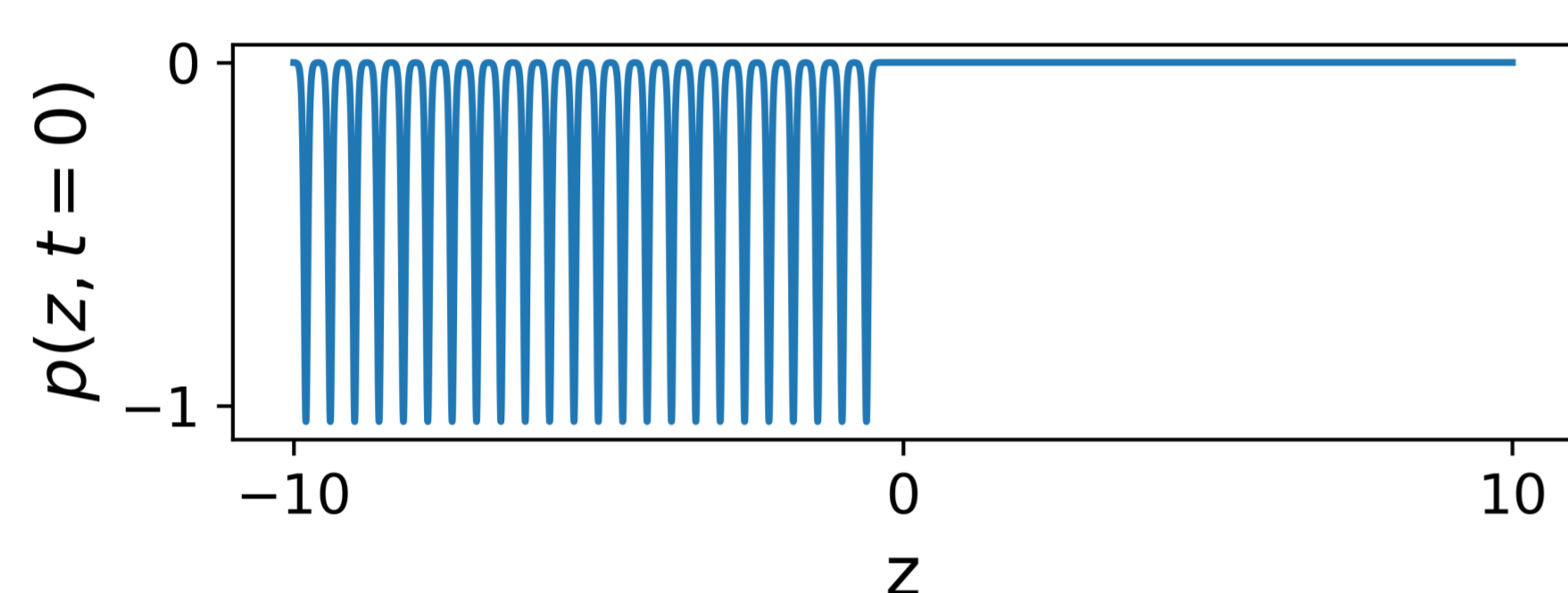
Modelo lineal continuo

Comenzamos por el modelo continuo más sencillo. Consideramos una membrana con restitución y disipación lineal. Linealizamos las tensiones paralelas al flujo y asumimos únicamente movimiento en x. El efecto de la presión lo tomamos como un forzante externo.

$$\frac{\partial^2 \psi(x, z, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi(x, z, t)}{\partial x^2} - \beta \frac{\partial \psi(x, z, t)}{\partial t} - p(z, t)$$

