

PNAV

PROGRAMA NACIONAL
DE ALGORITMOS
VERDES

Guía de buenas prácticas Infraestructuras sostenibles



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



MINISTERIO
PARA LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL
Y DE LA FUNCIÓN PÚBLICA



Plan de
Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



ENIA
AGENCIA EUROPEA DE
INTELIGENCIA
ARTIFICIAL

España | digital

20
26



Financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU. Sin embargo, los puntos de vista y las opiniones expresadas son únicamente los del autor o autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea o la Comisión Europea. Ni la Unión Europea ni la Comisión Europea pueden ser consideradas responsables de las mismas

Índice

La energía en centros de datos	3
1. Suministro energético sostenible	4
1.1. Factores clave en la contratación de energía verde	4
1.2. Relevancia de la ubicación geográfica del CPD.....	5
1.3. Selección de proveedores y servicios energéticamente eficientes	6
1.4. Eficiencia de los Centros de Datos	8
2. Sostenibilidad energética.....	8
2.1. Cogeneración energética	9
2.2. Resiliencia energética sostenible.....	10
Procedimiento de instalación y despliegue de hardware	11
3. Transporte medioambientalmente responsable	12
4. Cableado	13
4.1. Principios de sostenibilidad en el cableado	13
4.2. Diseño sostenible.....	13
4.3. Elección de conectores	14
4.4. Optimización del cableado.....	14
5. Despliegue del hardware	15
5.1. Distribución física de servidores	15
5.2. Sistemas de refrigeración	17
5.3. Mantenimiento y reparación de componentes.....	18
5.4. Evaluación y criterios de selección del hardware	20

La energía en centros de datos

1. Suministro energético sostenible

1.1. Factores clave en la contratación de energía verde

La contratación de energía verde constituye uno de los elementos esenciales para reducir el impacto ambiental de los centros de datos que soportan infraestructuras de inteligencia artificial. Más allá de una decisión de carácter reputacional, representa un factor crítico para garantizar la alineación con los objetivos de descarbonización de la Unión Europea y con las metas establecidas en el Acuerdo de París.

Al seleccionar un suministro energético sostenible, deben considerarse los siguientes factores clave:

- **Garantías de origen (GO):** Es fundamental que la energía contratada esté respaldada por certificados oficiales que acrediten su procedencia renovable. La Directiva (UE) 2018/2001 establece el marco de referencia para el uso de garantías de origen de electricidad renovable en la Unión Europea.
- **Adicionalidad:** No basta con adquirir certificados de energía ya producida. Se recomienda priorizar acuerdos de compra de energía (PPA, *Power Purchase Agreements*) que fomenten la inversión en nuevas instalaciones renovables, contribuyendo así a la expansión de capacidad limpia.
- **Estabilidad y resiliencia del suministro:** La fiabilidad del suministro debe ser evaluada en términos de seguridad energética. Contratar energía a proveedores que integren almacenamiento renovable (baterías, hidrógeno verde) **aporta resiliencia al asegurar un suministro firme y continuo incluso cuando la generación renovable es intermitente.** Esta resiliencia se ve reforzada en la operación crítica de los centros de datos cuando se combina con almacenamiento local (BESS, UPS, fuel cells) y con redundancia en los puntos de conexión a la red de distribución.
- **Integración con el mix energético local:** La ubicación del CPD influye en la disponibilidad de energías renovables locales (solar, eólica, hidroeléctrica) y en la eficiencia de su integración en la red. El estándar ITU-T L.1300 enfatiza la importancia de evaluar la ubicación en relación con el mix renovable disponible.
- **Coste nivelado de la energía (LCOE):** Es necesario equilibrar sostenibilidad y viabilidad económica. Los contratos deben valorar el coste total de la energía en función de su origen, estabilidad y previsibilidad a largo plazo.

- **Transparencia y certificaciones adicionales:** Además de las garantías de origen, conviene priorizar proveedores con certificaciones como **ISO 50001 (Gestión de la energía)** o adhesión a iniciativas globales (ej. RE100), que acrediten un compromiso sostenido con la sostenibilidad energética.

En conjunto, la contratación de energía verde debe pasar de un enfoque meramente formal (compra de certificados) hacia un modelo estratégico basado en contratos de largo plazo, adicionalidad y resiliencia, alineado con los objetivos de neutralidad climática europeos para 2050.

1.2. Relevancia de la ubicación geográfica del CPD

La ubicación geográfica de un centro de procesamiento de datos (CPD) constituye un factor determinante tanto en el impacto ambiental de la instalación como en la viabilidad económica y operativa de la infraestructura. Este aspecto está directamente ligado al principio de *Green by Design*, ya que una adecuada selección de emplazamiento permite reducir de manera estructural la huella de carbono y la dependencia de recursos externos.

