

TESIS CARRERA DE DOCTORADO EN FÍSICA

**COMPORTAMIENTOS EMERGENTES EN
POBLACIONES DE ROBOTS INTERACTUANTES**

Mg. Carlos Eduardo Valencia Urbina
Doctorando

Dr. Pablo Martin Gleiser
Director

Miembros del Jurado

Dr. J. J. Jurado (Instituto Balseiro)
Dr. Segundo Jurado (Universidad Nacional de Cuyo)
Dr. J. Otro Jurado (Univ. Nac. de LaCalle)
Dr. J. López Jurado (Univ. Nac. de Mar del Plata)
Dr. U. Amigo (Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche)

9 de Marzo de 2023

Departamento de Física Medica – Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

A mi familia

A mis amigos

A todos los que me conocen

A toda esa otra gente que no

Índice de símbolos

Índice de contenidos

Índice de símbolos	v
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Uso del estilo provisto	1
1.1. Opciones que acepta el estilo	1
1.2. Parámetros convenientes	2
2. Título del Capítulo 2	3
2.1. Formulación del problema	3
2.2. Interpretaciones	4
3. otr	7
3.1. Sección 1	7
3.2. otra	7
3.3. una	7
3.4. dos	7
3.5. tres	7
4. cuatro	9
4.1. una	9
4.2. otra mas	9
5. Dinámica neuronal critica en el C. elegans	11
5.1. Formulación del problema	11

5.2. Interpretaciones	12
6. otr	15
6.1. Sección 1	15
6.2. otra	15
6.3. una	15
6.4. dos	15
6.5. tres	15
7. cuatro	17
7.1. una	17
7.2. otra mas	17
A. Ejemplo de apéndice: El problema de la medida	19
Bibliografía	21
Publicaciones asociadas	23
Agradecimientos	25

Índice de figuras

2.1. La figura muestra algunas curvas más o menos lindas	5
5.1. La figura muestra algunas curvas más o menos lindas	13
A.1. Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos	20

Índice de tablas

Resumen

Este es el resumen en castellano.

La tesis debe reflejar el trabajo desarrollado, mostrando la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las conclusiones que pueden inferirse de dichos resultados.

Palabras clave: FORMATO DE TESIS, LINEAMIENTOS DE ESCRITURA, INSTITUTO BALSEIRO

Abstract

This is the title in English:

The thesis must reflect the work of the student, including the chosen methodology, the results and the conclusions that those results allow us to draw.

Keywords: THESIS FORMAT, TEMPLATES, INSTITUTO BALSEIRO

Capítulo 1

Uso del estilo provisto

“Hablaban siempre de dinero y planeaban asaltar un banco”

— Domingo Cavallo, 2001

1.1. Opciones que acepta el estilo

[1] [2] [3] [4]

Espaciado

El interlineado que se utiliza en el cuerpo de la tesis es de un espacio y medio. Esto se puede cambiar usando una de las opciones

- Un espacio y medio, formato recomendado por el instituto (**default**)
- un sólo espacio (`\documentclass[12pt,singlespacing]{ibtesis}`)
- doble espacio (`\documentclass[12pt,doublespacing]{ibtesis}`)

Formato de la página

El formato de la página puede ser

- final Es el recomendado para la tesis por el Instituto (**default**)
- borrador (`\documentclass[12pt,preprint]{ibtesis}`)
Es un formato con márgenes más chicos, útil para realizar correcciones en borradores

Doble faz

- `\oneside` Los márgenes son iguales para todas las páginas
- `\twoside` Páginas izquierdas y derechas son diferentes

Soporte físico

El estilo tiene una opción para soporte en papel y en pantalla:

- En papel (`\documentclass[12pt,paper]{ibtesis}`) (**default**)
- En pantalla (archivo pdf) (`\documentclass[12pt,screen]{ibtesis}`)
Incluye links y algunos colores en el texto

Otras opciones

Otras opciones con las que se cargue el estilo se pasan directamente a los estilos usados. Por ejemplo si usamos:

`\documentclass[11pt,screen,oneside,preprint,draft,pagebackref]{ibtesis}`
producirá un documento con letra de menor tamaño (11pt), no se procesarán los gráficos (draft) para una mayor velocidad, se producirán links en el archivo pdf con la característica adicional que las referencias tendrán un link al lugar donde fueron citadas ya que la opción `pagebackref` se pasa al paquete `\hyperref`.

