



*Análisis de productividad en rodamientos de alto desempeño hidrostático para máquinas rotativas y turbinas hidráulicas*

*Productivity analysis in high hydrostatic performance bearings for rotating machines and hydraulic turbines*

*Análise de produtividade em rolamentos de alto desempenho hidrostático para máquinas rotativas e turbinas hidráulicas*

José Francisco Pérez Fiallos<sup>I</sup>  
[jperez@epoch.edu.ec](mailto:jperez@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0229-4770>

Elvis Enrique Arguello<sup>II</sup>  
[elvis.arguello@epoch.edu.ec](mailto:elvis.arguello@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-5083-1011>

Rodrigo Rigoberto Moreno Pallares<sup>III</sup>  
[rodrigo.moreno@epoch.edu.ec](mailto:rodrigo.moreno@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-1877-6942>

**Correspondencia:** [jperez@epoch.edu.ec](mailto:jperez@epoch.edu.ec)

Ciencias de la salud  
Artículos de investigación

**\*Recibido:** 16 de julio de 2021 **\*Aceptado:** 30 de agosto de 2021 **\* Publicado:** 06 de septiembre de 2021

- I. Facultad Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- II. Facultad Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- III. Facultad Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

## Resumen

Durante todo este tiempo existe una evolución en cuanto a la aplicación de uso de cojinetes con aplicaciones en el área de la hidrostática. Estos diseños han permitido una mejora de ventajas que sus diseños han alcanzado. Estas mejoras logran un gran desempeño en aspectos de compresión en la tribología. Esto permite que nuevas tecnologías y deseos se puedan implementar para alcanzar un mejor cometido y una mejor precisión en cuanto al diseño de rodamientos. El presente documento revisa algunos procesos que optimiza los diseños en cuanto ejercicio de geometría, aspectos de diseño de hidrostática en función de algunos sistemas hidráulicos.

Los aspectos considerados dentro de los estudios presentados son mediante un flujo de condiciones presurizadas y algunos dispositivos electrónicos de control que consigue alcanzar una reducción en los costos de mantenimiento. Se muestra algunas tendencias actuales sobre el diseño y fabricación de cojinetes capaces de alcanzar gran desempeño.

**Palabras clave:** Cojinetes; Rodamientos alto desempeño; Hidrostática; tribología.

## Abstract

During all this time there is an evolution regarding the application of bearing use with applications in the area of hydrostatics. These designs have allowed an improvement of advantages that their designs have achieved. These improvements achieved great performance aspects of compression in tribology. This allows new technologies and wishes to be implemented to achieve better performance and better precision in bearing design. This document reviews some processes that optimizes designs in terms of geometry performance, hydrostatic design aspects of them bearings in function of some hydraulic systems.

The aspects considered within the studies presented within a flow of pressurized conditions and some electronic control devices that achieve a reduction in maintenance costs. It shows some current trends in the design and manufacture of bearings capable of achieving high performance.

**Keywords:** Bearings; High performance bearings; Hydrostatic; tribology.

## Resumo

Durante todo esse tempo há uma evolução quanto à aplicação do uso de rolamentos com aplicações na área de hidrostática. Esses projetos permitiram um aprimoramento das vantagens

que seus projetos alcançaram. Essas melhorias alcançaram grandes aspectos de desempenho de compressão em tribologia. Isso permite que novas tecnologias e desejos sejam implementados para obter melhor desempenho e melhor precisão no projeto do rolamento. Este documento analisa alguns processos que otimizam projetos em termos de desempenho de geometria, aspectos de projeto hidrostático dos rolamentos em função de alguns sistemas hidráulicos.

Os aspectos considerados nos estudos apresentados dentro de um fluxo de condições pressurizadas e alguns dispositivos de controle eletrônico que permitem uma redução nos custos de manutenção. Ele mostra algumas tendências atuais no projeto e fabricação de rolamentos capazes de atingir alto desempenho.