Los principales factores a considerar son:

- **Mix energético de la región:**
El porcentaje de energías renovables presentes en la red eléctrica local es un criterio clave. Un CPD ubicado en un país o región con elevada penetración de fuentes renovables (eólica, hidroeléctrica, solar) tendrá un impacto de carbono significativamente menor que otro situado en áreas con alta dependencia de combustibles fósiles.
- **Disponibilidad de energías renovables in situ:**
La posibilidad de integrar generación renovable local (ej. parques solares adyacentes, acceso a energía hidroeléctrica) aporta mayor control sobre la sostenibilidad y reduce riesgos de *greenwashing* asociados al simple uso de certificados de origen.
- **Condiciones climáticas y refrigeración natural:**
La climatología local influye directamente en las necesidades energéticas para refrigeración. Emplazamientos en climas fríos permiten aprovechar estrategias de *free cooling*, reduciendo la dependencia de sistemas de climatización activos y, por tanto, el consumo energético total del CPD.
- **Acceso a infraestructuras de red y logística sostenible:**
La eficiencia no debe evaluarse únicamente en términos de energía, sino también

considerando el transporte de hardware, el acceso a conectividad de baja latencia y la proximidad a grandes nodos de consumo. Una localización que minimice la huella de transporte y optimice la conectividad contribuye a la sostenibilidad global de la instalación.

- **Riesgos geopolíticos y de suministro energético:**

La estabilidad regulatoria y la resiliencia de la red local son elementos críticos. Un CPD en un entorno con incertidumbre política o dependencia de fuentes fósiles importadas puede comprometer la continuidad de negocio y elevar su huella de carbono indirecta.

En definitiva, la ubicación del CPD debe evaluarse no solo en función de costes operativos o latencia, sino como una decisión estratégica que condiciona la capacidad de cumplir con los objetivos de neutralidad climática y resiliencia energética.

1.3. Selección de proveedores y servicios energéticamente eficientes

La selección de proveedores energéticos y de servicios asociados al funcionamiento del CPD debe basarse en criterios que garanticen un impacto real en la sostenibilidad y no únicamente en el cumplimiento formal de certificaciones o garantías de origen. Una elección adecuada contribuye a la reducción de la huella de carbono, la eficiencia operativa y la resiliencia a largo plazo de la infraestructura.

Los aspectos clave a considerar son:

- **Uso de energías renovables:**

Es prioritario seleccionar proveedores que utilicen un alto porcentaje de energías renovables en su mix de generación (solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa sostenible). Además de la contratación de electricidad certificada, conviene favorecer acuerdos a largo plazo (*Power Purchase Agreements*) que aseguren **adicionalidad**, es decir, la creación de nueva capacidad renovable. Este criterio garantiza un impacto tangible en la descarbonización del sistema energético.

- **Certificaciones de gestión ambiental y energética:**

La existencia de sistemas de gestión certificados aporta transparencia y fiabilidad. Se recomienda priorizar proveedores con certificaciones como **ISO 50001 (gestión de la energía)**, **ISO 14001 (gestión ambiental)** o el reglamento europeo **EMAS**, ya que aseguran procesos estandarizados de eficiencia y mejora continua.

- **Eficiencia operativa y métricas verificables:**
Los proveedores deben poder demostrar valores óptimos en indicadores clave como **PUE (Power Usage Effectiveness)** o **WUE (Water Usage Effectiveness)**. Estos parámetros, reconocidos en estándares internacionales, permiten evaluar la eficiencia real en el uso de energía y agua en sus instalaciones.
- **Transparencia y reporting continuo:**
La publicación de informes de sostenibilidad auditados de forma independiente es esencial. Dichos informes deben incluir métricas claras de consumo energético, emisiones de gases de efecto invernadero y evolución hacia objetivos de reducción alineados con las metas climáticas de la Unión Europea.

En conclusión, la selección de proveedores debe responder a un marco de energías renovables, certificación sólida y transparencia efectiva, asegurando que el suministro energético del CPD sea coherente con los principios de sostenibilidad y resiliencia a largo plazo.

En la práctica, la evaluación de proveedores energéticamente eficientes puede estructurarse en base a criterios objetivos, tales como:

- **Origen de la energía:** porcentaje contractual garantizado de electricidad renovable (garantías de origen reconocidas a nivel UE).
- **Certificación y reporting:** disponibilidad de certificaciones como ISO 50001 o auditorías externas de sostenibilidad, y publicación de informes de emisiones verificadas.
- **Modelos de contratación:** existencia de PPAs (*Power Purchase Agreements*) de largo plazo vinculados a generación renovable nueva (*additionality*).
- **Almacenamiento asociado:** integración de almacenamiento renovable (baterías, hidrógeno) que garantice suministro firme.
- **Condiciones de resiliencia:** redundancia en puntos de interconexión y planes de continuidad energética auditados.

