



Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach

Laurent, Alexis; Dal Maso, Mirko; Wang, Xiao; Zhu, Xianli; Prata Dias, Gabriela

Publication date:
2020

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Laurent, A., Dal Maso, M., Wang, X., Zhu, X., & Prata Dias, G. (2020). *Environmental sustainability of data centres: A need for a multi-impact and life cycle approach.*

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

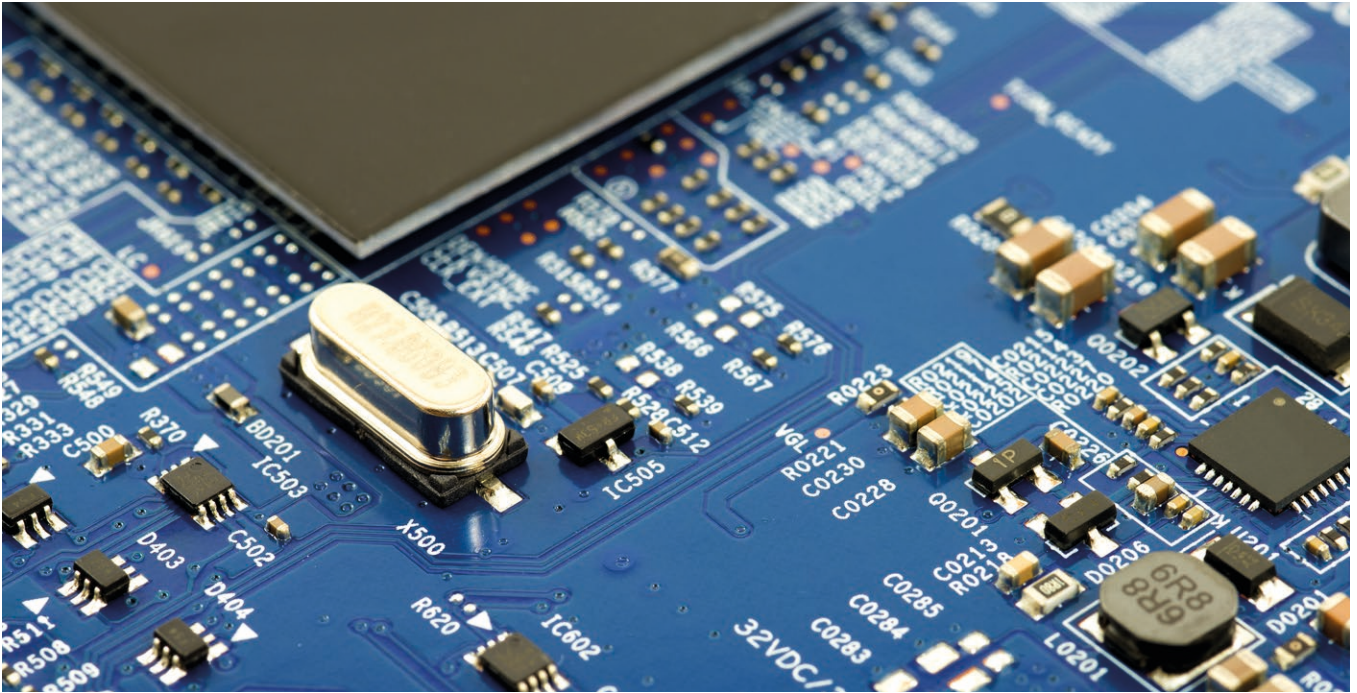


INFORME 1

Sostenibilidad ambiental de los centros de datos: Necesidad de un enfoque de impacto múltiple y ciclo de vida

MENSAJES CLAVE

- La preocupación por el uso energético de los centros de datos y sus impactos asociados en el cambio climático han atraído esfuerzos para reducir la demanda de energía operacional de los centros de datos.
- El foco puesto en la reducción del impacto en el cambio climático derivado de las operaciones de los centros de datos puede pasar por alto los efectos ambientales de otras etapas de su ciclo de vida, como la extracción de las materias primas, la fabricación de los equipos, la construcción de los centros de datos, el fin de la vida útil de los equipos y de los edificios donde se encuentran.
- Para apoyar el diseño sostenible de los centros de datos, se necesitan evaluaciones más completas sobre su sostenibilidad ambiental, que abarquen todo el ciclo de vida e incluyan un amplio espectro de problemas ambientales.
- En el presente informe se utilizan ejemplos para mostrar los importantes impactos ambientales de los centros de datos, derivados de otras etapas del ciclo de vida que no sean sus operaciones, y se pide que se utilice un análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar y abordar esos impactos.