Respuesta ante una serie de pulsos de aire

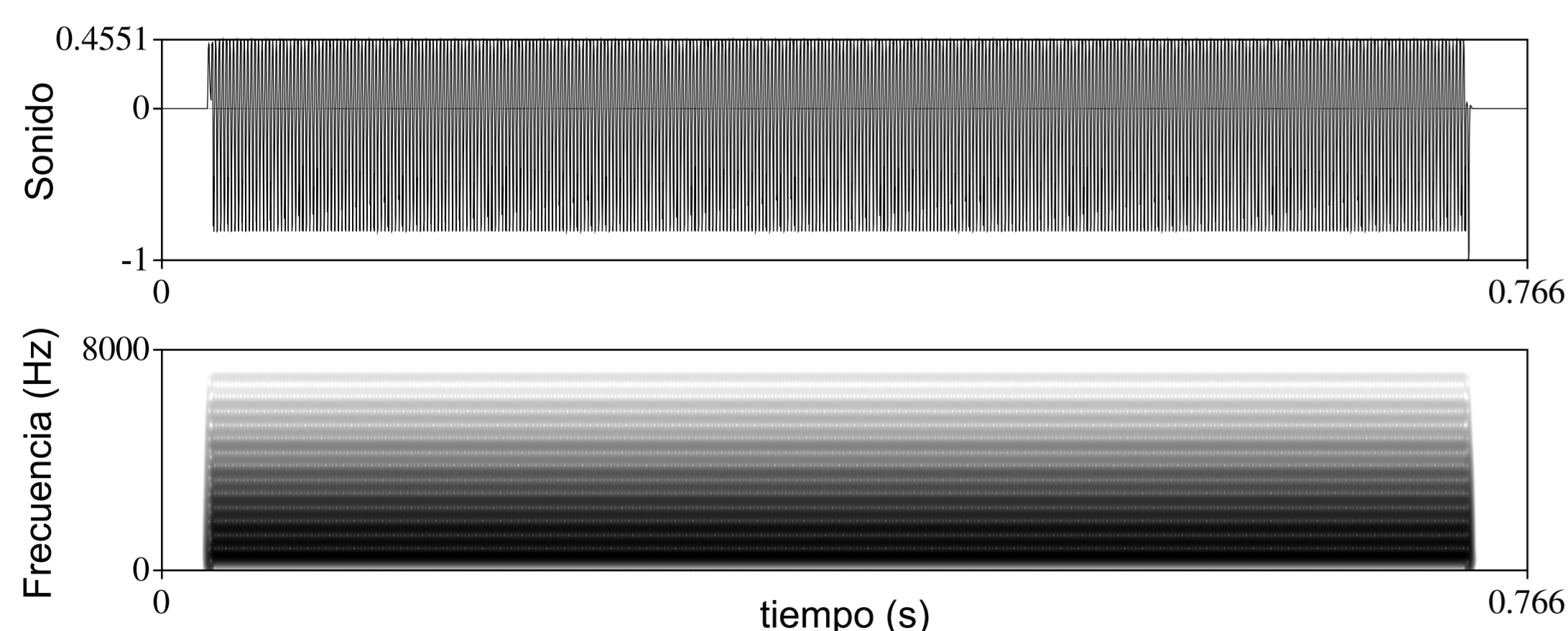
Consideramos el movimiento de la membrana ante una serie de jets de aire. Motivados en Bernoulli, consideramos que cuando avanza el pulso, la velocidad del flujo aumenta y la presión disminuye. En la figura mostramos la serie de pulsos en presión. Este tren avanza a lo largo del eje z.



Mostramos el movimiento de la membrana y la dinámica de las variables medias. Vemos que esta es esencialmente bidimensional.

En la figura tenemos un ejemplo del sonido que se puede sintetizar con este procedimiento.

El problema de este modelo es que no puede describir oscilaciones autosostenidas, en la sección siguiente formulamos un modelo que sí.