**Palavras-chave:** Rolamentos; Rolamentos de alto desempenho; Hidrostático; tribologia.

### **Introducción**

Las invenciones de los cojinetes y rodamientos de alto desempeño permitieron que grandes avances en cuanto al diseño mecánico se lleven a cabo y logró que se acoplen a las diferentes teorías de lubricación y tribología.[1]

La lubricación considera aspectos de aplicación de un fluido entre dos superficies de fricción formando una película que permite que se adapte a los planos, y estos cojinetes con aplicación hidrostática tienen ventajas como brindar una fricción totalmente menor disminuyendo las fuerzas de interacción de cizallamiento, consiguen un desgaste menor entre las superficies de fricción. [2]

Dentro del área de la generación hidroeléctrica es muy común el uso de rodamientos hidrostáticos con aplicaciones en la turbina del hidrogenado, considerando que su funcionamiento presenta condiciones altas de fricción durante el inicio de rotación y se debe reducir al máximo la presencia de los daños superficiales. [3]

Dentro de la industria petroquímica en el área de refrigeración, el caudal del flujo hidrostático es accionado hacia un compresor que requiere dentro de su diseño un cojinete de alto desempeño en la cuales se ha implementado un tratamiento superficial para que pueda adaptarse a las condiciones del flujo. [4]

Es importante considerar que debe tener en el diseño del cojinete una correcta integración en los aspectos mecánicos e hidráulicos, establecer los subsistemas que se disponen así como sus restricciones y efectos mutuos.

Existe una gran diferencia entre las almohadillas o bases hidrostáticas, ya que se debe considerarse aspectos como rigidez y precisión del diseño según al lugar de impacto del flujo hidroestático, por lo que se recomienda dentro del diseño el uso de tecnología CNC en relación al mecanizado y tener una aplicación de un mayor número almohadillas que brinden un soporte considerando el tamaño y la fuerza del flujo hidroestático. [5]

Los cojinetes con aplicaciones en ambientes de trabajo relacionado con la hidrostática ,dependen de las condiciones de presurización de algún tipo de fluido y están sometidos a una carga directa e indirecta en incluso cuando tiene aplicación en el diseño de ejes; y estos tienen un uso como soporte por lo cual tienen una ideal aplicación en bombas para fluidos brindando una menor exigencia en aspectos mecánicos. [6]

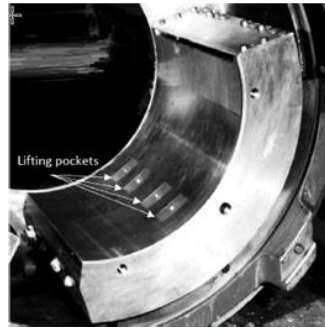
Una de las condiciones de gran exigencia para los cojinetes de aplicación hidroestática considera de gran importancia que la rigidez superficial, es notable cuando se define el centrado de un eje con una alta precisión; considerando las fuerzas dinámicas que producen un efecto de golpe sobre la superficie resultado de la compresibilidad del fluido.

Es significativo definir que las fuerzas de cargas y rigidez estática a la que están sometidos los cojinetes deben ser independientes a las condiciones del fluido, siendo una de las grandes ventajas en cuanto a este tipo de diseño. [7]

Los cojinetes hidroestáticos que presentan en su diseño un orificio como limitadores, tiene mejores resultados en cuando a la rigidez superficial debido a la dependencia de la presión de depósito y no tanto de las condiciones de tribología de la superficie y el tipo de lubricante usado.

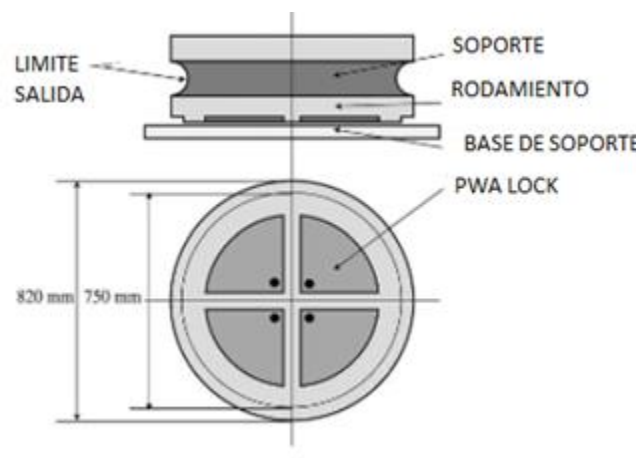
En la Figura 1 se puede observar las perforaciones o cavidad que ayudan al mejor acople de la superficie del cojinete y se pueda alcanzar un giro sin contacto. [8]