1.4. Eficiencia de los Centros de Datos

La eficiencia en los centros de datos debe entenderse como un **criterio transversal en la instalación y despliegue de infraestructuras hardware** más que como un objetivo aislado.

Los elementos clave a considerar son:

- Diseño físico y distribución del hardware:**
 La ubicación de racks, pasillos fríos y calientes, así como la accesibilidad para el mantenimiento, tienen un impacto directo en la eficiencia energética. Una distribución adecuada puede reducir el consumo en refrigeración y optimizar el flujo de aire sin necesidad de sistemas adicionales.
- Selección de componentes eficientes:**
 La elección de procesadores, memoria y almacenamiento debe basarse en criterios de eficiencia energética y análisis de ciclo de vida (LCA). Los equipos con mayor densidad de cómputo por unidad de energía consumida ofrecen ventajas sustanciales en términos de PUE (*Power Usage Effectiveness*).
- Sistemas de refrigeración sostenibles:**
 La eficiencia del CPD está íntimamente ligada a la elección del sistema de refrigeración. Estrategias como el *free cooling* (uso de aire exterior en climas fríos), la refrigeración líquida en circuito cerrado o la reutilización de calor residual deben evaluarse en función de su impacto en el consumo total de energía.
- Gestión energética integrada:**
 La implementación de sistemas de monitorización en tiempo real permite detectar ineficiencias y ajustar dinámicamente el consumo. Esto incluye la gestión inteligente de cargas de trabajo, de forma que el hardware opere en condiciones óptimas y con la mínima energía requerida.

En resumen, la eficiencia de los centros de datos debe abordarse como un **criterio de diseño y despliegue del hardware**, que combine decisiones en la distribución física, la selección de equipos, la refrigeración y el control operativo. De este modo, se cumple con el principio *Green by Design* y se asegura que la eficiencia energética sea un resultado inherente a la infraestructura, y no una corrección posterior.

2. Sostenibilidad energética

2.1. Cogeneración energética

La cogeneración energética en centros de datos consiste en **aprovechar el calor residual** generado por los equipos informáticos durante su funcionamiento para producir energía útil o cubrir necesidades térmicas externas. Esta estrategia no solo mejora la eficiencia global del sistema, sino que contribuye directamente a la reducción de emisiones al evitar el uso de fuentes fósiles adicionales para calefacción o procesos industriales.

Principales estrategias de cogeneración en CPDs

- **Reutilización de calor residual en calefacción urbana (district heating):**
El calor capturado en los sistemas de refrigeración puede inyectarse en redes de calefacción de barrio, hospitales, universidades o edificios públicos, sustituyendo combustibles fósiles. Este modelo ya se aplica en países nórdicos como Dinamarca o Suecia.
- **Integración con procesos industriales locales:**
Los CPDs situados próximos a instalaciones que requieren calor de baja o media temperatura (plantas de tratamiento de agua, invernaderos, procesos alimentarios) pueden aportar calor residual, reduciendo costes y huella de carbono de la cadena de valor.
- **Generación de agua caliente sanitaria (ACS):**
La integración del calor sobrante en sistemas de ACS para edificios colindantes es una medida de rápida implantación, especialmente en entornos urbanos.
- **Conversión del calor en electricidad mediante ciclos termodinámicos (ORC – Organic Rankine Cycle):**
Tecnologías emergentes permiten transformar parte del calor residual en electricidad, aunque con rendimientos moderados, siendo más viable en instalaciones de gran escala.

Factores de éxito en la implementación

1. **Diseño integrado desde la planificación:** La recuperación de calor debe contemplarse en la fase de diseño del CPD, asegurando la proximidad física a consumidores térmicos potenciales.
2. **Análisis económico-ambiental conjunto:** La viabilidad de proyectos de cogeneración depende de la demanda térmica estable en el entorno y de un marco regulatorio favorable.
3. **Eficiencia en los sistemas de captura:** Tecnologías de refrigeración líquida o circuitos cerrados facilitan un mayor aprovechamiento del calor residual frente a los sistemas de aire.
4. **Colaboración con entidades locales:** La cooperación con ayuntamientos, empresas de servicios energéticos (ESCOs) o redes de calefacción urbana es clave para materializar proyectos a escala.