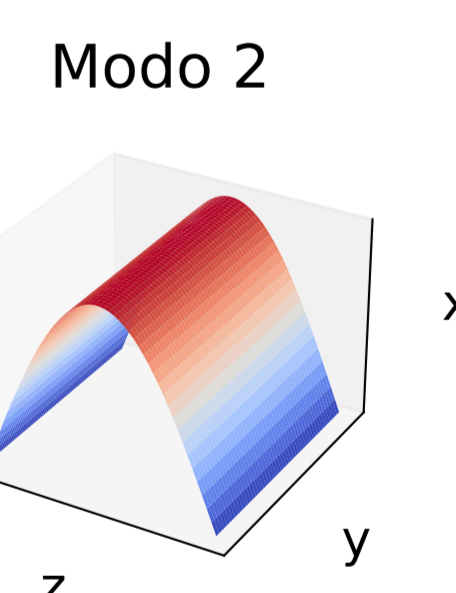
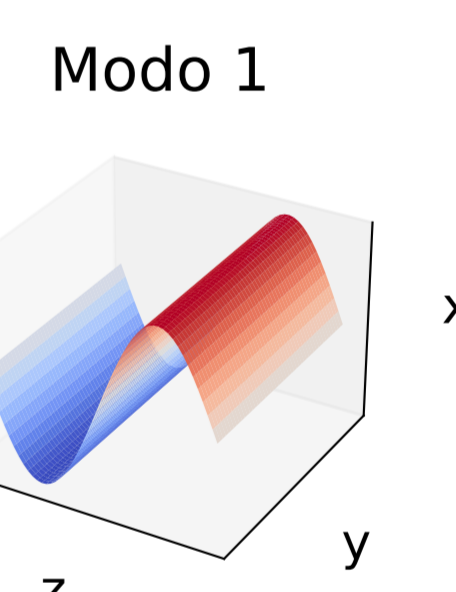
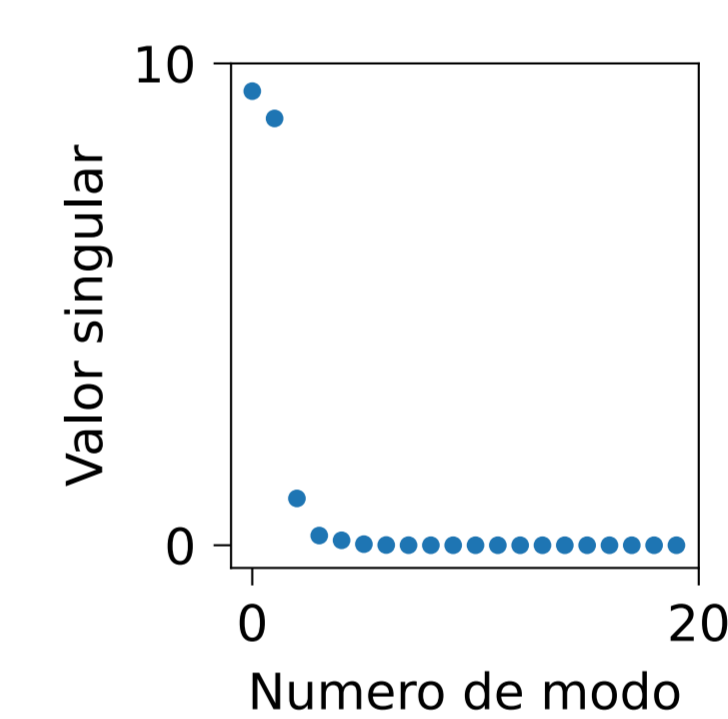