**Figura 1.** Almohadilla del cojinete con perforaciones de una turbina hidrodinámica. [8]



Existen diseños que reducen los inconvenientes en cuanto al acople de las superficies, se ha implementado cojinetes de soporte de empuje con lubricación líquida que permite una menor fricción, este acople se lo denomina soporte o base hidráulica, este tipo de diseño podemos observar en la Figura 2.

**Figura 2.** Soporte hidráulico con cojinete hidroestático con anillo de goma. [8]

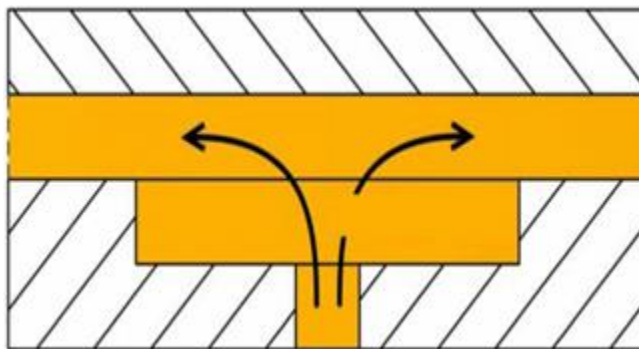


Los cojinetes hidrostáticos son elementos necesarios de unas máquinas de alto desempeño en cuanto a la carga de fricción, es importante considerar la lubricación y el tipo de soporte que son importantes para lograr el mejor rendimiento en relación al movimiento. Conseguir una formación de una película de lubricación entre las superficies de contacto del cojinete. En cuanto a aspectos de capacidad de resistencia de carga con la aplicación de espacios o soportes hidráulicos. El sistema encargado de conducir el aceite usa un tipo de inyección de lubricación dentro de las cavidades de lubricación en los rodamientos, el diseño de estas cavidades debe tener una mayor profundidad en relación a la superficie de contacto para alcanzar una película de lubricación viscosa en relación al fluido. [9]

Esto puede ocasionar una pérdida de presión cuando el líquido lubricante fluye hacia las cavidades, pero en especial la película de aceite generada en los extremos del cojinete logra ser más delgado, alcanzando un cizallamiento viscoso y esto permite lograr la presión de aceite necesaria.

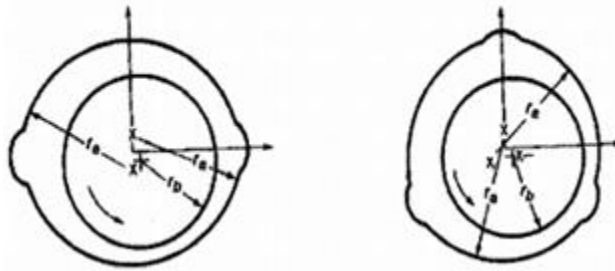
En la Figura 3 se puede observar el direccionamiento de lubricante sobre la superficie de contacto. [10]

**Figura 3.** Flujo de lubricante entre las superficies del rodamiento.



Conseguir una reducción en la ausencia de estabilidad de la fricción, se localiza específicamente en el cojinete cilíndrico con las cavidades o almohadillas para la película de aceite, se pueden llegar alcanzar grandes desgates en esta zona por lo que es uno de los grandes desafíos a futuro que se pueden llegar a eliminar, considerando que las diferentes aplicaciones que se pueden tener y las investigaciones en las diferentes propuestas se encuentran aun en estudios para conseguir eliminar en su totalidad las fuentes que generan momento dentro de la dinámica del giro del eje y la generación del golpes en su funcionamiento. En la Figura 4 podemos observar la superficie que modifica en los cojinetes, de tal forma que se puede reducir la aparición de inestabilidad en el fluido del lubricante. [11]