En conclusión, la cogeneración en centros de datos representa una **estrategia práctica y de impacto inmediato** dentro de la sostenibilidad energética. Permite transformar un residuo

(calor) en un recurso útil, alineándose con los principios de economía circular y con el objetivo europeo de reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Ejemplo práctico de cogeneración en CPDs

En **Estocolmo (Suecia)**, los centros de datos conectados a la red de calefacción urbana (*district heating*) gestionada por **Fortum Värme** reutilizan el calor residual para calentar miles de viviendas. Gracias a este sistema, se estima que por cada **10 MW de calor recuperado** se pueden abastecer aproximadamente **20.000 apartamentos**, reduciendo en paralelo las emisiones asociadas al uso de gas o carbón en calefacción. Este modelo se ha convertido en una referencia europea de integración de CPDs en estrategias de sostenibilidad urbana.

2.2. Resiliencia energética sostenible

La resiliencia energética en centros de datos es clave para garantizar la continuidad de servicio frente a interrupciones, fallos en el suministro eléctrico o eventos climáticos extremos. Sin embargo, las medidas de protección y recuperación deben alinearse con principios de sostenibilidad, evitando recurrir a sistemas de respaldo altamente contaminantes o ineficientes.

2.2.1. Recuperación y protección sostenible

- **Sistemas de respaldo con bajo impacto ambiental:**
Sustituir generadores diésel tradicionales por alternativas menos contaminantes, como sistemas de baterías de ion-litio o hidrógeno verde. Estos pueden proporcionar soporte inmediato en caso de corte de suministro, reduciendo la huella de carbono.
- **Integración de almacenamiento energético renovable:**
El uso de baterías asociadas a fuentes renovables (solar, eólica) permite cubrir picos de demanda y mantener operaciones críticas durante periodos de interrupción.
- **Protección ante picos y fluctuaciones de red:**
Implementar sistemas de alimentación ininterrumpida (SAIs/UPS) de alta eficiencia energética, con certificaciones europeas de ecodiseño, que limiten pérdidas energéticas en condiciones normales y garanticen continuidad en emergencias.
- **Ubicación estratégica del CPD:**
Evaluar riesgos de desastres naturales (inundaciones, olas de calor, incendios forestales) al seleccionar la localización, integrando mapas de riesgos climáticos de la **Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA)**.

2.2.2. Prácticas para la resiliencia energética

- **Diversificación del suministro energético:**
Contratar electricidad de diferentes proveedores o recurrir a PPAs (Power Purchase Agreements) con fuentes renovables, garantizando seguridad de suministro y menor exposición a volatilidad de precios.
- **Microredes y generación distribuida:**
Integrar el CPD en ecosistemas de microredes locales alimentadas por energías renovables, lo que facilita la resiliencia en caso de fallo de la red principal.
- **Diseño modular de la infraestructura:**
Implementar una arquitectura que permita aislar módulos de carga o racks específicos en caso de incidencia, manteniendo operativo el resto del CPD sin interrupción total.
- **Planes de recuperación sostenible:**
Elaborar planes de contingencia que no solo prioricen la continuidad del servicio, sino que incluyan criterios de sostenibilidad en la elección de tecnologías y recursos de emergencia.
- **Monitorización en tiempo real:**
Uso de plataformas de gestión energética que integren datos de red, consumo, almacenamiento y renovables, para anticipar fallos y redistribuir cargas automáticamente.

Procedimiento de instalación y despliegue de hardware

3. Transporte medioambientalmente responsable

El transporte de equipamiento para centros de datos, tanto en la fase de construcción inicial como en las operaciones de sustitución y mantenimiento, representa una parte significativa de las **emisiones indirectas de la cadena de valor (Alcance 3 del Protocolo GHG)**. Reducir este impacto requiere establecer criterios claros en la logística de aprovisionamiento, instalación y reposición del hardware.

Estrategias recomendadas

- **Optimización de la cadena de suministro:**
Favorecer proveedores que dispongan de centros de distribución próximos a la ubicación del CPD, reduciendo distancias de transporte y emisiones asociadas.
- **Transporte con bajas emisiones:**
Priorizar el uso de flotas de vehículos eléctricos, híbridos o alimentados con biocombustibles sostenibles para el traslado de equipos. En transporte internacional,

seleccionar compañías logísticas adheridas a programas de eficiencia energética y reducción de emisiones (ej. Noriega Grupo Logístico en España y otras empresas adheridas al programa nacional *Lean&Green*).

- **Consolidación de cargas:**
Reducir los envíos parciales mediante una planificación logística que maximice la ocupación de vehículos y contenedores, disminuyendo así el número de viajes y la huella de carbono por unidad transportada.
- **Selección de embalajes sostenibles:**
Emplear embalajes reciclables, reutilizables o de baja huella de carbono, con diseños que faciliten su retorno o reciclaje en destino. Esto reduce la generación de residuos y la necesidad de materias primas vírgenes.
- **Planificación del ciclo de vida logístico:**
Integrar la logística inversa para el retorno de equipos obsoletos y materiales reciclables, asegurando un tratamiento responsable de residuos electrónicos (RAEE) y embalajes.
- **Criterios de contratación a proveedores logísticos:**
Incluir en los pliegos de contratación requisitos de certificación ambiental (**ISO 14001 o ISO 14083 para emisiones de transporte**) y reportes periódicos de emisiones de alcance 3.