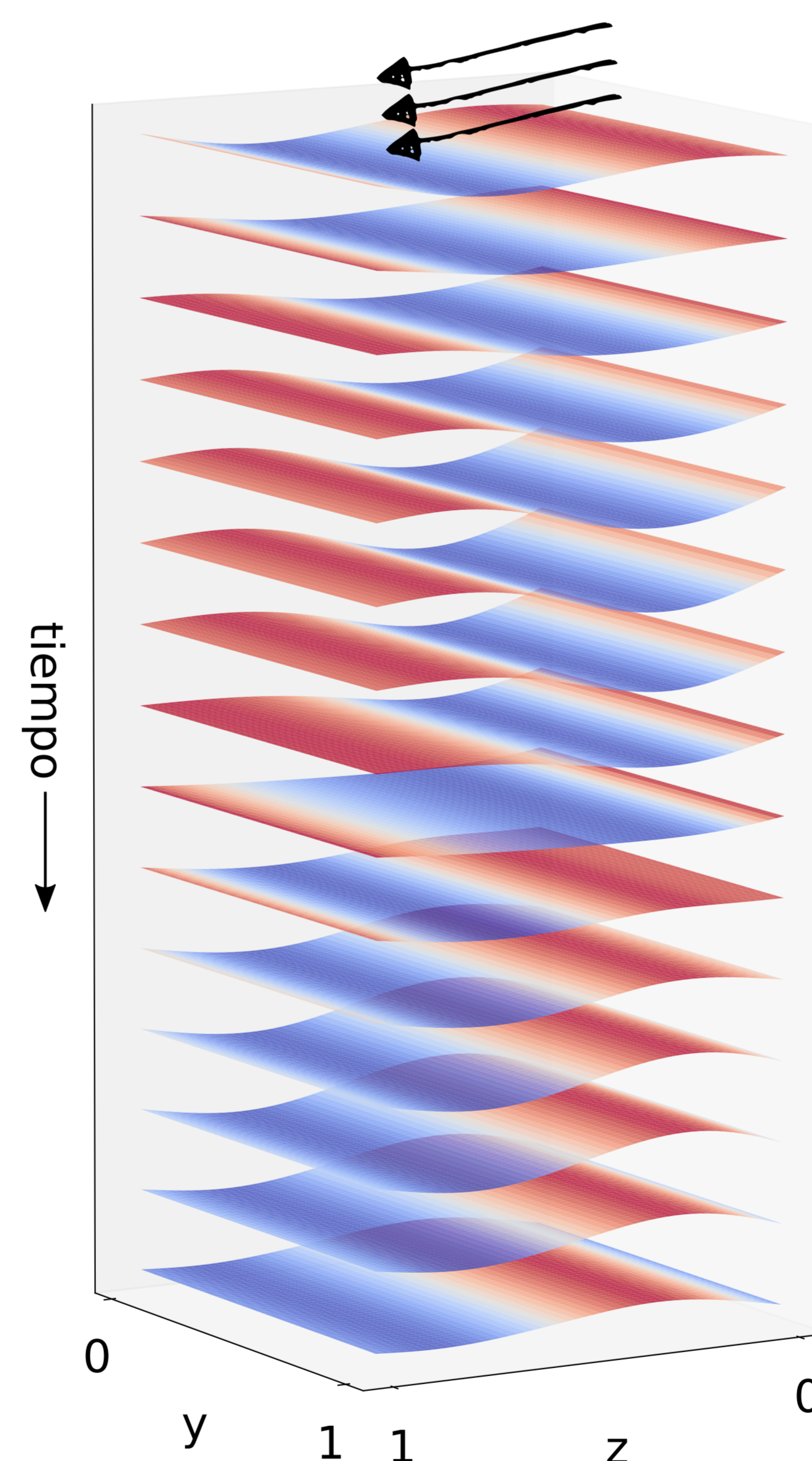
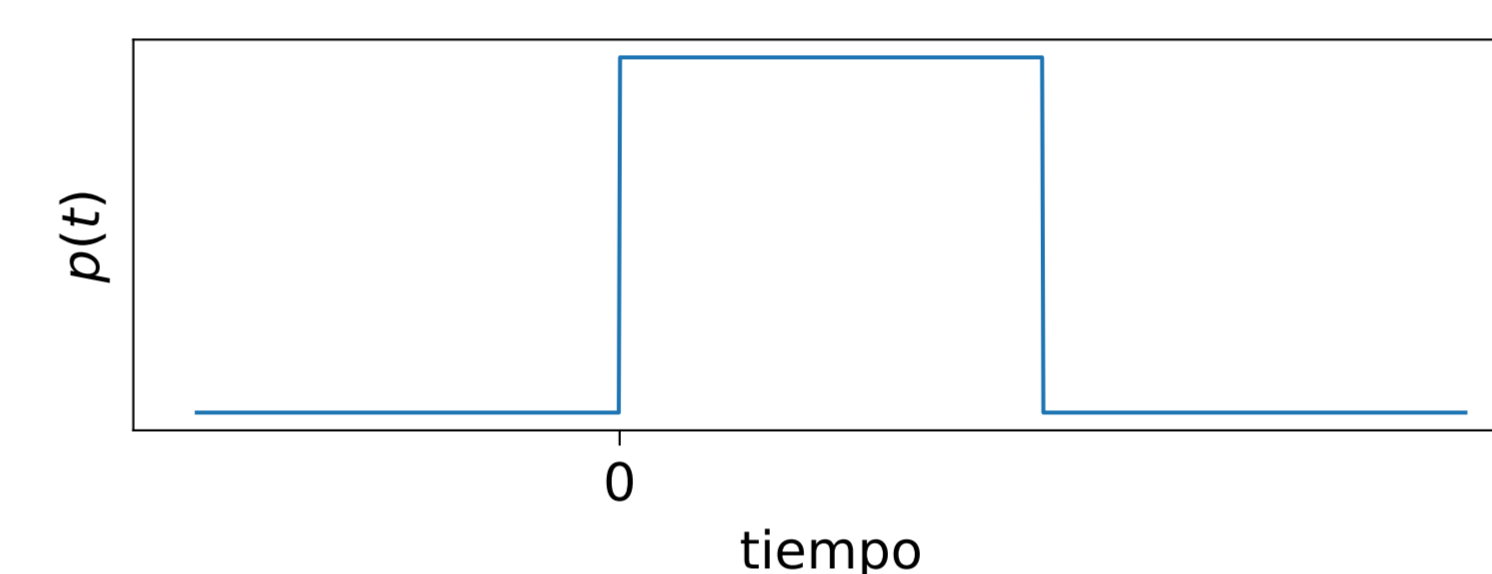
Modelo no lineal continuo