1. ANTECEDENTES: LA CRECIENTE IMPORTANCIA DE LOS CENTROS DE DATOS EN LA SOCIEDAD

En las últimas dos décadas, la dependencia de las sociedades de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) ha aumentado exponencialmente. El tráfico de Internet por sí solo ha pasado de 60 PB en 1997 a 1,1 ZB en 2017 (es decir, un factor de crecimiento de 20.000)ⁱ. Tomando el cuerpo humano como analogía, entre los principales componentes de las TIC figuran los centros de datos, que podrían asimilarse al cerebro, mientras que las redes y los dispositivos de los usuarios podrían considerarse como el esqueleto y los brazos de las TIC. Los centros de datos cumplen la función clave de almacenar, salvaguardar y procesar datos. Tras el crecimiento y la diversificación de las TIC, éstas han evolucionado desde servicios informáticos de las empresas, que consisten en unos pocos servidores en un armario, hasta los sistemas a hiperescala de cientos de miles de metros cuadrados que proporcionan el apoyo necesario para el crecimiento exponencial de Internet, las redes sociales y las sucesivas generaciones de dispositivos electrónicos.

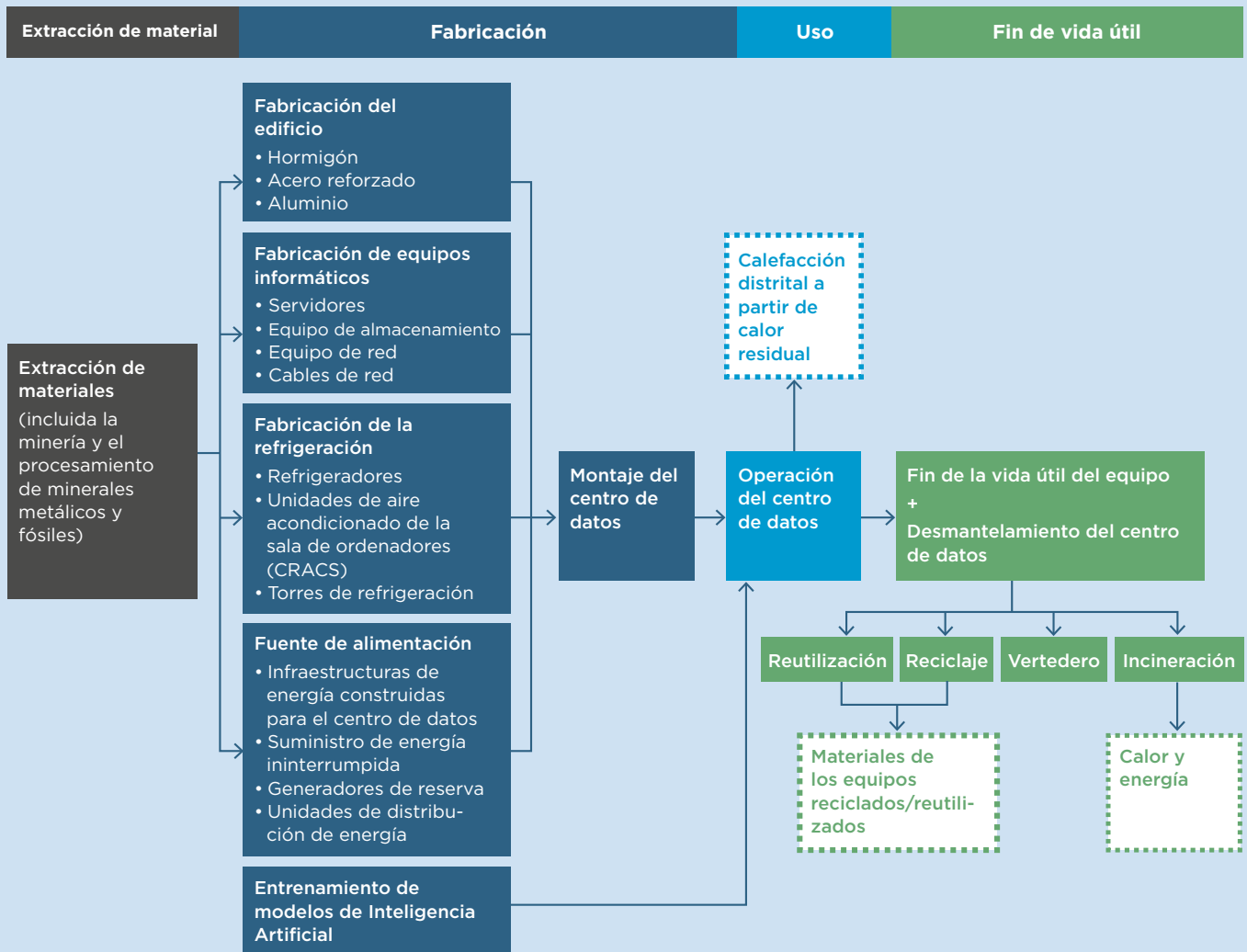
Según las estimaciones actuales, los centros de datos utilizan aproximadamente 200 TWh de electricidad al año, lo que representa aproximadamente el 1% de la demanda mundial de electricidad. Se prevé que para 2030 las TIC representarán más del 20% de la demanda mundial de electricidad, y que un tercio procederá de los centros de datos. El importante papel de los centros de datos en las sociedades futuras y su elevada demanda de energía exigen medidas urgentes para abordar su sostenibilidad ambiental, incluida su contribución al cambio climático