Beneficios de la aplicación

La aplicación de estas medidas permite:

1. Reducir las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero vinculadas al transporte.
2. Asegurar coherencia con los objetivos de descarbonización europeos y con las políticas de *Green Public Procurement*.
3. Mejorar la trazabilidad de emisiones de la cadena de suministro.

En definitiva, un transporte medioambientalmente responsable no solo minimiza el impacto climático del despliegue de hardware, sino que también refuerza la transparencia y la sostenibilidad de toda la cadena de valor de la infraestructura.

4. Cableado

El cableado en un centro de datos es un elemento crítico tanto para la fiabilidad como para la sostenibilidad de la infraestructura. Aunque tradicionalmente se ha considerado un aspecto secundario, su diseño, elección de materiales y disposición física tienen un impacto directo en el consumo energético, la eficiencia de refrigeración y la huella ambiental asociada a la construcción y mantenimiento del CPD.

4.1. Principios de sostenibilidad en el cableado

- **Selección de materiales de bajo impacto ambiental:** optar por cables con materiales reciclables, libres de halógenos y con baja emisión de humos, que además mejoran la seguridad en caso de incendio.
- **Estandarización y modularidad:** utilizar soluciones normalizadas (ej. ISO/IEC 11801) que permitan la interoperabilidad y faciliten la sustitución parcial en lugar de renovaciones completas.
- **Durabilidad y ciclo de vida:** escoger cables de alta calidad y resistencia mecánica que reduzcan la necesidad de reposición frecuente.

4.2. Diseño sostenible

- **Trazados optimizados:** reducir la longitud total de cableado mediante un diseño lógico de recorridos, minimizando pérdidas de señal y materiales innecesarios.
- **Segregación adecuada:** mantener separado el cableado de potencia y datos para evitar interferencias y facilitar el mantenimiento sin duplicar recursos.
- **Accesibilidad y escalabilidad:** diseñar canalizaciones y bandejas que permitan futuras expansiones sin necesidad de sustitución completa del sistema existente.
- **Impacto en la refrigeración:** evitar acumulaciones de cableado que obstaculicen el flujo de aire en pasillos fríos y calientes, lo que mejora la eficiencia térmica global.

4.3. Elección de conectores

- **Conectores modulares y reutilizables:** el uso de conectores estándar (RJ45, LC, MPO/MTP) integrados en sistemas de cableado estructurado y patch panels modulares permite sustituir únicamente los elementos afectados (latiguillos, cassettes o módulos), sin necesidad de retirar el cableado permanente. Este enfoque facilita la evolución tecnológica, reduce residuos electrónicos y minimiza el impacto ambiental y operativo asociado al recableado del CPD.

- **Certificación de eficiencia y seguridad:** priorizar conectores conformes con estándares reconocidos como ANSI/TIA-568, ANSI/TIA-942 e ISO/IEC 11801, que definen límites máximos de pérdidas por inserción y retorno, así como requisitos de durabilidad y resistencia ambiental. El cumplimiento de estos estándares asegura un rendimiento estable en el tiempo, reduce degradaciones prematuras y alarga la vida útil del cableado, diferenciando claramente estos conectores de soluciones no certificadas que carecen de garantías de rendimiento y durabilidad.
- **Reducción de metales críticos:** priorizar el uso de fibra óptica en enlaces troncales y de distribución, y limitar el empleo de cobre a tramos cortos y estrictamente necesarios. Este enfoque, junto con arquitecturas de red optimizadas y cables de mayor densidad, permite reducir significativamente la cantidad total de metales de alto impacto ambiental sin comprometer la eficiencia ni el rendimiento del centro de datos.

4.4. Optimización del cableado

- **Uso de tecnologías de alta densidad (ej. MPO/MTP):** reducen la cantidad de fibras necesarias y la ocupación de espacio.
- **Monitorización y gestión inteligente:** implementar sistemas de *intelligent cabling management* para controlar inventario, ocupación y estado de los enlaces.
- **Reutilización y reciclaje al final de la vida útil:** garantizar un sistema de logística inversa para reaprovechamiento de materiales.
- **Preparación para futuras tecnologías:** elegir categorías de cableado y conectores compatibles con velocidades emergentes (400G, 800G) que alarguen la vida útil de la infraestructura.

5. Despliegue del hardware

5.1. Distribución física de servidores

La distribución física del hardware dentro de un centro de datos no es un aspecto meramente técnico: tiene un impacto directo en la eficiencia energética, en los costes operativos y en la sostenibilidad ambiental del conjunto de la infraestructura. Un diseño adecuado permite optimizar el uso del espacio, reducir el consumo asociado a refrigeración y prolongar la vida útil de los equipos.