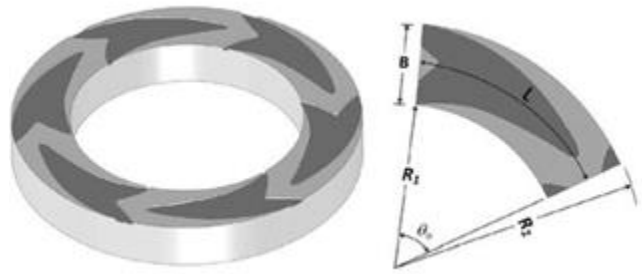
**Figura 4.** Reducción de inestabilidad de fluido dentro de los cojinetes de superficie lisa.



Las cavidades, donde se aloja la película de aceite se pactan a la ecuación resultante bajo el efecto de Reynolds en los ejes cilíndricos, y se pueden calcular de forma analítica en función de las condiciones de presión y la resistencia a los índices de capacidad de carga. Algunos estudios han tratado que ingresar entre algunas de las diferentes propuestas que la superficie de fricción para obtener diferentes tratamientos térmicos y alcanzar un mejor rendimiento en el soporte, considerando que una superficie plana es complicada en función de trabajos de mecanizado. Las cavidad o áreas de soporte se adaptan perfectamente a la ecuación de Reynolds de ejes cartesianos y es resultante de un buen modelo para observación de tendencia lineal. Contrastando, en relación a la superficie de apoyo circular de eje con diseño tipo muñón, requiere de una mayora técnica de mecanizado lo que vuelve compleja su fabricación; por lo que hoy en día ha establecido estudios que permiten conseguir una propuesta que mejore la distribución de la película de aceite bajo condición del diseño cónico y esférico, este tipo de diseño no son tan comunes ya que existen una menor cantidad de máquinas que disponen de este tipo de rodamiento. [12]

Estudios relacionados a cojinetes de empujes revisaron analíticamente el comportamiento ante fuerzas de inercia y fuerzas de inercia centrípetas considerando la rugosidad de la superficie del cojinete, tomando en cuenta dentro del cojinete de película de aire de empuje al momento que ingresa un nuevo diseño en la superficie alcanzado mejores rendimientos dinámicos en cuanto al soporte de un eje. Dentro de este tipo de diseño es muy común encontrar la aplicación de ranuras en espiral lo que logra que el efecto de las vibraciones sea menor cuando estos se presentan en una alta frecuencia. En la Figura 5 se puede visualizar l diseño en espiral de este tipo de rodamientos. [13]

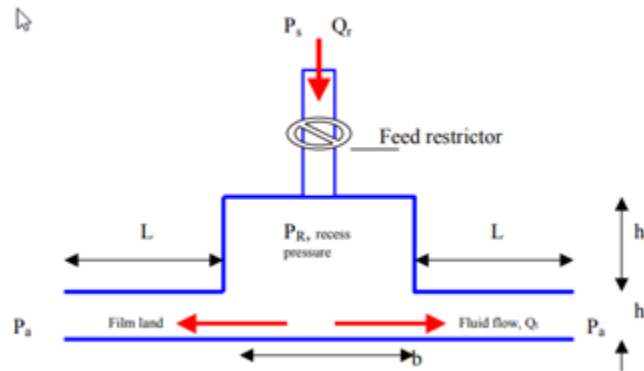
Figura 5. Diseño en espiral en cojinete hidrostáticos.



### Materiales y métodos

Se considera que la cavidad debe tener una profundidad  $AR=bB$ . El fluido logra encaminarse desde el orificio hacia el área de la almohadilla y la presión ambiental a través de los lados del cojinete, digamos  $P_{admisión}=0$

Figura 5. Diseño de la geometría de la cavidad de un rodamiento hidrostático.



En donde, el caudal del fluido que circula a través de la cavidad es una función relacionada a la disminución de presión.  $Q_t = F$  considerando  $(P_s - P_r)$

$$Q_r = Q_o = A_o C_d \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_r)} \quad ; \quad Q_r = Q_c = \frac{\pi d^4}{128 \mu l_c} (P_s - P_r) \quad (1)$$

Dentro del diseño se considera el área, la perforación y la descarga del coeficiente empírico, respectivamente. Son el diámetro y la longitud del conducto en dicha geometría desde brindar un espesor en la película considerando las turbulencias de las condiciones del fluido.