1.2. Parámetros convenientes

Se han definido tres longitudes que pueden servir para dar un ancho uniforme a todas las figuras. Estas longitudes se han definido sólo por conveniencia.

Los valores que se le han dado son:

- `\imsiz= 0.7\textwidth`
- `\imsizS= 0.5\textwidth`
- `\imsizL= 0.9\textwidth`

Si se quieren modificar, puede hacerse usando el comando `\setlength`, por ejemplo:

- `\setlength{\imsizL}{0.85\textwidth}`
- `\setlength{\imsiz}{3.6in}`
- `\setlength{\imsizS}{8.6cm}`

Capítulo 2

Título del Capítulo 2

“Quantum Mechanics is God’s version of ‘Trust me.’ ”

— Jorge Corona, 1982

2.1. Formulación del problema

El problema de la medida se puede describir informalmente del siguiente modo

1. De acuerdo con la mecánica cuántica cuando un sistema físico, ya sea un conjunto de electrones orbitando en un átomo, queda descrito por una función de onda. Dicha función de onda es un objeto matemático que supuestamente describe la máxima información posible que contiene un estado puro.
2. Si nadie externo al sistema ni dentro de él observara o tratara de ver como está el sistema, la mecánica cuántica nos diría que el estado del sistema evoluciona deterministamente. Es decir, que podría ser perfectamente predecible hacia donde irá el sistema.
3. La función de onda nos informa de cuales son los resultados posibles de una medida y sus probabilidades relativas, pero no nos dice qué resultado concreto se obtendrá si un observador trata efectivamente de medir el sistema o averiguar algo sobre él. De hecho, la medida sobre un sistema es un valor impredecible de entre los resultados posibles.

Eso plantea un problema serio, si las personas, los científicos u observadores son también objetos físicos como cualquier otro, debería haber alguna forma determinista de predecir como tras juntar el sistema en estudio con el aparato de medida, finalmente llegamos a un resultado determinista. Pero el postulado de que una medición destruye la “coherencia” de un estado inobservado e inevitablemente

tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas (ver notas a continuación):

- a) O bien pasamos a entender el proceso de decoherencia por lo cual un sistema pasa de tener un estado puro que evoluciona predeciblemente a tener un estado mezcla o impredecible (ver teoría del caos)
- b) O bien admitimos que existen unos objetos no-físicos llamados “conciencia” que no están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y que nos resuelven el problema.
- c) O tratamos de inventar cualquier hipótesis exótica que nos haga compatibilizar como por un lado deberíamos estar observando tras una medida un estado no fijado por el estado inicial y por otro lado que el estado del universo en su conjunto evoluciona de forma determinista.

El enunciado anterior “una medición destruye la ‘coherencia’ de un estado inobservado e inevitablemente tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas” es demasiado arriesgado y no probado. Si partimos de que las entidades fundamentales que constituyen la materia, precisamente, y al contrario de lo que deduce (B) no tienen consciencia de sí mismas, y sin preferencia alguna por el determinismo o el caos absoluto, sólo pueden encontrar el equilibrio comportándose según leyes de probabilidad o lo que es lo mismo por leyes de “caos determinado”. En la práctica cualquier defensa o negación de la teoría cuántica no responde a razonamientos matemáticos deductivos sino a impresiones o sugerencias con origen en axiomas filosóficos totalmente arbitrarios. Notar que p.ej, la palabra “equilibrio” en este párrafo puede o no tener sentido y el valor de realidad que se conceda al mismo no está sujeto a demostración matemática alguna.

2.2. Interpretaciones

Comúnmente existen diversas interpretaciones de la mecánica cuántica, cada una de las cuales en general afronta el problema de la medida de manera diferente. De hecho si el problema de la medida estuviera totalmente no existirían algunas de las interpretaciones rivales. En cierto modo la existencia de diferentes interpretaciones refleja que no existe un consenso sobre como plantear precisamente el problema de la medida. Algunas de las interpretaciones más ampliamente conocidas son las siguientes:

1. Interpretación estadística, en la que se supone un estado cuántico describe una regularidad estadística, siendo explicables los diferentes resultados de la medida de

un observable atribuibles a factores estocásticos o fluctuaciones debidas al entorno y no observables. La electrodinámica estadística es una teoría de los electrones en que el comportamiento cuántico, aparentemente aleatorio, de los electrones de un sistema es atribuible a las fluctuaciones del campo electromagnético debido al resto de electrones del universo.