5.1.1. Principios para una distribución eficiente de racks y servidores

1. **Pasillos fríos y calientes:** organizar los racks de manera que las entradas de aire frío y salidas de aire caliente estén claramente separadas, evitando recirculaciones. Esta práctica es recomendada por la European Code of Conduct for Data Centres Energy Efficiency (Comisión Europea).
En la práctica, se implementa orientando todos los racks de una misma fila en la misma dirección (frentes enfrentados y traseras enfrentadas), definiendo desde el diseño inicial qué pasillos son de impulsión y cuáles de retorno, alineando las rejillas de suelo o puntos de impulsión exclusivamente con los pasillos fríos y validando la configuración mediante mediciones térmicas tras la instalación.
2. **Aislamiento físico:** emplear cerramientos en los pasillos para controlar mejor los flujos de aire y reducir la necesidad de climatización adicional.
Esto se lleva a la práctica mediante la instalación de cerramientos específicos en pasillos fríos o calientes (puertas, techos y paneles laterales), el uso sistemático de paneles ciegos en huecos libres de los racks y la integración de estos elementos con el sistema de climatización para reducir caudales y consumo energético.
3. **Densidad equilibrada:** distribuir la carga de servidores evitando concentraciones excesivas que generen puntos calientes y demanden más refrigeración localizada. Para ello, se definen límites máximos de potencia por rack en fase de diseño, se distribuyen las cargas de alta densidad de forma homogénea y se monitorizan temperatura y consumo para detectar y corregir desequilibrios operativos.
4. **Escalabilidad modular:** planificar la sala en módulos escalables que permitan ampliar capacidad sin rediseñar por completo la infraestructura.
Este principio se aplica diseñando la sala por bloques repetibles de racks, reservando capacidad eléctrica y de refrigeración para crecimiento futuro y evitando layouts rígidos que obliguen a redistribuciones completas en cada ampliación.

5.1.2. Optimización del flujo de aire y accesibilidad para mantenimiento

- **Bandejas y cableado ordenado:** un diseño limpio de canalizaciones evita obstrucciones en el flujo de aire y mejora la eficiencia de refrigeración.
En la práctica, se logra separando las rutas de cableado de datos y potencia, utilizando bandejas elevadas o laterales que no interfieran con el flujo frontal–trasero del aire y retirando cableado obsoleto durante tareas de mantenimiento.
- **Espacio libre alrededor de los racks:** mantener pasillos de ancho suficiente no solo favorece el movimiento de técnicos, sino que también permite una distribución homogénea de temperatura.
Esto implica definir anchos mínimos de pasillo desde el diseño, evitar el

almacenamiento de material en zonas de circulación y mantener despejadas las áreas de impulsión y retorno de aire.

- **Accesibilidad segura:** priorizar diseños que permitan intervenir en equipos sin interrumpir el flujo de aire ni el suministro eléctrico, reduciendo riesgos operativos. Se aplica garantizando accesos completos frontal y trasero a los racks, ubicando PDU y elementos críticos fuera de los flujos de aire y estableciendo procedimientos de mantenimiento que no requieran desmontajes que alteren la ventilación.
- **Uso de suelos técnicos perforados y paneles ciegos:** canalizan el aire frío directamente a los equipos y bloquean zonas sin uso para evitar fugas. En la práctica, se colocan losetas perforadas únicamente en pasillos fríos y se dimensionan según el caudal requerido, se sellan aperturas no utilizadas del suelo técnico y se instalan paneles ciegos en racks y zonas sin equipamiento.

5.1.3. Impacto de la distribución física en el consumo energético y la refrigeración

- Una **distribución ineficiente** puede incrementar hasta un **30 % el consumo energético en climatización**, según datos de la *Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA)*.
- **Diseños optimizados** permiten reducir la dependencia de sistemas de climatización mecánica, favoreciendo estrategias de *free cooling* en regiones frías.
- La correcta disposición de racks influye en la **eficiencia del PUE (Power Usage Effectiveness)**: un PUE bajo (cercano a 1,2) es alcanzable cuando la distribución física está bien planificada.
- Evitar puntos calientes contribuye a alargar la vida útil de los servidores, reduciendo la necesidad de reemplazos y, con ello, la huella de carbono asociada a la fabricación de nuevo hardware.