La película de aceite del rodamiento, la presión del fluido que va desde la presión media ( $P_r$ ) hasta la presión exterior  $P_{admisión}$ . Dentro de este flujo que no llega a comprimirse, se presenta un caudal quien es una función de la caída de presión.

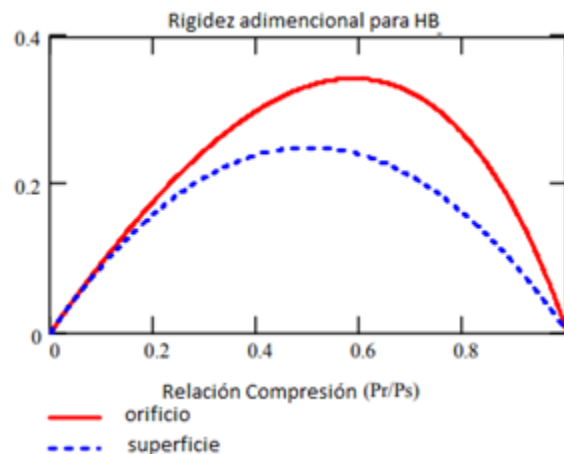
$$Q_t = -\frac{B h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} = +\frac{B h^3 (P_R - P_a)}{12\mu L} \quad (2)$$

Donde B, representa el ancho de la superficie de rodamiento y L es la dimensión en cuanto a longitud. No se considera el movimiento del rodamiento a través de la superficie a lo largo del eje. Bajo condiciones del rodamiento y también las interacciones que pueden presentarse de forma estacionaria cuando permanece fijo el eje. [14]

$$Q_r = f(P_s - P_R) = 2C_l(P_R - P_a) = 2Q_t \quad (3)$$

Los cojinetes hidroestáticos de compresión que en su diseño cuentan con un mayor diámetro en el orificio, son de mayor uso y es importante evitar la obstrucción de estos orificios ya que pueden causar problemas muy complejos en el funcionamiento dinámico del rodamiento, por lo que algunos sistemas usan micro filtros de protección en el circuito del fluido, como también los tiempos necesarios de recambio del mismo. En la figura 6, se observa la condición de un cojinete con un fluido incompresible y un fluido laminar sin fuerza de movimiento. [15]

**Figura 6.** Fluido Laminar sin inercia vs fluido incompresible



El análisis presentado muestra algunos parámetros que se deben considerar en los rodamientos hidroestáticos en cuanto aspectos físicos y el comportamiento dentro de la rigidez derivada estática. Las condiciones en otras frecuencias pueden producir cambios en la interacción de la rigidez y la amortiguación de fuerzas. La compresión del fluido tendrá sus características de desempeño en función de las dimensiones de la cavidad y la velocidad de las condiciones hidrodinámicas sobre la superficie del diseño y considerar las interacciones de las fuerzas hidroestáticas y también hidrodinámicas. [16]

## Resultados

Se presentan algunas soluciones propuestas para mejorar el desempeño de la estabilidad del rodamiento en las condiciones hidrodinámicas en los cojinetes hidroestáticos para eliminar las condiciones de Reynolds mediante el fluido que circula por las cavidades del rodamiento, las cuales son las siguientes:

- El uso de superficies en los apoyos del rodamiento que permiten diseñar una zona texturizadas con esto se logra conseguir una reducción de los coeficientes de acoplamiento entre la fricción de las superficies.
- Realizar cambios geométricos en los rodamientos específicamente en las cavidades para lograr una reducción de la desviación de la rigidez en la superficie; lo que se consigue con este diseño una estabilidad al direccionar a la rigidez hacia una menor área de la superficie en el rodamiento.
- Dentro de los cojinetes hidroestáticos que tienen como medio de lubricación el aire permite se recomienda el uso de una plataforma basculante de pivote del tipo flexión, aunque su diseño y funcionamiento es complejo se adapta de una mejor manera en turbomáquinas de velocidad con este tipo de rodamientos.
- La necesidad de incrementar mayores estudios en este tipo de rodamientos y la aplicación de diferentes modelos matemáticos que estudien el contacto en las superficies del cojinete y el área de contacto consideran el caudal del medio hidráulico.