a otros posibles problemas ambientales, como el agotamiento de los recursos. Este paso es esencial para prever y asegurar un desarrollo ambientalmente sostenible de los centros de datos a largo plazo.

2. ESFUERZOS EXISTENTES PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD DE LOS CENTROS DE DATOS CENTRADOS EN EL USO DE LA ENERGÍA DURANTE LAS OPERACIONES

Enfoque principal en el consumo de electricidad. La continua (24/7) y alta demanda de electricidad de los equipos de los centros de datos, y las frecuentes ramificaciones de contribución al cambio climático resultantes, han orientado las medidas a frenar principalmente el consumo de energía durante la fase de operación del edificio. Así pues, los esfuerzos se han centrado en mejorar la eficiencia energética, en particular abordando la elevada demanda de energía de tres importantes componentes de los centros de datos: El equipo informático, el sistema de refrigeración y el sistema de suministro de energía.^{ii y iii} Entre los ejemplos de esos esfuerzos cabe citar la sustitución de los chips y servidores para aumentar la eficiencia operacional, el aprovechamiento del calor de los servidores para calefacción distrital, el uso de refrigeración gratuita a base de aire y agua, el paso a sistemas a hiperescala, la refrigeración de los servidores con materiales aislantes y el uso de la inteligencia artificial para regular el sistema de refrigeración de los centros de datos. Más allá de la eficiencia energética, los gigantes de las TIC, como Google, Microsoft y Facebook, también han comenzado a incrementar el uso de energías renovables para alimentar las operaciones de sus centros de datos.

Ilustración 1. Ilustración simplificada del ciclo de vida de un centro de datos.



Las casillas punteadas indican la recuperación de materiales y energía que sustituyen a los medios convencionales para proporcionarlos; por ejemplo, el calor residual producido por las operaciones de los centros de datos puede capturarse y distribuirse a los clientes cercanos, como casas, oficinas, piscinas o invernaderos, y así evitar la generación y distribución de calor de otras fuentes como la combustión de gas natural.

Obsérvese que los servicios de apoyo que tienen lugar a lo largo del ciclo de vida, como el transporte y el suministro de energía necesarios, no aparecen en la figura, aunque forman parte integrante del ciclo de vida del sistema.

Parámetros de evaluación y monitorización utilizados. Se han elaborado varios parámetros para evaluar cuantitativamente y hacer un seguimiento del rendimiento sostenible de los centros de datos. La mayoría de ellos se centraron en la eficiencia energética y la energía renovable, incluyendo no sólo el sistema informático sino también la fuente de energía para refrigeración y potencia^{iv}. Una medida ampliamente utilizada es la Eficacia de Uso de Potencia (PUE, por su sigla en inglés), que mide la relación entre la potencia utilizada por el equipo informático y la potencia suministrada al centro de datos. Más recientemente, la industria de las TIC ha comenzado a examinar otras mediciones de la eficiencia más allá del problema exclusivo de la energía, utilizando la Eficiencia en el Uso del Carbono (CUE, por su sigla en inglés) y la Eficiencia en el Uso del Agua (WUE, por su sigla en in-

glés) para medir el rendimiento en el uso del carbono y el agua durante las operaciones del centro de datos, respectivamente^v.