Queremos dar cuenta del efecto del movimiento de la membrana con la presión local sobre cada elemento. Consideramos que cuando el elemento cierra el lumen, la velocidad del flujo aumenta y la presión disminuye. Por el contrario, cuando el elemento abre el lumen, la velocidad del flujo baja y la presión sube. Este efecto lo modelamos como una fuerza en la dirección de la velocidad del elemento. Introduciendo una disipación no lineal el modelo se reescribe así:

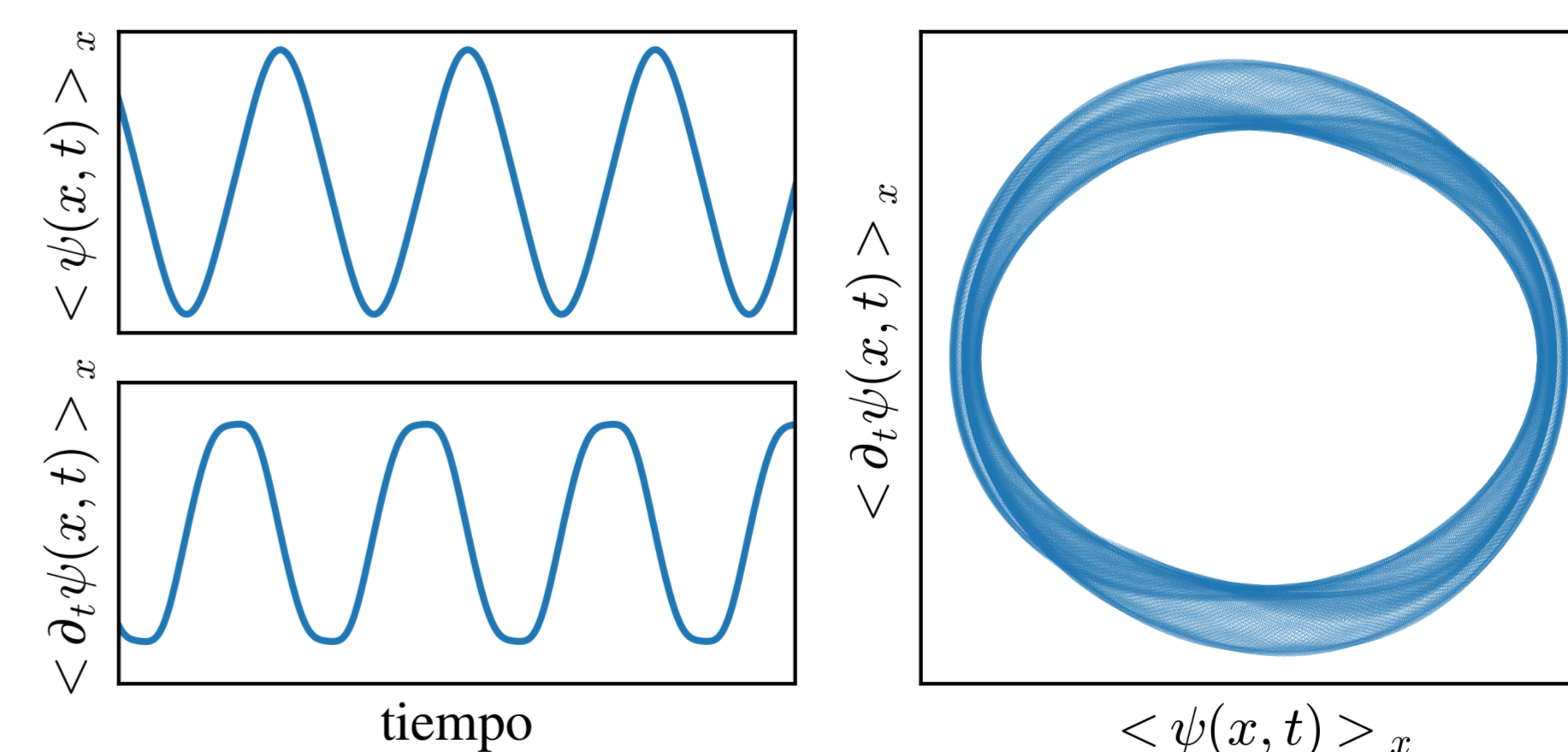
$$\delta m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = -k_{\perp} x_i - (\beta - p_i(t)) \frac{dx_i}{dt} - \alpha_i \frac{dx_i}{dt} x_i^2 - k_{\parallel} (2x_i - x_{i-1} - x_{i+1})$$