## Conclusiones

Este trabajo ha recopilado algunas de las condiciones de interacción y diseño de rodamientos para ambientes hidroestáticos y rodamientos de diseño con cavidades que logran un mejor desempeño. Muchos de los estudios presentados en esta revisión consideran la capacidad de carga del rodamiento, además de correlacionar las propiedades de los fluidos sobre la película de aceite que se forma entre las superficies.

También se considera que al comportamiento de un fluido no newtoniano desafía a su ecuación ya definida debido a interacciones que actualmente están siendo considerada en la hipótesis del comportamiento del fluido.

## Referencias

1. G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
2. N. Patir, H.S. Cheng Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces *Journal of Lubrication Technology*, 78 (Lub-78) (1978)
3. S.C. Lee, N. Ren Behaviour of elastic–plastic rough surface contacts as affected by surface topography, load, and material hardness *Tribology Transactions*, 39 (1) (1996), pp. 67-74
4. E. Dragoni, A. Strozzi
5. Mechanical analysis of a flat, deformable layer underlain by a rigid foundation and indentation by a paraboloidal punch M.H. Aliabadi, C.A. Brebbia (Eds.), *Contact mechanics: computational techniques*, Computational Mechanics Publications, Southampton (1993).
6. Zienkiewicz OC, Taylor RL. *The finite element method, volume1: the basis*, 5th ed. Butterworth and Heinemann; 2000 ISBN0-7506-5049-4.
7. van Beek A, van Ostayen RAJ. Analytical solution for tilted hydrostatic multi-pad thrust bearings of infinite length. *Tribology International* 1997;30(1):33–9
8. Ron A.J. van Ostayen, Anton van Beek, Mink Ros, A mathematical model of the hydro-support: an elasto-hydrostatic thrust bearing with mixed lubrication, *Tribology International*, Volume 37, Issue 8, 2004, Pages 607-616.

9. A.N. Gent, P.B. Lindley The compression of bonded rubber blocks Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 173 (3) (1959), pp. 111-117.
10. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor The finite element method, volume 1: the basis (5th ed), Butterworth and Heinemann (2000) ISBN 0-7506-5049-4.
11. C. Wu, L. Zheng An average Reynolds equation for partial film lubrication with a contact factor Journal of Tribology, 111 (1989), pp. 188-191.
12. G. Liu, Q. Wang, C. Lin A survey of contact models for simulating the contact between rough surfaces Tribology Transactions, 42 (3) (1999), pp. 581-591.
13. N. Patir, H.S. Cheng An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication Journal of Lubrication Technology, 100 (January) (1978), pp. 12-17
14. Manring, ND, Johnson, RE, Cherukuri, HP. The impact of linear deformations on stationary hydrostatic thrust bearings. J Tribol: T ASME 2002; 124: 874–877.
15. Singh, UP, Gupta, RS, Kapur, VK. On the steady performance of hydrostatic thrust bearing: Rabinowitsch fluid model. Tribol T 2011; 54: 723–729.
16. Hesselbach, J, Abel-Keilhack, C. Active hydrostatic bearing with magnetorheological fluid. J Appl Phys 2003; 9: 8441–8443.
17. Horvat, FE, Braun, MJ. Comparative experimental and numerical analysis of flow and pressure fields inside deep and shallow pockets for a hydrostatic bearing. Tribol T 2011; 54: 548–567.
18. Bai, X, Zhang, S, Cai, H. Characteristics of spherical hydrostatic supporting system for floated inertial platform. Tribol Int 2015; 90: 287–296.
19. Li, J, Chen, H. Evaluation on applicability of Reynolds equation for squared transverse roughness compared to CFD. J Tribol: T ASME 2007; 129: 963–967.

© 2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)  
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)