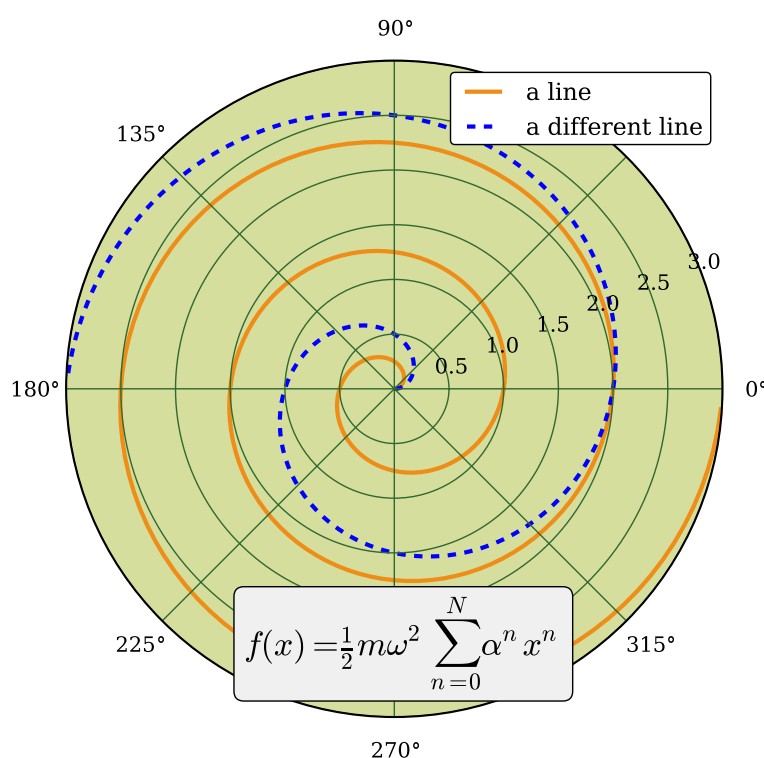


Figura 2.1: La figura muestra algunas curvas más o menos lindas. El gráfico está en coordenadas polares como se muestra en la

2. Interpretación de Copenhague, es la interpretación probablemente más común y a la que se han adherido la mayoría de manuales de mecánica cuántica tradicionalmente. Debida inicialmente a Niels Bohr y el grupo de físicos que trabajaba con él en Copenhague hacia 1927. Se asume el principio de incertidumbre y el principio de complementariedad de las descripciones ondulatoria y corpuscular.
3. Interpretación participatoria del principio antrópico.
4. Interpretación de historias consistentes.
5. Teorías de colapso objetivo. De acuerdo con estas teorías, la superposiciones de estados se destruyen aunque no se produzca observación, difiriendo las teorías en qué magnitud física es la que provoca la destrucción (tiempo, gravitación, temperatura, términos no lineales en el operador de evolución...). Esa destrucción es lo que evita

las ramas que aparecen en la teoría de los multi-universos o universos paralelos . La palabra "objetivo" procede de que en esta interpretación tanto la función de onda como el colapso de la misma son reales", en el sentido ontológico. En la interpretación de los muchos-mundos, el colapso no es objetivo, y en la de Copenhague es una hipótesis ad-hoc.

- Interpretación multiverso.
- Decoherencia por el entorno
- Interpretación de Bohm
- Interpretación Madhyamika

En la primera ecuación

$$\phi_1(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z}. \quad (2.1)$$

En la segunda ecuación:

$$\phi_2(z) = A_2 e^{ik_2 z} + B_2 e^{-ik_2 z}. \quad (2.2)$$

La solución de la tercera ecuación se puede obtener a partir de la solución en la primera ecuación aplicando

$$\phi_3(z) = e^{iKd} (A_1 e^{ik_1(z-l)} + B_1 e^{-ik_1(z-l)}). \quad (2.3)$$

Capítulo 3

otr

3.1. Sección 1

3.2. otra

3.3. una

3.4. dos

3.5. tres

Capítulo 4

cuatro

4.1. una

4.2. otra mas

Capítulo 5

Dinámica neuronal crítica en el *C. elegans*

“Quantum Mechanics is God’s version of ‘Trust me.’ ”