Limitaciones de las acciones pasadas y actuales, y el camino a seguir. Todas las medidas y mediciones mencionadas se relacionan con las operaciones de los centros de datos y adoptan una perspectiva limitada, con el uso de mediciones centradas principalmente en las necesidades de energía y, en menor medida, en las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso del agua. Sin embargo, la sostenibilidad ambiental va más allá de esas cuestiones, ya que requiere incluir también los daños a los ecosistemas, la salud humana y una amplia gama de impactos a los recursos naturales, como la toxicidad ejercida por las emisiones de productos químicos al me-



dio ambiente. Por consiguiente, estas medidas pasadas y actuales pasan por alto aspectos potencialmente importantes relativos a la sostenibilidad de los centros de datos, como los problemas ambientales que pueden ir más allá de las operaciones y que se derivan de la construcción, el transporte y el final de la vida útil de sus diferentes componentes. Para abarcarlas y permitir una evaluación completa de la sostenibilidad ambiental, se requiere una perspectiva de ciclo de vida y de impacto múltiple.

Esa perspectiva puede proporcionarse mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), normalizada por la ISO, que permite cuantificar una gran variedad de impactos ambientales^a asociados a productos, tecnologías o sistemas tomados desde una perspectiva de ciclo de vida. El ciclo de vida de un centro de datos incluye todas las actividades y procesos: desde la extracción de las materias primas necesarias, pasando por la fabricación de sus componentes y su construcción, así como las operaciones a lo largo de su vida útil, hasta su puesta fuera de servicio y el final de su vida útil, que engloba la eliminación y la posible recuperación de materiales y energía. La Ilustración 1 representa el ciclo de vida simplificado de un centro de datos típico.

En los últimos años, los requisitos de la norma ISO 14044 que enmarcan la conducta del ACV han servido de base para la elaboración de dos documentos de orientación destinados a las aplicaciones a los bienes y servicios del sector de las TIC: el Data Centre Life Cycle Assessment

Guidelines desarrollado por The Green Grid^{vi}, y el documento de orientación publicado por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI)^{vii}. La Comisión de la UE ha señalado el uso del Análisis de Ciclo de Vida como opcional y con prioridad media en su Código de Conducta para la Eficiencia Energética de los Centros de Datos, actualmente aplicable, que se centra en proporcionar orientación para mejorar la eficiencia energética de los centros de datos. La sección siguiente tiene por objeto demostrar que ese campo podría reforzarse y que, por lo tanto, se necesitan evaluaciones de la sostenibilidad ambiental más completas.

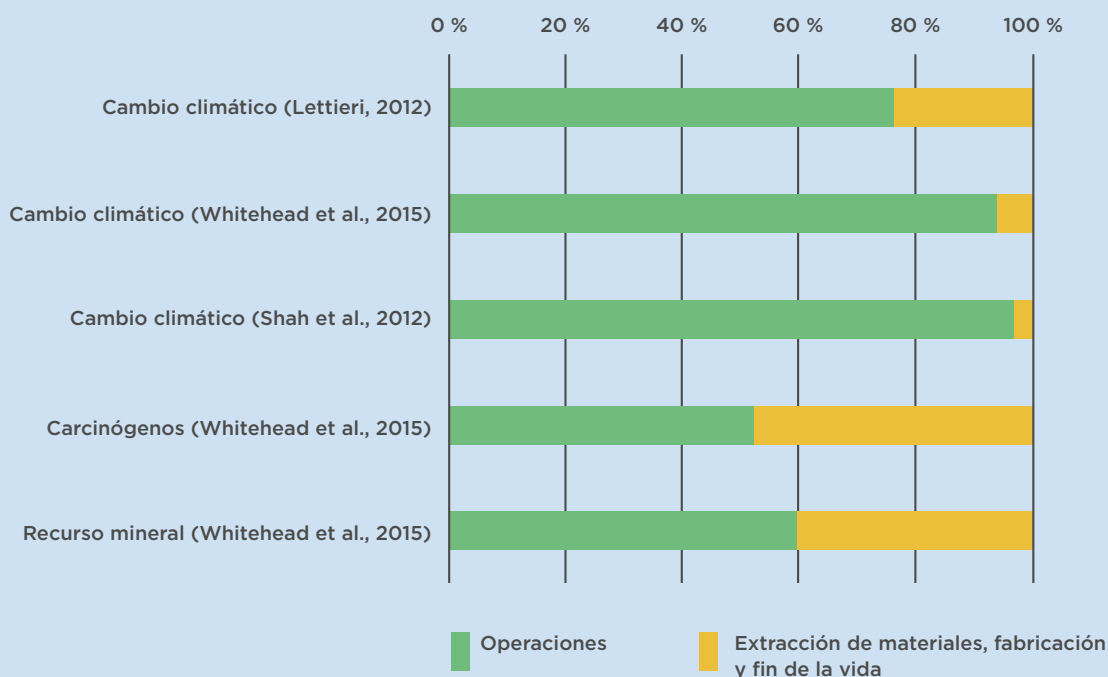
3. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA GARANTIZAR UNA PERSPECTIVA SISTÉMICA Y DE IMPACTO MÚLTIPLE