5.1.4. Criterios para minimizar la huella ambiental en el espacio físico

- **Uso eficiente del espacio construido:** diseñar CPDs compactos, evitando sobreconstrucción y maximizando la densidad de racks dentro de los límites de eficiencia térmica.
- **Flexibilidad de reutilización:** planificar infraestructuras que puedan ser reconvertidas para otros usos tecnológicos cuando queden obsoletas, reduciendo la necesidad de nuevas construcciones.
- **Materiales sostenibles en la infraestructura:** integrar mobiliario y soportes fabricados con materiales reciclados o de bajo impacto ambiental.
- **Optimización del ciclo de vida:** considerar no solo la fase de uso, sino también la fase de construcción y desmantelamiento, aplicando principios de economía circular.

5.2. Sistemas de refrigeración

El diseño y operación de los sistemas de refrigeración en un centro de datos representa uno de los principales determinantes de su eficiencia energética y huella ambiental. Según la **Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2022)**, hasta un **40 % del consumo eléctrico de un CPD puede destinarse a refrigeración**, lo que convierte a este aspecto en un área crítica de intervención sostenible.

La transición hacia **sistemas de refrigeración de bajo impacto ambiental** no solo reduce costes operativos, sino que contribuye al cumplimiento de los objetivos europeos de neutralidad climática y de gestión eficiente de recursos.

5.2.1. Alternativas con bajo impacto ambiental

- **Refrigeración líquida de alta eficiencia (direct-to-chip, inmersión o microcanales):** disipa el calor más eficazmente que el aire y permite densidades de computación más elevadas con menor consumo eléctrico.
- **Free cooling y economizadores de aire:** aprovechan las condiciones ambientales frías para reducir o eliminar la necesidad de sistemas mecánicos de climatización.
- **Sistemas híbridos (aire + líquido):** permiten transicionar progresivamente hacia refrigeración más eficiente, reduciendo riesgos operativos.
- **Uso de refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP):** alineado con el **Reglamento (UE) 517/2014 sobre gases fluorados**, que busca la reducción progresiva de HFCs.

5.2.2. Gestión eficiente del uso del agua en refrigeración

- **Sistemas cerrados de recirculación:** limitan el consumo de agua mediante la reutilización continua, evitando pérdidas por evaporación.
- **Uso de agua reciclada o no potable:** siempre que sea posible, priorizar agua regenerada para minimizar la presión sobre recursos hídricos locales.
- **Indicadores de eficiencia hídrica (WUE – Water Usage Effectiveness):** integrar métricas de uso de agua en los informes de sostenibilidad del CPD.
- **Monitorización avanzada:** aplicar sensores para medir fugas, consumo y calidad del agua, garantizando eficiencia y reducción de riesgos.

5.2.3. Reducción del consumo energético en climatización

- **Ventilación inteligente y dinámica:** ajustar el flujo de aire en función de la temperatura y la carga de trabajo mediante sistemas de control automático.

- **Optimización de la distribución térmica:** uso de pasillos fríos y calientes cerrados, junto con paneles ciegos, para minimizar recirculaciones.
- **Integración de energías renovables en la alimentación de sistemas de refrigeración:** ejemplo: bombas de calor alimentadas con electricidad verde.
- **Mantenimiento predictivo:** detectar ineficiencias en ventiladores, bombas y chillers mediante analítica avanzada.

5.3. Mantenimiento y reparación de componentes

El mantenimiento y la reparación de hardware en centros de datos son elementos clave para extender la vida útil de los equipos, reducir la generación de residuos electrónicos (*e-waste*) y optimizar el uso de recursos. La Comisión Europea estima que **el 70 % del impacto ambiental de los equipos TIC se produce en su fabricación**; por tanto, prolongar su ciclo de vida mediante estrategias de mantenimiento preventivo y reparación contribuye de forma decisiva a la sostenibilidad.

Principios de un mantenimiento sostenible

- **Mantenimiento preventivo y predictivo:** mediante sensores IoT y analítica avanzada, es posible anticipar fallos y reemplazar únicamente los componentes afectados, evitando sustituciones completas de equipos.
- **Gestión documental y trazabilidad:** implementar registros digitales de mantenimiento que garanticen el cumplimiento de normativas ambientales y faciliten auditorías.
- **Contratos de servicio sostenibles:** exigir a proveedores cláusulas que prioricen reparación frente a sustitución y que incluyan compromisos de reutilización de piezas.

Estrategias de reparación y prolongación de vida útil

- **Reparación modular:** elegir equipos con diseño modular que permita sustituir tarjetas, discos o memorias de manera independiente.
- **Uso de piezas reacondicionadas y certificadas:** fomenta la economía circular y reduce la necesidad de fabricar nuevos componentes.
- **Estandarización y compatibilidad:** optar por hardware que cumpla estándares internacionales de interoperabilidad, reduciendo la obsolescencia prematura.