— Jorge Corona, 1982

5.1. Formulación del problema

El problema de la medida se puede describir informalmente del siguiente modo

1. De acuerdo con la mecánica cuántica cuando un sistema físico, ya sea un conjunto de electrones orbitando en un átomo, queda descrito por una función de onda. Dicha función de onda es un objeto matemático que supuestamente describe la máxima información posible que contiene un estado puro.
2. Si nadie externo al sistema ni dentro de él observara o tratara de ver como está el sistema, la mecánica cuántica nos diría que el estado del sistema evoluciona determinísticamente. Es decir, que podría ser perfectamente predecible hacia donde irá el sistema.
3. La función de onda nos informa de cuales son los resultados posibles de una medida y sus probabilidades relativas, pero no nos dice qué resultado concreto se obtendrá si un observador trata efectivamente de medir el sistema o averiguar algo sobre él. De hecho, la medida sobre un sistema es un valor impredecible de entre los resultados posibles.

Eso plantea un problema serio, si las personas, los científicos u observadores son también objetos físicos como cualquier otro, debería haber alguna forma determinista de predecir como tras juntar el sistema en estudio con el aparato de

medida, finalmente llegamos a un resultado determinista. Pero el postulado de que una medición destruye la “coherencia” de un estado inobservado e inevitablemente tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas (ver notas a continuación):

- a) O bien pasamos a entender el proceso de decoherencia por lo cual un sistema pasa de tener un estado puro que evoluciona predeciblemente a tener un estado mezcla o impredecible (ver teoría del caos)
- b) O bien admitimos que existen unos objetos no-físicos llamados “conciencia” que no están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y que nos resuelven el problema.
- c) O tratamos de inventar cualquier hipótesis exótica que nos haga compatibilizar como por un lado deberíamos estar observando tras una medida un estado no fijado por el estado inicial y por otro lado que el estado del universo en su conjunto evoluciona de forma determinista.

«Prueba “prueba”» El enunciado anterior “una medición destruye la ‘coherencia’ de un estado inobservado e inevitablemente tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas” es demasiado arriesgado y no probado. Si partimos de que las entidades fundamentales que constituyen la materia, precisamente, y al contrario de lo que deduce (B) no tienen consciencia de sí mismas, y sin preferencia alguna por el determinismo o el caos absoluto, sólo pueden encontrar el equilibrio comportándose según leyes de probabilidad o lo que es lo mismo por leyes de “caos determinado”. En la práctica cualquier defensa o negación de la teoría cuántica no responde a razonamientos matemáticos deductivos sino a impresiones o sugerencias con origen en axiomas filosóficos totalmente arbitrarios. Notar que p.ej, la palabra “equilibrio” en este párrafo puede o no tener sentido y el valor de realidad que se conceda al mismo no está sujeto a demostración matemática alguna.

5.2. Interpretaciones

Comúnmente existen diversas interpretaciones de la mecánica cuántica, cada una de las cuales en general afronta el problema de la medida de manera diferente. De hecho si el problema de la medida estuviera totalmente no existirían algunas de las interpretaciones rivales. En cierto modo la existencia de diferentes interpretaciones refleja que no existe un consenso sobre como plantear precisamente el problema de la medida. Algunas de las interpretaciones más ampliamente conocidas son las siguientes:

Item		
Animal	Description	Price (\$)
Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

1. Interpretación estadística, en la que se supone un estado cuántico describe una regularidad estadística, siendo explicables los diferentes resultados de la medida de un observable atribuibles a factores estocásticos o fluctuaciones debidas al entorno y no observables. La electrodinámica estadística es una teoría de los electrones en que el comportamiento cuántico, aparentemente aleatorio, de los electrones de un sistema es atribuible a las fluctuaciones del campo electromagnético debido al resto de electrones del universo.