Importancia de la perspectiva del ciclo de vida. La inclusión de todo el ciclo de vida de los centros de datos es esencial para evitar que la carga ambiental se desplace de una etapa del ciclo de vida del sistema a otra, o de un componente a otro.

Un ejemplo es el paso de los combustibles fósiles a fuentes renovables como la fotovoltaica o las turbinas eólicas, donde la reducción de los impactos ambientales durante el funcionamiento del sistema (no hay combustión durante la generación de electricidad) no significa que éste sea el caso a lo largo de todo el ciclo de vida, ya que la producción y fabricación de los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas pueden estar asociadas a impactos potencialmente importantes, como la contaminación química y la escasez de metales^{xii}.

^a Por ejemplo, el cambio climático, el agotamiento de los recursos, la eco-toxicidad, la eutrofización, el consumo de agua, el uso de la tierra, la toxicidad para los seres humanos, el agotamiento del ozono, las radiaciones ionizantes, etc.

Ilustración 2. Contribuciones del ciclo de vida a determinados impactos ambientales asociados a los centros de datos.



Notas: Lettieri (2012)^x ha evaluado un centro de datos ficticio con una potencia media de 1,3 MW situado en el norte de California. Whitehead y otros (2015)^x han estudiado un centro de datos existente situado en el Reino Unido con una potencia media de 13 MW.

El centro de datos analizado por Shah y otros (2012)^{xi} era un centro de datos de producción real de una compañía de seguros con una potencia media de 1,8 MW.

Sólo se han realizado unos pocos estudios de ACV en centros de datos, pero sus resultados ya demuestran la pertinencia de adoptar un enfoque del ciclo de vida que abarque múltiples impactos ambientales. En estos estudios, las operaciones del centro de datos provocan una serie de impactos ambientales, como el cambio climático (véase la Ilustración 2), debido a la elevada demanda de electricidad de los sistemas informáticos y de refrigeración que se satisface principalmente mediante la combustión de combustibles fósiles. Sin embargo, en el caso de algunos problemas ambientales, los impactos derivados de las etapas previas y posteriores al funcionamiento del centro de datos son tan importantes como los impactos derivados de las operaciones (véase la Ilustración 2). Por ejemplo, el equipo de los centros de datos requiere la extracción de materiales, la fabricación y la eliminación de grandes cantidades de metales. Estos procesos pueden dar lugar a problemas de disponibilidad de recursos y a una posible contaminación por metales pesados que, a su vez, puede causar importantes daños de toxicidad a los ecosistemas y a la salud humana. Decisiones como el aumento de la frecuencia de sustitución de los servidores para aumentar la eficiencia energética durante el funcionamiento de los centros de datos, dan lugar a un aumento de consumo de materiales y esfuerzos de fabricación y, por consiguiente, dan lugar a que la carga ambiental pase de la etapa de funcionamiento a las demás etapas del ciclo de vida.