Gestión sostenible al final de la vida útil

- **Logística inversa:** establecer acuerdos con proveedores para la recogida de equipos obsoletos y su envío a plantas de reacondicionamiento o reciclaje.
- **Reciclaje certificado:** cumplir con la **Directiva RAEE (2012/19/UE)** para la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, asegurando la recuperación de metales críticos como cobre, cobalto o tierras raras.
- **Reportes de circularidad:** incorporar métricas sobre equipos reparados, reacondicionados y reciclados en los informes de sostenibilidad del CPD.

Beneficios de la aplicación

- Disminución significativa de residuos electrónicos.
- Reducción de emisiones asociadas a la fabricación y transporte de nuevos equipos.
- Optimización de la inversión económica al extender el ciclo de vida del hardware.
- Cumplimiento con la estrategia de economía circular de la Unión Europea.

5.4. Evaluación y criterios de selección del hardware

La selección de hardware constituye una de las decisiones más críticas en el ciclo de vida de un centro de datos, ya que condiciona tanto su eficiencia energética como su impacto ambiental global. La evaluación debe realizarse de manera sistemática, considerando indicadores ambientales, criterios de eficiencia y aspectos específicos de cada componente.

5.4.1. Evaluación de impacto ambiental

- **Análisis de Ciclo de Vida (LCA – Life Cycle Assessment):** aplicar metodologías normalizadas (ISO 14040/44, UNE-EN 45554 sobre reparabilidad) para evaluar el impacto ambiental desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida útil.
- **Indicadores ambientales clave:**
 - Consumo energético total (directo e indirecto).
 - Emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación y transporte.
 - Consumo de agua y uso de recursos minerales críticos (cobalto, litio, tierras raras).
- **Huella ambiental europea (Product Environmental Footprint, PEF):** método recomendado por la Comisión Europea para garantizar comparabilidad en la evaluación de productos TIC.

- **Cumplimiento normativo:** verificación de directivas RAEE (2012/19/UE) y RoHS (2011/65/UE) para garantizar que los equipos cumplen con las restricciones en el uso de sustancias peligrosas y la correcta gestión de residuos.

5.4.2. Procedimiento y criterios comunes de selección

- **Eficiencia energética certificada:** optar por equipos con certificaciones como *Energy Star for Servers* o adheridas al Reglamento (UE) 2019/424.
- **Reparabilidad y modularidad:** priorizar hardware que facilite la sustitución de componentes individuales (RAM, discos, fuentes de alimentación) sin reemplazar el sistema completo.
- **Durabilidad y garantías ampliadas:** exigir a fabricantes compromisos contractuales que aseguren soporte y actualizaciones durante ciclos más largos.
- **Compatibilidad y estandarización:** Se recomienda favorecer equipos que cumplan **estándares internacionales abiertos** (por ejemplo, Open Compute Project, NVMe, SATA, PCIe, SNIA SMI-S, IEEE 802.3) para mejorar la interoperabilidad entre distintos fabricantes. Esto **reduce riesgos de obsolescencia prematura** y facilita la integración y actualización de sistemas, aunque no elimina por completo la obsolescencia, ya que otros factores tecnológicos y de fabricante también influyen.

5.4.3. Otros criterios relativos a especificidades de los distintos componentes

- **Procesadores:** seleccionar CPUs y GPUs optimizadas para eficiencia energética en IA (*performance per watt*), con soporte para escalabilidad modular y funciones de gestión avanzada de energía.
- **Memoria RAM:** preferir módulos con bajo consumo (ej. DDR5 con gestión avanzada de energía), y priorizar densidades que reduzcan el número de módulos necesarios.
- **Almacenamiento:** Usar HDD para almacenamiento masivo de datos a los que se accede con poca frecuencia (archivos fríos, backups), y SSD cuando se necesita alto rendimiento, baja latencia y operaciones frecuentes de lectura/escritura, así como sistemas de almacenamiento jerárquico para optimizar accesos.
- **Sistemas de refrigeración integrados:** se recomienda el uso de disipadores pasivos eficientes y racks preparados para tecnologías de refrigeración líquida de bajo impacto (como rear-door heat exchanger o cold plates). La compatibilidad se determina revisando las especificaciones del hardware y del sistema de refrigeración, asegurando que temperaturas, flujo de aire y presión del líquido cumplen con los requisitos operativos y de eficiencia energética.

- **Otros periféricos (fuentes de alimentación, cableado interno, etc.):** exigir certificaciones de eficiencia (ej. 80 PLUS Titanium en fuentes de alimentación) y materiales con bajo impacto ambiental.

Este marco metodológico garantiza una selección de hardware coherente con los principios de *Green by Design*, incorporando tanto criterios de impacto ambiental general como aspectos técnicos específicos. De este modo, se asegura que la infraestructura de IA se despliegue bajo un enfoque sostenible, alineado con la normativa europea y los compromisos de neutralidad climática.