Figura 1

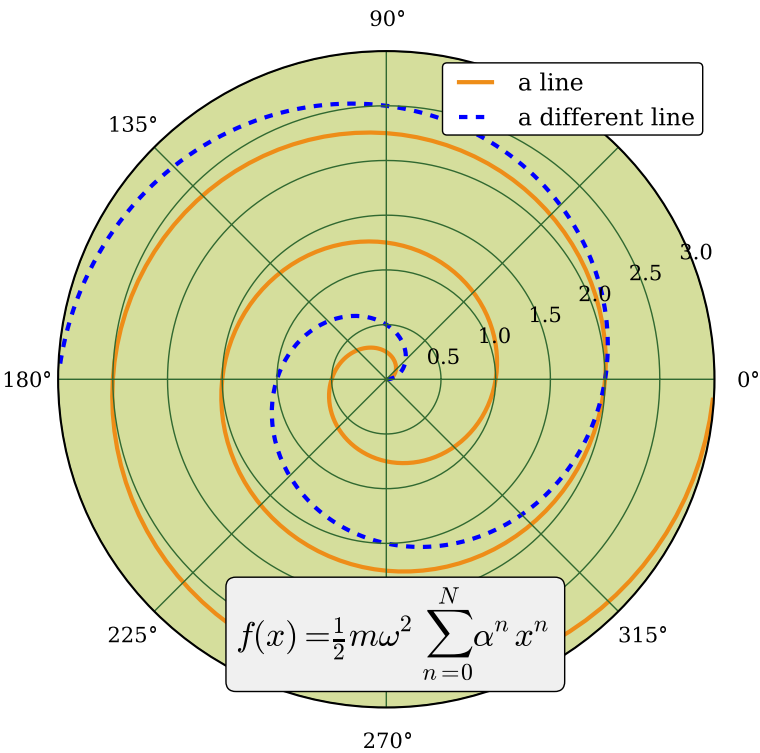


Figura 5.1: La figura muestra algunas curvas más o menos lindas. El gráfico está en coordenadas polares como se muestra en la

Tabla 1

2. Interpretación de Copenhague, es la interpretación probablemente más común y

a la que se han adherido la mayoría de manuales de mecánica cuántica tradicionalmente. Debida inicialmente a Niels Bohr y el grupo de físicos que trabajaba con él en Copenhague hacia 1927. Se asume el principio de incertidumbre y el principio de complementariedad de las descripciones ondulatoria y corpuscular.

3. Interpretación participatoria del principio antrópico.
4. Interpretación de historias consistentes.
5. Teorías de colapso objetivo. De acuerdo con estas teorías, la superposiciones de estados se destruyen aunque no se produzca observación, difiriendo las teorías en qué magnitud física es la que provoca la destrucción (tiempo, gravitación, temperatura, términos no lineales en el operador de evolución...). Esa destrucción es lo que evita las ramas que aparecen en la teoría de los multi-universos o universos paralelos. La palabra "objetivo" procede de que en esta interpretación tanto la función de onda como el colapso de la misma son reales", en el sentido ontológico. En la interpretación de los muchos-mundos, el colapso no es objetivo, y en la de Copenhague es una hipótesis ad-hoc.

- Interpretación multiverso.
- Decoherencia por el entorno
- Interpretación de Bohm
- Interpretación Madhyamika

En la primera ecuación

$$\phi_1(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z}. \quad (5.1)$$

En la segunda ecuación:

$$\phi_2(z) = A_2 e^{ik_2 z} + B_2 e^{-ik_2 z}. \quad (5.2)$$

La solución de la tercera ecuación se puede obtener a partir de la solución en la primera ecuación aplicando

$$\phi_3(z) = e^{iKd} (A_1 e^{ik_1(z-l)} + B_1 e^{-ik_1(z-l)}). \quad (5.3)$$

Capítulo 6

otr

6.1. Sección 1

6.2. otra

6.3. una

6.4. dos

6.5. tres

Capítulo 7

cuatro

7.1. una

7.2. otra mas

Apéndice A

Ejemplo de apéndice: El problema de la medida

“Negociemos Don Inodoro”

— Fernando de la Rúa, 2001

“Smartness runs in my family. When I went to school I was so smart my teacher was in my class for five years”

— George Burns

El gran problema lo constituye el proceso de medición. En la física clásica, medir significa revelar o poner de manifiesto propiedades que estaban en el sistema desde antes de que midamos .