En general, la contribución de la etapa de operación a los impactos ambientales debe considerarse con cautela, ya que varios parámetros específicos del sitio pueden influir en ella. Como se insinuó en uno de los estudios^x, la mezcla de energías de la red eléctrica puede tener una fuerte influencia en los impactos ambientales del ciclo de vida de los centros de datos. En la Ilustración 2, los tres estudios existentes se han realizado en lugares donde las mezclas de energías de la red eléctrica incluían grandes proporciones de combustibles fósiles.

Sin embargo, se pueden prever distribuciones muy diferentes de los impactos ambientales entre la etapa de operación y las demás etapas del ciclo de vida de los centros de datos cuando éstos se encuentran en un país con una combinación de redes basadas en energías renovables, por ejemplo, Noruega o Islandia con una generación de electricidad basada virtualmente en un 100% en energías renovables.

En sus esfuerzos por reducir eficazmente la contribución de los centros de datos a los efectos ambientales como el cambio climático, los interesados deberían, pues, examinar cuidadosamente el tipo de fuentes de energía que abastece la demanda de electricidad y los lugares seleccionados para construir los centros de datos, además de centrarse en el aumento de la eficiencia energética.



Importancia de una perspectiva de impacto múltiple.

Incluso en un entorno en el que la demanda de electricidad se satisficiera con fuentes de energía renovables, quedaría por abordar una serie de impactos ambientales adicionales, lo que exigiría abarcar todos los problemas posibles al evaluar la sostenibilidad ambiental de los centros de datos. Como puede verse en la Ilustración 2, los efectos relacionados con componentes carcinógenos en la producción de equipo informático, incluida la extracción de los materiales necesarios, son un ejemplo de ese problema ambiental. Como se mencionó anteriormente, el uso de los recursos minerales es otro aspecto importante que hay que evaluar. Además, durante el funcionamiento de los centros de datos, se necesitan cantidades importantes de agua para la refrigeración de los servidores. El uso del agua puede causar problemas de disponibilidad en el entorno local (escasez para los ecosistemas, el consumo humano y otros sectores competidores como la agricultura), así como posibles daños a los ecosistemas por la contaminación térmica al devolverse el agua a los ríos a una temperatura más elevada.

Varios equipos de los centros de datos contienen muchos componentes metálicos y necesitan grandes aportaciones de metal durante la etapa de producción. El aumento exponencial de la capacidad de los centros de datos mundiales puede dar lugar a una demanda creciente de determinados metales y materiales no metálicos, incluidos los minerales de tierras raras, que también son materiales clave en otros sectores (por ejemplo, en el sector de la energía eólica) y, por lo tanto, puede dar lugar a problemas de disponibilidad. Las iniciativas para hacer

frente a esa escasez de materiales pueden consistir en mejorar la eficiencia de los materiales durante la fabricación del equipo o aumentar la reutilización y el reciclado de los materiales al final de la vida útil del equipo.

Para poner a prueba e identificar estas y otras posibles medidas de mitigación (por ejemplo, la integración de iniciativas de economía circular, medidas de diseño ecológico, incentivos para la provisión de energías renovables, etc.) y sus repercusiones de gran alcance, se debería utilizar la ACV, con lo que se prestaría apoyo a los encargados de formular políticas y adoptar decisiones para diseñar estrategias a largo plazo para los futuros centros de datos sostenibles.

4. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Requerimiento de datos. Realizar un ACV puede requerir una cantidad significativa de tiempo y recursos. Para facilitar esas evaluaciones, las bases de datos de ACV contienen miles de procesos que pueden constituir un punto de partida útil y permiten a los usuarios centrar la recopilación de datos en los procesos clave y mejorar iterativamente la precisión de los resultados. Si bien las bases de datos de acceso público no parecen ofrecer todavía un nivel de detalle adecuado para modelar el ciclo de vida de un centro de datos, pueden utilizarse bases de datos como las de GaBi^{xii} o Ecoinvent^{xiii}, que contienen varios procesos relevantes para la industria de las TIC. Para seguir el ritmo al rápido crecimiento de los centros de datos y de las crecientes preocupaciones en torno a

sus impactos ambientales, se espera que la disponibilidad de los procesos pertinentes en las bases de datos de ACV siga mejorando.