Respuesta ante un aumento de la presión bronquial

Consideramos un perfil de presión cuadrado, aquí no consideramos una onda propagante, sino que esto afecta a toda la membrana de manera instantánea.



Vemos que el sistema puede sincronizarse en un movimiento esencialmente bidimensional con los modos hipotetizados en la literatura [1,2]. Esto es fuertemente dependiente de la condición inicial. Las variables promediadas tienen similitudes con un oscilador de relajación.



Conclusiones

En este trabajo proponemos dos modelos sencillos para la vibración de una membrana ante un flujo de aire. Uno es un modelo lineal en el que consideramos la respuesta ante una serie de jets. Encontramos que el sistema puede ser descrito por uno bidimensional dado por las variables medias espaciales.

Para poder describir oscilaciones autosostenidas, introducimos en el modelo el efecto del movimiento de la membrana sobre la presión local como una transferencia de energía. Encontramos que podemos tener oscilaciones dadas esencialmente por dos modos y que los perfiles de la membrana presentan similitudes con las observaciones experimentales en cuerdas vocales. En concordancia con modelos de fonación que asumen dos modos, las variables medias presentan similitudes con osciladores de relajación.

Referencias

- [1] I. R. Titze, Principles of Voice Production (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994).
- [2] T. Gardner, G. Cecchi, M. Magnasco, R. Laje, and G. B. Mindlin, Simple Motor Gestures for Birdsongs, Phys. Rev. Lett. (2001)