En mecánica cuántica el proceso de medición altera de forma incontrolada la evolución del sistema. Constituye un error pensar dentro del marco de la física cuántica que medir es revelar propiedades que estaban en el sistema con anterioridad. La información que nos proporciona la función de onda es la distribución de probabilidades, con la cual se podrá medir tal valor de tal cantidad. Cuando medimos ponemos en marcha un proceso que es indeterminable a priori, lo que algunos denominan azar, ya que habrá distintas probabilidades de medir distintos resultados. Esta idea fue y es aún objeto de controversias y disputas entre los físicos, filósofos y epistemólogos. Uno de los grandes objetores de esta interpretación fue Albert Einstein, quien a propósito de esta idea dijo su famosa frase "Dios no juega a los dados".

Independientemente de los problemas de interpretación, la mecánica cuántica ha podido explicar esencialmente todo el mundo microscópico y ha hecho predicciones que han sido probadas experimentalmente de forma exitosa, por lo que es una teoría unánimemente aceptada.

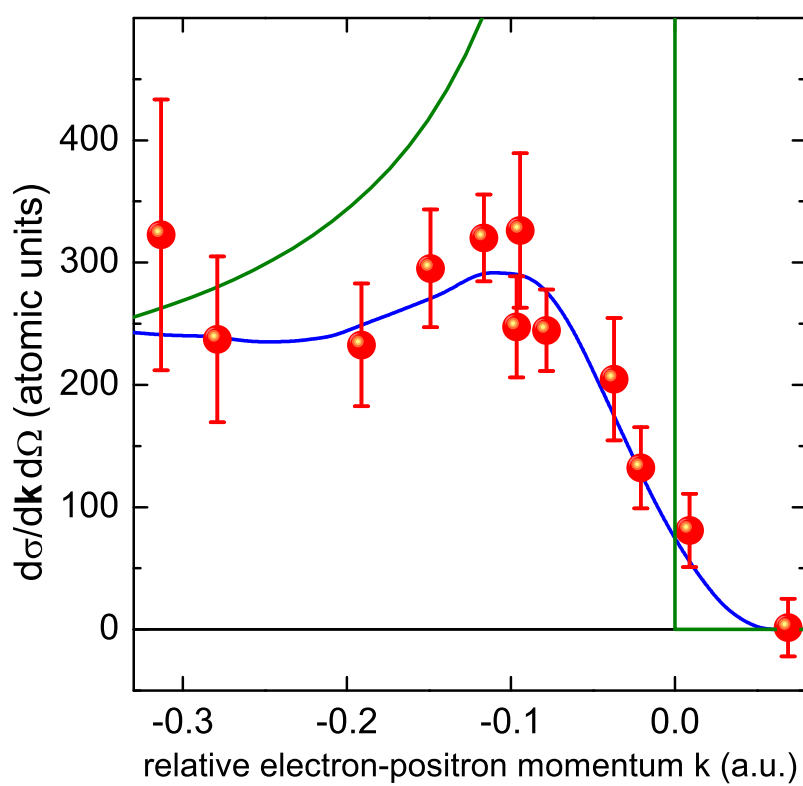


Figura A.1: Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos

Bibliografía

- [1] Abadi, M. M. Z. N. Criticalidad en modelos de actividad neuronal: efectos del tamaño y topología de la red. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, jun 2020. [1](#)
- [2] Busbice, T. Extending the C. Elegans Connectome to Robotics. *Original Research*, mayo 2014. URL <http://www.connectomeengine.com/download/Papers/Connectome.pdf>. [1](#)
- [3] Chialvo, D. R. Life at the Edge: Complexity and Criticality in Biological Function. *Acta Physica Polonica B*, **49**, 1955, ene. 2018. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018AcPPB..49.1955C>. [1](#)
- [4] Kato, S., Kaplan, H. S., Schrödel, T., Skora, S., Lindsay, T. H., Yemini, E., *et al.* Global Brain Dynamics Embed the Motor Command Sequence of *Caenorhabditis elegans*. *Cell*, **163** (3), 656–669, oct. 2015. URL [https://www.cell.com/cell/abstract/S0092-8674\(15\)01196-4](https://www.cell.com/cell/abstract/S0092-8674(15)01196-4). [1](#)

Publicaciones asociadas

1. Valencia Urbina, C. E., Cannas, S. A., & Gleiser, P. M. (2023). Emergent dynamics in a robotic model based on the *Caenorhabditis elegans* connectome. *Frontiers in neurorobotics*, 16, 1041410. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1041410>

Agradecimientos

A todos los que se lo merecen, por merecerlo