Consideraciones para los países en desarrollo. Pese a que la mayoría de los centros de datos están situados en América del Norte y Europa, la presencia en los países en desarrollo también está aumentando, aunque en una escala mucho menor. Los problemas que frenan la instalación de los centros de datos en los países en desarrollo pueden atribuirse a la escasez de conocimientos técnicos para construir y dirigir su funcionamiento, y a la falta de infraestructuras de apoyo adecuadas, incluidos el suministro de energía y de agua. La falta de infraestructuras fiables no sólo puede obstaculizar la instalación de los centros de datos. También puede ser a expensas de su sostenibilidad. Este podría ser el caso, por ejemplo, de los países con una red nacional que depende en gran medida de los combustibles fósiles, los problemas relacionados con los altos niveles de estrés hídrico y los débiles sistemas de gestión de desechos electrónicos. Al mismo tiempo, en los casos en que se construyan infraestructuras específicas (por ejemplo, nueva potencia energética) con el único propósito de suministrar a los centros de datos, se corre el riesgo de desviar las medidas necesarias destinadas a satisfacer las necesidades básicas locales (por ejemplo, la falta de acceso a la electricidad). No obstante, no debe subestimarse la posibilidad de que los centros de datos sean un catalizador positivo para mejorar las infraestructuras de manera que beneficien el desarrollo sostenible de las comunidades locales. Adoptar un enfoque holístico de la sostenibilidad social, ambiental y económica, y asegurar que las mejores prácticas aplicadas en los países desarrollados se transfieran e integren en los países en desarrollo, es fundamental para que los centros de datos puedan llegar a ser sostenibles, independientemente del lugar en que se construyan.

Ir más allá de la eco-eficiencia. La historia ha demostrado que las mejoras de la eficiencia de la tecnología suelen estar asociados a un aumento de la demanda o del uso de esa tecnología debido a los efectos de rebote, lo que en general hace que disminuya la eficacia. Los centros de datos parecen ir por ese camino, y es probable que las ganancias previstas en eficiencia ecológica por sí solas no puedan contrarrestar el aumento del uso de los centros de datos, caracterizado por su aumento previsto del consumo de electricidad en un factor de 3 a 8 entre 2019 y 2030 (suponiendo las hipótesis del mejor y el peor caso en las actuales proyecciones energéticas)^{xiv}. Por consiguiente, al evaluar los sistemas tecnológicos de rápida evolución, como los centros de datos, es necesario tener en cuenta tanto las perspectivas de eco-eficiencia como de eco-eficacia^{xv}. La ACV es una metodología am-



pliamente utilizada para evaluar la primera en su capacidad de diferenciar cuál de las diversas alternativas de productos o sistemas se asocia con los menores impactos ambientales. Todavía no aborda la segunda.

Para abordar la cuestión de la eco-eficacia, debemos adoptar una perspectiva amplia para captar las interacciones dinámicas de los centros de datos o por extensión de todo el sector de las tecnologías de la información y comunicaciones con otros sistemas, incluidos los posibles efectos rebote. Por ejemplo, se debe tener en cuenta la posible adición o desplazamiento de la capacidad de la instalación eléctrica como consecuencia del creciente uso de las TIC (y la demanda de energía). Al mismo tiempo, debemos relacionar los efectos mundiales de los centros de datos con los límites mundiales o umbrales de sostenibilidad, que representan el máximo nivel de efectos ambientales que podemos permitirnos para dar cabida a los recursos finitos de la Tierra y no exceder las capacidades de sustentación del planeta ni comprometer los sistemas de apoyo a la vida en la Tierra. Varios enfoques científicos han definido esos umbrales, como el marco de los límites planetarios^{xvi} el marco de la huella ecológica^{xvii} o la definición de objetivos de sostenibilidad absolutos como el destinado a mantener la temperatura media mundial por debajo de 1,5°C por encima de los niveles preindustriales (formalizado por el Acuerdo París). En la actualidad, sigue habiendo dificultades para traducir estos objetivos al nivel de los centros de datos, donde podrían servir como puntos de referencia al evaluar la huella ambiental mundial y, en última instancia, ayudar a definir qué es un centro de datos ambientalmente sostenible y qué se necesitaría para alcanzarlo.

AGRADECIMIENTOS

AUTORES

Alexis Laurent

División de Evaluación Cuantitativa de la Sostenibilidad, Departamento de Tecnología, Gestión y Economía, Universidad Técnica de Dinamarca (DTU)

Mirko Dal Maso

Asociación PNUMA DTU (UNEP DTU Partnership), Departamento de Tecnología, Gestión y Economía de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU)

También han contribuido a esta publicación:
Xiao Wang, Xianli Zhu y Gabriela Prata Dias.

El Centro de Copenhague para la Eficiencia Energética (**The Copenhagen Centre on Energy Efficiency**) funciona como el centro temático mundial de eficiencia energética de Energía Sostenible para Todos (SEforALL) y, en consecuencia, trabaja directamente para apoyar el objetivo del SEforALL de duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética para 2030.

El Centro de Copenhague cumple su misión a través de:

- La ayuda al cambio de políticas en países y ciudades, mediante desarrollo del conocimiento, análisis y apoyo técnico
- La aceleración la acción mediante la innovación en el desarrollo y financiación de proyectos
- La elevación del perfil de la eficiencia energética mediante la comunicación de soluciones exitosas y del apoyo a la divulgación.

Para más información, por favor visite www.energyefficiencycentre.org o contáctenos a través de c2e2@dtu.dk.

En relación a nuestro trabajo acerca de los Centros de Datos Sostenibles y Energía Inteligente, por favor contacte con Xiao Wang en xwang@dtu.dk

Visite el Sistema de Gestión de Conocimiento del Centro de Copenhague (KMS) en kms.energyefficiencycentre.org

El Centro de Copenhague para la Eficiencia Energética institucionalmente forma parte de la Asociación entre DTU y el PNUMA (UDP). UDP es un Centro de Colaboración del PNUMA y una destacada institución internacional de asesoramiento en materia de investigación sobre energía, clima y desarrollo sostenible.

NOTAS FINALES

- i Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*, 561(7722), 163–166. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06610-y>
- ii Arlitt, M., Bash, C., Blagodurov, S., Chen, Y., Christian, T., Gmach, D., Zhou, R. (2012). Towards the design and operation of net-zero energy data centers. *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm*, 552–561. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231479>
- iii Flucker, S., Whitehead, B., & Tozer, R. (2017). Minimising Data Centre Environmental Impact – Beyond Energy Efficiency. *Proceedings of CIBSE Technical Symposium 2017, (April)*, 1–11. <https://dc-oi.com/publications/>
- iv Shah, A., Bash, C., Sharma, R., Christian, T., Watson, B. J., & Patel, C. (2011). Evaluating life-cycle environmental impact of data centers. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, 133(3), 1–9. <https://doi.org/10.1115/1.4004096>
- v Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G. (2014). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.021>
- vi The Green Grid. (2012). *Data Centre Life Cycle Assessment Guide- lines*. <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/236-Data-Center-Life-Cycle-Assessment-Guide-lines>
- vii ETSI. (2015). *Environmental Engineering (EE); Methodology for environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Information and Communication Technology (ICT) goods, networks and services*, 1, 1–167. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203100_203199/203199/01.03.01_60/es_203199v010301p.pdf
- viii Laurent A., Olsen S.I., Hauschild M.Z., 2012. Limitations of carbon footprint as indicator of environmental sustainability. *Environmental Science and Technology* 46, 4100–4108
- ix Lettieri, D. J. (2012). *Expeditious Data Center Sustainability, Flow, and Temperature Modeling: Life-Cycle Exergy Consumption Combined with a Potential Flow Based, Rankine Vortex Superposed, Predictive Method*. <https://escholarship.org/uc/item/9p-f8k8wk>
- x Whitehead, B., Andrews, D., & Shah, A. (2015). The life cycle assessment of a UK data centre. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 332–349. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0838-7>
- xi Shah, A., Chen, Y., & Bash, C. E. (2012). Sources of variability in data center lifecycle assessment. *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSST.2012.6227975>
- xii GaBi database, <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2016-lci-documentation/extension-data-base-xi-electronics/>
- xiii Ecoinvent database, <https://www.ecoinvent.org/database/data-base.html>
- xiv Andrae, A., & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- xv Hauschild MZ (2015) Better – but is it good enough? On the need to consider both eco-efficiency and eco-effectiveness to gauge industrial sustainability. *Procedia CIRP* 29, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.126>
- xvi Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J.,... Sorlin, S. (2015). Plan-etary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- xvii Global Footprint Network. <https://www.footprintnetwork.org/>